

Universidad de Huelva

Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas
Informáticos y Automática



Contribuciones a la Educación en Ingeniería. Identificación de retos y propuesta de soluciones

Memoria para optar al grado de doctora
presentada por:

Macarena Martínez Luna

Fecha de lectura: 16 de octubre de 2023

Bajo la dirección de los doctores:

José Manuel Andújar Márquez

Francisca Segura Manzano

Huelva, 2023



UNIVERSIDAD DE HUELVA

**Programa de Doctorado de Ciencia y Tecnología
Industrial y Ambiental**

Línea de Investigación

**Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Control y
Robótica**



**Contribuciones a la Educación en Ingeniería.
Identificación de retos y propuesta de soluciones**

Tesis Doctoral

Macarena Martínez Luna

Huelva, 2023

Directores:

Dr. José Manuel Andújar Márquez

Dra. Francisca Segura Manzano

D. José Manuel Andújar Márquez, Catedrático de Universidad de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva,

Dña. Francisca Segura Manzano, Profesora Titular de Universidad de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva,

CERTIFICAN:

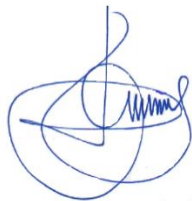
Que Dña. Macarena Martínez Luna, Ingeniera Industrial por la Universidad de Huelva, ha realizado bajo nuestra dirección y dentro del programa de doctorado de Ciencia y Tecnología Industrial y Ambiental (CyTIA) y en la línea de investigación de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Control y Robótica el trabajo correspondiente a su Tesis Doctoral titulada:

Contribuciones a la Educación en Ingeniería. Identificación de retos y propuesta de soluciones

Revisado el presente trabajo, estimamos que puede ser presentado al Tribunal que ha de juzgarlo.

Y para que así conste a efectos de lo establecido Real Decreto 99/2011 y por la normativa Reguladora del título de Doctor de la Universidad de Huelva, autorizamos la presentación de este trabajo en la Universidad de Huelva.

Huelva, a 14 de Julio de 2023



Director: Dr. José Manuel Andújar Márquez



Directora: Dra. Francisca Segura Manzano



Doctoranda: Dña. Macarena Martínez Luna

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores de Tesis, Dr. José Manuel Andújar y, especialmente, a la Dra. Francisca Segura, por animarme a embarcarme en esta aventura y todo lo que ha conllevado su realización. Por enseñarme lo que es la ayuda, la entrega y la perseverancia, por los consejos, la paciencia, la confianza y la pasión por esta profesión que todavía no está bien reconocida.

A todos mis compañeros, los que están y ya no, del Grupo de Investigación de Control y Robótica TEP-192 y del Centro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad (CITES), por haberme ayudado en todo lo que siempre he necesitado.

Dedicar este trabajo a las personas que han sido fundamentales en mi camino académico es un honor y un privilegio. Han sido mis compañeros de viaje, mis guías, mis mentores y mis amigos. Su apoyo incondicional, su paciencia y su motivación han sido la fuerza impulsora detrás de cada paso que he dado en esta larga travesía.

A mis padres, especialmente a mi madre, por su amor y apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos, y por creer en mí incluso cuando ni yo misma lo hacía. Por celebrar mis logros como si fueran suyos, y por enseñarme a no infravalorar nunca todo el trabajo, esfuerzo y sacrificio dedicado. A mi padre, por acercarme desde pequeña a la ingeniería y haberme transmitido su pasión por aprender el funcionamiento de las cosas, y para tener autonomía y herramientas para arreglarlas. Y, finalmente, por guiarme y aconsejarme en esta profesión.

A mis abuelas, mis segundas madres desde que soy pequeña, por estar siempre en los momentos importantes de mi vida y por vuestro inquebrantable apoyo, nunca voy a poder devolver todo lo que habéis hecho por mí, todo lo que me habéis dado. Soy la persona más afortunada del mundo por teneros como abuelas.

Este trabajo es también para ustedes. Espero que mi investigación pueda contribuir de alguna manera al progreso y al bienestar de nuestra sociedad. Me siento agradecida por tener la oportunidad de dedicar mi tesis doctoral a las personas que han sido la luz en mi camino.

“La paciencia y perseverancia tienen un efecto mágico ante el que las dificultades desaparecen y los obstáculos se desvanecen”

John Quincy Adams

Índice de Contenido

Índice de Contenido.....	VII
Índice de Figuras.....	XI
Índice de Tablas	XV
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Planteamiento General de la Tesis. Objetivos	3
1.2 Resumen de la Tesis	5
1.3 Innovaciones que aporta la Tesis.....	7
1.4 Proyectos de investigación que financian la tesis	11
1.5 Resultados de investigación derivados de la tesis.....	11
Capítulo 2. Estudio experimental interregional y transgeneracional para identificar la baja presencia de mujeres. Análisis de la brecha de género en las carreras STEM	19
2.1 Introducción.....	21
2.2 Materiales y Métodos.....	30
2.2.1 Enfoque ALAS: Fundamento y Metodología	30
2.2.2 Estadística inferencial: Prueba de fiabilidad y coherencia	34
2.3 Resultados.....	35
2.3.1 Educación Primaria y Educación Secundaria.....	36
2.3.2 Universidad.....	46
2.3.3 Graduados Universitarios.....	53
2.3.4 Empresa / Industria	56
2.4 Discusión.....	57
2.5 Conclusiones.....	60
Capítulo 3. El reto de la transición digital en la educación en ingeniería. Una solución a partir de una red colaborativa europea de laboratorios remotos basados en tecnologías de energías renovables.....	63
3.1 Introducción.....	65
3.2 Antecedentes científicos. Trabajos relacionados.....	68
3.3 Materiales y método.....	72
3.3.1 Enfoque RE-OPEN: Contexto y distribución de tareas	72

3.3.2 Laboratorio remoto normalizado: un ejemplo basado en un banco de supercondensadores	76
3.4 Resultados y Discusión	85
3.4.1 Encuesta de expectativas.....	85
3.4.2 Encuesta de autoevaluación.....	87
3.4.3 Encuesta de satisfacción	88
3.5 Conclusiones.....	90
Capítulo 4. Una aplicación real de hidrógeno como energía renovable. Sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno para el transporte y la distribución en la cadena alimentaria	93
4.1 Introducción.....	96
4.2 Materiales y métodos	102
4.2.1 Diseño y dimensionamiento	102
4.2.2 Desarrollo	111
4.2.3 Sistema de gestión de la energía.....	115
4.3 Implementación y Resultados Experimentales.....	123
4.4 Discusión.....	127
4.5 Conclusiones.....	134
Capítulo 5. Conclusiones y Desarrollos Futuros	137
5.1 Conclusiones.....	137
5.2 Desarrollos futuros.....	141
Referencias Bibliográficas.....	143
ANEXO I. Resultados de investigación derivados del objetivo 1	151
ANEXO I.A	151
ANEXO I.B.....	153
ANEXO I.C	159
ANEXO I.D	161
ANEXO I.E.....	167
ANEXO I.F	169
ANEXO II. Resultados de investigación derivados del objetivo 2.....	207
ANEXO II.A.....	207
ANEXO II.B	209

ANEXO II.C.....	215
ANEXO II.D.....	217
ANEXO II.E	225
ANEXO III. Resultados de investigación derivados del objetivo 3	249
ANEXO III.A	249
ANEXO III.B.....	251
ANEXO III.C.....	259
ANEXO IV. Estudio inferencial	283
ANEXO IV.A. Análisis de los indicadores de validez convergente y discriminante de las variables cuantitativas	283
ANEXO IV.B. Análisis de frecuencias	286
ANEXO IV.C. Prueba de Chi-cuadrado	288

Índice de Figuras

Figura 2. 1. Proporción de mujeres graduadas en educación terciaria en la UE clasificadas por disciplinas.	22
Figura 2. 2. Proporción de mujeres graduadas en educación terciaria en España clasificadas por disciplinas.	22
Figura 2. 3. Historial de nuevas matriculaciones. Ingeniería Electrónica Industrial, Ingeniería Informática e Ingeniería Mecánica Industrial en la UHU.	24
Figura 2. 4. Ilustración de las cinco etapas del ciclo vital en las que se basa el estudio del proyecto ALAS.....	30
Figura 2. 5. Ubicación geográfica de los centros educativos visitados durante la ejecución del proyecto ALAS.....	31
Figura 2. 6. Metodología ALAS: Base multimodelo utilizada para definir las encuestas.	33
Figura 2. 7. Taller participativo de Química.....	34
Figura 2. 8. Talleres participativos basados en Energías Renovables y Electrónica Industrial.....	34
Figura 2. 9. Indicador cuantitativo de impacto. Grupos destinatarios y alcance real.....	36
Figura 2. 10. Educación primaria. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro.	37
Figura 2. 11. Educación primaria. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 2) Teoría del Rol Social	38
Figura 2. 12. Educación primaria. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 3) Teoría de los Estereotipos de Género.	39
Figura 2. 13. Educación secundaria. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro	41
Figura 2. 14. Educación secundaria. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 2) Teoría del Rol Social	42
Figura 2. 15. Educación secundaria. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género	44
Figura 2. 16. Respuestas del profesorado de primaria y secundaria sobre el entorno educativo.	45
Figura 2. 17. Respuestas del profesorado de primaria y secundaria sobre el grado de preocupación sobre la escasa participación de las alumnas en el campo de la ciencia y la tecnología.....	46

Figura 2. 18. Alumnado universitario. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro ..	48
Figura 2. 19. Alumnado universitario. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 2) Teoría del Rol Social	49
Figura 2. 20. Alumnado universitario. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género	50
Figura 2. 21. Alumnado universitario. Pregunta adicional sobre el impacto que podría tener en la sociedad el bajo porcentaje de mujeres matriculadas en carreras STEM.	51
Figura 2. 22. Profesorado universitario. Pregunta adicional sobre el uso del lenguaje inclusivo en el aula	52
Figura 2. 23. Graduados universitarios. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro ..	53
Figura 2. 24. Graduados universitarios. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 2) Teoría del Rol Social	55
Figura 2. 25. Graduados universitarios. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género	56
Figura 2. 26. Empresa / industria. Respuestas a las preguntas sobre el campo STEM y la igualdad de género que existe en la empresa.....	57
Figura 3. 1. Tipos de laboratorios: (a) laboratorio virtual con acceso local; (b) laboratorio virtual con acceso remoto; (c) laboratorio real con acceso local; (d) laboratorio real con acceso remoto.	67
Figura 3. 2. Productos intelectuales de cada universidad europea.	73
Figura 3. 3. Respuestas de las encuestas: (a) Respuestas a la encuesta de profesores; (b) Respuestas a la encuesta de estudiantes; (c) Respuestas a la encuesta del sector industrial.....	74
Figura 3. 4. Nivel de satisfacción con las prácticas de laboratorio. Resultados de encuestas a profesores, estudiantes y personal técnico.	74
Figura 3. 5. Estandarización de infraestructuras TIC y diseño colaborativo de redes del proyecto RE-OPEN.....	76
Figura 3. 6. Laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores. Distribución de los componentes.....	77
Figura 3. 7. Laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores. Disposición eléctrica.	78
Figura 3. 8. Implementación física del laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores: (a) proceso de carga; (b) proceso de descarga. .	79

Figura 3. 9. Sistema de Gestión del Aprendizaje (LMS) de la plataforma RE-OPEN.	80
Figura 3. 10. Proceso de autenticación en la plataforma RE-OPEN.....	81
Figura 3. 11. Plataforma LMS del proyecto RE-OPEN.....	82
Figura 3. 12. Interfaz de usuario del laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores: proceso de carga.....	83
Figura 3. 13. Segunda ventana de la interfaz de usuario. Gráfico de carga y descarga del banco de supercondensadores.....	84
Figura 3. 14. Interfaz de usuario del laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores: proceso de descarga.....	85
Figura 4. 1. Arquitectura del sistema de refrigeración por hidrógeno integrado en el vehículo.	103
Figura 4. 2. Convertidor elevador CC/CC intercalado.....	107
Figura 4. 3. Convertidor elevador CC/CC	108
Figura 4. 4. Sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno. Distribución de los componentes.....	112
Figura 4. 5. Sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno. Interoperabilidad batería/pila de combustible.	116
Figura 4. 6. Sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno. Diagrama lógico de control.....	117
Figura 4. 7. Principio de funcionamiento del algoritmo de perturbación y observación modificado.....	118
Figura 4. 8. Comportamiento de la pila de combustible.....	120
Figura 4. 9. Algoritmo P&OM desarrollado para seguir el MPP de la pila de combustible.....	122
Figura 4. 10. Diagrama esquemático del conjunto de PEMFC y convertidor CC/CC con P&OM.	123
Figura 4. 11. (a) Detalle del camión frigorífico ligero; (b) Sistema de refrigeración eléctrico; (c) Nevera isotérmica.	124
Figura 4. 12. Distribución y montaje final del sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno desarrollado en el vehículo.....	125
Figura 4. 13. Circuito cerrado al tráfico utilizado para la prueba experimental.....	126
Figura 4. 14. Estados operativos del sistema HPRS durante la prueba experimental.....	126

Figura 4. 15. Potencia de la batería (PBat), potencia del convertidor CC/CA (PDCAC), potencia del equipo auxiliar (Paux) y potencia del convertidor CC/CC (PDCDC) durante la prueba experimental.	128
Figura 4. 16. Voltaje del bus de CC y corriente de la batería durante la prueba experimental.	129
Figura 4. 17. SOC de la batería y nivel de hidrógeno (H ₂) durante la prueba experimental.	130
Figura 4. 18. Perfil de voltaje y corriente de la PEMFC (VFC e IFC respectivamente), así como el punto de consigna de voltaje (VFC_SP) según la ley de control P&OM.	131
Figura 4. 19. Perfil de potencia de la PEMFC (PFC) y punto de consigna de potencia (PFC_SP) según la ley de control P&OM y la temperatura ambiente en el entorno de la PEMFC (T _{amb}).	132

Índice de Tablas

Tabla 2. 1. Las profesiones STEM entre las 20 vacantes con mayor cuello de botella a nivel europeo.....	25
Tabla 2. 2. Contribución de la investigación con respecto a trabajos científicos relacionados.....	29
Tabla 2. 3. Entorno educativo en Educación Primaria.....	40
Tabla 2. 4. Entorno educativo en Educación Secundaria.....	44
Tabla 2. 5. Razones que guiaron la elección del itinerario curricular.....	52
Tabla 3. 1. Comparación del diseño y la aplicación de los laboratorios remotos en la literatura.....	71
Tabla 3. 2. Banco de supercondensadores. Especificaciones de los componentes.....	78
Tabla 3. 3. Especificaciones impuestas al sistema basado en un banco de supercondensadores.	79
Tabla 3. 4. Respuestas de los estudiantes a la encuesta sobre expectativas.	86
Tabla 3. 5. Respuestas de los profesores a la encuesta sobre expectativas.	86
Tabla 3. 6. Respuestas de los estudiantes a la encuesta de autoevaluación.	87
Tabla 3. 7. Utilidad de los laboratorios remotos según los estudiantes y los profesores.....	88
Tabla 3. 8. Usabilidad percibida por estudiantes y profesores.	89
Tabla 4. 1. Comparación de las aportaciones del trabajo de investigación con respecto a la bibliografía revisada.	101
Tabla 4. 2. Principales características técnicas de los componentes del sistema de refrigeración por hidrógeno.	114
Tabla 4. 3. Valores característicos y límites de funcionamiento del sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno.....	117



Capítulo 1. Introducción

UNIVERSIDAD DE HUELVA
Programa de Doctorado de Ciencia y Tecnología
Industrial y Ambiental

Línea de Investigación
Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Control y
Robótica



Contribuciones a la Educación en Ingeniería.
Identificación de retos y propuesta de soluciones

Tesis Doctoral
María Jesús Martínez Lanza
Huelva, 2023

Directores:
Dr. José Manuel Antón Márquez
Dra. Francisca Segura Marcano

Palabras clave	Resumen
Fases de la tesis	<p>En este primer capítulo de Tesis se describen los objetivos abordados gracias a los proyectos que han permitido su desarrollo e implementación, lo que ha desembocado en diversas aportaciones de investigación. Seguidamente, se presenta un resumen de la Tesis por capítulos y se exponen las características más importantes de cada uno de ellos. También se presentan las innovaciones de la Tesis, dando una justificación para dirigir los futuros trabajos en la dirección de estas líneas de investigación propuestas. Y, por último, uno de los puntos más importantes de esta Tesis es mostrar la aportación científica en las diferentes publicaciones en Revistas Científicas y Congresos Internacionales en los que se han presentado los trabajos de investigación.</p>
Resumen de la Tesis	
Innovaciones aportadas por la Tesis	
Aportación científica de la Tesis	

1.1 Planteamiento General de la Tesis. Objetivos

Esta Tesis no se concibe como un trabajo aislado, sino que dentro del Grupo de Investigación TEP-192, concretamente el llevado a cabo en el Centro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad (CITES), forma parte del conjunto de Tesis que se están realizando simultáneamente y que se centran en proponer nuevas aportaciones al método de enseñanza – aprendizaje, concretamente en el ámbito STEM. Los nombres de los proyectos I+D+i que financian parcialmente esta tesis son tres:

- 15/3ACT/21 ALAS: Accompanying Girls Towards Stem Careers.
- REOPEN Erasmus + 2020-1-IT02-KA226-HE-095424, titulado “RE-OPEN Remote labOratories for Practical Experiments on energies at EU uNiversities”.
- 68/83: SHAKY- Desarrollo prototipo.

Dentro de las tareas de estos proyectos de investigación mencionados anteriormente, esta Tesis tiene como objetivo el estudio, desarrollo e implementación de nuevas metodologías en el proceso de enseñanza – aprendizaje dentro del ámbito STEM. En los últimos años se ha observado que, en el ámbito científico - tecnológico, la presencia de la mujer es cada vez menor, ocasionando una brecha de género cada vez más palpable tanto profesional como académicamente. Por este motivo, el primer objetivo de esta Tesis es la realización de un estudio para averiguar las posibles causas de esta baja presencia femenina. Esta primera premisa se encuentra financiada por el proyecto de I+D+i 15/3ACT/21 ALAS: Accompanying Girls Towards Stem Careers.

Seguidamente, la segunda parte de la Tesis profundiza más en el ámbito STEM. Desde la llegada del COVID-19 en el año 2020, el método de enseñanza – aprendizaje ha sufrido diversos cambios y ha tenido que adaptarse a esta nueva situación. Como consecuencia de lo anterior, el segundo objetivo de esta Tesis es una propuesta educativa basada en la implementación de un laboratorio remoto en la Universidad de Huelva para que pueda ser utilizado por el alumnado en las prácticas de laboratorio. Este laboratorio remoto se adapta a los nuevos tiempos, donde se está presenciando el auge de nuevas fuentes de energías renovables. Es por ello, que adaptándose a este nuevo cambio de enseñanza - aprendizaje, e incluyendo esta transición con nuevas fuentes de energía, el laboratorio remoto está basado en el uso de energías renovables. Esta segunda premisa se encuentra financiada por el proyecto de I+D+i REOPEN Erasmus + 2020-1-IT02-KA226-HE-095424, titulado “RE-OPEN Remote labOratories for Practical Experiments on energies at EU uNiversities”.

Finalmente, la última parte de la Tesis se centra en la formación práctica *in situ* del alumnado. Una vez que el alumnado ha tenido la oportunidad de experimentar y aprender sobre energías renovables a través de los laboratorios

remotos, falta que vean la implementación práctica en la vida real de estos. Por este motivo, el objetivo de esta tercera parte de la Tesis es que el alumnado pueda llevar a la práctica los conocimientos teóricos y técnicos adquiridos previamente. Por consiguiente, el alumnado se encargará de la sustitución del sistema de refrigeración de una furgoneta ligera dedica al transporte de alimentos. Este sistema de refrigeración se encarga de la conservación de los alimentos perecederos, y, además, el problema se origina con la alimentación de este tipo de equipos, que suele ser con diésel. Por este motivo, la alimentación diésel es sustituida por hidrógeno verde. Considerando el uso del hidrógeno como vector energético, en esta aplicación práctica el alumnado puede ver la conversión del hidrógeno en energía eléctrica mediante el uso de una pila de combustible, así como su almacenamiento en depósitos. Esta tercera premisa se encuentra financiada por el proyecto de I+D+i 68/83: SHAKY- Desarrollo prototipo.

El Capítulo 2 comienza con una revisión de los datos estadísticos que demuestran la baja participación y presencia de las mujeres en las carreras científico – tecnológicas. Además, se realiza otra revisión sobre la literatura científica sobre diversos estudios realizados que han intentado dar una explicación a esta baja participación femenina en este ámbito. Seguidamente, se presenta el estudio que se ha realizado en la Universidad de Huelva, donde se ha intentado buscar las posibles causas y soluciones de esta escasa presencia femenina, y acercar la ingeniería a la educación primaria y secundaria con la figura predominante de varias mujeres, las cuales han impartido diversos talleres. Este estudio abarca desde educación primaria hasta la incursión en los primeros años de trabajo tras la educación universitaria. Para poder llevar a cabo el estudio, ha sido necesario un método de análisis para estos grupos objetivo. El método de análisis seleccionado fue una encuesta adaptada a cada grupo objetivo, cuyos datos fueron posteriormente analizados.

Una vez realizado el estudio para conocer los motivos de esta brecha de género y cómo puede repercutir en el método de enseñanza – aprendizaje, se observa que, a nivel educativo, las prácticas de las enseñanzas del ámbito científico – tecnológico, desde el 2020, han tenido graves problemas para poder llevar a cabo su impartición. En esta línea, se desarrolla en el Capítulo 3 la implementación de una nueva metodología educativa capaz de acercar los laboratorios de prácticas al alumnado. Esta nueva metodología tiene que ser capaz de adaptarse a esta nueva era digital que se encuentra en auge, pero también a las actuales demandas que la Unión Europea (UE) está realizando con respecto a las nuevas fuentes de energías renovables. Para abarcar ambos desafíos, la Universidad de Huelva ha llevado a cabo la implementación de un laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores. Además, este laboratorio remoto no está aislado, sino que forma parte de una infraestructura estandarizada compuesta de cinco universidades europeas, todas ellas accesibles a través de Moodle.

Todos estos conocimientos sobre energías renovables adquiridos gracias a la infraestructura europea estandarizada de laboratorios remotos, pueden ser aplicados a la vida diaria. En el Capítulo 4 se desarrolla para el alumnado una aplicación directa de los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos sobre energías renovables. Esta aplicación directa será alimentar con tecnologías de hidrógeno verde el sistema de refrigeración de una furgoneta de reparto de alimentos perecederos, sustituyendo la anterior fuente de alimentación que era de combustible diésel. La desaparición del combustible diésel es una de las implementaciones que la UE tiene como objetivo para 2035.

Finalmente, la memoria de Tesis recoge un último capítulo donde se exponen las conclusiones recogidas en los capítulos anteriores, resultado de los diferentes trabajos de investigación, e incluye los futuros trabajos que se espera que surjan de la investigación realizada.

1.2 Resumen de la Tesis

Esta memoria está organizada en 5 capítulos de acuerdo a la siguiente distribución: en el *“Capítulo 1. Introducción”*, se realiza una descripción de la estructura de la Tesis comentando brevemente el objetivo y aportación de cada uno de los capítulos, se presentan los proyectos que han respaldado y financiado esta memoria de Tesis, así como el rendimiento científico que hasta la fecha ha producido el trabajo realizado en esta Tesis.

El *“Capítulo 2. Estudio experimental interregional y transgeneracional. Análisis de la brecha de género en las carreras STEM”*, comienza con una línea cronológica sobre la evolución de la participación de mujeres graduadas en enseñanzas superiores clasificadas por disciplinas tanto en la UE como en España.

Esta línea cronológica muestra la baja participación de las mujeres en el ámbito STEM desde el año 2014 hasta el 2020, no llegando a superar el 34% en la UE y el 29% en España. De igual forma, otra gráfica, esta vez de la Universidad de Huelva, muestra el número de mujeres matriculadas en las carreras de Ingeniería Electrónica Industrial, Ingeniería Mecánica Industrial e Ingeniería Informática. Esta gráfica, al igual que las anteriores, muestra que el número de mujeres matriculadas en estas tres ingenierías no ha sido capaz de superar el 20% desde el curso académico 2013/2014 al actual 2022/2023.

Después de observar estos antecedentes, el capítulo realiza un estudio para analizar las posibles causas de esta baja participación. El estudio abarca desde la educación primaria hasta los primeros años en el mundo laboral, y se realiza a través de unas encuestas. Estas encuestas están fundamentadas en 3 modelos predictivos de la psicología: 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro, 2) Teoría del Rol Social y 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género. El capítulo finaliza analizando los resultados obtenidos de las

encuestas y cuáles son los posibles motivos de que todavía, en pleno siglo XXI, no haya una equidad en la participación de las mujeres en el ámbito STEM.

En el *“Capítulo 3. El reto de la transición digital en la educación en ingeniería. Una solución a partir de una red colaborativa europea de laboratorios remotos basados en tecnologías de energías renovables”* está dedicado a la implantación de una nueva metodología educativa en el método de enseñanza – aprendizaje del ámbito STEM. Comienza exponiendo los cuatro tipos de laboratorios que existen: laboratorio virtual con acceso local; laboratorio virtual con acceso remoto; laboratorio real con acceso local; laboratorio real con acceso remoto. De estos cuatro tipos, se determina que el laboratorio que más ventajas ofrece es el laboratorio real con acceso remoto, también conocido como laboratorio remoto. Entre las ventajas de estos laboratorios destacan, por ejemplo, el acceso las 24 horas del día, los 7 días a la semana; el alumnado con trabajo no tiene dificultades para adaptar sus horarios a las actividades prácticas; el alumnado puede repetir las prácticas tantas veces como deseen. Si a estas ventajas que poseen los laboratorios remotos se incluye que el laboratorio remoto implementado en la UHU pertenece a una red colaborativa de laboratorios remotos europeos, se aumentan las ventajas, ya que las universidades con menos recursos tecnológicos pueden ampliar su oferta de prácticas con laboratorios de alta tecnología, y así también se produce un ahorro económico tanto de materiales como de espacio físico.

Desde hace algunos años, diversas instituciones han implementado el uso de laboratorios remotos en sus prácticas académicas, pero no se había abordado la creación de una plataforma colaborativa de laboratorios remotos. Esta plataforma, aparte de algunas ventajas mencionadas anteriormente, incluye la implementación y desarrollo de aplicaciones de energías renovables en un uso residencial. Por este motivo, el alumnado, aparte de disfrutar de diversos laboratorios remotos y ampliar sus conocimientos sobre diferentes fuentes de energías renovables, también puede ver su aplicación práctica en la vida real.

El laboratorio remoto implementado por la UHU se basa en un banco de supercondensadores. Los supercondensadores son elementos de almacenamiento que permiten rápidos ciclos de carga y descarga. Esto se debe a su alta densidad energética, lo que los dota de algunas ventajas, como poder manejar altos valores de corriente, tienen grandes rangos de voltaje y temperatura o poseen largos ciclos de funcionamiento. Con todas estas ventajas, los supercondensadores son utilizados hoy en día como apoyo energético, cubriendo picos de demanda para no sobrecargar la red eléctrica; cubren interrupciones en el suministro; o estabilizan el voltaje suministrado por los paneles fotovoltaicos. Otra ventaja de los supercondensadores es su uso en los coches híbridos, siendo viable su instalación en sistemas basados en hidrógeno.

El “Capítulo 4. Una aplicación real de hidrógeno como energía renovable. Sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno para el transporte y la distribución en la cadena alimentaria” se implementan los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos sobre energías renovables. Para ello, en una furgoneta de transporte refrigerado se sustituye el sistema de refrigeración de la cámara que contiene los alimentos. Estos equipos suelen estar alimentados por diésel, pero el porcentaje de contaminación es muy elevado.

Hoy en día el estilo de vida ha cambiado, la población cada vez es más urbana. Si a eso le sumamos el ritmo acelerado que lleva la población, ocasiona que la mayoría de compras de alimentos o ropa se realicen *on-line*, contribuyendo a aumentar la contaminación, y, consecuentemente, el calentamiento global. Es por ello, que, entre las medidas adoptadas por la UE, se encuentre la limitación en el uso de vehículos de gasolina y diésel para 2035. Con la implementación de estas nuevas medidas que irán desarrollándose de manera paulatina, es muy importante que la población tome conciencia sobre el calentamiento global. Por este motivo, este capítulo tiene como objetivo concienciar al alumnado sobre los beneficios del uso de las energías renovables.

El alumnado será el encargado de sustituir el sistema de refrigeración del vehículo por hidrógeno. Todas las etapas del proyecto, desde el diseño hasta la implementación será abordada por el alumnado.

Finalmente, en el “Capítulo 5. Conclusiones y Desarrollos Futuros”, se discuten las conclusiones más relevantes obtenidas en esta Tesis, y se enmarcan las líneas de investigación que se han abierto con el trabajo desarrollado, además de proponer estrategias y acciones en este sentido.

Las Referencias Bibliográficas consultadas cierran la memoria de esta Tesis.

1.3 Innovaciones que aporta la Tesis

En esta sección se recorren cada uno de los capítulos que integran esta memoria, destacando las aportaciones novedosas que se hacen en cada uno respecto a la situación del estado del arte antes de abordar las diferentes tareas que conforman cada capítulo.

El Capítulo 2 comienza mostrando un estudio estadístico sobre la baja participación de mujeres en el ámbito científico-tecnológico. En Europa, en el año 2014, un 33.04% fueron mujeres tituladas en el ámbito STEM. Este se ha mantenido estable, donde en el año 2020 el porcentaje fue de un 32.46%. En España, los porcentajes son menos favorables, con un 29.04% de mujeres matriculadas en 2014, hasta un 28.98% en 2020. La peor cifra se registró en España en 2020, y, desde entonces, no ha mejorado, debido a que en 2020 el método enseñanza-aprendizaje tuvo que adaptarse a la nueva situación provocada por el COVID-19. La UE tuvo que adoptar medidas en educación [1-3], pero, aun así,

Las carreras científico-tecnológicas fueron las más afectadas por esta nueva situación, donde, además, la baja participación de las mujeres está acentuándose cada vez más. Esta baja participación, unida al hecho de que los puestos relacionados con el ámbito STEM se encuentra en pleno auge, va a ocasionar a corto plazo un gran aumento de la brecha de género en este ámbito [4,5]. Si al bajo índice de mujeres matriculadas en carreras científico-tecnológicas le unimos que el número de puestos de empleo en el ámbito STEM es cada vez mayor [7-9], aquellas mujeres que actualmente no orienten su carrera académica a este ámbito [6], no van a poder a optar a esos puestos de trabajo.

Una vez se ha llegado a este punto de inflexión, la siguiente contribución del capítulo consiste en realizar un estudio para poder averiguar las posibles causas y consecuencias de esta baja participación femenina en el ámbito científico-tecnológico. En este sentido, no se había elaborado hasta el momento un estudio exhaustivo que dividiera al alumnado en cinco etapas diferentes para así poder observar con más claridad en qué momento preciso del ciclo vital se produce esta desvinculación por parte de la mujer del ámbito científico-tecnológico. Pero, además de estas cinco etapas, en estudio divide entre hombres y mujeres para poder analizar más detalladamente si es un problema social o generacional.

En la revisión bibliográfica se han encontrado referencias sobre otros estudios que han querido encontrar el origen de esta brecha de género, pero la gran parte de ellos se centran en una edad concreta [16-20]. Para poder llevar a cabo un estudio amplio que abarque diferentes etapas, se aplica un multimodelo donde se aplican tres teorías: 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro [22-26]; 2) Teoría del Rol Social [27-29]; 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género [30-33]. Por último, el estudio realiza cuestiones relacionadas con el entorno educativo [34].

Del mismo modo, el capítulo no solo encuesta al alumnado, también incluye al profesorado. El motivo de analizar al profesorado es que son un referente desde una edad muy temprana en el alumnado, inculcando no solo conocimiento, sino valores en el alumnado, y, además, el profesorado pertenece a otra generación con una mentalidad y crianza diferentes, lo que puede ocasionar muchas veces una influencia en el alumnado.

En el Capítulo 3 se pone de manifiesto la necesidad de transformar el método enseñanza-aprendizaje en educación, adaptándose a los nuevos retos planteados por el COVID-19 [35], así como la nueva transición ecológica adoptada por la UE. Para poder llevar la enseñanza al alumnado, la UE tuvo que adoptar diversas medidas [37-40], convirtiendo la enseñanza en un modelo híbrido, donde se combina educación on-line y presencial [36].

Para solucionar todos estos retos, el capítulo propone la implementación de laboratorios remotos [41,42] como nuevo método de enseñanza, sobre todo en las

prácticas de laboratorio de las carreras científico tecnológicas. Los laboratorios remotos son todavía una tecnología en desarrollo, pero tras la llegada del COVID-19 se han convertido en una nueva metodología útil y versátil.

Pero la implementación de laboratorios remotos que se propone en este capítulo no es una idea aislada, se trata de una colaboración entre cinco universidades europeas para crear una plataforma estandarizada capaz de albergar diferentes laboratorios remotos ubicados físicamente en estas universidades. Esta fusión de estas cinco universidades genera una gran variedad tecnológica para el alumnado, ya que un laboratorio de prácticas de ingeniería supone un gran desembolso económico, mantenimiento y, sobre todo, espacio físico [43,44]. Con esta red colaborativa de laboratorios, el alumnado puede tener a su disposición una amplia gama de laboratorios, ampliando sus conocimientos en otras ramas de la ingeniería. Además, estos laboratorios no solo permiten ampliar conocimientos en otros ámbitos, sino que están basados en energías renovables, lo que permite que el alumnado aprenda y se familiarice en este tipo de tecnologías implementadas a corto plazo por la UE.

La búsqueda bibliográfica llevada a cabo en este capítulo pone de manifiesto la necesidad de profundizar más sobre los laboratorios remotos. Los pocos estudios sobre laboratorios remotos [45-49], [51-53], [55] son aislados, es decir, no se propone una infraestructura cooperativa y estandarizada de laboratorios remotos. El trabajo realizado en [50] es una colaboración entre diversas universidades jordanas, mientras que en [54] son dos universidades italianas, pero en ninguno de estos dos trabajos se propone la implementación de laboratorios remotos basados en energías renovables para un uso residencial.

Por último, este capítulo se centra en el laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores implementado por la Universidad de Huelva. Este laboratorio permite al alumnado visualizar las curvas de carga y descarga del banco de supercondensadores para así poder profundizar en esta tecnología. Los supercondensadores permiten grandes ciclos de carga y descarga, soportan grandes corrientes y, actualmente, se usan en como soporte para las instalaciones fotovoltaicas. Pero lo más destacado de esta tecnología es su uso en sistemas híbridos basados en hidrógeno, suministrando energía combinando la pila de combustible y los supercondensadores.

El Capítulo 4 se puede entender como una continuación o aplicación práctica del trabajo desarrollado en el capítulo anterior, partiendo de una adquisición teórica de conocimientos a través de los laboratorios remotos basados en energías renovables implementados en las universidades, hasta finalizar llevando a la práctica diaria eso conocimientos teóricos. La aplicación práctica consiste en sustituir el sistema de refrigeración del camión por tecnología de hidrógeno verde. La implementación real de un sistema híbrido de pila de combustible conlleva realizar un estudio minucioso de todos los elementos que

componen el sistema y la interrelación entre ellos. Además, hay que tener en cuenta que los sistemas de pila de combustible tienen todavía muy poca implantación en el mercado y, por tanto, su disponibilidad y oferta comercial es bastante limitada. Por otro lado, las características físicas y funcionamiento de este tipo de sistemas exigen unos requerimientos adicionales en los acondicionadores de potencia y fuentes auxiliares.

En la bibliografía existen pocos autores que hayan realizado estudios sobre la aplicación de la pila de combustible en el transporte refrigerado. Las pocas investigaciones llevadas a cabo han usado una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) con un sistema de refrigeración por absorción de vapor (VARs) [60] y [74], pero solo a nivel de simulación. En este capítulo la pila de combustible seleccionada es de tipo PEMFC, porque a diferencia de las SOFC, las PEM requieren una etapa de precalentamiento, un complejo balance de planta (BoP) y un sistema de gestión de energía y son pesadas. Comparando las PEMFC con las SOFC, tiene un BoP más simple, unos tiempos de parada y arranque más corto, una mejor temperatura de funcionamiento, por lo que no necesita etapa de precalentamiento.

Otros autores han hecho uso de PEMFC en vehículos [78,66], pero solo a nivel de solución, otros a nivel de laboratorio [79]. Un estudio [81] aborda la sustitución del motor auxiliar diésel en un camión semirremolque frigorífico, pero a diferencia de este capítulo, no aporta información sobre el rendimiento del sistema de refrigeración en la fase de regulación de la temperatura, ni aborda la integración en el vehículo ni las pruebas en carretera. Por último, la empresa Nuvera® propone en [82] una arquitectura híbrida sustituyendo el motor diésel auxiliar por una PEMFC, pero a diferencia de la propuesta realizada en el Capítulo 4, el prototipo tiene unas dimensiones y potencias cerradas a sus camiones, lo que imposibilita la adaptación a otros vehículos y adaptaciones. Las referencias anteriores y como se muestra en el capítulo, ninguna de las propuestas encontradas era útil para solventar los requerimientos exigidos por el prototipo experimental construido.

En conclusión, esta Tesis realiza un recorrido por el método de enseñanza-aprendizaje en ingeniería, comenzando por realizar un estudio que aporte las posibles causas de la baja participación de las mujeres en el ámbito científico-tecnológico, para posteriormente proponer un nuevo método que refuerce la enseñanza práctica, como son los laboratorios remotos, y, además, basados en energías renovables. Finalmente, que el alumnado pueda llevar a la práctica los conocimientos teóricos adquiridos con los laboratorios remotos y puedan ver su aplicación en la vida real.

1.4 Proyectos de investigación que financian la tesis

ALAS: Accompanying Girls Towards Stem Careers (15/3ACT/21)

Entidad financiadora: Ministerio de Igualdad

Entidad/es participante/s: Universidad de Huelva

Subvención: 26 000 €

Periodo de ejecución: 01/01/2022 al 31/12/2022

Investigador/a responsable: Dra. Francisca Segura Manzano

RE-OPEN Remote laboratories for Practical Experiments on energies at EU Universities (REOPEN Erasmus + 2020-1-IT02-KA226-HE-095424)

Entidad financiadora: Subvencionado por la Unión Europea en concurrencia competitiva dentro de la convocatoria ERASMUS + de 2017

Entidad/es participante/s: Universidad de Huelva, Università degli Studi Guglielmo Marconi, Munster Technological University, Norwegian University of Science and Technology y FH Technikum Wien.

Subvención: 284 420 €

Periodo de ejecución: 01/04/2021 al 31/03/2023

Investigador/a responsable: Dr. José Manuel Andújar y Dra. Francisca Segura Manzano

SHAKY- Desarrollo prototipo (contrato 68/83) 8-2020

Entidad financiadora: Enagás Transporte SAU

Entidad/es participante/s: Universidad de Huelva y Enagás

Subvención: 26 620 €

Periodo de ejecución: 26/05/2020 al 25/05/2021

Investigador/a responsable: Dr. José Manuel Andújar

1.5 Resultados de investigación derivados de la tesis

En esta sección se recogen los resultados de investigación más relevantes y que han sido publicados y validados por la comunidad científica. En base a los objetivos expuestos anteriormente, se recoge el listado de contribuciones científicas derivadas de cada objetivo. En el Anexo I, Anexo II y Anexo III se recogen los documentos acreditativos que justifican los resultados de investigación detallados a continuación.

○ **Objetivo 1: Reto “La brecha de género en carreras STEM”**

Capítulo 2. Análisis de la brecha de género en las carreras STEM. Identificación de motivos, propuestas preventivas.

- Congreso 1: V Jornadas ScienCity 2022 de divulgación científica, tecnológica y de innovación en el ámbito de las Ciudades Inteligentes; 14 – 16 de noviembre de 2022; Huelva, España (Certificado de Participación ver Anexo I.A).

Estas jornadas tienen como objetivo dar a conocer a la sociedad los conocimientos y tecnologías emergentes siendo investigados en las universidades, informar de experiencias, servicios e iniciativas puestas ya en marcha por instituciones y empresas, llegar hasta decisores políticos que podrían crear sinergias, incentivar la creación de ideas y posibilidades de desarrollo conjuntas, implicar y provocar la participación ciudadana.

ScienCity se celebró por primera vez en 2018 y sirvió para que más de 20 expertos de 17 instituciones públicas y privadas tomaran contacto en la región durante una semana. En 2019 la participación aumentó a 32 expertos de 21 instituciones durante 3 días. En 2020 se han presentado un total de 40 trabajos de 63 autores pertenecientes a 30 instituciones públicas y privadas de España, Portugal, Brasil, Italia, Chipre, Francia, Polonia y Reino Unido. Como resultado, han surgido oportunidades de colaboración en torno a la participación en redes temáticas, así como en proyectos de investigación y difusión competitivos.

Martínez, M., Segura, F., Andújar, J. M., Ceada, Y., & Martín, M. J. (2022). Study on the Low Presence of Women in the STEM field. Search for Reasons to Be Able to Increase Participation. V Jornadas ScienCity 2022. Fomento de La Cultura Científica, Tecnológica y de Innovación En Ciudades Inteligentes, 10–13.

El artículo se encuentra publicado de forma individual en “Researchgate” en el siguiente enlace y adjuntado en el Anexo I.B de este documento (https://www.researchgate.net/publication/368608303_Study_on_the_Low_Presence_of_Women_in_the_STEM_field_Search_for_Reasons_to_Be_Able_to_Increase_Participation).

Del mismo modo, el artículo se encuentra publicado en el Libro de Actas de las IV Jornadas ScienCity 2022. Fomento de la Cultura Científica, Tecnológica y de Innovación en Ciudades Inteligentes, publicado también en “Researchgate” (https://www.researchgate.net/publication/371292884_Actas_de_las_IV_Jornadas_ScienCity_2022_Fomento_de_la_Cultura_Cientifica_Tecnologica_y_de_Innovacion_en_Ciudades_Inteligentes).

- Congreso 2: 2022 7th International STEM Education Conference (iSTEM-Ed2022); 6 – 8 de julio de 2022; Sukhothai, Tailandia (Certificado de Participación ver Anexo I.C).

Índice de calidad: Congreso internacional organizado por la EEAAT (Electrical Engineering Academic Association Thailand) y la Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, en colaboración con IEEE Education Society, IEEE Thailand Section, IEEE Education Society Thailand Chapter y The Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology (IPST). Este congreso abarca temas relacionados con la enseñanza y aprendizaje de STEM con ayuda de la tecnología, modos y aplicaciones pedagógicas de la educación en STEM, desarrollo de aptitudes y reciclaje para la alfabetización en STEM, estudios y desarrollo de planes de estudios centrados en la educación en STEM y vínculos y asociaciones con la industria.

Martínez, M., Segura, F., Ceada, Y., & Andújar, J. M. (2022). Working to reduce the gender gap in STEM fields in Spain. A project based on mentoring and participation. 7th International STEM Education Conference, ISTEM-Ed 2022, 8–11. <https://doi.org/10.1109/iSTEM-Ed55321.2022.9920940>

El artículo se encuentra publicado en IEEE Xplore en el siguiente enlace (<https://ieeexplore.ieee.org/document/9920940>) y adjuntado en el Anexo I.D de este documento.

Del mismo modo, el artículo se encuentra publicado en el Libro de Actas del congreso, publicado también en IEEE Xplore en el siguiente enlace: "<https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9920729/proceeding>".

- **Congreso 3:** 2023 IEEE 6th Eurasian Conference on Educational Innovation (IEEE ECEI2023); 3 – 5 de febrero de 2022; Singapore, Tailandia (Certificado de Participación ver Anexo I.E).

Índice de calidad: Congreso internacional organizado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Science Education Center, National Taiwan Normal University, Singapore University of Social Sciences y International Institute of Knowledge Innovation and Invention (IIKII). Este congreso proporciona una plataforma de comunicación para los investigadores en los temas de innovaciones educativas y Tecnologías Emergentes. Los objetivos de esta conferencia son posibilitar la colaboración interdisciplinar entre educadores y expertos de otras áreas del ámbito académico e industrial, así como la creación de redes internacionales.

- **Revista MDPI:**

El artículo presentado para el Congreso 3: "IEEE ECEI 2023", fue galardonado con el "Best Paper Conference Award" y propuesto para su publicación en la revista MDPI, "Education Sciences".

Índice de calidad: MDPI es una editorial de revistas revisadas por pares y de acceso abierto desde su creación en 1996. De todas las revistas que conforman MDPI, el artículo se encuentra publicado en la revista "Education Sciences". "Education Sciences" es una revista internacional de acceso abierto revisada por

pares y publicada mensualmente en línea por MDPI. Su objetivo es divulgar los resultados de investigaciones oportunas y de alta calidad sobre una amplia gama de temas. Esta revista en la categoría “Education & Educational Research” se posiciona la 115 / 742 (Q1), su último JCR (2022) disponible es de 3.0 y su último CiteScore (2022) es de 4.0.

Martínez, M., Segura, F., Andújar, J. M., & Ceada, Y. (2023). The Gender Gap in STEM Careers: An Inter-Regional and Transgenerational Experimental Study to Identify the Low Presence of Women. *Education Sciences*, 13(7), 1–36. <https://doi.org/10.3390/educsci13070649>

El artículo se encuentra publicado en MDPI en el siguiente enlace (<https://www.mdpi.com/2227-7102/13/7/649/htm>) y adjuntado en el Anexo I.F de este documento.

- **Objetivo 2: Reto “La transición digital en educación para la ingeniería”**

Capítulo 3: El reto de la transición digital en la ingeniería. Una solución a partir de una red colaborativa europea de laboratorios remotos basados en tecnologías de energías renovables.

- Congreso 1: IV Jornadas ScienCity 2021 de divulgación científica, tecnológica y de innovación en el ámbito de las Ciudades Inteligentes; 17 – 19 de noviembre de 2021; Huelva, España (Certificado de Participación ver Anexo II.A).

Estas jornadas tienen como objetivo dar a conocer a la sociedad los conocimientos y tecnologías emergentes siendo investigados en las universidades, informar de experiencias, servicios e iniciativas puestas ya en marcha por instituciones y empresas, llegar hasta decisores políticos que podrían crear sinergias, incentivar la creación de ideas y posibilidades de desarrollo conjuntas, implicar y provocar la participación ciudadana.

ScienCity se celebró por primera vez en 2018 y sirvió para que más de 20 expertos de 17 instituciones públicas y privadas tomaran contacto en la región durante una semana. En 2019 la participación aumentó a 32 expertos de 21 instituciones durante 3 días. En 2020 se han presentado un total de 40 trabajos de 63 autores pertenecientes a 30 instituciones públicas y privadas de España, Portugal, Brasil, Italia, Chipre, Francia, Polonia y Reino Unido. Como resultado, han surgido oportunidades de colaboración en torno a la participación en redes temáticas así como en proyectos de investigación y difusión competitivos.

Martínez, M., García, R., Segura, F., & Andújar, J. M. (2021). Standardized Remote Laboratories Based on Renewable Energy Sources for REOPEN European University Network. IV Jornadas ScienCity 2021. Fomento de La Cultura Científica, Tecnológica y de Innovación En Ciudades Inteligentes, 7–10.

El artículo se encuentra publicado de forma individual en “Researchgate” en el siguiente enlace y adjuntado en el Anexo II.B de este documento (https://www.researchgate.net/publication/358525351_Standardized_Remote_Laboratories_Based_on_Renewable_Energy_Sources_for_REOPEN_European_University_Network).

Del mismo modo, el artículo se encuentra publicado en el Libro de Actas de las IV Jornadas ScienCity 2021. Fomento de la Cultura Científica, Tecnológica y de Innovación en Ciudades Inteligentes, publicado también en “Researchgate” (https://www.researchgate.net/publication/362077362_Actas_de_las_IV_Jornadas_ScienCity_2021_Fomento_de_la_Cultura_Cientifica_Tecnologica_y_de_Innovacion_en_Ciudades_Inteligentes).

- Congreso 2: 2023 IEEE 6th Eurasian Conference on Educational Innovation (ECEI); 3 – 5 de febrero de 2022; Singapore, Tailandia (Certificado de Participación ver Anexo II.C).

Índice de calidad: Congreso internacional organizado por Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Science Education Center, National Taiwan Normal University, Singapore University of Social Sciences y International Institute of Knowledge Innovation and Invention (IIKII). Este congreso proporciona una plataforma de comunicación para los investigadores en los temas de innovaciones educativas y Tecnologías Emergentes. Los objetivos de esta conferencia son posibilitar la colaboración interdisciplinar entre educadores y expertos de otras áreas del ámbito académico e industrial, así como la creación de redes internacionales.

Martínez, M., Segura, F., Andújar, J. M., Zotto, L. del, Tabakovic, M., & O’Mahony, T. (2022). The challenges of digital transition in Engineering careers. A solution based on standardised renewable sources-based remote laboratories. 2023 IEEE 6th Eurasian Conference on Educational Innovation (ECEI), 0–3. <https://doi.org/10.1109/ECEI57668.2023.10105326>

El artículo se encuentra publicado en IEEE Xplore en el siguiente enlace (<https://ieeexplore.ieee.org/document/10105326>) y adjuntado en el Anexo II.D de este documento.

Del mismo modo, el artículo se encuentra publicado en el Libro de Actas del congreso, publicado también en IEEE Xplore en el siguiente enlace: “<https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/10105301/proceeding>”.

- Revista MDPI:

El artículo presentado para el Congreso 2: “IEEE ECEI 2023”, fue galardonado con el “Best Paper Conference Award” y propuesto para su publicación en la revista MDPI.

Índice de calidad: MDPI es una editorial de revistas revisadas por pares y de acceso abierto desde su creación en 1996. De todas las revistas que conforman MDPI, el artículo se encuentra publicado en la revista “Applied System Innovation”. “Applied System Innovation” es una revista internacional, revisada por pares y de acceso abierto sobre ingeniería y tecnología integradas. La revista es propiedad del “International Institute of Knowledge Innovation and Invention” (IIKII) y se publica bimestralmente en línea por MDPI. Esta revista en la categoría “Control and Systems Engineering” se posiciona la 86 / 286 (Q2), y en la categoría “Engineering, Electrical & Electronic” se posiciona la 140 / 349 (Q2). Su último JCR (2022) disponible es de 3.8 y su último CiteScore (2022) es de 4.9.

Martínez, M., Segura, F., & Andújar, J. M. (2023). The Challenge of Digital Transition in Engineering. A Solution Made from a European Collaborative Network of Remote Laboratories Based on Renewable Energies Technology. Applied System Innovation, 6(2). <https://doi.org/10.3390/asi6020052>

El artículo se encuentra publicado en MDPI en el siguiente enlace (<https://www.mdpi.com/2571-5577/6/2/52>) y adjuntado en el Anexo II.E de este documento.

- **Objetivo 3: Reto “Desarrollo de aplicaciones prácticas reales para la enseñanza en ingeniería”**

Capítulo 4: Una aplicación real de hidrógeno como energía renovable. Sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno para el transporte y la distribución en la cadena alimentaria.

- Congreso 1: ICAE2021, the 13th International Conference on Applied Energy; 29 noviembre – 2 de diciembre de 2021; Bangkok, Tailandia (Certificado de Participación ver Anexo III.A).

Índice de calidad: congreso internacional organizado por “The Applied Energy Innovation Institute”, “UNILAB” y “Open edX”. El tema principal del congreso fue “Soluciones Energéticas Sostenibles para una Recuperación Post-COVID hacia un Futuro Mejor”.

Martínez, M, Vivas, F. J., & Andújar, F. S. J. M. (2021). Hydrogen-based APU for refrigerated vans. A turnkey solution for freight transport. 13th International Conference on Applied Energy, 24, 1–6. <https://doi.org/https://doi.org/10.46855/energy-proceedings-9866>

El artículo se encuentra publicado en Energy Proceedings en el siguiente enlace y adjuntado en el Anexo III.B de este documento (<https://www.energy-proceedings.org/hydrogen-based-apu-for-refrigerated-vans-a-turnkey-solution-for-freight-transport/>).

Del mismo modo, el artículo se encuentra publicado en el Libro de Actas del congreso, publicado también en Energy Proceedings en el siguiente enlace: "<https://www.energy-proceedings.org/category/icae2021v7/>".

- Revista MDPI:

El artículo presentado para el Congreso 1: "ICAE2021" fue propuesto para su publicación en la revista "Applied Energy".

Índice de calidad: Elsevier es una editorial académica con sede en los Países Bajos que se especializa en contenido científico, técnico y médico. Sus productos incluyen revistas como The Lancet, Cell, la colección ScienceDirect de revistas electrónicas, Trends, la serie Current Opinion, la base de datos de citas en línea Scopus, la herramienta SciVal para medir el rendimiento de la investigación, el motor de búsqueda ClinicalKey para médicos y el servicio de atención del cáncer basado en la evidencia ClinicalPath. De todas las revistas que conforman Elsevier, el artículo se encuentra publicado en la revista "Applied Energy". "Applied Energy" es una revista internacional revisada por pares que cubre investigaciones sobre ingeniería energética que se estableció en 1975. La revista cubre áreas de conversión y conservación de energía, el uso óptimo de recursos energéticos, análisis y optimización de procesos energéticos, mitigación de contaminantes ambientales y sistemas energéticos sostenibles. Esta revista en la categoría "Energy & Fuels" se posiciona la 15 / 115 (Q1), y en la categoría "Engineering, Chemical" se posiciona la 9 / 140 (Q1). Su último Índice de Impacto (2022) disponible es de 11.2.

Segura, F., Vivas, F. J., Andújar, J. M., & Martínez, M. (2023). Hydrogen-powered refrigeration system for environmentally friendly transport and delivery in the food supply chain. Applied Energy, 338(March), 120945. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120945>

El artículo se encuentra publicado en ScienceDirect en el siguiente enlace y adjuntado en el Anexo III.C de este documento (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923003094>).



Capítulo 2. Estudio experimental interregional y transgeneracional para identificar la baja presencia de mujeres. Análisis de la brecha de género en las carreras STEM



Palabras clave	Resumen
<p>Carreras STEM</p> <p>Brecha de género</p> <p>Estudio experimental</p> <p>Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro</p> <p>Teoría del Rol Social</p> <p>Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género</p> <p>Taller participativo</p> <p>Empleo</p> <p>Educación europea</p>	<p>En la actualidad, el número de ofertas de empleo en carreras STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) se encuentra en continuo crecimiento, sin embargo, el número de graduados en este ámbito está disminuyendo, especialmente en el caso de las mujeres. En consecuencia, si no promovemos la formación de las mujeres en carreras STEM, la brecha de género, lejos de reducirse, seguirá aumentando. Este capítulo presenta la investigación llevada a cabo en el proyecto ALAS (Accompanying girls towards STEM careers), que consiste en un análisis experimental basado en un estudio multimodelo para descubrir las posibles causas de la baja participación de las mujeres en los campos STEM. Los modelos utilizados son: 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro, 2) Teoría del Rol Social y 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género. Además, se han llevado a cabo talleres participativos con el objetivo de captar las reacciones del alumnado cuando se les introduce en la práctica STEM.</p>

Lista de acrónimos

AGNU	Asamblea General de las Naciones Unidas
ALAS	Accompanying girLs towArds STEM careers
AVE	Average Variance Extracted
CEDEFOP	Centro Europeo para el Desarrollo de la Formación Profesional
ECC	Estereotipos sobre Competencias y Capacidades
EEE	Espacio Europeo de Educación
EM	Estados Miembros
EPWS	European Platform of Women Scientists
ERS	Estereotipos sobre Responsabilidad Social
EX	Expectativas
GENERA	Gender Equality Network in the European Research Area
MO	Motivos
PAU	Pruebas de Acceso a la Universidad
STEM	Science, Technology, Engineering and Mathematics
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
TS	Teoría del Rol Social
UE	Unión Europea
UHU	Universidad de Huelva
VI	Valor de Incentivo

2.1 Introducción

En la búsqueda de un sistema educativo adaptado a la nueva era digital, la Unión Europea (UE) ha puesto en marcha el Plan de Acción de Educación Digital (2021 - 2027). Este plan pretende enriquecer la calidad y el carácter integrador de los sistemas de educación y formación de los Estados Miembros (EM), al tiempo que se adaptan a la era digital y avanzan en el proceso de transición digital y ecológica [1]. Además, el Espacio Europeo de Educación (EEE) pretende eliminar, para el año 2025, las barreras al aprendizaje y mejorar el acceso a una educación de calidad para todos [2,3].

En este contexto, según datos recogidos por Eurostat y que se muestran en la Figura 2. 1 y Figura 2. 2, en 2020, el 57.30% de los titulados en educación terciaria (educación post-secundaria) en la UE eran mujeres, mientras que, en España, las tituladas en educación terciaria eran el 57.14%. Este porcentaje se mantuvo estable a lo largo del sexenio tanto para España como para la UE. En todos los campos de la educación, el porcentaje de mujeres tituladas fue superior al de hombres titulados en el periodo de 2014 a 2020 (la serie de datos publicados es la más reciente), excepto en los campos de "Tecnologías de la Información y la Comunicación" (TIC) e "Ingeniería, Industria y Construcción". Los campos de "Tecnologías de la Información y la Comunicación", "Ingeniería, Industria y Construcción" y "Ciencias Naturales, Matemáticas y Estadística" forman parte de las disciplinas de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (en inglés: *Science, Technology, Engineering and Mathematics* o STEM). Se puede observar que, en Europa, en el año 2014, menos de una cuarta parte (17.93%) eran mujeres

tituladas en el campo de "Tecnologías de la Información y la Comunicación". Este porcentaje ha aumentado tímidamente hasta el 20.79% en 2020. Sin embargo, en el año 2014, en España el porcentaje partía del 14.63%, y lejos de aumentar o mantenerse constante, ha descendido hasta el 12.6%.

Proporción de mujeres graduadas en educación terciaria en la UE en disciplinas STEM

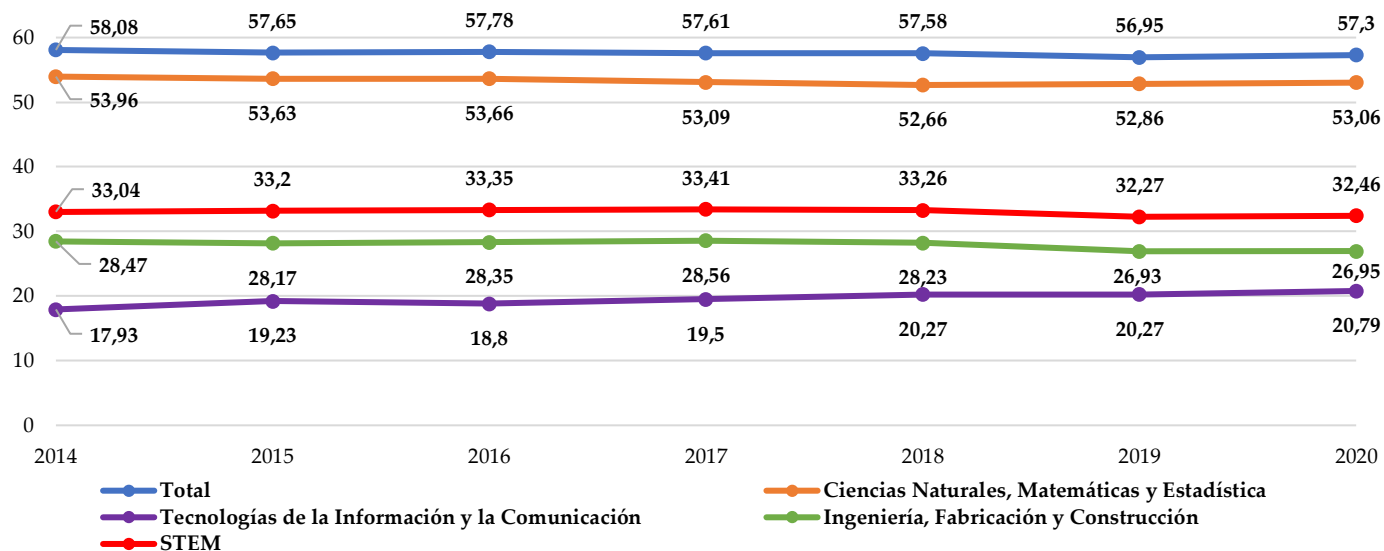


Figura 2. 1. Proporción de mujeres graduadas en educación terciaria en la UE clasificadas por disciplinas. Fuente: Eurostat (STEM = Media [Tecnologías de la Información y la Comunicación; Ciencias Naturales, Matemáticas y Estadística; Ingeniería, Fabricación y Construcción].

Proporción de mujeres graduadas en educación terciaria en España en disciplinas STEM

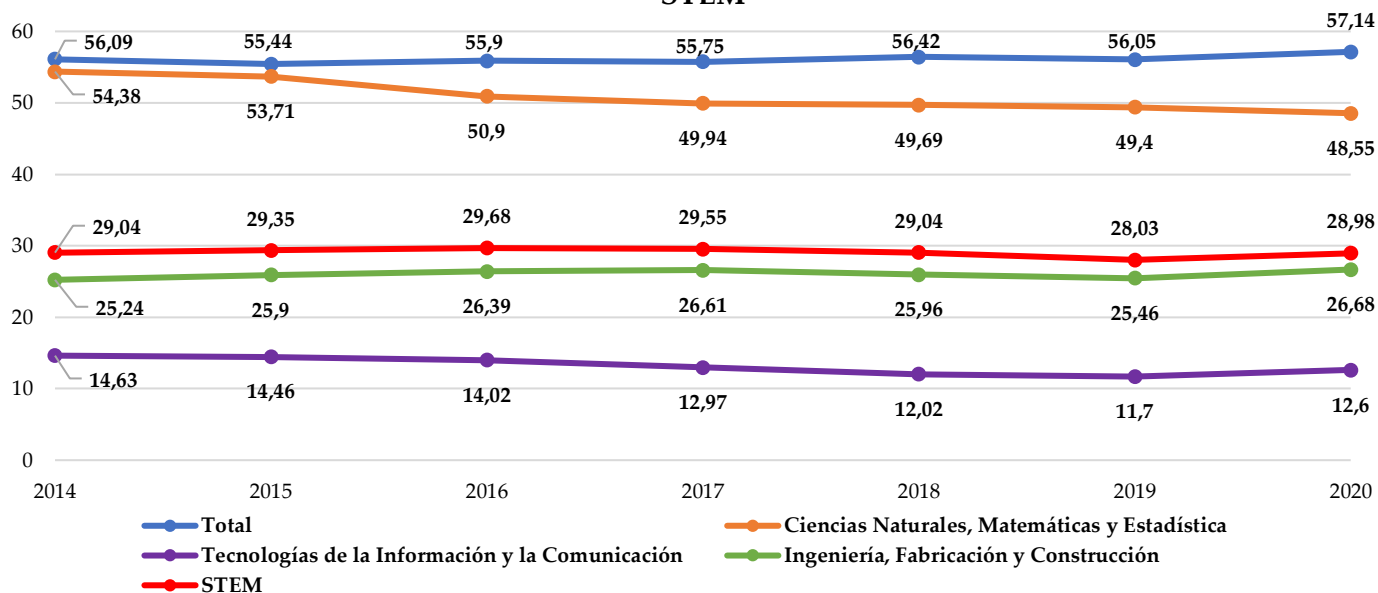


Figura 2. 2. Proporción de mujeres graduadas en educación terciaria en España clasificadas por disciplinas. Fuente: Eurostat (STEM = Promedio [Tecnologías de la Información y la Comunicación; Ciencias Naturales, Matemáticas y Estadística; Ingeniería, Fabricación y Construcción].

Como podemos observar en las series de datos recogidos, la baja presencia y participación de las mujeres en las carreras STEM es una realidad transgeneracional [4,5]. Según los datos aportados por el Ministerio de Universidades en su informe para 2022 [6], el 56.9% de los estudiantes españoles presentados a las Pruebas de Acceso a la Universidad (PAU) en 2020 eran mujeres. De este porcentaje, el 89.8% de las mujeres aprobaron las pruebas. Estos porcentajes son ligeramente inferiores en el caso de los hombres, donde el 43.1% de los estudiantes presentados a las PAU eran hombres, y el 88.9% aprobaron las pruebas. Este equilibrio de género se mantiene en términos de matriculación, de los 1 340 632 estudiantes matriculados en carreras universitarias, el 56% son mujeres. Sin embargo, cuando se analizan estos mismos datos en la rama de Ingeniería y Arquitectura, del total de estudiantes matriculados, sólo 233 365 (17.40%) están matriculados en carreras de Ingeniería y Arquitectura. De estos 233 365 matriculados, sólo 59 974 (25.7%) son mujeres. Estos datos significan que, del total de nuevas inscripciones en titulaciones universitarias, sólo el 4.47% corresponde a mujeres matriculadas en Ingeniería y Arquitectura.

Tomando como ejemplo la Universidad de Huelva (UHU), se analiza el número de estudiantes de nuevo ingreso en los últimos años en las titulaciones con mayor afinidad al área tecnológica (Ingeniería Electrónica Industrial, Ingeniería Mecánica Industrial e Ingeniería Informática). Como se observa en la Figura 2. 3, en el caso de Ingeniería Electrónica Industrial (verde para los hombres y azul para las mujeres), el porcentaje de mujeres matriculadas (azul) en la titulación tiene un efecto "W" invertida. El porcentaje de mujeres matriculadas es siempre inferior al 15%. En el caso de Ingeniería Informática (naranja para los hombres y rojo para las mujeres), la evolución de las matriculaciones de mujeres respecto a las matriculaciones de hombres se encuentra estancada, sin superar el 9% (rojo). El curso 2013/2014 comenzó con una tasa de mujeres matriculadas del 16.2%, sin embargo, en el actual curso académico 2022/2023 sólo el 8.2% son mujeres. La situación es más grave en Ingeniería Mecánica Industrial (morado para los hombres y rosa para las mujeres), donde el curso 2013/2014 comenzó con un 9.1% de mujeres matriculadas (rosa), mientras que en el actual curso 2022/2023 sólo ha habido un 4.9% de mujeres matriculadas.

Historial de nuevas matriculaciones. Grado en Ingeniería Electrónica Industrial, Ingeniería Informática e Ingeniería Mecánica Industrial. UHU

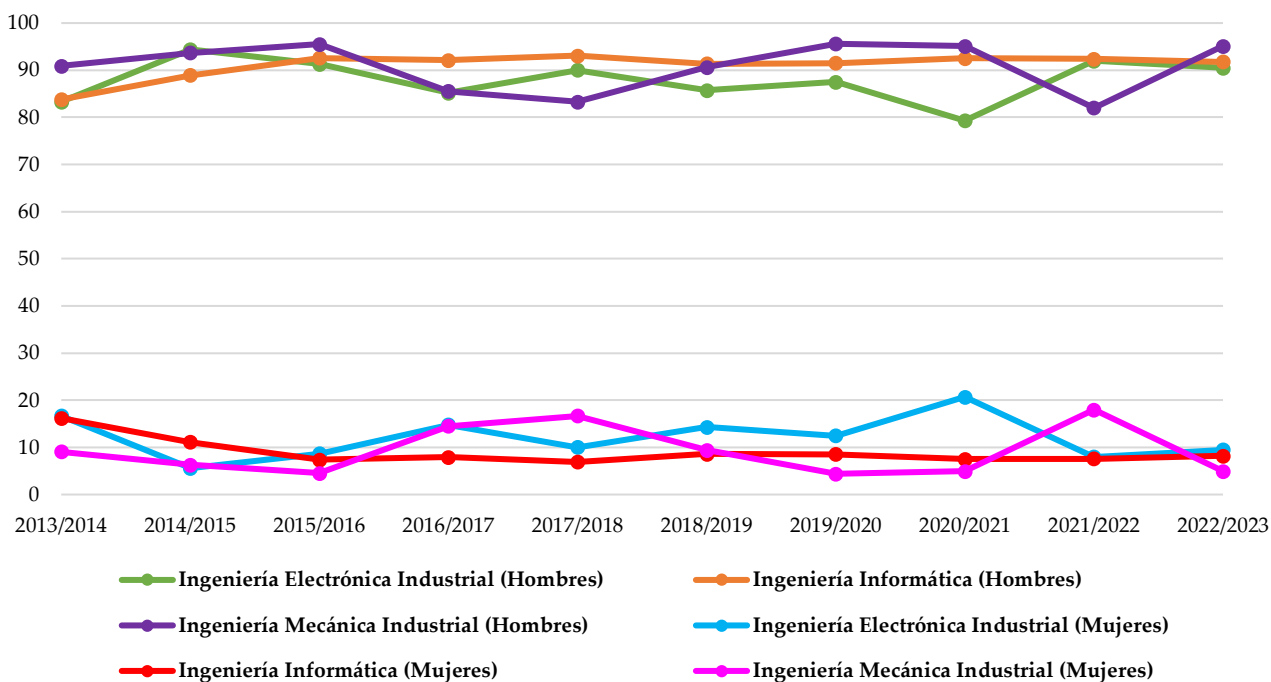


Figura 2. 3. Historial de nuevas matriculaciones. Ingeniería Electrónica Industrial, Ingeniería Informática e Ingeniería Mecánica Industrial en la UHU. Fuente: <https://www.uhu.es/unidad-calidad/informes-y-datos/perfil-del-alumnado-de-nuevo-ingreso>.

Pero, por otro lado, las ofertas de empleo relacionadas con el ámbito STEM han experimentado un crecimiento del 12% en la última década. La demanda de profesionales STEM crece a un ritmo mayor que en otros sectores [7]. Según el Centro Europeo para el Desarrollo de la Formación Profesional (CEDEFOP), este crecimiento será del 8% en 2025, frente al crecimiento medio del 3% previsto para todas las ocupaciones [8]. Durante la próxima década, se espera que el aumento de las ocupaciones relacionadas con el ámbito STEM aumente hasta el 10.8% [9]. Las profesiones relacionadas con el ámbito STEM se encuentran entre las 20 primeras de la UE, como muestra la Tabla 2. 1. Sin embargo, las empresas tienen dificultades para captar y contratar personal cualificado en estas áreas.

Hoy en día, a las personas que aspiran a un puesto de trabajo se les exigen cualidades tanto “hard” (conocimientos técnicos) como “soft” (conocimientos relacionados con el liderazgo y las relaciones sociales). Esta demanda no se cubre en muchos casos debido a la falta de aspirantes a estas profesiones que reúnan las competencias necesarias para poder desarrollarse profesionalmente en un entorno cada vez más competitivo [10–13].

En este sentido, el 59% de los participantes en el estudio realizado en [14], señalan tres razones principales para explicar estas dificultades:

- Escasez de titulados debido a la percepción negativa de las profesiones STEM.
- Los grandes avances tecnológicos obligan a las titulaciones a adaptarse a estos cambios.
- La imagen de las profesiones STEM no son neutras en cuanto al género.

Tabla 2. 1. Las profesiones STEM entre las 20 vacantes con mayor cuello de botella a nivel europeo.

Vacantes a nivel de 4 dígitos de la CIUO ¹		Vacantes a nivel de 2 dígitos de la CIUO	
Rango	Profesión	Rango	Profesión
7	Ingenieros mecánicos	2	Profesionales en ciencia e ingeniería
8	Desarrolladores de software	3	Profesionales de las tecnologías de la información y la comunicación
12	Ingenieros eléctricos	7	Profesionales asociados a las ciencias e ingeniería
14	Ingenieros civiles	14	Trabajadores del sector eléctrico y electrónico

¹ CIUO = Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones

En conclusión, el bajo porcentaje de mujeres graduadas en campos relacionados con el ámbito STEM, combinado con el aumento de ofertas de empleo que se producirá en estas profesiones en los próximos años, no contribuye a reducir la brecha de género en estas profesiones.

Tratando de revertir esta situación, la UE está tomando medidas para atraer a las mujeres al campo STEM. En 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas (AGNU) declaró el 11 de febrero Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia, como parte del esfuerzo para lograr el acceso y la participación plena y equitativa de las mujeres y las niñas en la ciencia. También existen otros recursos, como la Plataforma Europea de Mujeres Científicas (en inglés: *European Platform of Women Scientists* o EPWS) [15], en la que más de 100 redes de mujeres científicas y organizaciones de toda Europa promueven la igualdad de oportunidades en los campos de investigación de todas las disciplinas científicas. GENERA (Red de Igualdad de Género en el Espacio Europeo de Investigación; en inglés: *Gender Equality Network in the European Research Area*) era un proyecto de Horizonte 2020 cuyo objetivo era continuar, supervisar y mejorar los planes de igualdad de género de las instituciones y organizaciones de investigación.

En resumen, el objetivo de este capítulo es analizar las posibles causas y efectos de la escasa presencia de mujeres en campos relacionados con el ámbito STEM. Para llevar a cabo el estudio, se realiza una evaluación de jóvenes en cinco

etapas diferentes de su vida, desde la infancia hasta la vida adulta. Para ello, se aplica un estudio multimodelo basado en 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro, 2) Teoría del Rol Social y 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género.

Basándose en la literatura científica, merecen especial atención los siguientes trabajos centrados en el análisis de la brecha de género en las carreras STEM. El estudio realizado por McDaniel [16] examina cómo influye en los adolescentes la cultura de la igualdad de género en la elección de los estudios universitarios cuando empiezan a planificar su futuro. El estudio se realiza sobre un grupo de jóvenes de 15 años de 24 países diferentes. La autora del estudio reconoce que se desconoce cómo influyen la estratificación de género o las ideologías culturales en el desarrollo de las expectativas de carrera STEM de los chicos y chicas.

Más recientemente, se han puesto sobre la mesa nuevos trabajos científicos también relacionados con la preocupación por la brecha de género en STEM. La propuesta de García-Holgado et al. [17] analiza una serie de universidades latinoamericanas y europeas con el fin de definir planes de acción de igualdad de género para matricular, retener y orientar a las mujeres en los programas STEM. Dulce-Salcedo et al. [18] realizan un estudio para comprobar si la presencia de profesoras de STEM en la educación secundaria influye positivamente en la matriculación de más mujeres en STEM en la educación terciaria. El estudio evalúa mediante probabilidad lineal los datos del alumnado graduado en Bogotá entre 2010 y 2013 y determina que las estudiantes que estuvieron expuestas a una mayor proporción de profesoras en el ámbito STEM tuvieron más inclinación hacia estudios terciarios en este ámbito, mientras que a los estudiantes no le influyó.

Aparte del factor cultural mencionado en [16] y [17], y del factor de expectativas estudiado en [18], Jiang observa en [19] que el comportamiento de la clasificación por capacidades de los hombres es estadísticamente más fuerte que el de las mujeres en la elección de los estudios universitarios. El autor del estudio defiende que las diferencias de género en la capacidad y la clasificación por capacidades explican una parte de la brecha de género en las carreras STEM. Estos estereotipos de género también son investigados por Kumar et al. [20] con niños de 4 a 6 años. Los autores evalúan la percepción de los niños cuando ven a uno de cuatro grupos de científicos: todos hombres, todas mujeres, una sola mujer entre todos los hombres o un solo hombre entre todas las mujeres. El estudio determinó que los niños, a tan temprana edad, ya tenían prejuicios de género. Los niños juzgaron a los científicos del grupo de todos los hombres y de todas mujeres como "trabajadores", pero juzgaron a la única mujer científica como "inteligente".

Por último, Gawel y Krstić [21] realizan un seguimiento de la brecha de género desde la adolescencia hasta la edad adulta. Este estudio cuantifica el impacto de la brecha de género en diferentes niveles educativos (jóvenes, educación superior, educación de adultos y educación STEM) en los países de la UE. Los autores observan que las relaciones entre las brechas de género dependen en gran medida de las características del país. En los países con un nivel relativamente más bajo de espíritu empresarial femenino y académico, la brecha de género en el espíritu empresarial es la que se ve más afectada, muchas veces debido al abandono temprano en la educación.

En base a todo lo anterior, la hipótesis de partida de este trabajo es que la brecha de género en carreras STEM no puede ser explicada por un único modelo psicológico, y que las razones de la escasa presencia de mujeres en carreras STEM no son sólo psicológicas o culturales, sino que también se deben al entorno educativo.

El objetivo de este trabajo es analizar las posibles causas y efectos de la baja presencia de mujeres en campos relacionados con las STEM. Para llevar a cabo el estudio, se realiza una evaluación de jóvenes en cinco etapas diferentes de su vida, desde la infancia hasta la vida adulta. Para este fin, se aplica un estudio multimodelo, basado en (1) la teoría de la expectativa-valor de la motivación, (2) la teoría del rol social y (3) la teoría de los estereotipos de género, para examinar las razones de la escasa presencia de mujeres en carreras relacionadas con las STEM en la UE.

Adicionalmente, el estudio desarrollado en este capítulo incluye visitas a centros educativos donde se han realizado diferentes talleres participativos con alumnado de primaria y secundaria. La Tabla 2. 2 recoge la principal aportación de la propuesta realizada durante el proyecto ALAS, comparándola con los trabajos comentados anteriormente. La Tabla 2. 2 se divide en 5 ítems, donde el primer ítem es "Ámbito", y sirve para evaluar la localización geográfica dónde se ha realizado el estudio (nacional, internacional o ambos). El segundo ítem, "Grupo objetivo", se refiere al grupo sobre el que se realiza la investigación para evaluar la brecha de género en el campo STEM, como alumnado, graduados, profesorado o sector empresarial. El tercer ítem, "Curso académico", está orientado al alumnado con el fin de clasificarlos por edades. El cuarto ítem, "Herramienta de análisis de la encuesta", se utiliza para evaluar los cuestionarios/herramientas utilizadas para determinar las posibles causas de la brecha de género. Finalmente, el último ítem, "Actividades", se refiere a si en el estudio se realiza algún tipo de taller participativo para acercar las actividades STEM a los grupos objetivo encuestados.

Las principales novedades de la investigación desarrollada en este capítulo son:

1. Alcance interregional e internacional: el estudio se realiza en diferentes regiones de España (Huelva, Cádiz y Badajoz) y en tres países europeos (Italia, Austria y República Checa).
2. Grupo objetivo: la muestra analizada son jóvenes en cinco momentos del ciclo vital vinculados a la transición a la vida adulta (educación primaria, educación secundaria, educación superior, graduados y las primeras etapas de su incorporación al mercado laboral), con el objetivo de identificar las razones que explican la baja presencia de mujeres en entornos STEM.
3. Curso académico: el estudio incluye todo el sistema educativo español, desde la educación primaria hasta la universitaria.
4. Herramienta de análisis de las encuestas: las encuestas se basan en una fundamentación teórica multimodelo aplicando tres teorías, "Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro", "Teoría del Rol Social" y "Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género".
5. Actividades: talleres participativos conducidos por mujeres especialistas en el campo STEM. Estos talleres se imparten en educación primaria y secundaria y se adaptan al nivel educativo donde se imparten.

Tabla 2.2. Contribución de la investigación con respecto a trabajos científicos relacionados.

Referencia	Alcance	Grupo objetivo ⁽¹⁾	Curso académico	Herramienta de análisis de la encuesta	Actividades
Propuesta científica de la Tesis	Nacional e internacional (España y República Checa)	Educación primaria (alumnado y profesorado)	Quinto y sexto	Modelo 1: Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro	Talleres participativos sobre energías renovables, ingeniería electrónica y química
	Nacional e internacional (España e Italia)	Educación secundaria (alumnado y profesorado)	Tercero y cuarto		Modelo 2: Teoría del Rol Social
	Nacional e internacional (España, Italia, Austria y República Checa)	Universidad (alumnado y profesorado)	Todos	Modelo 3: Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género	-
	Nacional (España)	Graduados universitarios	Todos		-
	Nacional (España)	Empresa/industria	Todos		-
	[16]	Internacional	Educación secundaria	15 y 16 años	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones (ISCO) • Banco Mundial (World Bank) y Encuesta sobre valores europeos (EVS) • Teoría de Respuesta al Ítem
[17]	Nacional e internacional	Universidad	Todos	UNESCO SAGA Toolkit	-
[18]	Nacional (Bogotá)	Educación secundaria	Todos	-	-
[19]	Nacional (Universidad Purdue)	Graduados universitarios	Todos	<ul style="list-style-type: none"> • First Destination Survey (FDS) • Encuesta sobre la Comunidad Estadounidense • Encuesta nacional de titulados universitarios 	-
[20]	Nacional	Preescolar	4 - 6 años	Teoría de la atribución	-
[21]	Internacional (países europeos)	Juventud, enseñanza superior, aprendizaje de adultos y educación STEM	15 - 30 años	Encuesta de población activa de la Unión Europea (EU-LFS)	-

(1) Grupo objetivo: muestra de la población sobre la que se realiza el estudio. Se divide en alumnado (educación primaria, educación secundaria y universidad), profesorado y empresa/industria.

2.2 Materiales y Métodos

2.2.1 Enfoque ALAS: Fundamento y Metodología

Para encontrar una explicación a la baja participación de las mujeres en los estudios relacionados con el ámbito STEM, la investigación ALAS (Accompanying girLs towArds STEM careers) desarrolla un estudio para analizar las posibles causas y efectos. Para llevar a cabo el estudio, se realiza una evaluación de las personas en cinco etapas diferentes de su vida, desde la infancia hasta la vida adulta: educación primaria, educación secundaria, universidad, graduados e incorporación a la vida laboral, Figura 2. 4.



Figura 2. 4. Ilustración de las cinco etapas del ciclo vital en las que se basa el estudio del proyecto ALAS.

La investigación ha ampliado el estudio fuera de España para identificar si la brecha de género en las carreras STEM es un problema nacional o internacional y, en segundo lugar, si las causas de esta brecha de género son similares entre países. El estudio se ha llevado a cabo en diferentes regiones de España (Huelva, Cádiz y Badajoz) y en tres países de la UE: Italia (Roma), República Checa (Praga) y Austria (Viena). La Figura 2. 5 muestra un mapa de los centros educativos visitados.



Figura 2. 5. Ubicación geográfica de los centros educativos visitados durante la ejecución del proyecto ALAS.

2.2.1.1 Metodología y Encuestas

Para llevar a cabo el estudio en las cinco etapas vitales anteriormente mencionadas, se han distribuido una serie de encuestas basadas en los modelos teóricos que se muestran en la Figura 2. 6. Las encuestas son anónimas y sólo se pregunta por el sexo, la edad y el centro educativo. Como muestra la Figura 2. 6, las encuestas se basan en un fundamento teórico multimodelo para identificar las causas, tomar decisiones y prevenir la bajísima participación actual de las mujeres en las carreras STEM. El estudio multimodelo incluye:

- Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro [22–26]: este modelo se ha utilizado para explicar la segregación profesional de las mujeres y su infrarrepresentación en los estudios relacionados con la tecnología. El modelo propone que la manifestación de un comportamiento es el resultado de una multiplicación entre tres componentes: la necesidad de logro (motivos, MO), la probabilidad de éxito (expectativas, EX) y el valor de incentivo (VI) de la tarea. Las personas sólo se matriculan en estudios en los que creen que pueden tener éxito porque disponen de las habilidades y/o competencias para realizarlos (expectativas de éxito) y porque los valoran mucho (valor subjetivo de la tarea).

Para medir estas variables, en la enseñanza primaria las opciones de respuesta eran "Sí" o "No" para garantizar la comprensión de los sujetos y la fiabilidad de sus respuestas. En los niveles superiores (secundaria, universidad y graduados), las respuestas utilizadas consistieron en una escala de Likert de 5 puntos, que iba de 1 (totalmente en desacuerdo) a 5 (totalmente de acuerdo).

- Teoría del Rol Social [27–29]: este modelo pretende encontrar el origen de los prejuicios hacia las mujeres que ocupan puestos de liderazgo. El objetivo de este modelo es obtener información sobre las creencias de los participantes acerca de las tareas y actividades que consideran propias de los hombres, de las mujeres o de ambos. Socialmente existe una incongruencia entre el papel laboral tradicional de una mujer y un puesto de liderazgo. Esto significa que muchas mujeres no acceden a puestos de liderazgo o no permanecen en ellos mucho tiempo. Tradicionalmente, a las mujeres se les han atribuido funciones relacionadas con el cuidado y las emociones, mientras que a los hombres se les han atribuido funciones relacionadas con el logro, la asertividad y el poder.
- Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género [30–33]: este modelo explica que los estereotipos de género tienen una estructura multicomponente vinculada a rasgos de personalidad y comportamientos relacionados con el rol y las profesiones. Esto significa que cuanto mayor sea la coincidencia entre la imagen que una persona tiene de sí misma y la imagen prototípica de alguien que trabaja en un campo determinado, más probable será que esa persona elija esa profesión. Aplicado a las mujeres, esto significa que encuentran pocas similitudes entre ellas y la imagen prototípica de una persona que trabaja en el campo STEM. La causa principal de este problema es la falta de modelos femeninos en el ámbito científico-tecnológico, lo que no anima a las mujeres a optar por estos campos. Para ello, este constructo está formado por dos componentes: Estereotipos sobre Competencias y Capacidades (ECC) y Estereotipos sobre Responsabilidad Social (ERS).

Para medir estas variables, en educación primaria las opciones de respuesta fueron "Sí" o "No" para asegurar la comprensión de los sujetos y la fiabilidad de sus respuestas. En los niveles superiores (secundaria, universidad y graduados) las respuestas utilizadas consistieron en una escala de Likert de 5 puntos, que iba de 1 (totalmente en desacuerdo) a 5 (totalmente de acuerdo).

- Entorno educativo [34]: para identificar posibles problemas estructurales en los planes de estudio desde primaria hasta la universidad relacionados con la baja atracción del alumnado hacia las carreras STEM, se han incluido en las encuestas preguntas adicionales como número de laboratorios en el centro, número de prácticas de laboratorio realizadas, uso de lenguaje inclusivo, etc.

Estas teorías se aplican a las encuestas como se muestra en la Figura 2. 6. Cada teoría se aplica a un constructo, y cada constructo se compone de una serie de preguntas. En este sentido se han consultado las referencias [22-26] para formular las preguntas de las encuestas con el fin de analizar la “Teoría de la

Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro”. Las preguntas de las encuestas relacionadas con la “Teoría del Rol Social” se han obtenido de [27-29], y las preguntas que permiten evaluar la “Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género” se han obtenido de [30-33]. Por último, la referencia [34] se utilizó como base para elaborar los constructos relacionados con el entorno educativo.

Modelo 1: Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro

- Motivos (MO): Las materias STEM son divertidas; Entiendo las asignaturas STEM; Saco buenas notas en las asignaturas STEM.
- Expectativas (EX): Si me esfuerzo en las asignaturas STEM, aprenderé y sacaré buenas notas; Puedo estudiar lo suficiente para aprobar el próximo examen de asignaturas STEM.
- Valor de incentivo (VI): Ser bueno en STEM significa mucho para mí; Ser bueno en STEM me ayudará en el resto de los años en mis estudios; Lo que aprendemos sobre STEM es beneficioso para mi vida; Los conocimientos que tengo de STEM me ayudarán en mi futuro trabajo.

Modelo 2: Teoría del Rol Social

- Quién es responsable de:
 - Pilotar aviones.
 - Dedicarse a la ingeniería.
 - Cuidar enfermos.
 - Coser.
 - etc.

Modelo 3: Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género

- Estereotipos sobre Competencias y Capacidades (ECC): Los hombres están más cualificados que las mujeres para realizar tareas técnicas y mecánicas; las mujeres están más capacitadas para realizar tareas de organización y cooperación, etc..
- Estereotipos sobre Responsabilidad Social (ERS): Los hombres son responsables de mantener económicamente a sus familias; las mujeres deben ocuparse de la casa y de sus hijos.

Entorno Educativo

- ¿Utilizas el lenguaje inclusivo en la enseñanza?
- ¿Existe un laboratorio STEM en tu centro de primaria?; ¿Existe un laboratorio STEM en tu centro de secundaria?
- ¿Cuántas prácticas has realizado en el laboratorio?; ¿Cuántas veces has ido con tus alumnos al laboratorio desde que empezaste a trabajar en este centro educativo?
- ¿Crees que esto puede tener alguna consecuencia (positiva o negativa) en la sociedad?
- ¿Qué te motivó a elegir la carrera universitaria que has estudiado?

Figura 2. 6. Metodología ALAS: Base multimodelo utilizada para definir las encuestas.

2.2.1.2 Materiales: Talleres participativos

Además de distribuir encuestas, en los centros educativos de primaria y secundaria se han realizado talleres participativos. El objetivo de estos talleres participativos es introducir al alumnado en las carreras STEM, a través de prácticas tecnocientíficas. La complejidad de estos talleres participativos se adapta a la edad del alumnado. Según la “Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género” explicada anteriormente, los estereotipos influyen en la

elección de una profesión. Por esta razón, con el fin de atraer a las niñas al ámbito STEM, mujeres relacionadas con este ámbito han sido las responsables de dirigir los talleres. Los talleres participativos están dirigidos por alumnas de la Universidad de Huelva (Ingenieras Químicas Industriales e Ingenieras Electrónicas Industriales). La Figura 2. 7 muestra cómo las alumnas de Ingeniería Química Industrial enseñan el taller de química. En este taller elaboran slime y gel hidroalcohólico.



Figura 2. 7. Taller participativo de Química: (a) Elaboración de slime; (b) Elaboración de gel hidroalcohólico.

La Figura 2. 8 muestra cómo las alumnas de Ingeniería Electrónica Industrial muestran un taller participativo basado en tecnología de hidrógeno y energías renovables y otro taller participativo sobre el microcontrolador Arduino.



Figura 2. 8. Talleres participativos basados en Energías Renovables y Electrónica Industrial: (a) Tecnología de Hidrógeno y Energías Renovables; (b) Microcontrolador Arduino.

2.2.2 Estadística inferencial: Prueba de fiabilidad y coherencia

La información obtenida se organizó en cuatro bases de datos, una para cada nivel educativo. Los análisis se realizaron en SPSS-21. En primer lugar, se analizó la validez de los constructos: Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro (variables: motivos, MO; expectativas, EX; y valor de

incentivo, VI); Modelo 2) Teoría del Rol Social (TS); y Modelo 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género (variables: ECC y ERS), se verificaron mediante el análisis de los indicadores de validez convergente y discriminante de las variables cuantitativas. El análisis unidimensional mostró que el valor del primer componente para todos los constructos era superior a 1. Para medir la validez convergente y discriminante, se utilizaron otros indicadores, como la varianza media extraída (en inglés: *Average Variance Extracted* o AVE) y la raíz cuadrada de la varianza. El AVE de los constructos se situó por encima de los umbrales de 0.53 (excepto para los constructos MO y VI de la educación primaria; 0.50 y 0.48 respectivamente) y se cumplieron los criterios de consistencia interna para la mayoría de los constructos. En el Anexo IV.A se ofrecen más detalles sobre estas escalas, incluidas las cargas factoriales de cada ítem, el alpha de Cronbach, el AVE y el análisis de la validez discriminante.

En segundo lugar, para obtener información sobre cada constructo en función del sexo y la etapa educativa, se realizó un análisis de frecuencias, Anexo IV.B. Las tablas de frecuencias muestran el número y porcentaje de casos de cada valor observado para las variables.

En tercer lugar, para determinar la independencia entre la variable sexo y el resto de variables, se calculó el coeficiente Chi-cuadrado (χ^2) para cada nivel educativo. En este análisis, la variable sexo actúa como variable independiente y el resto como variables dependientes. El objetivo de esta prueba es contrastar la relación de dependencia mediante el nivel de significación; si el valor de significación es mayor o igual a Alfa (0.05), se determina que no existe dependencia; pero si es menor, se acepta la dependencia. En el Anexo IV.C se ofrecen más detalles sobre este análisis.

2.3 Resultados

Los resultados se clasifican por grupo objetivo y por constructo. De esta manera, será más fácil identificar dónde y cuándo la neutralidad que el alumnado de temprana edad tiene hacia las carreras STEM se desdibuja y la brecha entre el número de alumnos en comparación con el número de alumnas que prefieren carreras STEM se vuelve significativamente alto.

En primer lugar, en relación con el impacto del estudio, la Figura 2. 9 muestra el número objetivo (en azul) y el número alcanzado (en naranja con etiquetas) de participantes finalmente inscritos en la investigación.

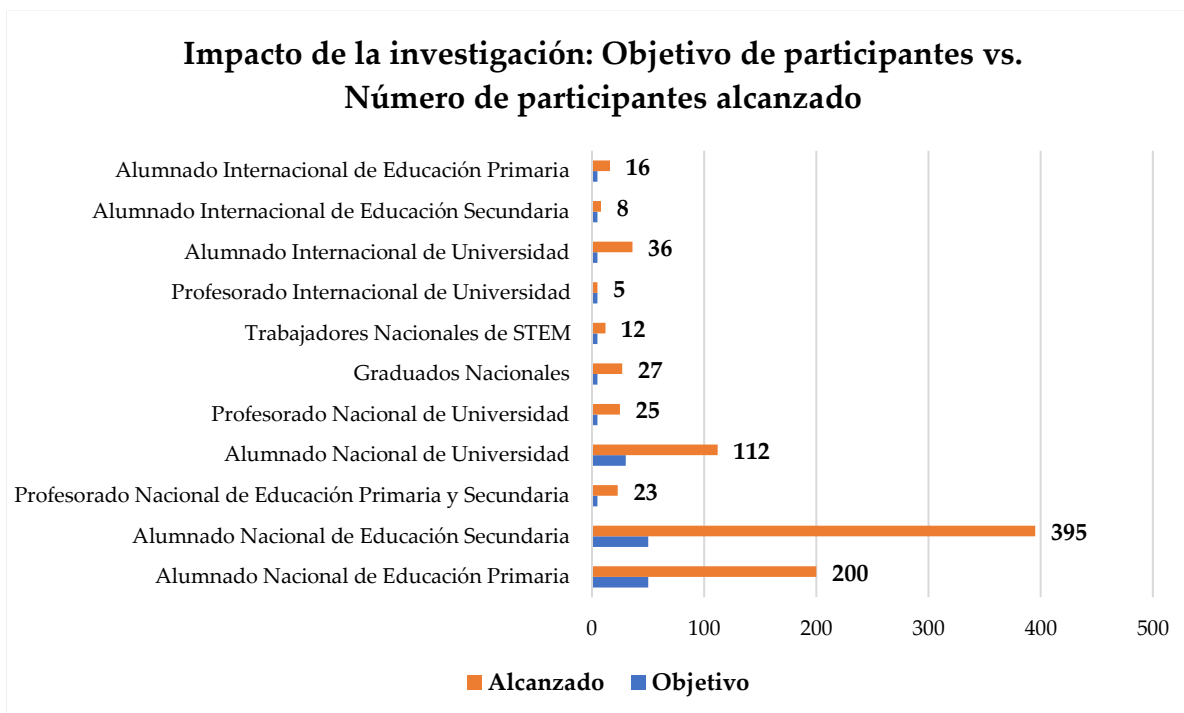


Figura 2. 9. Indicador cuantitativo de impacto. Grupos destinatarios y alcance real.

En base a lo anterior, el objetivo inicial era alcanzar los 150 participantes, mientras que finalmente la investigación ha contado con un total de 858 participantes (un 472% más de lo previsto). En todos los casos, las encuestas fueron anónimas, sólo se preguntó el sexo, la edad y el centro educativo.

2.3.1 Educación Primaria y Educación Secundaria

2.3.1.1 Alumnado de Educación Primaria

Los resultados obtenidos en las variables MO, EX y VI, del Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro, no muestran diferencias significativas entre los sexos. Los porcentajes de respuestas de chicas y chicos a los distintos ítems son similares (Figura 2. 10). Del mismo modo, se destaca que no existe dependencia entre estas variables y la variable sexo, ya que todos los valores de χ^2 fueron superiores a 0.05 (Anexo IV.C).

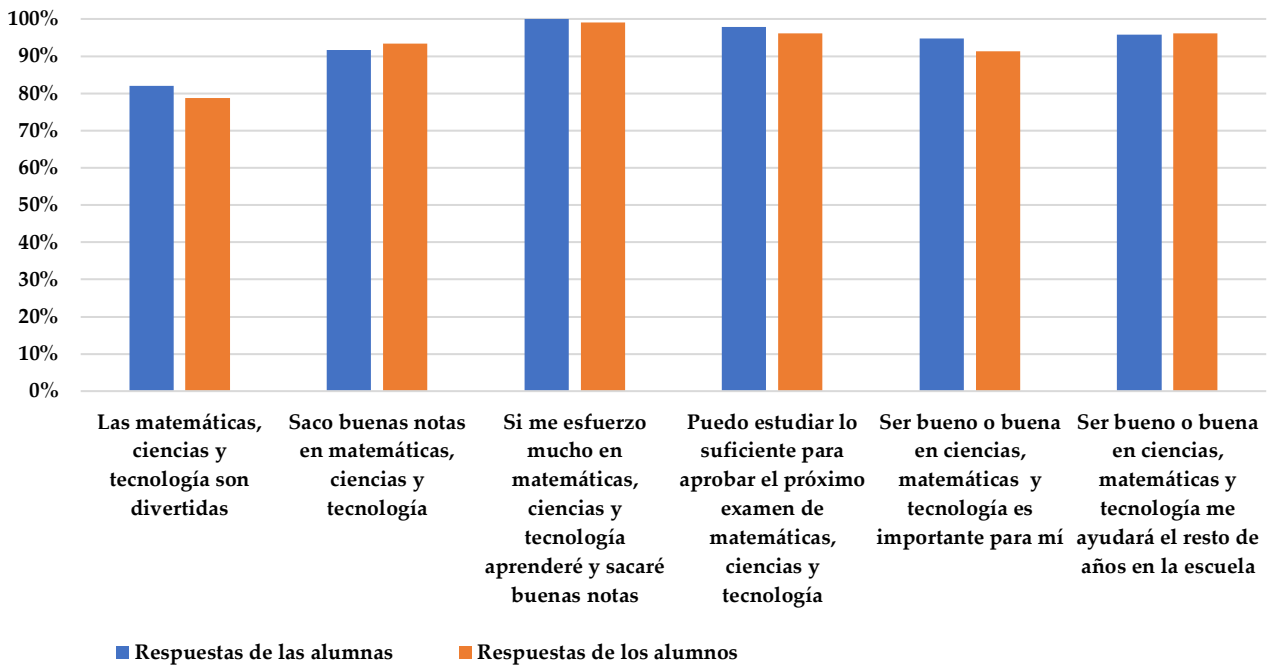
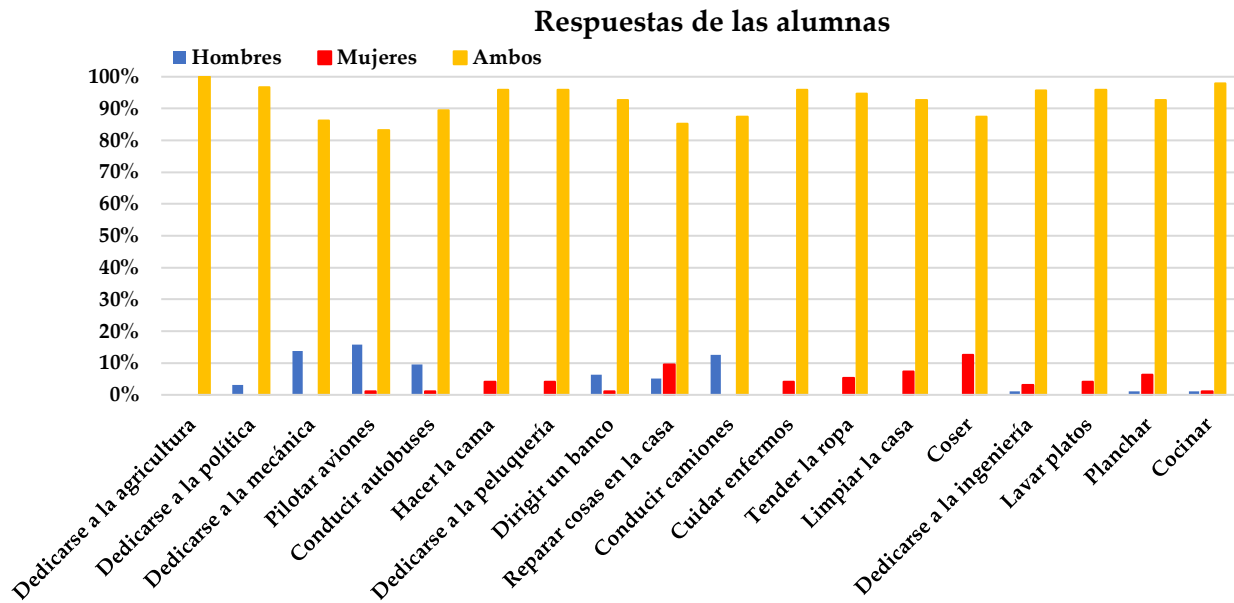


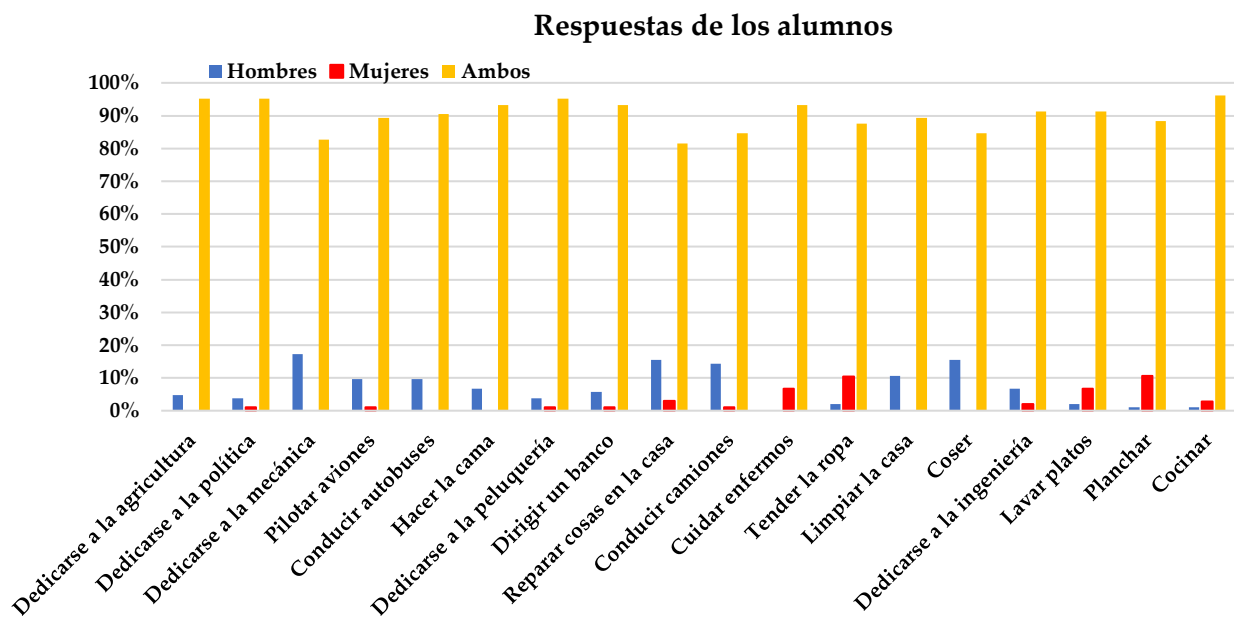
Figura 2. 10. Educación primaria. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro.

Los resultados obtenidos en la variable RS, del Modelo 2) Teoría del Rol Social, no muestran diferencias significativas entre los sexos. Este constructo plantea la pregunta "¿Quién es el responsable de estas actividades?". Los porcentajes de respuestas de chicas y chicos fueron similares (Figura 2. 11). Del mismo modo, se demostró que sólo el ítem "¿Quién debe dedicarse a la agricultura?" es dependiente de la variable sexo ($\chi^2 = 0.03$), ya que para el resto de los ítems los valores de χ^2 fueron superiores a 0.05 (Anexo IV.C). No obstante, cabe destacar que el ítem "Cuidar enfermos" fue atribuido en un alto porcentaje por los alumnos a ambos sexos y en un bajo porcentaje al sexo femenino, pero ninguna persona encuestada lo atribuyó a los hombres. Del mismo modo, los ítems "Dedicarse a la agricultura", "... a la mecánica" o "Conducir camiones" no fueron atribuidos por nadie al sexo femenino.

Por otro lado, los ítems "Cuidar enfermos", "Hacer la cama", "Tender la ropa", "Limpiar la casa" o "Coser" fueron atribuidos en un alto porcentaje por las alumnas a ambos sexos y en un bajo porcentaje al sexo femenino, pero ninguna persona encuestada lo atribuyó a los hombres.



(a)



(b)

Figura 2. 11. Educación primaria. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 2) Teoría del Rol Social: (a) Respuestas de las alumnas; (b) Respuestas de los alumnos.

En relación al del Modelo 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género, los datos muestran que las variables ECC y ERS varían en función del sexo, Figura 2. 12. Los porcentajes de respuestas afirmativas de los alumnos muestran que consideran a su propio sexo "más capaz de realizar tareas técnicas y mecánicas" y al sexo opuesto (femenino) "más capaz de realizar tareas organizativas y cooperativas." En cuanto a la pregunta relacionada con las especialidades de estudio (STEM vs. ciencias sociales), los alumnos responden

con mayor porcentaje que "el rendimiento de sus compañeras es mejor en carreras relacionadas con las humanidades y las ciencias sociales." Por último, se observa una diferencia significativa en las respuestas al ítem "Los hombres son los responsables de mantener económicamente a sus familias". Además, al ítem "Las mujeres deben ocuparse de la casa y del cuidado de sus hijos", sólo responden afirmativamente el 11% de las alumnas encuestadas, mientras que este porcentaje se triplica en el caso de los alumnos, llegando hasta el 31%. Por otra parte, se demostró la dependencia de algunos ítems de la variable sexo (por ejemplo: "Los hombres hacen mejor las tareas técnicas y mecánicas que las mujeres", "A las mujeres se les dan mejor estudiar carreras de letras (como: Idiomas, Historia, Magisterio, etc) que a los hombres", "A los hombres se les dan mejor estudiar carreras relacionadas con la ciencia que a las mujeres (ejemplo: Informática, Electrónica, etc)" y " Las mujeres deben ocuparse de la casa y del cuidado de sus hijos", ya que los valores de χ^2 fueron inferiores a 0.05 (Anexo IV.C).

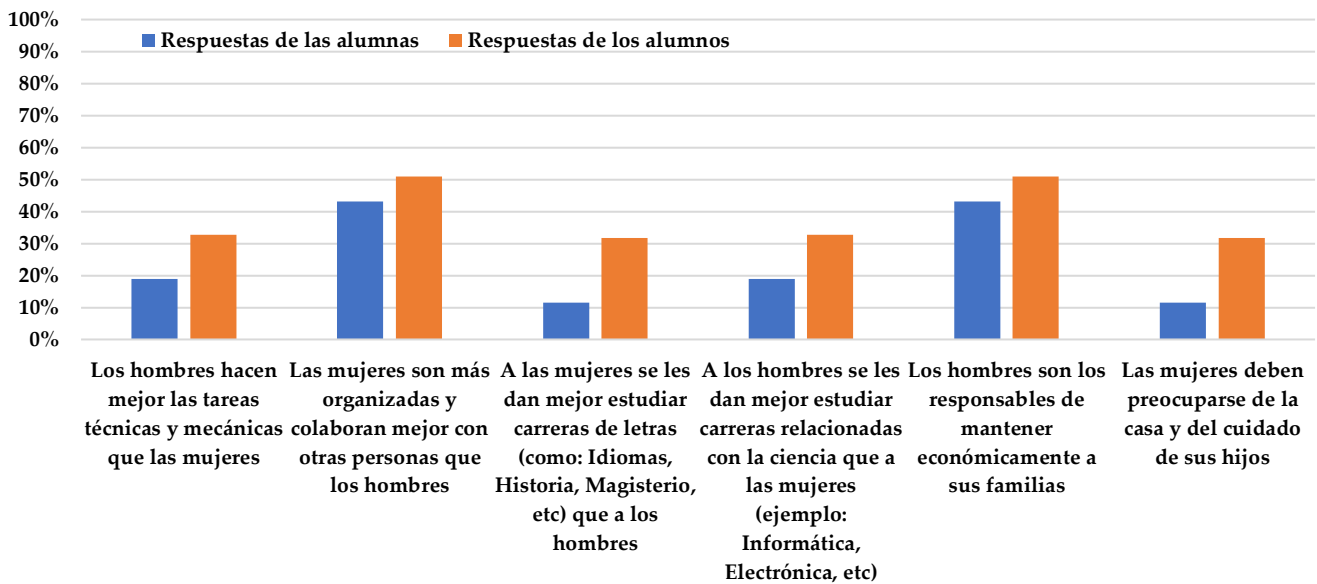


Figura 2. 12. Educación primaria. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 3) Teoría de los Estereotipos de Género.

En cuanto al entorno educativo, los datos revelan que un gran porcentaje de centros educativos no están equipados con un laboratorio de ciencias (83.4%), por lo que el 98.5% de los participantes en educación primaria no lo han visitado en el último año. En cuanto al sexo del profesorado de ciencias y matemáticas, los datos muestran que en la mayoría de los casos es femenino (87.4% y 78.9%) (Tabla 2. 3).

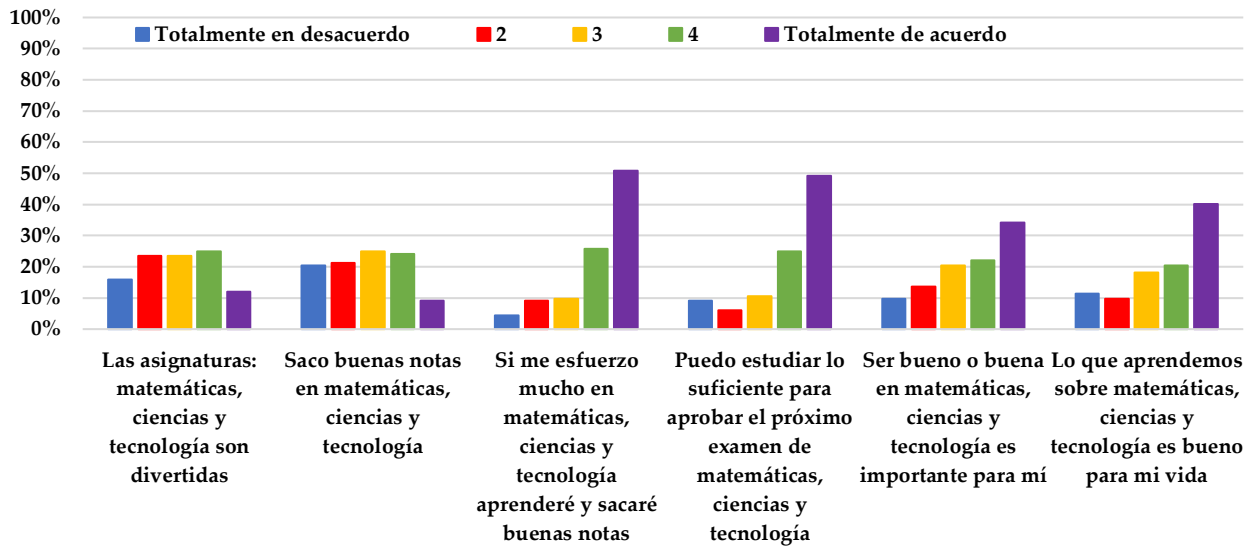
Tabla 2. 3. Entorno educativo en Educación Primaria.

¿En tu cole o clase hay laboratorio de ciencias?	Sí (%)	No (%)
	16.60%	83.40%
¿Cuántas veces has ido al laboratorio desde que empezaste en el cole?	Menos de 10 (%)	Más de 10 (%)
	98.50%	1.50%
¿Tu maestro o maestra de ciencias es hombre o mujer?	Hombres (%)	Mujeres (%)
	12.60%	87.40%
¿Tu maestro o maestra de matemáticas es hombre o mujer?	Hombres (%)	Mujeres (%)
	21.10%	78.90%

2.3.1.2 Alumnado de Educación Secundaria

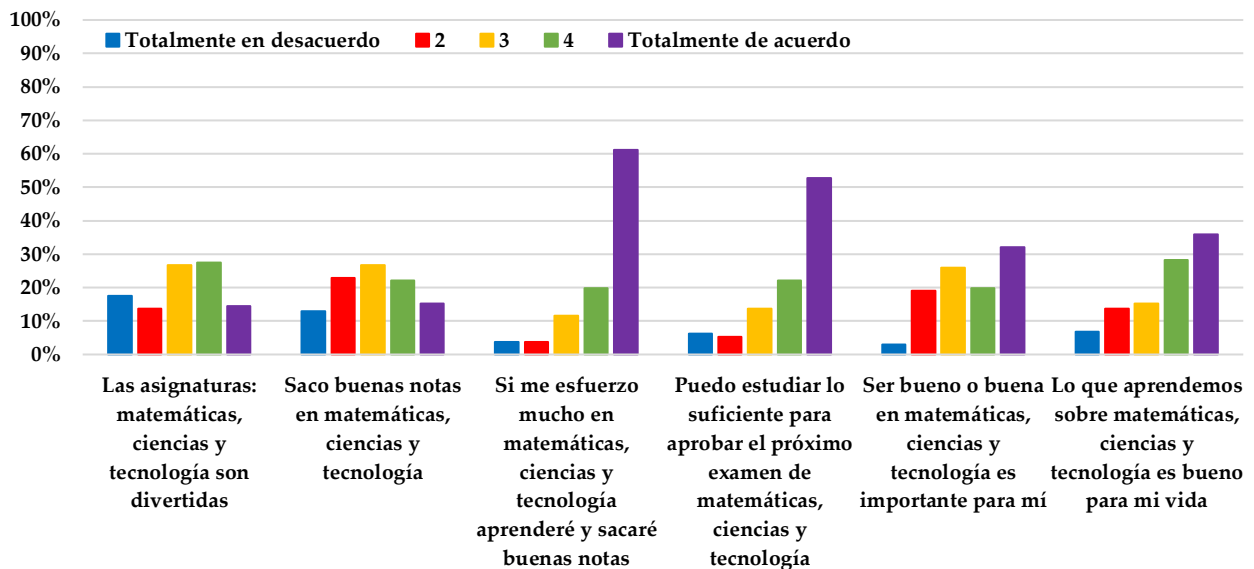
Los resultados obtenidos en las variables MO, EX y VI, del Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro, no muestran diferencias significativas entre ambos sexos. Aunque existe una ligera tendencia de las alumnas a responder negativamente (en comparación con sus compañeros) a los ítems " Las asignaturas: matemáticas, ciencias y tecnología son divertidas", "Saco buenas notas en matemáticas, ciencias y tecnología" y " Si me esfuerzo mucho en matemáticas, ciencias y tecnología aprenderé y sacaré buenas notas", el porcentaje de respuestas "Totalmente de acuerdo" en los ítems anteriores es mayor en los chicos que en las chicas (Figura 2. 13) y las medias de las respuestas masculinas a estos ítems son superiores a las de las alumnas (Anexo IV.B). También se demostró que un ítem de la variable MO, "Las asignaturas: matemáticas, ciencias y tecnología son divertidas ", es dependiente de la variable sexo, ya que el valor de χ^2 fue inferior a 0.05 (Anexo IV.C).

Respuestas de las alumnas



(a)

Respuestas de los alumnos

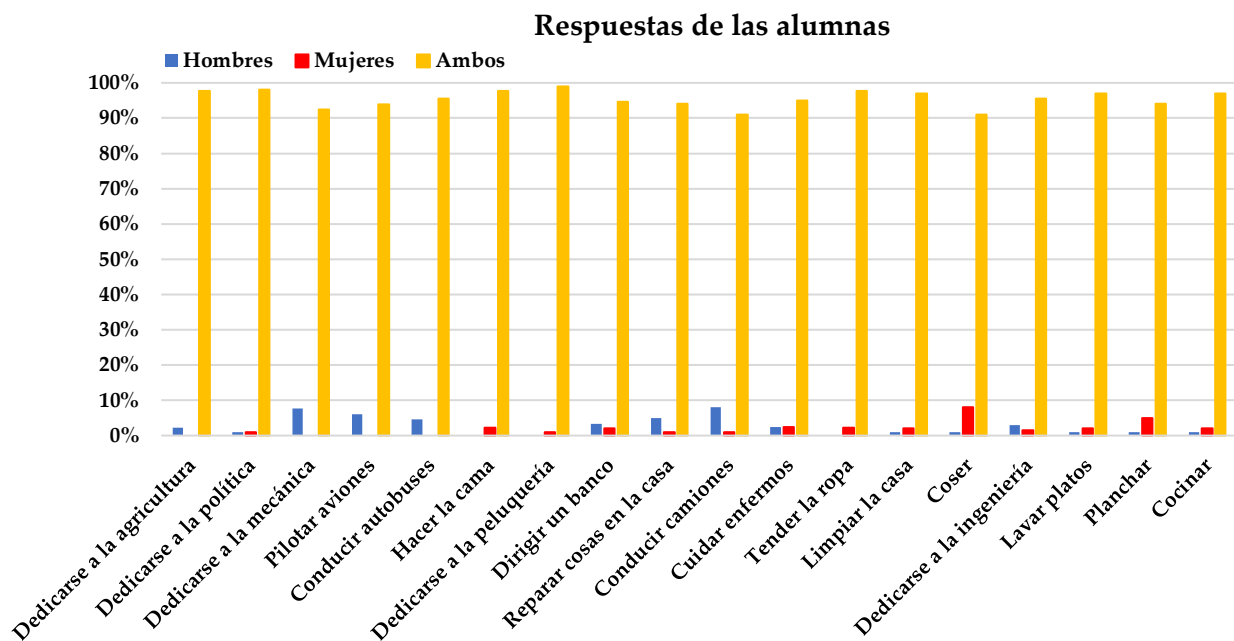


(b)

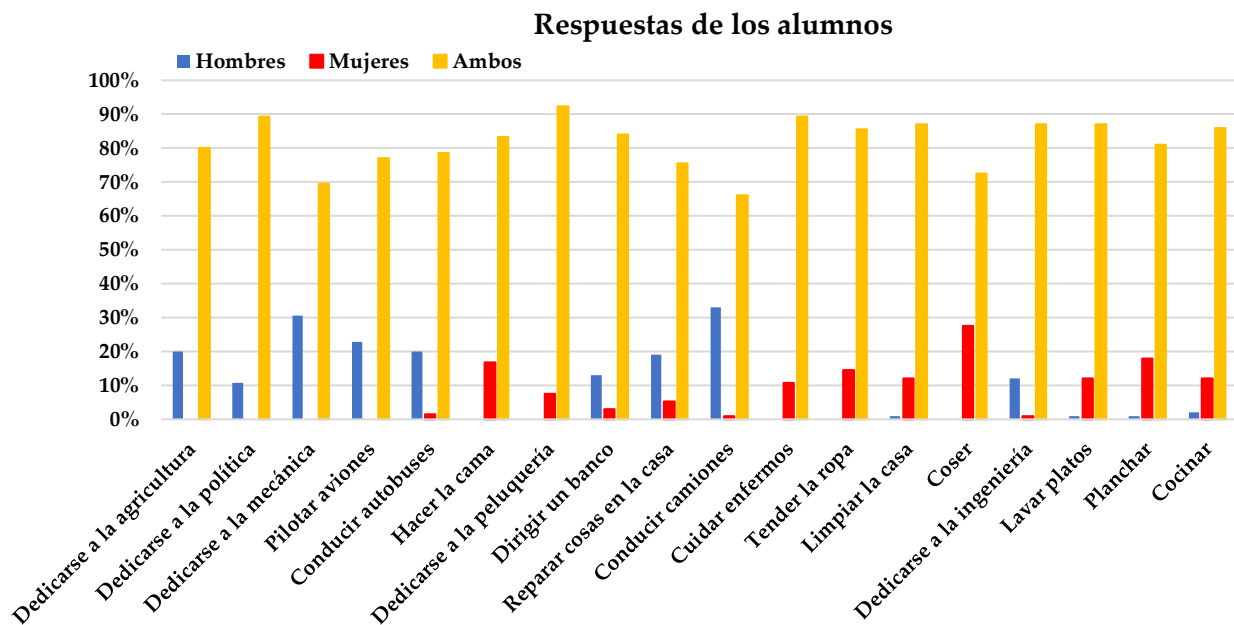
Figura 2. 13. Educación secundaria. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro: (a) Respuestas de las alumnas; (b) Respuestas de los alumnos.

Los resultados obtenidos en la variable RS del Modelo 2) Teoría del Rol Social, muestran diferencias significativas entre los sexos. Los porcentajes de respuestas de las alumnas al adjudicar la realización de las diferentes tareas a "Ambos sexos" fueron superiores a los de los alumnos; así como los porcentajes de respuestas de los alumnos al asignar las tareas domésticas y de cuidado de personas al sexo femenino (Figura 2. 14). Del mismo modo, se demostró que existe dependencia entre todos los ítems de esta variable y la variable sexo, ya que los valores de χ^2 fueron inferiores a 0.05 (Anexo IV.C). Señalar que ningún

alumno o alumna atribuyó los ítems: "Hacer la cama", "Dedicarse a la peluquería" y "Tender la ropa" al sexo masculino; tampoco atribuyeron al femenino "Dedicarse a la agricultura", "... a la mecánica" o "Pilotar aviones".



(a)

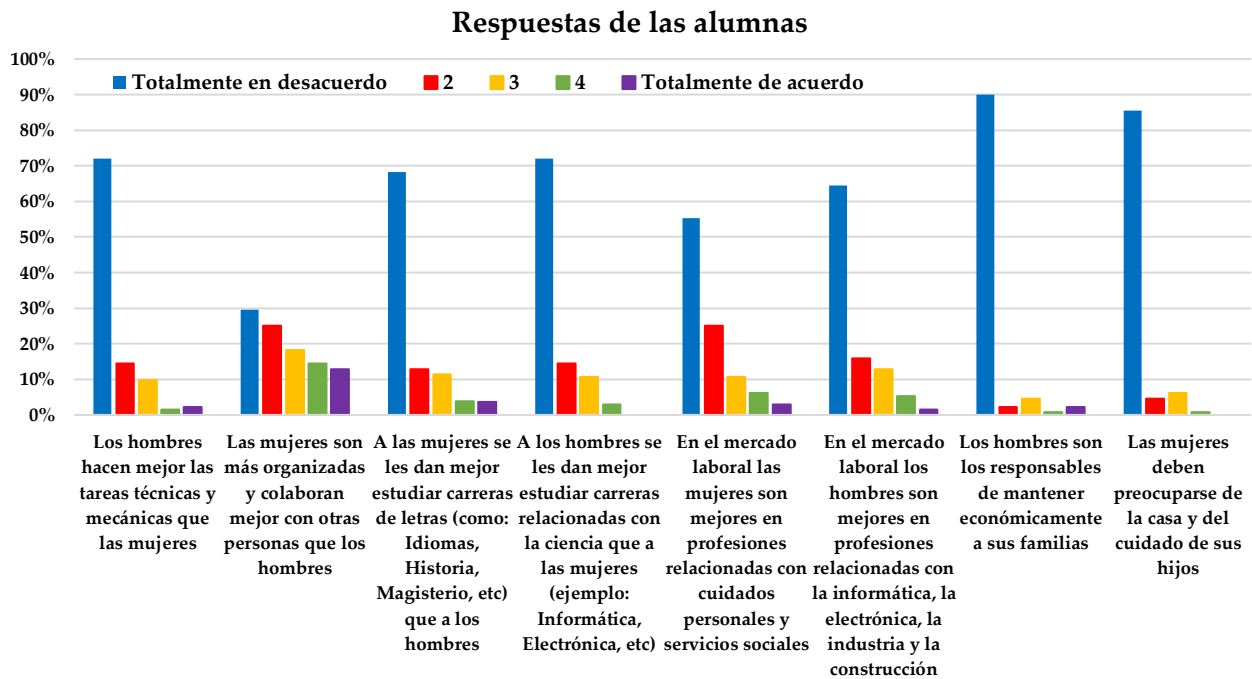


(b)

Figura 2. 14. Educación secundaria. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 2) Teoría del Rol Social: (a) Respuestas de las alumnas; (b) Respuestas de los alumnos.

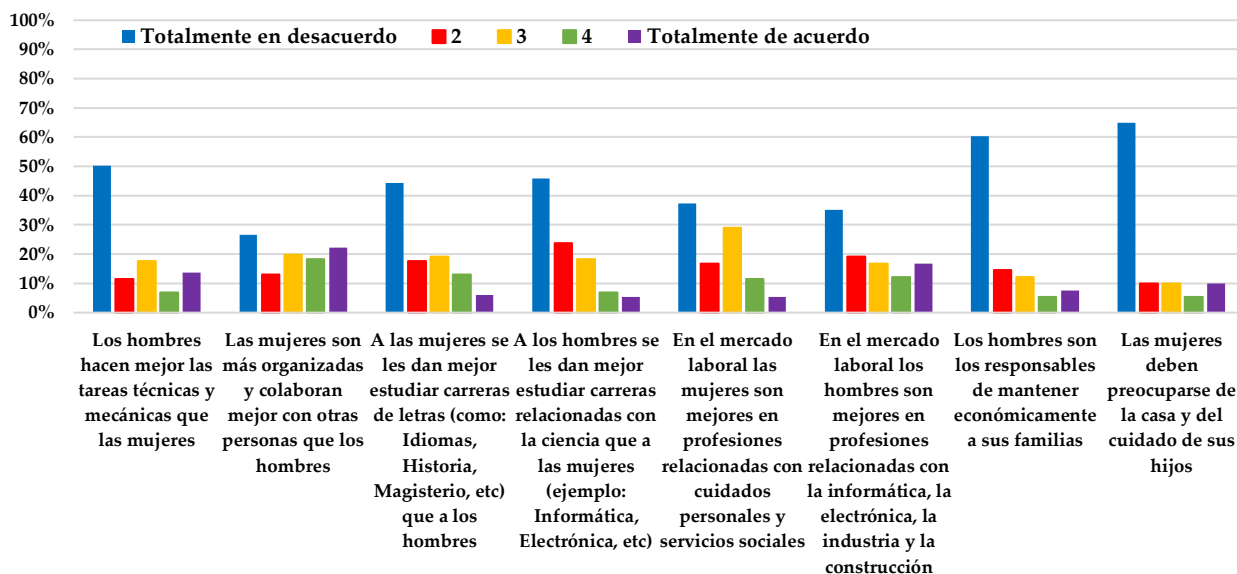
En cuanto al constructo basado en el Modelo 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género, los datos muestran que las variables ECC y ERS varían en función del sexo. Las respuestas de los alumnos indican que están de

acuerdo en mayor medida que sus compañeros en los ítems preguntados (Figura 2. 15). En el caso de la variable ECC, la media de las respuestas dadas por los alumnos ($Mean_{male}$) al ítem "Los hombres hacen mejor las tareas técnicas y mecánicas que las mujeres" fue de 2.22, mientras que la media de las alumnas ($Mean_{female}$) fue de 1.48. Los alumnos también consideran en mayor medida que "A los hombres se les dan mejor estudiar carreras relacionadas con la ciencia que a las mujeres" ($Mean_{male} = 2.02$; $Mean_{female} = 1.45$). Y en el ítem "En el mercado laboral los hombres son mejores en profesiones relacionadas con la informática, la electrónica, la industria y la construcción" la media de los alumnos fue superior a la de las alumnas ($Mean_{male} = 2.56$; $Mean_{female} = 1.64$) (Anexo IV.B). En cuanto a la variable ERS, las medias de las respuestas masculinas fueron superiores a las de las femeninas, lo que indica que están más de acuerdo que sus compañeros en que "mantener económicamente a la familia" corresponde al sexo masculino ($Mean_{male} = 1.85$; $Mean_{female} = 1.23$), mientras que "cuidar del hogar y de los hijos" es responsabilidad de las mujeres ($Mean_{male} = 1.85$; $Mean_{female} = 1.31$) (Anexo IV.B). Finalmente, los datos demostraron la dependencia de los ítems del constructo Estereotipos de Género respecto a la variable sexo, ya que los valores de χ^2 fueron inferiores a 0.05, excepto en el ítem de la variable ECC: "Las mujeres son más organizadas y colaboran mejor con otras personas que los hombres", ya que el valor de χ^2 fue de 0.06 (Anexo IV.C).



(a)

Respuestas de los alumnos



(b)

Figura 2. 15. Educación secundaria. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género: (a) Respuestas de las alumnas; (b) Respuestas de los alumnos.

En cuanto al entorno educativo, los datos revelan que la mayoría de los centros educativos visitados disponen de laboratorio de ciencias (88.2%), aun así, el 75.3% del alumnado lo ha visitado menos de 10 veces en el último año. En cuanto al sexo del profesorado de ciencias, la mayoría indica que es femenino (67.3%), sin embargo, en las asignaturas de matemáticas y tecnología, los datos muestran que son masculinos (57% y 63.1%) (Tabla 2. 4).

Tabla 2. 4. Entorno educativo en Educación Secundaria.

¿En tu instituto hay laboratorio de ciencias?	Sí (%)	No (%)
	88.20%	11.80%
¿Cuántas veces has ido al laboratorio desde que empezaste en el instituto?	Menos de 10 (%)	Más de 10 (%)
	75.30%	24.70%
¿Tu profe de ciencias es hombre o mujer?	Hombres (%)	Mujeres (%)
	32.70%	67.30%
¿Tu profe de matemáticas es hombre o mujer?	Hombres (%)	Mujeres (%)
	57%	43%
¿Tu profe de tecnología es hombre o mujer?	Hombres (%)	Mujeres (%)
	63.10%	36.90%

2.3.1.3 Profesorado de Educación Primaria y Secundaria

Las principales preguntas formuladas al profesorado estaban relacionadas con el entorno educativo, como se muestra en la Figura 2. 16. Podemos observar que en casi todos (70%) los centros educativos visitados hay un laboratorio de ciencias, pero lamentablemente menos del 35% del profesorado encuestado ha llevado al alumnado al laboratorio. A pesar de que en la gran mayoría de centros educativos de educación primaria y secundaria hay laboratorios de ciencias, más de la mitad del profesorado encuestado no prepara experimentos prácticos para su alumnado en los laboratorios de ciencias.

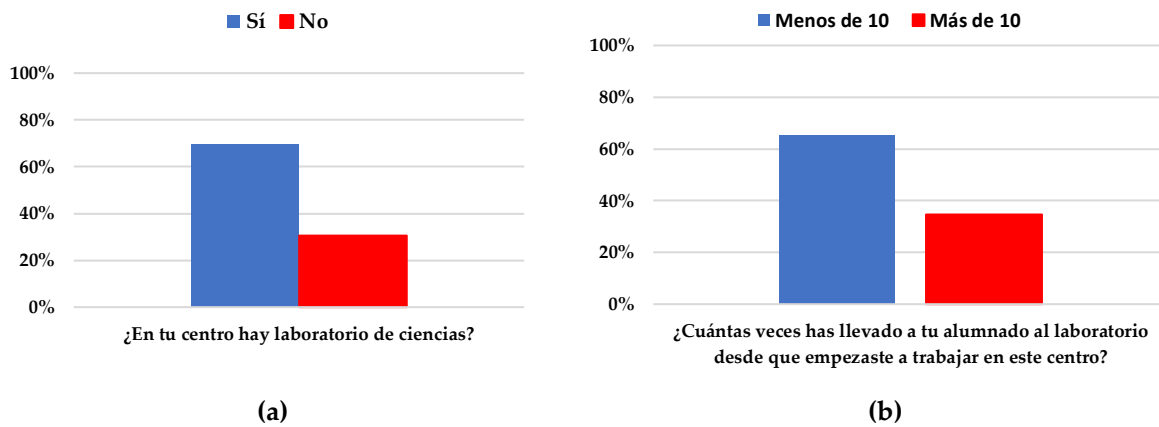


Figura 2. 16. Respuestas del profesorado de primaria y secundaria sobre el entorno educativo.

De toda la muestra del profesorado consultado en las encuestas, el 78.3% son mujeres y el 21.7% hombres. Otra pregunta adicional que se les realizó fue “¿Mientras impartes docencia utilizas el lenguaje inclusivo?”. Algunas respuestas sobre el uso o no del lenguaje inclusivo fueron: "Porque no creo que sea necesario", "No es un hábito para mí", "Creo que es imprescindible porque todavía hay mucha desigualdad de género", "Para que los alumnos adquieran este lenguaje" o "Para normalizarlo".

También se evalúa el grado de concienciación del profesorado sobre la escasa participación de las alumnas en el campo de la ciencia y la tecnología, tal y como se muestra en la Figura 2. 17. En cuanto a las respuestas, se puede observar que, en educación primaria y secundaria, las profesoras están más preocupadas que los profesores por el descenso de alumnas que eligen carreras STEM, pero los profesores son más sensibles hacia la brecha de género en las carreras STEM.

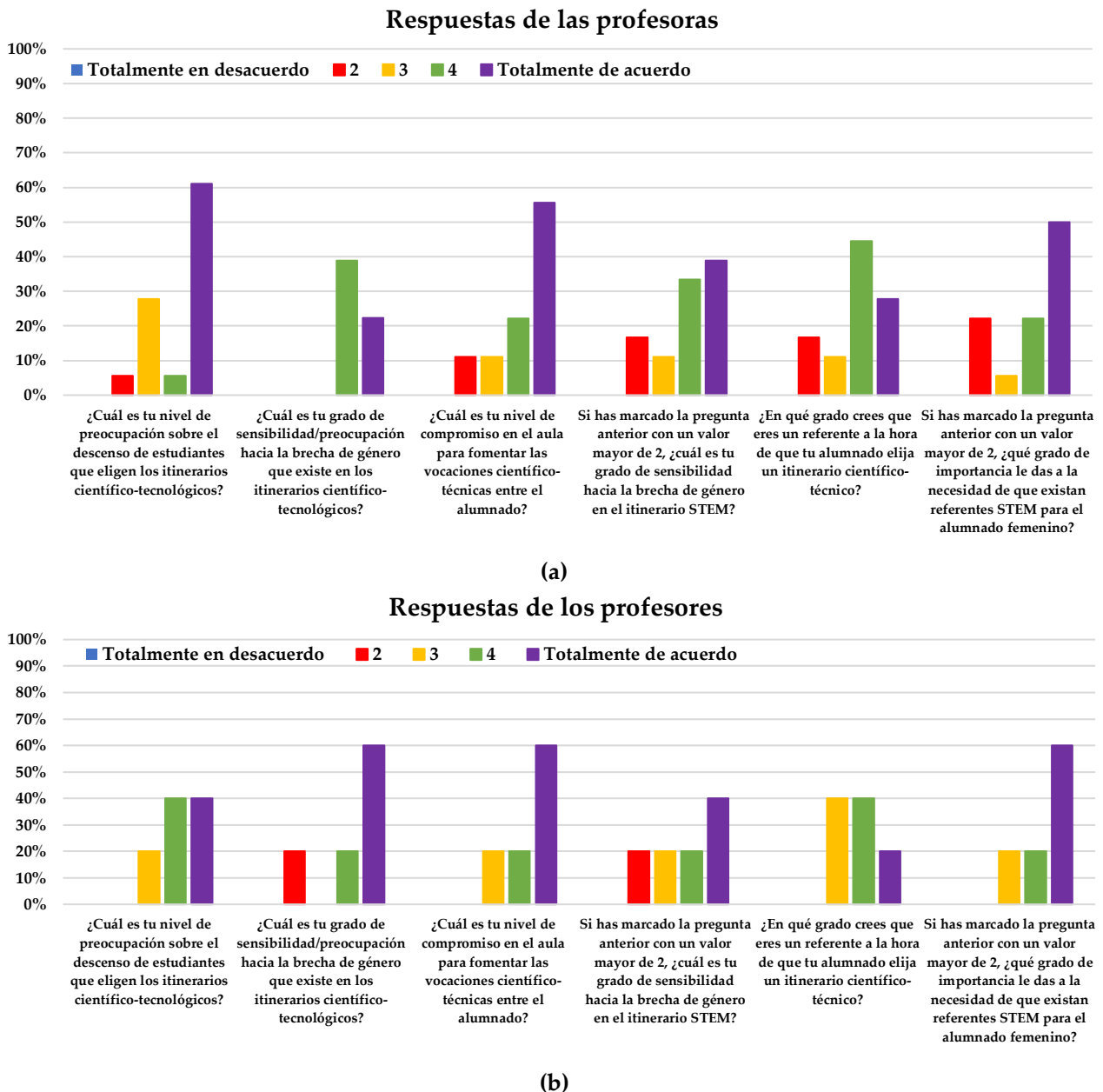


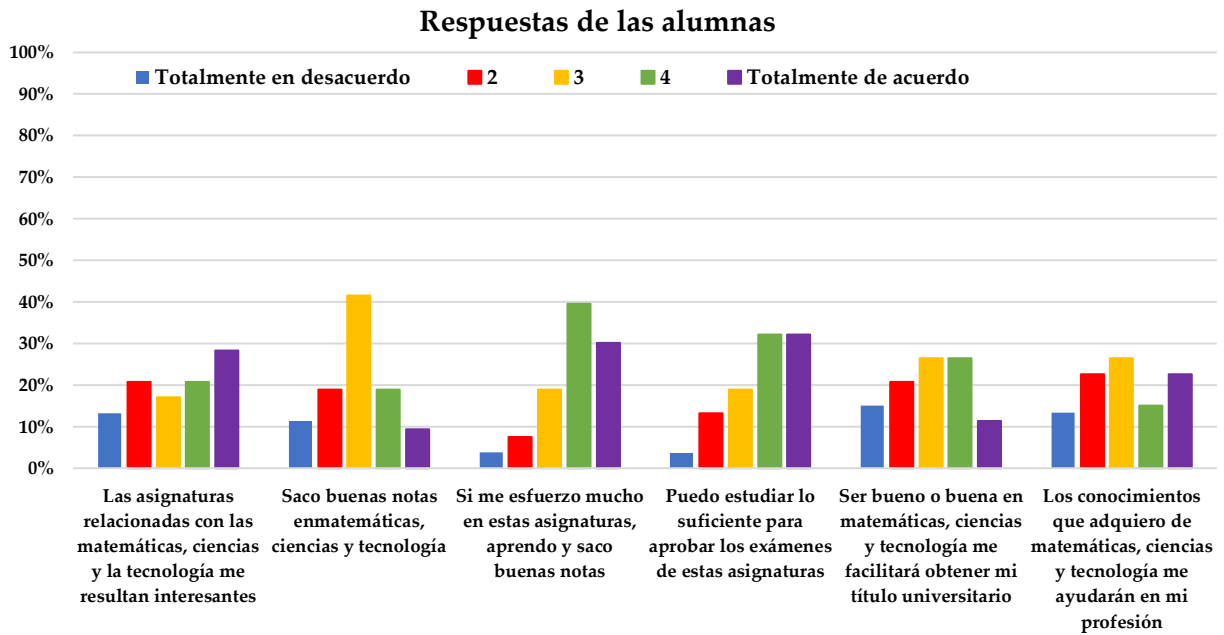
Figura 2. 17. Respuestas del profesorado de primaria y secundaria sobre el grado de preocupación sobre la escasa participación de las alumnas en el campo de la ciencia y la tecnología: (a) Respuestas de las profesoras; (b) Respuestas de los profesores.

2.3.2 Universidad

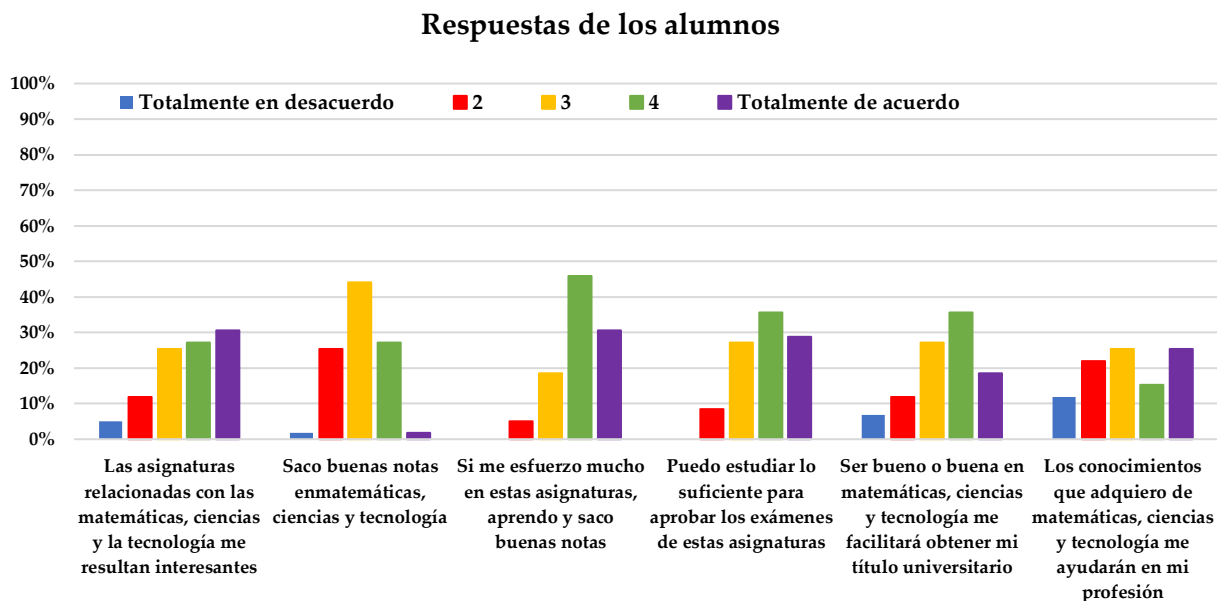
A nivel universitario, la investigación se extendió tanto a alumnado como a profesorado de distintos campos; no sólo de ingeniería, sino también del ámbito científico, social y económico.

2.3.2.1 Alumnado Universitario

Los resultados obtenidos en las variables MO y EX, del Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro, no muestran diferencias significativas entre ambos sexos, aunque las medias de las respuestas de los alumnos son algo superiores a las de las alumnas (Anexo IV.B). Sin embargo, hay dos ítems de la variable VI que sí muestran diferencias en las respuestas ofrecidas por las alumnas y los alumnos, ya que los alumnos respondieron con un mayor porcentaje de respuestas afirmativas que " Ser bueno o buena en matemáticas, ciencias y tecnología es importante para mí " ($Mean_{male} = 3.47; Mean_{female} = 2.98$) y que "Los conocimientos que adquiero de matemáticas, ciencias y tecnología me ayudarán en mi profesión" ($Mean_{male} = 3.46; Mean_{female} = 2.96$) (Anexo IV.B y Figura 2. 18). Sin embargo, el ítem MO es dependiente de la variable sexo ("Comprendo bien dichas asignaturas") ya que el valor de χ^2 fue inferior a 0.05 (Anexo IV.C).



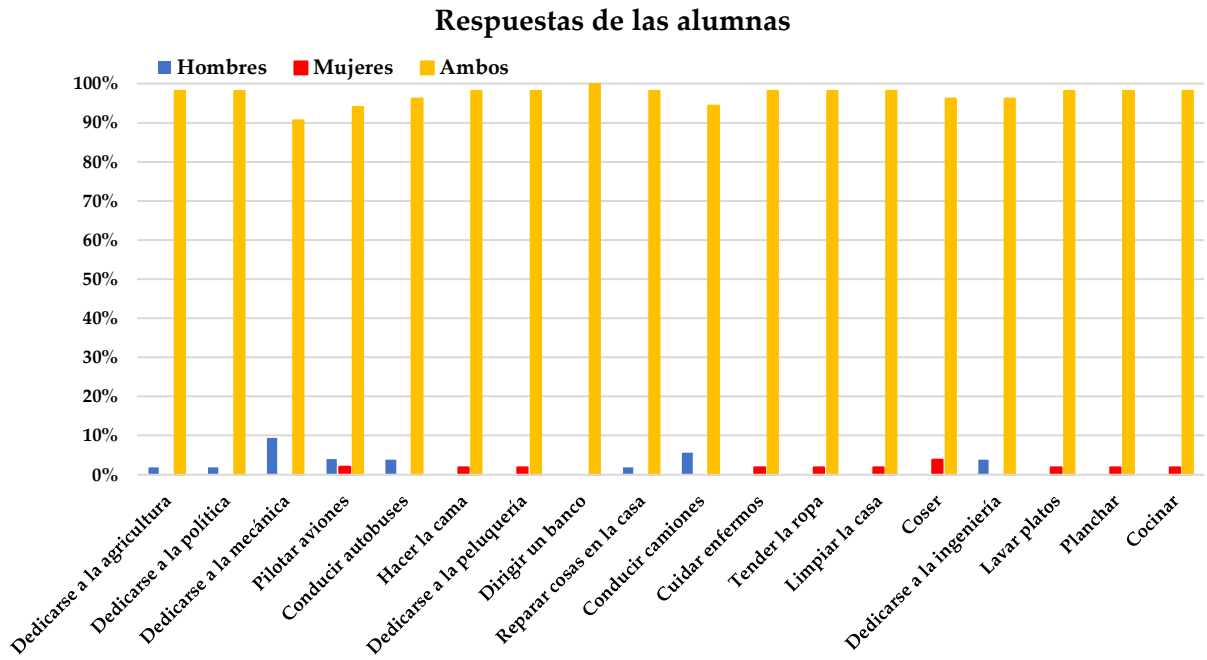
(a)



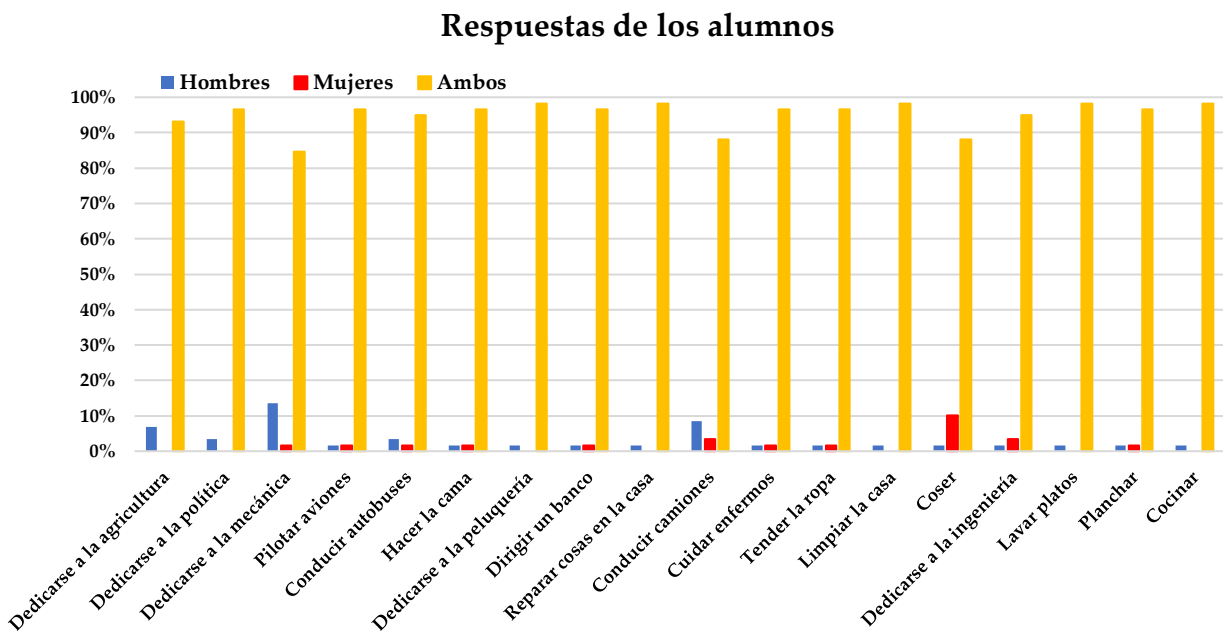
(b)

Figura 2. 18. Alumnado universitario. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro: (a) Respuestas de las estudiantes; (b) Respuestas de los estudiantes.

Los resultados obtenidos en la variable RS, del Modelo 2) Teoría del Rol Social, no muestran diferencias significativas entre sexos. Los porcentajes de respuestas femeninas y masculinas a los diferentes ítems fueron similares (Figura 2. 19). Del mismo modo, se demostró que no existe dependencia entre la mayoría de los ítems de este constructo y la variable sexo, ya que los valores de χ^2 fueron superiores a 0.05 (Anexo IV.C), con la excepción del ítem "¿Quién debe dedicarse a la agricultura?" que sí mostró dependencia ($\chi^2 = 0.03$). Destaca el hecho de que ninguna alumna atribuyó al sexo masculino determinadas tareas domésticas y de cuidado (hacer la cama, cuidar a los enfermos, tender la ropa, limpiar la casa y coser) y sí lo hicieron los alumnos. Del mismo modo que los ítems "Dedicarse a la agricultura", "... a la política" y "Reparar las cosas en la casa" fueron atribuidos en un alto porcentaje por los alumnos a ambos sexos y en un bajo porcentaje al sexo masculino, pero ninguna persona encuestada atribuyó este ítem a las mujeres.



(a)



(b)

Figura 2. 19. Alumnado universitario. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 2) Teoría del Rol Social: (a) Respuestas de las alumnas; (b) Respuestas de los alumnos.

En cuanto a las variables ECC y ERS, del Modelo 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género, los porcentajes de las respuestas de los alumnos de ambos sexos afirman estar "Totalmente en desacuerdo" en casi todos los ítems (porcentaje superior al 50% en ambos sexos), excepto en el relativo a "Las mujeres son más organizadas y colaboran mejor con otras personas que los hombres", donde más del 15% de los alumnos encuestados están "Totalmente de acuerdo" con este ítem, mientras que sólo el 5% de las alumnas encuestadas

(Figura 2. 20) están de acuerdo con este ítem. Las medias de las respuestas de ambos sexos son similares (Anexo IV.B). El análisis χ^2 mostró que no existe dependencia entre las variables ECC y ERS con la variable sexo, ya que todos los valores son superiores a 0.05 (Anexo IV.C).



Figura 2. 20. Alumnado universitario. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género: (a) Respuestas de las alumnas; (b) Respuestas de los alumnos.

Además, se preguntó al alumnado universitario sobre su grado de preocupación en relación con el efecto que la actual brecha de género en las carreras STEM podría tener en la sociedad. Casi el 70% de los participantes encuestados cree que esto tendrá consecuencias en la sociedad, Figura 2. 21.

¿Crees que esto puede tener alguna consecuencia (positiva o negativa) sobre la sociedad?, ¿qué tipo de consecuencias?

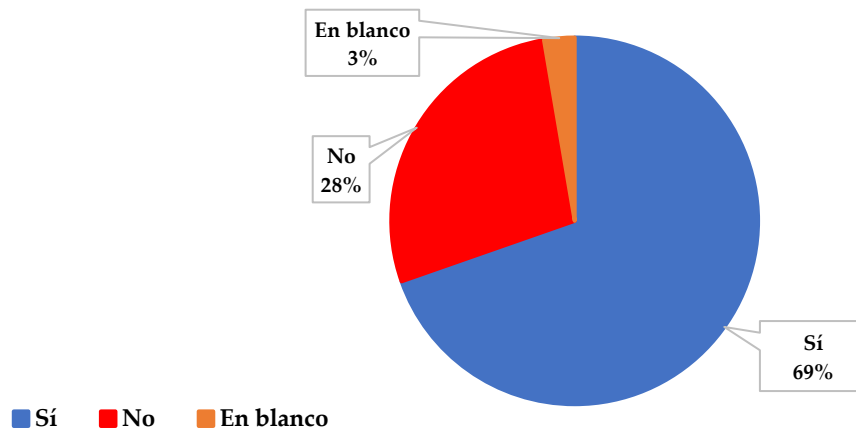


Figura 2. 21. Alumnado universitario. Pregunta adicional sobre el impacto que podría tener en la sociedad el bajo porcentaje de mujeres matriculadas en carreras STEM.

Del mismo modo que se ha hecho para el alumnado de primaria y secundaria, el último constructo para el alumnado universitario fue el entorno educativo. En referencia a las razones que guiaron al alumnado a elegir su actual carrera universitaria, se observan diferencias entre las respuestas de mujeres y hombres que estudian carreras STEM, y entre mujeres que estudian carreras STEM y mujeres que no estudian carreras STEM. La mitad del alumnado encuestado que estudia carreras STEM (54.55% de las mujeres y 55.26% de los hombres) reconoce que eligieron las carreras STEM por vocación. Por el contrario, el porcentaje aumenta hasta el 88.10% (mujeres) y el 71.43% (hombres) en el caso del alumnado no STEM que elige sus carreras por vocación.

Otras razones como la influencia familiar tienen un peso del 18.8% en las mujeres STEM (el mayor peso en comparación con las mujeres no STEM y todos los alumnos). Además, casi una quinta parte de las mujeres STEM encuestadas (18.18%) afirma que su elección estuvo motivada por las oportunidades profesionales. Este porcentaje se duplica en el caso de los hombres STEM (34.21%). Las respuestas del alumnado de titulaciones no STEM no contempla las influencias familiares ni las oportunidades profesionales en su elección. Observando sólo a los alumnos, las respuestas de los alumnos STEM están mayoritariamente relacionadas con la vocación y las oportunidades profesionales (55.26% y 34.21%), similar a lo que ocurre con los alumnos de titulaciones no STEM (71.43% y 19.05%) (Tabla 2. 5).

Tabla 2. 5. Razones que guiaron la elección del itinerario curricular.

	Respuestas de las alumnas		Respuestas de los alumnos	
	STEM (%)	No STEM (%)	STEM (%)	No STEM (%)
Influencia familiar	18.8%	-	2.63%	-
Vocación	54.55%	88.10%	55.26%	71.43%
Itinerario curricular previo	9.09%	11.90%	2.63%	4.76%
Obligación	-	-	5.26%	-
Oportunidades profesionales	18.18%	-	34.21%	19.05%
NS/NC	-	-	-	4.76%

2.3.2.2 Profesorado Universitario

En este grupo, las encuestas se realizaron por sexo, edad, años de experiencia docente e institución en la que enseñan. De este grupo de 25 profesores, el 20% eran mujeres y el 80% hombres. Las encuestas al profesorado se centran más en cómo perciben los papeles que tradicionalmente existen en este campo entre hombres y mujeres aplicados a alumnos y alumnas. Como muestra la Figura 2. 22, también se les realizó preguntas adicionales, entre ellas "¿Mientras imparte docencia utiliza el lenguaje inclusivo?". Más de la mitad del profesorado, independientemente de que sean hombres o mujeres, no utilizan el lenguaje inclusivo en las clases. Algunas respuestas sobre el uso o no del lenguaje inclusivo fueron: "Pérdida de tiempo", "Dificulta la comunicación", "No lo tengo interiorizado. No me sale de forma natural", "Porque no estoy de acuerdo con este lenguaje", "Estoy acostumbrado y me parece el más adecuado" o "Este lenguaje muestra igualdad y respeto".

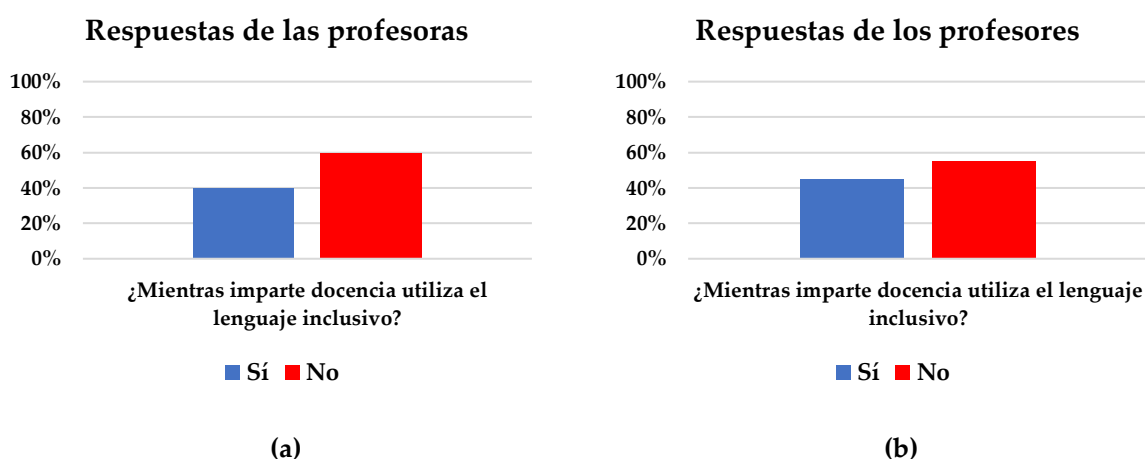


Figura 2. 22. Profesorado universitario. Pregunta adicional sobre el uso del lenguaje inclusivo en el aula: (a) Respuestas de las profesoras; (b) Respuestas de los profesores.

2.3.3 Graduados Universitarios

Los resultados obtenidos en las variables MO, EX y VI, del Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro, no muestran diferencias significativas entre los sexos. Del mismo modo, se destaca que no existe dependencia entre estas variables y la variable sexo, ya que todos los valores de χ^2 fueron superiores a 0.05 (Anexo IV.C).

Sin embargo, hay un ítem de la variable VI que sí muestra diferencias en las respuestas ofrecidas por las alumnas y los alumnos, ya que los alumnos contestaron con un mayor porcentaje de respuestas afirmativas que "ser bueno en materias STEM significa mucho para mí" ($Mean_{male} = 4.08$; $Mean_{female} = 3.63$) (Anexo IV.B y Figura 2. 23).

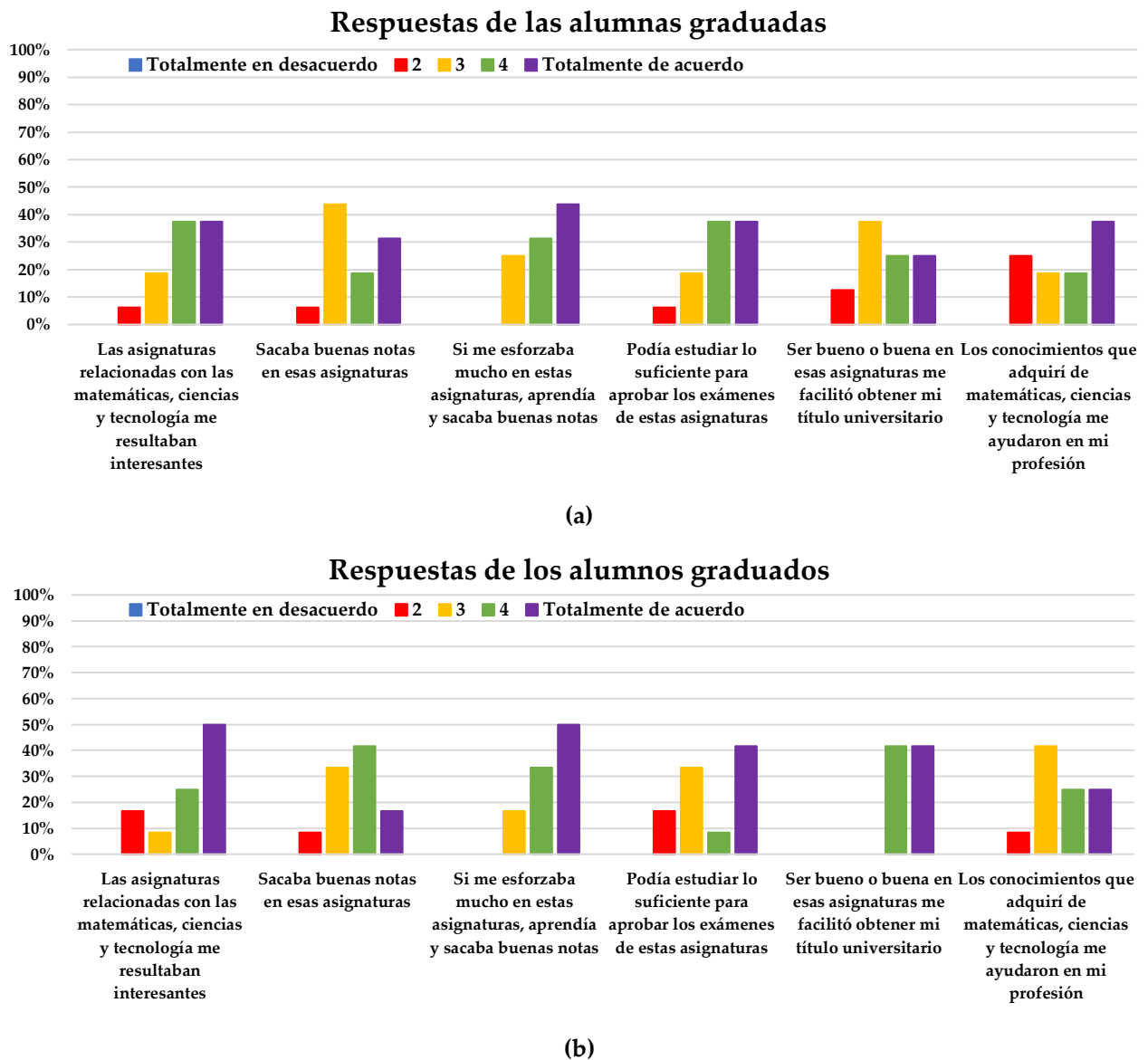
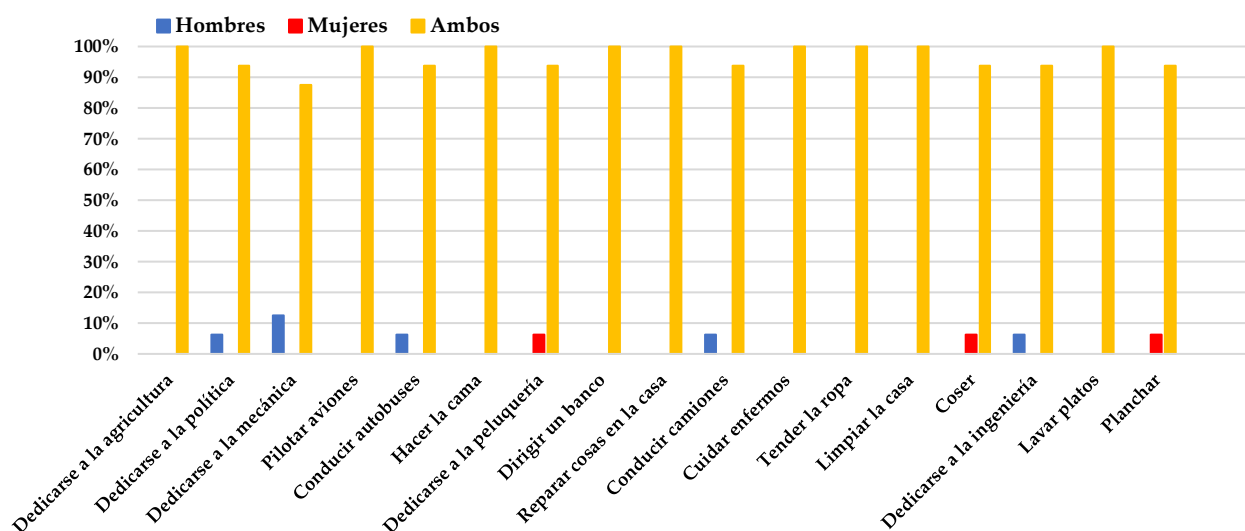


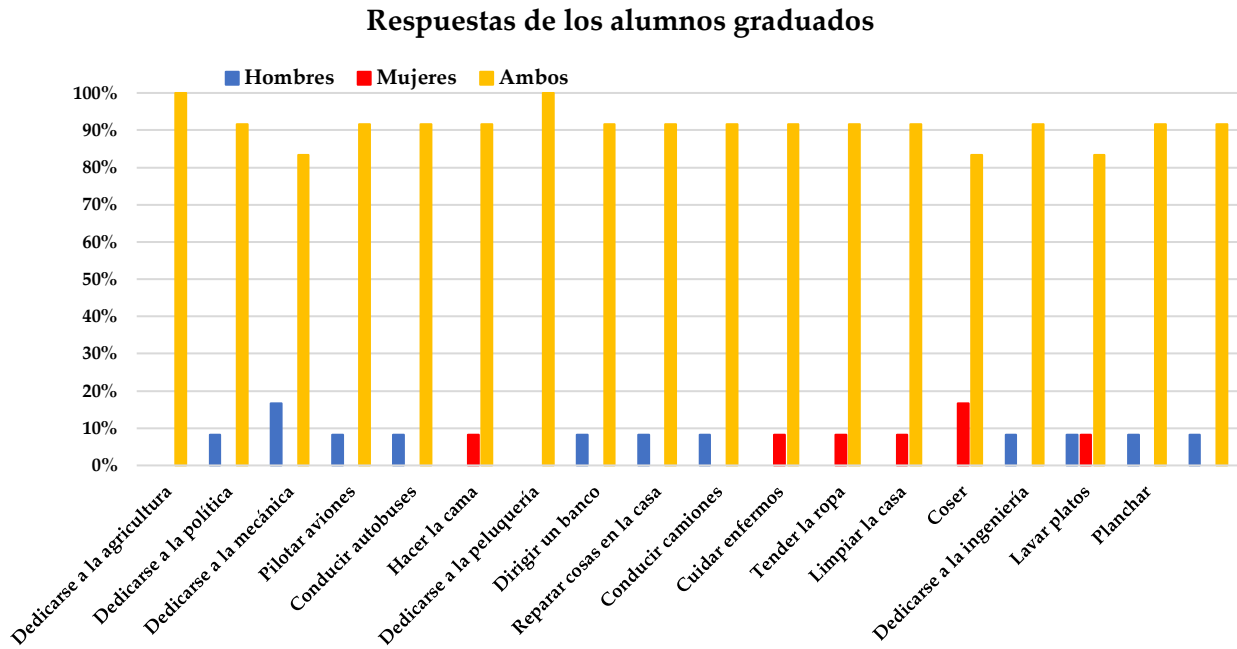
Figura 2. 23. Graduados universitarios. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 1) Teoría de la Expectativa - Valor de Elección Ligada al Logro: (a) Respuestas de las alumnas; (b) Respuestas de los alumnos.

Los resultados obtenidos en la variable RS, del Modelo 2) Teoría del Rol Social, no muestran diferencias significativas entre sexos. Los porcentajes de respuestas femeninas y masculinas a los diferentes ítems fueron similares (Figura 2. 24). Del mismo modo, se demostró que no existe dependencia entre la mayoría de los ítems de este constructo y la variable sexo, ya que los valores de χ^2 fueron superiores a 0.05 (Anexo IV.C). No obstante, cabe destacar el hecho de que un mayor número de mujeres tituladas considera que tanto mujeres como hombres son responsables de realizar todas las tareas mencionadas en la encuesta (el 100% de las mujeres encuestadas cree que tareas como pilotar aviones, dirigir un banco, cuidar enfermos o limpiar la casa corresponden tanto a hombres como a mujeres). Sin embargo, en cuanto a la respuesta de los hombres titulados, se observa que hay un número considerable de tareas que los titulados consideran que corresponden exclusivamente a los hombres (dedicarse a la política, dedicarse a la mecánica, pilotar aviones, conducir autobuses), mientras que las tareas domésticas corresponden exclusivamente a las mujeres (cuidar enfermos, tender la colada, limpiar la casa o coser).

Respuestas de las alumnas graduadas



(a)

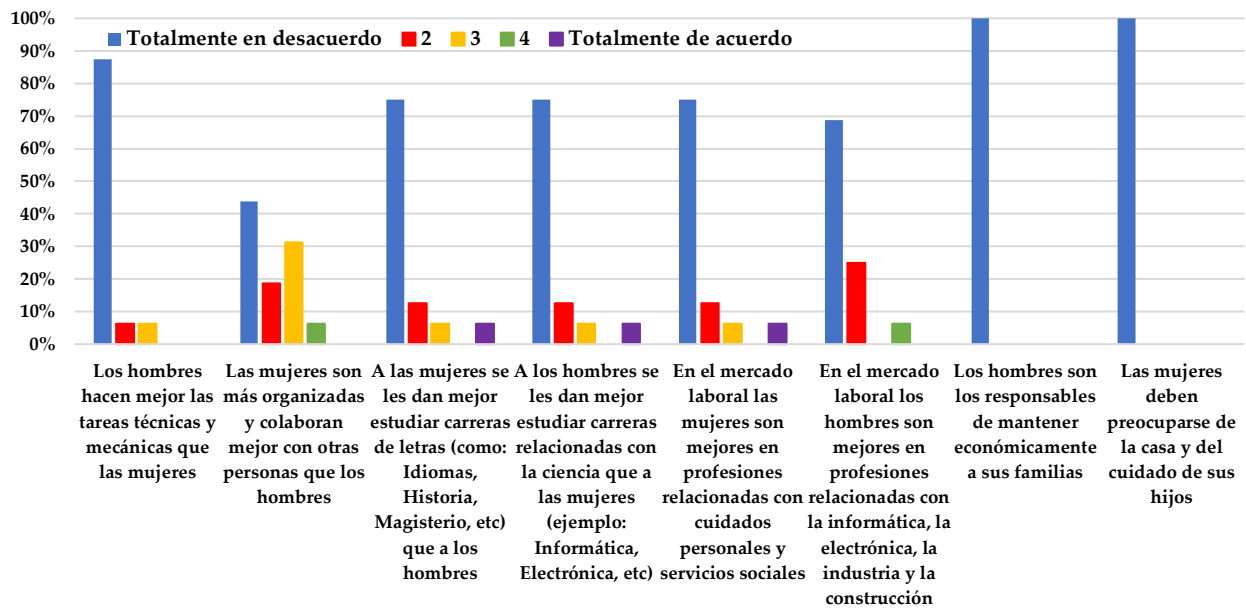


(b)

Figura 2. 24. Graduados universitarios. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 2) Teoría del Rol Social: (a) Respuestas de las alumnas; (b) Respuestas de los alumnos.

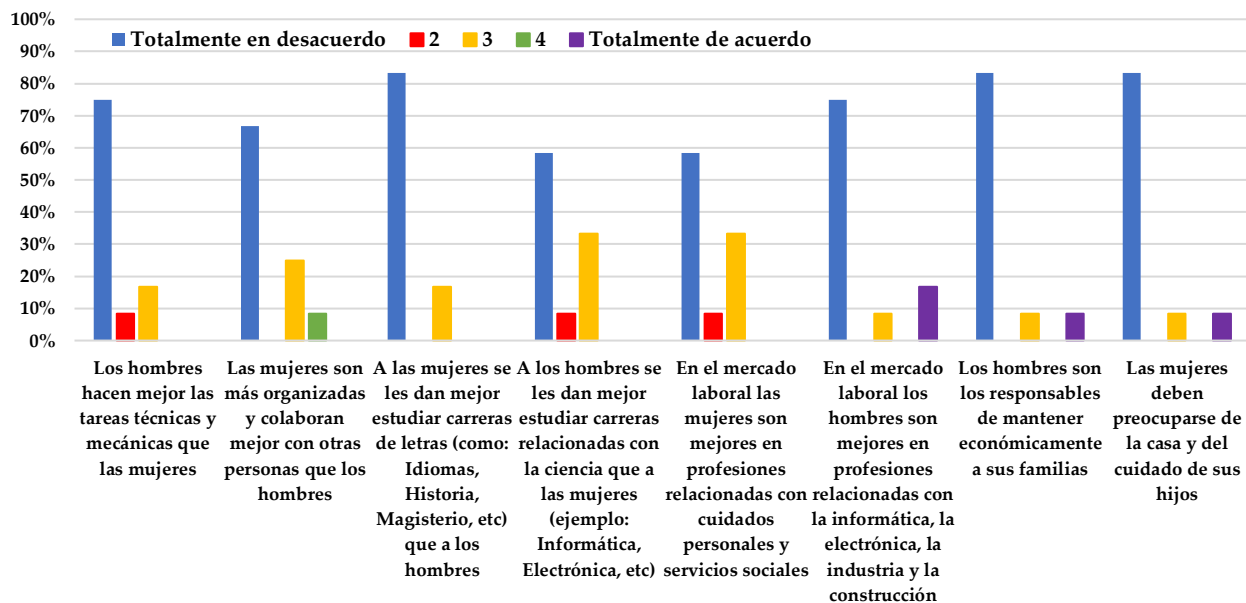
En relación al Modelo 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género, para las variables ECC y ERS, el alumnado de ambos sexos manifiesta estar "Totalmente en desacuerdo" en casi todos los ítems (porcentaje superior al 50% por ambos sexos), Figura 2. 25, Anexo IV.B. El análisis χ^2 mostró que no existe dependencia entre las variables ECC y ERS con la variable sexo, ya que todos los valores son superiores a 0.05 (Anexo IV.C). Pero algunos ítems merecen atención, por ejemplo, en el ítem "En el mercado laboral los hombres son mejores en profesiones relacionadas con la informática, la electrónica, la industria y la construcción", el nivel de desacuerdo es mayor en las mujeres que en los hombres ($Mean_{female} = 1.44$, $Mean_{male} = 1.92$). En los ítems "Los hombres son los responsables de mantener económicamente a sus familias" y "Las mujeres deben preocuparse de la casa y del cuidado de sus hijos/as", absolutamente todas las mujeres encuestadas están en desacuerdo, pero no todos los hombres encuestados piensan lo mismo, incluso hay algunos que están totalmente de acuerdo ($Mean_{female} = 1$, $Mean_{male} = 1.50$).

Respuestas de las alumnas graduadas



(a)

Respuestas de los alumnos graduados



(b)

Figura 2. 25. Graduados universitarios. Respuestas a las preguntas basadas en el Modelo 3) Teoría Multicomponente de los Estereotipos de Género: (a) Respuestas de las alumnas; (b) Respuestas de los alumnos.

2.3.4 Empresa / Industria

El último grupo destinatario para ampliar la investigación es la empresa y la industria. Las encuestas eran anónimas, sólo se preguntaba el sexo, la edad, el

cargo que se ocupa en la empresa y los años de experiencia. En las encuestas se hacen preguntas sobre el tipo de actividad que desarrolla la empresa dentro del campo STEM y la igualdad de género que existe en la empresa. La Figura 2. 26 muestra los resultados obtenidos de algunas de las preguntas elaboradas en la encuesta: ¿Existe en la empresa en la que trabaja un ambiente igualitario entre sexos (hombre/mujer)?", "¿Utiliza lenguaje inclusivo en su entorno laboral?" o "¿La empresa en la que trabaja tiene un Plan de Igualdad registrado en el REGCON (Registro y Deposito de convenios, acuerdos colectivos de trabajo y planes de igualdad)?". Como muestra la Figura 2. 26a, existe un entorno igualitario en las empresas, aunque el lenguaje inclusivo aún no está bien implantado (Figura 2. 26b). Del mismo modo, la mayoría de los trabajadores STEM no saben si existe un Plan de Igualdad en su empresa (Figura 2. 26c).

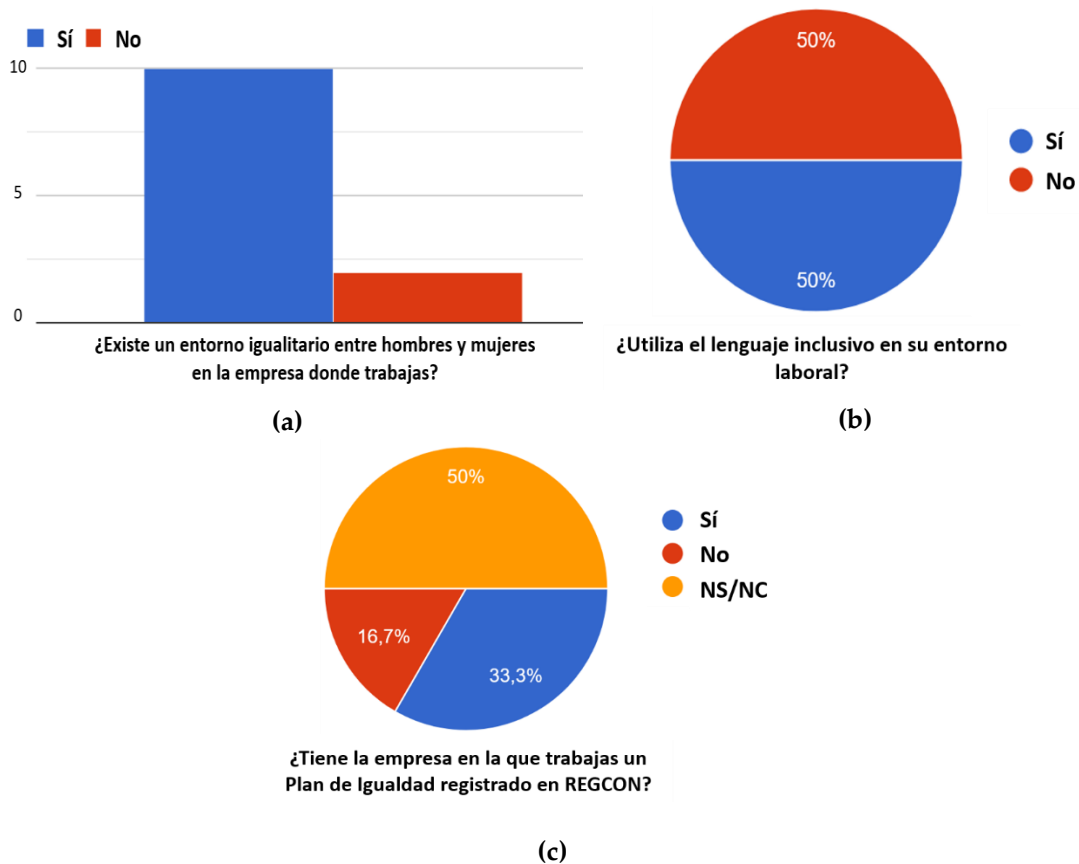


Figura 2. 26. Empresa / industria. Respuestas a las preguntas sobre el campo STEM y la igualdad de género que existe en la empresa.

2.4 Discusión

En relación con las expectativas y valores que el alumnado atribuye a las disciplinas STEM, según los datos obtenidos, no se observan diferencias significativas entre sexos a lo largo de las cinco etapas vitales/educativas (primaria, secundaria, universidad, graduados e incorporación al mercado laboral). En los distintos grupos de edad, alumnos y alumnas muestran similitudes en los motivos que les impulsan a estudiar matemáticas, ciencias o

tecnología, así como en las expectativas que tienen de éxito en estas materias y el valor que atribuyen al éxito obtenido.

En cuanto a las tareas y actividades que los alumnos consideran propias del hombre, de la mujer o de ambos sexos, es decir, el papel que la sociedad ha atribuido tradicionalmente a hombres y mujeres, los datos sí muestran diferencias significativas entre alumnos y alumnas, especialmente en educación secundaria, donde en esta etapa coincidente con la adolescencia, los alumnos muestran una mayor discriminación entre los roles asignados a los sexos.

En cuanto a los estereotipos de género relacionados con las competencias y habilidades, los datos indican que desde la educación primaria existe una mayor tendencia a que los alumnos se consideren mejores en las disciplinas y profesiones STEM. Esta tendencia es más perceptible en la educación secundaria, pero tiende a disminuir en la educación superior. En cuanto a los estereotipos de responsabilidad social atribuidos a los sexos, según los datos analizados, los alumnos muestran una mayor discriminación de las responsabilidades atribuidas a cada sexo que las alumnas. Estas diferencias son más acusadas en edades tempranas (educación primaria y secundaria) y disminuyen al llegar a la educación superior.

En cuanto a la influencia de los entornos educativos en la promoción de las titulaciones STEM, los datos revelan el uso frecuente de metodologías no activas en primaria y secundaria, así como una menor presencia femenina en los equipos docentes de estas materias en secundaria. Estos resultados podrían indicar que los entornos educativos analizados (primaria y secundaria) favorecen la escasa elección de titulaciones STEM por parte de las alumnas.

En cuanto a las motivaciones para la elección de la titulación, según los datos analizados, la vocación es la principal razón. Además, las universitarias creen que el bajo porcentaje de mujeres en titulaciones STEM aumentará las desigualdades entre hombres y mujeres. En cuanto a las causas de la baja participación femenina en STEM, las opiniones del alumnado difieren según el género. Las alumnas atribuyen la baja participación a causas sociales y los alumnos a diferencias de gustos entre hombres y mujeres. En general, las universitarias y los universitarios animarían a orientar las etapas educativas previas para aumentar la participación femenina en las carreras STEM.

La atención al profesorado, tanto en primaria como en secundaria, está muy comprometida con la brecha de género en todos los ámbitos, y especialmente en las carreras STEM.

Por desgracia, el profesorado universitario no parece tan comprometido ni preocupado por la brecha de género en las carreras STEM. La mayoría de ellos no están buscando nuevos recursos para hacer frente a la brecha de género en sus clases.

Por último, en cuanto a las empresas y la industria, se observa que reflejan lo que ocurre en el resto de sectores productivos y en la sociedad en general. Más del 83% de las empresas encuestadas cuenta con un plan de igualdad de género, pero sólo la mitad utiliza un lenguaje no sexista en el entorno laboral.

Comparando los resultados obtenidos en esta investigación con los trabajos científicos anteriormente referidos en la Tabla 2. 2, podemos analizar lo siguiente. El estudio realizado en [17] con estudiantes de 15 años de 57 países, encontró que el 64% de los chicos y chicas esperan poder trabajar en una profesión relacionada con STEM. En este caso, el estudio realizado en este capítulo, ha encontrado que el 40% de las alumnas de secundaria creen que los conocimientos obtenidos en matemáticas, ciencia y tecnología son beneficiosos para el futuro (*Figura 2. 13a*). Del mismo modo, el estudio de [17] constató que la separación de hombres y mujeres en determinados sectores de la esfera pública puede transmitir determinados roles de género en las ocupaciones profesionales. El estudio de este capítulo basado en el Modelo 2) Teoría del Rol Social también constató que sigue habiendo profesiones arraigadas en los roles de género.

García-Holgado, Mena, et al. [18] muestran que solo el 32.69% de los graduados en programas STEM durante el curso 2018/2019 eran mujeres. En el estudio de este capítulo, se muestra en la *Figura 2. 1*, que, en 2018, el 33.26% de los graduados en educación terciaria en la UE en disciplinas STEM eran mujeres.

Los resultados del estudio de Dulce-Salcedo et al. [19] indican que la brecha podría reducirse exponiendo al alumnado a una mayor proporción de profesoras de STEM en la educación secundaria. En el estudio de este capítulo, se agrupan las encuestas del profesorado de educación primaria y secundaria, y de los 23 profesores encuestados, 18 son profesoras, y tanto las alumnas como las profesoras son conscientes de la importancia de contar con un referente femenino en las clases de STEM.

Jiang [20] realizó un estudio en el que constató que las razones familiares, el lugar de trabajo y los estereotipos arraigados en el lugar de origen de las mujeres, influyen en una mayor tasa de abandono en las disciplinas STEM que en los hombres. En el estudio realizado en este capítulo, en el Modelo 2) Teoría del Rol Social, se ha encontrado un arraigo ideológico hacia las mujeres en el cuidado del hogar y de los enfermos.

En el estudio realizado por Kumar et al. [21] con niños de entre 4 y 6 años, se encontró que en la condición Hombre/todo-mujer, la figura del científico estaba más arraigada al rol masculino con un 59%, frente a un 33% en la condición todo-mujer, un 38% en la condición todo-hombre y un 43% en la condición mujer/todo-hombre. En el estudio realizado en este capítulo para el Modelo 2) Teoría del Rol Social con niños de educación primaria, se observa que muchas profesiones siguen presentando una diferencia de género (*Figura 2. 11a* y *Figura*

2. 11b), donde las ocupaciones poderosas o intelectuales se asocian a los hombres y las profesiones más orientadas a los cuidados se asocian a las mujeres.

Los resultados obtenidos del estudio realizado por Krstić y Gawel [22] determinaron que la brecha de género en el emprendimiento STEM está determinada por la brecha de género en la educación STEM. Hay el doble de hombres emprendedores que de mujeres empresarias. En la educación superior, la mayor brecha de género relacionada con STEM se da en ciencias, matemáticas, informática, ingeniería, fabricación y construcción, con muchos más graduados que graduadas. El estudio realizado en este capítulo muestra que en la enseñanza superior (Figura 2. 1 y Figura 2. 2) el número de mujeres tituladas en educación terciaria en Europa oscila entre el 32% y el 33%, mientras que en España oscila entre el 28% y el 29%.

2.5 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos, se puede concluir que nos queda un largo camino por recorrer para alcanzar ratios de estudio equilibrados entre hombres y mujeres en los campos STEM. Por un lado, los resultados de las encuestas muestran que todavía existen patrones sociales que hacen que los jóvenes diferencien cierto tipo de actividades en función del género. En esta etapa, los chicos siguen pensando que las profesiones relacionadas con el cuidado del hogar y de enfermos son responsabilidad de las mujeres, mientras que las profesiones más técnicas, autoritarias o manuales son para los hombres. Esto también puede extrapolarse al caso contrario, en el que el porcentaje de hombres en carreras como enfermería, trabajo social, educación primaria o psicología está dominado por las mujeres.

Por otro lado, se puede ver que de los tres niveles educativos (primaria, secundaria y universidad), el profesorado de educación superior, en comparación con el de primaria y secundaria, es el menos consciente de la brecha de género en STEM. La mayoría del profesorado universitario encuestado afirma no tener intención de llevar a cabo ningún tipo de pequeña acción en sus clases para contribuir a la visibilidad de las mujeres en un campo con un porcentaje tan bajo de mujeres.

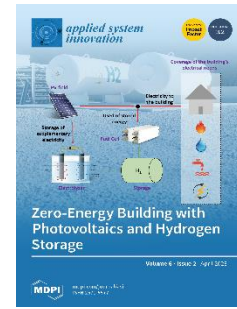
Aparte de las conclusiones obtenidas de las respuestas a las encuestas relacionadas con los tres modelos analizados, se determinan que una de las razones más importantes del bajo compromiso en las áreas STEM es el entorno educativo. El escaso contacto que el alumnado tiene con la ciencia y la ingeniería en la escuela primaria y secundaria hace realmente difícil atraer a los estudiantes (hombres o mujeres) hacia la ciencia o la ingeniería a la edad de dieciocho años (universidad) cuando nunca antes han pisado un laboratorio STEM. En este capítulo se deduce que es crucial redefinir los itinerarios curriculares, haciendo que se adapten al objetivo de que el alumnado de primaria y secundaria

aprendan ciencia e ingeniería con los "cinco sentidos" (ver, tocar, oír, oler y saborear).

Los talleres participativos realizados en este estudio han sido diseñados para mostrar que los campos de la tecnología y la ciencia están fuertemente vinculados a la toma de decisiones y a posiciones de liderazgo económico y social. Si se refuerza la presencia de las mujeres en las carreras STEM, la capacidad de influencia de las mujeres en estos campos es mucho mayor.



Capítulo 3. El reto de la transición digital en la educación en ingeniería. Una solución a partir de una red colaborativa europea de laboratorios remotos basados en tecnologías de energías renovables



Palabras clave	Resumen
Transición digital Formación en ingeniería Enseñanza de energías renovables Laboratorio remoto Red europea universitaria	<p>En la actualidad la sociedad se enfrenta a dos retos cruciales: la transición digital y la transición energética. La innovación educativa juega un papel clave en este desafiante escenario, especialmente en las carreras de ingeniería, donde las prácticas de laboratorio son tan importantes como las clases teóricas. Este capítulo presenta una plataforma de formación estandarizada apoyada por cinco universidades europeas que incluye cinco experiencias de laboratorios remotos. Cada universidad es responsable de desarrollar un módulo formativo bajo la orientación proporcionada por la entidad responsable (Universidad de Huelva, España). Para ello, la Universidad de Huelva ha puesto en marcha un laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores. El resto de universidades han seleccionado otra fuente de energía renovable y han replicado la infraestructura de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). El resultado es una red europea materializada en una plataforma homogeneizada donde profesorado y alumnado pueden encontrar todos los materiales didácticos (teóricos y prácticos) para formar y formarse en materia de energías renovables en la nueva era digital.</p>

Lista de acrónimos

ADDIE	Análisis, Diseño, Desarrollo, Implementación y Evaluación
AR	Augmented Reality
CA	Corriente Alterna
CC	Corriente Continua
CIT	Chiba Institute of Technology
DT	Digital Twins
FHTW	Fachhochschule Technikum Wien
GJU	German-Jordanian University
IAM	Identity and Access Management
IO	Intellectual Output
IoT	Internet of Things
LAN	Local Area Network
LMS	Learning Management System
Moodle	Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment
MTU	Munster Technological University
NIU	Northern Illinois University
NTNU	Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet
NTNU	Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet
PC	Personal Computer
Polito	Politecnico di Torino
PSUT	Princess Sumaya University for Technology
PWM	Pulse-Width Modulation
RE-OPEN	REmote labORatories Practical Experiences on renewable energies at EU uNiversities
SCORM	Shareable Content Object Reference Model
SO	Sistema Operativo
SPDT	Single-Pole Double-Throw
STEM	Science, Technology, Engineering, and Mathematics
STU	Slovak University of Technology in Bratislava
TIC	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
TTPU	Toshkent shahridagi Turin Politexnika Universiteti
UCM	Universidad Complutense de Madrid
UE	Unión Europea
UHU	Universidad de Huelva
UI	User Interface
UIC	University of Illinois de Chicago
UNED	Universidad Nacional de Educación a Distancia
UNIMINUTO	Corporación Universitaria Minuto de Dios
USB	Universal Serial Bus
USGM	Università degli Studi Guglielmo Marconi
VCC	Vapor Compression Cycle
VDC	Voltage Direct Current

3.1 Introducción

El método de enseñanza ha evolucionado desde los tiempos en los que el docente era una figura de gran autoridad y las clases se asemejaban a monólogos hasta la actualidad, donde la educación convierte al alumnado en protagonista

de su propio proceso de aprendizaje, fomentando la creatividad y la participación.

Aparte de los cambios producidos en el rol profesor-alumno y en las metodologías académicas, desde 2020, la naturaleza presencial en el aula ha sufrido cambios significativos. Con la llegada de COVID-19 [35], la naturaleza presencial del aula, especialmente en la educación superior, ha tenido que adaptarse hasta combinar las clases presenciales con el aprendizaje en línea [36].

Aunque este cambio en el método de enseñanza afecta a la educación superior [38–40], las áreas científico-tecnológicas son las más afectadas ya que gran parte de la formación depende de las prácticas de laboratorio. La transición digital en la educación [40], especialmente en las ingenierías, no puede ser inmediata, ya que el alumnado no puede completar su formación sin realizar prácticas con sistemas reales. Para adaptarse a este nuevo escenario digital, los laboratorios remotos aparecen como una solución interesante [41,42]. A continuación, se explican los cuatro principales tipos de laboratorios, que se muestran en la Figura 3. 1:

- Laboratorio virtual con acceso local (Figura 3. 1a): el entorno es virtual y se accede a él localmente. Todo el trabajo experimental se realiza en una simulación informática. La herramienta informática se instala en un ordenador que cumple los requisitos para poder ejecutarla.
- Laboratorio virtual con acceso remoto (Figura 3. 1b, laboratorio virtual): se simula el entorno y el alumnado accede a través de Internet. El alumnado utiliza una interfaz de experimentación de un sistema simulado a través de Internet.
- Laboratorio real con acceso local (Figura 3. 1c): representa el laboratorio tradicional presencial en el que el alumnado realiza experimentos en una planta física situada en la misma sala.
- Laboratorio real con acceso remoto (Figura 3. 1d, laboratorio remoto): existe un entorno real al que el alumnado accede a través de Internet. El usuario puede manipular la planta real desde cualquier lugar, lo que proporciona mayor facilidad al alumnado.

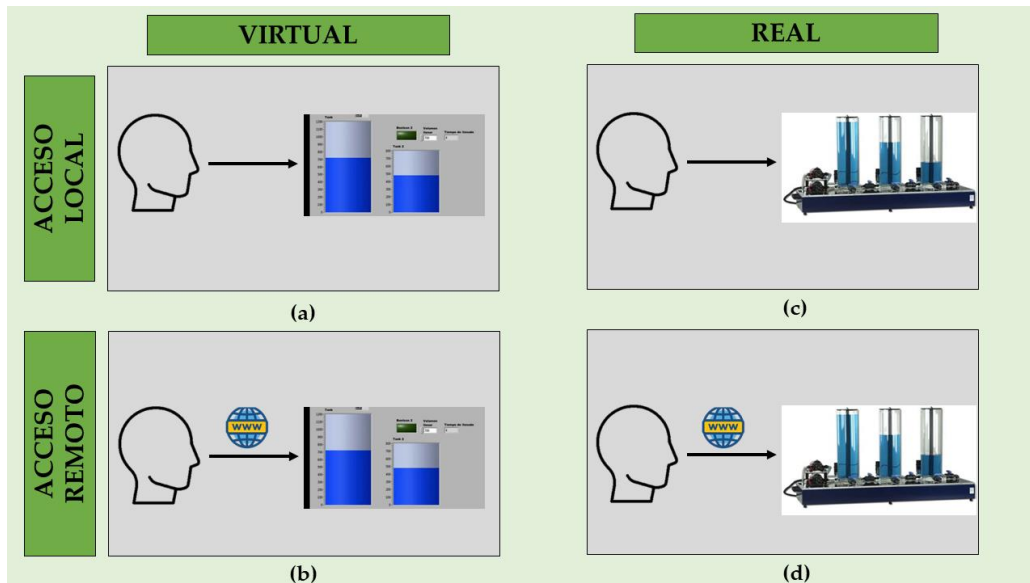


Figura 3. 1. Tipos de laboratorios: (a) laboratorio virtual con acceso local; (b) laboratorio virtual con acceso remoto; (c) laboratorio real con acceso local; (d) laboratorio real con acceso remoto.

Las ventajas principales de los laboratorios remotos son [43,44]:

- Se puede acceder las 24 horas del día, los 7 días a la semana desde una conexión a Internet, sin necesidad de supervisión por parte del personal.
- Gracias a un uso compartido más eficiente de los recursos, los centros educativos pueden satisfacer la demanda de laboratorios con menos equipos.
- El alumnado de universidades con menos recursos puede utilizar laboratorios de alta tecnología.
- El alumnado con dificultades para ajustar su horario de trabajo al de clase tiene mayor facilidad para realizar prácticas de laboratorio.
- La interfaz de usuario puede ejecutarse en varias plataformas, desde ordenadores de sobremesa y portátiles hasta tabletas y teléfonos inteligentes.
- El alumnado puede repetir las prácticas de laboratorio tantas veces como desee sin necesidad de asistencia adicional por parte del personal técnico para adquirir una mejor comprensión.
- Las experiencias remotas pueden compartirse entre universidades, y el alumnado tienen a su disposición un mayor número de laboratorios.
- Los laboratorios remotos permiten acceder a experimentos de última generación, evitando riesgos de daños en los equipos y accidentes.

Con tales ventajas, muchas universidades han decidido implantar laboratorios remotos en su metodología educativa para adaptarse a esta próxima era digital.

Resumiendo lo anterior, teniendo en cuenta las ventajas de los laboratorios remotos y cómo la Unión Europea (UE) pretende adaptar la educación a la nueva

era digital, este capítulo presenta una solución que integra una red colaborativa europea de laboratorios remotos basados en tecnologías de energías renovables con una infraestructura estandarizada de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC).

La siguiente sección 3.2 ofrece una revisión de la literatura científica, revisando trabajos relacionados, comparando la propuesta de este capítulo con estos trabajos, y destacando las principales aportaciones de la propuesta. La sección 3.3 describe los materiales y el método utilizados para llevar a cabo la investigación, y los resultados se discuten en la sección 3.4. Las principales conclusiones del artículo se resumen en la sección 3.5.

3.2 Antecedentes científicos. Trabajos relacionados

Basándose en la literatura científica, merecen especial atención los siguientes hallazgos basados en el desarrollo de laboratorios remotos en el ámbito de la enseñanza de la ingeniería. En 2014, la Universidad Tecnológica Eslovaca de Bratislava (en inglés: *Slovak University of Technology in Bratislava* o STU) [45], presentó un laboratorio remoto para su uso en cursos de control de procesos. La experiencia remota permite interactuar con tres plantas térmicas, una planta de levitación magnética y un sistema hidráulico de tanques.

El mismo año, el Instituto Tecnológico de Chiba (en inglés: *Chiba Institute of Technology* o CIT) [46], implementó un laboratorio remoto que controla mediante modulación por ancho de pulsos (en inglés: *Pulse-Width Modulation* o PWM) un motor de corriente continua (CC) y mide el voltaje de un alternador monofásico. El alumnado solo necesita un navegador web para acceder al laboratorio remoto, y está disponible para ejecutarse en portátiles, smartphones o tabletas.

En 2015, la Universidad de Padua llevó a cabo un proyecto más ambicioso en colaboración con el sector industrial [47]. Implementaron un laboratorio de refrigeración remoto que se ejecuta bajo el entorno LabVIEW®, y la planta física real se encuentra en un entorno industrial. La planta física real tiene un ciclo de compresión de vapor (en inglés: *Vapor Compression Cycle* o VCC) y está formado por cuatro componentes principales: evaporador, compresor, condensador y dispositivo de expansión.

En un intento de aunar educación e inclusión, la Universidad ITMO de San Petersburgo puso en marcha un laboratorio remoto que permite al alumnado con necesidades educativas especiales adquirir conocimientos de ingeniería eléctrica y electrónica, teoría de control e identificación de sistemas [48]. En ese trabajo, la configuración del laboratorio desarrollado incluye la monitorización y el control de motores CC. El alumnado accedió al laboratorio remoto utilizando paneles remotos LabVIEW® a través de un navegador web común.

Más recientemente, en 2020, la STU describió un laboratorio remoto en el área de la ingeniería de control [49]. Este laboratorio remoto consiste en tres plantas basadas en tanques y aplica los principios de sistemas no lineales. La interfaz de usuario está basada en MATLAB®, los datos obtenidos se transmiten al cliente a través de WebSockets, y el alumnado accede al laboratorio remoto a través de Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment).

Todos los laboratorios remotos descritos anteriormente han sido desarrollados por universidades de manera individual, sin ninguna otra entidad participante, excepto en el caso de Beghi et al. (2015) [47], que incluyó la colaboración industrial.

El primer ejemplo de red de laboratorios remotos encontrado en la literatura científica es el de Pastor et al. (2020) [50], donde la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), la Universidad Alemana de Jordania (en inglés: *German-Jordanian University* o GJU) y la Universidad Princesa Sumaya de Tecnología (en inglés: *Princess Sumaya University for Technology* o PSUT) implementaron una red cooperativa de laboratorios remotos. La red está construida sobre cuatro laboratorios remotos basados en energías renovables: un entrenador de energía eólica y fotovoltaica, donde el alumnado aprende las características de los paneles solares fotovoltaicos y los generadores de energía eólica; pila de combustible, donde se les enseña al alumnado los conceptos de conversión de energía utilizando pilas de combustible, electrólisis y paneles solares; un sistema híbrido generador de energía que combina la energía solar, eólica y las pilas de combustible; y un seguidor solar de dos ejes donde el alumnado visualiza la ubicación de los paneles solares en función de la radiación solar y ubicación. El alumnado accede a los laboratorios remotos a través de Moodle como LMS (en inglés: *Learning Management System* o LMS).

Más recientemente, la Universidad del Norte de Illinois (en inglés: *Northern Illinois University* o NIU) y la Universidad de Illinois en Chicago (en inglés: *University of Illinois de Chicago* o UIC) desarrollaron en 2022 un laboratorio virtual que controla una microrred con fuentes de energías renovables [51]. Las simulaciones del laboratorio se realizan en MATLAB/Simulink y LabVIEW®. El laboratorio virtual se compone de diferentes dispositivos experimentales: un seguidor solar, un aerogenerador y un sistema de almacenamiento de energía.

También en 2022 se implementó un laboratorio remoto basado en un curso de robótica experimental utilizando la tecnología de gemelos digitales (en inglés: *Digital Twins* o DT), la tecnología sobre internet de las cosas (en inglés: *Internet of Things* o IoT) y el método sobre enseñanza de Análisis, Diseño, Desarrollo, Implementación y Evaluación (ADDIE). La planta física incluye un robot ABB IRB120, y el alumnado utiliza el software RobotStudio para programar y depurar el robot [52].

La Corporación Universitaria Minuto de Dios (UNIMINUTO) en Colombia ha implantado un laboratorio remoto de bajo coste y código abierto basado en el control de tanques para aprender sobre sistemas de control automático [53]. Recientemente, la Universidad Politécnica de Turín en Tashkent (en uzbeko: *Toshkent shahridagi Turin Politehnika Universiteti* o TTPU) y el Politécnico de Turín (en italiano: *Politecnico di Torino* o PoliTo) han desarrollado un marco de cooperación académica. El laboratorio a distancia permite al alumnado aplicar la teoría del control automático en un sistema real de levitación magnética [54]. Por otro lado, la Universidad Complutense de Madrid (UCM) ha implementado un laboratorio remoto utilizando el robot educativo Dobot Magician. Este robot se utiliza en las prácticas de ingeniería electrónica de comunicaciones y permite al alumnado adquirir conocimientos sobre los principios básicos en robótica y detectar fallos en la práctica [55].

Basándose en la revisión bibliográfica, se puede afirmar que se han desarrollado pocos laboratorios remotos para la enseñanza de la ingeniería y, dentro de estos pocos trabajos, sólo uno ofrece una red de laboratorios remotos que consta de cuatro laboratorios ubicados en distintas universidades de Jordania [50]. La falta de estándares comunes en la definición e implementación de laboratorios remotos, así como la falta de especificaciones de conectividad, son los principales inconvenientes para adoptar y crear redes a gran escala de laboratorios remotos educativos basados en energías renovables.

Este capítulo propone una solución para construir un curso completo que integre una red estandarizada basada en laboratorios remotos, material didáctico complementario y hojas de autoevaluación, donde cada laboratorio está ubicado en un lugar diferente (cada laboratorio está ubicado en una universidad europea). El alumnado accede a través de un LMS común basado en Moodle, y, tras un único paso de inicio de sesión, puede seleccionar el módulo y el laboratorio remoto con el que desea practicar. La Tabla 3. 1 compara esta aportación científica con trabajos relacionados y resume las principales contribuciones.

Tabla 3. 1. Comparación del diseño y la aplicación de los laboratorios remotos en la literatura.

Referencia	Tipo de Laboratorio	Aplicación	LMS	Gestor de reservas	Solución ICT estandarizada ³	Hardware and Software TIC
Propuesta científica de la Tesis	Laboratorio real con acceso remoto ¹	Energías renovables de uso residencial	Sí	Sí	Sí	Arduino + LabVIEW (UI) + LMS (Moodle)
[45]	Laboratorio real con acceso remoto	Educación en ingeniería ⁴	No	No	No	Raspberry Pi + Arduino + HTML 5 and JavaScript (client) + PHP and MySQL (server) + JSON (data transfer)
[46]	Laboratorio real con acceso remoto	Educación en ingeniería	No	No	No	HS/3069F microcomputer board + TCP and UDP + WebSocket + HTML, CSS and JavaScript (UI)
[47]	Laboratorio real con acceso remoto	Educación en ingeniería	No	No	No	VNC + DAQ (NI-CompactDAQ) + LabVIEW (UI)
[48]	Laboratorio real con acceso remoto	Educación en ingeniería	No	No	No	NI ELVIS II + LabVIEW + TCP/IP protocol
[49]	Laboratorio real con acceso remoto	Educación en ingeniería	Sí	No	No	MATLAB + WebSockets + JavaScript + USB interface
[50]	Laboratorio real con acceso remoto	Educación en ingeniería	Sí	No	Sí	LMS (Moodle) ⁵
[51]	Laboratorio virtual con acceso remoto ²	Educación en ingeniería	No	No	No	MATLAB/Simulink + LabVIEW + Microsoft.Net Core + TCP/IP protocol + SolidWorks + Inkscape + Fritzing + CanvasJS + jQuery + JSON
[52]	Laboratorio real con acceso remoto	Educación en ingeniería	No	No	No	Raspberry Pi + RobotStudio + Unity3D + OPC UA protocol + MATLAB/Simulink
[53]	Laboratorio real con acceso remoto	Educación en ingeniería	No	No	No	Raspberry Pi 4 + Janus WebRTC Server + NodeJS + Flask + ACE code editor and highlighter + Redis
[54]	Laboratorio real con acceso remoto	Educación en ingeniería	No	Sí	Yes	NI MyRIO board + LabVIEW
[55]	Laboratorio real con acceso remoto	Educación en ingeniería	Sí	No	No	Raspberry Pi + Dobot + Python + EJS

¹ Un laboratorio remoto se define como un entorno en el que un estudiante controla a distancia un proceso y/o dispositivo a través de una red. Bajo este esquema, el estudiante utiliza y controla los recursos disponibles en un laboratorio mediante el uso de sensores e instrumentación para llevar a cabo una interacción real con equipos reales, en lugar de utilizar programas que simulan los procesos a observar y estudiar. ² Un laboratorio virtual se define como un entorno simulado por ordenador en el que se recrean las condiciones de experimentación típicas de un laboratorio convencional mediante programas informáticos genéricos o específicos. ³ Un modelo estandarizado implica la colaboración entre distintas universidades. ⁴ Este laboratorio remoto está destinado a la enseñanza de la ingeniería, pero la planta física se encuentra en un emplazamiento industrial, no en una universidad. ⁵ Pastor et al. (2020) [16] no proporcionan más información sobre protocolos de comunicación o recursos software/hardware utilizados.

Las principales novedades de la propuesta son:

1. Se desarrolla una plataforma de formación colaborativa basada en laboratorios remotos estandarizados. En la plataforma de formación participan cinco universidades de la UE.
2. Cada laboratorio remoto se basa en energías renovables con el objetivo de contribuir a la formación de competencias requeridas al alumnado en el nuevo modelo energético.
3. Un LMS que utiliza una plataforma cooperativa Moodle. Todas las universidades participantes pueden crear contenidos y material didáctico para la plataforma de formación cooperativa.
4. El gestor de reservas permite al alumnado seleccionar la fecha y hora para realizar la experiencia a distancia.
5. Una solución TIC estandarizada que permite unificar los criterios de las cinco universidades participantes. Todas las instituciones superiores han seguido los mismos estándares TIC. Esto proporciona replicabilidad y escalabilidad y facilita la incorporación de nuevos dispositivos en el laboratorio y la incorporación de nuevas universidades a la red colaborativa.
6. Hardware y software TIC: Arduino + LabVIEW (UI) + plataforma Moodle.

3.3 Materiales y método

3.3.1 Enfoque RE-OPEN: Contexto y distribución de tareas

El enfoque de los laboratorios remotos para experimentos prácticos sobre energías renovables en universidades de la UE (en inglés: *REmote labOratories Practical Experiences on renewable energies at EU uNiversities* o RE-OPEN) facilita a al alumnado el acceso a experimentos de laboratorios científico-tecnológicos cuando se encuentran fuera del campus universitario. El resultado es una plataforma de colaboración compuesta por módulos de formación estandarizados basados en laboratorios remotos y desarrollados por universidades de la UE. El objetivo es crear un nuevo modelo educativo con la implantación de laboratorios remotos, fusionando el aprendizaje tradicional y el aprendizaje en línea. Los laboratorios remotos están basados en energías renovables con el objetivo de contribuir a las competencias de formación en transición energética que se exige al alumnado.

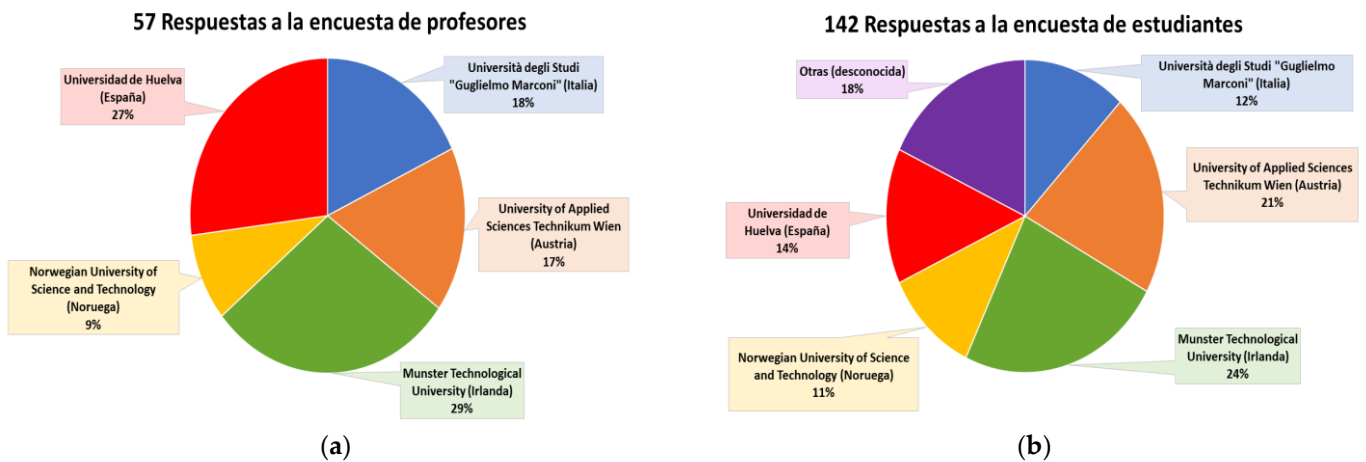
Las universidades europeas que participan en el proyecto RE-OPEN son la Universidad Guglielmo Marconi en Italia (en italiano: *Università Degli Studi Guglielmo Marconi* o USGM); la Universidad de Ciencias Aplicadas Technikum Wien en Austria (en alemán: *Fachhochschule Technikum Wien* o FHTW); la Universidad Tecnológica de Munster en Irlanda (en inglés: *Munster Technological University* o MTU); la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología en Noruega

(en noruego: *Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet* o NTNU); y la Universidad de Huelva (UHU) en España. Cada una de estas universidades se encarga de un producto intelectual (en inglés: *Intellectual Output* o IO), como se muestra en la Figura 3. 2.



Figura 3. 2. Productos intelectuales de cada universidad europea.

La MTU supervisa el IO1 para recopilar experiencias en el desarrollo y uso de laboratorios prácticos, virtuales y remotos. Además, la MTU se encarga de analizar el uso de laboratorios remotos en carreras de Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (en inglés: *Science, Technology, Engineering and Mathematics* o STEM) y de diseñar un modelo pedagógico de laboratorios remotos. El consorcio ha distribuido encuestas al profesorado (Figura 3. 3a), alumnado (Figura 3. 3b) y trabajadores de la industria (Figura 3. 3c) entre los cinco países miembros. Los resultados obtenidos de estas encuestas se detallan en [56].



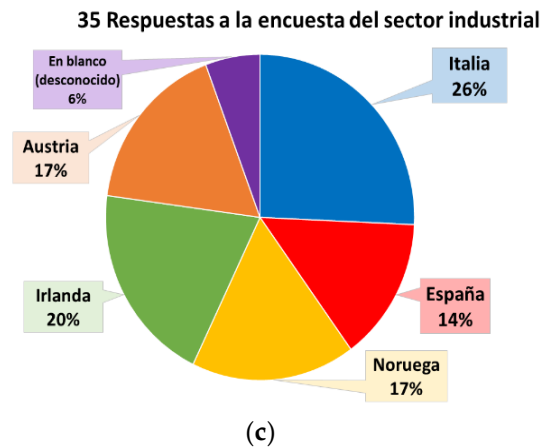


Figura 3. 3. Respuestas de las encuestas: (a) Respuestas a la encuesta de profesores; (b) Respuestas a la encuesta de estudiantes; (c) Respuestas a la encuesta del sector industrial.

Uno de los objetivos de estas encuestas era conocer el grado de motivación que alumnado, profesorado y trabajadores de la industria encontraban en la experiencia del laboratorio remoto, sus niveles de disfrute, su satisfacción general y niveles de interés en el laboratorio. La Figura 3. 4 muestra cómo la UHU obtuvo el mayor grado de satisfacción (4.5/5).

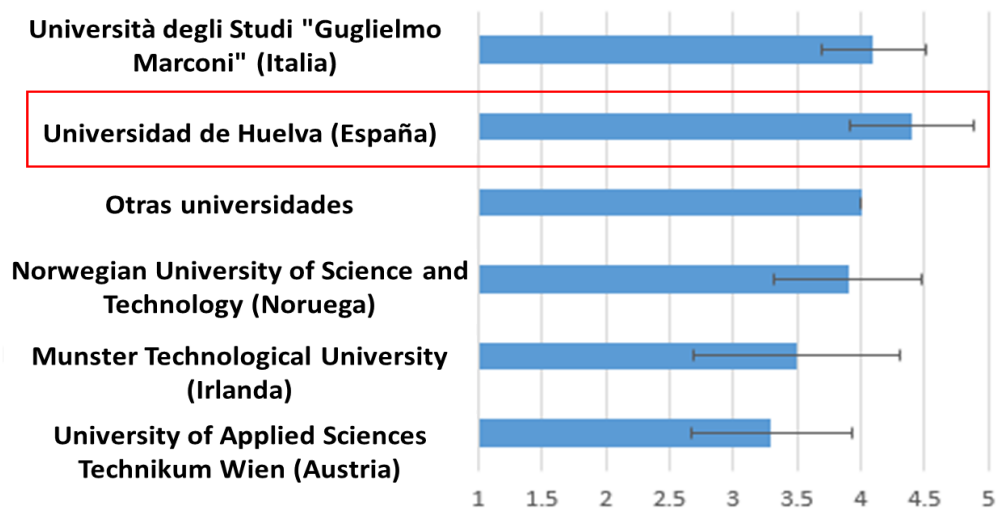


Figura 3. 4. Nivel de satisfacción con las prácticas de laboratorio. Resultados de encuestas a profesores, estudiantes y personal técnico.

Por otro lado, la UHU es responsable del IO2, definiendo las TIC estándar para el laboratorio remoto, estableciendo el sistema de comunicación, incluyendo el uso de dispositivos programables para la conexión remota de los dispositivos experimentales, estableciendo la infraestructura de laboratorio remoto armonizada y estandarizada, y elaborando las directrices para el usuario. La implantación de la infraestructura TIC del laboratorio remoto se basa en la arquitectura que se muestra en la Figura 3. 5. El usuario, que debe disponer de un ordenador con conexión a Internet (1, Figura 3. 5), accede a la plataforma RE-OPEN Moodle (2, Figura 3. 5), donde se alojan los cinco laboratorios remotos. A continuación, la plataforma RE-OPEN Moodle accede a la red de área local (en

inglés: *Local Area Network* o LAN) de la universidad a través de un servidor (3, Figura 3. 5). La intranet y el servidor están situados en la universidad, donde se encuentra el hardware del experimento. También hay un ordenador conectado a la LAN de la universidad. El ordenador (4, Figura 3. 5) puede ser un ordenador personal (en inglés: *Personal Computer* o PC), un mini PC, una Raspberry Pi o un dispositivo similar que permita la instalación de un sistema operativo (SO) y disponga de conexión a Internet. Por lo tanto, la interfaz de usuario (en inglés: *User Interface* o UI) es una herramienta de software, por ejemplo, un archivo LabVIEW®, que se ejecuta en el ordenador. El usuario accede a la interfaz de usuario a través de Internet y, por tanto, puede manejar la planta física (5, Figura 3. 5). En el esquema, la planta física se refiere no sólo al dispositivo basado en renovables, sino también a todos los elementos necesarios para la automatización del experimento. Un sistema de control y supervisión adecuado es clave, ya que reúne las funciones de operar la planta, supervisar su estado e intercambiar datos con la interfaz de usuario; es decir, está conectado al miniordenador. En la sección 3.3.2 se ofrece una descripción detallada de la implementación del laboratorio remoto.

El modelo educativo propuesto y la red colaborativa de la UE se construyen sobre una base común: una microrred residencial basada en energías renovables. Las instituciones han seleccionado diferentes laboratorios remotos relacionados con distintas fuentes de energía renovable para formar parte de la microrred residencial. Como ejemplo, este capítulo describe el laboratorio remoto desarrollado por la Universidad de Huelva. Las TIC y la infraestructura son replicadas por el resto de entidades.

Tras las encuestas y la implementación del laboratorio remoto, la FHTW se encarga de diseñar los módulos de experimentación sobre energías renovables desarrollados por cada universidad participante y de redactar el plan de estudios de dichos módulos (IO3). La USGM es responsable del diseño del LMS (IO4), que incluye el curso de formación y los laboratorios remotos de cada universidad europea. La NTNU tiene que seleccionar al alumnado que realizará las diferentes experiencias prácticas y elaborar las directrices que los usuarios tienen que seguir para llevar a cabo las actividades experimentales (IO5).

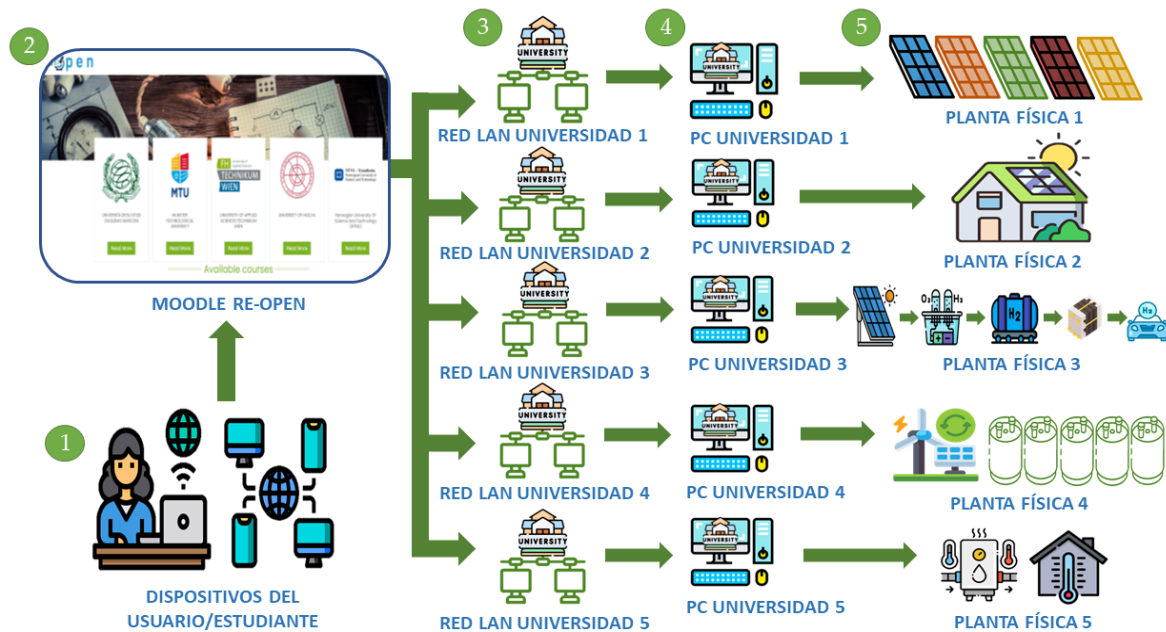


Figura 3. 5. Estandarización de infraestructuras TIC y diseño colaborativo de redes del proyecto RE-OPEN.

3.3.2 Laboratorio remoto normalizado: un ejemplo basado en un banco de supercondensadores

En el contexto del proyecto RE-OPEN, la UHU ha puesto en marcha un laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores (planta física 4, Figura 3. 5). Los supercondensadores son condensadores de alta capacidad y tienen un valor de capacitancia muy superior al de otros condensadores, pero con límites de voltaje más bajos, lo que supone un puente entre los condensadores electrolíticos y las baterías recargables. Con esta ventaja, los supercondensadores permiten una carga y descarga rápida. El objetivo de este laboratorio remoto es permitir al alumnado interactuar con una planta real a través de la interfaz de usuario, visualizando las curvas de carga y descarga del banco de supercondensadores. La interfaz de usuario permite al alumnado visualizar el banco de supercondensadores en tiempo real, es decir, se proporciona una práctica de laboratorio similar a un laboratorio presencial, pero con la novedad de que el alumnado está entrenando desde casa.

3.3.2.1 Descripción del sistema

El banco de supercondensadores (1, Figura 3. 6 y Figura 3. 7) se conecta a través de un relé unipolar de doble efecto (en inglés: *Single-Pole Double-Throw* o SPDT) (2, Figura 3. 6 y Figura 3. 7) para elegir entre los circuitos de carga o descarga.

Para el circuito de carga, el banco de supercondensadores puede cargarse desde una fuente de alimentación programable (3, Figura 3. 6 y Figura 3. 7), de

acuerdo con las especificaciones técnicas del dispositivo, Tabla 3. 2. Para evitar posibles riesgos, se ha colocado un fusible de protección para el proceso de carga (4, Figura 3. 6 y Figura 3. 7).

Para el circuito de descarga, se utiliza una carga electrónica (5, Figura 3. 6 y Figura 3. 7). La carga electrónica consiste en un banco de 8 resistencias de potencia conectadas en paralelo. Cada resistencia es accionada por un módulo relé.

Para el sistema de control y adquisición de datos se utiliza un microcontrolador Arduino (6, Figura 3. 6). El microcontrolador Arduino está conectado mediante una interfaz de bus serie universal (en inglés: *Universal Serial Bus* o USB) a un ordenador local (7, Figura 3. 6) y mediante el protocolo RS-232 a una fuente de alimentación programable. El alumnado puede visualizar la planta física del laboratorio en tiempo real a través de una cámara de vídeo conectada por USB (8, Figura 3. 6). Del mismo modo, la información obtenida por Arduino se muestra a través de una interfaz de usuario (9, Figura 3. 6) en el PC del usuario conectado remotamente. Esta interfaz de usuario permite al alumnado interactuar con la planta real.

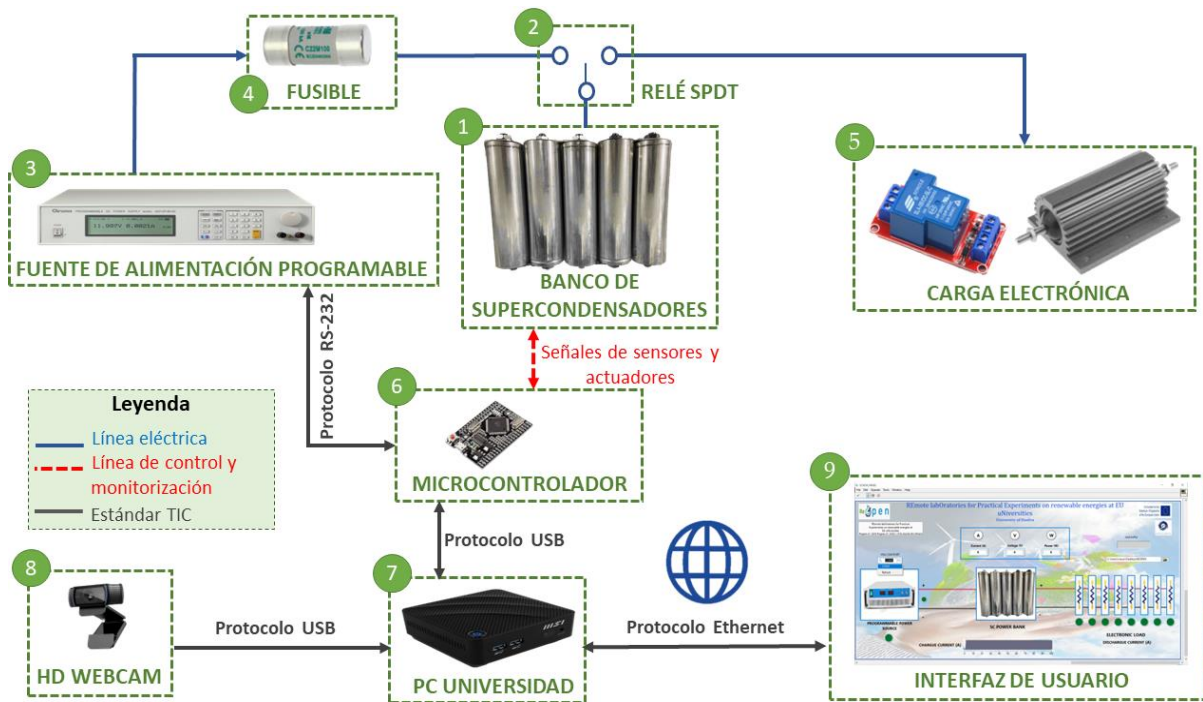


Figura 3. 6. Laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores. Distribución de los componentes.

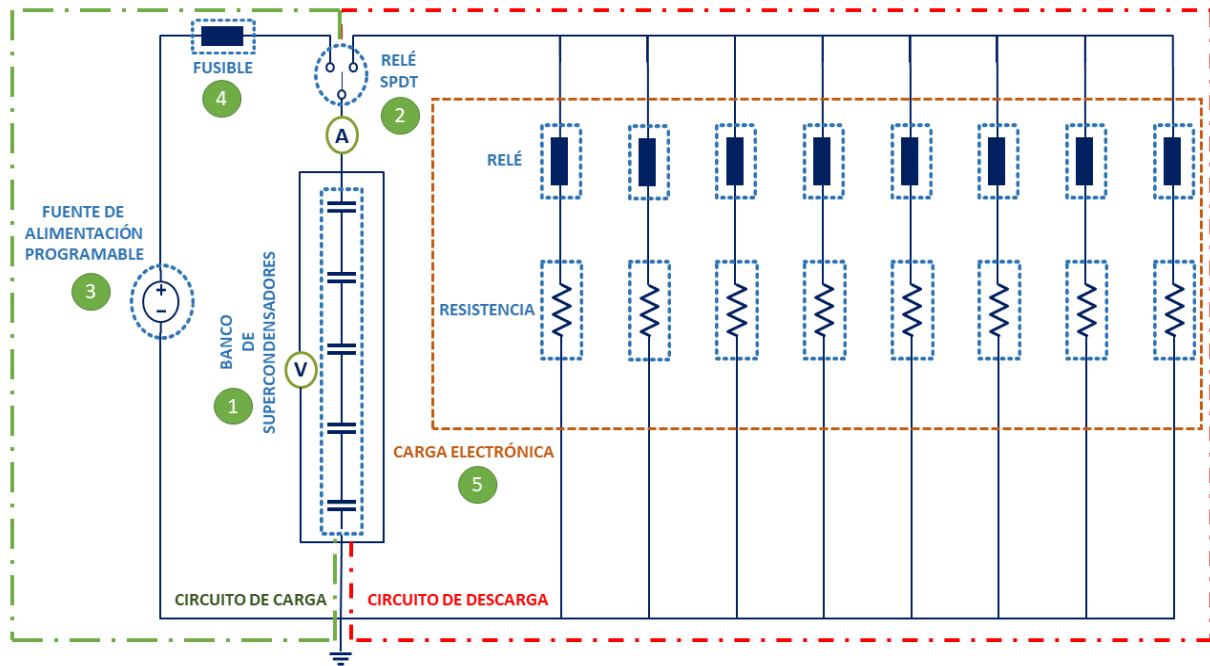


Figura 3. 7. Laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores. Disposición eléctrica.

Las especificaciones técnicas de cada componente utilizado en el banco de pruebas de supercondensadores se muestran en la Tabla 3. 2.

Tabla 3. 2. Banco de supercondensadores. Especificaciones de los componentes.

Componentes	Parámetros	Unidades
Supercondensador	Capacidad: 5 000 F	5
	Sobretensión: 2.85 VCC	
	Voltaje de funcionamiento: 2.4 VCC	
	Máx. Corriente continua: 210 A	
Relé SPDT	Máx. Corriente de conmutación: 80 A	1
	Máx. Voltaje de conmutación: 75 VCC	
	Voltaje nominal (VCC): 12 V	
Fuente de alimentación programable	Voltaje de entrada: 220 VCA	1
	Voltaje de salida: 0–30 VCC	
	Corriente de salida: 0.1–100 A	
Fusible	Potencia de salida: 3 000 W	1
	Corriente nominal: 100 A	
Banco de resistencias de potencia	Voltaje nominal: 500 VCA	8
	Resistencia: 1 Ω	
	Potencia nominal con disipador estándar @25 °C: 200 W	
Módulo relé	Interfaz normalmente abierta carga máxima: 250 VCA/30 A; 30 VCC/30 A	8
	Corriente de disparo: 3 mA	
	Voltaje de funcionamiento: 12 VCC	
	Corriente nominal RMS primaria: 100 A	
Sensor de corriente	Corriente primaria, rango de medición: 0, ..., ± 150 A	1
	Corriente nominal RMS del secundario: 50 mA	

Fuente de alimentación conmutada	Rango de voltaje de entrada: 88~264 VCA Voltaje de salida: 12 VCC Rango de corriente de salida: 0~4.2 A Potencia nominal de salida: 50.4 W	1
Sensor de voltaje (implementado por divisor de resistencia)	Rango: 0~12 VCC	1

En la Figura 3. 8 se muestra la implementación física del laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores. La imagen de la izquierda muestra el proceso de carga del banco de supercondensadores y la de la derecha, el proceso de descarga.

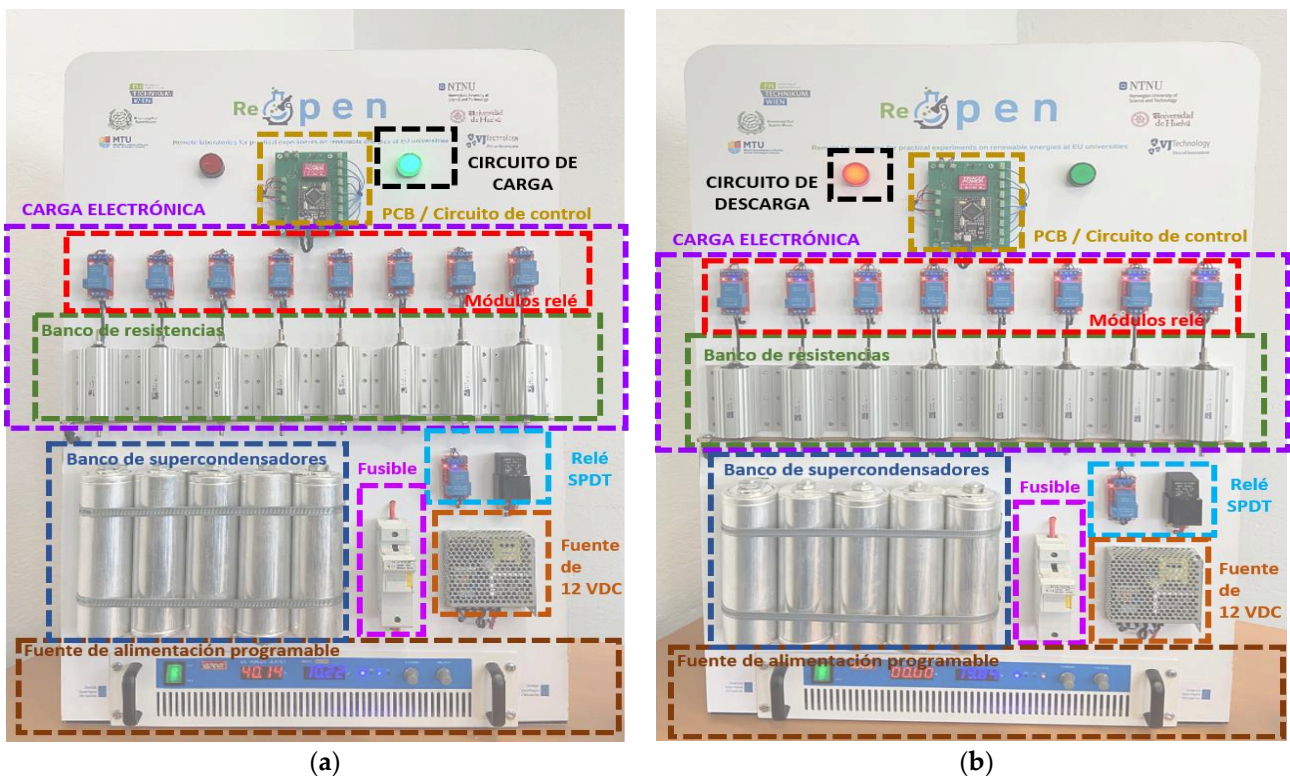


Figura 3. 8. Implementación física del laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores: (a) proceso de carga; (b) proceso de descarga.

Para las pruebas de carga y descarga, las condiciones de funcionamiento que deben imponerse para la seguridad y evitar riesgos en modo remoto se muestran en la Tabla 3. 3.

Tabla 3. 3. Especificaciones impuestas al sistema basado en un banco de supercondensadores.

Parámetros
Voltaje de funcionamiento 1-módulo supercondensador simple: 2.4 VCC
Voltaje de funcionamiento del banco de supercondensadores: 12 VCC
Corriente de carga: 0~70 A
Corriente de descarga: 0~96 A

3.3.2.2 Infraestructura TIC y Sistema de Gestión del Aprendizaje

La estructura educativa desarrollada engloba los laboratorios remotos de las universidades participantes, cumpliendo el objetivo de crear una infraestructura de laboratorios remotos y colaborativos en las universidades de la UE, como se muestra en la Figura 3. 9. Todos los laboratorios remotos son accesibles desde Moodle. La integración se realizó con un paquete SCORM (en inglés: *Shareable Content Object Reference Model*). La decisión de seleccionar SCORM como herramienta para compartir contenidos se basó en la recomendación de la empresa VJTechnology®, que ha proporcionado apoyo técnico al proyecto RE-OPEN. Como característica adicional, el LMS facilita la reserva de laboratorios remotos mediante un gestor de reservas y material interactivo como vídeos interactivos de realidad aumentada (en inglés: *Augmented Reality* o AR).

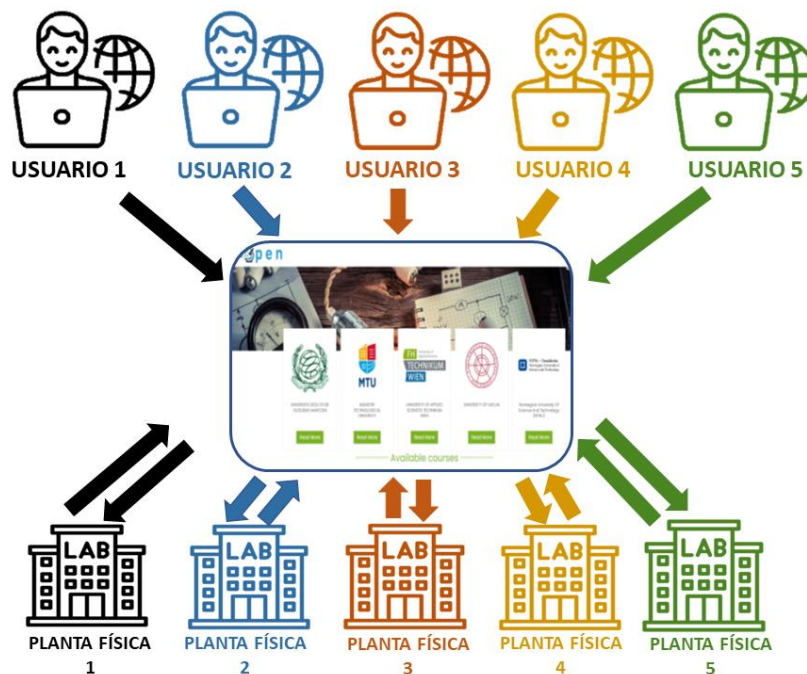


Figura 3. 9. Sistema de Gestión del Aprendizaje (LMS) de la plataforma RE-OPEN.

Mientras un usuario accede a distancia a un laboratorio, el resto de las plantas están disponibles para otros usuarios. Así, es posible realizar cinco experiencias a distancia al mismo tiempo.

Para validar la autenticación del alumnado, éste se conecta al portal de la universidad. A continuación, se envía un parámetro de identificación a RE-OPEN Moodle, que verifica su presencia en su base de datos. El acceso al LMS se establece mediante la gestión de identidades y accesos (en inglés: *Identity and Access Management* o IAM) [57]. IAM confirma que el usuario, el software o el hardware son auténticos utilizando RE-OPEN LMS para autenticar las credenciales en una base de datos, como se muestra en la Figura 3. 10.

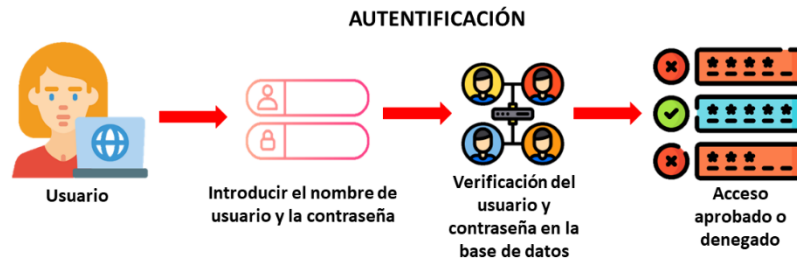
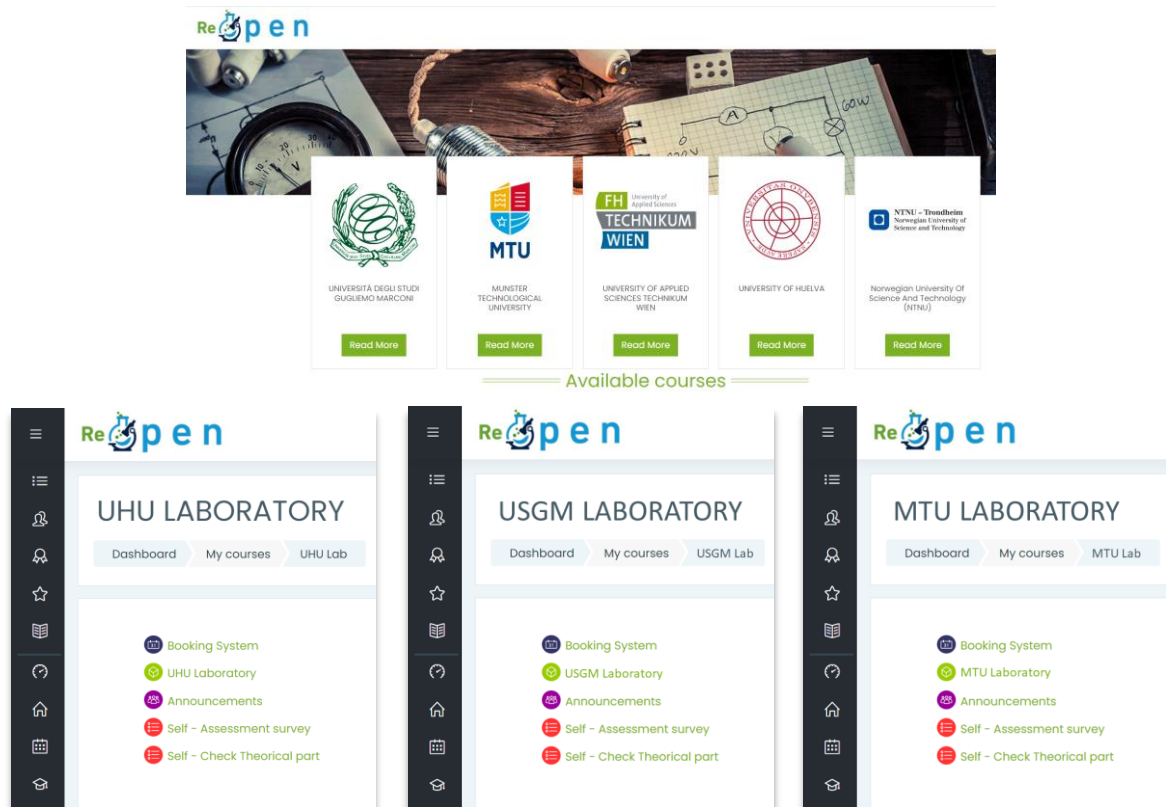


Figura 3. 10. Proceso de autenticación en la plataforma RE-OPEN.

Para hacer realidad esta estructura estandarizada y colaborativa entre las cinco universidades europeas participantes, se ha implantado un LMS común para todas ellas. Este LMS, concretamente una plataforma Moodle, incorpora las cinco experiencias remotas de cada universidad. Para acceder a la plataforma RE-OPEN, el alumnado puede acceder a la siguiente URL, <https://reopen.vjtechnology.it/index.php> (consultada el 19 de abril de 2023), tal y como se muestra en la Figura 3. 11. El alumnado debe estar matriculado en un curso de una de las cinco universidades europeas.



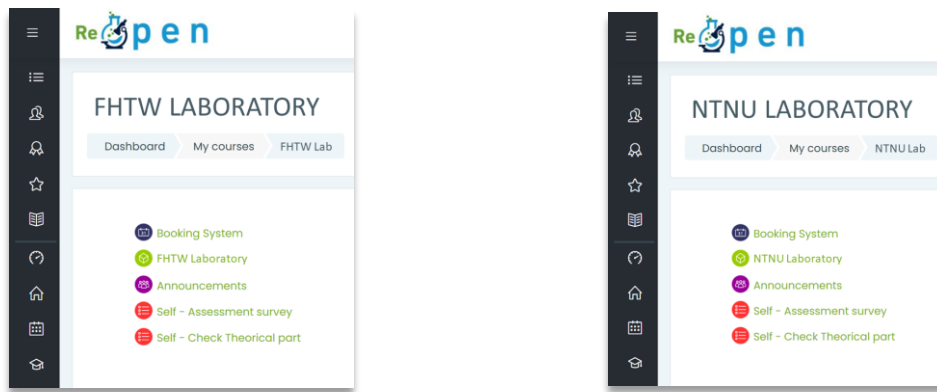


Figura 3. 11. Plataforma LMS del proyecto RE-OPEN.

A continuación, el alumnado debe introducir el nombre de usuario y la contraseña. El nombre de usuario y la contraseña son facilitados por el profesor de la asignatura al inicio del curso académico, garantizando así el correcto funcionamiento de la plataforma colaborativa en términos de seguridad.

Una vez que el alumnado entra en RE-OPEN Moodle, se muestran los diferentes módulos con sus respectivos laboratorios remotos. El usuario tiene acceso al gestor de reservas, incluyendo la experiencia remota, los anuncios, las hojas de autoevaluación y la sección de autocomprobación teórica. Antes de comenzar la experiencia remota, el profesor da una clase teórica sobre energías renovables. Lo primero que debe hacer el alumnado antes de la experiencia a distancia es rellenar la sección de autocomprobación teórica. En esta encuesta se pregunta sobre los conocimientos teóricos explicados en clase. Una vez finalizada la experiencia remota, el alumnado puede realizar una evaluación de los conocimientos adquiridos rellenando la encuesta de autoevaluación. Esta encuesta es posteriormente evaluada por el profesor.

3.3.2.3 Interfaz de usuario

Una vez dentro del curso de la UHU, el alumnado puede acceder al laboratorio remoto a través de la herramienta "Laboratorio UHU". Como se muestra en la Figura 3. 12, el laboratorio remoto consta de la interfaz de usuario en la parte inferior, y en la parte superior, un vídeo muestra en tiempo real el funcionamiento de la planta física.

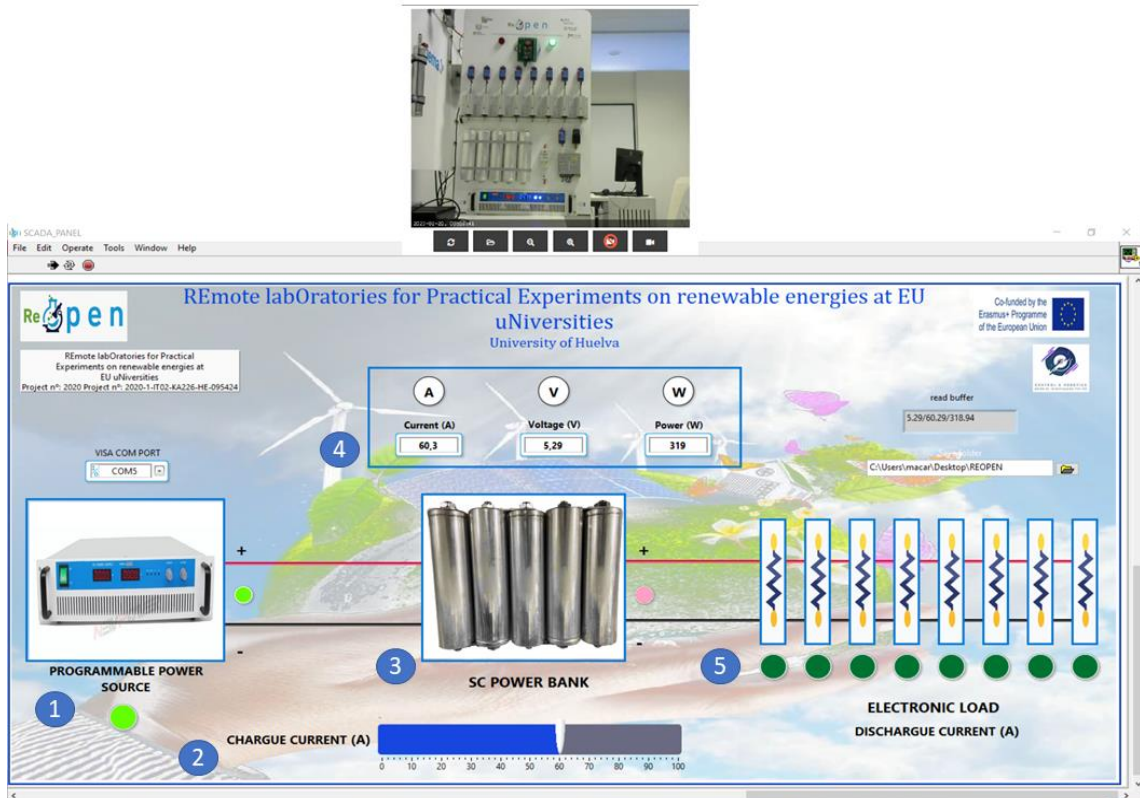


Figura 3. 12. Interfaz de usuario del laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores: proceso de carga.

La interfaz de usuario se crea en el entorno LabVIEW®. Para comenzar con la práctica remota, en primer lugar, el alumnado debe encender la fuente de alimentación programable pulsando sobre la imagen (1, Figura 3. 12). Una vez encendida la fuente de alimentación programable, el alumnado debe seleccionar la corriente de carga del banco de supercondensadores. Para seleccionar la corriente de carga, el alumnado debe mover la barra deslizante (2, Figura 3. 12). A continuación, se inicia el proceso de carga del banco de supercondensadores. Si el alumnado hace clic en la imagen del banco de supercondensadores (3, Figura 3. 12), podrá ver una segunda ventana como se muestra en la Figura 3. 13, donde se puede visualizar las diferentes curvas de carga. En la parte superior de la ventana principal de la interfaz de usuario, el alumnado puede visualizar los valores instantáneos de corriente, voltaje y potencia del banco de supercondensadores (4, Figura 3. 12). Una vez que el voltaje en el banco de supercondensadores alcanza los 12 VCC, el proceso de carga se detiene.

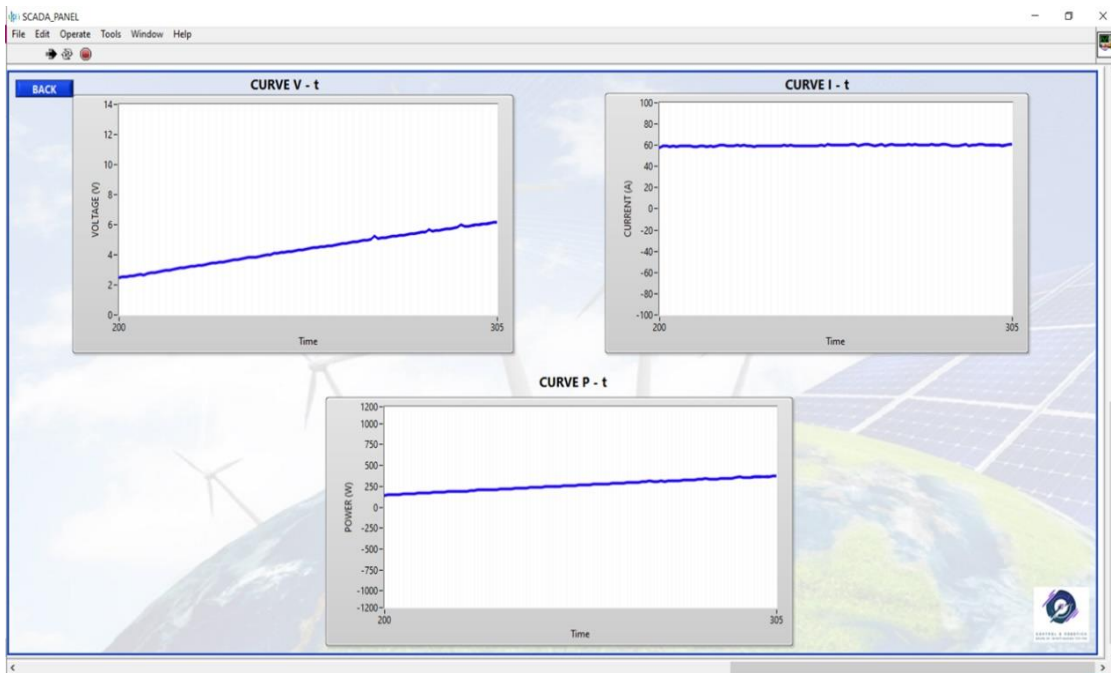


Figura 3. 13. Segunda ventana de la interfaz de usuario. Gráfico de carga y descarga del banco de supercondensadores.

Del mismo modo, el alumnado puede realizar una prueba experimental para dibujar el proceso de descarga. Para ello, el alumnado debe apagar la fuente de alimentación programable (1, Figura 3. 14) y seleccionar el número de resistencias deseado (5, Figura 3. 14), hasta un máximo de ocho resistencias. La corriente de descarga está condicionada por el número de resistencias seleccionadas, cuantas más resistencias se seleccionen, mayor será la corriente de descarga. Al igual que en el proceso de carga, el alumnado puede controlar los valores instantáneos de corriente, voltaje y potencia en la parte superior de la ventana principal de la interfaz de usuario (4, Figura 3. 14). El alumnado también puede monitorizar las curvas de descarga en la segunda ventana de la interfaz de usuario, como se muestra en la Figura 3. 13.

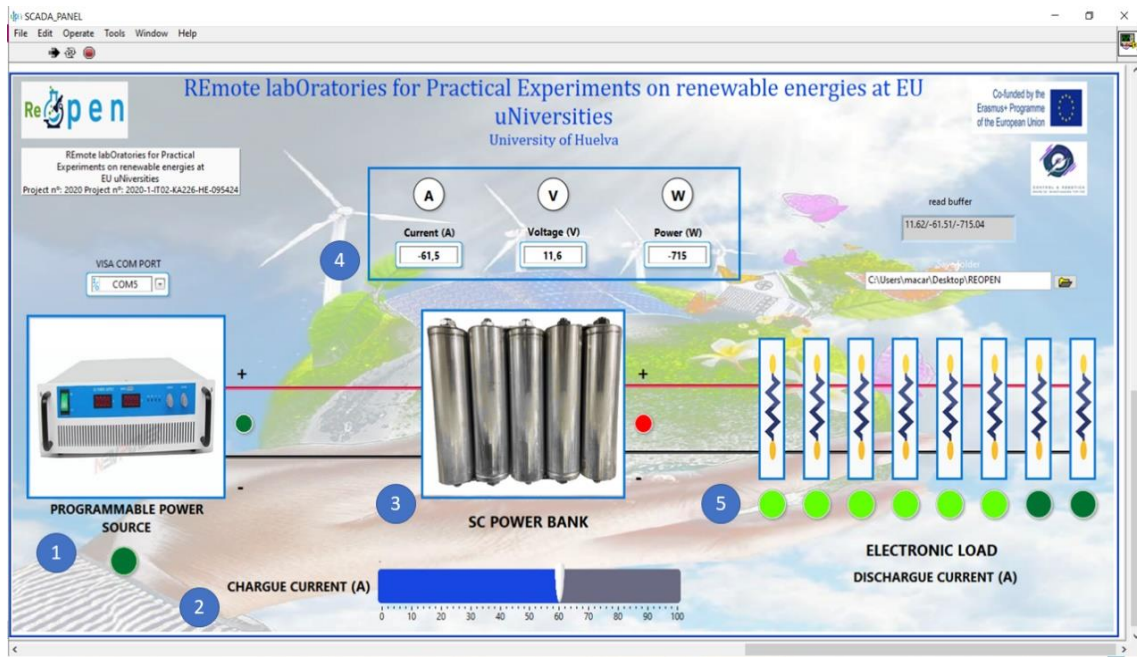


Figura 3. 14. Interfaz de usuario del laboratorio remoto basado en un banco de supercondensadores: proceso de descarga.

3.4 Resultados y Discusión

Como ya se ha mencionado, la UHU, junto con otras cuatro universidades europeas, han desarrollado una infraestructura estandarizada de laboratorios remotos. Para mostrar las contribuciones y capacidades de la plataforma colaborativa desarrollada, se realizó un estudio estadístico, como se muestra en la Figura 3. 3. El estudio estadístico se basa en una encuesta anónima de expectativas que se rellenó antes de la experiencia a distancia. Esta encuesta inicial incluye preguntas para averiguar si el alumnado y profesorado han tenido experiencias previas con laboratorios remotos. Una vez que el alumnado ha completado la experiencia remota, rellena una encuesta sobre los conocimientos técnicos adquiridos. Después, el alumnado rellena una encuesta anónima de satisfacción. Las preguntas se han valorado en una escala Likert de 5 puntos (1: totalmente en desacuerdo y 5: totalmente de acuerdo). A continuación, se presentan los resultados del análisis en función de los objetivos de este estudio.

3.4.1 Encuesta de expectativas

El objetivo de esta encuesta es conocer si el alumnado y profesorado ha tenido experiencia previa a distancia y su opinión sobre el uso de estas nuevas tecnologías. Como se puede observar en las Tabla 3. 4 y Tabla 3. 5, poco alumnado y profesorado ha tenido la oportunidad de utilizar previamente laboratorios remotos en el método de enseñanza-aprendizaje. Del mismo modo, alumnado y profesorado ha oído hablar de ello o ha visto vídeos sobre laboratorios remotos, pero no ha participado activamente. También, tanto alumnado como profesorado

piensa que el uso de laboratorios remotos mejora el método de aprendizaje. Por último, una gran mayoría opina que los laboratorios remotos deberían incluirse en los planes de estudio.

Tabla 3. 4. Respuestas de los estudiantes a la encuesta sobre expectativas.

P1	Sí (%)		No (%)		
¿Ha tenido anteriormente la oportunidad de adquirir experiencia con laboratorios remotos?	20		80		
P2 En caso afirmativo en la pregunta anterior, ¿qué tipo de experiencias ha adquirido sobre los laboratorios remotos?	He oído hablar de ello pero no he participado activamente (%)	He visto un vídeo en Internet pero no he participado activamente (%)	Tuve un laboratorio remoto (%)	He tenido varios laboratorios remotos de este tipo en mi formación (%)	
	40	35	20	5	
P3 ¿Cree que sería o fue útil para su estudio tener experiencia con laboratorios remotos?	No es nada útil (%)	Poco útil (%)	Parcialmente útil (%)	Útil (%)	Muy útil (%)
	2	3	5	60	30
P4 ¿Cree que los laboratorios remotos deberían incluirse más en los planes de estudios?	No es nada útil (%)		Poco útil (%)		Parcialmente útil (%)
	72		8		18

Como se desprende de los datos recogidos en la Tabla 3. 4, el 80% del alumnado no tenían ninguna experiencia previa con los laboratorios remotos. Sin embargo, el 90% del alumnado considera que los laboratorios remotos son útiles o muy útiles, y el 72% recomienda su inclusión en los planes de estudio.

Tabla 3. 5. Respuestas de los profesores a la encuesta sobre expectativas.

P1	Sí (%)		No (%)		
¿Ha tenido anteriormente la oportunidad de adquirir experiencia con laboratorios remotos?	27		73		
P2 En caso afirmativo en la pregunta anterior, ¿qué tipo de experiencias ha adquirido sobre los laboratorios remotos?	He oído hablar de ello pero no he participado activamente (%)	He visto un vídeo en Internet pero no he participado activamente (%)	Tuve un laboratorio remoto (%)	He tenido varios laboratorios remotos de este tipo en mi formación (%)	
	30	35	25	10	
P3	No es nada útil (%)	Poco útil (%)	Parcialmente útil (%)	Útil (%)	Muy útil (%)

¿Cree que sería o ha sido útil para su docencia tener experiencia con laboratorios remotos?	4	5	6	50	35
P4	Yes (%)		No (%)		Unsure (%)
¿Cree que los laboratorios remotos deberían incluirse más en los planes de estudios?	66		12		12

De la Tabla 3. 5 se desprende que el 73% del profesorado no tenía ninguna experiencia previa con los laboratorios remotos. Al igual que el alumnado, a pesar de no tener experiencia previa, un gran porcentaje, el 85% del profesorado considera que los laboratorios remotos son útiles o muy útiles. No obstante, el profesorado aún no está convencido de que los laboratorios remotos deban incluirse en los planes de estudios.

3.4.2 Encuesta de autoevaluación

El profesorado evaluó los conocimientos técnicos adquiridos por el alumnado durante la experiencia a distancia. Previamente, el alumnado rellenó la encuesta de autoevaluación. En esta encuesta se les formulaban varias preguntas sobre los conocimientos técnicos que habían aplicado para poder realizar la experiencia a distancia. Las preguntas de la encuesta de autoevaluación se muestran en la Tabla 3. 6. El profesor evaluó las preguntas con un porcentaje de preguntas correctas o incorrectas.

Tabla 3. 6. Respuestas de los estudiantes a la encuesta de autoevaluación.

		Correcto (%)	Incorrecto (%)
P1	¿Cuál es la corriente máxima de carga?	40	60
P2	¿Cuál es el voltaje máximo de carga del banco de supercondensadores?	73.33	26.67
P3	¿Cuántos supercondensadores hay?	80	20
P4	¿Cuántas resistencias hay?	86.67	13.33
P5	¿Cuál es la corriente máxima de descarga?	53.33	46.67
P6	¿Cuántas variables puedes representar en los gráficos?	66.67	33.33
P7	Cuando se carga el banco de supercondensadores, ¿hay que apagar la fuente de alimentación programable?	93.33	6.67
P8	Tras el experimento, ¿qué tipos de valores se guardan en el archivo .txt?	60	40

3.4.3 Encuesta de satisfacción

En general, puede decirse que el alumnado y profesorado ha tenido una aceptación muy alta hacia la integración de laboratorios remotos. Esta aceptación se debe a que los laboratorios remotos ofrecen versatilidad y flexibilidad para el aprendizaje. La versatilidad y flexibilidad se deben a que los laboratorios remotos no dependen de un horario prefijado y permiten repetir el experimento tantas veces como el alumnado lo requiera. De hecho, parte del alumnado y profesorado expresará su entusiasmo por poder probar los demás laboratorios remotos integrados en la plataforma estandarizada RE-OPEN.

A partir de las respuestas del alumnado y profesorado que se muestran en las Tabla 3. 7 y Tabla 3. 8, se observa que alumnado y profesorado considera útil poder acceder a laboratorios remotos de otras universidades (Tabla 3. 7, P0; AVG_Estudiantes = 4.8; AVG_Profesores = 4.82, y Tabla 3. 8, P5; AVG_Estudiantes = 4.37; AVG_Profesores = 4.14).

En cuanto al procedimiento de aprendizaje (Tabla 3. 7, P1 y P2), alumnado y profesorado confirma, mediante puntuaciones altas, que los laboratorios remotos refuerzan y mejoran los conceptos teóricos (P1; AVG_Estudiantes = 4.25; AVG_Profesores = 4.29). Además, la infraestructura estandarizada de RE-OPEN mejora la comprensión de la importancia del uso de las energías renovables (P2; AVG_Estudiantes = 3.88; AVG_Profesores = 4.01). Asimismo, alumnado y profesorado considera que el uso de laboratorios remotos aumenta la seguridad del alumnado y del equipo con respecto a los laboratorios físicos (Tabla 3. 7, P3; AVG_Estudiantes = 3.92; AVG_Profesores = 3,74). En general, alumnado y profesorado considera que el laboratorio remoto es una innovación positiva (Tabla 3. 7, P4; AVG_Estudiantes = 4.40; AVG_Profesores = 4.53).

Tabla 3. 7. Utilidad de los laboratorios remotos según los estudiantes y los profesores.

		Alumnado		Profesorado	
		AVG	SD	AVG	SD
P0	Es útil poder acceder a otros laboratorios remotos de otras universidades	4.80	0.79	4.82	0.81
P1	El uso de laboratorios remotos ayuda a reforzar los conceptos teóricos	4.25	0.64	4.29	0.73
P2	El laboratorio remoto ayuda a comprender la importancia del uso de energías renovables	3.88	0.58	4.01	0.66
P3	El uso de laboratorios remotos es más seguro que el de laboratorios físicos	3.92	0.62	3.74	0.54
P4	La valoración global del laboratorio remoto es positiva	4.40	0.58	4.53	0.72

AVG: media
SD: desviación típica

Tabla 3. 8. Usabilidad percibida por estudiantes y profesores.

		Alumnado		Profesorado	
		AVG	SD	AVG	SD
P5	El laboratorio remoto permite realizar la actividad del mismo modo que el laboratorio físico	4.37	0.49	4.14	0.55
P6	La actividad puede llevarse a cabo sin supervisión	4.01	0.60	3.77	0.62
P7	La flexibilidad horaria ayuda a realizar la actividad	4.75	0.54	4.73	0.50
P8	El manual de usuario proporcionado en el LMS ayuda a realizar la actividad	3.81	0.80	4.26	0.78
P9	Utilizar el gestor de reservas es fácil	4.11	0.69	4.79	0.77
P10	El acceso al laboratorio remoto a través del LMS es sencillo	4.29	0.72	4.54	0.73
P11	La interfaz de usuario es fácil e intuitiva	4.23	0.57	4.62	0.62
P12	La integración de la cámara de vídeo en el laboratorio remoto ayuda a comprender la actividad	4.52	0.51	4.80	0.74

AVG: Average

SD: Standard deviation

En cuanto a la realización del experimento (Tabla 3. 8, P5, P6, P7 y P8), el alumnado tiene una mejor valoración (P5; AVG_Estudiantes = 4.37) que el profesorado (P5; AVG_Profesores = 4.14). Además, el alumnado cree que la actividad puede realizarse sin la supervisión de un profesor (P6; AVG_Estudiantes = 4.01), mientras que el profesorado cree que debería haber un supervisor (P6; AVG_Profesores = 3.77). En este sentido, se muestra una gran ventaja de los laboratorios remotos sobre los presenciales, el control mediante software sustituye a la supervisión permanente del profesor que en las prácticas presenciales sería necesaria para garantizar el correcto uso de los dispositivos de laboratorio.

Por otro lado, alumnado (P7; AVG_Estudiantes = 4.75) y profesorado (P7; AVG_Profesores = 4.73) consideran una gran ventaja la flexibilidad de tiempo disponible para realizar las pruebas. Mientras que el profesorado cree que el material didáctico ayuda a aprender la actividad (P8; AVG_Profesores = 4.26), el alumnado no está de acuerdo con respecto a la idoneidad de las instrucciones para realizar el trabajo de laboratorio (P8; AVG_Estudiantes = 3.81; SD = 0.80).

El profesorado valora muy positivamente el gestor de reservas (P9; AVG_Profesores = 4.79), el acceso al LMS (P10; AVG_Profesores = 4.54) y la interfaz de usuario (P11; AVG_Profesores = 4.62), afirmando que es fácil de usar e intuitiva. Lo más innovador para el profesorado es la implementación de una cámara de vídeo que transmite la práctica a distancia en tiempo real (P12; AVG_Profesores = 4.80).

Estos mismos aspectos fueron evaluados por el alumnado, que afirma que el gestor de reservas del laboratorio remoto es fácil de utilizar (P9; AVG_Estudiantes = 4.11), así como el acceso remoto a través del LMS (P10; AVG_Estudiantes = 4.29). El alumnado considera que la interfaz de usuario es intuitiva (P11; AVG_Estudiantes = 4.23), y percibe ventajas reales en el uso de la cámara (P12; AVG_Estudiantes = 4.52).

Cabe destacar que las puntuaciones dadas por el alumnado a las preguntas P2 (Tabla 3. 7), P8 y P12 (Tabla 3. 8) fueron significativamente inferiores a las puntuaciones dadas por el profesorado. Esto puede deberse a que el alumnado sigue prefiriendo las prácticas presenciales en asignaturas con un alto nivel de experimentación como las energías renovables.

3.5 Conclusiones

El trabajo presentado en este capítulo pretendía contribuir a la transición digital en la educación superior, mediante la creación de un modelo educativo estandarizado basado en laboratorios remotos, centrados en las energías renovables, y desarrollado en el marco de la UE. El objetivo era establecer, probar y validar un modelo educativo estandarizado y una solución TIC para llevar a cabo actividades de laboratorio remotos, fusionando el aprendizaje en línea y tradicional, y permitiendo al alumnado llevar a cabo actividades/experimentos prácticos integrados, con lecciones teóricas sobre temas de energías renovables.

La red europea de colaboración está formada por cinco universidades europeas que se han propuesto subsanar la falta de infraestructuras comunes entre distintos laboratorios remotos. El resultado ha sido la creación de la red educativa RE-OPEN, ofreciendo verdaderas oportunidades de aprendizaje a un alumnado de ingeniería más diverso y amplio, al proporcionar un acceso más flexible a experimentos físicos en cualquier momento y lugar. Con esta infraestructura de colaboración, RE-OPEN fomenta la reutilización de códigos de programación, evitando la fragmentación que provoca el uso de herramientas propietarias por parte de cada universidad. De este modo, la red RE-OPEN proporciona al alumnado las competencias necesarias para satisfacer las necesidades de la Industria 4.0.

Inicialmente, este trabajo tenía como objetivo inicial entrevistar al menos a 15 profesores y 25 estudiantes de facultades STEM; a 5 miembros del personal universitario, como técnicos de laboratorio; y a 5 administradores de empresas para la fase de mapeo. En total, se obtuvieron 57 encuestas a profesores y 142 encuestas a estudiantes de facultades STEM, 13 encuestas a personal universitario como técnicos de laboratorio y 35 encuestas a administradores de empresas.

Los datos obtenidos de las encuestas muestran que la implantación de laboratorios remotos en el método de enseñanza-aprendizaje es una auténtica

novedad. En general, alumnado y profesorado opinan que la incorporación de este nuevo método es muy beneficioso, especialmente para las prácticas de laboratorio. Estos laboratorios ofrecen una gran flexibilidad y versatilidad, y tanto alumnado como profesorado valoran muy positivamente estas ventajas, ya que permiten repetir el experimento tantas veces como el alumnado lo requieran, reforzando los conceptos teóricos. Otra valoración muy positiva obtenida de las encuestas es que la red colaborativa se basa en energías renovables, adaptándose al nuevo modelo energético europeo. Pero, sobre todo, la idea de crear una red colaborativa de laboratorios remotos con la participación de cinco universidades europeas ha recibido la valoración más positiva. Esta idea llena un vacío que existía hasta ahora, permitiendo el desarrollo de nuevas habilidades técnicas y posibilitando que el alumnado amplíe sus conocimientos teóricos y prácticos al poder utilizar más laboratorios que sólo los que están disponibles en su propia universidad.

Desde que el COVID-19 llegó en 2020, ha estado transformando la vida de las personas. RE-OPEN es un proyecto que se creó para cubrir una necesidad que surgió en ese momento de continuar la enseñanza a distancia, especialmente a nivel práctico. Desde entonces, el método de enseñanza-aprendizaje se ha ido adaptando a esta nueva situación, cobrando protagonismo la enseñanza online, es decir, la educación híbrida. Por ello, cada vez se incorporan más laboratorios remotos en las universidades, especialmente en las relacionadas con el ámbito científico-tecnológico.

Se puede decir que esta red colaborativa de laboratorios remotos europeos es pionera en cubrir este nuevo contexto, y en un campo emergente y en auge, como es el de las energías renovables, que es un campo bastante caro, no todas las universidades pueden permitirse tener laboratorios basados en energías renovables dentro de sus instalaciones.

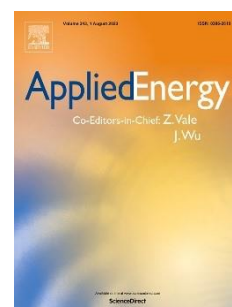
Para concluir, conviene hablar de los límites de los laboratorios remotos. Éstos no deben percibirse como un sustituto de los laboratorios convencionales (presenciales), sino como un complemento y una solución a sus restricciones. El laboratorio remoto, al igual que el virtual, es una herramienta tecnológica compuesta de software, pero, además y a diferencia del virtual, también está compuesto de hardware. El laboratorio remoto permite al profesorado y alumnado realizar, a través de Internet, sus prácticas como si estuvieran en un laboratorio convencional (presencial). Los usuarios utilizan y controlan los recursos disponibles mediante el uso de sensores e instrumentación que les permiten interactuar con equipos reales en lugar de utilizar simulaciones y sin requerir la presencia física en el laboratorio. Así, los usuarios pueden familiarizarse con interfaces que corresponden a equipos reales que manejan a distancia. Una ventaja destacada de los laboratorios remotos es la reducción de las limitaciones de espacio y tiempo, ya que no requieren la presencia física del usuario en el laboratorio. De esta forma, los laboratorios están disponibles más

allá del horario lectivo o de las prácticas presenciales programadas, lo que permite al alumnado aumentar el número de horas de práctica, requisito imprescindible para el aprendizaje en las carreras de ingeniería. Esto fomenta la autonomía en el aprendizaje, ya que no requiere la concurrencia con el profesor. Otro aspecto a destacar es la posibilidad de repetir la misma práctica o la implementación de variaciones en la práctica inicial de acuerdo a las necesidades e intereses del alumnado, contribuyendo al aprendizaje personalizado y respetando las necesidades individuales de cada usuario.

Dicho esto, los laboratorios remotos no deben considerarse como un sustituto de los laboratorios convencionales, sino como un complemento. En consecuencia, es necesario hacer un uso racional de los laboratorios remotos en conjunción con los laboratorios convencionales para proporcionar al alumnado el conjunto más completo de competencias en la nueva era digital.



Capítulo 4. Una aplicación real de hidrógeno como energía renovable. Sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno para el transporte y la distribución en la cadena alimentaria



Palabras clave Resumen

Camiones y furgonetas ligeros refrigerados

Pila de combustible PEM refrigerada por aire

Enseñanza de las energías renovables

La población urbana y la tendencia al comercio *on-line* provocan un aumento de la solución de reparto en las ciudades. El crecimiento del sector del transporte es muy perjudicial para el medio ambiente, ya que es responsable de aproximadamente el 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la Unión Europea (UE). El problema se agrava cuando se transportan alimentos perecederos, ya que el motor de propulsión del vehículo (en inglés: *Vehicle Propulsion Engine* o VPE) debe alimentar no sólo el vehículo, sino también la unidad de refrigeración. Esto significa que el VPE debe funcionar continuamente, tanto en carretera como parado (durante la entrega), ya que hay que preservar la cadena de frío. El resultado es costoso (elevado consumo de combustible) y perjudicial para el medio ambiente. En la actualidad, el transporte frigorífico no admite soluciones totalmente eléctricas debido al elevado consumo de energía necesario, lo que motiva el trabajo que se presenta en este capítulo. En él se presenta el desarrollo de una de un sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno (en inglés: *Hydrogen-Powered Refrigeration System* o HPRS) que se integrará en camiones ligeros y furgonetas estándar para el transporte y reparto de alimentos a corta distancia. La solución propuesta para el alumbrado combina una pila de combustible de membrana de electrolito polimérico (en inglés: *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* o PEMFC) refrigerada por aire, una batería de iones de litio y dos depósitos de hidrógeno presurizados de bajo peso para minimizar el coste y aumentar la autonomía y la densidad energética. Además, para su implantación e integración, el alumbrado desarrolla toda la electrónica de adquisición, potencia y control necesaria para su correcta gestión. Del mismo modo, el alumbrado también desarrollará un sistema de gestión de energía (en inglés: *Energy Management System* o EMS) para garantizar la continuidad y seguridad en el funcionamiento del sistema eléctrico durante la jornada laboral, maximizando al mismo tiempo tanto la potencia de salida disponible como la vida útil de la PEMFC. La finalidad de este capítulo es la aplicación práctica por parte del alumbrado del trabajo desarrollado en el capítulo anterior, partiendo de una adquisición teórica de conocimientos a través de los laboratorios remotos basados en energías renovables implementados en las universidades, hasta finalizar llevando a la práctica diaria eso conocimientos teóricos.

Los resultados experimentales en un camión ligero frigorífico real proporcionan más de 4 horas de autonomía en perfiles de conducción interurbana intensiva, que pueden incrementarse, en caso necesario, simplemente aumentando la presión del hidrógeno almacenado desde los 200 bares actuales hasta la que sea necesaria. El correcto funcionamiento de todo el HPRS ha sido validado experimentalmente en términos de funcionalidad, autonomía y seguridad, con un ahorro de combustible superior al 10% y más de 3 650 kg de CO₂/año evitado.

Lista de acrónimos

APU	Auxiliary Power Unit
BoP	Balance of Plant
CA	Corriente Alterna
CC	Corriente Continua
EMI	Electromagnetic Interference
EMS	Energy Management System
FC	Fuel Cell
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HPRS	Hydrogen-Powered Refrigeration System
MCC	Modo de Conducción Continua
MPP	Maximum Power Point
P&OM	Modified Perturbation and Observation
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
PWM	Pulse-Width Modulation
RS	Refrigeration System
SOC	State of Charge
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
UE	Unión Europea
VARS	Vapour Absorption Refrigerated System
VCL	Vehículos Comerciales Ligeros
VPE	Vehicle Propulsion Engine

Lista de símbolos

C	Condensador de filtro (F)
C_{Bat}	Capacidad de la batería (Ah)
C_{H2FC}	Tasa de consumo de hidrógeno de la PEMFC (litros/min)
δ	Ciclo de trabajo
$\Delta I_L(t)$	Corriente de rizado del inductor (A)
$\Delta V_C(t)$	Voltaje de rizado del condensador (V)
E_{req}	Energía necesaria para garantizar el funcionamiento del compresor eléctrico (Wh)
η_{DCAC}	Rendimiento del convertidor CC/CA
η_{H_2}	Eficacia de utilización del hidrógeno en un sistema eléctrico basado en el hidrógeno
f_S	Frecuencia de la señal PWM (20 kHz)
H_2	Nivel de hidrógeno (%)
H_{2min}	Nivel mínimo de hidrógeno (%)
$I_C(t)$	Corriente del condensador (A)
$I_L(t)$	Corriente del inductor (A)
$I_R(t)$	Corriente de carga (A)
L	Inductor (H)
P_{H_2}	Presión de almacenamiento del hidrógeno (bar)
P_{aux}	Potencia demandada por los auxiliares (W)
P_{Bat}	Potencia de la batería (W)
P_{cool}	Potencia demandada por el compresor eléctrico de refrigeración (W)
P_{DCAC}	Potencia del convertidor CC/CA (W)
P_{DCDC}	Potencia del convertidor elevador CC/CC (W)

P_{FC}	Potencia de la pila de combustible (W)
P_{FCSP}	Límite de potencia preestablecida de la pila de combustible (W)
R	Resistencia de carga (Ω)
SOC	Estado de carga de la batería (%)
t_{stop}	Tiempo diario en el que el vehículo se detiene y el compresor eléctrico de refrigeración se activa (h)
T_{amb}	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
T_{DCDC}	Temperatura de funcionamiento del convertidor CC/CC ($^{\circ}C$)
$T_{DCDCmax}$	Temperatura máxima de funcionamiento permitida en el convertidor elevador CC/CC ($^{\circ}C$)
V_{Bat}	Voltaje de la batería (V)
V_{BatFC}	Voltaje de preajuste de la batería para activar la pila de combustible (V)
V_{Batmin}	Voltaje mínimo de la batería (V)
V_{Batmax}	Voltaje máximo de la batería (V)
V_{BatN}	Voltaje nominal de la batería (V)
V_{DCBus}	Voltaje del bus de CC (V)
V_{bottle}	Volumen del depósito de H ₂ (litros)
V_{FC}	Voltaje de la pila de combustible (V)
V_{FCSP}	Límite de voltaje preestablecido de la pila de combustible (V)
$V_{H_2bottle}$	Volumen de hidrógeno almacenado en el depósito de H ₂ (litros)
V_{H_2req}	Volumen de hidrógeno necesario (litros)
$V_C(t)$	Voltaje del condensador (V)
$V_L(t)$	Voltaje del inductor (V)
Z	Factor de compresibilidad del hidrógeno

4.1 Introducción

A principios del milenio, la población rural era 1.16 veces superior a la urbana. De hecho, la población rural ha estado por encima de la urbana desde 1960, cuando se empieza a disponer de datos históricos [58]. Pero esta tendencia se invirtió en 2007 [59], cuando la población urbana era el 50% de la población mundial total, y se espera que para 2050, la población urbana alcance el 68%, siendo la urbanización una de las tendencias más transformadoras del siglo XXI. Con el aumento de la población mundial y la mejora general de las condiciones de vida, se espera que la demanda de alimentos, agua y energía aumente en un 50%, 30% y 45%, respectivamente [60]. El aumento de la demanda de alimentos, así como la expansión del comercio *on-line*, irán acompañados de un crecimiento proporcional del transporte de alimentos, normalmente refrigerados. Sin embargo, el sector del transporte es uno de los más contaminantes, en España, por ejemplo, en 2019, alcanzó el 29.1% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [61].

En concreto, los camiones ligeros y furgonetas utilizados para una amplia gama de servicios como la construcción, la entrega de alimentos refrigerados y

las ambulancias [62,63], son responsables del 2.5% de las emisiones totales de dióxido de carbono (CO₂) en la Unión Europea (UE) [64].

Por otro lado, la cadena de frío que garantiza la calidad y seguridad de los alimentos durante su transporte y entrega, se mantiene mediante sistemas de refrigeración (en inglés: *Refrigeration system* o RS) integrados en los vehículos. Estos sistemas de refrigeración, ya sean eléctricos o mecánicos, funcionan siempre con un motor de combustión (diésel), el mismo motor de combustión que propulsa los camiones ligeros y las furgonetas, o un motor de combustión auxiliar en los camiones grandes. Por tanto, los vehículos de transporte equipados con RS consumen más combustible y emiten más GEI. El impacto medioambiental de un RS con motor diésel puede ser hasta un 40% del motor de propulsión del vehículo (en inglés: *Vehicle propulsion engine* o VPE) [65]. El consumo adicional de diésel debido a los RS se sitúa en torno al 12%, lo que representa un coste de combustible de 6 000 euros al año, aproximadamente el 40% del coste directo [66].

Teniendo en cuenta lo anterior, el transporte refrigerado está reconocido como uno de los principales procesos en términos de ahorro potencial de energía y reducción de emisiones de GEI en las cadenas de frío [67]. La sustitución de los RS diésel por eléctricos (no accionados por el VPE) es una recomendación firme para los próximos años [68].

En este contexto, el Parlamento Europeo [69] ha establecido un objetivo medio de emisiones de CO₂ de 147 g CO₂/km para los nuevos vehículos comerciales ligeros (VCL) matriculados en la UE entre 2020 y 2024. España cuenta con una flota de unos 2.5 millones de VCL [70], y su objetivo es reducir las emisiones en 27 Mt de CO₂ para 2030 [71].

En la búsqueda de soluciones alternativas al contaminante del transporte diésel, resulta evidente la necesidad de migrar los motores de combustión interna a la tecnología de propulsión eléctrica [72]. En la actualidad, la tecnología se centra casi exclusivamente en el uso de soluciones basadas en baterías, pero en los últimos años ha surgido un gran interés por el uso de sistemas basados en hidrógeno para su utilización en aplicaciones móviles [73]. Este tipo de soluciones ya son técnicamente viables en la actualidad, caracterizándose por una mayor densidad energética en comparación con las soluciones basadas en baterías, lo cual es crucial en aplicaciones donde la autonomía y la reducción de peso son parámetros clave [73]. En esta línea de investigación, pocos autores han realizado estudios sobre la aplicación de las pilas de combustible (en inglés: *Fuel Cells* o FCs) al transporte refrigerado.

Una de las investigaciones más recientes se centra en el acoplamiento de una pila de combustible de óxido sólido (en inglés: *Solid Oxide Fuel Cell* o SOFC) con un sistema de refrigeración por absorción de vapor (en inglés: *Vapour Absorption Refrigerated System* o VARS). El funcionamiento se basa en el concepto

de cogeneración, en el que el calor producido durante el funcionamiento de la SOFC se utiliza a través del VARS para refrigerar la caja frigorífica isotérmica, mientras que la electricidad generada puede utilizarse para satisfacer el consumo del RS y de los auxiliares del vehículo cuando el VPE está apagado. Ejemplos de estas arquitecturas se estudian a nivel de simulación en [60] y [74]. En concreto, en [60] se analiza desde un punto de vista termo-económico la viabilidad de configuraciones de conjuntos SOFC+VARS en serie-paralelo para su uso en furgonetas o camiones pequeños, medianos y grandes. Un estudio similar se desarrolla en [74], donde se modela, simula y analiza el comportamiento y viabilidad técnica de una unidad de potencia auxiliar (en inglés: *Auxiliary Power Unit* o APU) SOFC con un VARS basado en $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$.

El inconveniente de utilizar SOFCs, [60] y [74], es que son FCs de alta temperatura (750 – 1 000 °C) que requieren una etapa de precalentamiento que dura hasta varias decenas de minutos [73]. Además de lo anterior, el funcionamiento de las SOFC requiere un complejo balance de planta (en inglés: *Balance of Plant* o BoP) y un sistema de gestión de la energía (en inglés: *Energy Management System* o EMS) que tenga en cuenta los requisitos térmicos y eléctricos necesarios [75]. Aparte de esto, las SOFC están diseñadas para proporcionar al menos varias decenas de kilovatios, por lo que están sobredimensionadas para su uso en camiones frigoríficos ligeros y furgonetas. Por último, requerirían espacio adicional y unas condiciones térmicas específicas en el vehículo difíciles de conseguir. En cambio, las pilas de combustible de membrana de electrolito polimérico (en inglés: *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* o PEMFC) están disponibles desde varios vatios hasta decenas de kilovatios, con un tamaño y un peso menores que las SOFC para la misma potencia [76]. Comparada con la SOFC, la PEMFC se caracteriza por un BoP más simple, unos tiempos de arranque y parada más cortos (en el rango de segundos), una temperatura de operación más baja (alrededor de 70 °C), así como una mejor respuesta dinámica [77], lo que la hace ideal para su uso en aplicaciones como la aquí estudiada.

Probablemente, en base a lo anterior, otros autores se hayan planteado el uso de PEMFCs para RSs en vehículos. A nivel de simulación, en [78] se presenta un estudio comparativo de diferentes arquitecturas de sistemas híbridos basados en baterías e hidrógeno (PEMFCs), para su aplicación en un camión semirremolque frigorífico. El rendimiento de cada configuración en términos de eficiencia y peso se evaluó mediante simulación para un viaje de 60 horas. De forma similar, en [66] se simula, diseña y modela un sistema de potencia híbrido basado en baterías y PEMFC para su uso en camiones frigoríficos utilizando la herramienta de software SH2&FC. El alcance de este trabajo finaliza con un análisis de viabilidad tecno-económica basado en el dimensionamiento del sistema y diferentes perfiles de consumo, así como un estudio de disponibilidad

de la cadena de hidrógeno. Las pruebas del prototipo se posponen para futuros trabajos.

Varios trabajos han evaluado prototipos experimentales, por ejemplo, [79] propone una arquitectura híbrida basada en supercondensadores, baterías y una PEMFC como APU para alimentar el RS eléctrico sustituyendo la batería interna de 12 VCC y el alternador del vehículo. En esta arquitectura, los supercondensadores absorben los picos de potencia durante los arranques del RS, mientras que la PEMFC suministra el perfil de demanda el resto del tiempo. El papel de la batería es garantizar el suministro de energía a la BoP de la PEMFC. Aunque el prototipo muestra su viabilidad técnica, los cambios sucesivos en la potencia de funcionamiento, así como los ciclos repetitivos de encendido y apagado de la PEMFC conducirán a su rápida degradación, con la consiguiente pérdida de rendimiento, eficiencia e inviabilidad económica [80]. Además, su validación se realizó a nivel de laboratorio, por lo que no se aborda la integración de la APU en el vehículo.

De forma similar, en [81] se presenta una arquitectura híbrida basada en baterías y un sistema PEMFC *multistack*, compuesto por tres *stacks* tipo PEM que operan en paralelo. La función del prototipo es sustituir el motor diésel auxiliar que alimenta el compresor de los camiones semirremolque frigoríficos por un grupo electrógeno alimentado con hidrógeno. El dimensionamiento del sistema sigue los roles definidos para las baterías y las PEMFC. En este caso, las baterías se utilizan como sistema de almacenamiento de energía a corto plazo (con una batería de pequeña capacidad), mientras que el sistema de hidrógeno se utiliza a largo plazo (con un depósito de H₂ de gran capacidad). Las pruebas experimentales incluyen la caracterización individual de los componentes y la validación del RS para diferentes condiciones de temperatura simuladas en una cámara climática. A pesar del carácter experimental de este trabajo, su rendimiento sólo se ha evaluado durante la denominada fase de *pulldown*, en la que el RS funciona a máxima potencia para alcanzar la temperatura objetivo, por lo que no se dispone de información sobre el rendimiento del RS en la fase de regulación de la temperatura. Además, no se abordan la integración en el vehículo ni las pruebas en carretera.

Por último, Nuvera® presenta en [82] un prototipo propio de arquitectura híbrida de alta potencia para su uso en camiones frigoríficos de largo recorrido. La propuesta pretende sustituir el motor diésel auxiliar del RS por una solución que integra el sistema híbrido y el RS en el mismo chasis. Se utiliza una PEMFC de 20 kW para alimentar el RS eléctrico en un bus de 480 VCA. En este caso, el prototipo desarrollado con fines comerciales tiene unas dimensiones y potencias cerradas, lo que imposibilita su adaptación a diferentes tamaños de vehículos y aplicaciones, además de requerir cambios estructurales en el vehículo para su instalación.

En respuesta a las carencias encontradas en la literatura, en este capítulo se presenta una solución llave en mano de un sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno (en inglés: *Hydrogen-powered refrigeration system* o HPRS) que, totalmente integrado en camiones ligeros y furgonetas, permite transportar y entregar mercancías refrigeradas de forma respetuosa con el medio ambiente.

Que sea sabido, hasta ahora no se han publicado en la literatura científica ni un diseño detallado que demuestre la plena integración de este tipo de RS en un vehículo, ni resultados experimentales probados bajo perfiles de conducción reales. La solución propuesta se basa en una filosofía "plug and play" que hibrida una PEMFC refrigerada por aire con un pack de baterías de iones de litio y botellas de hidrógeno ligeras presurizadas.

A continuación, se enumeran las principales novedades de la propuesta presentada en este capítulo:

- El HPRS desarrollado minimiza los costes y aumenta la autonomía y la densidad energética.
- El EMS desarrollado garantiza la continuidad y la seguridad en el funcionamiento de todo el RS y de las instalaciones del vehículo.
- El EMS desarrollado prolonga la vida útil y maximiza la potencia extraída de la PEMFC bajo perfiles de conducción interurbana intensiva.
- El HPRS desarrollado se integra fácilmente en el chasis comercial de camiones ligeros y furgonetas sin necesidad de cambios estructurales.
- El SR original del vehículo, tanto en términos de equipamiento como de instalaciones, permanece inalterado.
- El rendimiento del HRPS desarrollado se ha validado en pruebas experimentales en carretera bajo perfiles de conducción interurbana intensiva.

La Tabla 4. 1 presenta una comparativa entre la literatura revisada y la propuesta de este capítulo.

Tabla 4. 1. Comparación de las aportaciones del trabajo de investigación con respecto a la bibliografía revisada.

Referencia	Pila de combustible	Fabricante	Potencia nominal	Características	Tecnología	Nivel de desarrollo
Propuesta científica de la Tesis	PEMFC	Horizon®	2 kW	Uso conservador del hidrógeno. Mayor vida útil. Control térmico del sistema de hidrógeno. Algoritmo de control P&OM* para PEMFC. Extensión de la autonomía. Autonomía:4 horas ampliables a más de 8 horas.	PEMFC + baterías	Integración total en el vehículo. Prototipo en la carretera
[60]	SOFC	No detallado	Furgoneta pequeña: 3.3 kW Furgoneta mediana: 12.8 kW Furgoneta grande: 18.7 kW	La pila SOFC alimenta la parte eléctrica, y su calor residual alimenta el VARS	VARS + SOFC	Simulación
[74]	SOFC	No detallado	Furgoneta pequeña: 2 kW Furgoneta mediana: 5 kW Furgoneta grande: 9 kW	Separa la carga de refrigeración del motor diésel principal	VARS + SOFC	Simulación
[83]	PEMFC	No detallado	No detallado	Análisis de arquitecturas para una fuente de alimentación híbrida de FC y batería. Comparación del consumo y la degradación del hidrógeno.	PEMFC + baterías	Simulación
[66]	PEMFC	No detallado	-	Análisis de los perfiles de carga. Estudio de la cadena de hidrógeno	PEMFC + baterías	Simulación
[79]	PEMFC	Ballard Power System®	1.2 kW	La APU a base de hidrógeno alimenta la carga eléctrica de refrigeración sustituyendo a la batería y el alternador	PEMFC + baterías	Montaje del laboratorio
[84]	PEMFC	No detallado	No detallado	Sustituye el depósito de combustible y el motor diésel que acciona el compresor de refrigeración por un grupo electrógeno alimentado con hidrógeno.	PEMFC + baterías	Montaje del laboratorio
[82]	PEMFC	Nuvera®	20 kW	Prototipo de APU basada en FC. Caracterización de componentes	PEMFC + baterías	Pruebas de laboratorio de componentes individuales

* Algoritmo de perturbación y observación modificado para extraer la máxima potencia de la PEMFC

El capítulo está organizado como sigue: la sección 4.2 explica los materiales y métodos utilizados para desarrollar el HPRS, incluyendo una descripción detallada del diseño, la electrónica de potencia y el EMS. La sección 4.3 reúne la

implementación física y los resultados experimentales, que se analizan en la sección 4.4. Por último, en la sección 4.5 se presentan las conclusiones.

4.2 Materiales y métodos

La definición y diseño del HPRS propuesto se basa en los requerimientos energéticos definidos para la aplicación práctica objeto de estudio. En concreto, el HPRS se ha diseñado para su integración y uso en un camión ligero para el transporte de alimentos perecederos refrigerados a una temperatura de 4 °C en un perfil de conducción interurbano de 8 horas. El escenario es una ciudad del suroeste de España (Huelva) con un clima subtropical y, por tanto, con muchas pérdidas de frío en el transporte y la entrega. El perfil de conducción se caracteriza por un elevado número de viajes de corta distancia seguidos de un elevado número de paradas para descargar mercancías. En concreto, para el diseño actual del HPRS, los tiempos de conducción y parada del vehículo se han considerado similares (4 horas circulando por carretera y 4 horas en espera o estacionado), según estimaciones y encuestas a profesionales del sector.

En las siguientes secciones se presentará el diseño de la arquitectura y los componentes del HPRS desarrollado.

4.2.1 *Diseño y dimensionamiento*

4.2.1.1 Arquitectura del sistema de refrigeración por hidrógeno

Para alcanzar el objetivo deseado, la arquitectura del HRPS debe diseñarse adecuadamente. Para ello, es esencial aprovechar todo el equipamiento de serie del vehículo para reducir al mínimo las modificaciones a realizar. Esto facilitará la homologación del vehículo tras su actualización y, por otro lado, abaratará la conversión diésel-hidrógeno.

En este sentido, es habitual que los camiones ligeros refrigerados y las furgonetas integren dos soluciones complementarias para hacer funcionar el RS. La primera se basa en el uso de un compresor mecánico, acoplado mecánicamente al VPE (los camiones frigoríficos de mayor tamaño disponen de un motor diésel auxiliar para alimentar el RS), Figura 4. 1. Lógicamente, esta configuración sólo funciona cuando el VPE está encendido. La segunda se basa en una unidad eléctrica de CA trifásica o monofásica, que incluye un compresor eléctrico. Esto significa que cuando el vehículo se encuentra en una estación de servicio o base, el RS puede alimentarse de la red eléctrica a través de una toma prevista en el vehículo, Figura 4. 1.

Teniendo en cuenta la premisa de la fácil integración, el diseño del HPRS se basa en la unidad eléctrica existente. Para ello, se hibridarán dos sistemas de almacenamiento de energía, batería e hidrógeno. Desde este punto de partida, se

implementará un sistema electrónico de potencia y de control que, junto con el desarrollo de un EMS específico, deberá asegurar un suministro constante del RS. Por tanto, la solución concebida es que cuando el vehículo esté en marcha, el compresor mecánico accionado por el VPE alimente el RS. Sin embargo, cuando el vehículo esté aparcado o parado para la entrega, el VPE se apagará, y el HPRS se encargará de mantener el RS a través del compresor eléctrico del vehículo.

La arquitectura HPRS propuesta se basa en el diseño de un sistema híbrido compuesto por una batería, el subsistema de hidrógeno, un bus de CC, toda la electrónica de potencia y control necesaria, y el EMS (alojado en la unidad de control) que lo gestiona todo, Figura 4. 1.

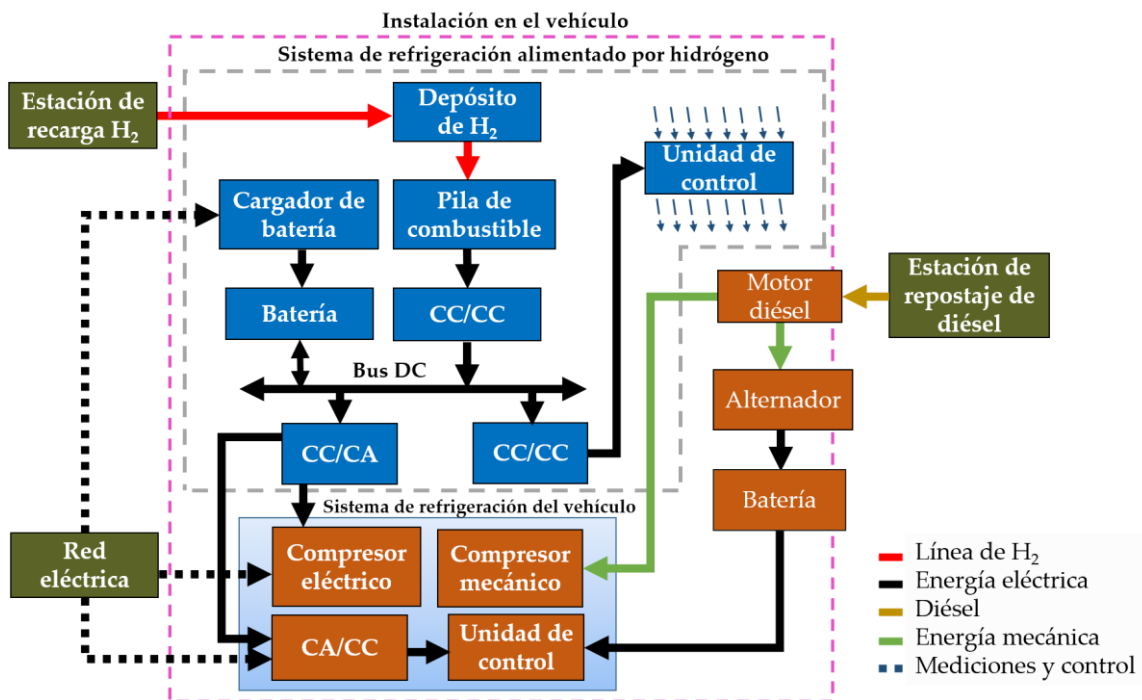


Figura 4. 1. Arquitectura del sistema de refrigeración por hidrógeno integrado en el vehículo.

La batería HPRS fija el voltaje del bus de CC y permanece permanentemente cargada a través de él. Por lo tanto, la función de la FC es recargar la batería suministrando energía al bus de CC a través de su convertidor CC/CC, que convierte la energía no regulada a la salida de la FC en energía regulada en el bus de CC. El compresor eléctrico del vehículo se alimenta del bus de CC a través de un convertidor CC/CA que también alimenta la unidad de control RS. El HPRS se completa con el depósito de almacenamiento de hidrógeno y los conductos de suministro, válvulas solenoides y de control y dispositivos de regulación de la presión necesarios. Además, se ha incorporado un cargador de batería estándar para cargar la batería del HPRS desde la red eléctrica. Así, en caso de fallo de la FC o falta de hidrógeno, el HPRS puede seguir funcionando con autonomía reducida.

4.2.1.2 Necesidades energéticas del HPRS

La energía requerida por el HPRS viene determinada por la ruta interurbana descrita del vehículo. Así, considerando la potencia nominal del compresor frigorífico eléctrico instalado ($P_{cool} = 2.5$ kW), el tiempo total de parada ($t_{stop} = 4$ h) y la eficiencia de conversión CC/CA, η_{DCAC} , estimada en un 90 %, la ecuación 4.1 determina la cantidad de energía necesaria (E_{req}) que debe suministrar el HPRS durante un día laborable. Se ha considerado el peor escenario posible, es decir, que el compresor esté siempre en funcionamiento durante el tiempo de parada.

$$E_{req} = \frac{P_{cool} \cdot t_{stop}}{\eta_{DCAC}} \quad (4.1)$$

Dando como resultado $E_{req} = 11.11$ kWh.

4.2.1.3 Dimensionamiento de la pila de combustible y del almacenamiento de hidrógeno

- Dimensionamiento de la pila de combustible

La PEMFC elegida es una FC refrigerada por aire, debido a su reducido BoP, menor coste y fácil gestión [85–87]. En cuanto a su dimensionamiento, debe responder a un compromiso entre energía y potencia. Así, no será necesario utilizar una FC cuya potencia sea al menos igual a la potencia máxima requerida, lo que aumentaría considerablemente su coste. Como se muestra en la Figura 4. 1, la batería está directamente conectada al bus de CC, por lo que puede soportar la potencia máxima. Sin embargo, la FC debe cargar la batería rápidamente (cuando el vehículo está en movimiento y el compresor eléctrico apagado) y contribuir de forma eficiente a evitar grandes descargas de la batería durante los tiempos de parada.

Teniendo en cuenta las soluciones disponibles en el mercado y las consideraciones de diseño, se eligió la PEMFC Horizon® de 2000 W refrigerada por aire. Este modelo integra toda la BoP y su control, lo que facilita enormemente las tareas de integración y gestión. A efectos de esta investigación, la FC es una caja negra por la que entra hidrógeno y sale energía eléctrica no regulada.

- Dimensionamiento del almacenamiento de hidrógeno

Para dimensionar el sistema de almacenamiento de hidrógeno, es necesario tener en cuenta la autonomía del HPRS, así como ciertas limitaciones físicas en términos de peso y dimensiones. El peso debe ser el menor posible para no reducir demasiado la capacidad de carga útil del vehículo. En cuanto al tamaño,

lo ideal es aprovechar las aberturas estructurales del vehículo, evitando cualquier modificación de su chasis.

Basándose en lo anterior, se ha decidido utilizar botellas de hidrógeno presurizadas de bajo peso y pequeñas dimensiones, especialmente diseñadas para aplicaciones móviles. Teniendo en cuenta las soluciones disponibles en el mercado, la autonomía requerida y las consideraciones de diseño, se ha seleccionado el Carbotainer® B20 200 bar (peso total 25 kg, dimensiones: Ø 30 mm y longitud 900 mm). Esta botella está fabricada con materiales ligeros, como fibra de carbono de alto rendimiento y polímeros termoplásticos que le confieren una gran resistencia mecánica. Además, el revestimiento de aleación de aluminio (fina capa metálica que impide el paso del hidrógeno) ha sido sometido a un tratamiento térmico que le confiere una gran elasticidad y resistencia a los ciclos de fatiga, lo que le otorga una vida útil de 30 años.

Una vez seleccionada la botella de hidrógeno, es necesario calcular el número de unidades necesarias para garantizar la autonomía requerida del HPRS. Para ello, conociendo la potencia nominal (P_{FC}) y el consumo de hidrógeno (C_{H_2FC}) de la PEMFC seleccionada, 2 000 W y 1 560 litros/h (26 l/min) respectivamente, y considerando un aprovechamiento energético conservador del hidrógeno (η_{H_2}) del 80% (debido a las pérdidas asociadas a la eficiencia del convertidor CC/CC, cableado, protecciones y purgas), el volumen global de hidrógeno necesario para garantizar la autonomía requerida del HPRS (V_{H_2req}) corresponde a la expresión (4.2).

$$V_{H_2req} = \frac{E_{req} \cdot 50\%}{P_{FC} \cdot \eta_{H_2}} \cdot C_{H_2FC} \quad (4.2)$$

Dando como resultado $V_{H_2req} = 5\,417$ litros.

Conociendo el volumen ($V_{bottle} = 20$ litros) y la presión de funcionamiento de la botella seleccionada ($P_{H_2} = 200$ bar), y considerando el factor de compresibilidad del hidrógeno ($Z = 1.132$ a 200 bar y 298 K), el volumen total de hidrógeno disponible en la botella ($V_{H_2,bottle}$) se calcula en la ecuación (4.3):

$$V_{H_2,bottle} = \frac{V_{bottle} \cdot P_{H_2}}{Z} \quad (4.3)$$

Dando como resultado $V_{H_2,bottle} = 3\,534$ litros.

Por lo tanto, se necesitarán dos botellas para mantener el HPRS propuesto en funcionamiento durante el tiempo de parada de los vehículos durante una jornada laboral completa.

4.2.1.4 Dimensionamiento de la batería

Para el dimensionamiento de la batería se han tenido en cuenta varios aspectos fundamentales, como la densidad energética, la disponibilidad comercial, el voltaje nominal y la autonomía.

Como ya se ha comentado, uno de los aspectos clave es la minimización del peso del HPRS, que es fundamental para maximizar la carga útil del vehículo. Esto requiere el uso de una tecnología de baterías de alta densidad energética, por lo que se utilizarán baterías con tecnología de iones de litio para esta aplicación.

La elección del voltaje nominal de la batería está estrechamente vinculada a la disponibilidad comercial tanto de las baterías como de los convertidores CC/CA. En concreto, las soluciones comerciales más habituales, y por tanto más robustas y económicas, se basan en configuraciones de baterías que cubren rangos de voltaje de 12 a 72 VCC, siendo las más habituales las de 12, 24, 48 y 60 VCC. La selección del voltaje nominal de la batería debe responder a un compromiso entre la disponibilidad de soluciones comerciales y el funcionamiento a bajas corrientes, ya que así se reducen costes en pérdidas, cableado y protección eléctrica. En base a lo anterior, se ha elegido una batería con un voltaje nominal (V_{Bat_N}) de 60 VCC.

Por último, se determina la autonomía de la batería calculando su capacidad nominal (C_{Bat}). A continuación, considerando la energía a suministrar por la batería (50% de (4.1)), su voltaje nominal ($V_{Bat_N} = 60$ VCC), así como la alimentación de la BoP y de toda la electrónica desarrollada ($P_{aux} = 350$ W aproximadamente), el valor de su capacidad nominal queda definido por la expresión (4.4).

$$C_{Bat} = \frac{E_{req} \cdot 50\% + P_{aux} \cdot t_{stop}}{V_{Bat_N}} \quad (4.4)$$

Dando como resultado $C_{Bat} = 116$ Ah.

Basándose en los cálculos realizados, se ha elegido una batería comercial Samsung® 50E de 60 VCC y 120 Ah.

4.2.1.5 Diseño del convertidor elevador CC/CC

Para la correcta integración y control de la PEMFC en el bus de continua, definido por la batería seleccionada, y considerando sus valores nominales de voltaje ($V_{FC} = 28$ VCC, $V_{Bat_N} = 60$ VCC), es evidente la necesidad de utilizar un convertidor de potencia de topología “boost o elevadora”, concretamente con una relación *boost* de aproximadamente 2:1. Dicha relación es fácilmente alcanzable con el uso de topologías no aisladas [88,89], más sencillas y baratas

que las aisladas, y que además operan en una región prácticamente lineal y con alta eficiencia. En concreto, para esta aplicación y para la PEMFC seleccionada, se propone el uso de un convertidor elevador CC/CC intercalado de 2 kW. El uso de una arquitectura intercalada permite reducir los requisitos de diseño de los componentes de potencia, aumentar la eficiencia global del convertidor al reducir las pérdidas Joule cuando se opera a corrientes más bajas, así como reducir el rizado de corriente a la entrada del convertidor, lo cual es esencial para reducir el estrés en la operación de la PEMFC [90,91]. En concreto, el convertidor elevador CC/CC intercalado consiste en dos convertidores elevadores CC/CC que operan en paralelo con señales de control analógicas desfasadas 180° entre sí.

Por último, para complementar el efecto positivo de la topología intercalada con respecto al rizado de la corriente de salida de la PEMFC, así como para reducir las interferencias electromagnéticas (en inglés: *Electromagnetic Interference* o EMI) y su impacto en el resto de la electrónica, se ha utilizado un filtro EMI de tipo PI a la entrada de cada convertidor. La Figura 4. 2 muestra la arquitectura del convertidor elevador intercalado propuesto.

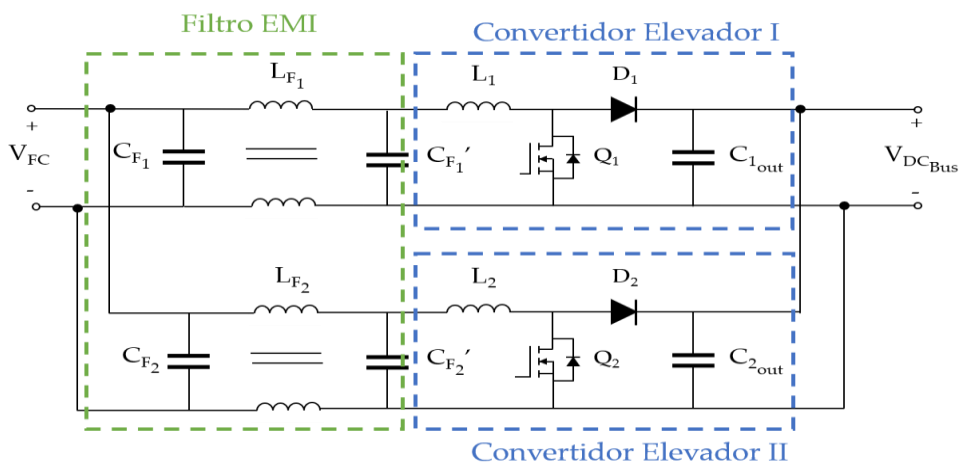


Figura 4. 2. Convertidor elevador CC/CC intercalado.

- Modelo de convertidor elevador CC/CC

Para el diseño del convertidor elevador CC/CC intercalado es necesario obtener el modelo matemático que describa su comportamiento. Para simplificar el análisis, basta con evaluar el comportamiento dinámico de un único convertidor elevador CC/CC, ya que el funcionamiento de ambos convertidores es análogo e independiente. Para su modelización se considerará el funcionamiento en modo de conducción continua (MCC).

A efectos de modelado, los componentes serán ideales (esto es suficiente para este análisis). Se definirán dos tiempos característicos, t_{off} y t_{on} , que representan las fracciones de tiempo en las que el transistor MOSFET Q está OFF (caso 1) y ON (caso 2) respectivamente. La suma de ambos tiempos define el periodo T de la señal de control. De acuerdo con lo anterior, el circuito

equivalente del convertidor CC/CC elevador para los casos 1 y 2 se muestra en las Figura 4. 3a y Figura 4. 3b respectivamente.

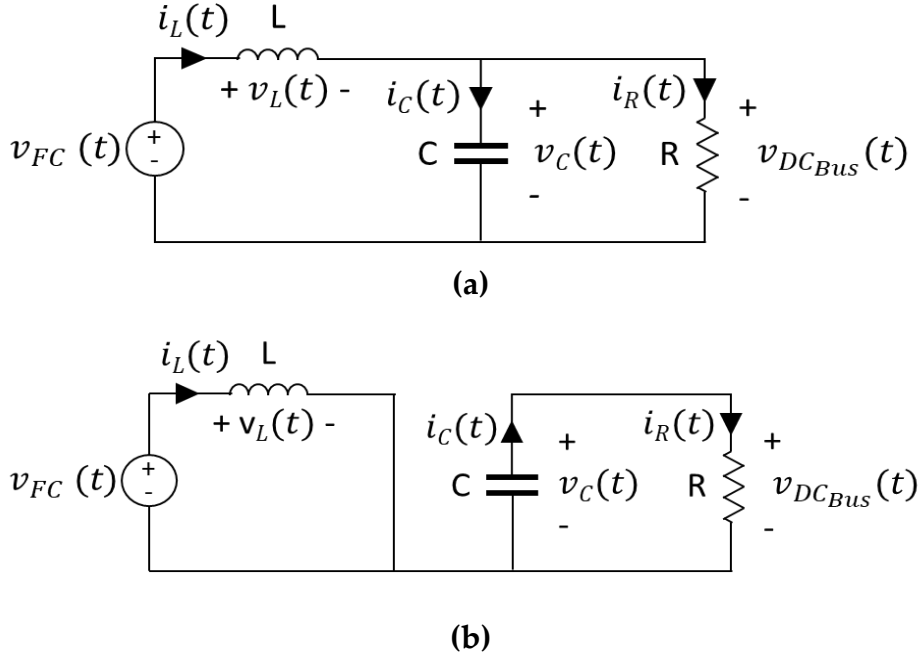


Figura 4. 3. Convertidor elevador CC/CC. a) Circuito equivalente para Q desactivado, caso 1; b) Circuito equivalente para Q activado, caso 2.

Considerando el caso 1, Figura 4. 3a. Q está en OFF, D está en polarización directa y, por tanto, conduce la corriente desde la PEMFC hasta la salida del convertidor CC/CC, Figura 4. 3a. Entonces, asumiendo un voltaje de entrada y salida constantes, V_{FC} y $V_{DC_{Bus}}$ debido a la FC y al condensador de alta capacitancia C y a la batería, el voltaje en L es también constante y negativo, $v_L(t) = V_{FC} - V_{DC_{Bus}}$, y la corriente a través de L decrece linealmente. Basándose en lo anterior, y de acuerdo con el circuito equivalente de la Figura 4. 3a, las ecuaciones que modelan el comportamiento de la corriente y el voltaje del condensador y el inductor se presentan en (4.5) y (4.6) respectivamente.

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt} = i_L(t) - i_R(t) \rightarrow \frac{dv_C(t)}{dt} = \frac{i_L(t)}{C} - \frac{v_C(t)}{RC} \quad (4.5)$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{FC}(t) - v_C(t) \rightarrow \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_{FC}(t) - v_C(t)}{L} \quad (4.6)$$

Por otro lado, cuando Q está en ON (caso 2, Figura 4. 3b), independientemente de la transición brusca del interruptor electrónico, la corriente del inductor debe mantener la continuidad, por lo que D tiene polarización inversa, Figura 4. 3b. Entonces, suponiendo un voltaje de entrada constante V_{FC} debida a la FC, el voltaje en L es también constante y positiva, $v_L(t) = V_{FC}$, y la corriente en L aumenta linealmente. Basándose en lo anterior, y de acuerdo con el circuito equivalente de la Figura 4. 3b, las ecuaciones que

modelan el comportamiento de la corriente y el voltaje del condensador y el inductor se presentan en las ecuaciones (4.7) y (4.8) respectivamente.

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt} = -i_R(t) \rightarrow \frac{dv_C(t)}{dt} = -\frac{v_C(t)}{RC} \quad (4.7)$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{FC}(t) \rightarrow \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_{FC}(t)}{L} \quad (4.8)$$

Considerando la corriente del inductor y el voltaje del condensador como variables de estado, el voltaje de la FC, $v_{FC}(t)$, como variable de entrada, el voltaje del bus de continua como variable de salida y considerando el ciclo de trabajo, $\delta = t_{on}/T$, las ecuaciones (4.5) - (4.8) permiten obtener el modelo de espacio de estados del convertidor (4.9). Para el valor instantáneo del modelo del convertidor, el ciclo de trabajo toma valores de 1 y 0 durante los intervalos de tiempo t_{on} y t_{off} , respectivamente, coincidiendo con el límite práctico del ciclo de trabajo del transistor. Para el valor medio del modelo, el ciclo de trabajo toma valores entre 0 y 1, coincidiendo con el ciclo de trabajo del convertidor.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-\delta)}{L} \\ \frac{(1-\delta)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_{FC} \quad (4.9)$$

$$[v_{DC_{Bus}}] = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix}$$

La función de transferencia del convertidor CC/CC puede calcularse a partir del modelo desarrollado en (4.9) para el estado estacionario $[\dot{i}_L \quad \dot{v}_C]^T = 0$, dando como resultado la ecuación (4.10).

$$\frac{V_{DC_{Bus}}}{V_{FC}} = \frac{1}{1-\delta} \quad (4.10)$$

La ecuación (4.10) muestra que variando el ciclo de trabajo es posible regular la relación de conversión.

- Diseño e implementación del convertidor elevador CC/CC

Para el diseño de la inductancia y capacitancia de cada convertidor elevador se considerará su funcionamiento en CCM y por tanto las expresiones (4.5) - (4.8) y (4.10). A continuación, se establecerán las características de diseño en términos de potencia, relación de conversión y frecuencia de la señal de control.

Considerando la potencia requerida y las ventajas de la topología intercalada, cada convertidor CC/CC elevador debe proporcionar la mitad de corriente/potencia que el convertidor CC/CC elevador completo, es decir, 1 kW.

Para calcular la relación de conversión, es necesario definir la condición del peor caso en la conexión PEMFC - bus CC a través del convertidor. Entonces, si la FC funciona siempre a su potencia nominal, $V_{FC} = 28 \text{ VCC}$; sin embargo, el

voltaje del bus de CC puede alcanzar un valor máximo de 64 VCC debido a su conexión directa a la batería. En base a lo anterior, y según (4.10), el ciclo de trabajo que responde a la condición más restrictiva será $\delta = 0.563$.

Finalmente, para gobernar la conmutación de los transistores del convertidor, se ha seleccionado una frecuencia de señal de modulación por ancho de pulsos (en inglés: *Pulse-Width Modulation* o PWM) (f_s) de 20 kHz por ser un valor ampliamente utilizado en el diseño de electrónica de potencia.

Para el cálculo del inductor, basándonos en la Figura 4. 3b, cuando Q está en ON, la relación entre la corriente y el voltaje en L viene dada por (4.8) y en su forma incremental por (4.11).

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{FC}}{L} \quad (4.11)$$

Si $\Delta t = t_{on} = \delta/f_s$, (4.11) puede escribirse como (4.12).

$$L = \frac{V_{FC} \cdot \delta}{\Delta I_L \cdot f_s} \quad (4.12)$$

Como ΔI_L es la oscilación de la corriente en el inductor L durante t_{on} , en la práctica, es el rizado. Sin embargo, (4.12) muestra que el precio a pagar por un rizado bajo es un inductor grande, lo que puede ser una mala decisión, porque el elemento que no es más ideal del convertidor es precisamente el inductor. Por lo tanto, es mejor suponer un rizado relativamente grande en el inductor, que luego se puede amortiguar con un condensador de salida de alta capacitancia. Así, asumiendo un valor conservador $\Delta I_L = 30\% \cdot I_L$ y utilizando los valores extremos en (4.12), el valor de L se obtiene mediante (4.13).

$$L = \frac{28 \text{ VDC} \cdot 0.563}{0.3 \cdot \frac{1000 \text{ W}}{28 \text{ VDC}} \cdot 20000 \text{ Hz}} = 74 \text{ } \mu\text{H} \quad (4.13)$$

Por lo tanto, se elige un inductor comercial de 80 μH .

En cuanto al condensador de salida C, según la Figura 4. 3b, su voltaje viene dado por (4.7), y en su forma incremental por (4.14).

$$\frac{\Delta V_C}{\Delta t} = \frac{I_C}{C} \quad (4.14)$$

De nuevo, si $\Delta t = t_{on} = \delta/f_s$, C viene dado por (4.15).

$$C = \frac{I_C \cdot \delta}{\Delta V_C \cdot f_s} \quad (4.15)$$

Donde I_C será la correspondiente al rizado en L, $I_C = \Delta I_L = 30\% \cdot I_L$. Así, suponiendo una variación de voltaje en el voltaje de salida de sólo el $1\% \cdot V_{DCBus}$

(con ello se mantendrá $V_{DC_{Bus}}$ constante, como es deseable), y utilizando, de nuevo, valores extremos, el valor de C se obtiene mediante (4.16).

$$C = \frac{0.3 \cdot \frac{1000 \text{ W}}{28 \text{ VDC}} \cdot 0.563}{0.01 \cdot 64 \text{ VDC} \cdot 20000 \text{ Hz}} = 470 \mu\text{F} \quad (4.16)$$

Por lo tanto, se elige un condensador comercial de 470 μF .

4.2.2 Desarrollo

Basándose en el dimensionamiento realizado en la sección 4.2.1 y en la estructura general del HPRS presentada en la Figura 4. 1, esta sección desarrollará en detalle el HPRS propuesto, que se muestra en la Figura 4. 4.

La arquitectura del HPRS se compone de tres sistemas, la unidad de potencia, el almacenamiento de hidrógeno y el control de cabina, que integra la llave de contacto y la interfaz de usuario, cada uno de ellos ubicado en una zona diferente del camión según su funcionalidad. Así, la unidad de potencia se encuentra en el interior de la caja refrigerada del vehículo, dentro de un recinto térmicamente aislado especialmente diseñado para esta aplicación (zona azul, Figura 4. 4). La elección de esta ubicación responde a dos necesidades fundamentales, espacio y refrigeración. Al tratarse de un prototipo de HPRS en un vehículo estándar, la carrocería del vehículo no permite la posibilidad de instalar la unidad de potencia en el exterior. Otra razón importante es que las modificaciones estructurales del camión debían reducirse al mínimo para cumplir la normativa vigente. Además, esta ubicación aísla la unidad de potencia de las altas temperaturas provocadas por los gases de escape del vehículo. Para evitar que el calor generado por la PEMFC y el equipo de potencia se acumule en el recinto, se ha previsto una entrada y salida de aire forzado al exterior en la caja refrigerada del vehículo. Estos conductos se han protegido debidamente para evitar puentes térmicos y la entrada de lluvia del exterior.

El sistema de almacenamiento de hidrógeno se ha situado en los laterales del camión (zona roja, Figura 4. 4), justo debajo de la caja refrigerada, por motivos de maniobrabilidad y seguridad. De este modo, la ubicación elegida permite acceder fácilmente a las botellas de hidrógeno presurizadas, para poder sustituirlas de forma rápida y segura. Además, esta ubicación evita la formación de atmósferas explosivas en caso de fuga de hidrógeno. Por último, el control general se integró en la cabina del vehículo, justo al lado del asiento del conductor (zona amarilla, Figura 4. 4).

A continuación, se analizará y describirá cada uno de los tres sistemas. En primer lugar, considerando la unidad de potencia, se basa en una PEMFC comercial de 2 kW (1, Figura 4. 4), que también integra su BoP y control local (2, Figura 4. 4). Gestiona las electroválvulas de alimentación y purga, el control

térmico de la pila (incorpora un sensor de temperatura que gestiona los ventiladores axiales para refrigerar y oxigenar la pila) y la conexión eléctrica a la carga. Para su funcionamiento, se requiere una fuente de alimentación externa de 12 V CC. Además, para aplicar la ley de control desarrollada (sección 2.3.2), se ha instalado un sensor adicional de temperatura ambiente de tipo termorresistencia (3, Figura 4. 4). Por último, se ha incorporado al sistema de gestión de la BoP un relé de control (4, Figura 4. 4) que, comandado por la unidad de control (21, Figura 4. 4), permite encender o apagar la PEMFC a distancia.

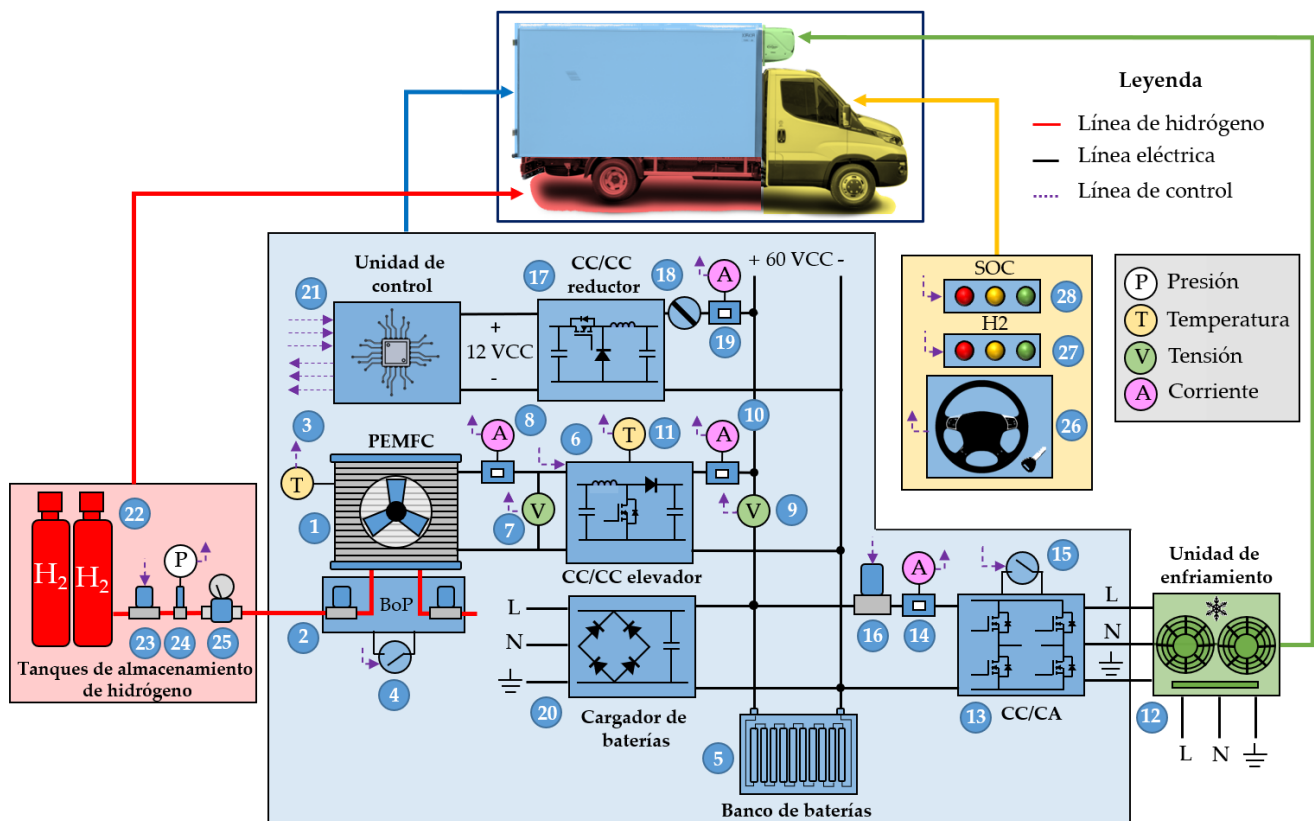


Figura 4. 4. Sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno. Distribución de los componentes.

De acuerdo con el funcionamiento ya descrito, la PEMFC se utiliza para cargar la batería (5, Figura 4. 4). Para ello, el convertidor CC/CC elevador desarrollado asegura la correcta integración y funcionamiento de la PEMFC en el bus CC (6, Figura 4. 4).

Para implementar el algoritmo de gestión de potencia de la PEMFC, el convertidor CC/CC elevador integra sensores de voltaje y corriente (7 y 8 respectivamente, Figura 4. 4) a su entrada para medir las variables de funcionamiento de la PEMFC. Del mismo modo, para medir el voltaje del bus CC y la potencia entregada por el conjunto PEMFC+convertidor CC/CC, se integran sensores de voltaje y corriente a su salida (9 y 10 respectivamente, Figura 4. 4). Finalmente, para la gestión térmica del convertidor CC/CC elevador, se instalan dos ventiladores axiales con control ON/OFF. Se activan mediante el sensor de temperatura de tipo termorresistencia (11, Figura 4. 4) montado en el disipador

de potencia. Si por alguna razón la temperatura se mantiene anormalmente alta a pesar de la ventilación, la unidad de control apagará el convertidor.

La batería alimenta la unidad de refrigeración (12, Figura 4. 4) a través de un convertidor CC/CA (13, Figura 4. 4) cuando el vehículo está parado o estacionado (contacto apagado, 26, Figura 4. 4). El funcionamiento en CA permite la alimentación desde la red eléctrica o desde el HPRS desarrollado (Figura 4. 4), en ambos casos monofásico de 230 VCA. En el mercado existen convertidores CC/CA para la relación requerida, por lo que se optó por un convertidor CC/CA comercial, concretamente el modelo Mars Rock 8 000 W de CNBOU®. El consumo de CC/CA del bus de CC se controla mediante un sensor de corriente (14, Figura 4. 4). Para su control a distancia, el convertidor CC/CA incorpora un relé de control (15, Figura 4. 4), cuyo cierre o apertura determina su conexión o desconexión y, por tanto, la alimentación de la unidad de refrigeración. Por último, por razones de seguridad, un contactor de corriente continua de alta intensidad (16, Figura 4. 4) está situado entre la batería y el convertidor CC/CA monofásico para garantizar el aislamiento eléctrico cuando sea necesario. Este contactor está abierto cuando el vehículo está en marcha o durante los trabajos de mantenimiento.

Se necesita un convertidor CC/CC reductor (60 a 12 VCC) para alimentar toda la electrónica auxiliar del HPRS desde el bus CC. Para ello se eligió el modelo B62SR12424AC de Delta Electronics® (17, Figura 4. 4). El consumo de energía de todos los componentes electrónicos auxiliares se controla mediante un sensor de corriente (19, Figura 4. 4). Un interruptor principal (18, Figura 4. 4) que puede ser accionado manualmente por el conductor permite encender o apagar el HPRS al principio o al final de la jornada laboral, respectivamente.

Para garantizar el funcionamiento del HPRS en cualquier circunstancia y hacerlo lo más versátil posible, se ha incluido un cargador de batería auxiliar (20, Figura 4. 4). Este dispositivo permite cargar la batería desde la red eléctrica cuando no se dispone de hidrógeno o hay algún problema con la PEMFC.

Por último, la monitorización de los sensores y el control de todos los actuadores y, en general, de todo el HPRS, se realiza mediante una unidad de control centralizada diseñada específicamente para esta aplicación y basada en un microcontrolador ATmega2560 (21, Figura 4. 4).

El sistema de almacenamiento de hidrógeno (zona roja, Figura 4. 4), situado en los laterales del vehículo, consta de dos botellas Carbotainer® B20 (22, Figura 4. 4). Cada botella tiene una capacidad de 20 litros y almacena hidrógeno comprimido a 200 bares. El hidrógeno se suministra a través de una tubería que incorpora una válvula solenoide (23, Figura 4. 4) para controlar la apertura/cierre del flujo de hidrógeno, y un sensor de presión (24, Figura 4. 4) para estimar el volumen de hidrógeno almacenado en las botellas a partir de la medición de la presión. También incorpora un regulador de dos etapas para adaptar la presión

de 200 bares de las botellas de hidrógeno a la presión de 0.5 bares de la línea de suministro a la PEMFC (25, Figura 4. 4).

Por último, se considerarán los elementos situados en la cabina del vehículo (zona amarilla, Figura 4. 4). En primer lugar, hay un circuito de detección de arranque del vehículo (26, Figura 4. 4). Este circuito proporciona a la unidad de control una señal ON/OFF para detectar la llave de contacto. Es importante recordar que la activación o desactivación de la llave de contacto del vehículo determinará el encendido o apagado del HPRS desarrollado. En cuanto a la interfaz con el conductor del vehículo, también se incorpora un panel indicador con LEDs para mostrar el estado del HPRS. La primera parte del panel consta de tres LED que indican el nivel de hidrógeno en las botellas (27, Figura 4. 4): alto (verde), medio (naranja) o bajo (rojo). La segunda parte del panel consta de tres LED que indican el estado de carga (en inglés: *State of Charge* o SOC) de la batería (28, Figura 4. 4): alto (verde), medio (naranja) y bajo (rojo).

En la Tabla 4. 2 se resumen las principales características técnicas de todos los elementos que, tras un minucioso estudio del mercado, se han seleccionado para el HPRS, incluidos el modelo y el fabricante.

Tabla 4. 2. Principales características técnicas de los componentes del sistema de refrigeración por hidrógeno.

Componente	Modelo	Fabricante	Características principales
PEMFC	2000 W refrigerado por aire	Horizon®	Tipo de pila de combustible: PEM Número de celdas: 48 Potencia nominal: 2 000 W Rendimiento: 28.8 V @ 70 A Máx. Temperatura de la pila: 65 °C Presión H2: 0.45 - 0.55 bar Eficacia de la pila: 40% @ 28.8 V
Botellas de hidrógeno (x2)	B20	Carbotainer®	Capacidad: 20 l (40 l total) Hidrógeno máximo almacenado: 3.5 Nm ³ (7 Nm ³ total) Presión de funcionamiento: 200 bar Ø 265 mm x longitud 823 mm
Batería	Samsung 50E	Samsung®	Voltaje nominal: 60 V Capacidad: 120 Ah (7.20 kWh)
Convertidor CC/CA	Mars Rock 8000 W	CNBOU®	Potencia nominal: 8 000 W (16 000 W potencia máxima) Frecuencia: 50 Hz / 60 Hz
Convertidor reductor CC/CC	B62SR12424AC	Delta Electronics®	Rango de voltaje de entrada: 18-106 V 200 W Output @ 18 V-27 V Vin range
Convertidor elevador CC/CC	Arquitectura intercalada	Desarrollado en este capítulo	Input voltage range: 20-50 V 2 000 W Output @ 40 V- 100 V Vin range

4.2.3 Sistema de gestión de la energía

4.2.3.1 Lógica de control del sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno

Para aumentar el rendimiento y la vida útil del HPRS, las prioridades de funcionamiento se establecen dispositivo por dispositivo. Así, la batería garantiza siempre la demanda eléctrica del compresor eléctrico, mientras que la PEMFC actuará como extensor de autonomía. En otras palabras, la PEMFC se utilizará para cargar la batería, manteniendo su funcionamiento a potencia constante (potencia nominal), independientemente de si el vehículo frigorífico está parado o en movimiento. Esta premisa tiene una doble finalidad: evitar sucesivos ciclos de arranque/parada y cambios bruscos en el perfil de potencia de la PEMFC, que podrían conducir a una reducción de su vida útil [92,93]. El funcionamiento de la PEMFC a potencia nominal tiene como objetivo aumentar el rendimiento del sistema y minimizar el tiempo de carga de la batería, de forma que el HPRS responda incluso a los perfiles de carga más desfavorables, correspondientes a rutas con una alta frecuencia de paradas.

Teniendo en cuenta lo anterior, el EMS del HPRS se describe como sigue, Figura 4. 5 y Figura 4. 6. El EMS implementa dos controles paralelos, uno para la batería y otro para la PEMFC. Estos controles dependerán del voltaje de la batería y de la llave de contacto, sin embargo, la PEMFC puede cargar la batería independientemente de si la llave de contacto está encendida o apagada. Supongamos que la batería está cargada inicialmente y que, mientras el VPE está en marcha (llave de contacto encendida), el RS hace uso del VPE y de su batería interna para accionar el compresor mecánico. En ese momento, el RS permanece en modo de espera (Figura 4. 6), que se caracteriza por la desconexión de la PEMFC y el aislamiento eléctrico de la batería y el convertidor CC/CA.

Cuando el conductor detiene el VPE (llave de contacto apagada), el HPRS comienza a funcionar (Figura 4. 6). En este momento, el EMS evalúa el voltaje de la batería (V_{Bat} que es igual a $V_{DC_{Bus}}$) y, si su valor es superior al valor mínimo de seguridad preestablecido ($V_{Bat_{min}} = 50 \text{ VCC}$; 3.125 VCC/célula , o $\text{SOC} = 20\%$ aproximadamente), Figura 4. 6, activa el contactor de CC, permitiendo que la batería alimente el compresor eléctrico a través del convertidor de potencia CC/CA. En consecuencia, la batería suministra energía al RS. Esto provocará una descarga prolongada de la batería hasta que su voltaje alcance el valor mínimo preestablecido ($V_{Bat_{FC}} = 54.4 \text{ VCC}$; 3.4 VCC/célula), Figura 4. 5 y Figura 4. 6. A continuación, el EMS evalúa el nivel de hidrógeno almacenado en las botellas (H_2) y la temperatura del convertidor de potencia CC/CC (T_{DCDC}). Si el nivel de hidrógeno es superior al mínimo ($H_{2_{min}} = 10 \text{ bar}$, equivalente a 400 litros (5%) del hidrógeno máximo almacenado) y la temperatura es inferior al valor máximo ($T_{DCDC_{max}} = 65 \text{ °C}$), activará la línea de suministro de hidrógeno y la PEMFC (Figura 4. 6). A continuación, se activa el convertidor de potencia CC/CC de

refuerzo y la PEMFC se pone en marcha de forma controlada utilizando un perfil escalonado hasta que se alcanza la potencia nominal de la PEMFC, Figura 4. 6. Con este procedimiento se pretende reducir el estrés térmico y eléctrico durante el intervalo de arranque de la PEMFC. El valor H_{2min} corresponde al volumen mínimo de hidrógeno que garantiza una parada controlada de la PEMFC y una presión mínima de hidrógeno suficiente para que el regulador de dos etapas funcione correctamente (25, Figura 4. 4). La $T_{DCDCmax}$ se ha seleccionado para garantizar una temperatura máxima de seguridad de los semiconductores de potencia de aproximadamente 80 °C, considerablemente inferior a su temperatura máxima admisible, 120 °C.

Cuando la PEMFC alcanza su potencia nominal, su controlador la mantiene en funcionamiento hasta que se produce una de las condiciones de desconexión: voltaje máximo de la batería ($V_{Bat_{max}} = 64 \text{ VCC}; 4 \text{ VCC/célula}$), bajo nivel de hidrógeno (H_{2min}), alta temperatura de funcionamiento del convertidor de potencia elevador CC/CC ($T_{DCDCmax}$) o alta temperatura ambiente, Figura 4. 6. Recordemos que el HPRS se encuentra en un recinto isotérmico (ver Figura 4. 4), por lo que es necesario controlar la temperatura ambiente. Las tres primeras condiciones son obligatorias y, por tanto, determinan la parada inmediata de la PEMFC, mientras que la situación de temperatura ambiente elevada es una condición menos restrictiva, que permite acciones correctoras para asegurar el funcionamiento continuo de la PEMFC. Para ello, el sistema de control regula la potencia de funcionamiento de la PEMFC para que su temperatura no alcance el límite máximo de funcionamiento seguro, ver sección 4.2.3.2.

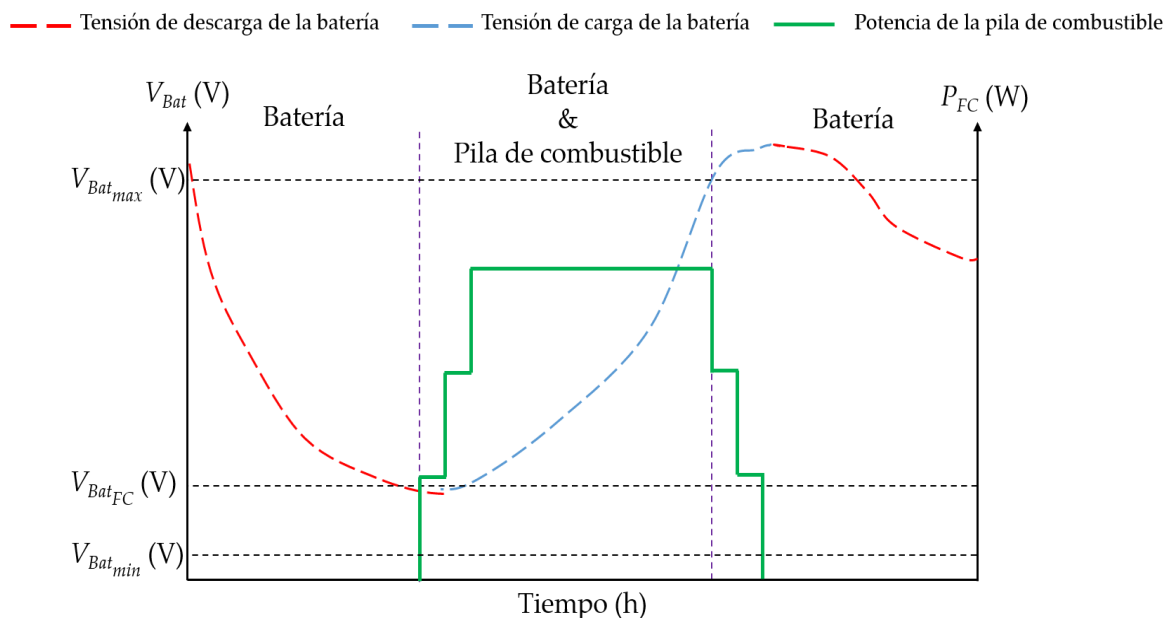


Figura 4. 5. Sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno. Interoperabilidad batería/pila de combustible.

Por último, mientras el nivel de hidrógeno almacenado lo permita, el proceso de carga continuará hasta que el voltaje de la batería alcance el límite

superior, $V_{Bat_{max}}$, tras lo cual la PEMFC se apagará de forma controlada, utilizando un perfil reductor, hasta que la PEMFC se apague por completo y se cierre la línea de suministro de hidrógeno, Figura 4. 5 y Figura 4. 6.

Este proceso descrito se repetirá indefinidamente durante el funcionamiento del RS hasta que se consuma todo el hidrógeno almacenado o finalice la jornada laboral. En la Tabla 4. 3 se enumeran los valores característicos y límite que definen el funcionamiento del HPRS desarrollado.

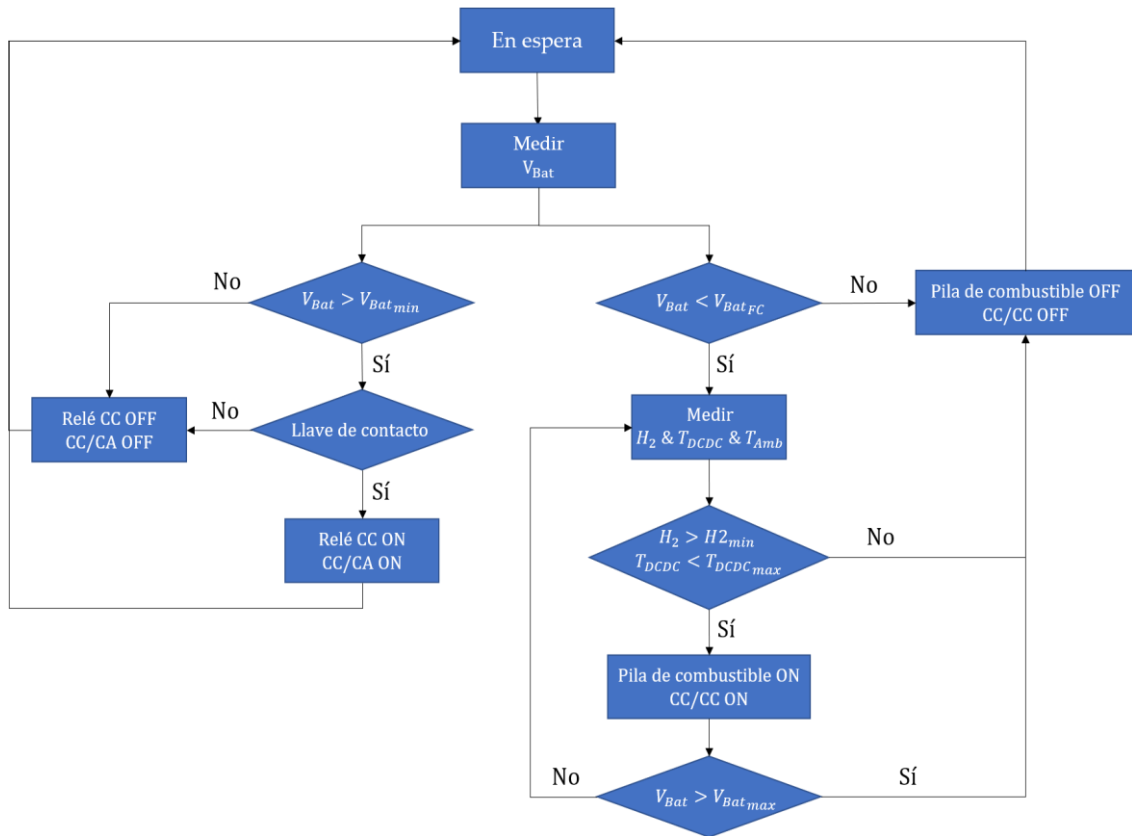


Figura 4. 6. Sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno. Diagrama lógico de control.

Tabla 4. 3. Valores característicos y límites de funcionamiento del sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno

Parámetro	Valor	Significado
$V_{Bat_{min}}$	50 VCC	Voltaje mínimo de funcionamiento de la batería, equivalente a un SOC = 20% aproximadamente
$V_{Bat_{FC}}$	54.4 VCC	Voltaje de la batería que provoca el funcionamiento de la PEMFC
$V_{Bat_{max}}$	64 VCC	Voltaje máximo de funcionamiento de la batería
$H_{2_{min}}$	10 bar, 400 litros	Nivel mínimo de hidrógeno calculado en términos de presión (10 bar) y volumen de hidrógeno (5% del máximo)
$T_{DCDC_{max}}$	65 °C	Temperatura máxima del disipador térmico del convertidor elevador CC/CC intercalado

4.2.3.2 Algoritmo de control de la pila de combustible y del convertidor CC/CC

Se ha desarrollado un algoritmo modificado de perturbación y observación (P&OM) para determinar la potencia de funcionamiento de la PEMFC independientemente de la humedad de funcionamiento, la temperatura o la degradación acumulada. Este algoritmo pretende asegurar la máxima transferencia de potencia de la PEMFC (recordemos que la PEMFC tiene una carga variable a su salida) a lo largo de su vida útil, proporcionando excelentes resultados sin necesidad de un modelo matemático que capture la dinámica, el comportamiento térmico y la tasa de degradación de la PEMFC.

El algoritmo P&OM desarrollado se basa en el P&O clásico, ampliamente utilizado en sistemas fotovoltaicos [94,95]. En este caso, la obtención del punto de máxima potencia (en inglés: *Maximum Power Point* o MPP) se basa exclusivamente en el comportamiento experimental de la curva de polarización de la PEMFC. Concretamente, en la relación entre las pendientes de las curvas voltaje - corriente (V - I) y potencia-corriente (P - I). Así, según la Figura 4. 7, el MPP se determina como el punto de la curva de polarización en el que la derivada de la potencia respecto al voltaje de la PEMFC es cero ($\frac{\Delta P_{FC}}{\Delta V_{FC}} = 0$). Del mismo modo, la pendiente de las curvas V - I y P - I determinará las acciones correctoras para localizar el MPP frente a perturbaciones en la curva de polarización debidas a variaciones en las condiciones instantáneas de operación, aumentando o disminuyendo así el voltaje de operación de la PEMFC, según opere en la región definida por $\frac{\Delta P_{FC}}{\Delta V_{FC}} < 0$ o $\frac{\Delta P_{FC}}{\Delta V_{FC}} > 0$ respectivamente.

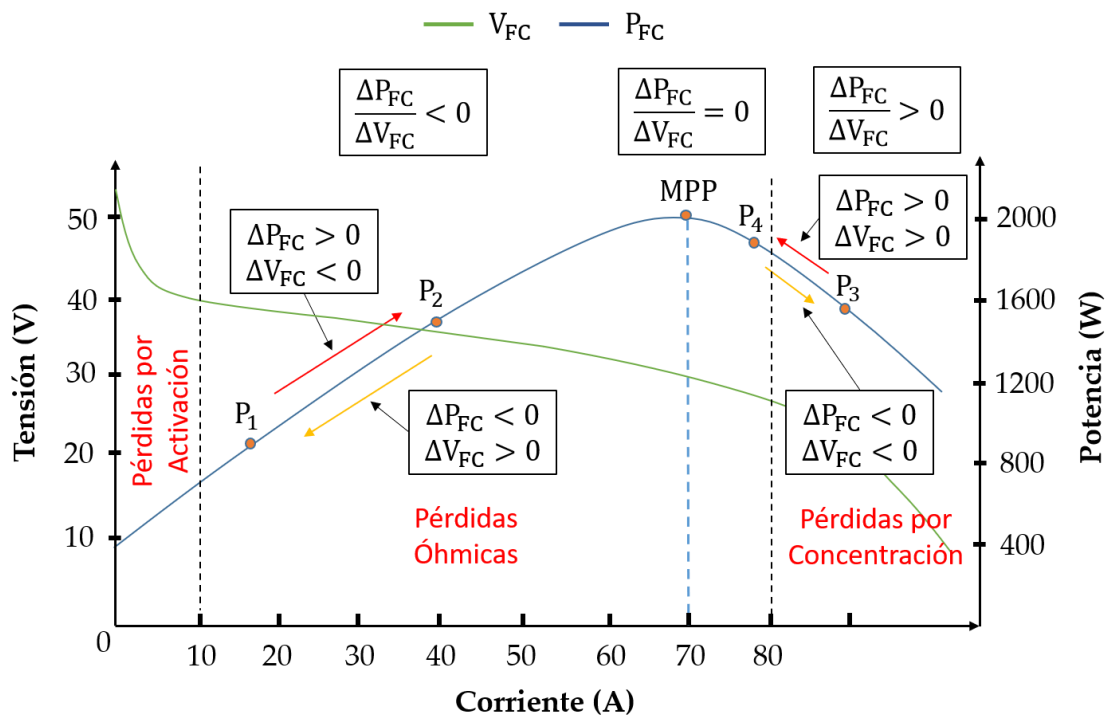


Figura 4. 7. Principio de funcionamiento del algoritmo de perturbación y observación modificado.

Por otro lado, las modificaciones del algoritmo P&O clásico garantizan dos condiciones fundamentales para preservar el funcionamiento seguro y constante de la PEMFC: la adecuación del límite de potencia al estrés térmico y el no funcionamiento a valores bajos de voltaje.

Como ya se ha mencionado, una temperatura ambiente exterior elevada o un fallo del circuito de ventilación forzada pueden provocar una parada controlada de la PEMFC por estrés térmico, lo que interrumpiría la alimentación del bus de CC. Dado que no es posible actuar sobre la BoP, al tratarse de un sistema comercial y por tanto cerrado, para asegurar la continuidad del suministro eléctrico en cualquier circunstancia, se establece una modificación del algoritmo clásico de P&O. Esta modificación en la ley de control se basa en la imposición de una potencia máxima de funcionamiento admisible, P_{FCSP} , en función de la temperatura ambiente (T_{amb}), planteando así un problema de seguimiento respecto a la potencia de funcionamiento de la PEMFC (P_{FC}), Figura 4. 7.

El cálculo de P_{FCSP} se basa en el modelo matemático (4.17), obtenido a partir de la caracterización experimental de la temperatura de funcionamiento de la PEMFC (T_{FC}) para diferentes valores de potencia, considerando la temperatura ambiente en el interior del recinto y para el caso más desfavorable, es decir, sin ventilación forzada, ver Figura 4. 8a. Las mediciones se realizaron una vez alcanzado el régimen de temperatura de funcionamiento estable.

A partir de esta caracterización, es posible determinar el gradiente térmico (ΔT_{FC}) asociado a cada potencia de funcionamiento de la PEMFC, Figura 4. 8a. Con su valor, y para un valor dado de temperatura ambiente, es posible determinar la potencia máxima de operación que asegura que la temperatura de la PEMFC no supera el límite seguro de operación (65 °C). En este caso, la consigna de potencia se ajusta correctamente a una función lineal con respecto a la temperatura ambiente, Figura 4. 8b.

$$P_{FCSP} = -48.969 \cdot T_{amb} + 3662.2 \quad (4.17)$$

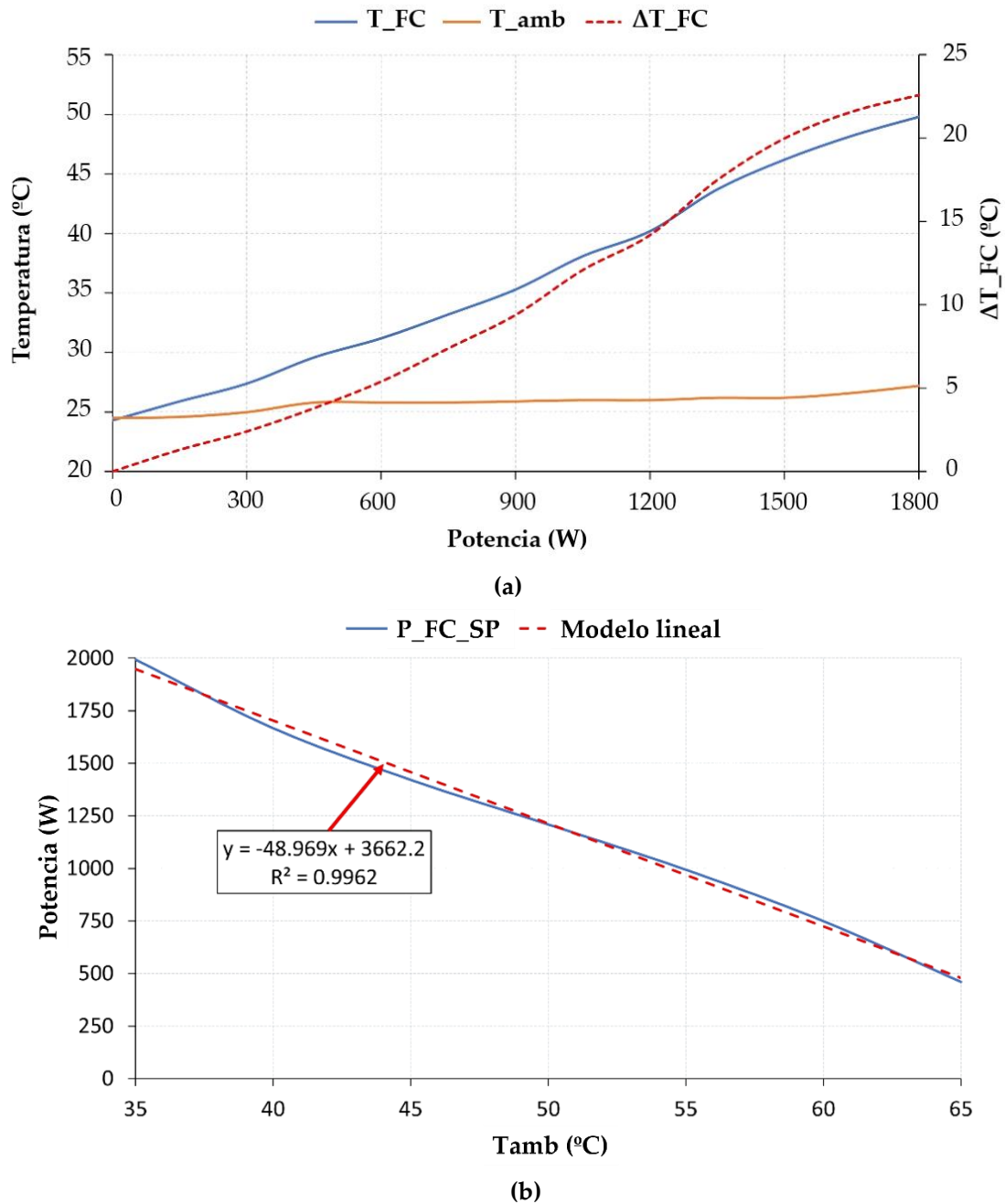


Figura 4. 8. Comportamiento de la pila de combustible: (a) Temperatura de funcionamiento de la pila de combustible con respecto a la potencia de funcionamiento y la temperatura ambiente y variación de la temperatura de la pila de combustible; (b) Potencia máxima de la pila de combustible y modelo polinómico con respecto a la temperatura ambiente.

Finalmente, para asegurar un uso eficiente y conservador de la PEMFC, se establece un límite inferior de voltaje de operación que permita a la PEMFC operar dentro de su rango de operación estándar, definido por las regiones de activación y óhmica. De esta forma, se asegura un alto rendimiento operativo, evitando trabajar en la región de concentración, que podría conducir a una mayor tasa de degradación asociada a la aparición de puntos calientes o fenómenos de inanición de gas [96,97]. Entonces, si el voltaje de operación es inferior al valor

límite, la ley de control establece un problema de seguimiento respecto al límite de voltaje prefijado ($V_{FC_{SP}} = 25 \text{ VCC}$), ver Figura 4. 9.

Considerando los principios de funcionamiento del algoritmo P&OM descrito, la Figura 4. 9 describe la lógica de control implementada en el control local del convertidor elevador CC/CC para gestionar la potencia de funcionamiento de la PEMFC. A continuación, se describe su funcionamiento.

Se trata de un procedimiento iterativo y parte de las medidas de las variables de corriente y voltaje de la PEMFC, así como de la temperatura ambiente en el recinto. A partir de ellas, se obtiene el valor de la potencia actual de funcionamiento de la PEMFC, así como, a partir de la ecuación (4.17), la consigna de potencia según el criterio térmico. A continuación, siguiendo el flujo del algoritmo P&OM desarrollado, se evalúa la pendiente de la curva definida por la potencia y el voltaje de la PEMFC para localizar el MPP. Así, tal y como se representa en la Figura 4. 7, una pendiente $\frac{\Delta P_{FC}}{\Delta V_{FC}} > 0$ indica la necesidad de aumentar el voltaje de funcionamiento de la PEMFC para desplazar el punto de funcionamiento hacia la izquierda, es decir, es necesario reducir la corriente de funcionamiento de la PEMFC y, por tanto, la demanda en sus bornes. Para ello, el controlador local del convertidor de potencia disminuirá su δ a saltos ($\Delta\delta$) fijado en 0.5%. Recordemos que δ puede variar de 1 a 0, por lo que el 5% es 0.05.

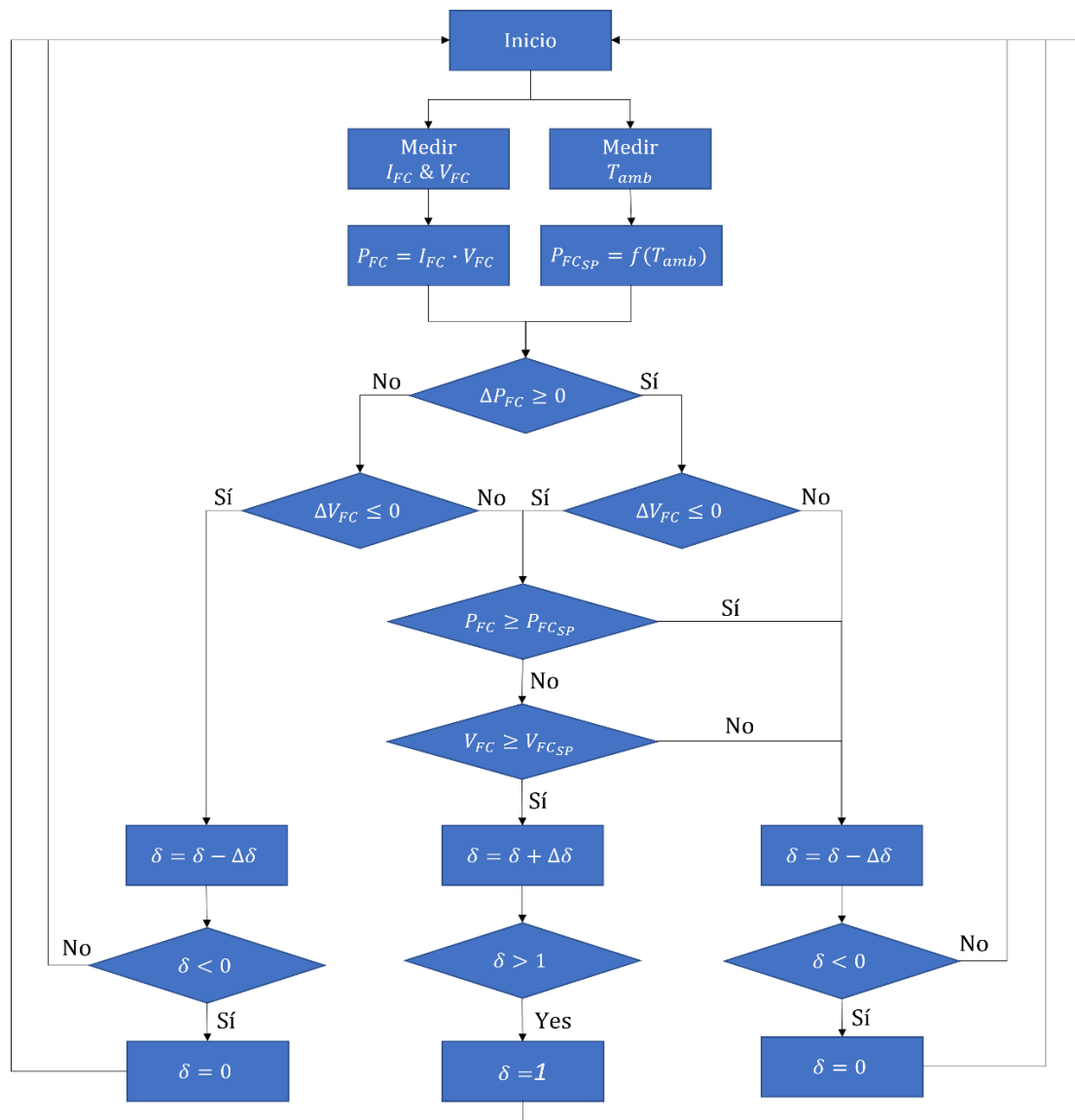


Figura 4. 9. Algoritmo P&OM desarrollado para seguir el MPP de la pila de combustible.

Por el contrario, si la pendiente $\frac{\Delta P_{FC}}{\Delta V_{FC}} < 0$, indica la necesidad de reducir el voltaje de funcionamiento de la PEMFC, para desplazar el punto de funcionamiento hacia la derecha. Esto requiere aumentar la corriente de funcionamiento de la PEMFC y, por tanto, la demanda en sus terminales. Ahora, a diferencia del caso anterior, el controlador local del convertidor de potencia aumentará su δ en $\Delta\delta = 0.5\%$. Esta operación puede realizarse si, y sólo si, la potencia y el voltaje de funcionamiento de la PEMFC están dentro de los límites establecidos por las restricciones de tensión térmica y voltaje mínimo descritos anteriormente. Así, si la potencia de la PEMFC es superior a la definida por P_{FCSP} , o el voltaje de funcionamiento es inferior a V_{FCSP} , el controlador local del convertidor elevador CC/CC procederá a reducir δ para priorizar los criterios de estrés térmico y degradación sobre la maximización de la potencia de funcionamiento.

Basándose en las hipótesis de diseño del algoritmo P&OM desarrollado, la estructura de control propuesta para el conjunto de PEMFC y convertidor elevador CC/CC intercalado se presenta esquemáticamente en la Figura 4. 10.

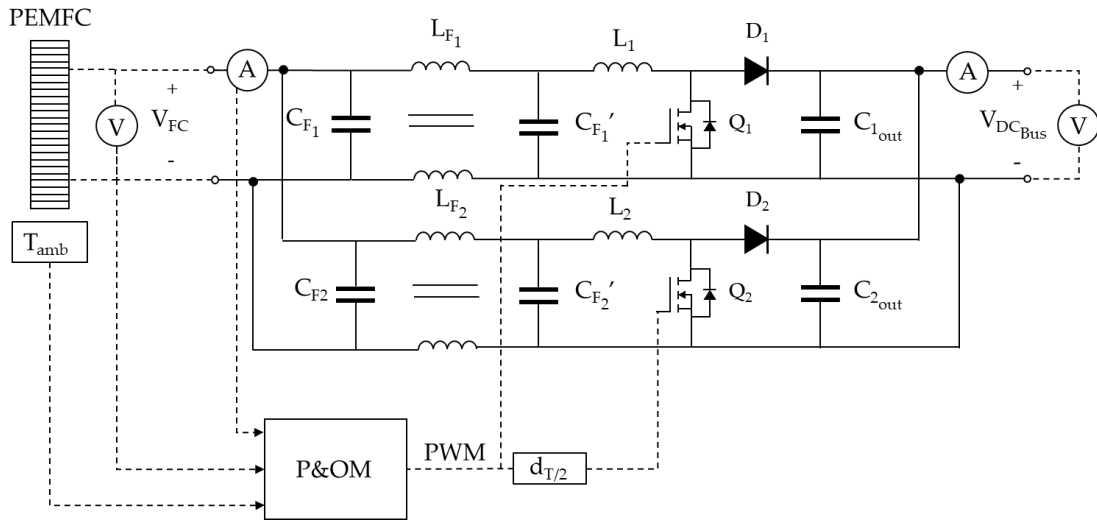


Figura 4. 10. Diagrama esquemático del conjunto de PEMFC y convertidor CC/CC con P&OM.

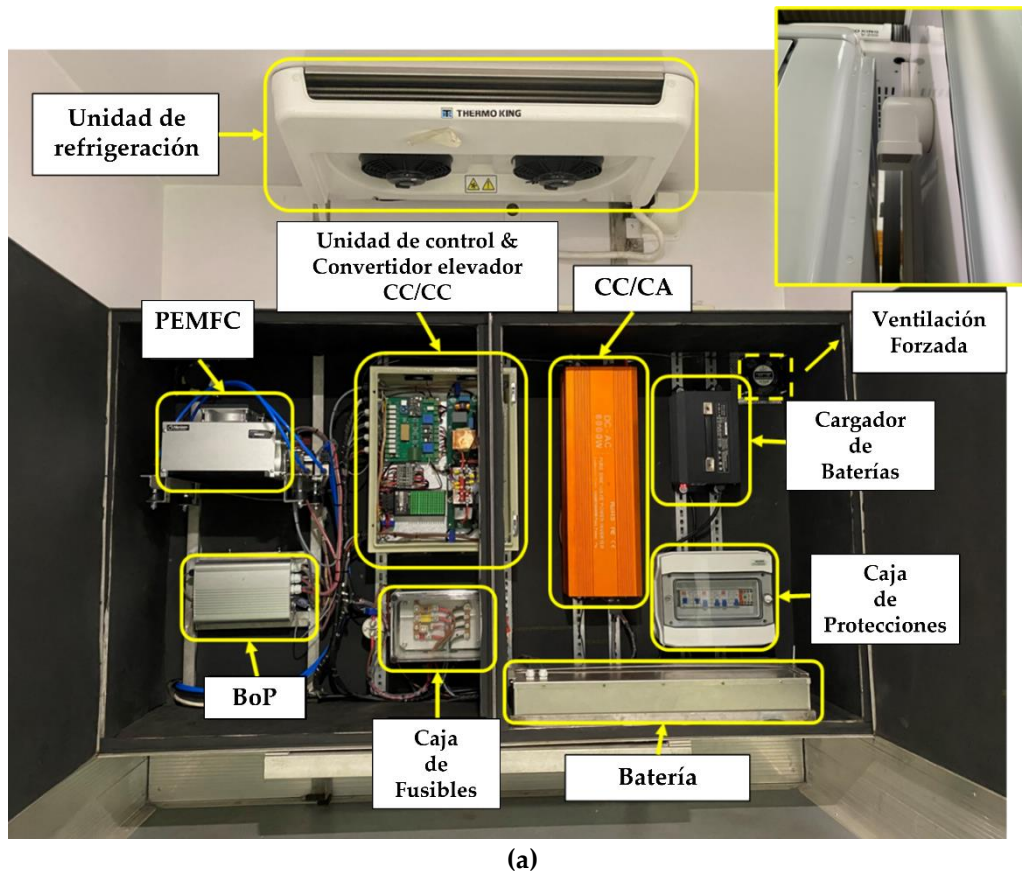
4.3 Implementación y Resultados Experimentales

En esta sección se lleva a cabo la validación experimental del HPRS y del EMS desarrollado y descrito en la sección 4.2.3. Para ello, se realizó una validación experimental en un vehículo comercial, concretamente, un camión frigorífico ligero Mercedes-Benz® Sprinter 311 CDI, Figura 4. 11a. Estaba equipado con el sistema de refrigeración eléctrico Thermo King® V-200 mostrado en la Figura 4. 11b, y con la caja refrigerada isotérmica mostrada en la Figura 4. 11c. La Figura 4. 11 muestra el vehículo tal y como salió de fábrica, recién comprado.

Por otro lado, la Figura 4. 12 muestra el montaje final del HPRS desarrollado en el vehículo. La Figura 4. 12a muestra todos los elementos en el interior de la caja isotérmica fabricada al efecto, alojada en la caja de refrigeración del vehículo (nótese el detalle del conducto de ventilación exterior). La Figura 4. 12b muestra el detalle de parte de la electrónica desarrollada, concretamente la unidad de control y el convertidor elevador CC/CC intercalado. Por último, la Figura 4. 12c muestra el sistema de almacenamiento de hidrógeno situado en el bastidor del vehículo en una caja metálica especialmente diseñada, de acuerdo con la ubicación descrita en la sección 4.2.2 y mostrada en la Figura 4. 4.



Figura 4. 11. (a) Detalle del camión frigorífico ligero; (b) Sistema de refrigeración eléctrico; (c) Nevera isotérmica.



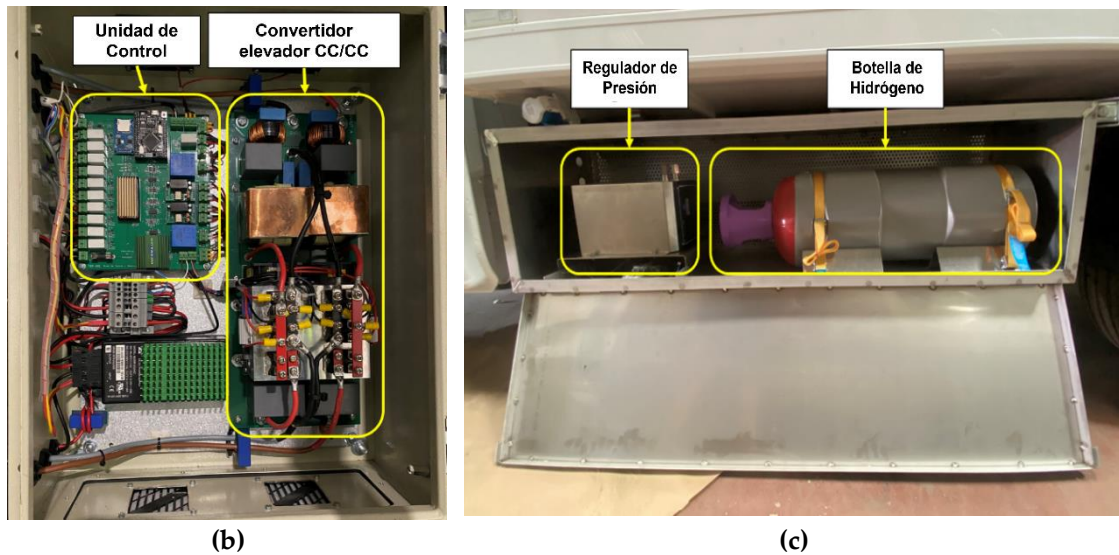


Figura 4. 12. Distribución y montaje final del sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno desarrollado en el vehículo. (a) Detalle de la unidad de control y del convertidor elevador CC/CC. (c) Botella de hidrógeno, regulador de presión y tubería de seguridad.

La prueba experimental consistió en someter al vehículo a una jornada normal de trabajo, de acuerdo con las características expuestas en el primer párrafo de la sección 4.2.1, donde se establecen las condiciones de diseño. Dado que el vehículo aún no estaba homologado para su uso en vías públicas y zonas urbanas, la experimentación se llevó a cabo en un circuito cerrado al tráfico de aproximadamente 2.5 km de longitud, que abarcaba un campus universitario y sus alrededores, Figura 4. 13.

La duración de la prueba fue el equivalente a un día laborable, 8 horas, comenzando a las 7:00 am y terminando a las 15:00 pm. El vehículo iba cargado de fruta y la temperatura de consigna del RS se fijó en 4 °C. Durante la prueba se realizaron tiempos de recorrido a velocidad controlada (urbana, < 50 km/h), paradas del vehículo, estacionamiento para descarga de la mercancía y tiempos de apertura de la puerta de la caja isotérmica, siempre siguiendo las indicaciones proporcionadas por una empresa especializada en este tipo de transporte. A lo largo de la jornada laboral, el perfil de funcionamiento del HRPS fue el que se muestra en la Figura 4. 14. Esta Figura debe interpretarse de la siguiente manera: cuando el vehículo está en movimiento, el HRPS está apagado (estado = 0) y el compresor del sistema de refrigeración (el mecánico en este caso, ver Figura 4. 1) es alimentado por el VPE. Cuando el vehículo se detiene y su motor se apaga, el HPRS se activa (estado = 1), alimentando el compresor del sistema de refrigeración (el eléctrico en este caso, ver Figura 4. 1).

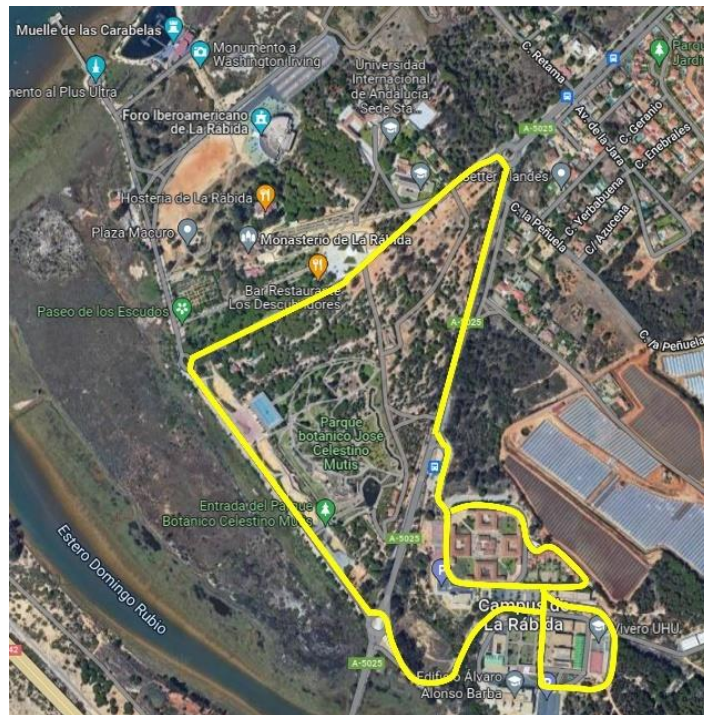


Figura 4. 13. Circuito cerrado al tráfico utilizado para la prueba experimental.

Las condiciones iniciales se fijaron en los valores de trabajo habituales: 80% del SOC de la batería y 6 m³ de hidrógeno almacenado, correspondientes al 85% de la capacidad máxima de hidrógeno.

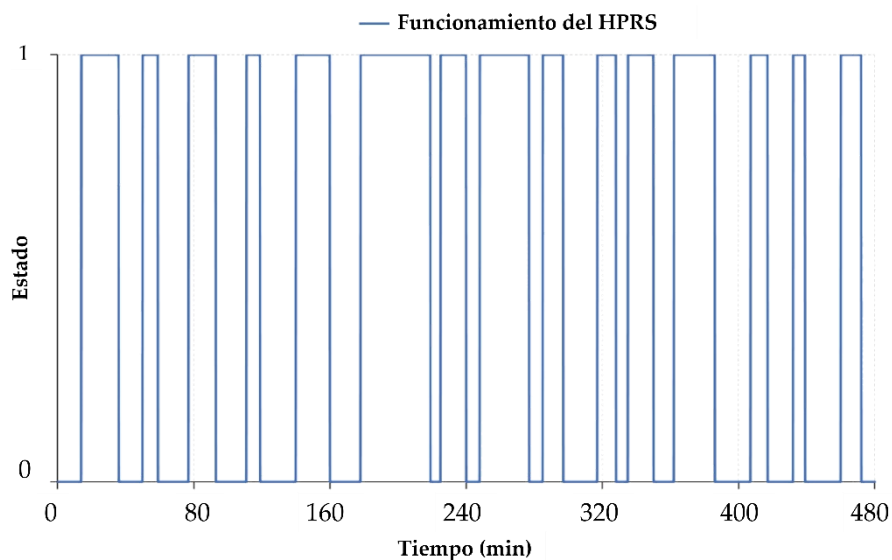


Figura 4. 14. Estados operativos del sistema HPRS durante la prueba experimental.

Los resultados obtenidos en la prueba experimental se muestran en las Figura 4. 15 a Figura 4. 19. En concreto, la Figura 4. 15 muestra la potencia suministrada/consumida de los elementos que componen el HPRS: PEMFC + convertidor elevador CC/CC, batería, convertidor CC/CA y consumos auxiliares para toda la prueba experimental. Hay que recordar que la potencia CC/CA

corresponde a la potencia del compresor eléctrico, considerando su correspondiente eficiencia. Los valores nulos de la potencia del convertidor CC/CA corresponden a los periodos del vehículo en movimiento, ya que el RS es soportado por el compresor mecánico. Los valores no nulos corresponden al consumo de potencia del RS, soportado por el compresor eléctrico cuando el vehículo está parado para la entrega de alimentos. Los criterios de signo son los siguientes: las variables de corriente y potencia se considerarán positivas si se inyectan al bus de CC, mientras que las variables de corriente o potencia se considerarán negativas si se extraen del bus de CC.

La Figura 4. 16 muestra las variables eléctricas de la batería, es decir, el voltaje del bus de continua junto con los valores característicos y límites definidos en la Tabla 4. 3, así como su corriente de carga/descarga.

La Figura 4. 17 muestra la evolución temporal del SOC de la batería, y el nivel de hidrógeno almacenado en las botellas durante la prueba experimental.

Por último, las Figura 4. 18 y Figura 4. 19 muestran las principales variables de funcionamiento de la PEMFC, es decir, voltaje, corriente y potencia, así como el valor de las consignas de voltaje y potencia en función de la temperatura ambiente dentro del recinto isotérmico, según el algoritmo P&OM definido en la sección 4.2.3.

4.4 Discusión

Como premisa inicial para entender la estrategia de control desarrollada, se ha considerado que la PEMFC debe garantizar el correcto SOC de la batería, que es controlado por su voltaje en bornes. Así, tal y como se define en la lógica de control desarrollada y presentada en las Figura 4. 5 y Figura 4. 6, el criterio de arranque de la PEMFC se establece en función del voltaje en bornes del pack de baterías de ion-litio, no del tiempo de recorrido ni de la energía demandada. El valor mínimo de voltaje al que la PEMFC comienza a funcionar (V_{BatFC}) se ha seleccionado teniendo en cuenta el SOC y los rangos mínimos de voltaje de funcionamiento para asegurar el correcto suministro de energía a la unidad de refrigeración mientras tiene lugar el protocolo de arranque de la PEMFC. Así, cuando el voltaje de la batería, debido a la descarga progresiva, alcanza el valor predefinido de 54.4 VCC, el EMS realiza el arranque controlado de la PEMFC, ver Figura 4. 15 a Figura 4. 19 ($t = 190$ min).

Otro aspecto importante a tener en cuenta antes de comentar los resultados es que, dado que el objetivo de la investigación es demostrar la viabilidad técnica y económica de la propuesta a través de un ejemplo de aplicación real, para los criterios de dimensionamiento del HPRS, los autores se han basado en su experiencia en otros proyectos similares, donde una solución comprometida que garantiza un correcto funcionamiento es un reparto homogéneo en términos de energía entre el pack de baterías y el sistema de hidrógeno. Así, para el

dimensionamiento del pack de baterías y del sistema de hidrógeno, se ha considerado un reparto energético aproximado del 50%. Por supuesto, se asume y entiende que, aunque funciona muy bien, se trata de una decisión empírica. Sería interesante afrontar en futuros trabajos, con un conocimiento detallado de la trayectoria y los tiempos de conducción y parada para una determinada aplicación, aplicar técnicas de optimización para resolver el problema de dimensionamiento multiobjetivo que garantice el menor coste del HPRS con la mayor autonomía.

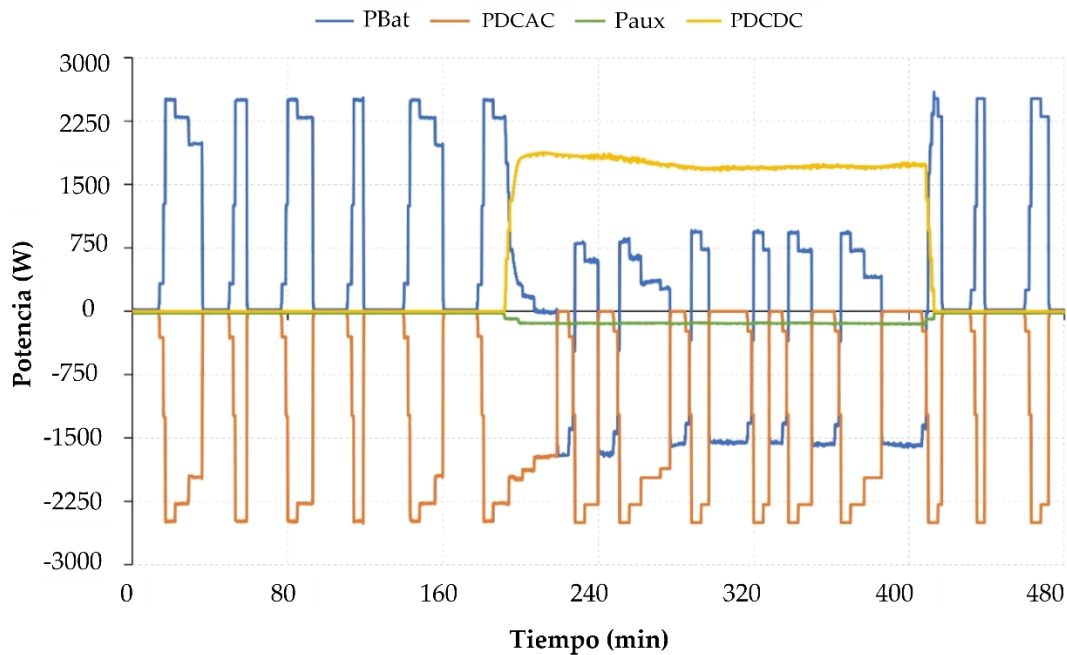


Figura 4. 15. Potencia de la batería (PBat), potencia del convertidor CC/CA (PDCAC), potencia del equipo auxiliar (Paux) y potencia del convertidor CC/CC (PDCDC) durante la prueba experimental.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la Figura 4. 15 representa el funcionamiento del RS del vehículo durante una jornada laboral de 8 h (480 min). Mientras el VPE está en marcha, el compresor mecánico garantiza el funcionamiento del RS, pero cuando el vehículo se detiene, el RS es alimentado por el compresor eléctrico a través del convertidor CC/CA. Por lo tanto, el P_{DCAC} muestra el perfil de demanda del compresor eléctrico y, en última instancia, el perfil que debe garantizar el HPRS. En base a lo anterior, sumando todo el tiempo que el compresor eléctrico está encendido (estado = 1 en la Figura 4. 14, y $P_{DCAC} \neq 0$ en la Figura 4. 15), se observa que prácticamente la mitad del tiempo el vehículo está parado durante intervalos de tiempo variables, correspondientes a las paradas para la entrega de alimentos, concretamente 4.2 horas, frente a las 3.8 horas cuando el vehículo está en movimiento.

Inicialmente, el voltaje del bus de CC es $V_{DCBus} > V_{Bat_{min}} = 50 \text{ VCC}$, Figura 4. 16, y el SOC de la batería es alto ($> 80\%$, Figura 4. 17), por lo que la batería suministra la potencia demandada por el compresor eléctrico, Figura 4. 15. En

consecuencia, esto provoca que la batería se descargue. En consecuencia, esto provoca la descarga de la batería, que se refleja en la evolución del voltaje del bus de CC y el nivel de SOC, hasta que se alcanza el valor de seguridad preestablecido, $V_{DC_{Bus}} = V_{Bat_{FC}} = 54.4 \text{ VCC}$, $t = 190 \text{ min}$, Figura 4. 16 y Figura 4. 17 respectivamente. Esto determina la puesta en marcha de la PEMFC, según la lógica y el diagrama de control descritos en la sección 4.2.3.1 y en la Figura 4. 6 respectivamente. Durante esta etapa, el consumo de los equipos auxiliares es muy bajo, y está asociado al consumo de potencia necesario para asegurar el funcionamiento de la electrónica de control y potencia $P_{aux} < 15 \text{ W}$, Figura 4. 15.

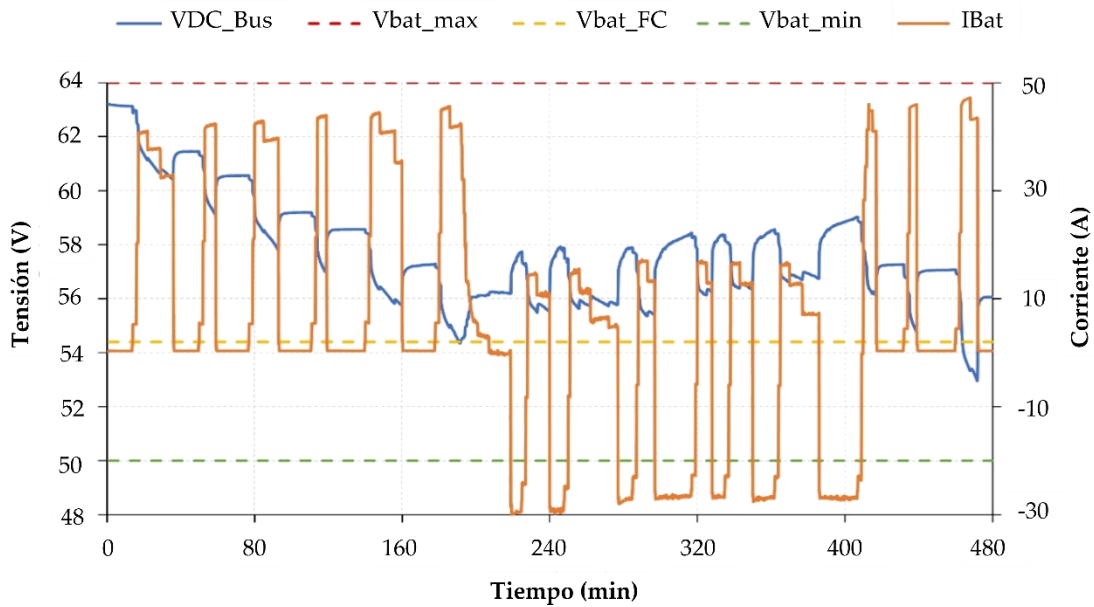


Figura 4. 16. Voltaje del bus de CC y corriente de la batería durante la prueba experimental.

Para poner en marcha la PEMFC, se estima el volumen de hidrógeno disponible en las botellas midiendo la presión, obteniendo un valor aproximado de 6 000 litros (85% del volumen máximo), muy superior al mínimo establecido, Figura 4. 17, por lo que se establece el protocolo de activación de la PEMFC. Este protocolo se caracteriza por un arranque controlado de la PEMFC imponiendo un perfil de potencia ascendente tipo escalera, con incrementos de 500 W y de 2 minutos de duración, Figura 4. 18. Este perfil pretende reducir el estrés térmico, hídrico y eléctrico debido a cambios bruscos en la potencia de funcionamiento de la PEMFC. Del mismo modo, el funcionamiento de la PEMFC requiere alimentación para su BoP, principalmente para su sistema oxidante/refrigerante, por lo que se produce un incremento en el consumo de potencia de los equipos auxiliares hasta un valor cercano a los 300 W, ver P_{aux} , Figura 4. 15. La potencia requerida del bus de continua es suministrada por la PEMFC a través del convertidor elevador de potencia CC/CC intercalado, P_{DCDC} .

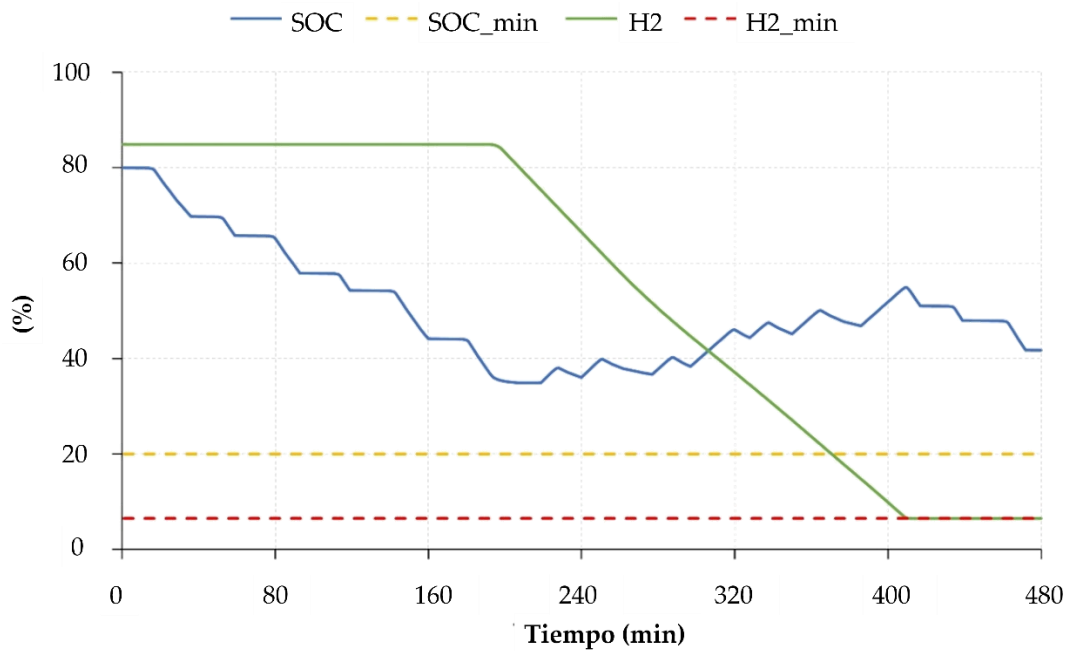


Figura 4. 17. SOC de la batería y nivel de hidrógeno (H2) durante la prueba experimental.

Durante el funcionamiento de la PEMFC, la lógica de control recalcula en tiempo real el punto de funcionamiento prefijado de la PEMFC según el algoritmo P&OM descrito en la sección 4.2.3.2. Así, en los instantes iniciales, la temperatura ambiente en el interior del recinto es relativamente baja ($T_{amb} \approx 20$ °C) y, por tanto, según la expresión (4.17), el punto de consigna de potencia (P_{FCSP}) es superior a la potencia máxima de la PEMFC, por lo que no establece una condición limitante, Figura 4. 19. Del mismo modo, el voltaje de funcionamiento de la PEMFC en su MPP es superior al voltaje mínimo establecida, por lo que tampoco establece una condición limitante, Figura 4. 18. Esto permite que la PEMFC opere en su MPP, manteniendo un perfil de potencia constante.

A medida que el funcionamiento de la PEMFC se prolonga en el tiempo, su producción de calor (el rendimiento a potencia nominal se sitúa en torno al 40%, produciendo aproximadamente 3 000 W de calor) provoca un aumento de la temperatura interna de la envolvente, ver T_{amb} , Figura 4. 19. Esto hace que se reduzca la consigna de potencia de la PEMFC para evitar su desconexión de seguridad. Así, a partir de $t = 240$ min, la consigna de potencia iguala y limita la potencia máxima extraíble de la PEMFC, Figura 4. 19, para reducir el aumento incontrolado de la temperatura ambiente que provocaría su desconexión. La corrección de la consigna de potencia, de acuerdo con la ley de control impuesta por el algoritmo P&OM, consigue el objetivo propuesto y permite estabilizar la temperatura ambiente en aproximadamente 37 °C, a la vez que garantiza el funcionamiento de la PEMFC, en este caso a una potencia aproximada de 1 850 W, Figura 4. 19. Obsérvese que la PEMFC funciona a una potencia casi constante,

lo que determina una tasa de consumo de hidrógeno también casi constante, Figura 4. 17.

Considerando el funcionamiento del convertidor CC/CC intercalado desarrollado, se demuestra a partir de las Figura 4. 15, Figura 4. 18 y Figura 4. 19 que permite la correcta integración de la PEMFC en el bus CC, a la vez que implementa con precisión el algoritmo P&OM desarrollado. Finalmente, a partir de los valores instantáneos de la potencia de salida de la PEMFC y de la potencia de salida del convertidor elevador CC/CC, Figura 4. 19 y Figura 4. 15 respectivamente, se puede determinar la eficiencia instantánea del convertidor de potencia, que es aproximadamente del 92% $\left(\frac{P_{DCDC}}{P_{FC}} = \frac{1702 W}{1850 W}\right)$.

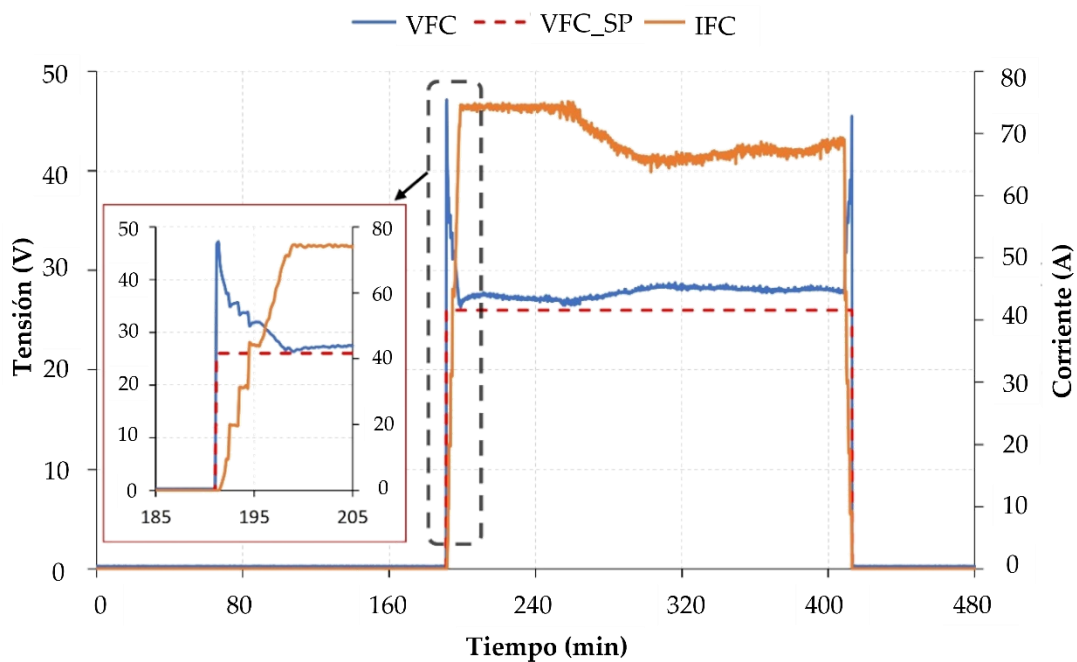


Figura 4. 18. Perfil de voltaje y corriente de la PEMFC (VFC e IFC respectivamente), así como el punto de consigna de voltaje (VFC_SP) según la ley de control P&OM.

Ahora, considerando el balance de potencia, durante la parada del vehículo, la demanda de potencia del compresor eléctrico es suministrada tanto por la PEMFC como por la batería, Figura 4. 15. Así, como el perfil de demanda es superior a la potencia generada por la PEMFC, la batería se descarga para garantizar el equilibrio de potencia en el bus de CC, $P_{DCAC} + P_{aux} = P_{Bat} + P_{DCDC}$. Por lo tanto, la PEMFC actúa como un extensor de autonomía. Por otro lado, cuando el vehículo está en movimiento, toda la energía producida por la PEMFC se utiliza completamente para cargar la batería, Figura 4. 15. Esto se refleja claramente en el bus de CC. Esto se refleja claramente en el perfil de voltaje del bus de CC y el SOC de la batería, Figura 4. 16 y Figura 4. 17 respectivamente.

Según el EMS desarrollado en la sección 4.2.3, el funcionamiento de la PEMFC se mantiene en el tiempo si el nivel de hidrógeno es superior al mínimo

establecido, el voltaje del bus de CC es inferior al valor máximo preestablecido ($V_{DC_{Bus}} < V_{Bat_{max}} = 64 \text{ VCC}$) y el convertidor elevador CC/CC funciona por debajo de su temperatura máxima. En este caso, la PEMFC se mantuvo operativa durante aproximadamente 220 minutos, hasta $t = 410$ minutos (Figura 4. 15, Figura 4. 18 y Figura 4. 19). En ese momento, se alcanzó el valor mínimo preestablecido del volumen de hidrógeno almacenado en las botellas, fijado en 400 litros, lo que corresponde a una presión de 10 bares (un volumen de hidrógeno de aproximadamente el 5% con respecto a la capacidad máxima), Figura 4. 17. Este valor es suficiente para llevar a cabo el funcionamiento controlado de la PEMFC. Este valor es suficiente para realizar el protocolo de apagado controlado de la PEMFC. Este protocolo se define mediante el uso de un perfil de potencia descendente de tipo escalera, con escalones de 500 W y 2 minutos de duración, Figura 4. 18. Al igual que en el procedimiento de arranque, este perfil reduce el estrés térmico de la PEMFC en caso de variación brusca de su potencia de funcionamiento, especialmente cuando la temperatura de la PEMFC es elevada, permitiendo que el sistema de refrigeración de la BoP enfríe progresivamente la PEMFC. Tras apagar el convertidor, la PEMFC, su BoP y su controlador local, se cierra la electroválvula de la línea de alimentación a la entrada del regulador de dos etapas (23, Figura 4. 4), aislando las botellas de hidrógeno y evitando así posibles fugas de hidrógeno en el interior del recinto.

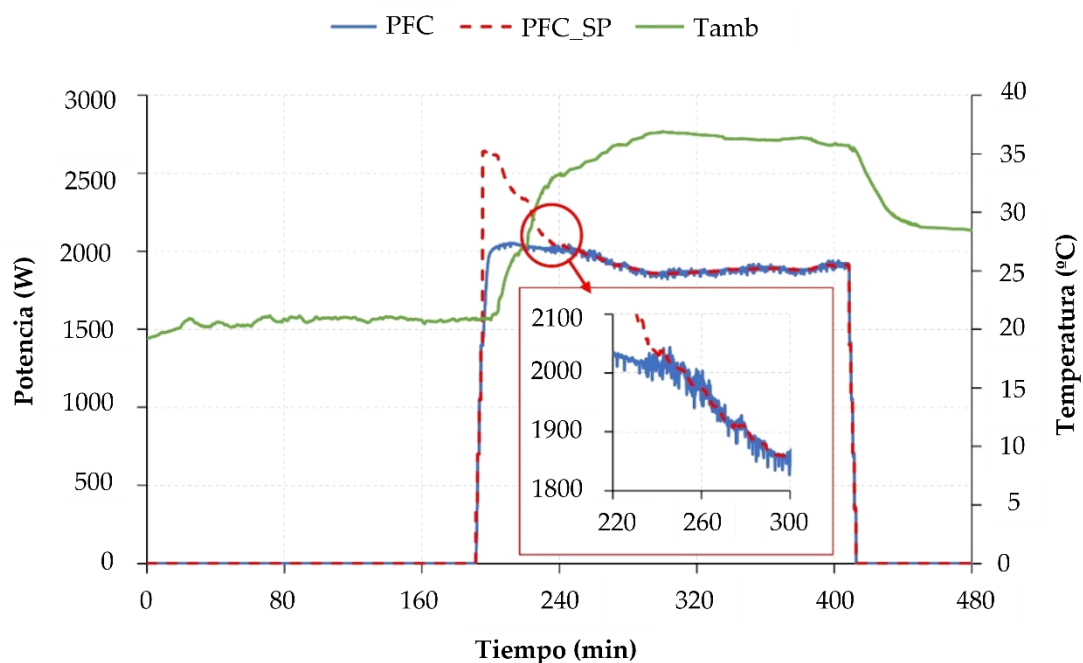


Figura 4. 19. Perfil de potencia de la PEMFC (PFC) y punto de consigna de potencia (PFC_SP) según la ley de control P&OM y la temperatura ambiente en el entorno de la PEMFC (Tamb).

A partir de $t = 413$ min (Figura 4. 15), el vehículo continúa con su ruta de reparto, sin embargo, al no estar disponible el recurso hidrógeno, el perfil de demanda queda garantizado por la batería, según el SGA definido. Gracias a la

carga realizada previamente por la PEMFC, el voltaje de la batería y su SOC es considerablemente superior a los mínimos establecidos, $V_{DC_{Bus}} = 59$ VCC y SOC = 53% (Figura 4. 16 y Figura 4. 17), permitiendo así su uso sin ninguna restricción. Por tanto, hasta la última parada en $t = 472$ min, coincidiendo prácticamente con el final de la jornada laboral, es únicamente la batería la que suministra la energía requerida por el compresor eléctrico, Figura 4. 15. Lógicamente, esta operación se traduce en una descarga progresiva de la batería, con la consiguiente reducción del voltaje del bus de continua y del SOC hasta un valor final de 56 VCC y 41% respectivamente, Figura 4. 16 y Figura 4. 17, ambos valores superiores a los mínimos prefijados.

A partir de los resultados experimentales, se valida el correcto funcionamiento de los HPRS y EMS desarrollados. Se ha demostrado que es posible garantizar el objetivo de 4 horas de autonomía, operando de forma segura, continua y suave a lo largo de una jornada laboral completa en un entorno real.

Finalmente, una vez verificado el correcto funcionamiento del HPRS desarrollado, se realizará el análisis en términos de ahorro de combustible, emisiones y coste económico considerando el uso del HPRS desarrollado.

Así, para el perfil de consumo diario (7 660 Wh) para una jornada laboral de 8 horas, con periodos de estacionamiento para el reparto de comida de aproximadamente la mitad del recorrido (4.2 horas estacionado y 3.8 horas en movimiento en la prueba realizada), considerando un aporte energético medio por unidad de volumen de 10.7 kWh/litro de gasóleo, y una eficiencia térmica del motor diésel de aproximadamente el 40%, se estima un ahorro de combustible de aproximadamente 1.8 litros diarios. Si además se considera que, en el caso del uso exclusivo del compresor mecánico, es necesario mantener arrancado el VPE para asegurar el funcionamiento del RS durante las paradas, con un consumo estimado de 0.8 litros/hora según datos del fabricante, resulta un consumo extraordinario de 3.4 litros por día. En consecuencia, el uso del HPRS desarrollado proporciona un ahorro de combustible de aproximadamente 5.2 litros/día.

Además, si, según las especificaciones del fabricante, se considera un consumo medio interurbano de 12.8 litros/hora, una jornada laboral de 8 horas resulta en un consumo diario de 48.64 litros/día, por lo tanto, el HPRS desarrollado ahorra un 10.7% de combustible.

En resumen, suponiendo que las rutas medias anuales de reparto son similares a la ruta de prueba y que la semana laboral es de 5 días, el ahorro anual de combustible es de aproximadamente 1 352 litros/año (la conversión en dinero ahorrado vendrá dada lógicamente por el precio del gasóleo en cada país; en el caso de España en la fecha del experimento, 2 433 €). Esta cantidad de gasóleo ahorrado, y por tanto no quemado, supone dejar de emitir 3 650 kg de CO₂/año.

Por supuesto, desde un punto de vista medioambiental, que no económico, el uso de la solución propuesta sólo tiene sentido si el hidrógeno utilizado es ecológico, lo que actualmente significa hidrógeno producido por electrólisis a partir de fuentes de energía renovables.

Por último, teniendo en cuenta que la inversión realizada en el sistema desarrollado ha sido de aproximadamente 12 500 euros (este coste sería mucho más barato para unidades posteriores, ya que un prototipo -artesanal- es mucho más caro que las unidades producidas en serie), es fácil realizar un sencillo análisis de amortización de la inversión. El ahorro en gasóleo es de unos 3 289,5 euros/año. El consumo medio de hidrógeno es de 5 542 Nm³/día, es decir, unos 0.5 kg/día o 130 kg/año. Hoy en día es posible comprar hidrógeno verde entre 8 y 10 euros/kg; luego, considerando un precio medio de 9 euros/kg, el gasto en hidrógeno es de 1 170 euros/año. Por tanto, la amortización aproximada es algo inferior a 6 años. Dicho esto, un sistema como el desarrollado, industrializado y comercializado, costaría menos de la mitad que el prototipo. Si a esto añadimos que la tendencia del diésel es al alza y la del hidrógeno a la baja, la amortización se reduciría drásticamente.

Como conclusión a esta sección de discusión, el diseño propuesto en este trabajo (siguiendo el concepto de hibridación, el diseño considera el balance energético, no el de potencia), aunque no puede considerarse matemáticamente óptimo, es probablemente, en base a nuestra experiencia, uno de los más económicos y eficientes. Esto se debe a que (1) la PEMFC funciona siempre a potencia nominal, sin perturbaciones que puedan deteriorarla prematuramente; (2) la PEMFC es de baja potencia, lo que implica un bajo consumo de hidrógeno y, por tanto, una mayor autonomía del sistema de refrigeración; (3) esto se traduce en menos hidrógeno que llevar a bordo y, por tanto, menos peso en las bombonas de hidrógeno; (4) una PEMFC de pequeña potencia implica un convertidor CC/CC a su salida, también de pequeña potencia; (5) todas estas características juntas conducen a un HPRS más pequeño, más ligero, más duradero y menos costoso. Esto garantiza un rápido retorno de la inversión.

4.5 Conclusiones

El crecimiento de las ciudades y sus suburbios, con el consiguiente aumento del consumo de bienes y alimentos en los entornos urbanos, ha provocado un aumento significativo de la demanda en el sector del transporte de corta distancia, especialmente en el sector del transporte refrigerado de alimentos. Teniendo en cuenta que los vehículos frigoríficos de reparto mantienen la cadena de frío utilizando exclusivamente energía procedente de combustibles fósiles (gasolina/diésel), existe una grave amenaza para el medio ambiente en este ámbito.

En este trabajo se ha llevado a cabo el diseño, desarrollo paso a paso y validación experimental de un sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno (HPRS) para su uso en camiones ligeros refrigerados destinados al sector del reparto de alimentos. Las principales aportaciones se centran en el diseño de la arquitectura del HPRS, la electrónica necesaria (adquisición, control y alimentación) para su correcto funcionamiento, así como un sistema de gestión de energía (EMS) y un novedoso algoritmo orientado a maximizar el rendimiento del HPRS en términos de operatividad, potencia y vida útil.

Centrándonos en los resultados experimentales obtenidos sobre un prototipo experimental basado en un vehículo comercial, se puede resumir que:

(1) Las tecnologías del hidrógeno permiten el desarrollo de soluciones técnicamente viables y seguras con cero emisiones netas para su uso en el sector del transporte refrigerado de alimentos.

(2) La filosofía de diseño utilizada permite una fácil integración en la flota actual de vehículos, minimizando los esfuerzos económicos y de investigación para la promoción y uso de las tecnologías del hidrógeno en el sector del transporte refrigerado de alimentos.

(3) El diseño de la arquitectura HPRS y EMS garantiza la autonomía requerida para su uso en vehículos frigoríficos de corto alcance sin paradas para repostar.

(4) El uso del HPRS desarrollado presenta grandes ventajas en términos de ahorro económico y cuidado del medio ambiente, ya que, para el vehículo ensayado, su uso permite reducir el consumo medio anual de combustible en más de un 10% y reducir las emisiones de CO₂ hasta en 3 650 kg.

La pedagogía utilizada en este trabajo y su replicabilidad permite a investigadores, fabricantes, partes interesadas y responsables políticos utilizarlo como punto de partida para el diseño de nuevos modelos o soluciones para la flota existente de vehículos frigoríficos de reparto, para avanzar hacia una movilidad sostenible y demostrar la viabilidad del uso de las tecnologías del hidrógeno.



Capítulo 5. Conclusiones y Desarrollos Futuros



Palabras clave	Resumen
Conclusiones extraídas de trabajos anteriores de investigación	<p>Este último capítulo que cierra esta memoria de Tesis está orientado a recoger todas las conclusiones derivadas de los trabajos de investigación realizados, lo cual conformará la primera sección del capítulo, así como las principales aportaciones y futuras líneas de trabajo que se prevé que puedan surgir de la Tesis, que serán objeto de la segunda sección.</p> <p>En esta Tesis se realizado un análisis sobre la actual brecha de género en carreras científico tecnológicas, se ha realizado una búsqueda de las causas y cómo estás pueden influir a corto plazo. Este análisis a dado origen a qué no sólo la brecha de género está afectando a las carreras STEM, la llegada del COVID-19 en 2020 hizo un cambio en el método enseñanza-aprendizaje, adaptando la educación a un modelo híbrido. Una solución para esta nueva situación fue el uso de laboratorios remotos, para que el alumnado pudiera realizar las prácticas de laboratorios. Además, este laboratorio implementado en la Universidad de Huelva forma parte de una infraestructura estandarizadas de laboratorios remotos de diferentes universidades europeas, provocando que el alumnado tuviera más variedad a la hora de realizar las prácticas. También estos laboratorios de esta infraestructura estaban basados en energías renovables, adaptándose a las nuevas medidas adoptadas por la Unión Europea para 2035.</p> <p>Los conocimientos sobre energías renovables adquiridos por el alumnado, posteriormente han sido llevado a la práctica, sustituyendo el sistema de refrigeración de una furgoneta refrigerada de reparto por una pila de combustible hidrógeno.</p> <p>Respecto a las conclusiones que se verán a continuación, éstas tienen por objetivo mostrar los resultados teóricos y experimentales que contienen la mayoría de los capítulos de esta Tesis.</p>
Desarrollos futuros	
Brecha de género	
Laboratorio remoto	
Pila de combustible	

5.1 Conclusiones

Respecto al estudio sobre la participación de las mujeres en el ámbito STEM que se realiza en el **Capítulo 2**, lo primero que se deduce, como se observa en la Figura 2.3, es que, en los grados de Ingeniería Electrónica Industrial, Ingeniería Mecánica Industrial e Ingeniería Informática, en la Universidad de Huelva, desde el año 2014, no se ha superado el 20% de mujeres matriculadas en estas ingenierías. Si a este hecho se suma que, como se muestra en la Tabla 1, las

profesiones STEM se encuentran entre las 20 vacantes con mayor cuello de botella a nivel europeo, concretamente los ingenieros mecánicos se encuentran en el puesto número 7, los desarrolladores de software (Ingeniería Informática) en el puesto número 8 y los ingenieros electrónicos y los ingenieros eléctricos en el puesto número 14. De estos datos se deduce que la baja participación de mujeres en el ámbito científico-tecnológico, unido a que las profesiones en el ámbito STEM se encuentra en crecimiento, y se espera un crecimiento mayor para los próximos años, aquellas mujeres que actualmente no orienten su vida académica a los estudios STEM, en un futuro no podrán optar a estos puestos de trabajo.

De la comparativa realizada entre diferentes estudios, ninguno de ellos ha elaborado un estudio tan detallado separando al alumnado en diferentes etapas. Del mismo modo, muchos no han interactuado con el alumnado, ya que los datos han sido obtenidos de diferentes bases de datos, y consecuentemente, ningún estudio ha elaborado talleres participativos para interactuar con el alumnado y así acercarlo a este ámbito.

Analizando los resultados obtenidos de la encuesta del estudio realizado en el Capítulo 2, se puede concluir que todavía queda un largo camino para poder ver esta equidad de género en el ámbito científico-tecnológico. Del mismo modo, los resultados de las encuestas muestran que todavía existen prototipos de géneros en bastantes profesiones y actividades domésticas. Muchos jóvenes, tanto hombres como mujeres, siguen asociando las profesiones relacionadas con los cuidados, como del hogar o de las personas, con el género femenino, mientras aquellas actividades que requieren autoridad, fuerza o alguna destreza técnica son asociadas al género masculino.

En este estudio también se ha incluido al profesorado, ya que, sobre todo en edades más tempranas como primaria y secundaria, estos son un referente para el alumnado. El profesorado de primaria y secundaria está más concienciado con la brecha de género, pero no lleva a su alumnado a los laboratorios del centro para que estos puedan interactuar con la ciencia. Por otro lado, el profesorado universitario, la mayoría dedicados a la enseñanza en el ámbito científico-tecnológico, son los menos conscientes en la brecha de género, no contribuyendo a dar visibilidad a las mujeres en este ámbito.

Otra consecuencia obtenida de las encuestas es el entorno educativo, ya que si los centros educativos, tengan o no laboratorio de ciencias no llevan al alumnado a realizar prácticas, tanto en primaria como en secundaria, se hace difícil atraer al alumnado a carreras donde la parte práctica tienen gran relevancia, como son las ingenierías.

En definitiva, en este capítulo se deduce que un cambio en los itinerarios curriculares, donde el alumnado pudiera ver y llevar a la práctica los conocimientos teóricos adquiridos, podría orientarlos más hacia carreras más técnicas. Por este motivo los talleres participativos han tenido como objetivo

acercar la ciencia e ingeniería desde la posición de la mujer, ya que muchas veces se elige una profesión por prototipo, es decir, si la imagen que tienes de esa profesión la defines con tu imagen. Si en el ámbito científico hay pocas mujeres y ningún prototipo, es difícil que las niñas se sientan identificadas con estas profesiones.

El **Capítulo 3** ha tenido como objetivo fundamental contribuir a la transición digital en la educación superior mediante la creación de un modelo educativo estandarizado basado en laboratorios remotos centrados en las energías renovables y desarrollado en el marco de la UE, supliendo así las nuevas medidas propuestas por la UE para 2035.

La finalidad era establecer, probar y validar un modelo educativo basado en el uso de laboratorios remotos para las prácticas, fusionando así el aprendizaje presencial y en línea, dando origen a un modelo híbrido, donde el alumnado puede llevar a cabo actividades/experimentos prácticos integrados con lecciones teóricas sobre temas de energías renovables. Se puede decir que esta red colaborativa de laboratorios remotos europeos es pionera en cubrir este nuevo contexto, y en un campo emergente, en auge y bastante caro donde no todas las universidades pueden permitirse tener laboratorios basados en energías renovables dentro de sus instalaciones.

La colaboración de laboratorios remotos se ha llevado a cabo a través de cinco universidades europeas, dando como resultado la red educativa RE-OPEN. Cada universidad ha seguido un desarrollo paso por paso donde ha implementado su laboratorio remoto, para luego integrarlos en la infraestructura estandarizada. Si bien existen trabajos publicados sobre el desarrollo de laboratorios remotos en ingeniería, solo dos proponen una infraestructura colaborativa, pero ninguno de ellos está basado en fuentes de energías renovables.

La infraestructura colaborativa estandarizada ha permitido al alumnado ampliar la oferta académica de prácticas, teniendo acceso a otros laboratorios, que, aunque no se encuentren físicamente en su universidad, pueden acceder a él a través de Internet. No obstante, el laboratorio remoto diseñado e implementado por la Universidad de Huelva hace uso de un banco de supercondensadores, una tecnología poco conocida y que ofrece grandes ventajas, sobre todo en el uso de energías renovables, estabilizando el voltaje suministrado por los paneles fotovoltaicos, o en su actual uso en los coches híbridos con pila de combustible. Con esta infraestructura de colaboración, RE-OPEN fomenta la reutilización de códigos de programación, evitando la fragmentación que provoca el uso de herramientas propietarias por parte de cada universidad. De este modo, la red RE-OPEN proporciona al alumnado las competencias necesarias para satisfacer las necesidades de la Industria 4.0.

Los datos obtenidos de las encuestas muestran que tanto el profesorado como el alumnado proponen la utilización de laboratorios remotos en el método enseñanza-aprendizaje. Los laboratorios remotos ofrecen una gran flexibilidad y versatilidad, y tanto alumnado como profesorado valoran muy positivamente estas ventajas, ya que permiten repetir el experimento tantas veces como el alumnado lo requiera, reforzando los conceptos teóricos. La valoración más positiva de las encuestas se la ha llevado la idea de haber creado una infraestructura colaborativa entre cinco universidades europeas, permitiendo que el alumnado desarrolle nuevas habilidades técnicas y amplíen sus conocimientos teóricos y prácticos al poder utilizar laboratorios que no estén disponibles en su universidad.

Los laboratorios remotos no deben considerarse como un sustituto de los laboratorios convencionales, sino como un complemento, ya que proporcionan un conjunto más completo de competencias en la nueva era digital. Los laboratorios permiten al alumnado y profesorado realizar las prácticas como si estuvieran en un laboratorio presencial, con la ventaja de la reducción de espacio y tiempo que estos poseen. De esta forma, el alumnado puede hacer uso del laboratorio más allá del horario lectivo establecido, lo que posibilita un mejor acceso para el alumnado que tiene un horario limitado, y además, posibilitando la repetición de las prácticas el número de veces necesarias para la adquisición de conocimiento.

El **Capítulo 4** está caracterizado por su alto contenido experimental. La implementación real de un sistema híbrido de pila de combustible conlleva realizar un estudio minucioso de todos los elementos que componen el sistema y la interrelación entre ellos. Además, hay que tener en cuenta que los sistemas de pila de combustible no tienen aún una gran implantación en el mercado y, por tanto, la disponibilidad comercial es limitada. Por otro lado, las características físicas y funcionamiento de este tipo de sistemas exigen unos requerimientos adicionales en los sistemas de acondicionamiento de potencia y fuentes auxiliares.

Debido al crecimiento urbano en las ciudades, el reparto de alimentos ha provocado un aumento en el sector transporte, concretamente en el sector del transporte refrigerado de alimentos. Este crecimiento está suponiendo un problema, debido a que tanto el motor del vehículo como el motor que refrigera la cámara de conservación de los alimentos se alimenta por combustibles fósiles, en su mayoría por diésel. Este tipo de combustibles se ha convertido en una fuerte amenaza para la contaminación, y un objetivo para frenar el cambio climático. Por este motivo la UE ya está implantando medidas para 2035, entre las que destaca la supresión de combustibles fósiles en el transporte.

En el Capítulo 4 se diseñó, desarrolló y validó un sistema de refrigeración alimentado por hidrógeno (HPRS) para su uso en camiones ligeros refrigerados

destinados al sector del reparto de alimentos. Realizando una exhaustiva búsqueda bibliográfica y habiendo obtenido pocos trabajos relacionados con lo propuesto en este capítulo, se optó por la implementación de una pila de combustible tipo PEM y unas baterías. Para la aplicación propuesta, las PEMFC necesitan menor temperatura de funcionamiento, posee un BoP más simple y unos tiempos de arranque y parada más cortos (en el rango de segundos), así como una mejor respuesta dinámica.

Los resultados experimentales obtenidos en este capítulo corroboran que las tecnologías de hidrógeno pueden desarrollar soluciones seguras, viables y sin gases de efecto invernaderos, es decir, cero emisiones netas. A diferencia del prototipo diseñado por Nuvera[®] que solo puede ser implementado en su flota, este diseño permite ser integrado en la actual flota de vehículos, sin necesidad de hacer cambios ni modificaciones en la estructura del vehículo. Tras la prueba en carretera del vehículo, se confirmó que en las 8 horas laborales de trabajo no se necesitó parar para repostar, lo que equivale a una reducción del 10% del consumo medio anual y de 3 650 kg de emisiones de CO₂.

Se considera que el objetivo de esta Tesis es estudiar, diseñar e implementar un nuevo sistema de enseñanza-aprendizaje en las carreras científico tecnológicas, promoviendo la participación de las mujeres en el ámbito STEM.

5.2 Desarrollos futuros

Lejos de considerar esta Tesis como algo cerrado, los capítulos que la conforman han terminado siendo puertas abiertas hacia trabajos de investigación futuros.

Así, por ejemplo, a partir del estudio realizado en el **Capítulo 2**, se pueden tomar medidas para mostrar y atraer al alumnado al ámbito científico-tecnológico. Para ello se pueden modificar los itinerarios curriculares de primaria y secundaria, dando protagonismo a los conceptos prácticos para que refuercen los teóricos, y habiendo una multidisciplinariedad entre las asignaturas. Del mismo modo, se puede dar visibilidad a las pocas mujeres en la ciencia, para que así las niñas, desde pequeña, puedan tener a una mujer ingeniera o científica como referente, y no sea una profesión asociada solamente al género masculino.

El proyecto desarrollado en el **Capítulo 3**, abre nuevos caminos y retos hacia un nuevo modelo educativo basado en una educación híbrida, donde el alumnado pueda realizar las prácticas de laboratorio sin necesidad de supervisión, y además abriendo fronteras con la cooperación de diferentes universidades. La Universidad de Huelva cuenta con una plataforma donde tiene alojados diferentes laboratorios remotos en otras especialidades.

Del mismo modo, en la Universidad de Huelva se está llevando a cabo la creación de una plataforma móvil terrestre alimentada por hidrógeno, que una

vez desarrollada y a corto plazo servirá como práctica para otro laboratorio remoto.

La implementación llevada a cabo en el **Capítulo 4** deja abierta muchas puertas a la investigación, sobre todo en el sector del transporte, pudiendo sustituir los motores contaminantes por motores alimentados por hidrógeno. Los trabajos futuros se orientan en dos direcciones. Por un lado, intentar transferir la tecnología desarrollada para que puedan comenzar a fabricarse en serie furgonetas refrigeradas y camiones ligeros que basen sus sistemas de refrigeración en el uso de hidrógeno. Por otro, a partir de la tecnología desarrollada, diseñar HPRS de mayor potencia y autonomía, viables para su montaje en camiones frigoríficos pesados utilizados en el transporte nacional e internacional. Además, aunque un análisis sensible a los costes no estaba dentro del alcance de este trabajo, dados los actuales precios del gasóleo (un gran problema para el sector del transporte), es sin duda un reto para futuros trabajos.

Referencias Bibliográficas

- [1] M. Marchisio, A. Barana, C. Fissore, and M. Pulvirenti, "Digital Education to Foster the Success of Students in Difficulty in Line with the Digital Education Action Plan," in *EDEN Conference Proceedings*, 2021, no. 1, pp. 353–363, doi: 10.38069/edenconf-2021-ac0034.
- [2] N. Alexiadou and X. Rambla, "Education policy governance and the power of ideas in constructing the new European Education Area," *Eur. Educ. Res. J.*, no. September, 2022, doi: 10.1177/14749041221121388.
- [3] I. Kushnir, "Referentiality mechanisms in EU education policymaking: The case of the European Education Area," *Eur. J. Educ.*, vol. 57, no. 1, pp. 128–141, 2022, doi: 10.1111/ejed.12485.
- [4] M. Martínez, F. Segura, J. M. Andújar, and R. Ordóñez, "ALAS: Accompanying girls towards STEM careers . An experimental study from primary to higher education," 2022.
- [5] M. Martínez, F. Segura, J. M. Andújar, Y. Ceada, and M. J. Martín, "Study on the Low Presence of Women in the STEM field . Search for Reasons to Be Able to Increase Participation," in *V Jornadas ScienCity 2022. Fomento de la Cultura Científica, Tecnológica y de Innovación en Ciudades Inteligentes*, 2022, pp. 10–13.
- [6] Secretaría General de Universidades, *Datos y cifras del Sistema Universitario Español. Publicación 2021-2022*. 2022.
- [7] D. Langdon, D. Beede, and M. Doms, "STEM: Good jobs now and for the future," no. February, 2017.
- [8] A. . Fallis, "Encouraging STEM Studies for the Labour Market," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2015.
- [9] U.S. Bureau of Labor Statistics, "Employment Projections," 2022. <https://www.bls.gov/emp/tables/stem-employment.htm>.
- [10] D. Tres Bishop, "The Hard Truth About Soft Skills," *Muma Bus. Rev.*, vol. 1, no. 18, pp. 233–239, 2017, doi: 10.28945/3803.
- [11] W. Mely, B. Br, D. Nirwana, and R. Manulang, "The Effect of Organizational Learning on Improving Hard skills , Soft Skills , and Innovation on Performance," vol. 3, pp. 126–146, 2022.
- [12] E. R. Schislyaeva and O. A. Saychenko, "Labor Market Soft Skills in the Context of Digitalization of the Economy," *Social Sciences*, vol. 11, no. 3. 2022, doi: 10.3390/socsci11030091.
- [13] H. S. Karimi and A. A. Piña, "Strategically Addressing the Soft Skills Gap Among STEM Undergraduates," vol. 7, no. 1, pp. 21–46, 2021.
- [14] K. Attström, S. Niedlich, K. Sandvliet, H.-M. Kuhn, and E. Beavor, *Mapping and Analysing Bottleneck Vacancies in EU Labour Markets - Overview report*. 2014.

- [15] A. García-Holgado, S. Verdugo-Castro, C. González, M. C. Sánchez-Gómez, and F. J. García-Peñalvo, "European Proposals to Work in the Gender Gap in STEM: A Systematic Analysis," *IEEE Rev. Iberoam. Tecnol. del Aprendiz.*, vol. 15, no. 3, pp. 215–224, 2020, doi: 10.1109/RITA.2020.3008138.
- [16] A. McDaniel, "The role of cultural contexts in explaining cross-national gender gaps in STEM expectations," *Eur. Sociol. Rev.*, vol. 32, no. 1, pp. 122–133, 2016, doi: 10.1093/esr/jcv078.
- [17] A. García-Holgado *et al.*, "Gender equality in STEM programs: a proposal to analyse the situation of a university about the gender gap," vol. 21, no. 1, pp. 1–9, 2020, [Online]. Available: <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>.
- [18] O. V. Dulce-Salcedo, D. Maldonado, and F. Sánchez, "Is the proportion of female STEM teachers in secondary education related to women's enrollment in tertiary education STEM programs?," *Int. J. Educ. Dev.*, vol. 91, p. 102591, May 2022, doi: 10.1016/J.IJEDUDEV.2022.102591.
- [19] X. Jiang, "Women in STEM: Ability, preference, and value," *Labour Econ.*, vol. 70, p. 101991, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.LABECO.2021.101991.
- [20] S. C. Kumar, A. S. Haber, M. E. Ghossainy, S. Barbero, and K. H. Corriveau, "The impact of visualizing the group on children's persistence in and perceptions of STEM," *Acta Psychol. (Amst.)*, vol. 233, p. 103845, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.ACTPSY.2023.103845.
- [21] A. Gaweł and M. Krstić, "Gender Gaps In Entrepreneurship And Education Levels From The Perspective Of Clusters Of European Countries," *J. Dev. Entrep.*, vol. 26, pp. 1–28, 2021, doi: 10.1142/S1084946721500242.
- [22] P. R. Pintrich and E. V. De Groot, "Motivational and self-regulated learning components of classroom," *J. Educ. Psychol.*, vol. 82, no. 1, pp. 33–40, 1990.
- [23] A. Bandura, *Self-efficacy: The exercise of control*. New York, NY, US: W H Freeman/Times Books/ Henry Holt & Co, 1997.
- [24] J. S. Eccles and A. Wigfield, "Motivational, beliefs, values and goals," 2002.
- [25] A. Wigfield and J. S. Eccles, "Expectancy–Value Theory of Achievement Motivation," *Contemp. Educ. Psychol.*, vol. 25, no. 1, pp. 68–81, Jan. 2000, doi: 10.1006/CEPS.1999.1015.
- [26] J. S. Eccles, C. Freedman-Doan, P. Frome, J. Jacobs, and K. S. Yoon, "Gender-role socialization in the family: A longitudinal approach," in *The developmental social psychology of gender.*, Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2000, pp. 333–360.
- [27] A. H. Eagly and W. Wood, "Social role theory," in *Handbook of Theories of Social Psychology*, no. March, 2012, pp. 458–476.
- [28] A. H. Eagly, *Sex differences in social behavior: A social-role interpretation*. Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 1987.

- [29] A. B. Eagly, Alice H. , Wood, Wendy, Diekman, "Social role theory of sex differences and similarities: A current appraisal," in *The Developmental Social Psychology of Gender.*, Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2000, pp. 123–174.
- [30] K. Deaux and L. L. Lewis, "Structure of gender stereotypes: Interrelationships among components and gender label.," *J. Pers. Soc. Psychol.*, vol. 46, pp. 991–1004, 1984, doi: 10.1037/0022-3514.46.5.991.
- [31] K. Deaux, W. Winton, M. Crowley, and L. L. Lewis, "Level of categorization and content of gender stereotypes.," *Soc. Cogn.*, vol. 3, pp. 145–167, 1985, doi: 10.1521/soco.1985.3.2.145.
- [32] M. Sáinz, J. Meneses, B. S. López, and S. Fàbregues, "Gender Stereotypes and Attitudes Towards Information and Communication Technology Professionals in a Sample of Spanish Secondary Students," *Sex Roles*, vol. 74, no. 3–4, pp. 154–168, 2016, doi: 10.1007/s11199-014-0424-2.
- [33] B. Hannover and U. Kessels, "Self-to-prototype matching as a strategy for making academic choices. Why high school students do not like math and science," *Learn. Instr.*, vol. 14, no. 1, pp. 51–67, Feb. 2004, doi: 10.1016/J.LEARNINSTRUC.2003.10.002.
- [34] G. R. Sturrock and D. B. Zandvliet, "Citizenship Outcomes and Place-Based Learning Environments in an Integrated Environmental Studies Program," *Education Sciences*, vol. 13, no. 3. 2023, doi: 10.3390/educsci13030292.
- [35] S. Brachtl *et al.*, "Physical home-learning environments of traditional and non-traditional students during the COVID pandemic: exploring the impact of learning space on students' motivation, stress and well-being," *Smart Learn. Environ.*, vol. 10, no. 1, p. 7, 2023, doi: 10.1186/s40561-023-00222-4.
- [36] M. W. Bülow, "Designing Synchronous Hybrid Learning Spaces: Challenges and Opportunities," no. February, pp. 135–163, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-88520-5_9.
- [37] A. Al-Badi and A. Khan, "Technological Transition in Higher Education Institution in the Time of Covid-19," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 203, pp. 157–164, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.PROCS.2022.07.022.
- [38] A. M. Al-Smadi, A. Abugabah, and A. Al Smadi, "Evaluation of E-learning Experience in the Light of the Covid-19 in Higher Education," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 201, no. C, pp. 383–389, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.03.051.
- [39] K. K. Chelliah, "COVID-19 pandemic: student and faculty experience in Higher Education," *J. Med. Imaging Radiat. Sci.*, vol. 53, no. 4, p. S58, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.JMIR.2022.10.200.
- [40] E. Lerma, R. Costa-Castelló, R. Griñó, and C. Sanchis, "Herramientas para la docencia de control digital en grados de ingeniería," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 18, no. 2, p. 193, 2021, doi: 10.4995/riai.2020.13756.

- [41] M. Martínez, F. Segura, J. M. Andújar, L. del Zotto, M. Tabakovic, and T. O'Mahony, "The challenges of digital transition in Engineering careers . A solution based on standardised renewable sources-based remote laboratories," in *6th IEEE Eurasian Conference on Educational Innovation 2023*, 2023, pp. 0–3.
- [42] M. Martínez, R. García, F. Segura, and J. M. Andújar, "Standardized Remote Laboratories Based on Renewable Energy Sources for REOPEN European University Network," in *IV Jornadas ScienCity 2021. Fomento de la Cultura Científica, Tecnológica y de Innovación en Ciudades Inteligentes*, 2021, pp. 7–10.
- [43] N. Abekiri, A. Rachdy, M. Ajaamoum, B. Nassiri, L. Elmahni, and Y. Oubail, "Platform for hands-on remote labs based on the ESP32 and NOD-red," *Sci. African*, vol. 19, p. e01502, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.SCIAF.2022.E01502.
- [44] K. Mukhtar, K. Javed, M. Arooj, and A. Sethi, "Advantages, Limitations and Recommendations for online learning during COVID-19 pandemic era," *Pakistan J. Med. Sci.*, vol. 36, May 2020, doi: 10.12669/pjms.36.COVID19-S4.2785.
- [45] M. Kalúz, L. Čirka, R. Valo, and M. Fikar, "ArPi Lab: A Low-cost Remote Laboratory for Control Education," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 47, no. 3, pp. 9057–9062, Jan. 2014, doi: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.00963.
- [46] M. Ishibashi, H. Fukumoto, T. Furukawa, H. Itoh, and M. Ohchi, "Development of a web-based remote experiment system for electrical machinery learners," *2014 Int. Power Electron. Conf. IPEC-Hiroshima - ECCE Asia 2014*, pp. 724–729, 2014, doi: 10.1109/IPEC.2014.6869668.
- [47] A. Beghi, A. Cervato, and M. Rampazzo, "A Remote Refrigeration Laboratory for Control Engineering Education," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 29, pp. 25–30, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.11.208.
- [48] D. Dobriborsci, D. Bazylev, and A. Margun, "Teaching students the basics of control theory using NI ELVIS ii," *Smart Innov. Syst. Technol.*, vol. 75, pp. 420–427, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-59451-4_42.
- [49] P. Bisták, "Remote Control Laboratory for Three-Tank Hydraulic System Using Matlab, Websockets and JavaScript," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 17240–17245, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1766.
- [50] R. Pastor *et al.*, "Renewable energy remote online laboratories in Jordan universities: Tools for training students in Jordan," *Renew. Energy*, vol. 149, pp. 749–759, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.12.100.
- [51] L. Guo, M. Vengalil, N. M. M. Abdul, and K. Wang, "Design and implementation of virtual laboratory for a microgrid with renewable energy sources," *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 30, no. 2, pp. 349–361, 2022, doi: 10.1002/cae.22459.
- [52] D. Pang, S. Cui, and G. Yang, "Remote Laboratory as an Educational Tool in Robotics Experimental Course," *Int. J. Emerg. Technol. Learn.*, vol. 17, no. 21, pp. 230–245, 2022, doi: 10.3991/ijet.v17i21.33791.
- [53] J. Álvarez Ariza and C. Nomesqui Galvis, "RaspyControl Lab: A fully open-source

- and real-time remote laboratory for education in automatic control systems using Raspberry Pi and Python,” *HardwareX*, vol. 13, no. January, 2023, doi: 10.1016/j.ohx.2023.e00396.
- [54] M. G. Ballatore, V. Razza, D. Regruto, I. Stievano, and A. Tabacco, “The Educational Benefit of a Remote Automatic Control Laboratory. A Win-Win Collaboration between Asia and Europe,” *Educ. Knowl. Soc.*, vol. 23, p. e28495, 2022, doi: 10.14201/eks.28495.
- [55] D. Goncalves, E. Besada, and J. A. L., “Un laboratorio remoto de código abierto y bajo coste para el brazo robótico educativo Dobot Magician,” *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 20, pp. 124–136, 2023.
- [56] T. O’Mahony, M. Hill, and A. Duffy, “Undergraduate Engineering Laboratories: A Study Exploring Laboratory Objectives and Student Experiences at an Irish University BT - 3rd International Conference on Science and Technology Education 2022,” 2023, pp. 69–81.
- [57] A. Caballero, “Information Security Essentials for Information Technology Managers: Protecting Mission-Critical Systems,” *Comput. Inf. Secur. Handb.*, pp. 393–419, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-803843-7.00024-7.
- [58] R. S. Kookana, P. Drechsel, P. Jamwal, and J. Vanderzalm, “Urbanisation and emerging economies: Issues and potential solutions for water and food security,” *Sci. Total Environ.*, vol. 732, p. 139057, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.139057.
- [59] H. Ritchie and M. Roser, “Urbanization,” *Our World Data*, 2018.
- [60] B. Pandya, A. El-Kharouf, V. Venkataraman, and R. Steinberger-Wilckens, “Comparative study of solid oxide fuel cell coupled absorption refrigeration system for green and sustainable refrigerated transportation,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 179, p. 115597, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.115597.
- [61] MITECO, “Gases de efecto invernadero. Serie 1990-2019. Informe resumen 2021:7–7,” 2023.
- [62] P. Di Trolio, P. Di Giorgio, M. Genovese, E. Frasci, and M. Minutillo, “A hybrid power-unit based on a passive fuel cell/battery system for lightweight vehicles,” *Appl. Energy*, vol. 279, p. 115734, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.115734.
- [63] Z. Yang, J. E. Tate, E. Morganti, and S. P. Shepherd, “Real-world CO₂ and NO_x emissions from refrigerated vans,” *Sci. Total Environ.*, vol. 763, p. 142974, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.142974.
- [64] Comisión Europea, “Reglamento 631/2019 del Parlamento Europeo y del Consejo de 17 de abril de 2019.,” *D. Of. la Unión Eur.*, vol. 2019, no. 25.4.2019, pp. 671–854, 2019, [Online]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2019-80663>.
- [65] S. A. Tassou, G. De-Lille, and Y. T. Ge, “Food transport refrigeration – Approaches

- to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 8–9, pp. 1467–1477, Jun. 2009, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2008.06.027.
- [66] R. Garde, F. Jiménez, T. Larriba, G. García, M. Aguado, and M. Martínez, “Development of a Fuel Cell-Based System for Refrigerated Transport,” *Energy Procedia*, vol. 29, pp. 201–207, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2012.09.025.
- [67] M. Mac Kinnon, G. Razeghi, and S. Samuelsen, “The role of fuel cells in port microgrids to support sustainable goods movement,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 147, p. 111226, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111226.
- [68] A. Meneghetti, F. Dal Magro, and A. Romagnoli, “Renewable energy penetration in food delivery: Coupling photovoltaics with transport refrigerated units,” *Energy*, vol. 232, p. 120994, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.120994.
- [69] European Commission, “Regulation of the European Parliament and the Council - amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO2 emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles in line with the Union’s increased climate a,” *Eur. Comm.*, vol. 0197, pp. 1–34, 2021, [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:870b365e-eecc-11eb-a71c-01aa75ed71a1.0001.01/DOC_1&format=PDF.
- [70] DGT, “Anuario Estadístico General,” 2020.
- [71] C. EUROPEA, “Assessment of the final national energy and climate plan of Spain,” pp. 1–25, 2020.
- [72] W. Zhuang *et al.*, “A survey of powertrain configuration studies on hybrid electric vehicles,” *Appl. Energy*, vol. 262, p. 114553, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.114553.
- [73] Z. B. A. Mat, Madya, Y. B. Kar, S. H. B. A. Hassan, and N. A. B. Talik, “Proton exchange membrane (PEM) and solid oxide (SOFC) fuel cell based vehicles-a review,” in *2017 2nd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*, 2017, pp. 123–126, doi: 10.1109/ICITE.2017.8056893.
- [74] V. Venkataraman, A. W. Pacek, and R. Steinberger-Wilckens, “Coupling of a Solid Oxide Fuel Cell Auxiliary Power Unit with a Vapour Absorption Refrigeration System for Refrigerated Truck Application,” *Fuel Cells*, vol. 16, no. 3, pp. 273–293, 2016, doi: 10.1002/fuce.201500124.
- [75] B. Yang *et al.*, “Comprehensive summary of solid oxide fuel cell control: a state-of-the-art review,” *Prot. Control Mod. Power Syst.*, vol. 7, no. 1, p. 36, 2022, doi: 10.1186/s41601-022-00251-0.
- [76] V. Malik, S. Srivastava, M. K. Bhatnagar, and M. Vishnoi, “Comparative study and analysis between Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) and Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell – A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 47, pp. 2270–2275, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.04.203.
- [77] A. de las Heras, F. J. Vivas, F. Segura, and J. M. Andújar, “How the BoP

- configuration affects the performance in an air-cooled polymer electrolyte fuel cell. Keys to design the best configuration," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 17, pp. 12841–12855, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2016.11.051.
- [78] N. Marx, D. Hissel, F. Harel, E. Pahon, B. Courteille, and F. Chaillou, "On the Design of a Hybrid Fuel Cell - Battery Genset for a Refrigerated Semi-Trailer Truck," in *2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2018, pp. 1–5, doi: 10.1109/VPPC.2018.8605015.
- [79] Y. Baghzouz, R. Hurt, and R. F. Boehm, "Evaluation of a fuel cell for powering the electrical load of ICE vehicles," *2007 Int. Conf. Clean Electr. Power, ICCEP '07*, pp. 74–77, 2007, doi: 10.1109/ICCEP.2007.384189.
- [80] F. J. Vivas, A. de las Heras, F. Segura, and J. M. Andújar, "Cell voltage monitoring All-in-One. A new low cost solution to perform degradation analysis on air-cooled polymer electrolyte fuel cells," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 25, pp. 12842–12856, May 2019, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2018.12.172.
- [81] N. Marx, D. Hissel, F. Harel, and B. Courteille, "Experimental Testing of a Hydrogen Genset Used in a Refrigerated Semi-Trailer Truck Application," in *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/VPPC46532.2019.8952231.
- [82] "PNNL project with Nuvera, Plug Power for refrigerated trucks," *Fuel Cells Bull.*, vol. 2013, no. 9, p. 4, Sep. 2013, doi: 10.1016/S1464-2859(13)70311-0.
- [83] N. Marx, D. Hissel, F. Harel, E. Pahon, B. Courteille, and F. Chaillou, "On the design of a hybrid fuel cell – Battery genset for a refrigerated semi-trailer truck," *2018 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2018 - Proc.*, 2019, doi: 10.1109/VPPC.2018.08605015.
- [84] N. Marx; D. Hissel; F. Harel; B. Courteille, "Experimental testing of a hydrogen genset used in a refrigerated semi-trailer truck application," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2019, p. 5, doi: 10.1109/VPPC46532.2019.8952231.
- [85] Y. Chang, J. Zhao, S. Shahgaldi, Y. Qin, Y. Yin, and X. Li, "Modelling of mechanical microstructure changes in the catalyst layer of a polymer electrolyte membrane fuel cell," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 54, pp. 29904–29916, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2018.10.157.
- [86] A. J. Calderón, F. J. Vivas, F. Segura, and J. M. Andújar, "Integration of a Multi-Stack Fuel Cell System in Microgrids: A Solution Based on Model Predictive Control," *Energies*, vol. 13, no. 18. 2020, doi: 10.3390/en13184924.
- [87] M. N. Uddin, V. V Nageshkar, and R. Asmatulu, "Improving water-splitting efficiency of water electrolysis process via highly conductive nanomaterials at lower voltages," *Energy, Ecol. Environ.*, vol. 5, no. 2, pp. 108–117, 2020, doi: 10.1007/s40974-020-00147-5.
- [88] C. Napole, M. Derbeli, and O. Barambones, "A global integral terminal sliding mode control based on a novel reaching law for a proton exchange membrane fuel

- cell system,” *Appl. Energy*, vol. 301, p. 117473, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.117473.
- [89] J. M. Andújar, F. J. Vivas, F. Segura, and A. J. Calderón, “Integration of air-cooled multi-stack polymer electrolyte fuel cell systems into renewable microgrids,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 142, p. 108305, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.IJEPES.2022.108305.
- [90] K. Benagoune, M. Yue, S. Jemei, and N. Zerhouni, “A data-driven method for multi-step-ahead prediction and long-term prognostics of proton exchange membrane fuel cell,” *Appl. Energy*, vol. 313, p. 118835, May 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2022.118835.
- [91] M. Uno and K. Tanaka, “Pt/C catalyst degradation in proton exchange membrane fuel cells due to high-frequency potential cycling induced by switching power converters,” *J. Power Sources*, vol. 196, no. 23, pp. 9884–9889, Dec. 2011, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2011.08.030.
- [92] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, “Development of hybrid battery–supercapacitor energy storage for remote area renewable energy systems,” *Appl. Energy*, vol. 153, pp. 56–62, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.APENERGY.2014.12.008.
- [93] F. J. Vivas, A. De las Heras, F. Segura, and J. M. Andújar, “A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 126–155, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.09.014.
- [94] J. M. Enrique, E. Durán, M. Sidrach-de-Cardona, and J. M. Andújar, “Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 1, pp. 31–38, Jan. 2007, doi: 10.1016/J.SOLENER.2006.06.006.
- [95] J. M. Enrique, J. M. Andújar, and M. A. Bohórquez, “A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications,” *Sol. Energy*, vol. 84, no. 1, pp. 79–89, Jan. 2010, doi: 10.1016/J.SOLENER.2009.10.011.
- [96] S. Collong and R. Kouta, “Fault tree analysis of proton exchange membrane fuel cell system safety,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 25, pp. 8248–8260, Jul. 2015, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2015.04.101.
- [97] J. M. Andújar, F. Segura, F. Isorna, and A. J. Calderón, “Comprehensive diagnosis methodology for faults detection and identification, and performance improvement of Air-Cooled Polymer Electrolyte Fuel Cells,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 88, pp. 193–207, May 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.02.038.

ANEXOS. PUBLICACIONES

Algunos de los trabajos científicos publicados, debido a restricciones relativas a derechos de autor, han sido retirados de la tesis. En sustitución de los documentos ofrecemos la siguiente información: referencia bibliográfica, enlace al texto completo y resumen.

- Macarena, M., Francisca, S., Yolanda, C., & Manuel, A. J. (2022). Working to reduce the gender gap in STEM fields in Spain. A project based on mentoring and participation. In 2022 7th International STEM Education Conference (iSTEM-Ed). 2022 7th International STEM Education Conference (iSTEM-Ed). IEEE. <https://doi.org/10.1109/istem-ed55321.2022.9920940>

Enlace al texto completo: [10.1109/istem-ed55321.2022.9920940](https://doi.org/10.1109/istem-ed55321.2022.9920940)

Resumen:

The low presence and participation of women in Spain, in studies and professions linked to some STEM fields (Science, Technology, Engineering and Mathematics) is a trans generational reality, despite the good academic results of women in science and technology. This vocational segregation has aroused the interest of the international scientific community over the last forty years, but there is hardly any research in our country that approaches the study of gender biases in different STEM professions by young people throughout the different stages of transition to adult life.

- Martínez, M., Segura, F., Andújar, J. M., Del Zotto, L., Tabakovic, M., & O'Mahony, T. (2023). Challenges of Digital Transition in Engineering Careers: Solution Based on Standardized Renewable Source-based Remote Laboratories. In 2023 IEEE 6th Eurasian Conference on Educational Innovation (ECEI). 2023 IEEE 6th Eurasian Conference on Educational Innovation (ECEI). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ecei57668.2023.10105326>

Enlace al texto completo: [10.1109/ecei57668.2023.10105326](https://doi.org/10.1109/ecei57668.2023.10105326)

Resumen:

Nowadays, society faces two crucial challenges: digital transition and energy transition. In this sense, educative innovation plays a key role in this challenging scenario, and more particularly engineering careers, where laboratory practices are as important as theoretical classes. This article presents a standardized platform made of five remote laboratories-based training modules. Five European universities from five different

countries (Austria, Ireland, Italy, Norway, and Spain) participate in the project. Each university is responsible for developing each remote laboratory, under the guidance provided by the responsible entity (the University of Huelva, Spain). For this purpose, the University of Huelva has implemented a remote laboratory based on a supercapacitor power bank. The rest of the universities have selected other renewable sources and have replicated the information and communications technology (ICT) infrastructure. The result is a European network materialized on a homogenized platform where teachers and students can find all the resources (lecture notes and laboratory practices) to train and to be trained in renewable energy matter remotely.

ANEXO I. Resultados de investigación derivados del objetivo 1

ANEXO I.A

Certificado de Participación en las V Jornadas ScienCity 2022 de divulgación científica, tecnológica y de innovación en el ámbito de las Ciudades Inteligentes.



Dña. Macarena Martínez Luna con NIF 49109940H

Presentó la ponencia con título ***“Study on the Low Presence of Women in the STEM Field. Search for Reasons to be Able to Increase Participation”*** en las V Jornadas ScienCity celebradas en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva del 14 al 16 de noviembre de 2022.

Y para que así conste a los efectos oportunos, se expide el presente certificado de aprovechamiento.

Fdo.: D. Salvador Pérez Litrán
Director de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería

 Documento firmado electrónicamente por:
Salvador Pérez Litrán
Fecha: 22/11/2022
CSV: 17DPgRQ4CY37zCj0pASgYg==

ANEXO I.B

Standardized Remote Laboratories Based on Renewable Energy Sources for REOPEN European University Network

M. Martínez, R. García, F. Segura, J.M. Andújar

Presentado en:



Evento: V Jornadas ScienCity 2022 de divulgación científica, tecnológica y de innovación en el ámbito de las Ciudades Inteligentes.

Organizador: Departamento de Ingeniería Electrónica, Sistemas Informáticos y Automática (DIESIA) y el Departamento de Tecnologías de la Información (DTI) pertenecientes a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) de la Universidad de Huelva (UHU).

Fecha: 14 - 16 de noviembre de 2021.

Lugar: Universidad de Huelva.

Study on the Low Presence of Women in the STEM field. Search for Reasons to Be Able to Increase Participation

M. Martínez, F. Segura¹, J.M. Andújar¹, Y. Ceada¹, M. J. Martín²

¹Grupo de Investigación de Control y Robótica TEP-192

²Grupo de Investigación de Ingeniería de Fluidos Complejos TEP-185
Universidad de Huelva, Spain

Abstract- This paper presents an ALAS project (Ref. 15/3ACT/PAC2021) founded by Spanish Women Institute. With the recent increase in jobs related to the STEM field and the low presence and participation of women in studies and professions related to this field, it represents a gap when it comes to accessing the labour market, despite the good academic results of women in science and technology. Today there is hardly any research in our country that addresses the study of gender bias in different STEM professions by young people throughout the different stages of transition to adult life.

Keywords - STEM, education, surveys, participatory workshop, employment

I. INTRODUCTION

Nowadays, there is a low presence of women in the STEM field (Science, Technology, Engineering and Mathematics) both in studies and in related professions. However, the statistics show the good academic results that women obtain in science and technology. Specifically, in the 2021 report offered by the Spanish Ministry of Universities [1], in the University Entrance Exams (UEE), there was a higher percentage of women enrolled (56.5%) compared to the percentage of men enrolled (43.5%). Specifically, of all the branches of education, it is in the branch of Engineering and Architecture where 74.9% of those enrolled and 72.7% of graduates were men.

Figure 1 shows the low homogeneity that exists in the Engineering and Architecture branch.

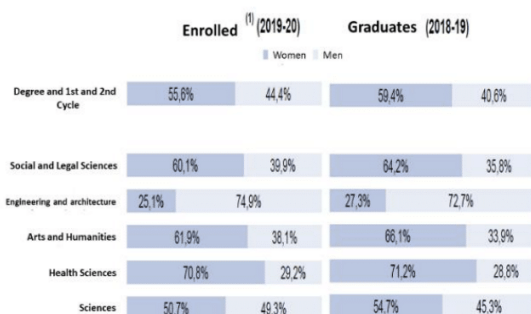


Figure 1. Distribution of the number of undergraduate and 1st and 2nd cycle students by branch of education and gender

According to RCLCO (Real State Consulting), between 2005 and 2015, STEM employment grew by nearly 25% – over five times more than non-STEM employment over the

same period, in United States (U.S). Throughout the 2020s, the U.S. Bureau of Labor Statistics (BLS) projects nearly 11% growth compared to less than 8% for all other industries. Unemployment in STEM jobs peaked at 9% in 2020 versus 16% for non-STEM jobs.

This increase in STEM professions, together with the low homogeneity of women in the Engineering and Architecture branch, can have negative consequences for professional development. Specifically, as shown in Figure 1, the percentage of women enrolled in the branch of Architecture and Engineering was 25.1%, but at the University of Huelva (UHU), this percentage can drop up to 10 points in some engineering areas. Even in some engineering areas, the enrolment percentage can reach 0%.

II. ACCOMPANYING GIRLS TOWARDS STEM CAREERS

In this context, the ALAS project (Accompanying girls towards STEM careers) is framed. This project is focused on evaluating this low homogeneity of women in the STEM field. The objectives of this project are to evaluate young people at different stages of your life, from childhood to adult life, in order to identify the factors that explain the low presence of women in the STEM environment. In order to evaluate these factors, a series of surveys have been carried out based on the following models:

1. Expectancy-Value Theory of Achievement Motivation [2].
2. Motivational Theory of Role Modelling [3].
3. Multicomponent Model of Gender Stereotypes [4].

A. Surveys

These surveys aim to try to understand the gender gap in some STEM fields. These surveys aim to know the perception that students have about people related to STEM professions, if they find both access and progression to these professions difficult. Figure 2 shows some of the questions asked in the surveys.

Model 1: Expectancy-Value Theory of Achievement Motivation

- Being good at math, science, and technology is important to me.
- Being good at math, science, and technology will help me the rest of my years in school.
- What we learn about math, science, and technology is good for my life

Model 2: Motivational Theory of Role Modelling

- Take care of mechanics
- Piloting airplanes
- Make the beds
- Caring for the sick

Model 3: Multicomponent Model of Gender Stereotypes

- Boys do better technical and mechanical tasks than girls.
- Girls are more organized and collaborate better with other people than boys.
- Girls are better at studying humanity's careers (such as: Languages, History, Teaching ...) than boys.
- Boys are better at studying science-related careers than girls. (Example: Computer Science, Electronics ...)

Figure 2. Survey's structure. Example of surveys developed at primary school. Classification by models and constructors

B. Participatory workshops

Apart from these surveys, a series of active participation workshops have been developed in educational centres. These workshops are taught by women who have studied STEM careers at the University of Huelva. These women play a mentoring role and they teach the workshops in the scientific areas of their specialty. Figure 3 shows a workshop related to hydrogen technology and Figure 4 shows a map with the places where the surveys have been distributed.



Figure 3. Participatory workshop about hydrogen technology

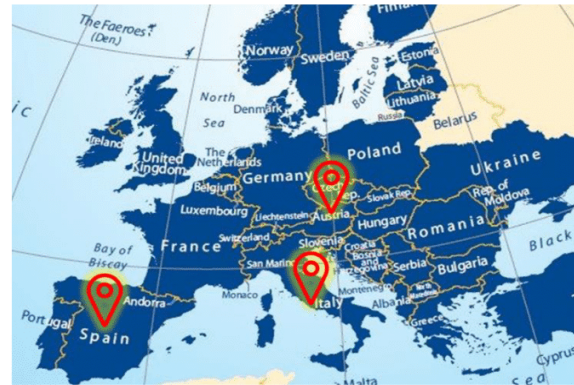


Figure 4. Places visited under ALAS project

III. RESULTS

A. Primary school

The criterion for primary school will be set for students in the last two years. The target was to get 50 surveys and 200 have been achieved. Figure 5 shows some surveys results of the educational centres of the primary schools. In these answers, it can be observed, such as “Make the bed”, “Care sick”, “Clean the house” or “To sew” women predominate and in “Engage in mechanics”, “Fly planes”, “Drive buses” or “Drive trucks” men predominate.

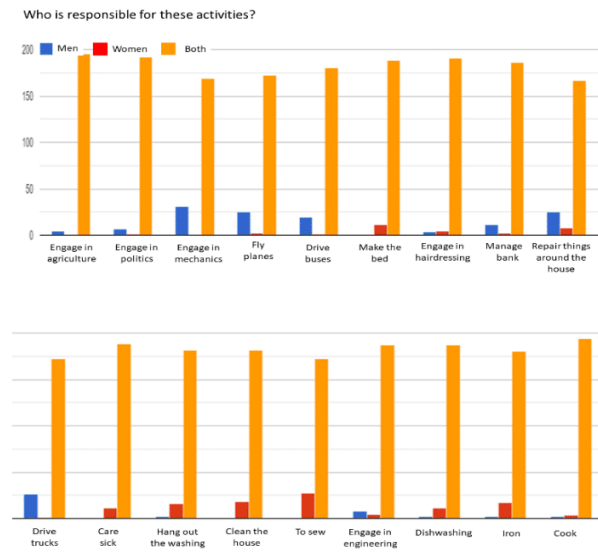


Figure 5. Answers to the questions based on the Motivational Theory of Role Modeling. Primary school

B. Secondary school

The criterion for secondary school students will be set for third and fourth grade, as it is the last phase of secondary education. The target was to get 50 surveys and 395 have been achieved. Figure 6 shows as the same case that in primary education, for the answers “Make the bed”, “Care sick”, “Clean the house” or “To sew” women predominate and in answers as “Engage in mechanics”, “Fly planes”, “Drive

buses” or “Drive trucks” men predominate.

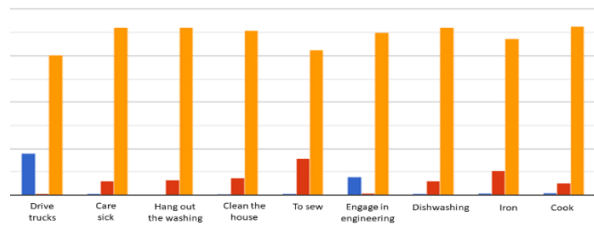
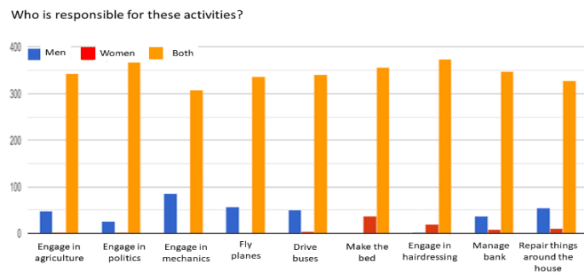


Figure 6. Answers to the questions based on the Motivational Theory of Role Modeling. Secondary school

In Figure 7 are shown four graphs very important. These graphs are important because it can be seen how in primary education centres there are no laboratories, and in secondary education centres there are laboratories but the students do not go them.

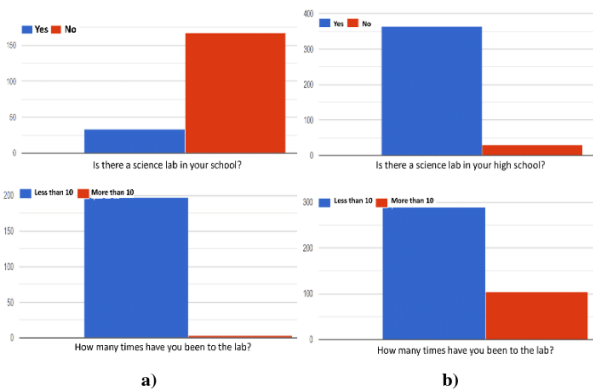


Figure 7. Graphs that address the attendance of students to the laboratories of their educational centers. a) Primary school; b) Secondary school

Figure 8 shows the answers to some questions asked of primary and secondary teachers. The target was to get 5 surveys and 23 have been achieved. The highlight of Figure 8 is that there is a lot of equality in the response to the question "Female students are more organized and collaborate better with other people than male students".

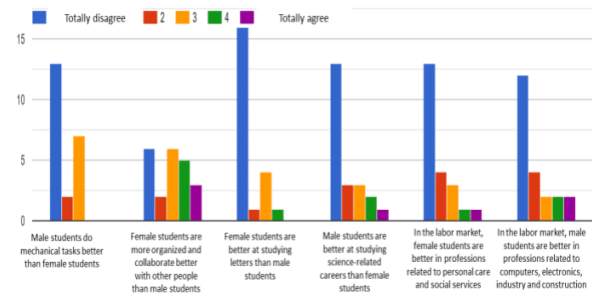


Figure 8. Answers of primary and secondary teachers to questions based on Application of the Multicomponent Model of Gender Stereotypes

C. University

The target was to get 30 surveys and 112 have been achieved. As shows in Figure 5 and Figure 6, in the primary and secondary education surveys there were some answers in which women predominated. Also, in Figure 9, shows as in the surveys of university, the answer more predominance is "Both", although in the "To sew" answer continue to predominate women and in the "Engage in mechanics" answer, men continue to predominate.

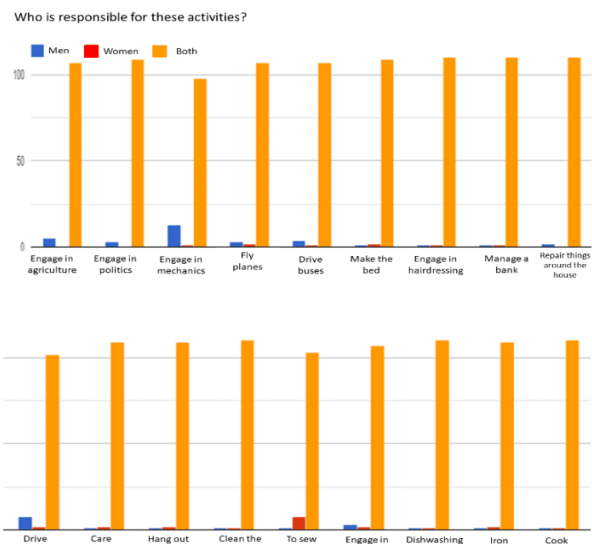


Figure 9. Answers to the questions based on the Motivational Theory of Role Modeling. University

Figure 10 shows the answers to some questions asked of university teachers. The target was to get 5 surveys and 25 have been achieved. In the answers to these surveys, the teachers agree more that "Female students are more organized and collaborate better with other people than male students".

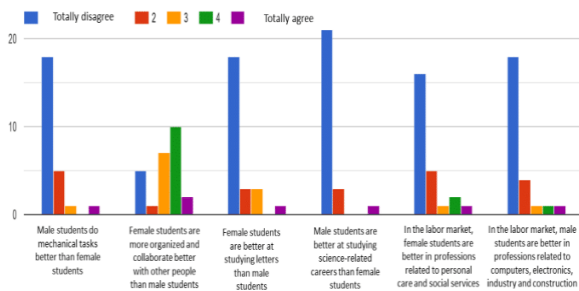


Figure 10. Teacher's answers to questions based on Application of the Multicomponent Model of Gender Stereotypes

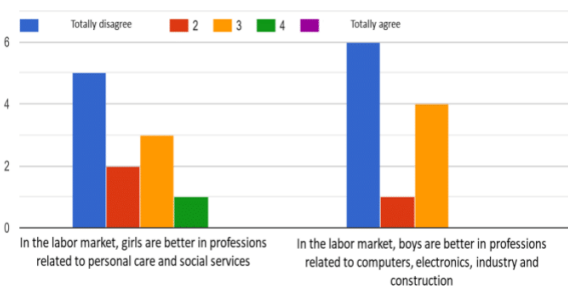


Figure 12. Answers to the questions based on the Multicomponent Model of Gender Stereotypes. Enterprise / Industry

D. Postgraduate

The target was to get 5 surveys and 27 have been achieved. Figure 11 shows that there is a predominance of men in "Engage in mechanics", "Fly planes", "Drive buses", "Drive trucks" or "Engage in engineering", and a predominance of women in "Make the bed", "Care sick", "Clean the house", "To sew", "Iron" or "Cook".

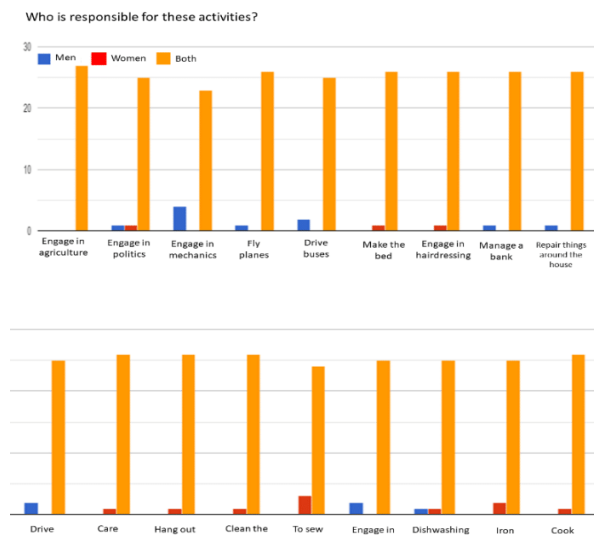


Figure 11. Answers to the questions based on the Motivational Theory of Role Modeling. Postgraduate

E. Enterprise / Industry

The target was to get 5 surveys and 12 have been achieved, 6 women and 6 men. The answer to the question "In the labour market, girls are better in professions related to personal care and social services" are more equitable.

IV. CONCLUSIONS

With the surveys carried out to date, it has been observed that there is not much difference in the responses according to gender. This means that the gap would not be due to a belief in the inferiority of women.

However, it has been found that in primary education schools do not have science laboratories and it has been found that in secondary education they have science laboratories but do not use them. This means that the students, in all the years prior to entering the university, they have never had contact with anything technological or related to engineering, which makes it difficult to choose this one.

In the answers "To sew", "Iron", "Cook", "Care sick" or "Clean the house" predominate in all the answers "Both", but there are many answers of predominance of "Women". As in the same case, in the questions "Engage in mechanics", "Drive trucks", "Drive buses" or "Fly planes" predominate in all the answers "Both", but there are many answers of predominance of "Men". These responses may be due to education or ideology.

LIST OF ACRONYMS

- ALAS: Accompanying girls towArds STEM careers
- BLS: Bureau of Labor Statistics
- RCLCO: Real State Consulting
- STEM: Science, Technology, Engineering and Mathematics
- UEE: University Entrance Exams
- UHU: University of Huelva
- U.S: United States

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been supported by project Ref:15/3ACT/21 ALAS: Accompanying Girls Towards Stem Careers, founded by Spanish Ministry of Equity.

REFERENCES

- [1] M. de U. Gobierno de España, "Datos y Cifras," *Datos y cifras*, pp. 1-7, 2021, [Online]. Available: <https://cpage.mpr.gob.es/>.
- [2] J. S. Eccles and A. Wigfield, "MOTIVATIONAL BELIEFS , VALUES , AND GOALS," 2002.
- [3] A. H. Eagly and W. Wood, "Social role theory," *Handb. Theor. Soc. Psychol.*, no. March, pp. 458-476, 2012, doi: 10.4135/9781446249222.n49.
- [4] M. Sáinz, J. Meneses, B. S. López, and S. Fàbregues, "Gender Stereotypes and Attitudes Towards Information and Communication Technology Professionals in a Sample of Spanish Secondary Students," *Sex Roles*, vol. 74, no. 3-4, pp. 154-168, 2016, doi: 10.1007/s11199-014-0424-2.

ANEXO I.C

Certificado de Participación en el 7th International STEM Education Conference (iSTEM-Ed2022)



Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
and
The Electrical Engineering Academic Association (Thailand)

Present this certificate to

Macarena Martínez, Yolanda Segura, Francisca Segura, José Manuel Andújar

Working to reduce the gender gap in STEM fields in Spain. A project based on mentoring and participation

in recognition of successful presentation and research contributions to
The 7th International STEM Education Conference (iSTEM-Ed 2022)
Sukhothai, Thailand,
July 6-8, 2022.

 Asst. Prof. Dr. Rungaroon Porncharoen Dean of Faculty of Industrial Education Rajamangala University of Technology Phra Nakhon	 Dr. Natworapol Rachsinwathcharabul President Rajamangala University of Technology Phra Nakhon	 Assoc. Prof. Dr. Athikom Roeksabutr President Electrical Engineering Academic Association (Thailand)
---	--	--

ANEXO I.D

Working to reduce the gender gap in STEM fields in Spain. A project based on mentoring and participation

M. Martínez, F. Segura, Y. Ceada, J.M. Andújar

Presentado en:



Evento: 7th International STEM Education Conference (iSTEM-Ed2022).

Organizador: EEAAT (Electrical Engineering Academic Association Thailand) y la Rajamangala University of Technology Phra Nakhon.

Fecha: 6 – 8 de julio de 2022.

Lugar: Sukhothai, Tailandia.

ANEXO I.E

Certificado de Participación en el IEEE 6th Eurasian Conference on Educational Innovation (IEEE ECEI2023)

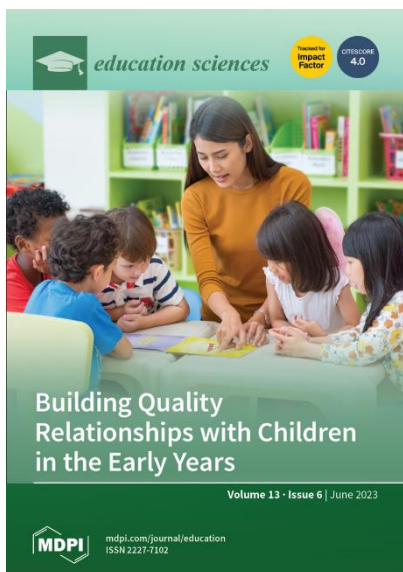


ANEXO I.F

The Gender Gap in STEM Careers: An Inter-Regional and Transgenerational Experimental Study to Identify the Low Presence of Women

M. Martínez, F. Segura, J.M. Andújar, Y. Ceada

Publicado en:



Revista: Education Sciences

Editorial: MDPI

Editor Jefe: Prof. Dr. James Albright

Referencia: Volumen 13, Edición 7

Año: 2023

DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci13070649>

Categoría	Ranking de revistas / Total de revistas	Cuartil
Education & Educational Research	115 / 742	Q1
JCR (2022)	3.0	
CiteScore (2022)	4.0	
Lecturas	248	

Article

The Gender Gap in STEM Careers: An Inter-Regional and Transgenerational Experimental Study to Identify the Low Presence of Women

Macarena Martínez ^{*}, Francisca Segura , José Manuel Andújar  and Yolanda Ceada 

Research Centre CITES, University of Huelva, 21007 Huelva, Spain

* Correspondence: macarena.martinez@diesia.uhu.es; Tel.: +34-959-21-73-80

Abstract: Currently, the number of job offers in STEM careers (Science, Technology, Engineering and Mathematics) is growing up, but by contrast, the number of graduates in these fields is decreasing, particularly women graduates. Consequently, if we do not promote the training of women in STEM careers, the gender gap, far from narrowing, will continue to widen. This paper presents the research carried out in the ALAS project (Accompanying girLs towArds STEM careers), which consists of an experimental analysis based on a multi-model study to discover the possible causes of this low participation of women in STEM fields. The models used are the (1) expectancy–value theory of motivation, (2) social role theory, and (3) gender stereotypes theory. Additionally, participatory workshops have been carried out, with the aim of capturing the students’ reactions when they are introduced to STEM practices. The surveyed target groups range from primary education groups up to university graduates and enterprise employees, including both students and teachers. The obtained results show that there are still social patterns that make young people differentiate certain types of activities based on gender, especially at secondary school age. Nevertheless, the findings reveal that beyond the three studied models, a key factor in young people’s decision to be enrolled in STEM careers is their educational environment.



Citation: Martínez, M.; Segura, F.; Andújar, J.M.; Ceada, Y. The Gender Gap in STEM Careers: An Inter-Regional and Transgenerational Experimental Study to Identify the Low Presence of Women. *Educ. Sci.* **2023**, *13*, 649. <https://doi.org/10.3390/educsci13070649>

Academic Editors: Eila Jeronen and Kelum Gamage

Received: 16 March 2023

Revised: 19 May 2023

Accepted: 21 June 2023

Published: 26 June 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: STEM careers; gender gap; expectancy–value theory of motivation; social role theory; experimental study; gender stereotypes theory; participatory workshop; employment; European education

1. Introduction

In the search for an education system adapted to the new digital age, the European Union (EU) has implemented the Digital Education Action Plan (2021–2027). This plan aims to enrich the quality and inclusiveness of Member States’ (MS) education and training systems, while adapting to the digital age and advancing the process of the digital and ecological transition [1]. Additionally, the European Education Area (EEA) for 2025 aims to remove barriers to learning and improve access to quality education for all [2,3].

In this context, according to data collected by Eurostat and shown in Figures 1 and 2, in 2020, 57.30% of tertiary education graduates (post-secondary education) in the EU were women, while in Spain, the graduates of tertiary education were 57.14% women. This percentage remained stable over a six-year period for both Spain and the EU. In all fields of education, the percentage of female graduates was higher than male graduates in the period from 2014 to 2020 (according to the most recent published data series), except for the fields of Information and Communication Technology, and Engineering, Industry and Construction. The fields of Information and Communication Technology; Engineering, Industry and Construction; and Natural Sciences, Mathematics and Statistics are part of the Science, Technology, Engineering and Mathematics (STEM) disciplines. It is possible to see that in 2014, less than a quarter (17.93%) of graduates in the field of Information and Communication Technology in Europe were female, and this percentage has slightly

increased up 20.79% as of 2020. In Spain, the percentage started at 14.63%, and far from increasing or keeping constant, it has decreased to 12.6%.

Proportion of female graduates of tertiary education in the EU, classified by discipline

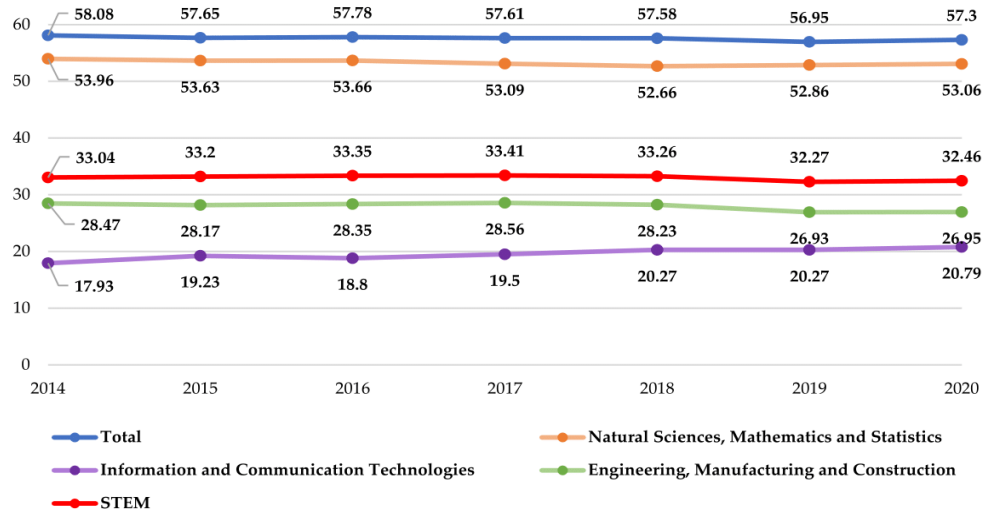


Figure 1. Proportion of female graduates of tertiary education in the EU, classified by discipline. Source: Eurostat (STEM = Average [Information and Communication Technology; Natural Sciences, Mathematics and Statistics; Engineering, Manufacturing and Construction]).

Proportion of female graduates of tertiary education in Spain, classified by discipline

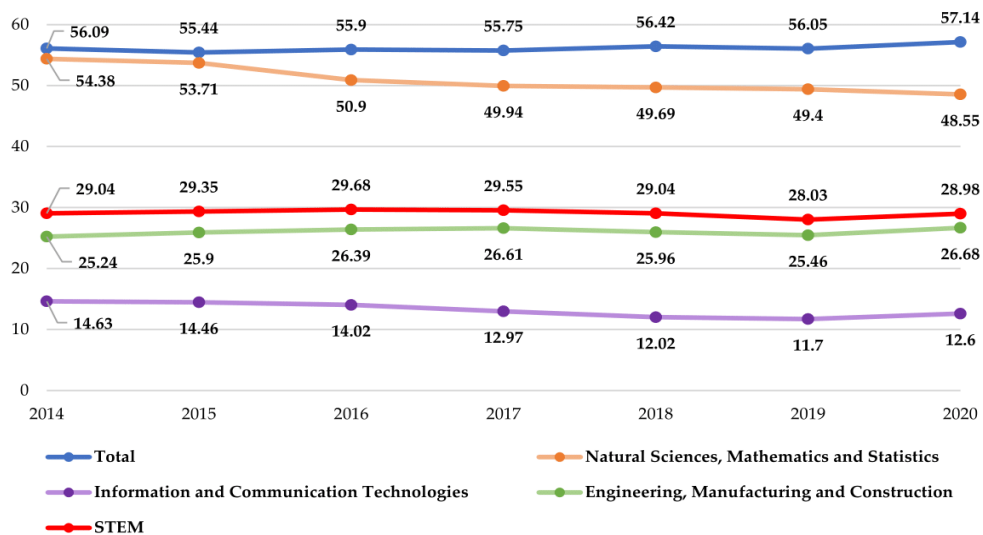


Figure 2. Proportion of female graduates of tertiary education in Spain, classified by discipline. Source: Eurostat.

As we can observe from the collected data series, the low presence and participation of women in STEM careers is a transgenerational reality [4,5]. According to the data provided by the Spanish Ministry of Universities in its report for 2022 [6], 56.9% of Spanish students who presented to university entrance exams (in Spanish, referred to as PAU; Prove Access University) in 2020 were women. Of this percentage, 89.8% of women passed the tests. These percentages are slightly lower in the case of men, where 43.1% of students who presented to the PAUs were male, and 88.9% passed the tests. This gender balance is maintained in terms of enrolment; of the 1,340,632 students enrolled in university degrees, 56% are women. However, when these same data are analysed in the Engineering and Architecture branch, from all the students enrolled at university, only 233,365 (17.40%) are enrolled in Engineering and Architecture degrees. Of these 233,365 enrolments, only 59,974 (25.7%) are female enrolments. These data mean that from the total number of new enrolments in university degrees, only 4.47% are women enrolled in Engineering and Architecture.

Taking the University of Huelva (UHU) as an example, the number of new students in recent years in degrees with a greater affinity to the area of technology has been analysed (BEng Industrial and Electronic engineering, BEng Industrial and Mechanical engineering, and BEng Computer Science). As shown in Figure 3, in the BEng in Industrial and Electronic Engineering (green for men and blue for woman), the percentage of women enrolled (blue) in the degree shows an inverted “W” effect. The percentage of women enrolled is always below 15%. In the case of the BEng in Computer Science (orange and red), the evolution of female enrolment with respect to male enrolment is stagnant, without exceeding 9% (red). The 2013/2014 academic year started with a 16.2% enrolment rate, but in the 2022/2023 academic year, only 8.2% of students were women. The situation is more serious in the BEng in Industrial and Mechanical engineering (ochre and pink), which in the 2013/2014 academic year started with 9.1% of students being women (pink), while in the current 2022/2023 academic year, only 4.9% of students enrolled are women.

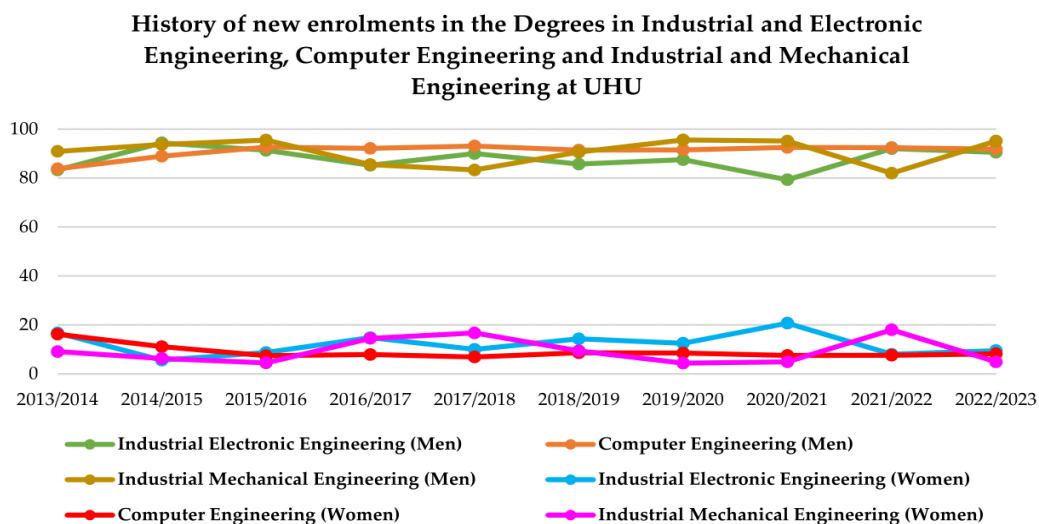


Figure 3. History of new enrolments. BEng in Industrial and Electronic engineering, Computer Science and Industrial and Mechanical engineering. UHU. Source: <https://www.uhu.es/unidad-idad/informes-y-datos/perfil-del-alumnado-de-nuevo-ingreso> (accessed on 12 March 2023).

However, on the other hand, STEM-related job offers have seen a 12% growth in the last decade. The demand for STEM professionals is growing at a higher rate than in other sectors [7]. According to the European Center for the Development of Professional Vocation (CEDEFOP), this growth will be 8% by 2025, compared to the average growth of

3% projected for all occupations [8]. Over the next decade, the increase in STEM-related occupations is expected to rise to 10.8% [9]. STEM-related professions are in the top 20 in the EU, as shown in Table 1. However, companies find it difficult to engage and hire qualified personnel in these areas. Nowadays, people who aspire to job offers are required to have both hard (technical knowledge) and soft (knowledge linked to leadership and social relations) skills. This demand is not covered in many cases, due to a lack of applicants for these professions who have the necessary skills to be able to develop professionally in an increasingly competitive environment [10–13].

In this sense, the 59% of participants in the study carried out in [14] point to three main reasons that explain these difficulties:

- There is a graduate shortage due to negative perceptions of STEM professions;
- Major technological advances mean that degrees have to adapt to these changes;
- There is a common perception that most STEM professions are not gender-neutral.

Table 1. STEM occupations among the top 20 bottleneck vacancies at European level.

Vacancies at ISCO 4-Digit Level		Vacancies at ISCO 2-Digit Level	
Rank	Specific Occupation	Rank	Specific Occupation
7	Mechanical engineers	2	Science and engineering professionals
8	Software developers	3	Information and communications technology professionals
12	Electrical engineers	7	Science and engineering associate professionals
14	Civil engineers	14	Electrical and electronic trade workers

In conclusion, the low percentage of women graduates in STEM-related fields combined with the increase in job vacancies that will occur in these professions in the coming years will not contribute to reducing the gender gap in these professions; on the contrary, this gap may widen.

Trying to reverse this situation, the European Union is taking measures to engage women in the STEM field. In 2015, the United Nations General Assembly (UNGA) declared 11 February as the International Day of Women and Girls in Science, as part of the effort to achieve full and equal participation of women and girls in science. There are also other resources such as the European Platform of Women Scientists (EPWS) [15], wherein more than 100 networks of women scientists and organisations from all over Europe promote equal opportunities in research fields across all scientific disciplines. GENERA (the Gender Equality Network in the European Research Area) is a Horizon 2020 project aiming to continue, monitor and improve the gender equality plans of research institutions and organisations.

Based on the scientific literature, the following works, which are focused on analysing the gender gap in STEM careers, deserve special attention. The study by McDaniel [16] examines how gender equality culture influences adolescents' choice of career when they begin to plan their future. The study was conducted on a group of 15-year-olds from 24 different countries. The author recognised that it is unknown how gender stratification or cultural ideologies impact the development of boys' and girls' STEM career expectations.

More recently, new scientific works also related to the STEM gender gap concern have been brought up for discussion. The proposal made by Garcia-Holgado et al. [17] analyses a number of Latin American and European universities in order to define gender equality action plans to enrol, retain and orient women in STEM programmes. Dulce-Salcedo et al. [18] conducted a study to test whether the presence of female STEM teachers in secondary education positively influences the enrolment of more women in STEM in tertiary education.

Apart from the cultural factor mentioned in [16,17], and the expectative factor studied in [18], Jiang observes in [19] that men's ability-sorting behaviour is statistically stronger

than women's when choosing a degree. The author defends that gender differences in ability and ability sorting explain a portion of the gender gap in STEM careers. These gender stereotypes were also investigated by Kumar et al. [20] with children aged 4–6 years. The authors assessed the perceptions of children when they viewed one of four groups of scientists: all-male, all-female, a lone female among all males, or a lone male among all females.

Finally, the gender gap was monitored from adolescence to adult age by Gawel and Krstić in [21]. This study quantifies the impact of the gender gap at different levels of education (youth, higher education, adult learning and STEM education) in EU countries. The authors observed that in countries with a relatively lower level of female entrepreneurship and education outcomes, the gender gap in entrepreneurship is affected most significantly by gender gaps in early leavers, higher education and STEM education.

Based on all of the above, the starting hypothesis of this work is that the gender gap in STEM careers cannot be explained by one single psychological model, and that the reasons for the low presence of women in STEM careers are not only psychological or cultural, but also due to the educational environment.

The objective of this paper is to analyse the possible causes and effects of the low presence of women in STEM-related fields. To carry out the study, an evaluation of young people in five different stages of their lives, from childhood to adult life, is carried out. For this purpose, a multi-model study is applied, based on the (1) expectancy–value theory of motivation, (2) social role theory, and (3) gender stereotypes theory, to examine the reasons for the low presence of women in STEM-related careers in the EU.

Additionally, the study includes visits to educational centres wherein different participatory workshops are carried out with students from both primary and secondary schools. Table 2 shows the main contribution of authors' proposal, taking into account the aforementioned related works. Table 2 is divided into five items, where the first item is "Scope" and serves to evaluate where the study has been conducted (nationally, internationally or both). The second item, "Target group" refers to the group on which the research is conducted in order to evaluate the gender gap in the STEM field, such as students, graduates, teachers and entrepreneurs. The third item, "academic year" is oriented to students in order to classify them by age. The fourth item, "Survey analysis tool" is used to evaluate the questionnaires/tools used to determine the possible causes of the gender gap. Finally, the last item, "Activities" refers to whether any type of participatory workshop is carried out in the study to bring STEM activities closer to the surveyed target groups.

The novelty of the authors' proposal is constituted as follows.

1. Interregional and international scope: the study is carried out in different regions of Spain (Huelva, Cadiz, and Badajoz), and in three European countries (Italy, Austria and the Czech Republic).
2. Target groups: the sample analysed is made up of young people at five different moments of the life cycle, all linked to the transition to adult life (primary education, secondary education, higher education and the early stages of their entry into the labour market), with the aim of identifying the reasons for the low presence of women in STEM environments.
3. Academic year: the study includes the entire education system, from primary education to university education.
4. Survey analysis tool: the surveys are based on a multi-model theoretical foundation applying three theories: the expectancy–value theory of motivation, the social role theory and the gender stereotypes theory.
5. Activities: participatory workshops led by women specialists in STEM fields. These workshops are given in primary and secondary education settings, and the workshops are adapted to the educational level at which they are given.

Table 2. Authors’ contribution regarding scientific related works.

Reference	Scope	Target Group ⁽¹⁾	Academic Year	Survey Analysis Tool	Activities
Authors’ proposal	National and international (Spain and the Czech Republic)	Primary education (Students and teachers)	Third and fourth year		Renewable Energies, Industrial Electronics and Chemical Engineering participatory workshops
	National and international (Spain and Italy)	Secondary education (Students and teachers)	Fifth and sixth year	Model 1: Expectancy–Value Theory of Motivation Model 2: Social Role Theory Model 3: Gender Stereotypes Theory	Renewable Energies, Industrial Electronics and Chemical Engineering participatory workshops
	National and international (Spain, Italy, Austria and the Czech Republic)	University (Students and professors)	All		-
	National (Spain)	University graduates	All		-
	National (Spain)	Enterprise/industry professionals	All		-
[16]	International	Secondary education	15 and 16 years old	International Standard Classification of Occupation (ISCO) World Bank and European Values Survey (EVS) Item Response Theory	-
[17]	National and International	University	All	UNESCO SAGA Toolkit	-
[18]	National (Bogotá)	Secondary education	All	-	-
[19]	National (University of Purdue)	University graduates	All	First Destination Survey American Community Survey National Survey of College Graduates	-
[20]	National	Preschool	4–6 years old	Attribution theory	-
[21]	International (European countries)	Youth, higher education, adult learning and STEM education	15–30 years old	European Union Labor Force Survey (EU-LFS)	-

(1) Target group: sample of the population on which the study is conducted, divided into students (primary education, secondary education and university), teachers/professors and enterprise/industry professionals.

2. Materials and Methods

2.1. ALAS Approach: Foundation and Methodology

In order to find an explanation for the low participation of women in STEM-related studies, ALAS research (Accompanying girLs towArds STEM careers) developed a study to analyse the possible causes and effects. To carry out the study, an evaluation of people in five different stages of their lives, from childhood to adult life (primary education, secondary education, university students, university graduates and enterprise/industry professionals), is carried out, as shown in Figure 4.

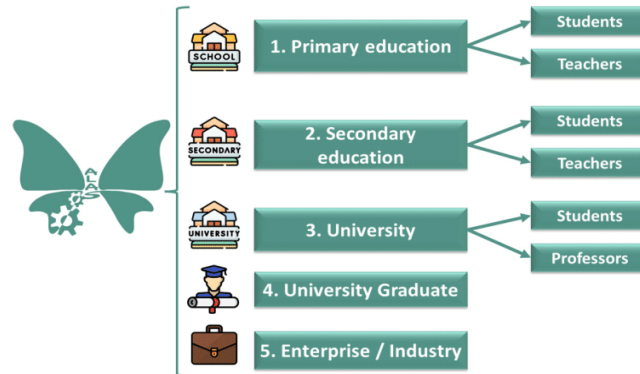


Figure 4. ALAS research. Five different stages from childhood to adult life.

The research group has extended the study outside Spain to identify whether the gender gap in STEM careers is a national or international problem, and, secondly, whether the causes of this gender gap are similar across countries. The study has been carried out in different regions of Spain (Huelva, Cádiz, and Badajoz), and three EU countries: Italy (Rome), the Czech Republic (Prague) and Austria (Vienna). Figure 5 shows a map of the educational centres visited.



Figure 5. ALAS geography. Sites visited during the project execution.

2.1.1. Methodology and Surveys

In order to carry out the study on the five different life stages mentioned above, a series of surveys based on the theoretical models, shown in Figure 6, were distributed. The surveys are anonymous; only gender, age and educational centre information was received. As Figure 6 shows, the surveys are based on a multi-model theoretical foundation in order to identify causes, make decisions and alleviate the current very low participation of women in STEM careers. The multi-model study involves

Model 1: Expectancy and Value Theory of Motivation

- Motives (MO): STEM subjects are fun; I understand STEM subjects; I get good grades in STEM subjects.
- Expectations (EX): If I work hard in STEM subjects, I will learn and get good grades; I can study hard enough to pass the next STEM subject exam.
- Incentive value (IV): Being good at STEM means a lot to me; Being good at STEM will help me in the rest of my studies; What we learn about STEM is beneficial to my life; The knowledge I have of STEM will help me in my future work.

Model 2: Social Role Theory

- Who is responsible for
 - Flying planes?
 - Engaging in engineering?
 - Caring for the sick?
 - Sewing?
 - etc.

Model 3: Gender Stereotypes Theory

- Stereotypes about competences and capabilities (SCC): Men are more qualified than women to carry out technical and mechanical tasks; Women are better able to carry out organizational and cooperative tasks, etc.
- Stereotypes about social responsibility (SSR): Men are responsible for supporting their families financially; Women should take care of the house and their children.

Educational Environment

- Do you use inclusive language while teaching?
- Is there a STEM lab in your primary school?; Is there a STEM lab in your secondary school?
- How many practices have you carried out in the lab?; How many times have you gone with your students to the laboratory since you started working in this educational centre?
- Do you think this can have any (positive or negative) consequences for society?
- What motivated you to choose the university degree you studied?

Figure 6. ALAS methodology: the multi-model basis used in the research.

- The expectancy–value theory of motivation [22–26]: this model has been used to explain the vocational segregation of women and their under-representation in technology-related studies. The model proposes that the manifestation of a behaviour is the result of a multiplication of three components: the need for achievement (motives, MO), the probability of success (expectations, EX), and the incentive value (IV) of the task. People only enrol in studies that they believe they can succeed in because they have the skills and/or competencies to pursue them (expectations for success), and because they perceive them to have a high value (subjective task value).
- To measure these variables, in primary education, the response options were “Yes” and “No”, to ensure the subjects’ understanding and the reliability of their answers. At higher levels (secondary, university and graduates), the responses used consisted of a 5-point Likert scale, ranging from 1 (strongly disagree) to 5 (strongly agree).
- Social role theory [27–29]: this model aims to highlight the sources of prejudice towards women in leadership positions. The goal of this model is to obtain information on participants’ beliefs about the tasks and activities they consider to be the domain of men, women or both. Socially, there is an incongruence between a woman’s traditional work role and a leadership position. This means that many women do not obtain leadership positions, or do not stay in them for long. Traditionally, women have had roles attributed to them that relate to care and emotions, while men have had roles attributed to them that relate to achievement, assertiveness and power.

- Gender stereotypes theory [30–33]: this model explains that gender stereotypes have a multicomponent structure linked to personality traits, role-related behaviours and professions. This means that the closer the match between a person’s self-image and the prototypical image of someone working in a particular field, the more likely that person is to choose that profession. When applied to women, this means that they find few similarities between themselves and the prototypical image of a person working in the STEM field. The main cause of this problem is the lack of female role models in the scientific and technological fields, which does not encourage women to opt for these fields. For this purpose, the construct is made up of two components: stereotypes about competences and capabilities (SCC), and stereotypes about social responsibility (SSR).
- To measure these variables, in primary education, the response options were “Yes” and “No”, to ensure the subjects’ understanding and the reliability of their answers. At higher levels (secondary, university and graduates), the responses used consisted of a 5-point Likert scale, ranging from 1 (strongly disagree) to 5 (strongly agree).
- The educational environment [34]: To identify possible structural problems and how the educational environment influences the selection of academic curricula from primary school to university, additional questions have been included in the surveys; these questions concern the number of laboratories in a given centre, the number of laboratory practices carried out, the use of inclusive language, etc.

These theories are applied to the surveys as shown in Figure 6. Each theory is applied to one construct, and each construct is made up of a series of questions. In this sense, references [22–26] have been consulted to formulate the questions in the surveys to analyse the expectancy–value theory of motivation. The questions in the surveys related to social role theory have been obtained from [27–29], and the questions that allow us to evaluate the gender stereotypes theory were obtained from [30–33]. Finally, the authors used [34] as a basis to elaborate upon constructs related to educational environment.

2.1.2. Materials and Participatory Workshops

In addition to distributing surveys, in primary and secondary educational centres, participatory workshops have been carried out. The aim of these participatory workshops is to introduce students to STEM careers by means of technological and scientific laboratory practices. The complexity of these participatory workshops is adapted to the age of the students. According to the gender stereotypes theory explained above, stereotypes have an effect on students’ choice of a profession. For this reason, in order to engage girls in STEM, female STEM leaders were made responsible for running the workshops. The participatory workshops were driven by female students from the University of Huelva (Industrial Chemical Engineers and Industrial Electronics Engineers). Figure 7 shows the women Industrial Chemical Engineers teaching chemistry practice. In this workshop, they made slime and hydroalcoholic gel.



Figure 7. Chemical participatory workshop: (a) making slime; (b) making hydroalcoholic gel.

Figure 8 shows how the women Electronics Engineers led a hydrogen and renewable energy-based participatory workshop and another participatory workshop about an Arduino microcontroller.



Figure 8. Renewable energy-based and Industrial and Electronic participatory workshops: (a) hydrogen and renewable energies; (b) Arduino microcontroller.

2.2. Inferential Statistics, and Reliability and Consistency Tests

The information obtained was organised in four databases, one for each educational level. The analyses were carried out in SPSS-21.

Firstly, the validity of the constructs, (Model 1) the expectancy–value theory of motivation (variables: motives, MO, expectations, EX and incentive value, VI), (Model 2) social role theory (SR), and (Model 3) gender stereotypes theory (variables: stereotypes about competences and capabilities, SCC, and stereotypes about social responsibility, SSR), was verified by analysing the convergent and discriminant validity indicators of the quantitative variables. A unidimensional analysis showed that the value of the first component for all constructs was greater than 1. To measure convergent and discriminant validity, other indicators were used, such as the average variance extracted (AVE) and the square root of variance. The AVE of the constructs was above the threshold of 0.53 (except for the MO and VI constructs of primary education, which were 0.50 and 0.48, respectively), and the internal consistency criteria were met for most of the constructs. Further details of these scales, including the factor loadings for each item, Cronbach’s alpha, AVE and discriminant validity analysis, are provided in Appendix A.

Secondly, in order to obtain information about each construct according to gender and educational stage, a frequency analysis was carried out, as shown in Appendix B. The frequency tables show the number and percentage of cases of each observed value for the variables.

Thirdly, to determine the independence between the sex variable and the rest of the variables, the chi-square coefficient (χ^2) was calculated for each educational level. In this analysis, the sex variable acts as an independent variable, and the rest as dependent variables. The objective of this test is to contrast the dependency relationship by means of the significance level; if the significance value is greater than or equal to alpha (0.05), it is determined that there is no dependency. If the significance value is less, dependency is accepted. Further details of this analysis are provided in Appendix C.

3. Results

The results are classified by target group and by construct. In this way, it will be easier to identify where and when the neutrality that early ages students have towards STEM careers is blurred, and when the gap between the number of male students and the number of female students who prefer STEM careers becomes significant.

Firstly, in relation to the impact of the study, Figure 9 shows the target number (in blue) and the achieved number (in orange with labels) of participants finally enrolled in the research.

ALAS impact: target and achieved number of participants

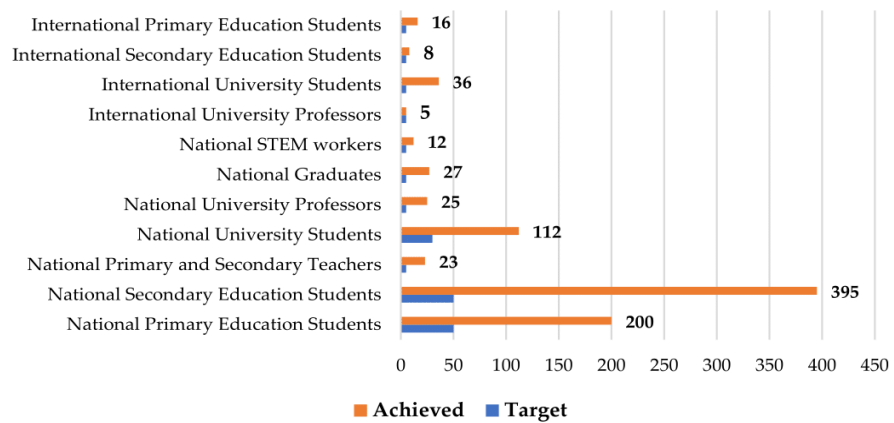


Figure 9. Quantitative impact indicator using the target groups and real scope.

Based on above, the initial objective was to achieve at least 150 participants; in the end, the research involved a total of 858 participants (472% more than expected). In all cases, the surveys were anonymous; only gender, age and educational centre statistics were received.

3.1. Primary Education Students

The results obtained in the variables MO, EX and VI, of the (Model 1) expectancy–value theory of motivation, do not show significant differences between the sexes. The percentages of girls’ and boys’ responses to the different items were similar (Figure 10). In the same way, it is highlighted that there is no dependency between these variables and the sex variable, since all the values of χ^2 were greater than 0.05 (Appendix C).

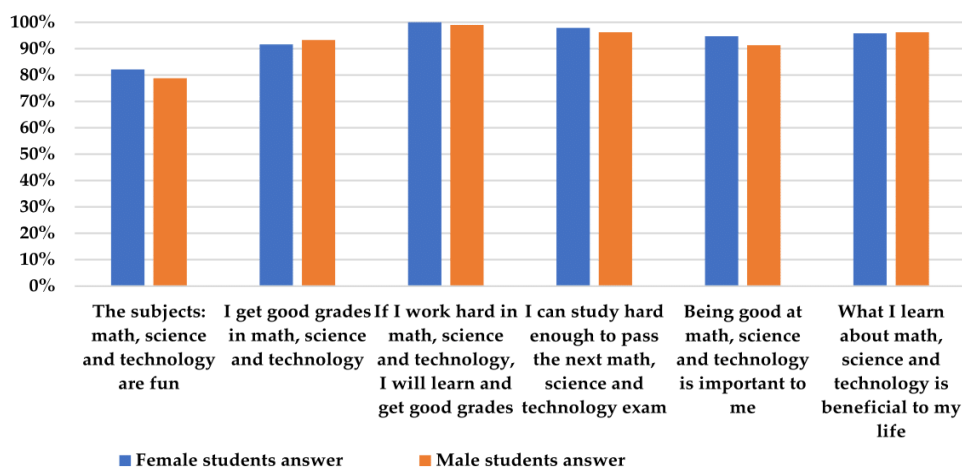


Figure 10. Primary education answers to questions based on (Model 1) the expectancy–value theory of motivation.

The results obtained in the SR variable, of (Model 2) the social role construct, do not show significant differences between the sexes. This construct asks the question “Who is responsible for these activities?”. The percentages of responses from girls and boys were similar (Figure 11). Similarly, we observed that only the item “Who should dedicate themselves to agriculture?” was dependent on the sex variable ($\chi^2 = 0.03$), since for the rest of the items, the values of χ^2 were higher than 0.05 (Appendix C). However, it should be noted that the item “Taking care of sick people” was attributed in a high percentage by students to both sexes and in a low percentage to the female sex, but no person surveyed attributed it only to men. In the same way, the items “Dedicate themselves to agriculture” and “...to mechanics” were not attributed to the female sex by anyone.

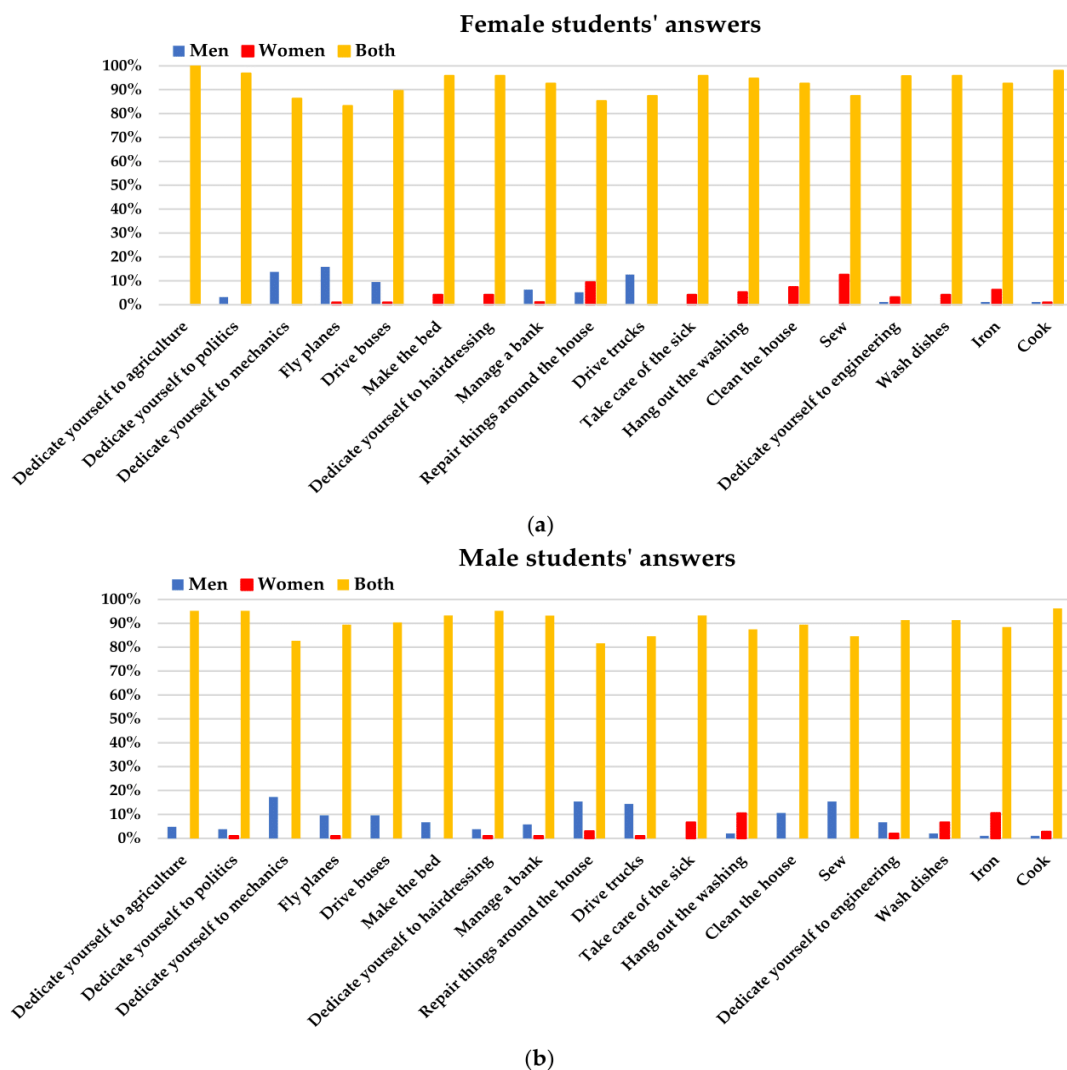


Figure 11. Primary education answers to questions based on (Model 2) the social role theory: (a) female students' answers; (b) male students' answers.

In relation to (Model 3) the gender stereotypes construct, the data show that the SCC and SSR variables vary according to sex, as shown in Figure 12. The percentages of

affirmative responses from male students show that they consider their own sex “more capable of performing technical and mechanical tasks” and the opposite sex (female) “more capable of organizational and cooperative tasks”. Regarding the question related to study specialities (STEM vs. social science), the male students responded with a higher percentage that “the performance of their classmates is better in careers related to the humanities and social sciences”. Finally, a significant difference is observed in the responses to the item “Men are responsible for supporting their families financially”. Additionally, to the item “Women should take care of the home and the care of their children”, only 11% of surveyed female students responded affirmatively, while this percentage is tripled in case of male students, rising until to 31%. On the other hand, the dependence of some items on the sex variable was demonstrated (for example, “men are more capable than women of performing technical and mechanical tasks”, “the performance of girls is better in writing careers, humanities and social sciences”, “the performance of boys is better in scientific and technical careers” and “women should worry about the house and taking care of their children”), as the values of χ^2 were less than 0.05 (Appendix C).

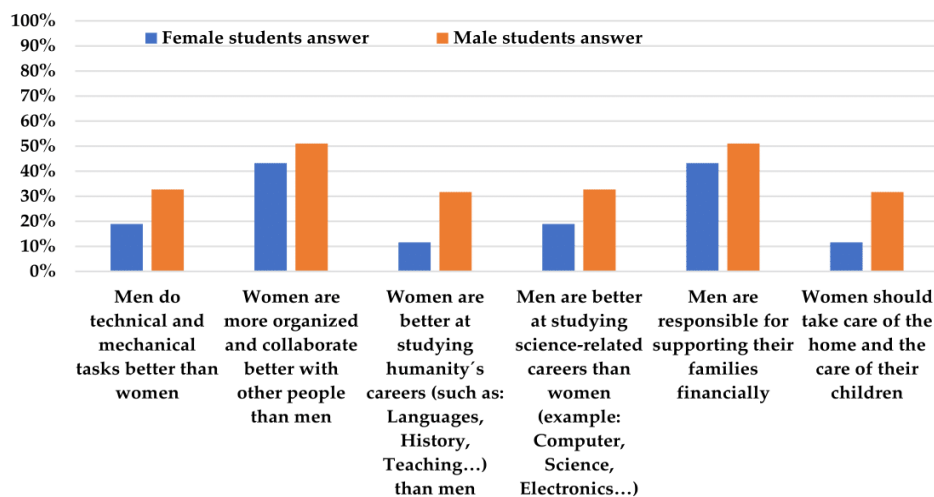


Figure 12. Primary education answers to questions based on (Model 3) the gender stereotypes theory.

Regarding the educational environment, the data reveal that the vast majority of educational centres are not equipped with a science laboratory (83.4%); therefore, 98.5% of primary education students have not visited one in the last year. Regarding the sex of science and mathematics teachers, the data show that in most cases it is female (87.4% and 78.9%) (Table 3).

Table 3. Educational environment in primary education.

	Yes (%)	No (%)
Is there a STEM lab in your school?	16.60%	83.40%
	Less than 10 (%)	More than (%)
How many times have you gone to the lab?	98.50%	1.50%
	Male (%)	Female (%)
Science teacher's gender	12.60%	87.40%
	Male (%)	Female (%)
Mathematics teacher's gender	21.10%	78.90%

3.2. Secondary Education Students

The results obtained for the variables MO, EX and VI, of the expectancy–value construct, do not show significant differences between both sexes. However, there is a slight tendency of female students to respond negatively (compared to their peers) to the items “I understand STEM subjects”, “I get good grades in STEM subjects” and “If I work hard in STEM subjects I will learn and I will get good grades”. The percentage of “totally agree” responses in the above items is higher in boys than in girls (Figure 13), and the means of male responses to these items are higher than those of female students (Appendix B). It was also shown that an item of the MO variable, “I understand STEM subjects”, is dependent on the sex variable, since the value of χ^2 was less than 0.05 (Appendix C).

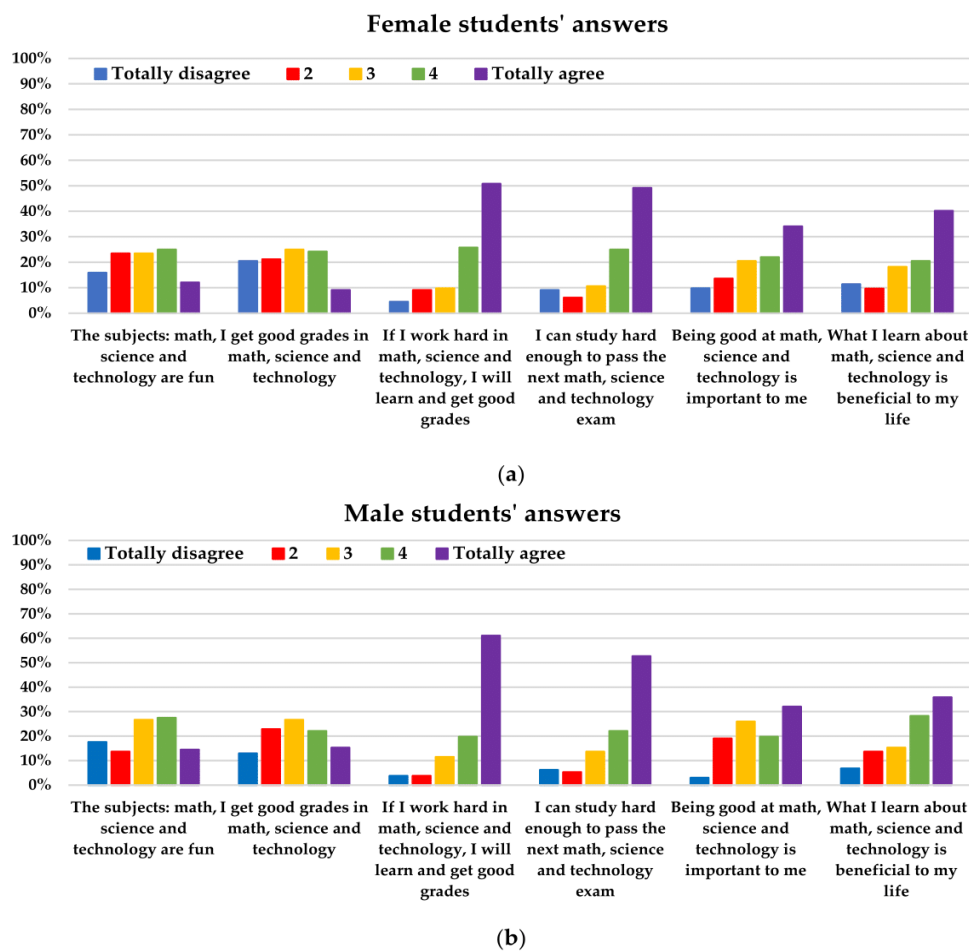


Figure 13. Secondary education answers to questions based on (Model 1) the expectancy–value theory of motivation: (a) female students’ answers; (b) male students’ answers.

The results obtained in the SR variable of the (Model 2) social role theory show significant differences between the sexes. The percentages of responses from the female students when awarding the execution of the different tasks to “both sexes” were higher than those of the male students, as well as the percentages of responses from the students when assigning domestic tasks and caring for people to the female sex (Figure 14). In a similar vein, it was shown that there is a dependency between all the items of this

variable and the sex variable, since the values of χ^2 were less than 0.05 (Appendix C). It is notable that no male or female student attributed the items “make the beds”, “dedicate themselves to hairdressing” and “hang out the washing” to the male sex, nor did they attribute “dedicate themselves to agriculture”, “. . . to mechanics” or “fly planes” to the female sex.

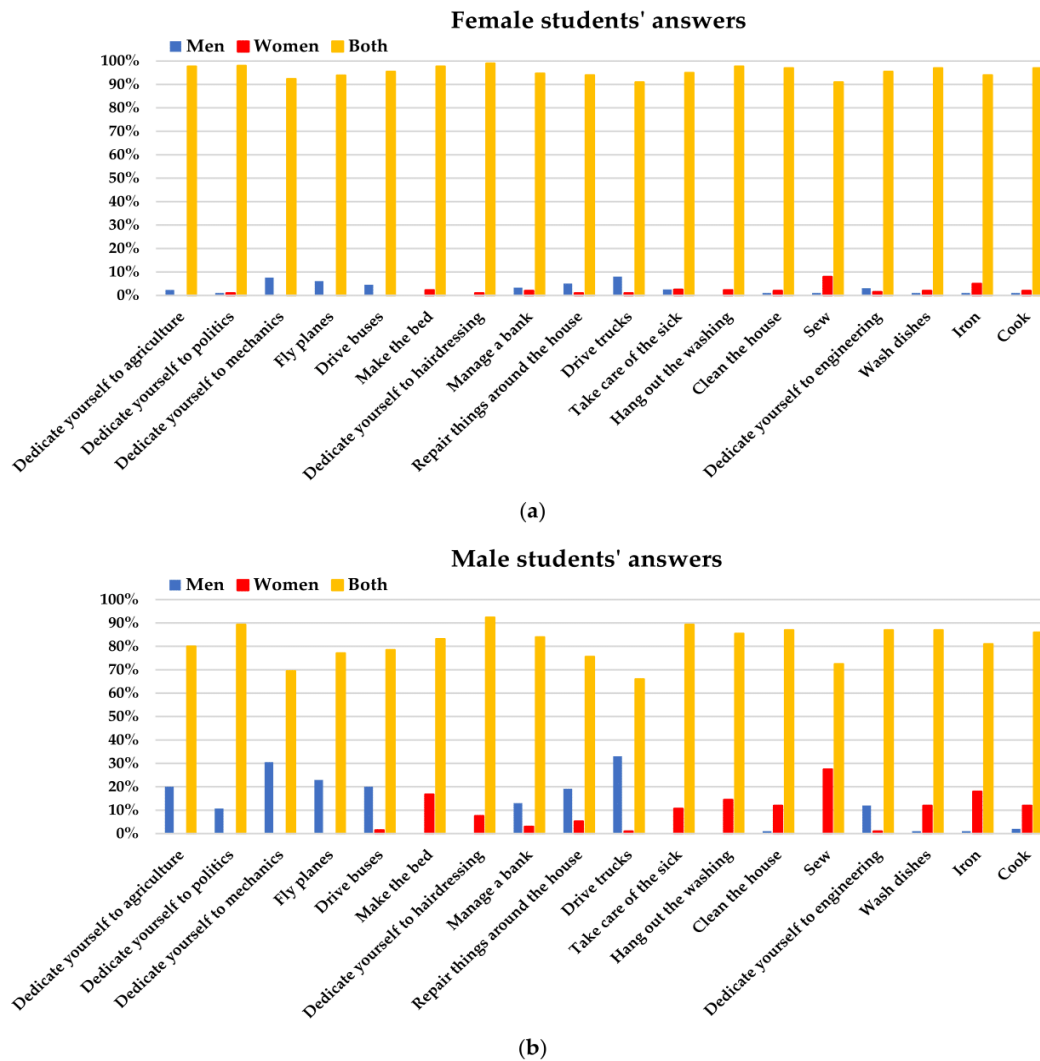


Figure 14. Secondary education answers to questions based on (Model 2) the social role theory: (a) female students' answers; (b) male students' answers.

Regarding the gender stereotypes construct (Model 3), the data shows that the SCC and SSR variables vary depending on sex. The answers of the students indicate that they agree to a greater extent than their classmates with the items asked (Figure 15). For the SCC variable, the average of the responses given by male students (Mean_{male}) to the item “men are more capable of doing technical and mechanical tasks” was 2.22, while that of the female students (Mean_{female}) was 1.48. The male students also consider to a greater extent than their female counterparts that “boys’ performance is better in technical careers” (Mean_{male} = 2.02; Mean_{female} = 1.45). Additionally, in the item “boys are better in STEM

professions”, the means of the male students were higher than those of the female students (Mean_{male} = 2.56; Mean_{female} = 1.64) (Appendix B). Regarding the SSR variable, the means of the male responses were higher than those of the female students, which indicates that they agree to a greater extent than their peers that “maintaining families financially” is the responsibility of the male sex (Mean_{male} = 1.85; Mean_{female} = 1.23), while “taking care of the home and the offspring” is the responsibility of the female sex (Mean_{male} = 1.85; Mean_{female} = 1.31) (Appendix B). Finally, the data demonstrated the dependence of the items of the gender stereotypes construct on the sex variable, since the values of χ^2 were less than 0.05, except in the item of the SCC variable “women are more capable of doing organizational and cooperative tasks”, since the value of χ^2 was 0.06 (Appendix C).

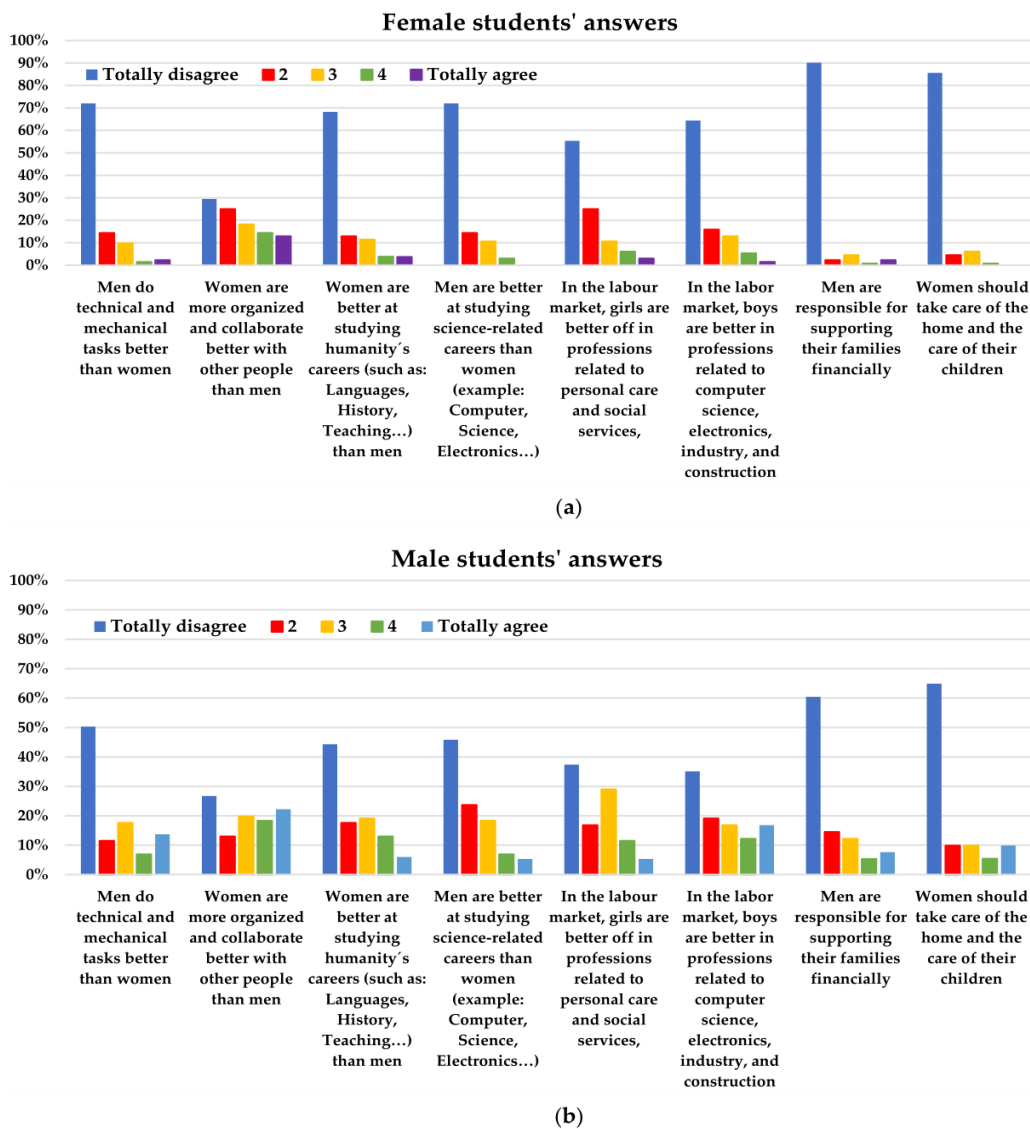


Figure 15. Secondary education answers to questions based on (Model 3) the gender stereotypes theory: (a) female students' answers; (b) male students' answers.

Regarding the educational environment, the data reveal that most of the educational centres visited have a STEM laboratory (88.2%); even so, 75.3% of the students had visited it less than 10 times in the last year. Regarding the sex of science teachers, the majority were female (67.3%); however, in the subjects of mathematics and technology, the data showed that the majority of teachers were male (57% and 63.1%) (Table 4).

Table 4. Educational environment in secondary education.

Is there a STEM lab in your high school?	Yes (%)	No (%)
	88.20%	11.80%
How many times have you been to the lab?	Less than 10 (%)	More than (%)
	75.30%	24.70%
Science teacher’s gender	Male (%)	Female (%)
	32.70%	67.30%
Mathematics teacher’s gender	Male (%)	Female (%)
	57%	43%
Technology teacher’s gender	Male (%)	Female (%)
	63.10%	36.90%

3.3. Primary and Secondary Teachers

The main questions formulated for teachers were related to educational environment, as shown in Figure 16. We can observe that in almost all (70%) the educational centres visited, there is a STEM laboratory, but unfortunately less than 35% of the surveyed teachers give lessons in the STEM laboratory to his/her students. Despite there being a science lab in the school, more than a half of surveyed teachers do not prepare hands-on experiments for their students in STEM labs.

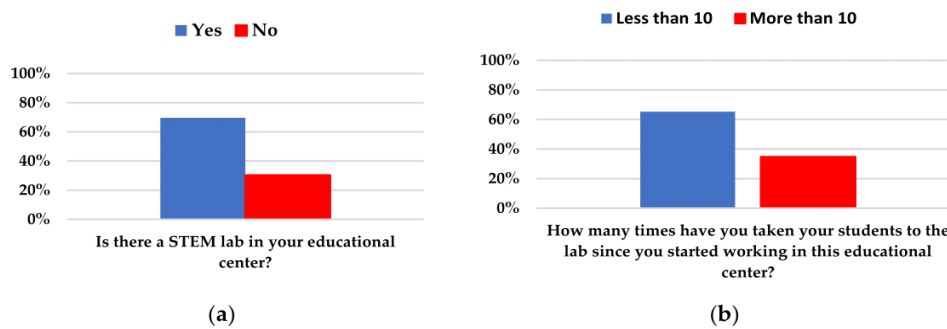


Figure 16. Primary and secondary teachers’ answers about the educational environment: (a) question about if the educational centre has science laboratory; (b) question about how often students use science laboratory.

Of the whole sample of teachers consulted in surveys, 78.3% are women and 21.7% are men. Another additional question they were asked was “Do you use inclusive language while teaching?” Some responses about the use or non-use of inclusive language were “Because I do not think it’s necessary”, “It’s not a habit for me”, “I think it’s essential because there is still a lot of gender inequality”, “For students to acquire this language” and “To normalize it”.

The degree of teachers’ awareness of the low participation of female students in the fields of science and technology was also assessed, as shown in Figure 17. Regarding the answers, we can observe that in primary and secondary schools, female teachers are more

concerned than male teachers about the decrease in students choosing STEM careers, but male teachers are more cognizant of the gender gap in STEM careers.

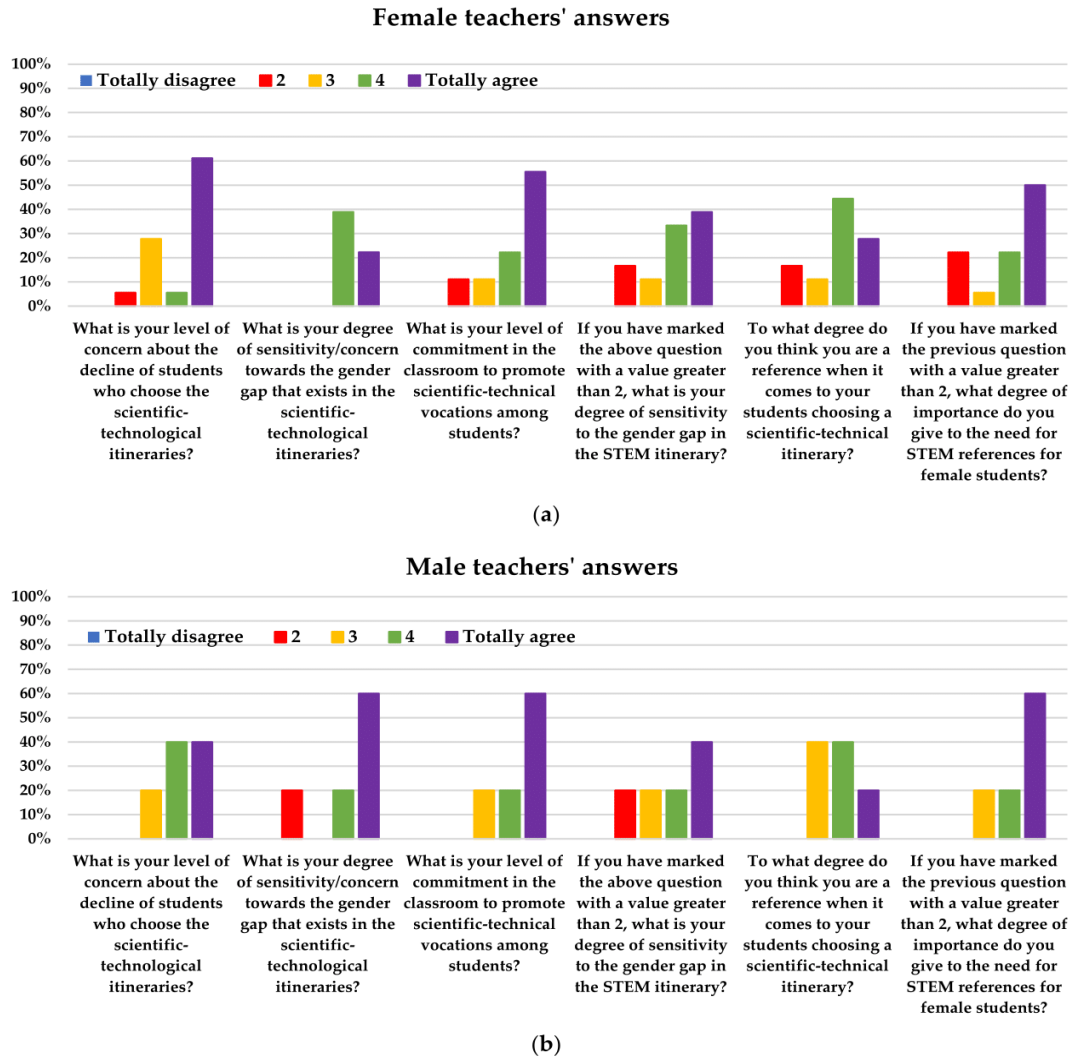


Figure 17. Primary and secondary teachers' answers on their degree of awareness of the low participation of female students in STEM careers: (a) female teachers' answers; (b) male teachers' answers.

3.4. University

At university level, the research was extended to both students and professors from different fields; these not only included engineering, but also science, social sciences and economics.

3.4.1. University Students

The results obtained in the variables MO and EX, of the (Model 1) expectancy-value theory of motivation, do not show significant differences between both sexes, although the means of the male responses are somewhat higher than those of the female students (Appendix B). However, there are two items of the VI variable that do show differences in

the answers offered by the female students and the male students, since the males answered with a higher percentage of affirmative responses that “being good in STEM subjects means a lot to me” (Mean_{male} = 3.47; Mean_{female} = 2.98) and that “being good in these subjects will help me in the rest of my studies” (Mean_{male} = 3.46; Mean_{female} = 2.96) (Appendix B and Figure 18). However, only one item of the expectancy–value construct is dependent on the sex variable (“I understand STEM subjects”), since the value of χ^2 was less than 0.05 (Appendix C).

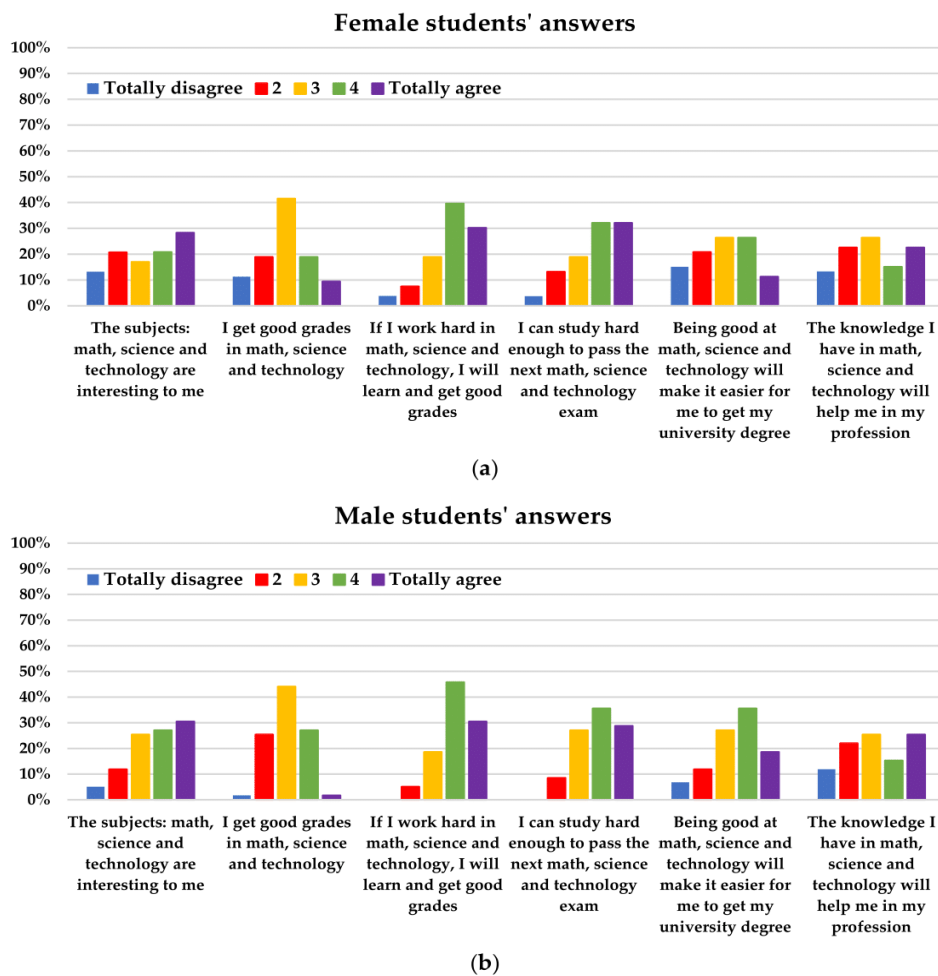


Figure 18. University students’ answers to questions based on (Model 1) expectancy–value theory of motivation: (a) female students’ answers; (b) male students’ answers.

The results obtained in the RS variable of the (Model 2) social role theory do not show significant differences between the sexes. The percentages of female and male responses to the different items were similar (Figure 19). In the same way, it was shown that there is no dependency between most of the items of this construct and the sex variable, since the values of χ^2 were higher than 0.05 (Appendix C), with the exception of the item “who should be dedicated to agriculture?”, which did show dependence ($\chi^2 = 0.03$). It is worth highlighting the fact that no female student attributed certain domestic and care tasks to the male sex (i.e., making the bed, taking care of the sick, hanging out the washing, cleaning

the house and sewing), but the male students did. In a similar vein, the items “dedicate themselves to agriculture”, “...to politics” and “repairing things around the home” were attributed in a high percentage by students to both sexes and in a low percentage to the male sex, but no person surveyed attributed this item only to women.

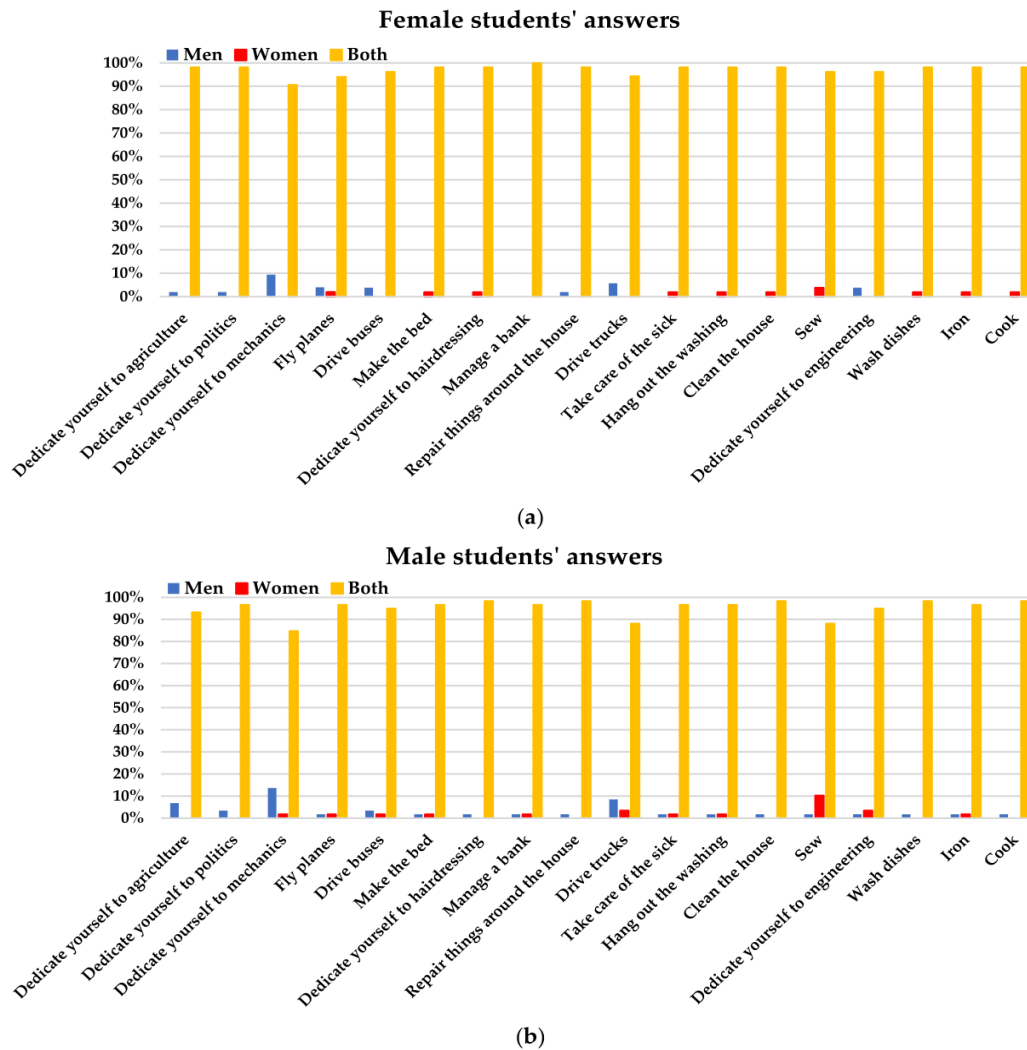


Figure 19. University students’ answers to questions based on (Model 2) the social role theory: (a) female students’ answers; (b) male students’ answers.

As for the SCC and SSR variables of the (Model 3) gender stereotypes theory, the percentages of the responses of students stating that they “totally disagree” with almost all the items were higher than 50% in both sexes, except for the one related to “Women are more organized and collaborate better with other people than men”. More than 15% of surveyed male student agreed totally with this item, while only 5% of the surveyed female students (Figure 20) agreed with this item. The means of the responses of both sexes are similar (Appendix B). The χ^2 analysis showed that there is no dependence between the SCC and SSR variables with the sex variable, since all the values are greater than 0.05 (Appendix C).

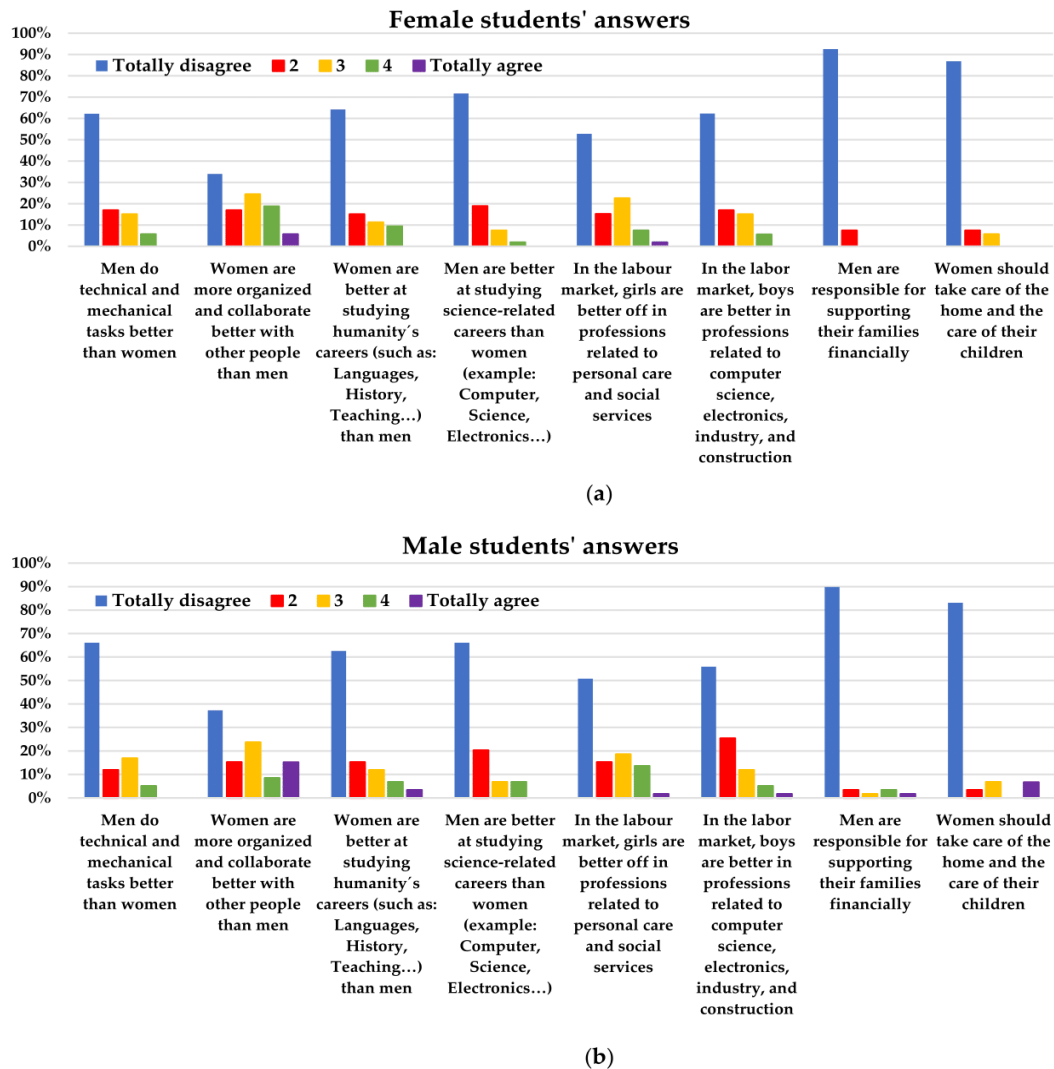


Figure 20. University students' answers to questions based on (Model 3) the gender stereotypes theory: (a) female students' answers; (b) male students' answers.

Additionally, university students were asked about their degree of concern in relation to the effect that the actual gender gap in STEM careers could have on society. Almost 70% of the surveyed participants think this will have consequences for society, as shown in Figure 21.

Do you think this will have any (positive or negative) consequences for society?

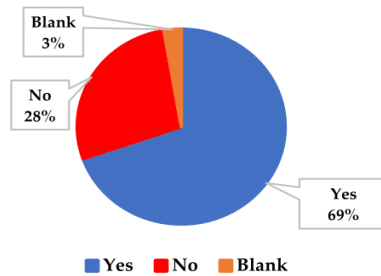


Figure 21. University students’ answers to an additional question on the impact that the low percentage of women enrolled in STEM careers could have on society.

As for the primary and secondary students, the last construct discussed with the university students was the educational environment. With regard to the reasons that guided the students to choose their current university degree, differences can be observed between the responses of women and men studying STEM careers, and between women studying STEM and women studying non-STEM careers. Half of the surveyed students studying STEM careers (54.55% of women and 55.26% of men) recognise that they selected STEM careers by vocation. By contrast, this percentage increased to 88.10% (women) and 71.43% (men) in the case of non-STEM students.

Other reasons such as family influence have a weight of 18.8% in STEM women (the highest weight in comparison with the non-STEM women and all the male students). Additionally, almost one fifth of surveyed STEM women (18.18%) say their choice was motivated by professional opportunities. This percentage duplicates in the case of STEM men (34.21%). The responses of the students of non-STEM degrees do not contemplate family influences or professional opportunities in their choice. Observing only the male students, the responses of the STEM students were mostly related to vocation and professional opportunities (55.26% and 34.21%), similar to male students of non-STEM degrees (71.43% and 19.05%) (Table 5).

Table 5. Reasons that guided the choice of curriculum.

	Female Students’ Responses		Male Students’ Responses	
	STEM (%)	No STEM (%)	STEM (%)	No STEM (%)
Family influence	18.8%	-	2.63%	-
Vocation	54.55%	88.10%	55.26%	71.43%
Previous curricular itinerary	9.09%	11.90%	2.63%	4.76%
Obligation	-	-	5.26%	-
Professional opportunities	18.18%	-	34.21%	19.05%
Dk/Da	-	-	-	4.76%

3.4.2. University Professors

Surveys asked this group their gender, age, years of teaching experience, and the institution in which they teach. Of this group of 25 professors, 20% were women and 80% were men. The professors’ surveys were more focused on how they perceive the roles that traditionally exist in this field between men and women, as they apply to male and female students. As Figure 22 shows, they were also asked additional questions, including: “Do you use inclusive language while teaching?”. More than half of professors, regardless of whether they are men or women, do not use inclusive language in classes. Some answers about the use or not of inclusive language were “It’s a waste of time”, “It

makes communication difficult”, “I have not internalized it. It does not come naturally to me”, “Because I do not agree with this language”, “I’m used to it and it seems to me the most appropriate” and “This language shows equality and respect”.

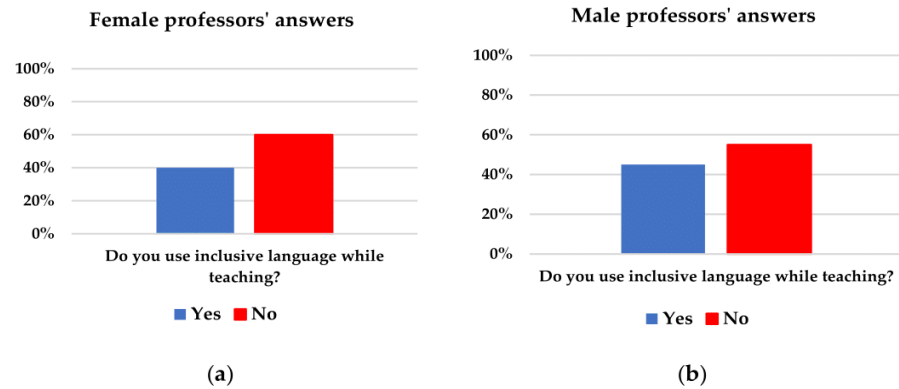


Figure 22. University professors answers to an additional question on the use of inclusive language in the classroom: (a) female professors’ answers; (b) male professors’ answers.

3.5. University Graduates

The results obtained in the variables MO, EX and VI of the (Model 1) expectancy–value theory of motivation do not show significant differences between the sexes. In a similar vein, it is highlighted that there is no dependency between these variables and the sex variable, since all the values of χ^2 were greater than 0.05 (Appendix C).

However, there is one item of the VI variable that does show differences in the answers offered by the female students and the male students; the male students responded with a higher percentage of affirmative responses that “being good in STEM subjects means a lot to me” (Mean_{male} = 4.08; Mean_{female} = 3.63) (Appendix B and Figure 23).

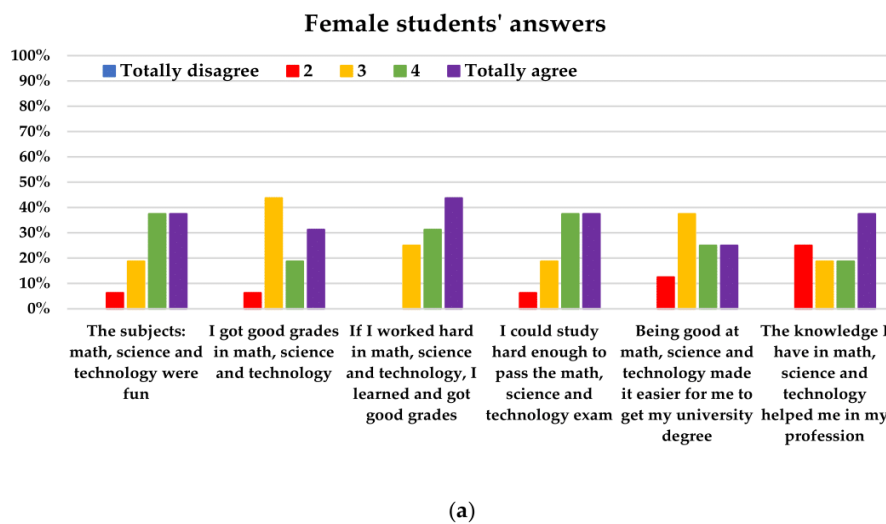


Figure 23. Cont.

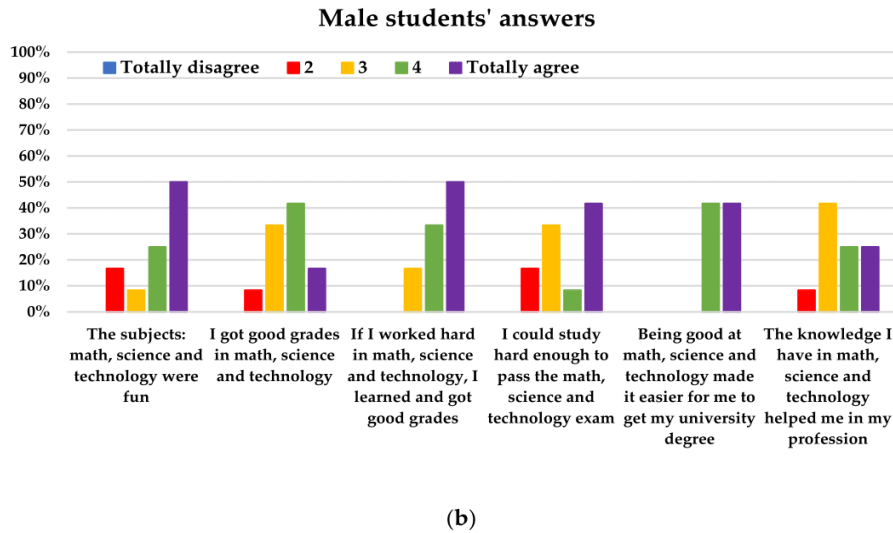
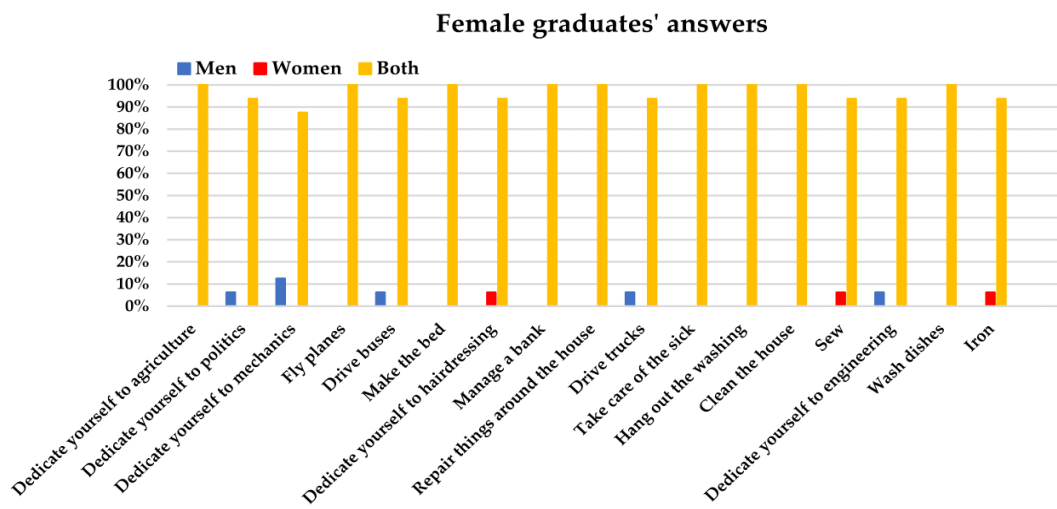


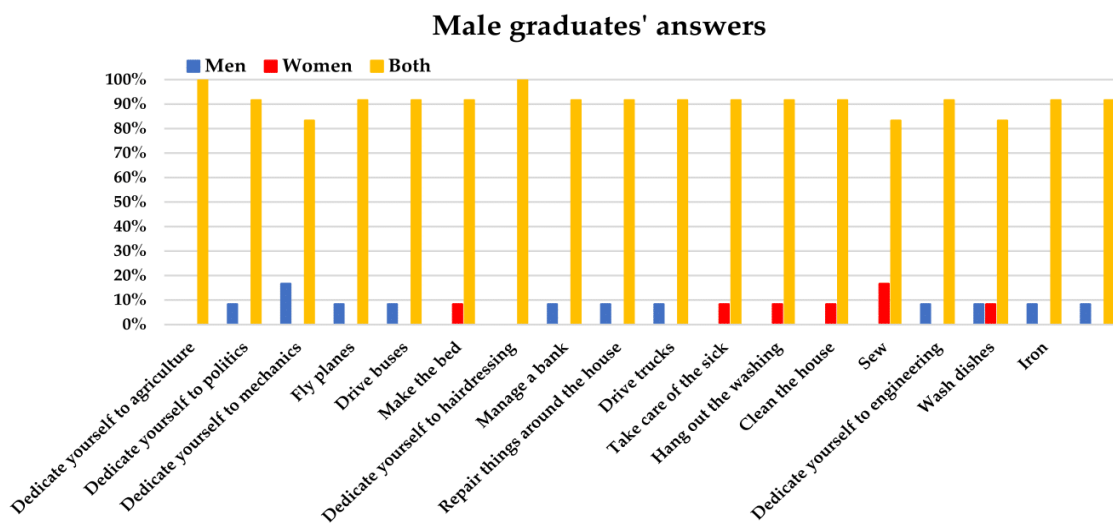
Figure 23. University graduates’ answers to questions based on (Model 1) the expectancy–value theory of motivation. (a) female students’ answers; (b) male students’ answers.

The results obtained in the SR variable of the (Model 2) social role theory do not show significant differences between the sexes. The percentages of female and male responses to the different items were similar (Figure 24). In the same way, it was shown that there is no dependency between most of the items of this construct and the sex variable, since the values of χ^2 were higher than 0.05 (Appendix C). Nevertheless, it is worth highlighting the fact that a higher number of female graduates consider both women and men to be responsible for doing all the tasks mentioned in the survey (100% of surveyed women believe that task such as flying planes, managing a bank, taking care of the sick and cleaning the house correspond to both men and women). However, regarding the answers from male graduates, it can be seen that there are considerable number of tasks that male graduates consider to correspond exclusively to men (dedicating themselves politics, dedicating themselves to mechanics, flying planes, driving buses); meanwhile, they considered several domestic tasks to correspond exclusively to women (taking care of the sick, hanging out the washing, cleaning the house, sewing).

In relation to (Model 3) the gender stereotypes theory, for the SCC and SSR variables, students of both sexes stated that they “totally disagree” with almost all of the items (i.e., more than 50% of students of both sexes), as shown in Figure 25, Appendix B. The χ^2 analysis showed that there is no dependence between the SCC and ERS variables with the sex variable, since all the values are greater than 0.05 (Appendix C). But some items deserve attention. For example, in the item “In the labour market, boys are better at STEM professions”, the disagreement level is higher in woman than in men (Mean_{female} 1.44, Mean_{male} = 1.92). In the items “Men are responsible for supporting their families financially” and “Women should take care of the home and of their children”, absolutely all of the surveyed women disagreed, but not all of the surveyed men thought the same. There were even some who totally agreed with these items (Mean_{female} = 1, Mean_{male} = 1.50).

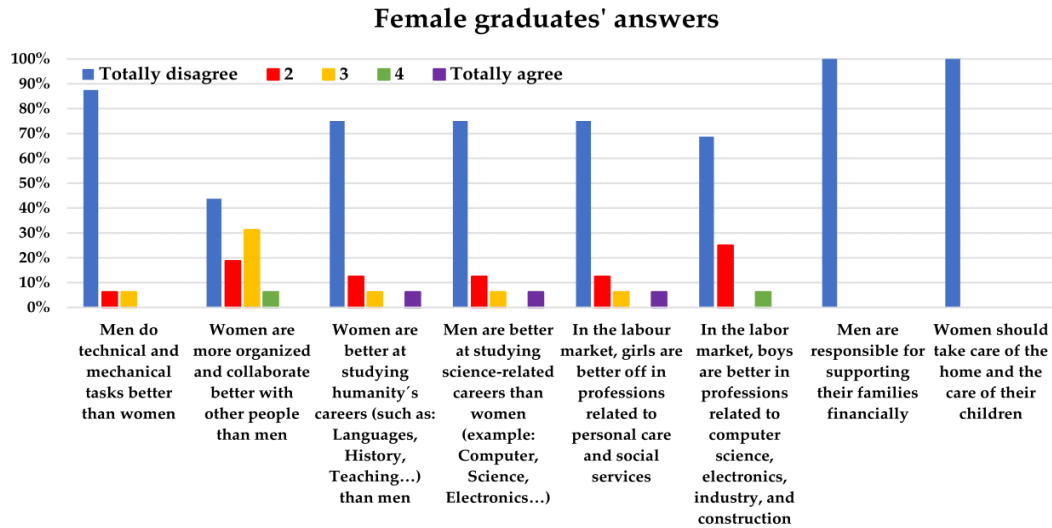


(a)

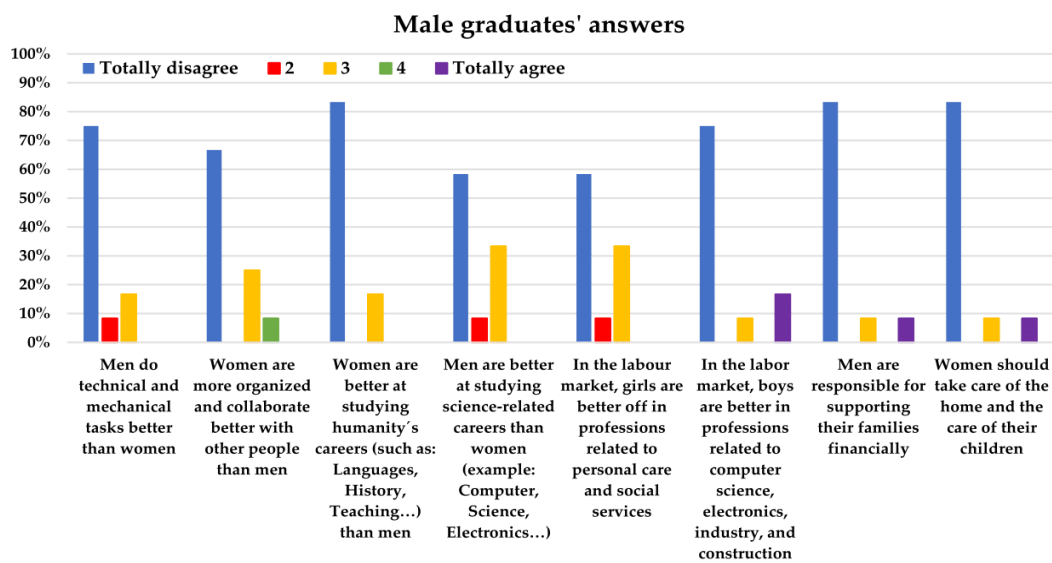


(b)

Figure 24. University graduates' answers to questions based on (Model 2) the social role theory: (a) female graduates' answers; (b) male graduates' answers.



(a)



(b)

Figure 25. University graduates' answers to questions based on (Model 3) the gender stereotypes theory: (a) female graduates' answers; (b) male graduates' answers.

3.6. Enterprise/Industry Professionals

The last target group studied is that of enterprise and industry professionals. The surveys were anonymous; only information on gender, age, position held in the company and years of experience was obtained. The surveys asked questions about the type of activity carried out by the company within the STEM field, and the gender equality that exists within the company. Figure 26 shows the obtained results from some of the questions in the survey: "Is there an equal environment between men and women in the company where you work?", "Do you use inclusive language in your work environment?" and "Does the company in which you work have an Equality Plan registered in REGCON?".

As Figure 26a shows, there is an equal environment in the companies, although inclusive language is not yet well established (Figure 26b). Similarly, most STEM workers do not know if there is an Equality Plan in their company (Figure 26c).

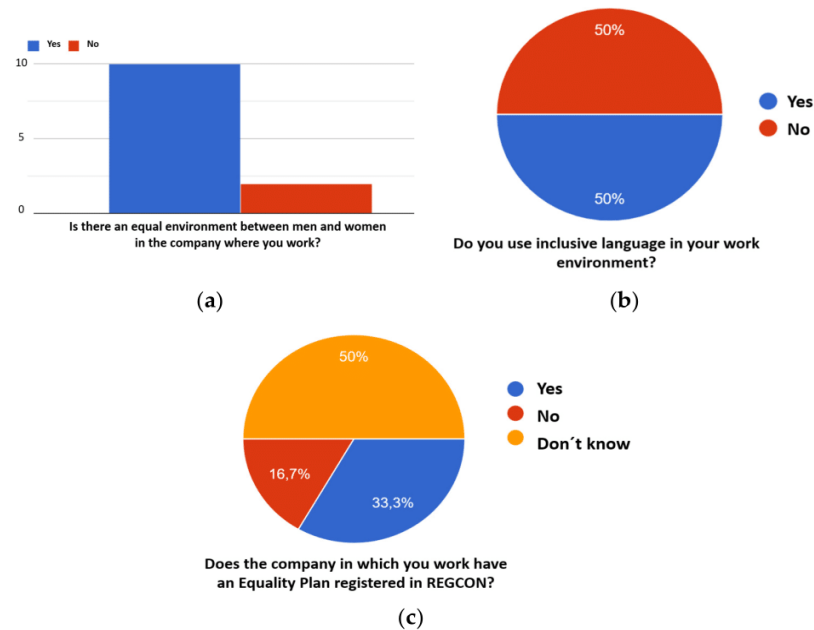


Figure 26. Enterprise/industry professionals' answers to questions about the STEM field and the gender equality that exists within their company: (a) question about equality environment; (b) question about inclusive language; (c) question about equality plan.

4. Discussion

Based on collected data, the initial hypothesis is validated. There is not a single model that explains the low presence of women in STEM careers. From the research carried out, we can observe an interrelation between the three models. Students who classify tasks and professions according to gender (i.e., the social role theory) are prone to assigning different capabilities to women and men (i.e., the gender stereotypes theory).

Then, with regard to the tasks and activities that students consider to be typical of men, women or both sexes, i.e., the roles that society has traditionally attributed to men and women, the data do show significant differences between male and female students, especially in secondary education; at this stage (coinciding with adolescence), male students showed greater discrimination between the roles assigned to the sexes.

Regarding gender stereotypes related to competences and skills, the collected data indicate that from primary education onwards, there is a greater tendency for male students to consider themselves better at STEM disciplines and professions. This tendency is more noticeable in secondary education, but tends to decrease in higher education. Regarding the stereotypes of social responsibility attributed to the sexes, according to the data analysed, male students show a greater discrimination of responsibilities attributed to each sex than female students. These differences are more pronounced at an early age (primary and secondary education), and diminish by the time they reach higher education.

Regarding the influence of educational environments on the promotion of STEM degrees, the data revealed the frequent use of non-active methodologies in primary and secondary schools, as well as a lower female presence in the teaching teams of these subjects in secondary schools. These findings could indicate that the educational environments analysed (primary and secondary) favour female students rarely choosing STEM degrees.

With regard to the motivations for the choice of degree, according to the data analysed, vocation is the main reason. In addition, university students believe that the low percentage of women in STEM degrees will increase inequalities between men and women. On the causes of low female participation in STEM, students' opinions differ by gender. Female students attribute low participation to social causes, and male students attribute low participation to gender differences in taste. Both female and male university students would encourage guidance in the previous educational stages to increase female participation in STEM degrees.

With regard to teachers, both primary and secondary education teachers are highly committed to closing the gender gap in all fields, and particularly in STEM careers.

Unfortunately, university professors do not seem to be either as committed or as concerned about the gender gap in STEM careers. Most of them are not looking for new resources to help challenge the gender gap in their classes.

Regarding companies and industries, it can be observed that they reflect what is happening in the other productive sectors and the rest of society in general. More than 83% of surveyed companies have a gender equality plan, but only half use inclusive language in the work environment.

Comparing the results obtained by the authors in this research with previous scientific works referred to in Table 2, we can observe the following. The study carried out in [16] with 15-year-old students in 57 countries found that 64% of boys and girls expect to be able to work in a STEM-related profession. In our case, the study conducted by the authors found that 40% of female secondary school students believe that their knowledge obtained in mathematics, science and technology will be beneficial for their future (Figure 13a). Similarly, a study in [16] found that the separation of men and women in certain sectors of the public sphere can spread certain gender roles in professional occupations. The authors' study, based on "(Model 2) social role theory" also found that there are still professions rooted in gender roles.

García-Holgado, Mena et al. [17] showed that only 32.69% of graduates in STEM programs during the 2018/2019 academic year were female. In the study conducted by the authors, in Figure 1, it is shown that in 2018, 33.26% of graduates in tertiary education in the EU in STEM disciplines were female.

The results of the study by Dulce-Salcedo et al. [18] indicate that this gap could be reduced by exposing students to a higher proportion of female STEM teachers in secondary education. In the study conducted by the authors, surveys of primary and secondary education teachers are pooled, and of the 23 teachers surveyed, 18 are female teachers; both female students and female teachers are aware of the importance of having a female reference in STEM classes.

Jiang [19] conducted a study in which he found that family reasons, place of work and stereotypes rooted in women's place of origin influence a higher dropout rate in women in STEM disciplines than in men. In the study carried out using "(Model 2) social role theory", the authors found ideological entrenchment regarding women taking care of the home and caring for the sick.

The study conducted by Kumar et al. [20] with children between 4 and 6 years of age found that in the male/all-female condition, the scientist figure was more rooted in the male role, with 59%, as opposed to 33% in the all-female condition, 38% in the all-male condition and 43% in the female/all-male condition. In the study carried out by the authors for “(Model 2) social role theory” with children in primary education, it can be seen that many professions still have a gender difference in perception (Figure 11a,b), where powerful and intellectual occupations are associated with men, and more care-oriented professions are associated with women.

The results obtained from the study conducted by Krstić and Gawel [21] determined that the gender gap in STEM entrepreneurship is determined by the gender gap in STEM education. There are twice as many male entrepreneurs as female entrepreneurs. In higher education, the largest STEM-related gender gaps are in science, mathematics, computing, engineering, manufacturing, and construction, with far more male graduates than female graduates. The study conducted by the authors shows that in higher education (Figures 1 and 2) the number of women graduates in tertiary education in Europe ranges between 32–33%, while in Spain, it ranges between 28–29%.

5. Conclusions

Based on the obtained results, it can be concluded that we have a long way to go to reach gender-balanced study ratios in STEM fields. On the one hand, the results of the surveys show that there are still social patterns that make young people differentiate certain types of activities based on gender. At this stage, boys still think that professions related to the care of the home and of sick people are the responsibility of women, while more technical, authoritative and manual professions are for men. This can also be extrapolated in the opposite direction, resulting in careers such as nursing, social work, primary education and psychology being dominated by women.

On the other hand, it can be seen that of the three educational levels (primary, secondary and university), higher education teachers, compared to primary and secondary teachers, are the least aware of the gender gap in STEM. Most of the university professors surveyed state that they have no intention of carrying out any type of small action in their classes to contribute to the visibility of women in a field with such a low percentage of women.

Apart from the conclusions obtained from the responses to the surveys related to the three models analysed, the authors determined that one of the most important reasons for low engagement in STEM areas is the educational environment, i.e. the poor contact that students have with science and engineering in primary and secondary school. It is difficult to engage students (male or female) in science or engineering at the age of eighteen (university) when they have never stepped into a STEM laboratory before. The authors deduce that it is crucial to redefine the curriculum, adapting it to ensure that primary and secondary students learn science and engineering with the “five senses” (seeing, touching, hearing, smelling and tasting).

The participatory workshops carried out in this study have been designed to show that the fields of technology and science are strongly linked to decision-making and economic and social leadership positions. If the presence of women in STEM careers is strengthened, women’s capacity for influence in these fields will be much greater.

Author Contributions: Conceptualization, M.M. and F.S.; methodology, M.M., Y.C. and F.S.; formal analysis, M.M., F.S., Y.C. and J.M.A.; writing—original draft preparation, M.M.; writing—review and editing, J.M.A.; project administration, F.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Ref:15/3ACT/21 and the APC was funded by Ref: 2020-1-IT02-KA226-HE-095424.

Institutional Review Board Statement: The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board of University of Huelva on 11 January 2023.

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author. The data are not publicly available due to the participation of minors in the study.

Acknowledgments: This work has been supported by project Ref:15/3ACT/21 ALAS: Accompanying Girls Towards Stem Careers, founded by the Spanish Ministry of Equity.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

List of Acronyms

ALAS	Accompanying girls towards STEM careers
AVE	Average variance extracted
BEng	Bachelor of Engineering degree
CEDEFOP	European Center for the Development of Professional Vocation
EEA	European Education Area
EPWS	European Platform of Women Scientists
ERA	European Research Area
EU	European Union
GENERA	Gender Equality Network in the European Research Area
MS	Member state
PAU	University entrance exams
STEM	Science, Technology, Engineering and Mathematics
UHU	University of Huelva
UNGA	United Nations General Assembly

Appendix A

Factorial Analysis	Primary Students				Secondary Students				University Students				University Graduates			
	Mean (SD)	Load	AVE	Alfa	Mean (SD)	Load	AVE	Alfa	Mean (SD)	Load	AVE	Alfa	Mean (SD)	Load	AVE	Alfa
<i>Motives (MO)</i>																
STEM subjects are fun	4.22 (1.59)	0.62	0.50	0.49	3.01 (1.29)	0.79	0.73	0.84	3.49 (1.31)	0.79	0.71	0.78	3.93 (1.15)	0.85	0.81	0.89
I understand STEM subjects	4.50 (1.33)	0.85			3.14 (1.26)	0.90			3.31 (1.09)	0.93			3.64 (1.09)	0.94		
I get good grades in STEM subjects	4.70 (1.06)	0.64			2.92 (1.27)	0.86			2.99 (0.96)	0.80			3.57 (1.03)	0.91		
<i>Expectations (EX)</i>																
If I work hard in STEM subjects, I will learn and get good grades	4.98 (0.28)	0.71	0.54	-0.18	2.66 (1.35)	0.92	0.85	0.82	3.94 (0.95)	0.90	0.81	0.78	4.18 (1.02)	0.90	0.81	0.78
I can study hard enough to pass the next STEM subjects exam	4.88 (0.67)	-0.71			4.20 (1.13)	0.92			3.80 (1.05)	0.90			3.93 (1.05)	0.90		
<i>Incentive value (IV)</i>																
Being good at STEM means a lot to me	4.72 (1.03)	0.67	0.48	0.44	3.58 (1.27)	0.79	0.64	0.81	3.24 (1.21)	0.78	0.60	0.68	3.82 (1.06)	0.83	0.79	0.82
Being good at STEM will help me in the rest of the years in my studies	4.86 (0.74)	0.76			3.99 (1.19)	0.77			3.22 (1.4)	0.81			3.46 (1.32)	0.89		
What we learn about STEM is beneficial to my life	4.84 (0.79)	0.64			3.58 (1.26)	0.82			-	-			-	-		
The knowledge I have of STEM will help me in my future work	-	-			3.70 (1.33)	0.83			3.16 (1.53)	0.74			3.25 (1.29)	0.86		
<i>Stereotypes about competences and capabilities (SCC)</i>																
Men are more qualified than women to do technical and mechanical tasks	2.05 (1.76)	0.75	0.53	0.68	1.15 (1.27)	0.72	0.61	0.87	1.63 (0.94)	0.75	0.57	0.84	1.43 (0.96)	0.58	0.61	0.83
Women are better able to do organizational and cooperative tasks	2.89 (2.00)	0.55			2.76 (1.46)	0.73			2.47 (1.37)	0.68			1.89 (1.07)	0.54		

Factorial Analysis	Primary Students				Secondary Students				University Students				University Graduates			
	Mean (SD)	Load	AVE	Alfa	Mean (SD)	Load	AVE	Alfa	Mean (SD)	Load	AVE	Alfa	Mean (SD)	Load	AVE	Alfa
Girls' performance is better in arts, humanities and social sciences majors	1.88 (1.66)	0.82			1.90 (1.22)	0.80			1.7 (1.07)	0.82			1.57 (1.17)	0.91		
The performance of boys is better in scientific-technical careers	1.68 (1.51)	0.76			1.73 (1.05)	0.83			1.47 (0.82)	0.78			-	-		
In the labour market, girls are better in professions related to care and services	-	-	-	-	2.03 (1.18)	0.73			1.96 (1.15)	0.69			1.61 (1.03)	0.91		
In the job labour, boys are better at STEM professions	-	-	-	-	2.10 (1.35)	0.86			1.68 (0.96)	0.81			1.64 (1.19)	0.87		
Stereotypes about social responsibility (SSR)																
Men are responsible for supporting their families financially	1.80 (1.61)	0.86	0.74	0.65	1.54 (1.09)	0.93	0.87	0.85	1.16 (0.61)	0.85	0.72	0.60	1.21 (0.83)	0.99	0.98	0.1
Women should take care of the house and their children.	2.43 (1.92)	0.86			1.58 (1.17)	0.93			1.32 (0.88)	0.85			1.21 (0.83)	0.99		

Appendix B

	Secondary Students		University Students		University Graduates	
	Mean (SD) Female	Mean (SD) Male	Mean (SD) Female	Mean (SD) Male	Mean (SD) Female	Mean (SD) Male
Motives (MO)						
STEM subjects are fun	2.94 (1.27)	3.08 (1.30)	3.30 (1.42)	3.66 (1.18)	3.81 (1.17)	4.08 (1.16)
I understand STEM subjects	2.94 (1.27)	3.34 (1.21)	3.06 (1.20)	3.54 (0.93)	3.56 (1.15)	3.75 (1.05)
I get good grades in STEM subjects	2.80 (1.27)	3.04 (1.26)	2.96 (1.11)	3.02 (0.82)	3.50 (1.15)	3.67 (0.88)
Expectations (EX)						
If I work hard in STEM subjects, I will learn and get good grades	4.09 (1.75)	4.31 (1.07)	3.85 (1.06)	4.02 (0.84)	4.19 (0.83)	4.17 (1.27)
I can study hard enough to pass the next STEM subjects exam	3.99 (1.29)	4.10 (1.19)	3.75 (1.16)	3.85 (0.94)	4.06 (0.93)	3.75 (1.21)
Incentive (IV)						
Being good at STEM means a lot to me	3.57 (1.34)	3.59 (1.21)	2.98 (1.25)	3.47 (1.14)	3.63 (1.02)	4.08 (1.08)
Being good at STEM will help me in the rest of the years in my studies	3.97 (1.23)	4.01 (1.15)	2.96 (1.41)	3.46 (1.36)	3.19 (1.47)	3.83 (1.03)
What we learn about STEM is beneficial to my life	3.60 (1.31)	3.56 (1.21)	-	-	-	-
The knowledge I have of STEM will help me in my future work	3.68 (1.38)	3.73 (1.27)	3.11 (1.35)	3.20 (1.36)	3.19 (1.42)	3.33 (1.15)
Stereotypes about competences and capabilities (SCC)						
Men are more qualified than women to do technical and mechanical tasks	1.48 (0.90)	2.22 (1.47)	1.64 (0.94)	1.61 (0.95)	1.19 (0.54)	1.75 (1.29)
Women are better able to do organizational and cooperative tasks	2.56 (1.38)	2.96 (1.51)	2.45 (1.29)	2.49 (1.45)	2 (1.03)	1.75 (1.14)
Girls' performance is better in arts, humanities and social sciences majors	1.62 (1.07)	2.19 (1.30)	1.66 (1.02)	1.73 (1.13)	1.50 (1.09)	1.67 (1.30)
The performance of boys is better in scientific-technical careers	1.45 (0.80)	2.02 (1.19)	1.40 (0.72)	1.54 (0.90)		
In the labour market, girls are better in professions related to care and services	1.77 (1.06)	2.31 (1.23)	1.91 (1.11)	2 (1.19)	1.50 (1.09)	1.75 (0.96)
In the job labour, boys are better at STEM professions	1.64 (1)	2.56 (1.49)	1.64 (0.94)	1.71 (0.98)	1.44 (0.81)	1.92 (1.56)
Stereotypes about social responsibility (SSR)						
Men are responsible for supporting their families financially	1.23 (0.77)	1.85 (1.27)	1.08 (0.27)	1.24 (0.79)	1 (0)	1.50 (1.24)
Women should worry about the house and taking care of their children.	1.31 (0.87)	1.85 (1.36)	1.19 (0.52)	1.44 (1.10)	1 (0)	1.50 (1.24)

Appendix C

	χ^2 Gender			
	Primary Students	Secondary Students	University Students	University Graduates
Motives (MO)				
STEM subjects are fun	0.56	0.38	0.30	0.57
I understand STEM subjects	0.69	0.04	0.03	0.54
I get good grades in STEM subjects	0.65	0.34	0.07	0.65
Expectations (EX)				
If I work hard in STEM subjects, I will learn and get good grades	0.34	0.25	0.60	0.48
I can study hard enough to pass the next STEM subjects exam	0.47	0.78	0.43	0.30
Incentive value (IV)				
Being good at STEM means a lot to me	0.35	0.14	0.30	0.12
Being good at STEM will help me in the rest of the years in my studies	0.79	0.23	0.36	0.59
What we learn about STEM is beneficial to my life	0.90	0.13	-	-
The knowledge I have of STEM will help me in my future work	-	0.33	0.10	0.59
Social Role (SR)				
Who would these activities correspond to men, women or both? Engage in agriculture	0.03	0.00	0.21	-
... Politics	0.61	0.00	0.62	0.35
... Mechanics	0.48	0.00	0.49	0.75
... Fly planes	0.42	0.00	0.79	0.24
... Drive buses	0.58	0.00	0.63	0.83
... Do housework	0.44	0.00	0.63	0.24
... Engage in hairdressing	0.06	0.00	0.34	0.38
... Head a bank	0.98	0.02	0.41	0.24
... Repair devices at home	0.34	0.00	0.94	0.24
... Drive trucks	0.58	0.00	0.32	0.83
... Take care of sick	0.44	0.00	0.63	0.24
... Hang out the washing	0.14	0.00	0.63	0.24
... Cleaning the house	0.43	0.01	0.37	0.24
... Sew the clothes	0.58	0.00	0.26	0.38
... Engage to engineering	0.11	0.02	0.32	0.83
... Washing the dishes	0.29	0.01	0.37	0.24
... Ironing	0.56	0.00	0.63	0.83
... Cooking	0.65	0.01	0.37	0.24

	χ^2 Gender			
	Primary Students	Secondary Students	University Students	University Graduates
Stereotypes about competences and capabilities (SCC)				
Men are more qualified than women to do technical and mechanical tasks	0.03	0.00	0.88	0.48
Women are better able to do organizational and cooperative tasks	0.27	0.06	0.31	0.38
Girls' performance is better in arts, humanities and social sciences majors	0.00	0.00	0.72	0.52
The performance of boys is better in scientific-technical careers	0.02	0.00	0.64	-
In the labour market, girls are better in professions related to care and services	-	0.00	0.88	0.26
In the job labour, boys are better at STEM professions	-	0.00	0.69	0.21
Stereotypes about social responsibility (SSR)				
Men are responsible for supporting their families financially	0.07	0.00	0.34	0.24
Women should worry about the house and taking care of their children.	0.00	0.00	0.20	0.24

References

- Marchisio, M.; Barana, A.; Fissore, C.; Pulvirenti, M. Digital Education to Foster the Success of Students in Difficulty in Line with the Digital Education Action Plan. *EDEN Conf. Proc.* **2021**, *1*, 353–363. [CrossRef]
- Alexiadou, N.; Rambla, X. Education policy governance and the power of ideas in constructing the new European Education Area. *Eur. Educ. Res. J.* **2022**, *4*, 14749041221121388. [CrossRef]
- Kushnir, I. Referentiality mechanisms in EU education policymaking: The case of the European Education Area. *Eur. J. Educ.* **2022**, *57*, 128–141. [CrossRef]
- Martínez, M.; Segura, F.; Andújar, J.M.; Ordóñez, R. ALAS: Accompanying girls towards STEM careers. An experimental study from primary to higher education. In Proceedings of the 6th IEEE Eurasian Conference on Educational Innovation, Singapore, 3–5 February 2023.
- Martínez, M.; Segura, F.; Andújar, J.M.; Ceada, Y.; Martín, M.J. Study on the Low Presence of Women in the STEM field. Search for Reasons to Be Able to Increase Participation. In Proceedings of the V Jornadas ScienCity 2022. Fomento de la Cultura Científica, Tecnológica y de Innovación en Ciudades Inteligentes, Huelva, Spain, 14–16 November 2022; pp. 10–13.
- Secretaría General de Universidades. Datos y Cifras del Sistema Universitario Español. Publicación 2021–2022. In Datos y Cifras. 2022. Available online: https://www.universidades.gob.es/stfls/universidades/Estadisticas/ficheros/DyC_2021_22.pdf (accessed on 12 March 2023).
- Langdon, D.; McKittrick, G.; Beede, D.; Khan, B.; Doms, M. STEM: Good Jobs Now and for the Future. In ESA Issue Brief #03-11. 2011; pp. 37–49. Available online: <https://eric.ed.gov/?id=ED522129> (accessed on 12 March 2023).
- Fallis, A. Encouraging STEM Studies for the Labour Market. *J. Chem. Inf. Model.* **2015**, *53*, 1689–1699.
- U.S. Bureau of Labor Statistics. Employment Projections. 2022. Available online: <https://www.bls.gov/emp/tables/stem-employment.htm> (accessed on 12 March 2023).
- Tres Bishop, D. The Hard Truth About Soft Skills. *Muma Bus. Rev.* **2017**, *1*, 233–239. [CrossRef] [PubMed]
- Mely, W.; Br, B.; Nirwana, D.; Manulang, R. The Effect of Organizational Learning on Improving Hard skills, Soft Skills, and Innovation on Performance. *J. Prajaiswara* **2022**, *3*, 126–146.
- Schislyeva, E.R.; Saychenko, O.A. Labor Market Soft Skills in the Context of Digitalization of the Economy. *Soc. Sci.* **2022**, *11*, 91. [CrossRef]

13. Karimi, H.S.; Piña, A.A. Strategically Addressing the Soft Skills Gap Among STEM Undergraduates. *J. Res. STEM Educ.* **2021**, *7*, 21–46. [CrossRef]
14. Attström, K.; Niedlich, S.; Sandvliet, K.; Kuhn, H.-M.; Beavor, E. Mapping and Analysing Bottleneck Vacancies in EU Labour Markets—Overview Report. 2014, p. 122. Available online: <https://ec.europa.eu/eures/downloadSectionFile.do?fileId=8010> (accessed on 12 March 2023).
15. García-Holgado, A.; Verdugo-Castro, S.; González, C.; Sánchez-Gómez, M.C.; García-Peñalvo, F.J. European Proposals to Work in the Gender Gap in STEM: A Systematic Analysis. *IEEE Rev. Iberoam. Tecnol. Aprendiz.* **2020**, *15*, 215–224. [CrossRef]
16. McDaniel, A. The role of cultural contexts in explaining cross-national gender gaps in STEM expectations. *Eur. Sociol. Rev.* **2016**, *32*, 122–133. [CrossRef]
17. García-Holgado, A.; Mena, J.; García-Peñalvo, F.J.; Pascual, J.; Heikkinen, M.A.; Harmoinen, S.; García, L.; Niebles, R.P.; Amores, L. Gender equality in STEM programs: A proposal to analyse the situation of a university about the gender gap. In Proceedings of the 2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Porto, Portugal, 27–30 April 2020; Volume 21, pp. 1–9.
18. Dulce-Salcedo, O.V.; Maldonado, D.; Sánchez, F. Is the proportion of female STEM teachers in secondary education related to women’s enrollment in tertiary education STEM programs? *Int. J. Educ. Dev.* **2022**, *91*, 102591. [CrossRef]
19. Jiang, X. Women in STEM: Ability, preference, and value. *Labour Econ.* **2021**, *70*, 101991. [CrossRef]
20. Kumar, S.C.; Haber, A.S.; Ghossainy, M.E.; Barbero, S.; Corriveau, K.H. The impact of visualizing the group on children’s persistence in and perceptions of STEM. *Acta Psychol.* **2023**, *233*, 103845. [CrossRef] [PubMed]
21. Gawel, A.; Krstić, M. Gender Gaps In Entrepreneurship And Education Levels From The Perspective Of Clusters Of European Countries. *J. Dev. Entrep.* **2021**, *26*, 2150024. [CrossRef]
22. Pintrich, P.R.; Groot, E.V. De Motivational and self-regulated learning components of classroom. *J. Educ. Psychol.* **1990**, *82*, 33–40. [CrossRef]
23. Bandura, A. Self-Efficacy: The Exercise of Control; W H Freeman/Times Books/Henry Holt & Co. 1997. Available online: <https://psycnet.apa.org/record/1997-08589-000> (accessed on 12 March 2023).
24. Eccles, J.S.; Wigfield, A. Motivational beliefs, values, and goals. *Annu. Rev. Psychol.* **2002**, *53*, 109–132. [CrossRef]
25. Wigfield, A.; Eccles, J.S. Expectancy-Value Theory of Achievement Motivation. *Contemp. Educ. Psychol.* **2000**, *25*, 68–81. [CrossRef]
26. Eccles, J.S.; Freedman-Doan, C.; Frome, P.; Jacobs, J.; Yoon, K.S. Gender-role socialization in the family: A longitudinal approach. In *The Developmental Social Psychology of Gender*; Lawrence Erlbaum Associates Publishers: Mahwah, NJ, USA, 2000; pp. 333–360.
27. Eagly, A.H.; Wood, W. Social role theory. *Handb. Theor. Soc. Psychol.* **2012**, *2*, 458–476. [CrossRef]
28. Eagly, A.H. *Sex Differences in Social Behavior: A Social-Role Interpretation*; John, M., Ed.; MacEachran Memorial Lecture Series; 1985; Lawrence Erlbaum Associates, Inc.: Hillsdale, NJ, USA, 1987.
29. Eagly, A.H.; Wood, W.; Diekmann, A.B. Social role theory of sex differences and similarities: A current appraisal. In *The Developmental Social Psychology of Gender*; Lawrence Erlbaum Associates Publishers: Mahwah, NJ, USA, 2000; pp. 123–174.
30. Deaux, K.; Lewis, L.L. Structure of gender stereotypes: Interrelationships among components and gender label. *J. Pers. Soc. Psychol.* **1984**, *46*, 991–1004. [CrossRef]
31. Deaux, K.; Winton, W.; Crowley, M.; Lewis, L.L. Level of categorization and content of gender stereotypes. *Soc. Cogn.* **1985**, *3*, 145–167. [CrossRef]
32. Sáinz, M.; Meneses, J.; López, B.-S.; Fàbregues, S. Gender Stereotypes and Attitudes Towards Information and Communication Technology Professionals in a Sample of Spanish Secondary Students. *Sex Roles* **2016**, *74*, 154–168. [CrossRef]
33. Hannover, B.; Kessels, U. Self-to-prototype matching as a strategy for making academic choices. Why high school students do not like math and science. *Learn. Instr.* **2004**, *14*, 51–67. [CrossRef]
34. Sturrock, G.R.; Zandvliet, D.B. Citizenship Outcomes and Place-Based Learning Environments in an Integrated Environmental Studies Program. *Educ. Sci.* **2023**, *13*, 292. [CrossRef]


Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

ANEXO II. Resultados de investigación derivados del objetivo 2

ANEXO II.A

Certificado de Participación en las IV Jornadas ScienCity 2021 de divulgación científica, tecnológica y de innovación en el ámbito de las Ciudades Inteligentes.



Código Seguro de verificación: 0ttdGX/743V31yz2rC+dgwQ==. Permite la verificación de la integridad de una copia de este documento electrónico en la dirección: https://verificafirma.uhu.es/verificafirma Este documento incorpora firma electrónica reconocida de acuerdo a la Ley 59/2003, de 19 de diciembre, de firma electrónica.			
FIRMADO POR	SALVADOR PEREZ LITRAN	FECHA	29/11/2021
ID. FIRMA	firma.uhu.es	PÁGINA	1/1
 0ttdGX/743V31yz2rC+dgwQ==			

ANEXO II.B

Standardized Remote Laboratories Based on Renewable Energy Sources for REOPEN European University Network

M. Martínez, R. García, F. Segura, J.M. Andújar

Presentado en:



Evento: IV Jornadas ScienCity 2021 de divulgación científica, tecnológica y de innovación en el ámbito de las Ciudades Inteligentes.

Organizador: Departamento de Ingeniería Electrónica, Sistemas Informáticos y Automática (DIESIA) y el Departamento de Tecnologías de la Información (DTI) pertenecientes a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) de la Universidad de Huelva (UHU).

Fecha: 17 - 19 de noviembre de 2021.

Lugar: Universidad de Huelva

Standardized Remote Laboratories Based on Renewable Energy Sources for REOPEN European University Network

M. Martínez, R. García, F. Segura, J.M. Andújar

Grupo de Investigación de Control y Robótica TEP-192, Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva, Spain
macarena.martinez@diesia.uhu.es

Abstract- This paper presents a prominent e-learning tool that is part of the collaborative European project RE-OPEN (Ref. 2020-1-IT02-KA226-HE-095424). Focused on the European energy transition and the problems derivatives from COVID-19, this project offers an educational tool to bring the digital transition to higher education. To undertake such challenge, the University of Huelva has implemented a remote laboratory based on supercapacitor power bank. This laboratory will help students to acquire knowledge from a distance. As a remote laboratory, it ensures complete accessibility and availability to users from every part in the world, requiring fewer resources and contributing to the democratization of education.

Keywords- Remote laboratory, standardised ICT, European Digital Action Plan, European Green Deal

I. INTRODUCCIÓN

On 11 March 2020, World Health Organization (WHO) elevated the public health emergency situation caused by COVID-19 to an international pandemic. Due to this, on 14 March 2020 a state of alarm was decreed throughout the national territory [1]. Among the restrictions implemented, it is found in home confinement and the suspension of the presence in the classrooms.

This interruption highlights the need to bring the digital transition to the classroom, adapting educational system to the new available technological resources.

Although all educational areas were affected, STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) careers have been particularly affected, as hands-on experiments are crucial parts of science and technology education [2].

Among the different types of laboratories that exist, remote laboratories [3] stand out:

- They are available for the students at the time and place of their choice, as long as there is an internet connection available.
- The user interface can utilize many softwares to make the system available on many platforms, ranging from desktop and laptop PCs, to tablets and smart phones.
- They are beneficial for students who has work besides their studies, are ill, or are otherwise hindered from participating in the laboratory at the times set up by the staff.
- The students can also repeat the laboratory exercises as many times as they desire without any extra assistance required from staff, in order to gain a better understanding and further knowledge.
- Can be shared between universities, and the number of

remote laboratories available for the students can be much higher than the number present at their own university.

A. RE-OPEN Project

In this context, the RE-OPEN project (Remote Laboratories Practical Experiments on renewable energies at EU universities) is framed, an European Erasmus + project that is working to promote the digital transformation of Higher Education by encouraging an easy and constant access to experimental labs on renewable energies at European Union (EU) universities. RE-OPEN is the solution to overcome the challenges of online education by creating an infrastructure of collaborative remote laboratories in EU universities [4].

The incorporation of theoretical lessons on renewable energy subjects will facilitate the implementation of remote laboratories based on renewable energies. These laboratories will facilitate the energy transition, complying with the objectives proposed by the European Green Deal and the Digital Education Action Plan (2021 - 2027).

The European Green Deal, which was published by the European Commission in December 2019, outlines a plan to achieve net greenhouse gas emissions by 2050 in Europe [5]. The proposed actions will definitely affect the energy sector, which will be based on renewable energy sources.

Additionally, the Digital Education Action Plan (2021 - 2027) is a renewed initiative of EU to support a sustainable and effective adaptation of the education and training systems of the EU Member States to the digital age [6].

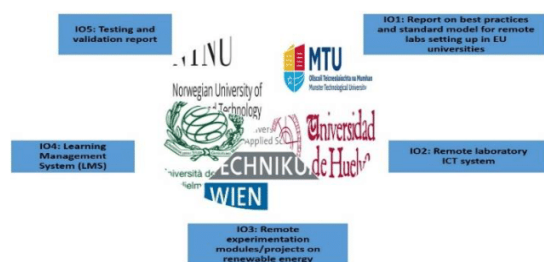


Fig. 1. Intellectual Outputs (IO) of each European university

There are 5 participating universities from 5 Member States, specialized in training in energy technologies that have already adopted innovative training methodologies. The participating EU universities are: Università degli Studi Guglielmo Marconi from Italy as coordinator, Fachhochschule Technikum Wien from Austria, Munster Technological University from Ireland, Norwegian University of Science and

Technology from Norway, the University of Huelva from Spain. Additionally, the project includes the ICT company VJ Technology from Italy [7].

As shown in Fig. 1, each partner is responsible for one Intellectual Output (IO). In a first stage, the Munster Technological University has analysed the results of the questionnaires made to students, professors, and technical staff from the different participating universities. The data obtained is shown in Fig. 2.

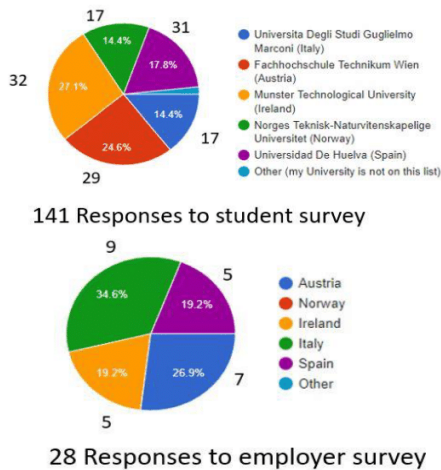


Fig. 2. Survey data collection

The results showed that the University of Huelva is, among the participants, the entity that achieves the best score (4.5/5) in relation to the degree of satisfaction of students and professors in which experimental practices are useful to identify strengths and limitations of theoretical models as predictors of real-world behaviour. Fig. 3 shows the results of the questionnaires.

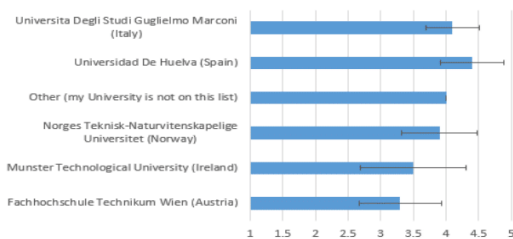


Fig. 3. Results of the questionnaires

The second part of the project is coordinated by the University of Huelva and the activities are: mapping of the hands-on/remote labs in EU universities, designing standard Information and communications technology (ICT) based learning solutions and pedagogical models of remote laboratories (Arduino board, LabView software).

II. SUPERCAPACITORS REMOTE LABORATORY

A. Technical requirements

In this context, the University of Huelva has decided to implement a remote laboratory based on supercapacitor (SC)

power bank, as alternative energy storage system that offers high energy densities and a large capacity for rapid charging and discharging. The objective is to develop a monitoring and control system that allows students to visualize and study the charging and discharging curves of the SC power bank. This remote laboratory is made up by: (1) a real plant based on SC power bank, (2) a communication interface that sends the video signal from the laboratory to a server and allows the communication between the students' computer and the remote laboratory facility, and (3) a user interface integrated into Moodle. In this case, Moodle is used as the Learning Management System (LMS). The experiment is available for students 24 hours a day, 365 days a year, by means of a reservation system, also integrated into the LMS [8].

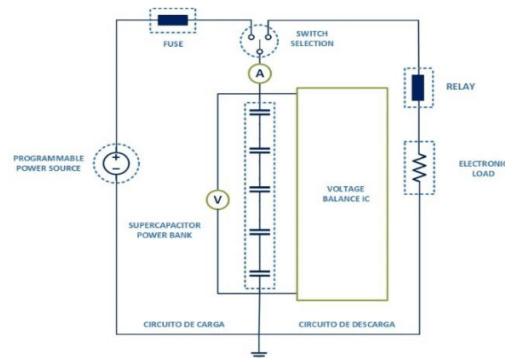


Fig. 4. System architecture

Fig. 4 shows a general diagram of the physical plant. The SC power bank is permanently connected to the acquisition system, measuring the voltage (V) and the current (A) flowing through them. The charging current must be limited below the maximum current supported by the supercapacitor model and the maximum voltage supplied by SC must be limited between 2,1 V and 2,7 V. Respecting the manufacturer's nominal voltage is essential to avoid permanent damage of the equipment or the reduction of its lifetime. Awareness of this issue is key when connecting supercapacitors in series. The main parameters of the plant are shown in Table I.

TABLE I
COMPONENT SPECIFICATIONS

Component	Parameter
Supercapacitor power bank	Capacity: 5000 F
	Surge voltage: 2,85 VDC
	Operating voltage: 2,7 VDC
	Max. Continuous current: 210 A
Programmable power source	Input voltage: 220 VAC
	Output voltage: 0 – 30 VDC
	Output current: 0,1 – 100 A
Resistor power bank	Output power: 3000 W
	Resistance: 1 Ω
	Power rating on std heatsink @ 25°C: 200 W
Relay module	Normally open interface maximum load: 250 VAC/30 A; 30 VDC/30 A
	Trigger current: 3 mA
	Working voltage: 12 V
Fuse	Rated current: 100 A
	Rated voltage: 500 VAC
Voltage Balance IC	Input Voltage Range : 8 – 24 VDC
	Cell Voltage Detection Range : 2,4V – 3,1VDC

B. System description



Fig. 5. SC remote laboratory. Component layout

Depending on the experiment, the SC power bank (1, Fig. 5) will be connected to the charge or discharge circuit by means of a selector switch (2, Fig. 5). The selector switch will be implemented by an SPDT relay.

For the charging process, a programmable power source (3, Fig. 5) will be used, following the system conditions imposed in Table II. A protection fuse (4, Fig. 5) is included for the charging process. Since it must be programmed remotely, an essential requirement is that it allows serial programming (RS-232 protocol), compatible with the Arduino microcontroller. To ensure equal charging of each SC, a charge regulator (5, Fig. 5) is used which will set 12 VDC on the SC power bank.

In the same way, the discharge circuit connects the SC power bank with an electronic load (6, Fig. 5), in this case formed by a bank of 8 power resistors, and some relay modules as a protection measure.

An Arduino microcontroller (7, Fig. 5) will be used for the control and acquisition system. The user, in this case the student, making use of a computer (8, Fig. 5), will remotely access the laboratory, which he will view through a USB camera (9, Fig. 5) that transmits in real time, located in the physical laboratory. Finally, the student will be able to interact with the system through the user interface (10, Fig. 5).

TABLE II
SYSTEM SPECIFICATIONS

Operating voltage SC: 2,4 VDC
Operating voltage SC power bank: 12 VDC
Charging current: 0 – 100 A
Discharging current: 0 – 96 A

C. User interface

The user interface designed for the application is shown in Fig. 6. This interface was developed in LABVIEW, and has been integrated into Moodle, which is used as LMS. The user interface is accessible through a reservation management platform 24 hours a day, 365 days a year.

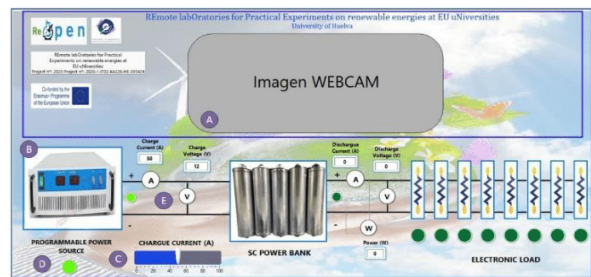


Fig. 6. User interface in LABVIEW (charge)

Attending to the developed user interface, two parts can be distinguished. In the first one, the video image taken from the USB camera (item A, Fig. 6) is displayed. From this picture, students can easily check the operation of the plant, which be necessary in various experiments. The second part of the user interface includes all the controls that the student can use to operate the system. First, the student will turn on the programmable power source (item B, Fig. 6) and then choose the load current (20 A, 40 A, 60 A, 80 A and 100 A) on the slider (item C, Fig. 6). Once charging begins, an indicative green LED (item D, Fig. 6) will light up. The current and voltage values can be viewed on the displays (item E, Fig. 6).

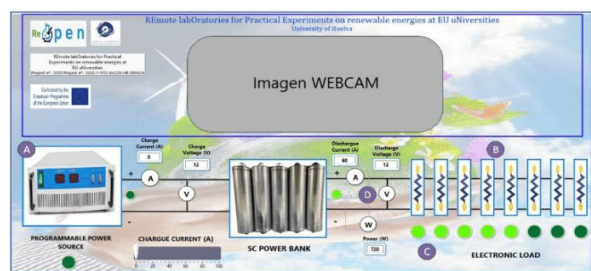


Fig. 7. User interface in LABVIEW (discharge)

Once the SC power bank is charged to 12VDC, the discharge process will begin. Next, the student must turn off the programmable power source (item A, Fig. 7) and choose

the number of resistors (item B, Fig. 7) to turn on to discharge the bank. The discharge current will depend on the number of resistors turned on. Once the download begins, an indicative led will light up (item C, Fig. 7). The current and voltage values can be viewed on the displays (item D, Fig. 7). By clicking on the image of the SC power bank, the student will be able to visualize the different loading and unloading curves that are generated. This screen is shown in Fig. 8.

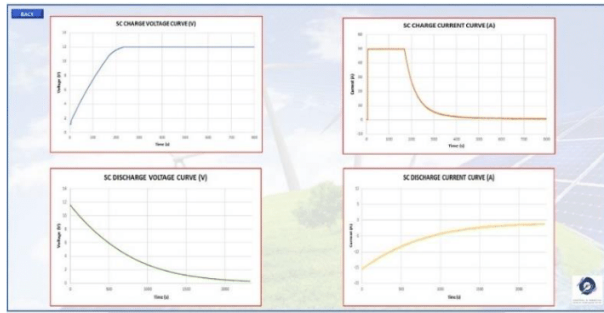


Fig. 8. User interface in LABVIEW (graphs)

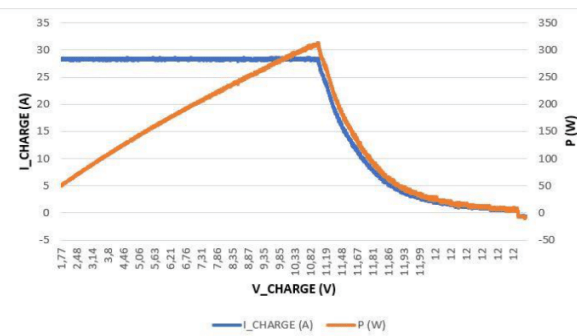


Fig. 9. Experimental V-I and V-P curves of the charging process

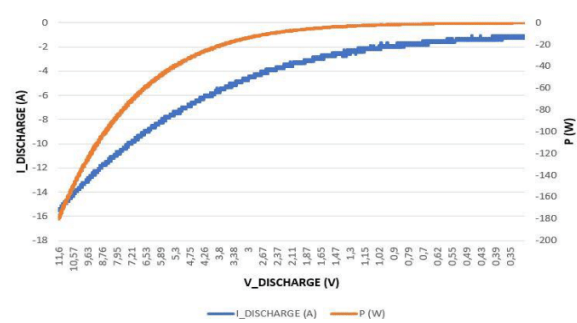


Fig. 10. Experimental V-I and V-P curves of the discharging process

III. EXPERIMENTAL RESULTS

In the following section the laboratory practice activities are presented, reporting graphs of real measurements obtained during the remote laboratory tests.

Several tests of charging and discharging of the SC power bank are carried out. Fig. 9 shows the V-I and V-P graphs of the charge of the SC power bank up to 12 VDC with the programmable power source at a charging current of 30 A.

Similarly, Fig. 10 shows the V-I and V-P graphs of the SC power bank discharge down to 0 VDC with a resistor power bank at a discharging current of about 16 A.

LIST OF ACRONYMS

- EU: European Union
- ICT: Information and communications technology
- IO: Intellectual Output
- LMS: Learning Management System
- RE-OPEN: Remote labORatories Practical Experiments on renewable energies at EU uNiversities
- SC: Supercapacitor
- SPDT: Single Pole Double Throw
- STEM: Science, Technology, Engineering and Mathematics
- WHO: World Health Organization

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been developed under RE-OPEN project Ref. 2020-1-IT02-KA226-HE-095424, found by ERASMUS+ Programme 2020 – KA2.

REFERENCES

- [1] Ministerio de la Presidencia España, “Real Decreto 463/2020, de 14 de marzo, por el que se declara el estado de alarma para la gestión de la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19,” *Boletín Of. del Estado*, vol. 67, pp. 25390–25400, 2020.
- [2] F. J. Vivas *et al.*, “Hy2Green: Remote laboratory of hydrogen technologies as an e-learning tool for training new professionals adapted to the new European energy model,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 17556–17563, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2668.
- [3] D. A. H. Samuelsen and O. H. Graven, “Remote laboratories in engineering education - an overview of implementation and feasibility,” no. July 2016, pp. 20–22, 2016, doi: 10.18687/laccei2016.1.1.050.
- [4] “RE-OPEN Project”.
- [5] European Commission, “The European Green Deal,” *Eur. Comm.*, vol. 53, no. 9, p. 24, 2019, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [6] European Commission, “Digital Education Action Plan 2021-2027,” *Eur. Comm.*, p. 20, 2020.
- [7] P. Release, “RE-OPEN: the European Universities network to promote the setting up of Remote laboratories for teaching Renewable Energies,” pp. 1–3, 2021.
- [8] F. J. Vivas *et al.*, “Hy2Green . The Role of Remote Laboratory in Times of Confinement An Example for Education in Hydrogen Technology,” pp. 28–31, 2020.

ANEXO II.C

Certificado de Participación en el IEEE 6th Eurasian Conference on Educational Innovation (IEEE ECEI2023)



ANEXO II.D

Challenges of Digital Transition in Engineering Careers: Solution Based on Standardized Renewable Source-based Remote Laboratories

M. Martínez, F. Segura, J.M. Andújar, L. del Zotto, M. Tabakovic, T. O'Mahony

Presentado en:



Evento: IEEE 6th Eurasian Conference on Educational Innovation (IEEE ECEI2023).

Organizador: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); Science Education Center; National Taiwan Normal University; Singapore University of Social Sciences; International Institute of Knowledge Innovation and Invention (IIKII)

Fecha: 3 – 5 de febrero de 2023.

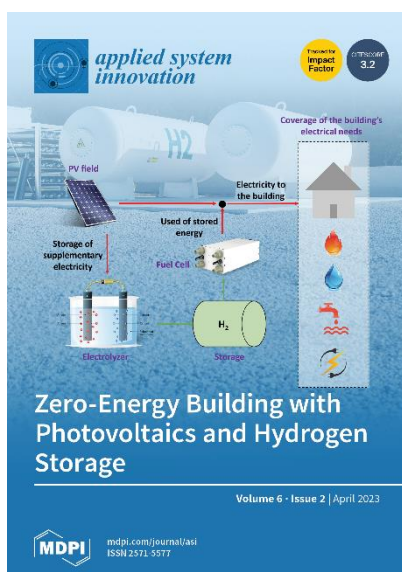
Lugar: Singapore, Tailandia.

ANEXO II.E

The Challenge of Digital Transition in Engineering. A Solution Made from a European Collaborative Network of Remote Laboratories Based on Renewable Energies Technology

M. Martínez, F. Segura, J.M. Andújar

Publicado en:



Revista: Applied System Innovation

Editorial: MDPI

Editor Jefe: Prof. Dr. Christos Douligeris

Referencia: Volumen 6, Edición 2

Año: 2023

DOI: <https://doi.org/10.3390/asi6020052>

Categoría	Ranking de revistas / Total de revistas	Cuartil
Control and Systems Engineering	86 / 286	Q2
Engineering, Electrical & Electronic	140 / 349	Q2
JCR (2022)	3.8	
CiteScore (2022)	4.9	
Lecturas	855	
Citas	1	

Article

The Challenge of Digital Transition in Engineering. A Solution Made from a European Collaborative Network of Remote Laboratories Based on Renewable Energies Technology

Macarena Martínez *, Francisca Segura  and José Manuel Andújar 

Research Centre CITES, University of Huelva, 21007 Huelva, Spain

* Correspondence: macarena.martinez@diesia.uhu.es; Tel.: +0034-959-21-73-80

Abstract: Society currently faces two crucial challenges: digital transition and energy transition. Educative innovation plays a key role in this challenging scenario, particularly engineering careers, where laboratory practices are as important as theoretical classes. This paper presents a standardized training platform supported by five European universities which include a remote laboratory experience. Each university is responsible for developing a training module under the guidance provided by the responsible entity (University of Huelva, Spain). For this purpose, the University of Huelva has implemented a remote laboratory based on a supercapacitor power bank. The rest of the universities have selected any other renewable source and have replicated the information and communications technology (ICT) infrastructure. The result is a European network materialized on a homogenized platform where teachers and students can find all the teaching materials (theory and practice) to train and to be trained in renewable energy matters in the new digital era.

Keywords: digital transition; engineering training; renewable energy education; remote laboratory; European university network



Citation: Martínez, M.; Segura, F.; Andújar, J.M. The Challenge of Digital Transition in Engineering. A Solution Made from a European Collaborative Network of Remote Laboratories Based on Renewable Energies Technology. *Appl. Syst. Innov.* **2023**, *6*, 52. <https://doi.org/10.3390/asi6020052>

Academic Editor: Claudio Zunino

Received: 17 March 2023

Revised: 11 April 2023

Accepted: 17 April 2023

Published: 20 April 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The evolution of teaching has changed from the times when the teacher was a figure of considerable authority, and classes resembled monologues, to today, where education makes the student the protagonist of his or her own learning process, encouraging creativity and participation.

Apart from the teacher–student role and academic methodologies, since 2020, the face-to-face nature of the classroom has undergone significant changes. With the arrival of COVID-19 [1], the face-to-face nature of the classroom, especially higher education, has undergone significant changes. Modern higher education combines face-to-face classes with online learning [2].

This change in the method of teaching affects higher education [3–5], especially in scientific–technological areas, where a large part of the training depends on laboratory practices. Digital transition in education [6], especially in engineering, cannot be immediate, because students are unable to complete their training without practice with real systems. In order to adapt to this new digital scenario, remote laboratories appear as an interesting solution [7,8]. The main four types of laboratories are explained below and shown in Figure 1:

- Virtual laboratory with local access (Figure 1a): The environment is virtual and is accessed locally. All experimental work is performed in a computer simulation. The software tool is installed on a computer that meets the requirements to run it.
- Virtual laboratory with remote access (Figure 1b, virtual laboratory): The environment is simulated, and the student accesses through the Internet. The student uses an experimentation interface of a simulated system via the Internet.

- Real laboratory with local access (Figure 1c): This represents the face-to-face traditional laboratory where the student performs experiments in a physical plant located in the same room.
- Real laboratory with remote access (Figure 1d, remote laboratory): There is a real environment which the student accesses through the Internet. The user is able to manipulate the real plant from anywhere, thus providing greater facilities to students.

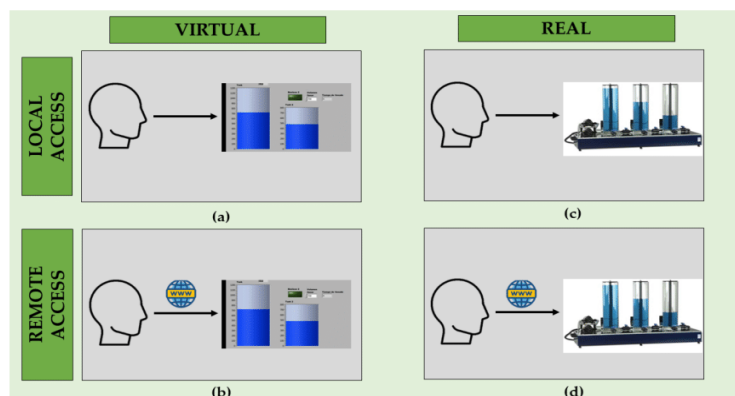


Figure 1. Types of laboratories: (a) virtual laboratory with local access; (b) virtual laboratory with remote access; (c) real laboratory with local access; (d) real laboratory with remote access.

The main advantages of remote laboratories are [9,10]:

- Remote laboratories can be accessed 24 h/7 days a week from an Internet connection, without requiring staff supervision.
- Due to more efficient sharing of resources, educational institutions can satisfy laboratory demand with less equipment.
- Students from universities with fewer resources can make use of high-tech laboratories.
- Students with difficulties in adjusting their work timetable with their class timetable have greater ease when conducting laboratory practices.
- The user interface is available to be run on several platforms, ranging from desktop and laptop PCs to tablets and smart phones.
- Students can also repeat the laboratory practice as many times as they desire without any extra assistance required from staff in order to gain a better understanding and further knowledge.
- Remote experiences can be shared between universities, and students have at their disposal a higher number of laboratories.
- Remote laboratories allow access to state-of-the-art experiments, avoiding risks of equipment damage and accidents.

With such advantages, many universities have decided to implement remote laboratories in their educational methodology to adapt to this coming digital era.

Summarizing the above, taking into account the advantages of remote laboratories and how the European Union (EU) aims to adapt education to the new digital era, this paper presents a solution that integrates a European collaborative network of remote laboratories based on renewable energies technology with standardized information and communications technology (ICT) infrastructure.

The next section offers a scientific literature review, revising previous related works, comparing the authors' proposal with these earlier findings, and highlighting the main contributions of the proposal. Section 3 describes the Materials and Method used to conduct the research, and results are discussed in Section 4. The main conclusions of the paper are summarized in Section 5.

2. Scientific Background. Related Works

Based on scientific literature, the following findings based on the development of remote laboratories in the field of engineering education deserve special attention. In 2014 the Institute of Information Engineering, Automation, and Mathematics, STU, in Bratislava [11], presented a remote laboratory to be used in process control courses. The remote experience allows interaction with three thermal plants, a magnetic levitation plant, and a hydraulic tank system. The same year, the Chiba Institute of Technology [12], implemented a remote laboratory that controls by pulse-width modulation (PWM) a direct current (DC) motor and measures the voltage of a single-phase alternator. The student needs only a web browser to access the remote laboratory, and it is available to be run in laptop, smartphone, or tablet. A more ambitious project was carried out by the University of Padova in 2015 in collaboration with industry [13]. They implemented a remote refrigeration laboratory running under the LabVIEW® environment, and the real physical plant was located at an industrial site. The real physical plant has a vapor compression cycle (VCC), and the system has four main components: evaporator, compressor, condenser, and expansion device. In an attempt to join education and inclusion, ITMO University of Saint Petersburg implemented a remote laboratory which allowed students with special education needs to gain knowledge in electrical engineering and electronics, control theory and systems identification [14]. In that work, the developed laboratory setup included DC motor monitoring and control. Students accessed the remote lab using LabVIEW® remote panels through a common web browser. More recently, in 2020, Slovak University of Technology in Bratislava described a remote laboratory in the area of control engineering [15]. This remote laboratory consists of three tank-based plants and applies the principles of nonlinear systems. The user interface is based on MATLAB®, the obtained data are transmitted to the client via WebSockets, and students access the remote lab via Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment (Moodle) (from Australia).

All above-described remote laboratories have been developed by single universities, without any other participating entity, except in the case of Beghi et al. (2015) [13] which included industrial collaboration.

The first example of remote laboratory network found in the scientific literature is Pastor et al. (2020) [16], where the Spanish National University for Distance Education (UNED), the German Jordanian University, and the Princess Sumaya University for Technology (PSUT) implemented a cooperative remote laboratories network. The network is built over four remote laboratories based on renewable energies: a wind and photovoltaics power trainer, where students learn the characteristics of solar photovoltaic panels and wind power generators (windmill, electric fan, solar photovoltaic panel, anemometer, temperature sensor, and load box). Students access via Moodle as a learning management system (LMS) to interact with the remote laboratory.

More recently, Northern Illinois University and the University of Illinois at Chicago developed in 2022 a virtual laboratory that controls a microgrid with renewable energy sources [17]. The laboratory simulations are performed in MATLAB/Simulink and LabVIEW®. The virtual laboratory is composed of different experimental devices: a solar tracking system, a wind turbine, and an energy storage system.

Also in 2022, a remote laboratory based on an experimental robotics course was implemented using digital twin (DT) technology, IoT technology, and the adopted analysis, design, development, implementation, and evaluation (ADDIE) teaching method. The physical plant includes an ABB IRB120 robot, and students use RobotStudio software to program and debug the robot [18]. UNIMINUTO university has implemented a low-cost and open-source remote laboratory based on tanks control to learn automatic control systems [19]. Recently, Turin Polytechnic University in Tashkent (TPPU, Tashkent, Uzbekistan) and the Politecnico di Torino (PoliTo, Italy) have developed an academic cooperation framework. The remote laboratory allow students to apply automatic control theory on a real magnetic levitation system [20]. On the other hand, the Complutense University of Madrid has implemented a remote laboratory using the Dobot Magician educational robot.

This robot is used in the practices of electronic engineering in communications and allows students to acquire knowledge about the basic principles in robotics and to detect failures in practice [21].

Based on the literature review, the authors conclude that there have been few remote laboratories developed for engineering education, and, within these few works, only one offers a network of remote laboratories, consisting of four laboratories located in different universities in Jordan. The lack of common standards in the definition and implementation of remote laboratories as well as the lack of connectivity specifications are major drawbacks to adopting and creating wide-scale networks of educational remote laboratories based on renewable energies.

In this paper, the authors propose a solution to build a complete course which integrates a standardized remote-laboratory-based network, supplementary learning material, and self-evaluation sheets, where each laboratory is located at a different place (each laboratory is located at each university). The student accesses through a common Moodle-based LMS, and after a single login step, he/she can select the module and the remote laboratory he/she wants to practice with. Table 1 compares the authors' proposal with related works and summarizes the main contributions.

Table 1. Comparison of design and implementation of remote laboratories in literature.

Reference	Type of Laboratory	Application	LMS	Booking System	Standardized ³ ICT Solution	ICT Hardware and Software
Authors' proposal	Real laboratory with remote access ¹	Renewable energy residential	Yes	Yes	Yes	Arduino ⁶ + LabVIEW (UI) ⁷ + LMS (Moodle) ⁸
[11]	Real laboratory with remote access	Engineering education	No	No	No	Raspberry Pi ⁸ + Arduino + HTML ⁵ ⁹ and JavaScript ¹⁰ (client) + PHP ¹¹ and MySQL ¹² (server) + JSON ¹³ (data transfer)
[12]	Real laboratory with remote access	Engineering education	No	No	No	HS/3069F microcomputer board + TCP and UDP + WebSocket + HTML, CSS ¹⁴ and JavaScript (UI)
[13]	Real laboratory with remote access	Engineering education ⁴	No	No	No	VNC ¹⁵ + DAQ (NI-CompactDAQ) + LabVIEW (UI)
[14]	Real laboratory with remote access	Engineering education	No	No	No	NI ELVIS II + LabVIEW + TCP/IP protocol
[15]	Real laboratory with remote access	Engineering education	Yes	No	No	MATLAB ¹⁶ + WebSockets + JavaScript + USB interface
[16]	Real laboratory with remote access	Engineering education	Yes	No	Yes	LMS (Moodle) ⁵
[17]	Virtual laboratory with remote access ²	Engineering education	No	No	No	MATLAB/Simulink + LabVIEW + Microsoft.Net Core ¹⁷ + TCP/IP protocol + SolidWorks ¹⁸ + Inkscape ¹⁹ + Fritzing ²⁰ + CanvasJS ²¹ + jQuery + JSON

Table 1. Cont.

Reference	Type of Laboratory	Application	LMS	Booking System	Standardized ³ ICT Solution	ICT Hardware and Software
[18]	Real laboratory with remote access	Engineering education	No	No	No	Raspberry Pi + RobotStudio ²² + Unity3D ²³ + OPC UA protocol + MATLAB/Simulink
[19]	Real laboratory with remote access	Engineering education	No	No	No	Raspberry Pi 4 + Janus WebRTC Server ²⁴ + NodeJS ²⁵ + Flask ²⁶ + ACE code editor and highlighter + Redis ²⁷
[20]	Real laboratory with remote access	Engineering education	No	Yes	Yes	NI MyRIO board + LabVIEW
[21]	Real laboratory with remote access	Engineering education	Yes	No	No	Raspberry Pi + Dobot ²⁸ + Python ²⁹ + EJS ³⁰

¹ A remote laboratory is defined as an environment where a student remotely controls a process and/or device through a network. Under this scheme, the student uses and controls the available resources in a laboratory by means of the use of sensors and instrumentation to undertake actual interaction with real equipment, instead of using programs that simulate the processes to be observed and studied. ² A virtual laboratory is defined as a computer-simulated environment in which the conditions for experimentation typical of a conventional laboratory are recreated using generic or specific computer software. ³ A standardized model involves collaboration between different universities. ⁴ This remote laboratory is for engineering education, but the physical plant is located in an industrial site, not at a university. ⁵ Pastor et al. (2020) [16] do not provide further information on communication protocols or software/hardware resources used. ⁶ Arduino (Italy). ⁷ LabVIEW (United States). ⁸ Raspberry Pi (United Kingdom). ⁹ HTML5 (Switzerland). ¹⁰ JavaScript (United States). ¹¹ PHP (PHP Group). ¹² MySQL (United States). ¹³ JSON (United States). ¹⁴ CSS (Switzerland). ¹⁵ VNC (United Kingdom). ¹⁶ MATLAB (United States). ¹⁷ Microsoft.Net Core (United States). ¹⁸ SolidWorks (France). ¹⁹ Inkscape (United States). ²⁰ Fritzing (Germany). ²¹ CanvasJS (Australia). ²² RobotStudio (Switzerland). ²³ Unity3D (Denmark). ²⁴ Janus WebRTC Server (Italy). ²⁵ NodeJS (United States). ²⁶ Flask (United States). ²⁷ Redis (Italy). ²⁸ Dobot (Spain). ²⁹ Python (United States). ³⁰ EJS (Spain).

The main novelties of the proposal are:

1. A collaborative training platform based on standardized remote laboratories is developed. The training platform is made up of five EU universities.
2. The application: the remote laboratory is based on renewable energy with the aim of contributing to training skills required from students in the new energy model.
3. An LMS using a cooperative Moodle platform. All participating universities are able to create content and teaching material for the cooperative training platform.
4. A booking system: with this tool, the student selects the date and time to carry out the remote experience.
5. A standardized ICT solution that can unify the criteria for the five participant universities. All higher institutions have followed the same ICT standards. This provides replicability and scalability and makes it easy to add new devices at the laboratory and incorporate new universities in the collaborative network.
6. ICT hardware and software: Arduino + LabVIEW (UI) + Enlarge/MyFrontier + Moodle platform.

3. Materials and Method

3.1. REOPEN Approach. Context and Task Distribution

The remote laboratories for practical experiments on renewable energies at EU universities (REOPEN) approach provides easier access for students to scientific–technological laboratory experiments when the student is away from the university campus. The result is a collaborative platform made up of standardized remote-laboratory-based training modules developed by EU universities. The aim is to create a new educational model with the implementation of remote laboratories, merging traditional and online learning. The

remote laboratories are based on renewable energies with the aim of contributing to those training skills in energy transition required from students.

The European universities participating in the REOPEN project are Guglielmo Marconi University (Italy), University of Applied Sciences Technikum Wien (Austria), Munster Technological University (Ireland), Norwegian University of Science and Technology (Norway) and the University of Huelva (Spain). Each of these universities is in charge of one intellectual output (IO), as shown in Figure 2.



Figure 2. Intellectual outputs (IOs) of each European university.

Munster Technological University (MTU) oversees IO1 to collect experiences in development and use of hands-on, virtual, and remote laboratories. Additionally, MTU is in charge of analyzing the use of remote laboratories in Engineering and science, technology, engineering, and mathematics (STEM) careers and designing a pedagogical model of remote laboratories. The consortium has distributed surveys to professors (Figure 3a), students (Figure 3b), and industry workers (Figure 3c) between the five member countries. The results obtained from these surveys are detailed in [22].

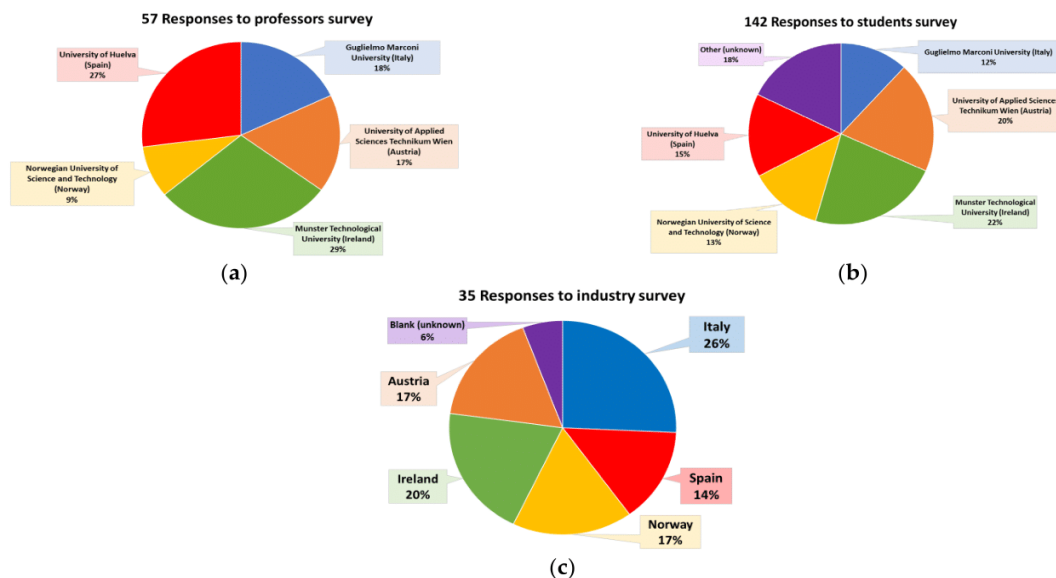


Figure 3. Survey data collection: (a) Responses to professors' survey; (b) Responses to students survey; (c) Responses to industry survey.

One of the objectives of these surveys was to find out how motivating students, professors, and industry workers found the laboratory experience, their levels of enjoyment with the laboratory, and their overall satisfaction and levels of interest in the laboratory. Figure 4 shows how the University of Huelva (UHU) achieved the highest degree of satisfaction (4.5/5).

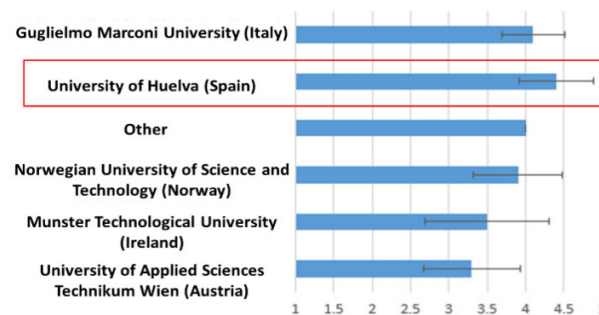


Figure 4. Satisfaction level with laboratory practices. Results from surveys of professors, students, and technical staff.

On the other hand, the University of Huelva (UHU) is responsible for IO2, defining the standard ICT for the remote laboratory, establishing the communication system, including the use of programmable devices for the remote connection of the experimental devices, establishing the harmonized and standardized remote lab infrastructure, and the elaboration of guidelines for the user. The implementation of the remote laboratory ICT infrastructure is based on the architecture shown in Figure 5. The user, who must have a computer with Internet connection (item 1, Figure 5), accesses the REOPEN Moodle platform (item 2, Figure 5), where the five remote laboratories are hosted. Next, the REOPEN Moodle platform accesses the university's local area network (LAN) through a server (item 3, Figure 5). The intranet and server are located at the university, where the experiment hardware is located. A computer is also connected to the university's LAN. The computer (item 4, Figure 5) can be a personal computer (PC), a mini-PC, a Raspberry Pi, or a similar device that allows the installation of an operating system (OS) and has an Internet connection. Thus, the user interface (UI) is a software tool, for example a LabVIEW[®] file, that runs on the computer. The user accesses the UI via the Internet and, therefore, can operate the physical plant (item 5, Figure 5). The last element in the architecture is the physical plant. In the scheme, the plant refers not only to the renewable-based device but also all the necessary elements for the experiment automation. A proper control and monitoring system is key, gathering the functions of operating the plant, monitoring its status, and exchanging data with the UI; that is, it is connected to the minicomputer. A detailed description of the remote laboratory implementation is given in Section 3.2.

As authors have commented, the proposed educational model and the intended EU collaborative network are built over a common basis: a renewable-based residential microgrid. Institutions have selected different remote laboratories related to different renewable energy sources to be part of the residential microgrid. As an example, this paper describes the remote laboratory developed by the University of Huelva. The ICT and infrastructure are replicated by the rest of the entities.

After the surveys and the remote laboratory implementation, University of Applied Sciences Technikum Wien (FHTW) is in charge of designing the experimentation modules on renewable energies developed by each participant university and writing the curriculum of these modules (IO3). Guglielmo Marconi University (USGM) is responsible for designing the LMS (IO4), which includes the training course and remote laboratories of each European university. Norwegian University of Science and Technology (NTNU) has to select the students who carry out the different practical experiences and elaborate the guidelines that the users have to follow in order to carry out the experimental activities (IO5).

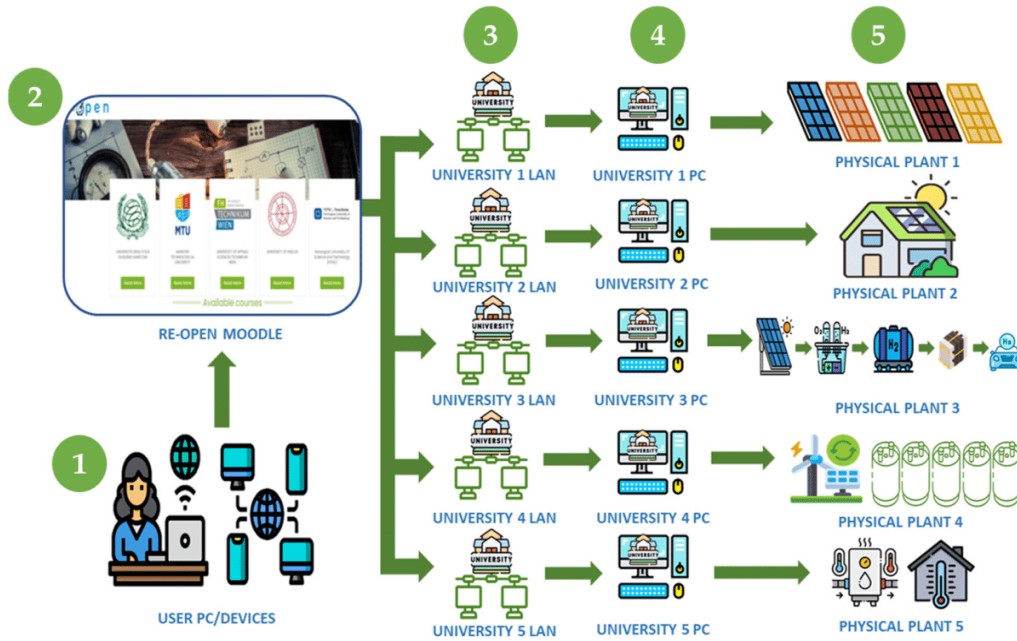


Figure 5. REOPEN ICT infrastructure standardization and collaborative network design.

3.2. Standardized Remote Laboratory. An Example Based on Supercapacitor Power Bank

In the context of the REOPEN project, the UHU has implemented a remote laboratory based on a supercapacitor power bank (physical plant 4, Figure 5). Supercapacitors are high-capacity and have a capacitance value much higher than other capacitors but with lower voltage limits, bridging the gap between electrolytic capacitors and rechargeable batteries. With this advantage, supercapacitors enable fast charging and discharging. The aim of this remote laboratory is to allow students to interact with a real plant through a user interface, visualizing the charging and discharging curves of the supercapacitor power bank in real time. That is, a laboratory practice similar to a face-to-face laboratory is provided but with the novelty that student is training from home.

3.2.1. System Description

The supercapacitor power bank (item 1, Figures 6 and 7) is connected through a single-pole double-throw (SPDT) relay (item 2, Figures 6 and 7) to choose between the charging or discharging circuits.

For the charging circuit, the supercapacitor power bank can be charged from a programmable power source (item 3, Figures 6 and 7), according to technical specifications, Table 2. A protection fuse is placed for the charging process (item 4, Figures 6 and 7) to avoid potential risks.

For the discharging circuit, an electronic load (item 5, Figures 6 and 7) is used. The electronic load consists of a bank of 8 power resistors connected in parallel. Each resistor is driven by a relay.

Table 2. Supercapacitor power bank. Component specifications.

Component	Parameter	Units
Supercapacitor	Capacity: 5000 F Surge voltage: 2.85 VDC Operating voltage: 2.4 VDC Max. Continuous current: 210 A	5
Relay SPDT	Max. Switching current: 80 A Max. Switching Voltage: 75 VDC Rated voltage (VDC): 12 V	1
Programmable power source	Input voltage: 220 VAC Output voltage: 0–30 VDC Output current: 0.1–100 A Output power: 3000 W	1
Fuse	Rated current: 100 A Rated voltage: 500 VAC	1
Resistor power bank	Resistance: 1 Ω Power rating on standard heatsink @25 °C: 200 W	8
Relay module	Normally open interface maximum load: 250 VAC/30 A; 30 VDC/30 A Trigger current: 3 mA Working voltage: 12 VDC	8
Current sensor	Primary nominal RMS current: 100 A Primary current, measuring range: 0, . . . , ±150 A Secondary nominal RMS current: 50 mA	1
Switching power supply	Input voltage range: 88–264 VAC Output voltage: 12 VDC Output current range: 0~4.2 A Output rated power: 50.4 W	1
Voltage sensor (implemented by resistor divisor)	Range: 0–12 VDC	1

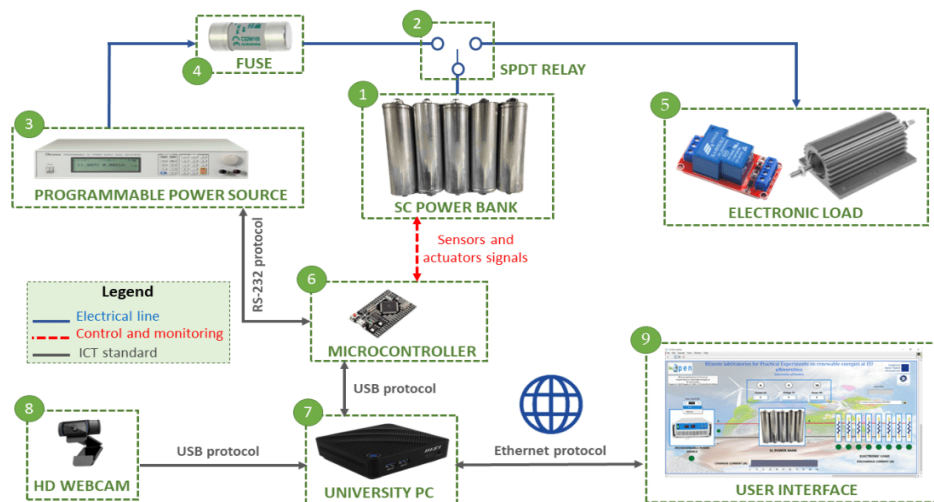


Figure 6. Supercapacitor remote laboratory. Component layout.

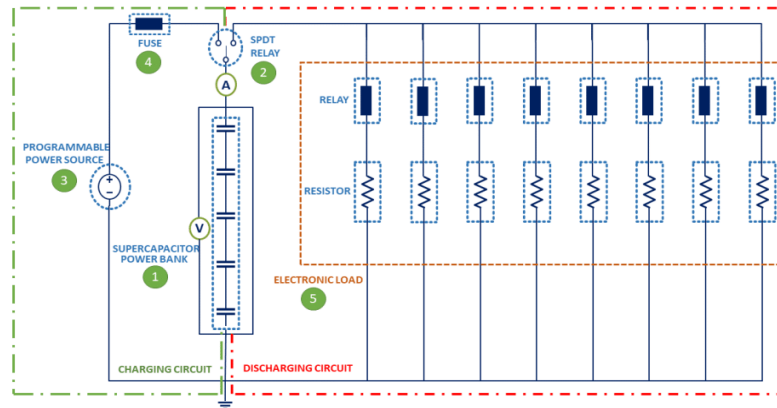


Figure 7. Supercapacitor test bench. Electrical layout.

For the control and data acquisition system, an Arduino microcontroller (item 6, Figure 6) is used. The Arduino microcontroller is connected via a Universal Serial Bus (USB) interface to a local computer (item 7, Figure 6) and via the RS-232 protocol to a programmable power source. The student can visualize the laboratory physical plant in real time through a USB-connected video camera (item 8, Figure 6). Similarly, the information obtained by Arduino is displayed through a UI (item 9, Figure 6) at the user PC connected remotely. This user interface allows the student to interact with the real plant.

The technical specifications of each component used in the supercapacitor test bench are shown in Table 2.

The physical implementation of the supercapacitor power-bank-based remote laboratory is shown in Figure 8. The image on the left shows the charging process of the supercapacitor power bank, and the image on the right shows the process of the discharging cycle.

For the charging and discharging tests, the operating conditions to be imposed for security and avoiding risk in remote mode are shown in Table 3.

Table 3. Supercapacitor power bank system specifications.

Parameter
Operating voltage 1-single supercapacitor module: 2.4 VDC
Operating voltage supercapacitor power bank: 12 VDC
Charging current: 0~70 A
Discharging current: 0~96 A

3.2.2. ICT Infrastructure and Learning Management System

The developed educational structure encompasses the remote laboratories of the participant universities, fulfilling the objective of creating an infrastructure of remote and collaborative laboratories in EU universities, as shown in Figure 9. All remote laboratories are accessible from Moodle. The integration was carried out with Shareable Content Object Reference Model (SCORM). The decision to select SCORM as the content sharing tool was based on the recommendation of the company VJTechnology®, which has provided technical support to REOPEN partnership. As extra features, the LMS facilitates the reservation of remote laboratories through a booking system and interactive material such as augmented reality (AR) interactive videos.

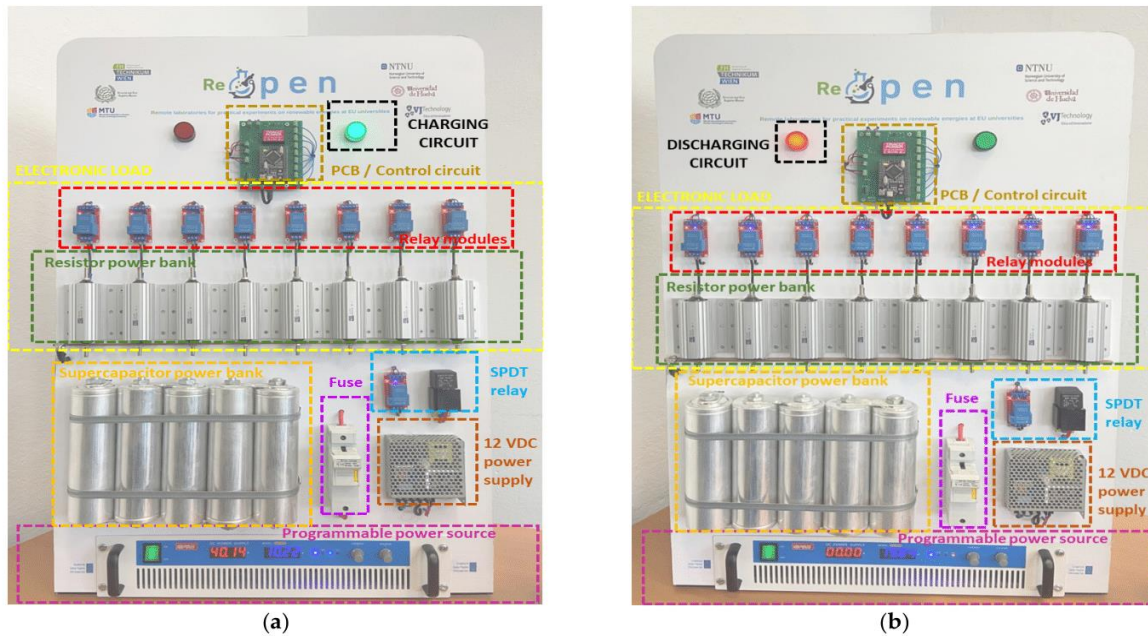


Figure 8. Physical implementation of the remote laboratory based on supercapacitor power bank: (a) charging process; (b) discharging process.

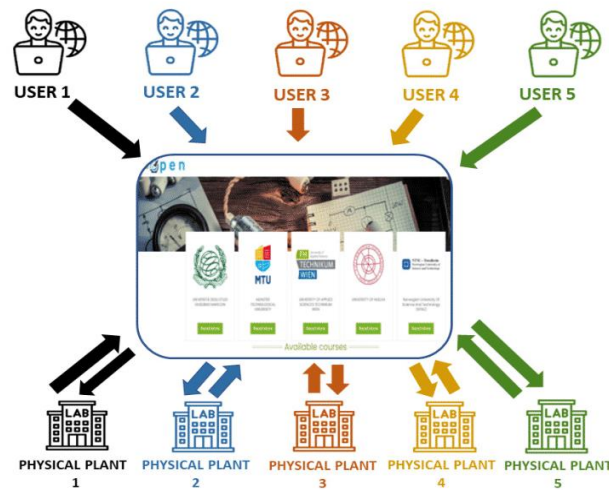


Figure 9. LMS of REOPEN platform.

While one user is remotely accessing a laboratory, the rest of the plants are available for other users. It is thus possible to conduct five remote experiences at the same time.

To validate the student’s authentication, the student logs into the university portal. An identification parameter is then be sent to REOPEN Moodle, which verifies their presence in its database. The access to LMS is established by means of identity and access management (IAM) [23]. IAM confirms that the user, software, or hardware is authentic by using the REOPEN LMS to authenticate the credentials in a database, as shown in Figure 10.

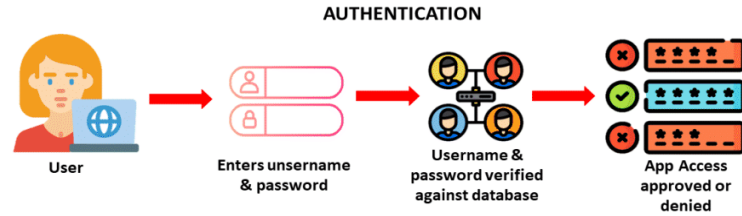


Figure 10. Authentication process in REOPEN platform.

In order to realize this standardized and collaborative structure between the five participating European universities, a common LMS has been implemented for all universities. This LMS, namely a Moodle platform, incorporates the five remote experiences of each university. To access the REOPEN platform, students can access the following URL, <https://reopen.vjtechnology.it/index.php> (accessed on 14 April 2023), as shown in Figure 11. The student must be enrolled in a course at one of the five European universities.



Figure 11. REOPEN LMS platform.

Then, the student must enter the username and password. The username and password are provided by the professor of the course at the beginning of the academic year, thus ensuring the correct functioning of the collaborative platform in terms of security.

Once the student logs into REOPEN LMS, the different modules with respective remote laboratories are shown. The user has access to the booking system, including the remote experience, announcements, self-assessment sheets, and self-check theoretical section. Before starting the remote experience, the professor gives a lecture on renewable energies. The first thing the student should do before the remote experience is to fill in the self-check theoretical section. This survey asks about the theoretical knowledge explained in class. Once the student has completed the remote experience, the student can carry out an assessment of the knowledge acquired filling the “self-assessment survey”. This survey is subsequently evaluated by the professor.

3.2.3. User Interface

Once inside the course, for example the “UHU Laboratory” tool, the student can access the remote laboratory implemented by the UHU. As shown in Figure 12, the remote laboratory consists of the user interface at the bottom, and at the top a video shows in real time the operation of the physical plant.

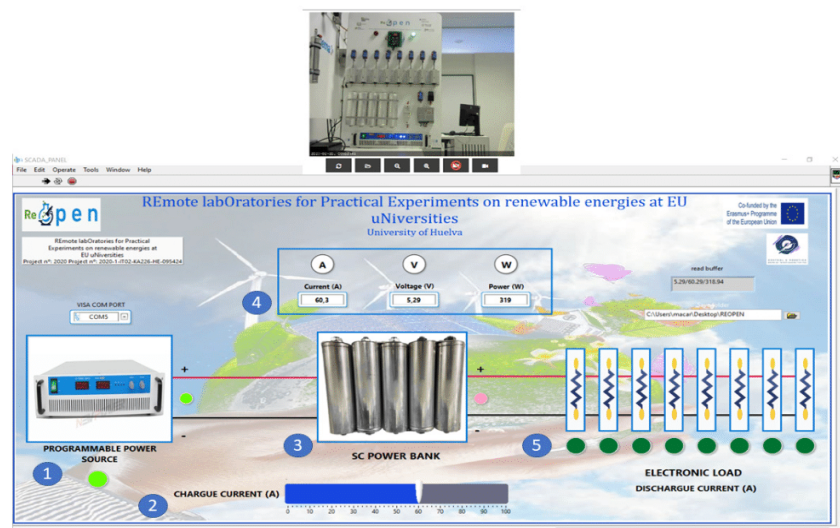


Figure 12. User interface of the remote laboratory of supercapacitor power bank: charging process.

The user interface is created in the LabVIEW® environment. To start with the remote practice, firstly the student must turn on the programmable power source by clicking on the image (item 1, Figure 12). Once the programmable power source is turned on, the student must select the charging current of the supercapacitor power bank. To select the charge current, the student must move the slider bar (item 2, Figure 12). Then, the charging process of the supercapacitor power bank starts. If the student clicks on the image of the supercapacitor power bank (item 3, Figure 12), a second window can be seen by the student, as shown in Figure 13, and the student can visualize the different charging curves. In the upper part of the main window in the user interface, the student can visualize the instantaneous current, voltage, and power values of the supercapacitor power bank (item 4, Figure 12). Once the voltage at the supercapacitor power bank reaches 12 voltage direct current (VDC), the charging process stops. Based on the remote laboratory implementation, it is possible to carry out open-ended laboratory practices.

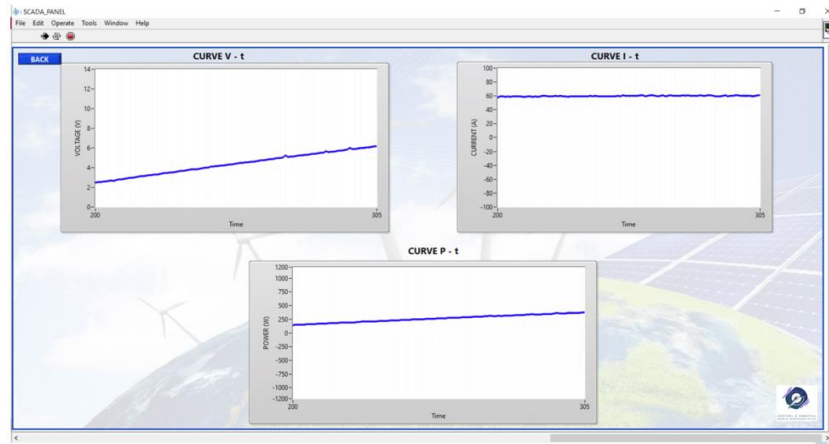


Figure 13. Second window in user interface. Charging and discharging chart of the supercapacitor power bank.

Similarly, the student can carry out an experimental test to draw the discharging process. To do this, the student must turn off the programmable power source (item 1, Figure 14) and tun on the desired number of resistors (item 5, Figure 14). The discharging current is conditioned by the number of selected resistors. The more resistors selected, the higher the discharging current. In the same way as for the charging process, the student can monitor the instantaneous current, voltage, and power values at the top on the main window of the user interface (item 4, Figure 14). The student can also monitor the discharging curves in the second window of the user interface, as shown in Figure 13.

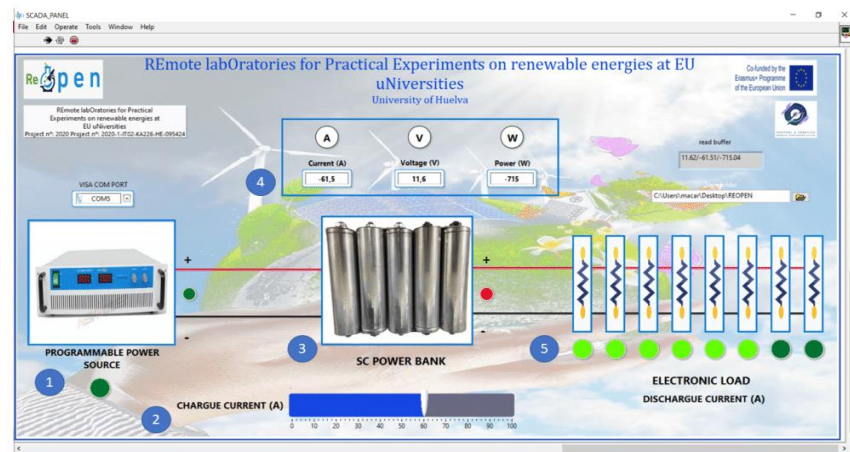


Figure 14. User interface of the remote laboratory of supercapacitor power bank: discharging process.

4. Results and Discussion

As already mentioned, the UHU, together with four other European universities, have developed a standardized remote laboratories infrastructure. To show the contributions and capabilities of the developed collaborative platform, a statistical study was conducted, as shown in Figure 3. The statistical study is based on an anonymous expectation survey that was filled in before the remote experience. This initial survey includes questions to find out whether the students and professors have had previous experience with remote laboratories. Once the students have completed the remote experience, they fill in a survey on technical

knowledge acquired. Afterwards, users have completed an anonymous satisfaction survey. The questions were asked to rate on a 5-point Likert scale (1: strongly disagree and 5: strongly agree). The results of the analysis in terms of the objectives of this study are presented below.

4.1. Expectation Survey

The aim of this survey is to find out whether students and professors have had previous remote experiences and their opinion on the use of these new technologies. As can be seen in Tables 4 and 5, few students and professors have previously had the opportunity to use remote laboratories in the teaching–learning method. Similarly, students and professors have heard about this or seen videos about remote laboratories, but they have not actively participated. Both students and professors think that the use of remote laboratories enhances the learning method. Finally, a large majority of them think that remote labs should be included within the curricula plans.

Table 4. Students' responses to expectation survey.

Q1	Yes (%)		No (%)		
Have you previously had the opportunity to gain experience with remote laboratories?	20		80		
Q2 If Yes on the previous question, what kind of experiences did you acquire about the remote laboratories?	I have heard about this but have not actively participated (%)	I have seen a video on internet but have not actively participated (%)	I had one remote laboratory (%)	I have had several such remote laboratories in my education (%)	
	40	35	20	5	
Q3 Do you think it would be or it was useful for your study to have experience with remote laboratories?	It is not at all useful (%)	Little useful (%)	Partially useful (%)	Useful (%)	Very useful (%)
	2	3	5	60	30
Q4 Do you think that the remote laboratories should be included more in the curricula plans?	Yes (%)	No (%)	Unsure (%)		
	72	8	18		

As we can see from the data collected in Table 4, 80% of participants did not have any previous experience with remote laboratories. Nevertheless, 90% of students consider remote laboratories useful or very useful, and 72% of participants recommend their inclusion in the curricula plans.

From Table 5, 73% of professors did not have any previous experience with remote laboratories. Similar to students, despite not having previous experience, a large percentage, 85%, of professors consider remote laboratories useful or very useful. Nevertheless, professors are not yet convinced that remote labs should be included in the curricula.

Table 5. Professors’ responses to expectation survey.

Q1	Yes (%)		No (%)		
Have you previously had the opportunity to gain experience with remote laboratories?	27		73		
Q2	I have heard about this but have not actively participated (%)	I have seen a video on Internet but have not actively participated (%)	I had one remote laboratory (%)	I have had several such remote laboratories in my education (%)	
If Yes on the previous question, what kind of experiences did you acquire about the remote laboratories?	30	35	25	10	
Q3	It is not at all useful (%)	Little useful (%)	Partially useful (%)	Useful (%)	Very useful (%)
Do you think it would be or it was useful for your teaching to have experience with remote laboratories?	4	5	6	50	35
Q4	Yes (%)		No (%)		Unsure (%)
Do you think that the remote laboratories should be included more in the curricula plans?	66		12		12

4.2. Self-Assessment Survey

The professor assessed the technical knowledge acquired by the students during the remote experience. Prior to this, the students filled in the “self-assessment survey”. In this survey, they were asked several questions about the technical knowledge they had applied in order to be able to carry out the remote experience. The questions asked in the “self-assessment survey” are shown in Table 6. The professor evaluated the questions with a percentage of correct or incorrect questions.

Table 6. Responses from students to self-assessment survey.

		Correct (%)	Incorrect (%)
Q1	What is the maximum charging current?	40	60
Q2	What is the maximum charging voltage of the supercapacitor power bank?	73.33	26.67
Q3	How many supercapacitors are there?	80	20
Q4	How many resistors are there?	86.67	13.33
Q5	What is the maximum discharging current?	53.33	46.67
Q6	How many variables can you plot in the graphs?	66.67	33.33
Q7	When the supercapacitors power bank is charged, do you have to turn off the programmable power source?	93.33	6.67
Q8	After the experiment, what types of values are saved in the txt file?	60	40

4.3. Satisfaction Survey

In general, it can be said that the students and professors have had a very high acceptance of the integration of the remote laboratories. This acceptance is due to the fact that remote laboratories offer versatility and flexibility for learning. The versatility and flexibility are due to the fact that remote laboratories do not depend on a predetermined schedule and allow the experiment to be repeated as many times as students require. In

fact, some students and professors expressed their excitement at being able to try out the other remote laboratories integrated into the standardized REOPEN platform.

Based on students' and professors' answers, shown in Tables 7 and 8, it can be seen that students and professors consider being able to access remote labs from other universities useful (Table 7, Q0; AVG_Students = 4.8; AVG_Professors = 4.82, and Table 8, Q5; AVG_Students = 4.37; AVG_Professors = 4.14).

Table 7. Usefulness of remote laboratories according to the students and professors.

		Students		Professors	
		AVG	SD	AVG	SD
Q0	Being able to access other remote labs from other universities is useful	4.80	0.79	4.82	0.81
Q1	The use of remote laboratories helps reinforce theoretical concepts	4.25	0.64	4.29	0.73
Q2	The remote laboratory helps to understand the importance of the use of renewable energies	3.88	0.58	4.01	0.66
Q3	The use of remote laboratories is safer than the use of physical laboratories	3.92	0.62	3.74	0.54
Q4	The overall assessment of the remote lab is positive	4.40	0.58	4.53	0.72

AVG: Average. SD: Standard deviation.

Table 8. Usability perceived by students and professors.

		Students		Professors	
		AVG	SD	AVG	SD
Q5	The remote laboratory allows the activity to be carried out in the same way as the physical laboratory	4.37	0.49	4.14	0.55
Q6	The activity can be carried out without supervision	4.29	0.60	4.02	0.62
Q7	Time flexibility helps to carry out the activity	4.75	0.54	4.73	0.50
Q8	The user manual provided in the LMS helps to carry out the activity	3.81	0.80	4.26	0.78
Q9	Using the booking system is easy	4.11	0.69	4.79	0.77
Q10	Access to the remote lab via the LMS is easy	4.29	0.72	4.54	0.73
Q11	The user interface is easy and intuitive	4.23	0.57	4.62	0.62
Q12	The integration of the video camera in the remote laboratory helps to understand the activity	3.77	0.51	4.80	0.74

AVG: Average. SD: Standard deviation.

Regarding the learning procedure (Table 7, Q1 and Q2), the students and professors confirm, by means of high scores, that remote laboratories strengthen and improve theoretical concepts (Q1; AVG_Students = 4.25; AVG_Professors = 4.29). In addition, the standardized infrastructure of REOPEN improves the understanding of the importance of the use of renewable energies (Q2; AVG_Students = 3.88; AVG_Professors = 4.01). Likewise, students and professors consider that the use of remote laboratories increases the safety of students and equipment with respect to physical laboratories (Table 7, Q3; AVG_Students = 3.92; AVG_Professors = 3.74). In general, the students and professors consider that the remote lab is a positive innovation (Table 7, Q4; AVG_Students = 4.40; AVG_Professors = 4.53).

Regarding the performance of the experiment (Table 8, Q5, Q6, Q7, and Q8), students have a better assessment (Q5; AVG_Students = 4.37) than professors (Q5; AVG_Professors = 4.14).

In addition, students believe that the activity can be performed without the supervision of a professor (Q6; AVG_Students = 4.29), while professors believe that there should be a supervisor (Q6; AVG_Professors = 4.02). In this sense, a great advantage of the remote laboratories over face-to-face laboratories is shown: the control by software substitutes the permanent teacher supervision that in face-to-face practice would be required to guarantee the correct use of lab devices.

On the other hand, students (Q7; AVG_Students = 4.75) and professors (Q7; AVG_Professors = 4.73) consider the flexibility of time available to take the tests to be a great advantage. While professors believe that the teaching material helps to learn the activity (Q8; AVG_Professors = 4.26), students were not in agreement with respect to the suitability of instructions to perform the lab work (Q8; AVG_Students = 3.81; SD = 0.80).

Professors rate the “booking system tool” (Q9; AVG_Professors = 4.79), the access to the LMS (Q10; AVG_Professors = 4.54), and the user interface (Q11; AVG_Professors = 4.62) very positively, saying that it is easy to use and intuitive. Most innovative for teachers is the implementation of a video camera that transmits the remote practice in real time (Q12; AVG_Professors = 4.80).

These same aspects were evaluated by students, who say that the “booking system tool” of the remote laboratory is easy to use (Q9; AVG_Students = 4.11), as well as remote access through the LMS (Q10; AVG_Students = 4.29). Students consider the user interface to be intuitive (Q11; AVG_Students = 4.23), although they do not perceive any real advantages of using the camera (Q12; AVG_Students = 3.77).

Remarkably, it can be observed that scores given by students to questions Q2 (Table 7), Q8, and Q12 (Table 8) were significantly lower than the scores given by professors. This may be because students still prefer face-to-face practice in subjects with a high level of experimentation such as renewable energy.

5. Conclusions

This work aimed to contribute to the digital transition in higher education by creating a standardized educational model based on remote laboratories focused on renewable energy and developed in an EU framework. The aim was to establish, test, and validate a standardized educational model and an ICT solution for conducting laboratory activities remotely, merging online and traditional learning and allowing students to carry out practical activities/experiments integrated with theoretical lessons on renewable energy topics.

The collaborative European network consists of five European universities that have proposed to bridge the lack of common infrastructures between different remote laboratories. The result has been the creation of the REOPEN educational network. REOPEN offers real learning opportunities to a more diverse and broader engineering student body by providing more flexible access to physical experiments anytime, anywhere. With this collaborative infrastructure, REOPEN promotes the reuse of programming codes, avoiding the fragmentation caused using proprietary tools by each university. Thus, the REOPEN network provides students with the necessary competences to meet the needs of Industry 4.0.

Initially, this work had the initial objective of interviewing at least 15 professors and 25 students from STEM faculties; 5 university staff such as laboratory technicians; and 5 business administrators for the mapping phase. In total, 57 professors’ surveys and 142 students’ surveys from STEM faculties, 13 surveys from university staff such as laboratory technicians, and 35 business administrators’ surveys were obtained.

The data obtained from the surveys show that the implementation of remote laboratories in the teaching–learning method is a real novelty. In general, students and professors think that the incorporation of this new method is very beneficial, especially for laboratory practices. These laboratories offer a great deal of flexibility and versatility, and both students and professors have a very positive assessment of these advantages, as they allow the experiment to be repeated as many times as the students require, reinforcing the theoretical concepts. Another very positive evaluation obtained from the surveys is that the collaborative network is based on renewable energies, adapting to the new European

energy model. Above all, however, the idea of creating a collaborative network of remote laboratories with the participation of five European universities has received the most positive evaluation. This idea fills a gap that existed until now, allowing the development of new skills techniques and enabling students to broaden their theoretical and practical knowledge by being able to use more laboratories than only those that are available at their own university.

Since COVID-19 arrived in 2020, it has been transforming people's lives. REOPEN is a project that was created to cover a need that was arising at that time to continue teaching, especially at a practical level, remotely for the safety of students and professors. Since then, the teaching–learning method has been adapting to this new situation, with online teaching, i.e., hybrid education, taking center stage. Therefore, more and more remote laboratories are being incorporated in universities, especially in universities related to the scientific–technological field.

It can be said that this collaborative network of European remote laboratories is a pioneering approach to covering this new context, and in an emerging and booming field, such as renewable energies, which is a rather expensive field, not all universities can afford to have renewable energy-based laboratories inside their facilities.

To conclude, it is convenient to discuss the limits of remote laboratories. These should not be perceived as a substitute for conventional labs (on-site) but as a complement and solution to their restrictions. The remote lab, like the virtual one, is a technological tool composed of software but, in addition and unlike the virtual one, it is also composed of hardware. The remote lab allows teachers and students to carry out, through the Internet, their practice as if they were in a conventional lab (on-site). Users use and control the resources available through the use of sensors and instrumentation that allow them to interact with real equipment instead of using simulations and without requiring physical presence in the lab. Users can therefore become familiar with interfaces that correspond to real equipment that they operate remotely. An outstanding advantage of remote labs is reducing space and time limitations, as they do not require the physical presence of the user in the lab. In this way, the labs are available beyond school hours or scheduled classroom practice, which allows students to increase the number of hours of practice, an essential requirement for learning in engineering careers. This encourages autonomy in learning, since it does not require concurrence with the teacher. Another aspect to highlight is the possibility of repeating the same practice or the implementation of variations in the initial practice according to the needs and interests of the students, contributing to personalized learning and respecting the individual needs of each user.

That said, remote labs should not be seen as a substitute for conventional labs but as a complement. Consequently, it is necessary to make rational use of remote laboratories in conjunction with conventional laboratories to provide students with the most complete set of skills in the new digital era.

Author Contributions: Conceptualization, F.S. and J.M.A.; Methodology, F.S.; software, M.M.; validation, M.M. and F.S.; formal analysis, M.M.; resources, F.S. and J.M.A.; writing—original draft preparation, M.M.; writing—review and editing, F.S.; project administration, F.S.; funding acquisition, J.M.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Erasmus+ Programme, grant number Ref. 2020-1-IT02-KA226-HE-095424 RE-OPEN project; ERASMUS+ Programme 2020—KA2; and the APC was funded by Ref. 2020-1-IT02-KA226-HE-095424 RE-OPEN project, funded by ERASMUS+ Programme 2020—KA2.

Institutional Review Board Statement: Ethical review and approval were waived for this study due to practices with remote laboratories have been carried out inside the facilities of universities participant in the project, within the classes lessons and with internal personnel.

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author. The data are not publicly available due to internal agreement between project partnership.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

List of Acronyms

AR	Augmented reality
DC	Direct current
EU	European Union
FHTW	University of Applied Sciences Technikum Wien
IAM	Identity and access management
ICT	Information and Communications Technology
LAN	Local area network
LMS	Learning management system
MOODLE	Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment
MS	Member states
MTU	Munster Technological University
NTNU	Norwegian University of Science and Technology
OS	Operating system
PC	Personal computer
PSUT	Princess Sumaya University for Technology
PWM	Pulse-width modulation
SCORM	Shareable Content Object Reference Model
SPDT	Single-pole double-throw
STEM	Science, technology, engineering, and mathematics
UHU	University of Huelva
UI	User interface
UNED	Spanish National University for Distance Education
USB	Universal Serial Bus
USGM	Università degli Studi Guglielmo Marconi
VCC	Vapor compression cycle
VDC	Voltage direct current

References

1. Brachtl, S.; Ipsier, C.; Keser Aschenberger, F.; Oppl, S.; Oppl, S.; Pakoy, E.K.; Radinger, G. Physical home-learning environments of traditional and non-traditional students during the COVID pandemic: Exploring the impact of learning space on students' motivation, stress and well-being. *Smart Learn. Environ.* **2023**, *10*, 7. [\[CrossRef\]](#)
2. Bülow, M.W. Designing Synchronous Hybrid Learning Spaces: Challenges and Opportunities. In *Hybrid Learning Spaces*; Gil, E., Mor, Y., Dimitriadis, Y., Köppe, C., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022; pp. 135–163. ISBN 978-3-030-88520-5.
3. Al-Badi, A.; Khan, A. Technological Transition in Higher Education Institution in the Time of COVID-19. *Procedia Comput. Sci.* **2022**, *203*, 157–164. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
4. Al-Smadi, A.M.; Abugabah, A.; Smadi, A. AI Evaluation of E-learning Experience in the Light of the COVID-19 in Higher Education. *Procedia Comput. Sci.* **2022**, *201*, 383–389. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
5. Chelliah, K.K. COVID-19 Pandemic: Student and faculty experience in higher education. *J. Med. Imaging Radiat. Sci.* **2022**, *53*, S58. [\[CrossRef\]](#)
6. Lerma, E.; Costa-Castelló, R.; Griñó, R.; Sanchis, C. Herramientas para la docencia de control digital en grados de ingeniería. *Rev. Iberoam. Automática Inf. Ind.* **2021**, *18*, 193. [\[CrossRef\]](#)
7. Martínez, M.; Segura, F.; Andújar, J.M.; del Zotto, L.; Tabakovic, M.; O'Mahony, T. The challenges of digital transition in Engineering careers. A solution based on standardised renewable sources-based remote laboratories. In Proceedings of the 6th IEEE Eurasian Conference on Educational Innovation 2023, Singapore, 3–5 February 2023; pp. 0–3.
8. Martínez, M.; García, R.; Segura, F.; Andújar, J.M. Standardized Remote Laboratories Based on Renewable Energy Sources for REOPEN European University Network. In Proceedings of the IV Jornadas ScienCity 2021. Fomento de la Cultura Científica, Tecnológica y de Innovación en Ciudades Inteligentes, Huelva, Spain, 17–19 November 2021; Kindle Direct Publishing: Washington, DC, USA, 2021; pp. 7–10.
9. Abekiri, N.; Rachdy, A.; Ajaamoum, M.; Nassiri, B.; Elmahni, L.; Oubail, Y. Platform for hands-on remote labs based on the ESP32 and NOD-red. *Sci. Afr.* **2023**, *19*, e01502. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

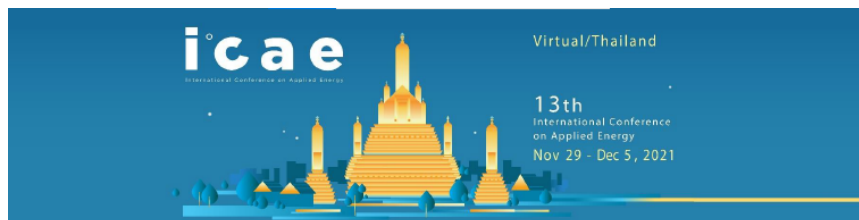
10. Mukhtar, K.; Javed, K.; Arooj, M.; Sethi, A. Advantages, Limitations and Recommendations for online learning during COVID-19 pandemic era. *Pakistan J. Med. Sci.* **2020**, *36*, S27. [[CrossRef](#)]
11. Kalúz, M.; Čirka, L.; Valo, R.; Fikar, M. ArPi Lab: A Low-cost Remote Laboratory for Control Education. *IFAC Proc. Vol.* **2014**, *47*, 9057–9062. [[CrossRef](#)]
12. Ishibashi, M.; Fukumoto, H.; Furukawa, T.; Itoh, H.; Ohchi, M. Development of a web-based remote experiment system for electrical machinery learners. In Proceedings of the 2014 International Power Electronics Conference IPEC-Hiroshima—ECCE Asia 2014, Hiroshima, Japan, 18–21 May 2014; pp. 724–729. [[CrossRef](#)]
13. Beghi, A.; Cervato, A.; Rampazzo, M. A Remote Refrigeration Laboratory for Control Engineering Education. *IFAC-PapersOnLine* **2015**, *48*, 25–30. [[CrossRef](#)]
14. Dobriborsci, D.; Bazylev, D.; Margun, A. Teaching students the basics of control theory using NI ELVIS ii. *Smart Innov. Syst. Technol.* **2017**, *75*, 420–427. [[CrossRef](#)]
15. Bisták, P. Remote Control Laboratory for Three-Tank Hydraulic System Using Matlab, Websockets and JavaScript. *IFAC-PapersOnLine* **2020**, *53*, 17240–17245. [[CrossRef](#)]
16. Pastor, R.; Tobarra, L.; Robles-Gómez, A.; Cano, J.; Hammad, B.; Al-Zoubi, A.; Hernández, R.; Castro, M. Renewable energy remote online laboratories in Jordan universities: Tools for training students in Jordan. *Renew. Energy* **2020**, *149*, 749–759. [[CrossRef](#)]
17. Guo, L.; Vengalil, M.; Abdul, N.M.M.; Wang, K. Design and implementation of virtual laboratory for a microgrid with renewable energy sources. *Comput. Appl. Eng. Educ.* **2022**, *30*, 349–361. [[CrossRef](#)]
18. Pang, D.; Cui, S.; Yang, G. Remote Laboratory as an Educational Tool in Robotics Experimental Course. *Int. J. Emerg. Technol. Learn.* **2022**, *17*, 230–245. [[CrossRef](#)]
19. Álvarez Ariza, J.; Nomesqui Galvis, C. RaspyControl Lab: A fully open-source and real-time remote laboratory for education in automatic control systems using Raspberry Pi and Python. *HardwareX* **2023**, *13*, e00396. [[CrossRef](#)]
20. Ballatore, M.G.; Razza, V.; Regruto, D.; Stievano, I.; Tabacco, A. The Educational Benefit of a Remote Automatic Control Laboratory. A Win-Win Collaboration between Asia and Europe. *Educ. Knowl. Soc.* **2022**, *23*, e28495. [[CrossRef](#)]
21. Goncalves, D.; Besada, E.; López-Orozco, J.A. Un laboratorio remoto de código abierto y bajo coste para el brazo robótico educativo Dobot Magician. *Rev. Iberoam. Automática E Inf. Ind.* **2023**, *20*, 124–136.
22. O'Mahony, T.; Hill, M.; Duffy, A. Undergraduate Engineering Laboratories: A Study Exploring Laboratory Objectives and Student Experiences at An Irish University. In Proceedings of the 3rd International Conference on Science and Technology Education 2022, Porto, Portugal, 6–7 October 2022; da Silva, L.F.M., Ferreira, A.J.M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2023; pp. 69–81.
23. Caballero, A. Information Security Essentials for Information Technology Managers: Protecting Mission-Critical Systems. *Comput. Inf. Secur. Handb.* **2017**, *14*, 393–419. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

ANEXO III. Resultados de investigación derivados del objetivo 3

ANEXO III.A

Certificado de Participación en el 13th International Conference on Applied Energy



Certificate of Participation

This is to certify that

Macarena Martínez Luna

*has participated in the 13th International Conference on Applied Energy
during Nov 29 - Dec 5, 2021.*

Prof. J. Yan
Conference Chair of ICAE 2021
& Editor-in-Chief of *Applied Energy*, *Advances in Applied Energy*

ANEXO III.B

Hydrogen-based APU for refrigerated vans. A turnkey solution for freight transport

M. Martínez, F. J. Vivas, F. Segura, J.M. Andújar

Presentado en:



Evento: 13th International Conference on Applied Energy.

Organizador: The Applied Energy Innovation Institute, UNILAB y Open edX.

Fecha: 29 de noviembre – 2 de diciembre de 2021.

Lugar: Bangkok, Tailandia.

Hydrogen-based APU for refrigerated vans. A turnkey solution for freight transport

M. Martínez*, F. J. Vivas, F. Segura, J. M. Andújar

Research Centre on Technology, Energy and Sustainability (CITES). Universidad de Huelva, Spain

* (macarena.martinez@diesia.uhu.es)

ABSTRACT

The increase in refrigerated food demand, due to increase on urban population is involving the replacement of conventional diesel-powered transport refrigeration units (TRUs) by electrical-based auxiliary power units APUs, in an imperious. This paper presents a turnkey solution of a hydrogen-based APU for a refrigeration unit integrated in short haul trucks, for its use in the food industry.

Keywords: refrigerated vans, freight transport, hydrogen-based APU, turnkey solution

NONMENCLATURE

Acronyms

APU	Auxiliary Power Unit
BoP	Balance of Plant
CU	Cooling Unit
EMS	Energy Management System
ESS	Energy Storage System
GHG	Greenhouse Gas
HL	Hydrogen Level
ICE	Internal Combustion Engine
P&OM	Modified Perturbation and Observation
PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell
SOC	State of Charge
TRU	Transport Refrigeration Unit

Symbols

δ	DC/DC boost converter duty cycle
I_{FC}	PEFC operating current (A)
$P_{Aux}(t)$	Auxiliary elements operating power (W)
$P_{Bat}(t)$	Battery operating power (W)
$P_{CU}(t)$	Cooling unit operating power (W)
$P_{DCAC}(t)$	DC/AC converter input power (W)
$P_{DCDC}(t)$	DC/DC converter output power (W)
$P_{FC}(t)$	PEFC operating power (W)
$P_{FCSP}(t)$	PEFC power set-point (W)
T_{amb}	Ambient cooling air temperature (°C)

T_{DCDC}	High power converter operating temperature (°C)
$T_{DCDCmax}$	High power converter operating maximum temperature (°C)
V_{Bat}	Battery pack voltage (V)
V_{BatFC}	Battery pack minimum preset value (V)
V_{Batmax}	Battery pack maximum preset safety value (V)
V_{Batmin}	Battery pack minimum preset safety value (V)
V_{FC}	PEFC operating voltage (V)
V_{PEFCSP}	Preset voltage limit (V)

1. INTRODUCTION

At the beginning of the millennium, the rural population was 1,16 times the urban population. This relation, between rural and urban population has been kept since 1960, when the historical data are available [1]. But this trend was inverted in 2007 [2], when urban population was the 50% of the total world population, and it is expected that by 2050, urban population achieves 68%. Urbanization will be one of the 21st century's most transformative trends. With increase in world population and a general improvement in living conditions, it is predicted that food, water and energy demand will increase by 50%, 30% and 45%, respectively [3]. The increase in food demand will be accompanied by a proportional growth in food transportation.

Food quality and safety cold chain is maintained by TRUs driven by the diesel engine in short to large vehicles. Refrigerated transport has been recognised as one of the main processes in terms of energy saving potential and greenhouse gas (GHG) emissions reduction in cold chains. Replacing the diesel TRU with an electric TRU is a strong recommendation for the coming years. [4]. The environmental impacts of cooling systems for the transport of food powered by diesel engines can be up to 40% of the impacts of the vehicle engine [5]. Additionally, refrigerated transport uses additional

diesel to power the refrigeration system, increasing the consumption by 12% and fuel cost by 6,000€/y (up to 40% of direct costs), [6].

2. H₂-BASED AUXILIARY POWER UNIT

The technological proposal includes the definition and design of the APU sized to meet the energy

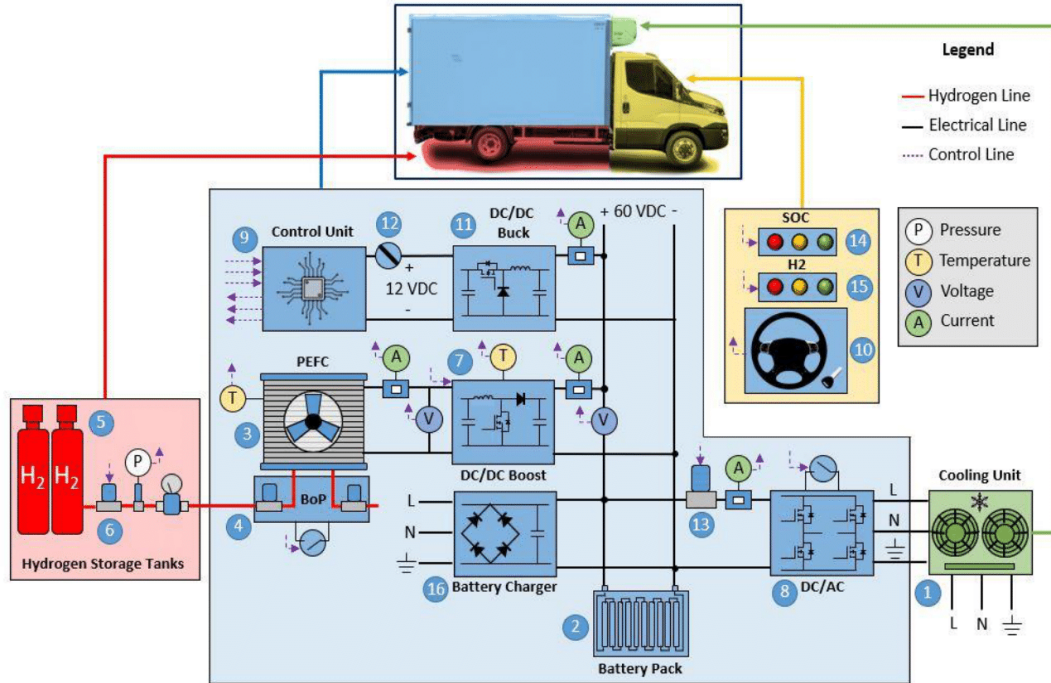


Fig. 1. Hydrogen-based APU for refrigerated van. Component layout

This paper presents a comprehensive hydrogen-based auxiliary power unit (APU) solution for an integrated refrigeration unit in short-haul trucks for use in the food industry.

For this purpose, several parameters must be considered due to their influence into the truck container:

- Container dimensions,
- Route distance,
- Ambient temperature, solar irradiation and humidity during transit,
- Number and size of refrigerated box opening doors,
- Insulation, walls and lining material properties, transmission and radiation coefficients, surface area, thickness, temperature gradient, etc.),
- Infiltration through gaps or holes,
- Thermal loads: fruits, vegetables, meat, fish, frozen products, etc.

The objective of the PU development is to validate the deployment of hydrogen technologies in transportation applications.

requirements defined for the cooling system under study. The developed solution proposes the replacement of the mechanical compressor with an electric one, eliminating the truck's fuel consumption to generate cold, and consequently reducing its overall emissions.

Regarding the power system, the central core of the APU will be a polymer electrolyte fuel cell (PEFC). There is also an energy storage system based on a battery bank, which can cope with the start-up and cold unit cycles, allowing a more conservative use of the hydrogen system.

The APU incorporates all the electrical conversion elements, as well as the auxiliary power control and management equipment, so that its design is based on the "Plug & Play" philosophy.

The input to the fuel cell unit is provided by a hydrogen gas supply line with the purity and pressure conditions required by the fuel cell manufacturer.

The APU output is provided by a single-phase 220 VAC, 50 Hz power outlet, capable of supplying up to 3 kW

of steady-state power, sufficient to meet the requirements of the cooling unit.

Hydrogen is supplied and stored in two 20-liter tanks, each with hydrogen compressed to 200 bar, and a system of valves, piping and regulators that allow safe operation during loading, unloading and storage.

2.1 Design and development

The objective of the developed APU is to guarantee the power supply to the cooling unit (CU) (1, Fig. 1) throughout the successive stops during the delivery route.

The philosophy employed during its design ensures the lowest impact on the TRU. The sizing of the APU was calculated to guarantee the energy demand during a working day, about 8 hours.

In this case, the APU is based on a hybrid energy storage system (ESS) composed by a 60 VDC Li-ion battery pack (2, Fig. 1), and a hydrogen-based ESS as a range extender. This consists of a 2 kW stack (PEFC) and its balance of plant (BoP), [7] (3 and 4, Fig. 1), and two high-pressure hydrogen tanks with a storage capacity of 20 L at 200 bar (5, Fig. 1). To guarantee the supply pressure of the PEFC (0.5 bar), a two-stage pressure regulator is used (6, Fig. 1). In addition, as the PEFC supplies unregulated power, an interleaved boost converter has been developed for proper integration and management of the PEFC on the DC bus (7, Fig. 1). Finally, the power conversion stage to supply the cooling unit from the DC bus is performed by an isolated single-phase DC/AC converter (8, Fig. 1).

For its part, the control unit (9, Fig. 1) performs the tasks related to the acquisition of the variable of interest, the management of the local APU controllers and the implementation of the energy management system (EMS). For this purpose, the APU has all the necessary sensors and actuators to carry out the proper control actions (see Fig. 1). In addition, the control unit monitors the status of the van ignition key (10, Fig. 1), to command the start or stop status of the APU.

To ensure proper power supply to the APU auxiliary equipment (fans, control unit, BoP, etc.), there is a 12 VDC buck DC/DC converter (11, Fig. 1) with direct power supply from the battery pack. In addition, to ensure electrical and personal safety during operation, the APU is equipped with auxiliary elements that allow safe disconnection of the electrical power system. Specifically, a rotary main switch (12, Fig. 1), and a DC contactor (13, Fig. 1).

From the user interface point of view, the APU integrates in the van cabin two indicator panels that

inform the driver about the battery state of charge (SOC) and hydrogen level (HL) (14 and 15 respectively, Fig. 1), as well as an alarm associated with the ESS maximum discharge limit.

Finally, the APU has an integrated battery charger (16, Fig. 1), which allows external recharging of the battery pack if necessary, which can be done simply from a usual 230 V AC outlet.

2.2 EMS (Energy Management System)

The developed EMS responds to a multi-objective proposal in which three fundamental design premises are considered, [8]: to guarantee of the power balance according to eq. 1 in DC bus, the maximum availability of the APU, as well as the conservative use of the battery pack and PEFC, [9].

$$P_{Bat}(t) + P_{DCDC}(t) + P_{DCAC}(t) + P_{Aux}(t) = 0 \quad (1)$$

The proposed solution is based on a hierarchical operation in which the battery pack assumes the power balance and the demand profile fluctuations in the first instance, preserving the charge of the battery pack and maintaining its operation in a stable state regardless of operating conditions.

Taking into account the above assumptions, and the system architecture shown in Fig. 1, the EMS strategy is described as follows (Fig. 2): First, during internal combustion engine (ICE) operation, the APU will be in standby until the start condition (ignition key disconnection) occurs. Next, it will be the battery pack, via the DC/AC converter, that will supply the required power to the CU. This operation will continue indefinitely until its SOC reaches a preset minimum level, after which the PEFC will start up in a controlled manner, using a stepped profile, which is essential to ensure proper humidification and thermal management of its stack.

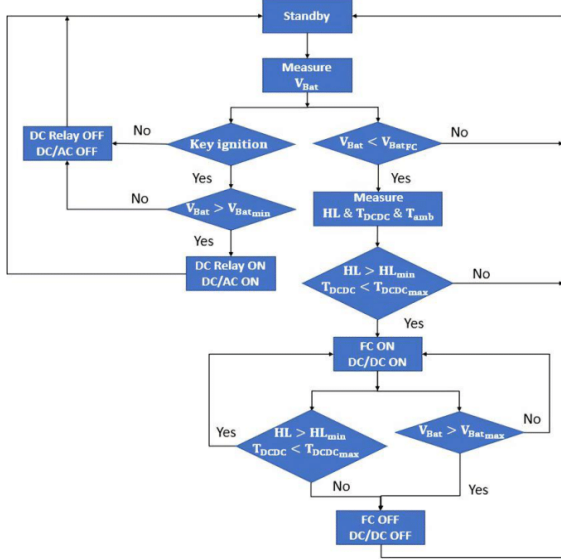


Fig. 2. EMS strategy of the developed Hydrogen-based APU.

Then, the control unit, through the DC/DC boost converter, implements a control law based on the modified perturbation and observation (P&OM) algorithm (Fig. 3), [10], which allows the maximum available power to be extracted from the PEFC. This algorithm has been slightly modified to ensure safe operation of the PEFC by setting power limitations as a function of operating voltage and ambient cooling air temperature (T_{amb} , Fig. 2). Based on this, a preset voltage limit (V_{PEFCSP}) is set to avoid operating in the stack concentration region. To reduce thermal stress, a maximum power setpoint (P_{FCSP}) is defined as a function of the ambient temperature inside the cabinet. This parameter was obtained experimentally under controlled conditions of ambient temperature and demand profile.

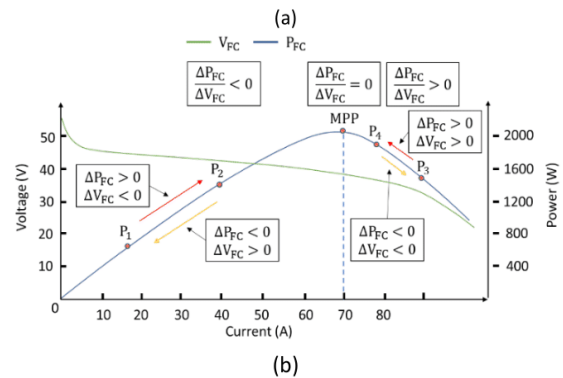
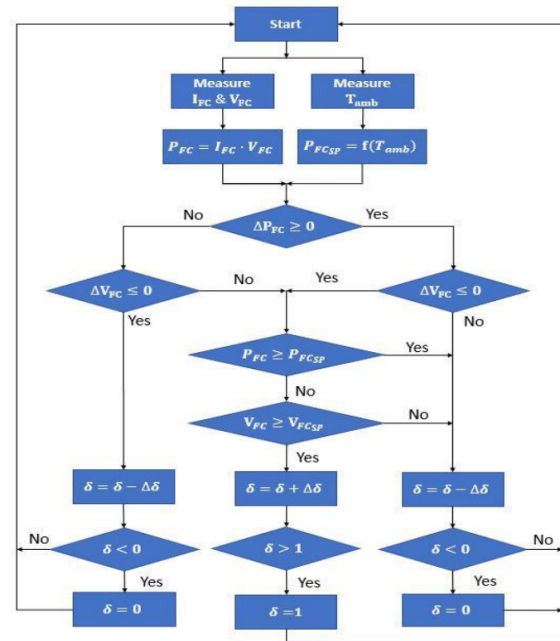


Fig. 3. PEFC control law (P&OM algorithm); (a) flowchart; (b) P&OM principle

The operation of the PEFC will be maintained indefinitely until the full state of charge of the battery pack or the minimum HL is reached. At that time, a controlled fuel cell shutdown protocol will be established according to a power reduction profile.

Finally, coinciding with the final part of the working day (the system is calculated for that), the battery pack will be allowed to start discharging again. From here, the PEFC remains off and when the van returns to its base, the APU is ready to recharge its battery pack and hydrogen tanks in anticipation of another day's work.

3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

The final assembly of the APU in Figure 1, the high-pressure hydrogen tanks and the pressure regulator is shown in Fig. 4. To validate the proposed design, the

developed APU was tested against a demand profile corresponding to a typical 8-hour workday.

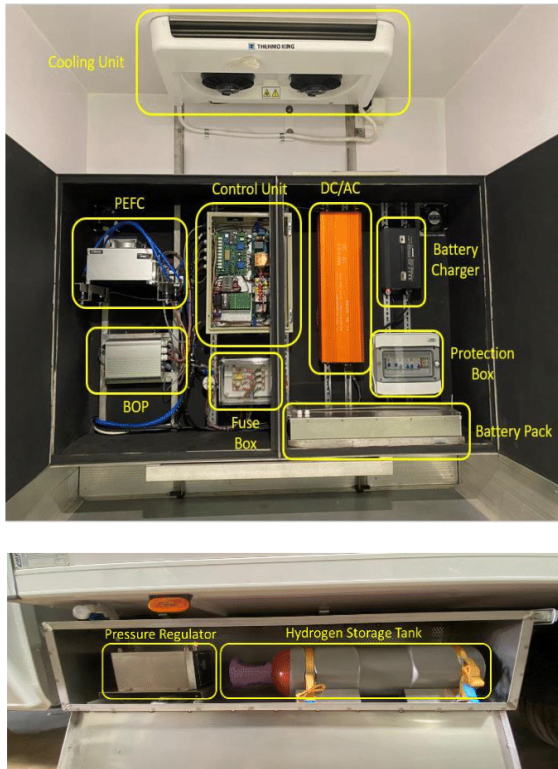


Fig. 4. Distribution and final assembly of the components inside (top) and outside (bottom) the refrigerated box of the van.

At the initial instant, the ICE is operating, supplying power to the CU, and therefore the APU is off ($P_{DCAC}(t) = 0$, Fig. 5). During delivery stops, the APU comes into operation and supplies power to the CU to counteract thermal losses ($P_{DCAC}(t) < 0$, Fig. 5).

According to the proposed EMS, it is the battery pack in the first instance which guarantees the demand profile (see P_{Bat} and P_{DCAC} , Fig. 5, $t \leq 190$ min). This operation is maintained until the SOC drops to 35% (Fig. 5 and 6, $t \leq 190$ min). At this point, the PEFC is activated (Fig. 5 and 7, $t = 190$ min).

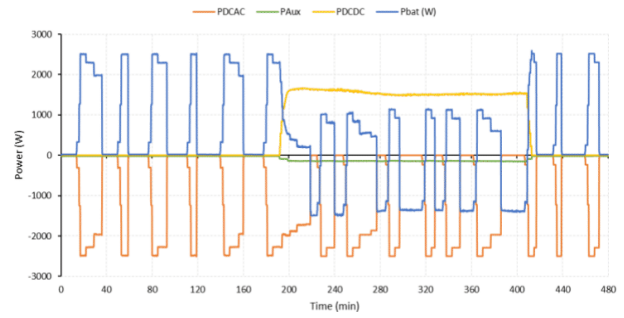


Fig. 5 Battery (P_{Bat}), DC/AC input power ($P_{DC/AC}$), DC/DC output power ($P_{DC/DC}$) and auxiliary consumption ($PAux$) power profile.

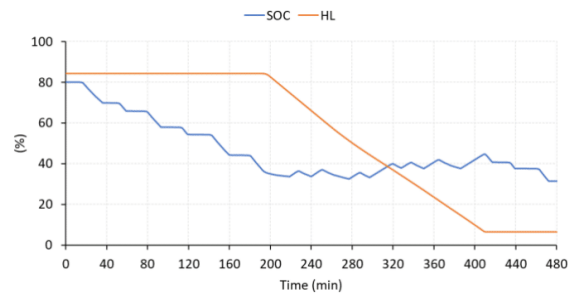


Fig. 6. SOC and HL profile.

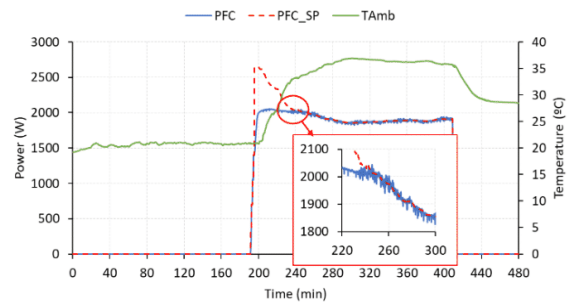


Fig. 7. PEFC generation (PFC), PEFC power setpoint (PFC_SP) and ambient temperature (TAmb) profile.

Based on the proposed P&OM algorithm, when the PEFC starts up, it charges the battery pack by transferring the maximum possible power to it; however, its continued operation causes a consequent increase in the ambient temperature inside the cabinet (Fig. 7, $190 \leq t \leq 220$ min). To reduce the thermal stress of the PEFC, this temperature increase determines a reduction of the maximum power supplied, which ensures that the ambient temperature is maintained in a safe range until the end of the PEFC operation (Fig. 5 and 7, $220 \leq t \leq 410$ min), in this case, determined by the total consumption of stored hydrogen (Fig. 5, 6 and 7, $t = 410$ min). After

this, when no more hydrogen is available, the PEFC is shut down in a controlled manner. Finally, from this point on, it is the battery pack which finally ensures the demand profile until the end of the working day (Fig. 5, $t \geq 410$ min).

From the experimental results, the correct design and development of the APU, the EMS and the P&OM algorithm are validated.

4. CONCLUSIONS

In this work, the design, development and experimental validation of a hydrogen-based APU for use in refrigerated vans has been carried out. Experimental results have demonstrated the correct functioning of the system in terms of operability, autonomy and safety. Based on the results, it is demonstrated that the developed APU is a valid solution to achieve the environmental objectives in refrigerated food transportation.

The hydrogen-based APU demonstrates an extended autonomy of more than 6 h, ensuring a trip without refuelling stops.

Taking into account that according to EU analysis, the environmental impact of refrigeration systems for food transport powered by diesel engines can be up to 40% of the vehicle's tractor engine. The proposal presented can make a significant contribution to reducing greenhouse gas emissions.

ACKNOWLEDGEMENT

This work is a contribution of two research projects: Ref. PID2020-116616RB-C31 supported by the Spanish State Program of R+D+I, and Ref. P20-00730 supported by the Andalusian Regional Program of R+D+I. FEDER-UHU, UHU-1259316.

REFERENCES

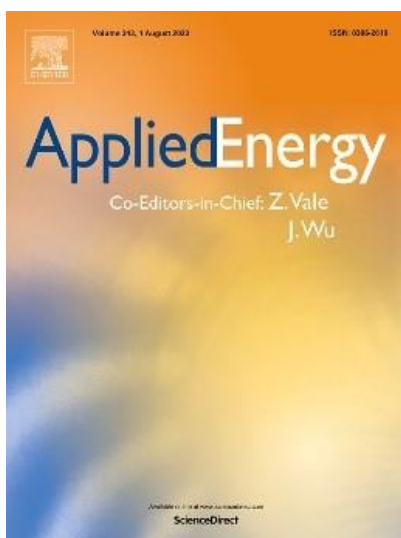
- [1] R. S. Kookana, P. Drechsel, P. Jamwal, and J. Vanderzalm, "Urbanisation and emerging economies: Issues and potential solutions for water and food security," *Sci. Total Environ.*, vol. 732, p. 139057, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139057.
- [2] "Urbanization - Our World in Data." <https://ourworldindata.org/urbanization> (accessed Sep. 14, 2021).
- [3] B. Pandya, A. El-Kharouf, V. Venkataraman, and R. Steinberger-Wilckens, "Comparative study of solid oxide fuel cell coupled absorption refrigeration system for green and sustainable refrigerated transportation," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 179, no. March, p. 115597, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115597.
- [4] A. Meneghetti, F. Dal Magro, and A. Romagnoli, "Renewable energy penetration in food delivery: Coupling photovoltaics with transport refrigerated units," *Energy*, vol. 232, p. 120994, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120994.
- [5] S. A. Tassou, G. De-Lille, and Y. T. Ge, "Food transport refrigeration - Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 8-9, pp. 1467-1477, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.06.027.
- [6] R. Garde, F. Jiménez, T. Larriba, G. García, M. Aguado, and M. Martínez, "Development of a fuel cell-based system for refrigerated transport," *Energy Procedia*, vol. 29, pp. 201-207, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.09.025.
- [7] F. Segura and J. M. Andújar, "Step by step development of a real fuel cell system. Design, implementation, control and monitoring," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 15, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.178.
- [8] F. J. Vivas, A. De Las Heras, F. Segura, and J. M. Andújar, "A proposal of energy management strategy on hybrid renewable system with hydrogen backup," in *IREC 2016 - 7th International Renewable Energy Congress*, 2016, doi: 10.1109/IREC.2016.7478902.
- [9] A. Monforti Ferrario, F. J. Vivas, F. Segura Manzano, J. M. Andújar, E. Bocci, and L. Martirano, "Hydrogen vs. Battery in the Long-term Operation. A Comparative Between Energy Management Strategies for Hybrid Renewable Microgrids," *Electronics*, vol. 9, no. 4, p. 698, Apr. 2020, doi: 10.3390/electronics9040698.
- [10] E. Durán, J. M. Andújar, F. Segura, and A. J. Barragán, "A high-flexibility DC load for fuel cell and solar arrays power sources based on DC-DC converters," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 5, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.11.002.

ANEXO III.C

Hydrogen-powered refrigeration system for environmentally friendly transport and delivery in the food supply chain

F. Segura, F.J. Vivas, J.M. Andújar, M. Martínez

Publicado en:



Revista: Applied Energy

Editorial: Elsevier

Editor Jefe: Jianzhong Wu y Zita Vale

Referencia: Volumen 338

Año: 2023

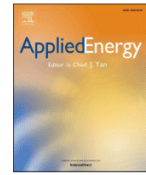
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120945>

Categoría	Ranking de revistas / Total de revistas	Cuartil
Energy & Fuels	15 / 115	Q1
Engineering, Chemical	9 / 140	Q1
Índice de Impacto (2022)	11.2	
Lecturas	5	



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy

Hydrogen-powered refrigeration system for environmentally friendly transport and delivery in the food supply chain

F. Segura, F.J. Vivas^{*}, J.M. Andújar, M. Martínez

Research Centre on Technology, Energy and Sustainability (CITES), University of Huelva, Spain

HIGHLIGHTS

- APU system for refrigerated light trucks based on hydrogen technology.
- Integral solution based on BoP, power, control and acquisition electronics, control loops.
- Step-by-step design of acquisition, control, and power electronics.
- Validation of experimental performance on refrigerated light truck.
- Proven performance of the proposed solution in terms of autonomy, cost reduction and CO₂ emissions.

ARTICLE INFO

Keywords:

Refrigerated light trucks and vans
Air-cooled PEM fuel cell
Hydrogen-powered refrigeration system
Refrigerated food transport sector
Energy management system

ABSTRACT

Urban population and the trend towards online commerce leads to an increase in delivery solution in cities. The growth of the transport sector is very harmful to the environment, being responsible for approximately 40% of greenhouse gas emissions in the European Union. The problem is aggravated when transporting perishable foodstuffs, as the vehicle propulsion engine (VPE) must power not only the vehicle but also the refrigeration unit. This means that the VPE must be running continuously, both on the road and stationary (during delivery), as the cold chain must be preserved. The result is costly (high fuel consumption) and harmful to the environment. At present, refrigerated transport does not support full-electric solutions, due to the high energy consumption required, which motivates the work presented in this article. It presents a turnkey solution of a hydrogen-powered refrigeration system (HPRS) to be integrated into standard light trucks and vans for short-distance food transport and delivery. The proposed solution combines an air-cooled polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC), a lithium-ion battery and low-weight pressurised hydrogen cylinders to minimise cost and increase autonomy and energy density. In addition, for its implementation and integration, all the acquisition, power and control electronics necessary for its correct management have been developed. Similarly, an energy management system (EMS) has been developed to ensure continuity and safety in the operation of the electrical system during the working day, while maximizing both the available output power and lifetime of the PEMFC. Experimental results on a real refrigerated light truck provide more than 4 h of autonomy in intensive intercity driving profiles, which can be increased, if necessary, by simply increasing the pressure of the stored hydrogen from the current 200 bar to whatever is required. The correct operation of the entire HPRS has been experimentally validated in terms of functionality, autonomy and safety; with fuel savings of more than 10% and more than 3650 kg of CO₂/year avoided.

1. Introduction

At the beginning of the millennium, the rural population was 1,16 times the urban population. In fact, the rural population has been above the urban population since 1960, when historical data are available [1].

But this trend was reversed in 2007 [2], when the urban population was 50% of the total world population, and by 2050 the urban population is expected to reach 68%. Urbanization will be one of the most transformative trends of the 21st century. With the increase of the world population and the general improvement of living conditions, the demand for food, water and energy is expected to increase by 50%, 30%

^{*} Corresponding author.

E-mail address: francisco.vivas@diesia.uhu.es (F.J. Vivas).

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120945>

Received 2 June 2022; Received in revised form 24 February 2023; Accepted 5 March 2023

Available online 13 March 2023

0306-2619/© 2023 The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Nomenclature			
Acronyms			
AC	Alternating Current	H_2	Hydrogen level (%)
APU	Auxiliary Power Unit	$H_{2,min}$	Minimum hydrogen level (%)
BoP	Balance of Plant	$I_C(t)$	Capacitor current (A)
CCM	Continuous Conduction Mode	$I_L(t)$	Inductor current (A)
DC	Direct current	$I_R(t)$	Load current (A)
EMI	Electromagnetic Interference	L	Inductor (H)
EMS	Energy Management System	P_{H_2}	Hydrogen storage pressure (bar)
EU	European Union	P_{aux}	Power demanded by auxiliaries (W)
FC	Fuel Cell	P_{Bat}	Battery power (W)
GHG	Greenhouse Gases	P_{cool}	Power demanded by the electric refrigeration compressor (W)
HPRS	Hydrogen-powered refrigeration system	P_{DCAC}	DC/AC converter power (W)
LCV	Light Commercial Vehicles	P_{DCDC}	Interleaved DC/DC boost converter power (W)
MPP	Maximum Power Point	P_{FC}	Fuel cell power (W)
P&OM	Modified Perturbation and Observation	$P_{FC,SP}$	Fuel cell preset power limit (W)
PEM	Polymer Electrolyte Membrane	R	Load resistor (Ω)
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell	SOC	Battery state of charge (%)
PWM	Pulse Width Modulation	t_{stop}	Daily time when the vehicle stops, and the electric refrigeration compressor activates (h)
RS	Refrigeration system	T_{amb}	Ambient temperature ($^{\circ}C$)
SOC	State of Charge	T_{DCDC}	Operating temperature of the DC/DC boost power converter ($^{\circ}C$)
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	$T_{DCDC,max}$	Maximum operating temperature allowed at DC/DC boost power converter ($^{\circ}C$)
VARS	Vapour Absorption Refrigerated System	V_{Bat}	Battery voltage (V)
VPE	Vehicle propulsion engine	$V_{Bat,FC}$	Battery preset voltage to activate fuel cell (V)
Notation and symbols		$V_{Bat,min}$	Minimum battery voltage (V)
C	Filter capacitor (F)	$V_{Bat,max}$	Maximum battery voltage (V)
C_{Bat}	Battery capacity (Ah)	$V_{Bat,N}$	Nominal battery voltage (V)
$C_{H_2,FC}$	PEMFC hydrogen consumption rate (litres/min)	$V_{DC,bus}$	DC bus voltage (V)
δ	Duty cycle	V_{bottle}	Bottle volume (litres)
$\Delta I_L(t)$	Inductor ripple current (A)	V_{FC}	Fuel cell voltage (V)
$\Delta V_C(t)$	Capacitor ripple voltage (V)	$V_{FC,SP}$	Fuel cell preset voltage limit (V)
E_{req}	Required energy to guarantee the electric compressor operation (Wh)	$V_{H_2,bottle}$	Volume of hydrogen stored in bottle (litres)
η_{DCAC}	DC/AC converter performance	$V_{H_2,req}$	Required hydrogen volume (litres)
η_{H_2}	Hydrogen utilization efficiency of hydrogen-based power system	$V_C(t)$	Capacitor voltage (V)
f_s	PWM signal frequency (20 kHz)	$V_L(t)$	Inductor voltage (V)
		Z	Hydrogen compressibility factor

and 45%, respectively [3]. The increase in food demand, as well as the expansion of online commerce, will be accompanied by a proportional growth of food transportation, usually refrigerated. However, the transport sector is one of the most polluting, in Spain for example, in 2019, it reached 29.1% of greenhouse gases (GHG) emissions [4].

In particular, light trucks and vans used for a wide range of services, such as construction, refrigerated food delivery and ambulances [5,6], are responsible for 2.5% of total carbon dioxide (CO₂) emissions in the European Union (EU) [7].

On the other hand, the cold chain, which guarantees the quality and safety of food during transport and delivery, is maintained by means of refrigeration systems (RSs) integrated into vehicles. These cooling systems, whether electric or mechanical, are always powered by a combustion (diesel) engine. The same combustion engine that powers light trucks and vans, or an auxiliary combustion engine in large trucks. Therefore, transport vehicles equipped with RSs consume more fuel and emit more GHG. The environmental impact of a diesel-powered RS can be up to 40% of that of the vehicle propulsion engine (VPE) [8]. The additional diesel consumption due to RS is around 12%, which represents a fuel cost of 6,000 € per year, approximately 40% of the direct cost [9].

Considering the above, refrigerated transport is recognised as one of the main processes in terms of potential energy savings and reduction of

GHG emissions in cold chains [10]. The replacement of diesel-based RS by electric (not driven by the VPE) is a strong recommendation for the coming years [11].

In this context, the European Parliament [12] has set an average CO₂ emission target of 147 g CO₂/km for new light commercial vehicles (LCVs) registered in the EU between 2020 and 2024. Spain has a fleet of around 2.5 million LCVs [13], and its target is to reduce emissions by 27 Mt CO₂ by 2030, [14].

In the search for alternative solutions to polluting diesel transport, the need to migrate from internal combustion engines to electric propulsion technology is evident [15]. Currently, the technology is almost exclusively focused on the use of battery-based solutions, but in recent years there has been a great interest in the use of hydrogen-based systems for use in mobile applications [16]. This type of solution is already technically feasible today, characterised by higher energy density compared to battery-based solutions, which is crucial in applications where autonomy and weight reduction are key parameters [16]. In this line of research, few authors have conducted studies on the application of FCs to refrigerated transport.

One of the most recent research focuses on the coupling of a solid oxide FC (SOFC) with a vapour absorption refrigeration system (VARS). The operation is based on the concept of cogeneration, where the heat produced during the operation of the SOFC is used through the VARS to

cool the isothermal refrigerated box, while the generated electricity can be used to meet the consumption of the RS and the vehicle auxiliaries when the VPE is off. Examples of these architectures are studied at simulation level in [3] and [17]. Specifically, in [3] the feasibility of series-parallel SOFC + VARS assembly configurations for use in small, medium and large vans or trucks is analysed from a thermal-economic point of view. A similar study is developed in [17], where the behaviour and technical feasibility of a SOFC auxiliary power unit (APU) with a NH_3 - H_2O based VARS is modelled, simulated and analysed.

The drawback of using SOFCs, [3] and [17], is that they are high temperature FCs (750–1000 °C that require a preheating stage, which lasts up to several tens of minutes [16]. In addition to the above, the operation of SOFCs requires a complex balance of plant (BoP) and energy management system (EMS) that considers the necessary thermal and electrical requirements [18]. Apart from this, SOFCs are designed to provide at least several tens of kilowatts, so they are oversized for use in light refrigerated trucks and vans. Finally, it would require additional space and specific thermal conditions in the vehicle that are difficult to achieve. In contrast, polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) are available from several watts to tens of kilowatts, with smaller size and weight than SOFCs for the same power [19]. Compared to SOFC, PEMFC is characterized by a simpler BoP, a shorter start-up and shut-down times (in the range of seconds), a lower operating temperature (around 70 °C), as well as a better dynamic response [20], which makes it ideal for use in applications such as the one studied here.

Probably, based on the above, other authors have considered the use of PEMFCs for RSs in vehicles. At the simulation level, a comparative study of different hybrid system architectures based on batteries and hydrogen (PEMFCs), for application in a refrigerated semi-trailer truck, is presented in [21]. The performance of each configuration in terms of efficiency and weight was evaluated by simulation for a 60-hour trip. Similarly, in [9] a hybrid power system based on batteries and PEMFC for use in refrigerated trucks is simulated, designed and modelled using the SH2&FC software tool. The scope of this work ends with a techno-economic feasibility analysis based on system sizing and different consumption profiles, as well as a hydrogen chain availability study. Prototype testing is postponed for future work.

Several papers have evaluated experimental prototypes. For example, [22] proposes a hybrid architecture based on supercapacitors, batteries and a PEMFC as APU to power the electric RS replacing the vehicle's internal 12 VDC battery and alternator. In this architecture, the supercapacitors absorb the power peaks during the RS starts, while the PEMFC supplies the demand profile the rest of the time. The role of the battery is to ensure the power supply to the BoP of the PEMFC. Although the prototype shows its technical feasibility, successive changes in operating power, as well as repetitive on/off cycling of the PEMFC will lead to its rapid degradation, with the consequent loss of performance, efficiency and economic unfeasibility [23]. Moreover, its validation was carried out at the laboratory level, so the integration of the APU in the vehicle is not addressed.

Similarly, a hybrid architecture based on batteries and a multi-stack PEMFC system, composed of three PEMFCs operating in parallel, is presented in [24]. The function of the prototype is to replace the auxiliary diesel engine that powers the compressor of refrigerated semi-trailer trucks with a hydrogen-powered genset. The sizing of the system follows the roles defined for the batteries and the PEMFCs. In this case, the batteries are used as a short-term energy storage system (with a small-capacity battery), while the hydrogen system is used for the long term (with a large-capacity H_2 tank). Experimental tests include individual component characterization and RS validation for different temperature conditions simulated in a climatic chamber. Despite the experimental nature of this work, its performance has only been evaluated during the so-called pulldown phase, in which the RS operates at maximum power to reach the target temperature, so no information is available on the performance of the RS in the temperature regulation phase. In addition, vehicle integration and road testing are not

addressed.

Finally, Nuvera® presents in [25] a proprietary prototype of a high-power hybrid architecture for use in long-haul refrigerated trucks. The proposal aims to replace the RS auxiliary diesel engine with a solution that integrates the hybrid system and the RS in the same chassis. A 20 kW PEMFC is used to power the electric RS on a 480 VAC bus. In this case, the prototype developed for commercial purposes has closed dimensions and power ratings, which makes it impossible to be adapted to different vehicle sizes and applications, in addition to requiring structural changes in the vehicle for installation.

In response to the shortcomings found in the literature, the authors present in this work a turnkey solution of a hydrogen-powered refrigeration system (HPRS) that, fully integrated in light trucks and vans, allows transporting and delivering refrigerated goods in an environmentally friendly way.

To the authors' knowledge, neither a detailed design demonstrating the full integration of this type of RS in a vehicle, nor experimental results tested under real driving profiles, have been published in the scientific literature so far. The proposed solution is based on a "plug and play" philosophy that hybridizes an air-cooled PEMFC with a lithium-ion battery pack and pressurized lightweight hydrogen bottles.

The main novelties of the proposal presented in this paper are listed below:

- The developed HPRS minimizes cost and increases autonomy and energy density.
- The developed EMS ensures continuity and safety in the operation of the whole RS and vehicle facilities.
- The developed EMS extends the lifetime and maximizes the power extracted from the PEMFC under intensive intercity driving profiles.
- The developed HPRS is easily integrated into the commercial chassis of light trucks and vans without the need for structural changes.
- The vehicle's original RS, both in terms of equipment and facilities, remains unchanged.
- The performance of the developed HPRS has been validated in experimental road tests under intensive intercity driving profiles.

Table 1 presents a comparative between the reviewed literature and the authors' proposal.

The paper is organized as follows: Section 2 explains the materials and methods used to develop the HPRS, including a detailed description of the design, power electronics and EMS. Section 3 brings together the physical implementation and experimental results, which are discussed in Section 4. Finally, conclusions are presented in Section 5.

2. Materials and methods

The definition and design of the proposed HPRS is based on the energy requirements defined for the practical application under study. Specifically, the HPRS has been designed for integration and use in a light truck for the transport of refrigerated perishable food at a temperature of 4 °C in an 8-hour intercity driven profile. The scenario is a city in south-western Spain (Huelva) with a subtropical climate and, therefore, with many cold losses in transport and delivery. The driven profile is characterized by a high number of short distance trips followed by a high number of stops to unload goods. Specifically, for the current design of the HPRS, driving and stopping times of the vehicle have been considered similar (4 h driving on the road and 4 h in standby or parked), according to estimates and surveys of professionals in the sector.

The following sections will present the design of the architecture and components of the developed HPRS.

Table 1
Comparison of the contributions of the work presented with the literature reviewed.

Reference	Fuel Cell	Manufacturer	Nominal Power	Feature	Powered by	Development level
Authors proposal	PEMFC	Horizon®	2 kW	Conservative use of hydrogen. Enhanced lifespan. Thermal control of the hydrogen system. P&OM* control algorithm for PEMFC. Range extender application. Autonomy:4 h extendable to more than 8 h.	PEMFC + batteries	Full integration on vehicle. Prototype on the road
[3]	SOFC	Non detailed	Small van: 3.3 kW Medium van: 12.8 kW Large van: 18.7 kW	The SOFC powers the electrical part, and its waste heat powers the VARS	VARS + SOFC	Simulation
[17]	SOFC	Non detailed	Small van: 2 kW Medium van: 5 kW Large van: 9 kW	Separates the cooling load from the main diesel engine	VARS + SOFC	Simulation
[21]	PEMFC	Non detailed	Non detailed	Analysis of architectures for a hybrid FC and battery power supply. Comparison of hydrogen consumption and degradation	PEMFC + batteries	Simulation
[9]	PEMFC	Non detailed	-	Analysis of load profiles. Study of hydrogen chain	PEMFC + batteries	Simulation
[22]	PEMFC	Ballard Power System®	1.2 kW	Hydrogen-based APU powers the cooling electrical load by replacing battery and alternator	PEMFC + batteries	Laboratory set-up
[24]	PEMFC	Non detailed	Non detailed	Replaces the fuel tank and the diesel engine driving the cooling compressor with a hydrogen-powered genset	PEMFC + batteries	Laboratory set-up
[25]	PEMFC	Nuvera®	20 kW	FC-based APU prototype. Component characterization	PEMFC + batteries	Laboratory testing of individual components

* Modified perturbation and observation algorithm to extract the maximum power from the PEMFC.

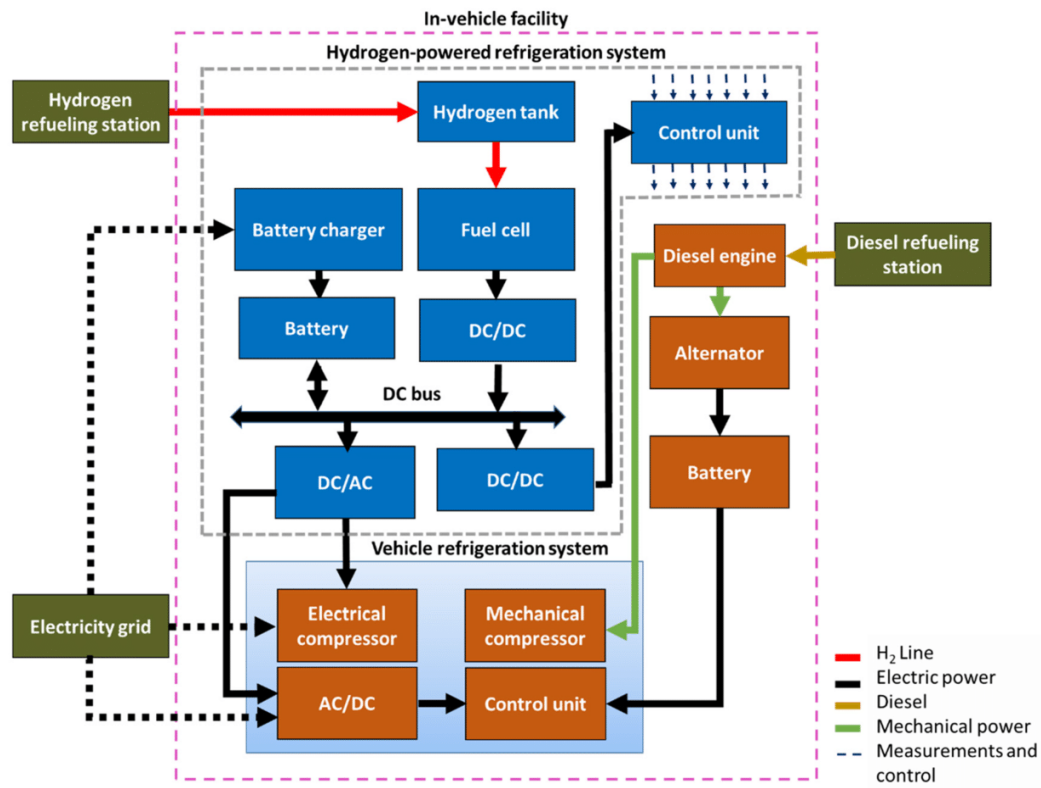


Fig. 1. Vehicle-integrated hydrogen-powered refrigeration system architecture.

2.1. Design and sizing

2.1.1. Hydrogen-powered refrigeration system architecture

To meet the desired objective, the HPRS architecture must be properly designed. To this end, it is essential to take advantage of all the standard equipment of the vehicle to minimize the modifications to be made. This will facilitate the homologation of the vehicle after its upgrade and, on the other hand, will make the diesel-hydrogen conversion cheaper.

In this regard, it is common for refrigerated light trucks and vans to integrate two complementary solutions to operate the RS. The first is based on the use of a mechanical compressor, mechanically coupled to the VPE (larger refrigerated trucks have an auxiliary diesel engine to power the RS), Fig. 1. Logically, this configuration only works when the VPE is on. The second is based on a three-phase AC or single-phase AC electric unit, which includes an electric compressor. This means that when the vehicle is at a service station or base, the RS can be powered from the electricity grid through a socket provided in the vehicle, Fig. 1.

Considering the premise of easy integration, the HPRS design is based on the existing electrical unit. For this purpose, two energy storage systems, battery, and hydrogen, will be hybridized. From this starting point, a power electronic and control system will be implemented which, together with the development of a specific EMS, must ensure a constant supply of the RS. Therefore, the conceived solution is that when the vehicle is running, the mechanical compressor driven by the VPE will power the RS. However, when the vehicle is parked or stopped for delivery, the VPE will be turned off, and the HPRS will be responsible for maintaining the RS through the vehicle's electric compressor.

The proposed HPRS architecture is based on the design of a hybrid system consisting of a battery, the hydrogen subsystem, a DC bus, all the necessary power and control electronics, and the EMS (housed in the control unit) that manages everything, Fig. 1.

The HPRS battery sets the DC bus voltage and remains permanently charged through it. Therefore, the function of the FC is to recharge the battery by supplying power to the DC bus through its DC/DC converter, which converts the unregulated power at the output of the FC into regulated power at the DC bus. The vehicle's electric compressor is powered from the DC bus through a DC/AC converter that also powers the RS control unit. The HPRS is completed with the hydrogen storage tank and the necessary supply lines, solenoid and control valves, and pressure regulation devices. In addition, a standard battery charger has been incorporated to charge the HPRS battery from the electricity grid. Thus, in case of FC failure or lack of hydrogen, the HPRS can continue to operate with reduced autonomy.

2.1.2. HPRS energy requirements

The energy required by the HPRS is determined by the described intercity route of the vehicle. Thus, considering the rated power of the installed electric refrigeration compressor ($P_{cool} = 2.5$ kW), the overall stopping time ($t_{stop} = 4$ h) and the DC/AC conversion efficiency, η_{DCAC} , estimated at 90 %, equation (1) determines the required amount of energy (E_{req}) to be supplied by the HPRS during a working day. The worst-case scenario has been considered, i.e., the compressor is always running during the stopping time.

$$E_{req} = \frac{P_{cool} \cdot t_{stop}}{\eta_{DCAC}} \quad (1)$$

Resulting $E_{req} = 11.11$ kWh.

2.1.3. Fuel cell and hydrogen storage sizing

- Fuel cell sizing

The PEMFC chosen is an air-cooled FC, due to its reduced BoP, lower

cost and easy management [26–28]. Regarding its sizing, it must respond to a commitment between energy and power. Thus, it will not be necessary to use a FC whose power is at least equal to the maximum power required, which would considerably increase its cost. As shown in Fig. 1, the battery is directly connected to the DC bus, so it can support the maximum power. However, the FC should charge the battery quickly (when the vehicle is in motion and the electric compressor is off) and contribute efficiently to avoid large battery discharges during stopping times.

Considering the solutions available on the market and design considerations, the Horizon® 2000 W air-cooled PEMFC was chosen. This model integrates the entire BoP and its control, which greatly facilitates the integration and management tasks. For the purposes of this research, the FC is a black box through which hydrogen enters and unregulated electrical power exits.

- Hydrogen storage sizing

For the sizing of the hydrogen storage system, it is necessary to consider the autonomy of the HPRS, as well as certain physical limitations in terms of weight and dimensions. The weight should be as low as possible so as not to reduce the vehicle's payload capacity too much. In terms of size, the ideal is to take advantage of the vehicle's structural openings, avoiding any modifications of its chassis.

Based on the above, it has been decided to use pressurized hydrogen bottles of low weight and small dimensions, specially designed for mobile applications. Taking into account the solutions available on the market, the required autonomy and the design considerations, the Carbottainer® B20 200 bar (full weight 25 kg, dimensions: Ø 30 mm and length 900 mm) has been selected. This bottle is made of lightweight materials, such as high-performance carbon fiber and thermoplastic polymers, which give it high mechanical strength. In addition, the aluminium alloy coating (thin metallic layer that prevents the passage of hydrogen) has undergone a heat treatment that makes it highly elastic and resistant to fatigue cycles, giving it a service lifespan of 30 years.

Once the hydrogen bottle has been selected, it is necessary to calculate the number of units needed to guarantee the required autonomy of the HPRS.

For this, knowing the rated power (P_{FC}) and hydrogen consumption ($C_{H2_{FC}}$) of the selected PEMFC, 2000 W and 1560 L/h (26 l/min) respectively, and considering a conservative energy use of hydrogen (η_{H_2}) of 80 % (due to losses associated with the efficiency of the DC/DC converter, wiring, protections and purges), the overall volume of hydrogen needed to guarantee the required autonomy of the HPRS ($V_{H2_{req}}$) corresponds to expression (2).

$$V_{H2_{req}} = \frac{E_{req} \cdot 50\%}{P_{FC} \cdot \eta_{H_2}} \cdot C_{H2_{FC}} \quad (2)$$

Resulting $V_{H2_{req}} = 5417$ L.

Knowing the volume ($V_{bottle} = 20$ L) and operating pressure of the selected bottle ($P_{H_2} = 200$ bar), and considering the hydrogen compressibility factor ($Z = 1,132$ at 200 bar and 298 K), the total volume of hydrogen available in the bottle ($V_{H_2_{bottle}}$) is calculated in equation (3):

$$V_{H_2_{bottle}} = \frac{V_{bottle} \cdot P_{H_2}}{Z} \quad (3)$$

Resulting $V_{H_2_{bottle}} = 3534$ L.

Therefore, two bottles will be required to keep the proposed HPRS in operation during vehicle stopping time for a full working day.

2.1.4. Battery sizing

Several fundamental aspects have been considered for the sizing of the battery, such as energy density, commercial availability, nominal voltage, and autonomy.

As already discussed, one of the key aspects is the minimization of the weight of the HPRS. This is critical to maximize the payload of the vehicle. This requires the use of high energy density battery technology, so lithium-ion technology batteries will be used for this application.

The choice of rated battery voltage is closely linked to the commercial availability of both batteries and DC/AC converters. Specifically, the most common commercial solutions, and therefore more robust and economical, are based on battery configurations covering voltage ranges from 12 to 72 VDC, the most common being 12, 24, 48 and 60 VDC. The selection of the nominal voltage of the battery must respond to a commitment between the availability of commercial solutions and operation at low currents, as this reduces costs in losses, wiring and electrical protection. Based on the above, a battery with a nominal voltage (V_{BatN}) of 60 VDC has been chosen.

Finally, the battery autonomy is determined by calculating its nominal capacity (C_{Bat}). Then, considering the energy to be provided by the battery (50 % of (1)), its nominal voltage ($V_{BatN} = 60$ VDC), as well as the power supply of the BoP and all the developed electronics ($P_{aux} = 350$ W approximately), the value of its nominal capacity is defined by expression (4).

$$C_{Bat} = \frac{E_{req} \cdot 50\% + P_{aux} \cdot t_{stop}}{V_{BatN}} \quad (4)$$

Resulting $C_{Bat} = 116$ Ah.

Based on the calculations performed, a commercial Samsung® 50E battery of 60 VDC and 120 Ah has been chosen.

2.1.5. DC/DC boost converter design

For the correct integration and control of the PEMFC on the DC bus, defined by the selected battery, and considering their nominal voltage values ($V_{FC} = 28$ VDC, $V_{BatN} = 60$ VDC), it is evident the need to use a boost topology power converter, specifically with a boost ratio of approximately 2:1. Such a ratio is easily achievable with the use of non-isolated topologies [29,30], which are simpler and cheaper than isolated ones, and which also operate in a practically linear region and with high efficiency. Specifically, for this application and for the selected PEMFC, the use of a 2-kW interleaved boost DC/DC converter is proposed. The use of an interleaved architecture allows reducing the design requirements of the power components, increasing the overall converter efficiency by reducing Joule losses when operating at lower currents, as well as reducing the current ripple at the converter input, which is essential to reduce stress in the PEMFC operation [31,32]. Specifically, the interleaved DC/DC boost converter consists of two DC/DC boost

converters operating in parallel with analog control signals 180° out of phase with each other.

Finally, to complement the positive effect of the interleaved topology with respect to the PEMFC output current ripple, as well as to reduce electromagnetic interference (EMI) and its impact on the rest of the electronics, a PI-type EMI filter has been used at the input of each converter. Fig. 2 shows the architecture of the proposed interleaved boost converter.

- DC/DC boost converter model

For the design of the interleaved DC/DC boost converter it is necessary to obtain the mathematical model describing its behaviour. To simplify the analysis, it is sufficient to evaluate the dynamic behaviour of a single DC/DC boost converter, since the operation of both converters is analogous and independent. For its modelling, the operation in continuous conduction mode (CCM) will be considered.

For modelling purposes, the components will be ideal (this is sufficient for this analysis). Two characteristic times, t_{off} and t_{on} , will be defined, representing the fractions of time in which the MOSFET transistor Q is OFF (case 1) and ON (case 2) respectively. The sum of both times defines the period T of the control signal. According to the above, the equivalent circuit of the DC/DC boost converter for cases 1 and 2 is

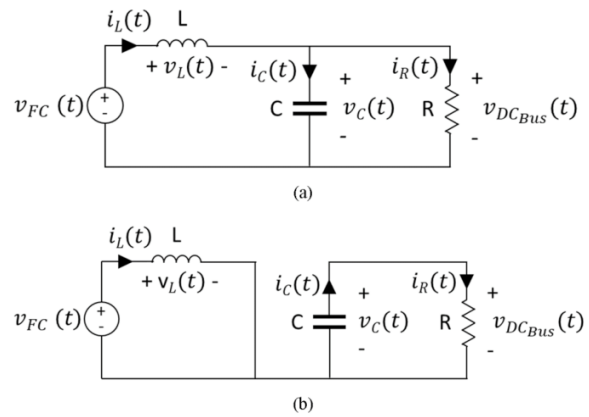


Fig. 3. DC/DC boost converter. a) Equivalent circuit for Q off, case 1; b) Equivalent circuit for Q on, case 2.

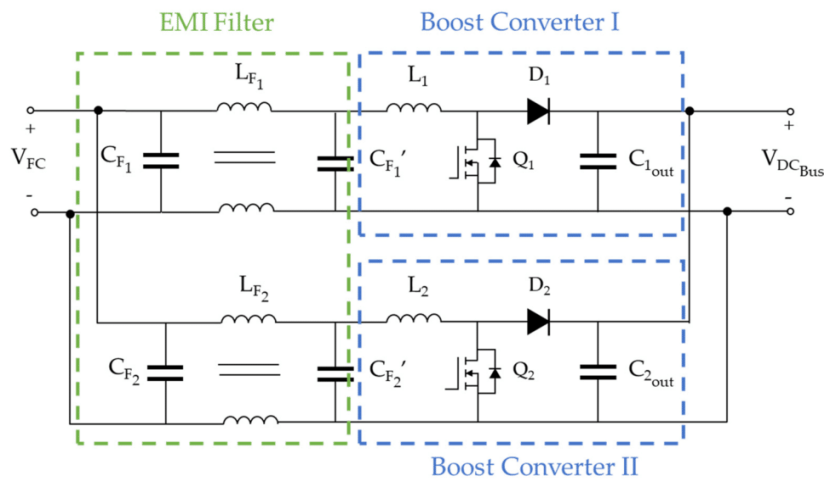


Fig. 2. Interleaved DC/DC boost converter.

shown in Fig. 3a and 3b respectively.

Considering case 1, Fig. 3a. Q is OFF, D is forward biased and thus drives the current from the PEMFC to the output of the DC/DC converter, Fig. 3a. Then, assuming a constant input and output voltage, V_{FC} and $V_{DC_{Bus}}$ due to the FC and the high capacitance capacitor C and the battery, the voltage at L is also constant and negative, $v_L(t) = V_{FC} - V_{DC_{Bus}}$, and the current through L decreases linearly. Based on above, and according to the equivalent circuit of Fig. 3a, the equations modelling the current and voltage behaviour of the of the capacitor and inductor are presented in (5) and (6) respectively.

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt} = i_L(t) - i_R(t) \rightarrow \frac{dv_C(t)}{dt} = \frac{i_L(t)}{C} - \frac{v_C(t)}{RC} \quad (5)$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{FC}(t) - v_C(t) \rightarrow \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_{FC}(t) - v_C(t)}{L} \quad (6)$$

On the other hand, when Q is ON (case 2, Fig. 3b), regardless of the abrupt transition of the electronic switch, the inductor current must maintain continuity, so D is reversed biased, Fig. 3b. Then, assuming a constant input voltage V_{FC} due to the FC, the voltage at L is also constant and positive, $v_L(t) = V_{FC}$, and the current at L increases linearly. Based on the above, and according to the equivalent circuit in Fig. 3b, the equations modelling the current and voltage behaviour of the capacitor and inductor are presented in Eqs. (7) and (8) respectively.

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt} = -i_R(t) \rightarrow \frac{dv_C(t)}{dt} = -\frac{v_C(t)}{RC} \quad (7)$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{FC}(t) \rightarrow \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_{FC}(t)}{L} \quad (8)$$

Considering the inductor current and capacitor voltage as state variables, the FC voltage $v_{FC}(t)$ as input variable, the DC bus voltage as output variable and considering the duty cycle, $\delta = t_{on}/T$, equations (5) - (8) allow to obtain the state space model of the converter (9). For the instantaneous value of the converter model, the duty cycle takes values of 1 and 0 during the time intervals t_{on} and t_{off} , respectively, coinciding with the practical limit of the duty cycle of the transistor. For the average value of the model, the duty cycle takes values between 0 and 1, coinciding with the duty cycle of the converter.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(1-\delta)}{L} \\ \frac{(1-\delta)}{C} & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_{FC} \quad (9)$$

$$[v_{DC_{Bus}}] = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix}$$

The DC/DC converter transfer function can be calculated from the model developed in (9) for the steady state ($[\dot{i}_L \dot{v}_C]^T = 0$), resulting in equation (10).

$$\frac{V_{DC_{Bus}}}{V_{FC}} = \frac{1}{1-\delta} \quad (10)$$

Eq. (10) shows that by varying the duty cycle it is possible to regulate the conversion ratio.

- DC/DC Boost Converter design and implementation

For the design of the inductance and capacitance of each boost converter, its operation in CCM will be considered and therefore the expressions (5)-(8) and (10). The design characteristics in terms of power, conversion ratio and frequency of the control signal will be established as follows.

Considering the power required and the advantages of the interleaved topology, each DC/DC boost converter should provide half the current/power of the entire DC/DC boost converter, i.e., 1 kW.

For the calculation of the conversion ratio, it is necessary to define the worst-case condition in the PEMFC – DC bus connection through the converter. Then, if the FC always works at its nominal power, $V_{FC} = 28$ VDC; however, the DC bus voltage can reach a maximum value of 64 VDC due to its direct connection to the battery. Based on the above, and according to (10), the duty cycle responding to the most restrictive condition will be $\delta = 0.563$.

Finally, to govern the switching of the transistors of the converter, a pulse width modulation (PWM) signal frequency (f_s) of 20 kHz has been selected because is value widely used in power electronics design.

For the inductor calculation, based on Fig. 3b, when Q is ON, the relationship between current and the voltage at L is given by (8) and in its incremental form by (11).

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{FC}}{L} \quad (11)$$

If $\Delta t = t_{on} = \delta/f_s$, (11) can be written as (12).

$$L = \frac{V_{FC} \cdot \delta}{\Delta I_L \cdot f_s} \quad (12)$$

Since ΔI_L is the swing of the current in the inductor L during t_{on} , in practice, it is the ripple. However, (12) shows that the price to pay for a low ripple is a large inductor, which may be a bad decision, because as is well known the most non-ideal element of the converter is precisely the inductor. Therefore, it is best to assume a relatively large ripple in the inductor which can then be damped by a high capacitance output capacitor. Thus, assuming a conservative value $\Delta I_L = 30\% \cdot I_L$ and using the extreme values in (12), the value of L is obtained by (13).

$$L = \frac{28VDC \cdot 0.563}{0.3 \cdot \frac{1000W}{28VDC} \cdot 20000Hz} = 74\mu H \quad (13)$$

Therefore, a commercial 80 μH inductor is chosen.

Regarding the output capacitor C , according to Fig. 3b, its voltage is given by (7), and in its incremental form by (14).

$$\frac{\Delta V_C}{\Delta t} = \frac{I_C}{C} \quad (14)$$

Again, if $\Delta t = t_{on} = \delta/f_s$, C is given by (15).

$$C = \frac{I_C \cdot \delta}{\Delta V_C \cdot f_s} \quad (15)$$

Where I_C will be that corresponding to the ripple in L , $I_C = \Delta I_L = 30\% \cdot I_L$. Thus, assuming a voltage variation at the output voltage of only $1\% \cdot V_{DC_{Bus}}$ (this will keep $V_{DC_{Bus}}$ constant, as desirable), and using, again, extreme values, the C value is obtained by (16).

$$C = \frac{0.3 \cdot \frac{1000W}{28VDC} \cdot 0.563}{0.01 \cdot 64VDC \cdot 20000Hz} = 470\mu F \quad (16)$$

Therefore, a commercial 470 μF capacitor is chosen.

2.2. Development

Based on the sizing performed in Section 2.1 and the general structure of the HPRS presented in Fig. 1, this section will develop in detail the proposed HPRS, which is shown in Fig. 4.

The HPRS architecture is composed of three systems, the power unit, the hydrogen storage, and the cabin control, which integrates the ignition key and the user interface, each of them located in a different area of the truck according to its functionality. Thus, the power unit is located inside the refrigerated box of the vehicle, inside a thermally insulated enclosure specially designed for this application (blue area, Fig. 4). The choice of this location responds to two fundamental needs, space, and cooling. As this is a prototype of HPRS on a standard vehicle, the vehicle body does not allow the possibility of installing the power unit outside. Another important reason was that structural changes to the truck must

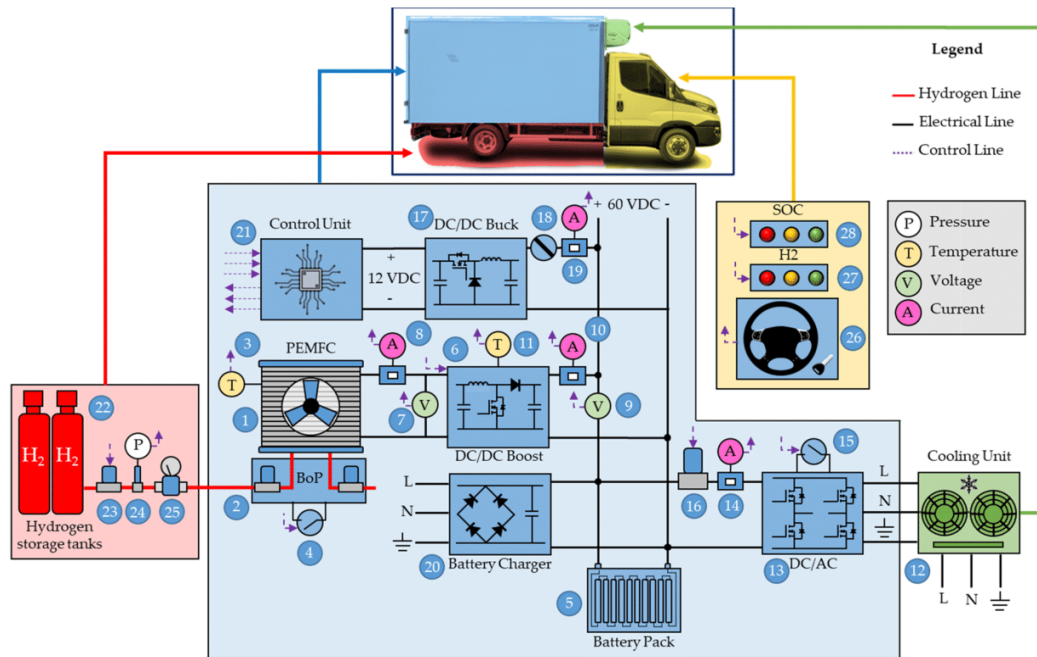


Fig. 4. Hydrogen-powered refrigeration system. Component layout.

be kept to a minimum to comply with current regulations. In addition, this location isolates the power unit from the high temperatures caused by the vehicle's exhaust gases. To prevent the heat generated by the PEMFC and the power equipment from accumulating in the enclosure, a forced air inlet and outlet to the outside has been provided in the refrigerated box of the vehicle. These ducts have been duly protected to avoid thermal bridges and the entry of rain from the outside.

The hydrogen storage system was located on the sides of the truck (red zone, Fig. 4), just below the refrigerated box, for manoeuvrability and safety reasons. Thus, the chosen location allows easy access to the pressurized hydrogen bottles, so that they can be replaced quickly and safely. In addition, this location prevents the formation of explosive atmospheres in the event of a hydrogen leak.

Finally, the general control was integrated into the vehicle cabin, right next to the driver's seat. (Yellow area, Fig. 4).

In the following, each of the three systems will be analysed and described.

First, considering the power unit, it is based on a commercial 2 kW PEMFC (1, Fig. 4), which also integrates its BoP and local control (2, Fig. 4). It manages the supply and purge solenoid valves, the thermal control of the stack (it incorporates a temperature sensor that manages the axial fans to cool and oxygenate the stack) and the electrical connection to the load. For operation, an external 12 VDC power supply is required. In addition, to implement the developed control law (Section 2.3.3), an additional thermoresistance-type ambient temperature sensor has been installed (3, Fig. 4). Finally, a control relay (4, Fig. 4) has been incorporated into the BoP management system which, commanded by the control unit (21, Fig. 4), allows the PEMFC to be switched on or off remotely.

According to the operation already described, the PEMFC is used to charge the battery (5, Fig. 4). For this purpose, the developed DC/DC boost converter ensures the correct integration and operation of the PEMFC on the DC bus (6, Fig. 4).

To implement the PEMFC power management algorithm, the DC/DC boost converter integrates voltage and current sensors (7 and 8 respectively, Fig. 4) at its input to measure the PEMFC operating variables.

Similarly, to measure the DC bus voltage and the power delivered by the PEMFC + DC/DC converter assembly, voltage and current sensors are integrated at its output (9 and 10 respectively, Fig. 4). Finally, for thermal management of the DC/DC boost converter, two axial fans with ON/OFF control are installed. They are activated by the thermoresistance-type temperature sensor (11, Fig. 4) mounted on the power heatsink. If for any reason the temperature remains abnormally high despite ventilation, the control unit will shut down the converter.

The battery powers the cooling unit (12, Fig. 4) through a DC/AC converter (13, Fig. 4) when the vehicle is stopped or parked (contact off, 26 Fig. 4). The AC operation allows power supply from the electricity grid or from the developed HPRS (Fig. 1), in both cases single-phase 230 VAC. DC/AC converters are available on the market for the required ratio, so a commercial DC/AC converter was chosen, specifically the model Mars Rock 8,000 W by CNBOU®. The DC/AC consumption from the DC bus is monitored by a current sensor (14, Fig. 4). For remote control, the DC/AC converter incorporates a control relay (15, Fig. 4), whose closing or opening determines its connection or disconnection and, therefore, the power supply to the refrigeration unit. Finally, for safety reasons, a high-current DC contactor (16, Fig. 4) is located between the battery and the single-phase DC/AC converter to ensure electrical isolation when required. This contactor is open when the vehicle is running or during maintenance work.

A DC/DC buck converter (60 to 12 VDC) is required to power all the HPRS auxiliary electronics from the DC bus. The Delta Electronics® model B62SR12424AC was chosen for this purpose (17, Fig. 4). The power consumption of all the auxiliary electronics is monitored by a current sensor (19, Fig. 4). A main switch (18, Fig. 4) that can be manually operated by the driver allows the HPRS to be turned on or off at the beginning or end of the working day, respectively.

To ensure the operation of the HPRS in all circumstances, and to make it as versatile as possible, an auxiliary battery charger has been included (20, Fig. 4). This device allows the battery to be charged from the electricity grid (Fig. 1) when hydrogen is not available or there is a problem with the PEMFC.

Finally, the monitoring of the sensors and the control of all the

actuators and, in general, of the entire HPRS, is performed by a centralised control unit specifically designed for this application based on an ATmega2560 microcontroller (21, Fig. 4).

The hydrogen storage system (red zone, Fig. 4), located on the sides of the vehicle, consists of two Carbotainer® B20 bottles (22, Fig. 4). Each bottle has a capacity of 20 L and stores compressed hydrogen at 200 bar. Hydrogen is supplied through a pipeline incorporating a solenoid valve (23, Fig. 4) to control the opening/closing of the hydrogen flow, and a pressure sensor (24, Figure) to estimate the volume of hydrogen stored in the bottles from the pressure measurement. It also incorporates a two-stage regulator to adapt the 200 bar pressure of the hydrogen bottles to the 0.5 bar pressure of the supply line to the PEMFC (25, Fig. 4).

Finally, the elements located in the vehicle cabin (yellow area, Fig. 4) will be considered. First, there is a vehicle start detection circuit (26, Fig. 4). This circuit provides the control unit with an ON/OFF signal to detect the ignition key. It is important to remember that the activation or deactivation of the vehicle's ignition key will determine whether the developed HPRS will be turned on or off. Regarding the interface with the vehicle driver, an indicator panel with LEDs is also incorporated to show the HPRS status. The first part of the panel consists of three LEDs indicating the hydrogen level in the bottles (27, Fig. 4): high (green), medium (orange) or low (red). The second part of the panel consists of three LEDs indicating the state of charge (SOC) of the battery (28, Fig. 4): high (green), medium (orange) and low (red).

Table 2 summarizes the main technical characteristics of all the elements that, after a careful survey of the market, have been selected for the HPRS, including the model and the manufacturer.

Table 2
Main technical characteristics of the hydrogen-powered refrigeration system.

Components			
Component	Model	Manufacturer	Main characteristics
PEMFC	2000 W air-cooled	Horizon®	Type of fuel cell: PEM Number of cells: 48 Rated Power: 2000 W Performance: 28.8 V @ 70 A Max stack temperature: 65 °C H2 Pressure: 0.45–0.55 bar. Efficiency of stack: 40% @ 28.8 V
Hydrogen bottles (x2)	B20	Carbotainer®	Capacity: 20 l (40 l total) Maximum stored hydrogen: 3.5 Nm ³ (7 Nm ³ total) Operating pressure: 200 bar Ø 265 mm × length 823 mm
Battery	Samsung 50E	Samsung®	Nominal voltage: 60 V Capacity: 120 Ah (7.20 kWh)
DC/AC converter	Mars Rock 8000 W	CNBOU®	Rated power: 8000 W (16000 W peak power) Frequency: 50 Hz / 60 Hz
DC/DC buck converter	B62SR12424AC	Delta Electronics®	Input voltage range: 18 ~ 106 V 200 W Output @ 18 V ~ 27 V Vin range
DC/DC boost converter	Interleaved architecture	Developed by authors	Input voltage range: 20 ~ 50 V 2000 W Output @ 40 V ~ 100 V Vin range

2.3. Energy management system

2.3.1. Control logic of the hydrogen-powered refrigeration system

To increase the performance and lifespan of the HPRS, operating priorities are set on a device-by-device basis. Thus, the battery always guarantees the electrical demand of the electric compressor, while the PEMFC will act as a range extender. In other words, the PEMFC will be used to charge the battery, maintaining its operation at constant power (rated power), regardless of whether the refrigerated vehicle is stationary or in motion. This premise has a dual purpose: to avoid successive start/stop cycles and abrupt changes in the PEMFC power profile, which could lead to a reduction in its lifespan [33,34]. Operating the PEMFC at rated power aims to increase system performance and minimize battery charging time, so that the HPRS responds even to the most unfavourable load profiles, corresponding to routes with a high frequency of stops.

Considering the above, the EMS of the HPRS is described as follow, Fig. 5 and Fig. 6. The EMS implements two parallel controls, one for the battery and other for the PEMFC. These controls will depend on the battery voltage and the ignition key, however, the PEMFC can charge the battery regardless of whether the ignition key is on or off. Assume that the battery is initially charged and that, while the VPE is running (ignition key on), the RS makes use of the VPE and its internal battery to drive the mechanical compressor. At this point, the HPRS remains in standby mode (Fig. 6), which is characterised by the disconnection of the PEMFC and the electrical isolation of the battery and the DC/AC converter.

When the driver stops the VPE (ignition key off), the HPRS starts working (Fig. 6). At this moment, the EMS evaluates the battery voltage (V_{Bat} that is equal to $V_{DC_{max}}$) and, if its value is higher than the preset minimum safety value ($V_{Bat_{min}} = 50$ VDC, 3.125 VDC/cell, or $SOC = 20\%$ approximately), Fig. 6, it activates the DC contactor, allowing the battery to power the electric compressor through the DC/AC power converter. Consequently, the battery supplies the power to the RS. This will cause a prolonged discharge of the battery until its voltage reaches the preset minimum value ($V_{Bat_{fc}} = 54.4$ VDC, 3.4 VDC/cell), Figs. 5 and 6. Then, the EMS evaluates the level of hydrogen stored in the bottles (H_2) and the temperature of the DC/DC power converter (T_{DCDC}). If the hydrogen level is higher than the minimum ($H_{2_{min}} = 10$ bar, equivalent to 400 L (5 %) of maximum stored hydrogen) and the temperature is lower than the maximum value ($T_{DCDC_{max}} = 65$ °C), it will activate the hydrogen supply line and the PEMFC (Fig. 6). Subsequently, the DC/DC boost power converter is activated, and the PEMFC is started in a controlled manner using a step-up profile until the rated power of the PEMFC is reached, Fig. 6. This procedure is intended to reduce the thermal and electrical stress during the PEMFC start-up interval. The $H_{2_{min}}$ value corresponds to the minimum volume of hydrogen that ensures a controlled shutdown of the PEMFC and a minimum hydrogen pressure enough for the two-stage regulator to function properly (25, Fig. 4). The $T_{DCDC_{max}}$ has been selected to ensure a maximum safety temperature of the power semiconductors of approximately 80 °C, considerably lower than their maximum allowable temperature, 120 °C.

When the PEMFC reaches its rated power, its controller keeps it running until one of the shutdown conditions occurs: maximum battery voltage ($V_{Bat_{max}} = 64$ VDC, 4 VDC/cell), low hydrogen level ($H_{2_{min}}$), high operating temperature of the DC/DC boost power converter ($T_{DCDC_{max}}$) or high ambient temperature, Fig. 6. Remember that the HPRS is in an isothermal enclosure (see Fig. 4), so it is necessary to control the ambient temperature. The first three conditions are mandatory and, therefore, determine the immediate shutdown of the PEMFC, while the high ambient temperature situation is a less restrictive condition, allowing corrective actions to ensure the continuous operation of the PEMFC. To this end, the control system regulates the operating power of the PEMFC so that its temperature does not reach the maximum safe operating limit, see Section 2.3.2.

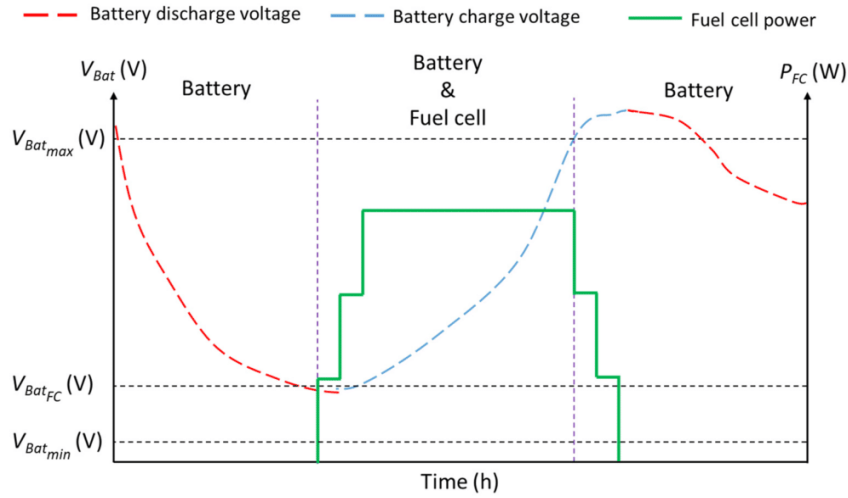


Fig. 5. Hydrogen-powered refrigeration system. Battery/Fuel cell interoperability.

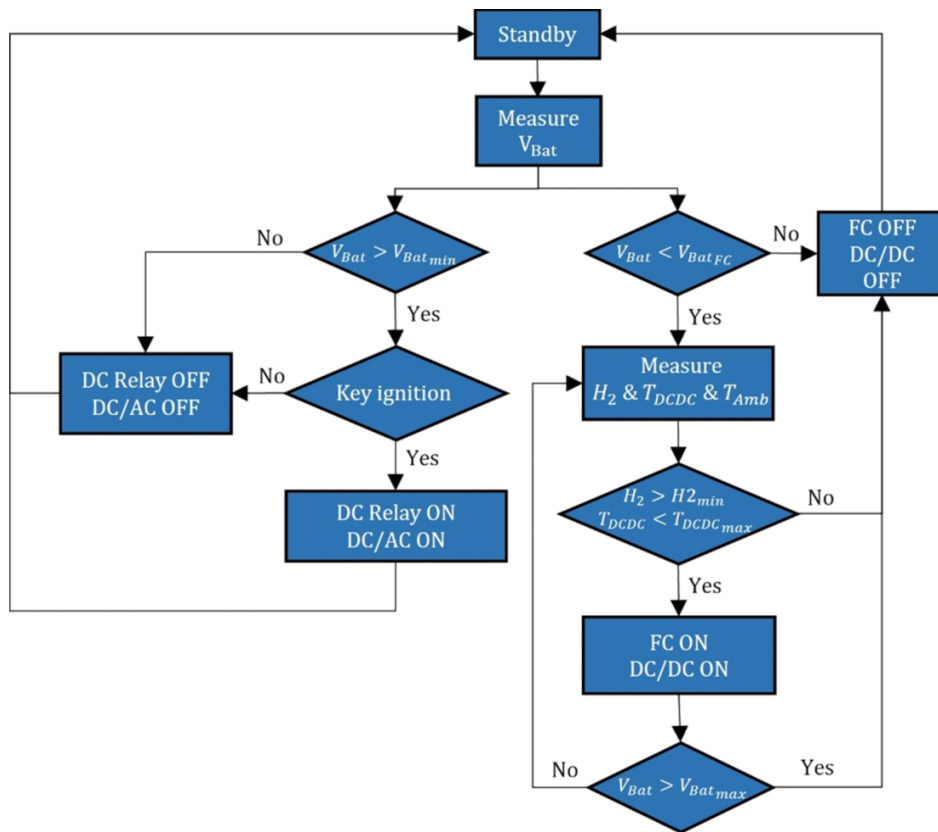


Fig. 6. Hydrogen-powered refrigeration system. Control logic diagram.

Finally, as long as the stored hydrogen level allows, the charging process will continue until the battery voltage reaches the upper limit, V_{Bat_max} , after which the PEMFC will be shut down in a controlled manner, using a step-down profile, until the PEMFC is completely shut down and the hydrogen supply line is closed, Fig. 5 and Fig. 6.

This described process will be repeated indefinitely during the operation of the RS until all the stored hydrogen is consumed or the working day is over. Table 3 lists the characteristic and limit values that define the operation of the developed HPRS.

Table 3
Characteristic values and operating limits of the hydrogen-powered refrigeration system.

Parameter	Value	Meaning
V_{Batmin}	50 VDC	Minimum battery operating voltage, equivalent to a SOC = 20% approximately
V_{BatFC}	54.4 VDC	Battery voltage causing operation of the PEMFC
V_{Batmax}	64 VDC	Maximum battery operating voltage
H_{2min}	10 bar, 400 L	Minimum hydrogen level calculated in terms of pressure (10 bar) and volume of hydrogen (5% of maximum)
$T_{DCDCmax}$	65 °C	Maximum temperature of the heatsink of the interleaved DC/DC boost converter

2.3.2. Control algorithm of the fuel cell and DC/DC converter

A modified perturbation and observation (P&O) algorithm were developed to determine the operating power of the PEMFC regardless of the operating humidity, temperature or accumulated degradation. This algorithm aims to ensure maximum power transfer of the PEMFC (remember that the PEMFC has a variable load at its output) throughout its lifespan, providing excellent results without the need for a mathematical model that captures the dynamic, thermal behaviour and degradation rate of the PEMFC.

The developed P&O algorithm is based on the classical P&O, widely used in photovoltaic systems [35,36]. In this case, the obtaining of the maximum power point (MPP) is based exclusively on the experimental behaviour of the PEMFC polarization curve. Specifically, on the relationship between the slopes of the voltage-current (V – I) and power-current (P – I) curves. Thus, according to Fig. 7, the MPP is determined as the point on the polarization curve at which the derivative of the power with respect to the PEMFC voltage is zero ($\frac{\Delta P_{FC}}{\Delta V_{FC}} = 0$). Similarly, the slope of the V-I and P-I curves will determine the corrective actions to localize the MPP against disturbances in the polarization curve due to variations in the instantaneous operating conditions, thereby increasing or decreasing the operating voltage of the PEMFC, depending on whether it operates in the region defined by $\frac{\Delta P_{FC}}{\Delta V_{FC}} < 0$ or $\frac{\Delta P_{FC}}{\Delta V_{FC}} > 0$ respectively.

On the other hand, modifications to the classical P&O algorithm guarantee two fundamental conditions to preserve the safe and constant operation of the PEMFC: the adequacy of the power limit to thermal stress and the non-operation at low voltage values.

As mentioned above, a high outdoor ambient temperature or a fail-

ure of the forced ventilation circuit can cause a controlled shutdown of the PEMFC due to thermal stress, which would interrupt the power supply to the DC bus. Since it is not possible to act on the BoP, being a commercial system and therefore closed, to ensure continuity of power supply in any circumstance, a modification of the classic P&O algorithm is established. This modification in the control law is based on the imposition of a maximum permissible operating power, P_{FCsp} , as a function of the ambient temperature (T_{amb}), thus posing a tracking problem with respect to the operating power of the PEMFC (P_{FC}), Fig. 7.

The P_{FCsp} calculation is based on the mathematical model (17), obtained from the experimental characterization of the PEMFC operating temperature (T_{FC}) for different power values, considering the ambient temperature inside the enclosure and for the most unfavourable case, i. e., without forced ventilation, see Fig. 8a. Measurements were performed once the stable operating temperature regime was reached.

From this characterization, it is possible to determine the thermal gradient (ΔT_{FC}) associated with each operating power of the PEMFC, Fig. 8a. With its value, and for a given value of ambient temperature, it is possible to determine the maximum operating power that ensures that the temperature of the PEMFC does not exceed the safe operating limit (65 °C). In this case, the power setpoint is correctly set to a linear function with respect to the ambient temperature, Fig. 8c.

$$P_{FCsp} = -48.969 \cdot T_{amb} + 3662.2 \tag{17}$$

Finally, to ensure an efficient and conservative use of the PEMFC, a lower operating voltage limit is set to allow the PEMFC to operate within its standard operating range, defined by the activation and ohmic regions. In this way, a high operational performance is ensured, avoiding working in the concentration region, which could lead to a higher degradation rate associated with the occurrence of hot spots or gas starvation phenomena [37,38]. Then, if the operating voltage is lower than the limit value, the control law establishes a tracking problem with respect to the preset voltage limit ($V_{FCsp} = 25V$), see Figure.

Considering the operating principles of the described P&O algorithm, Fig. 9 describes the control logic implemented in the local control of the DC/DC boost converter to manage the operating power of the PEMFC. Its operation is described below.

It is an iterative procedure and starts from the measurements of the PEMFC current and voltage variables, as well as the ambient temperature in the enclosure. From them, the value of the current operating power of the PEMFC is obtained, as well as, from equation (17), the

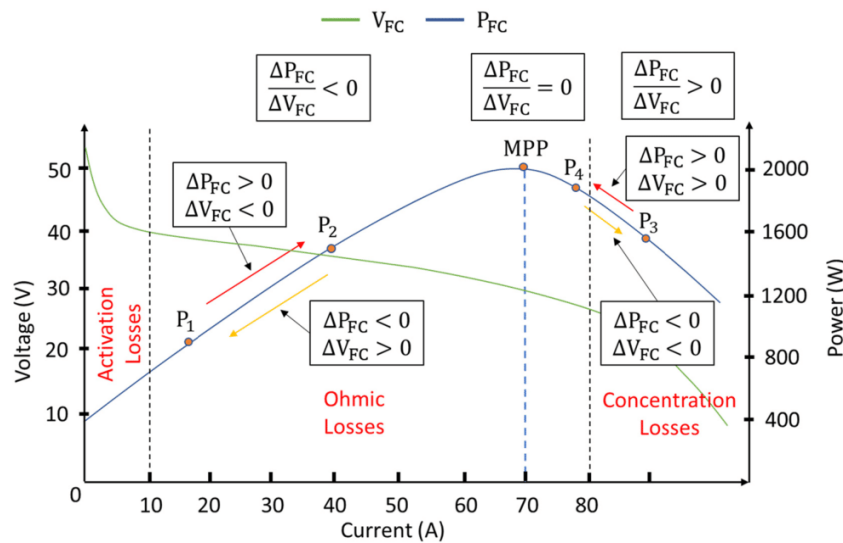


Fig. 7. Working principle of the modified perturbation and observation algorithm.

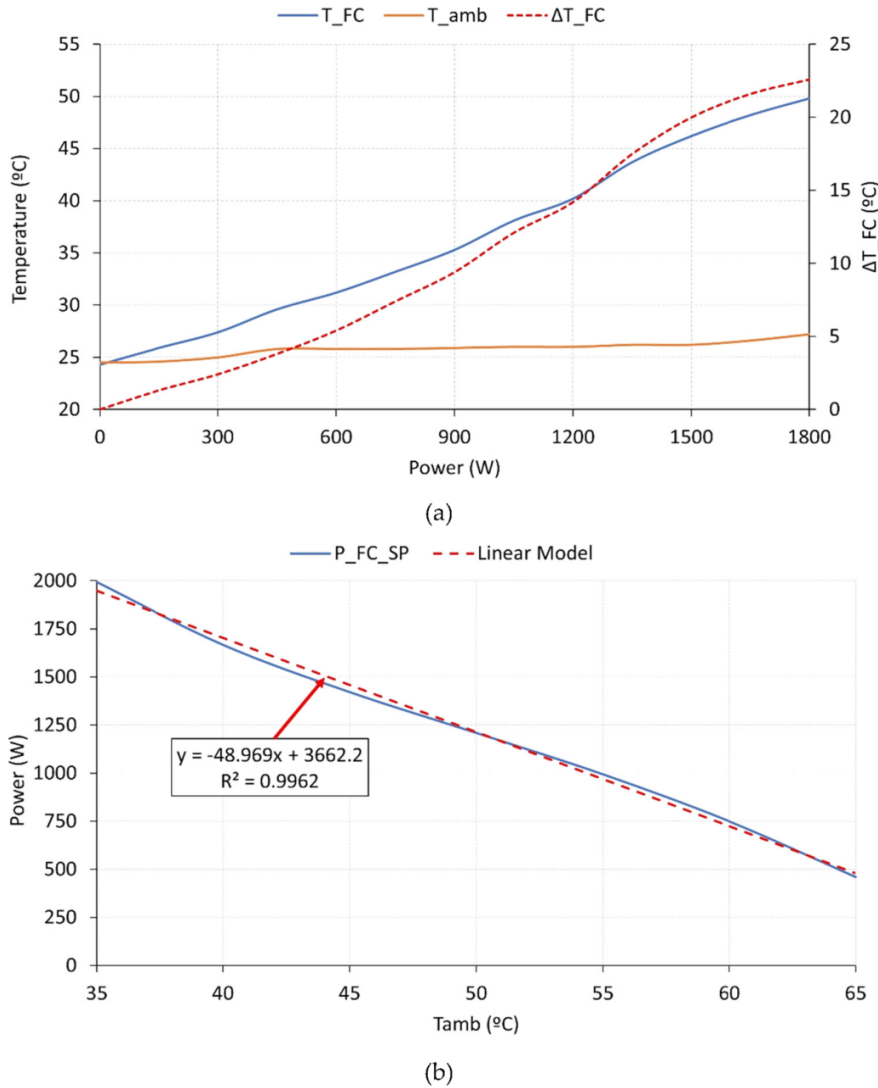


Fig. 8. PEMFC behaviour. (a) PEMFC operating temperature with respect to operating power and ambient temperature and PEMFC temperature variation; (b) Maximum PEMFC power and polynomial model with respect to ambient temperature.

power set-point according to the thermal criterion. Then, following the flow of the developed P&OM algorithm, the slope of the curve defined by the PEMFC power and voltage is evaluated to locate the MPP. Thus, as depicted in Fig. 7, a slope $\frac{\Delta P_{FC}}{\Delta V_{FC}} > 0$ indicates the need to increase the PEMFC operating voltage to shift the operating point to the left, i.e., it is necessary to reduce the PEMFC operating current, and therefore, the demand on its terminals. For this purpose, the local controller of the power converter will decrease its δ in jumps ($\Delta\delta$) set at 0.5%. Remember that δ can vary from 1 to 0, so 5% is 0.05.

Conversely, if the slope $\frac{\Delta P_{FC}}{\Delta V_{FC}} < 0$, it indicates the need to reduce the operating voltage of the PEMFC, to shift the operating point to the right. This requires increasing the PEMFC operating current and, therefore, the demand on its terminals. Now, unlike the previous case, the local controller of the power converter will increase its δ by $\Delta\delta = 0.5\%$. This operation can be performed if, and only if, the power and operating voltage of the PEMFC are within the limits set by the thermal stress and minimum voltage constraints described above. Thus, if the PEMFC

power is higher than that defined by $P_{FC,sp}$, or the operating voltage is lower than $V_{FC,sp}$, the local controller of the DC/DC boost converter will proceed to reduce δ to prioritize thermal stress and degradation criteria over the maximization of the operating power.

Based on the design assumptions of the developed P&OM algorithm, the proposed control structure for the PEMFC and interleaved DC/DC boost converter assembly is schematically presented in Fig. 10.

3. Implementation and Experimental Results

In this section, the experimental validation of the HPRS and the EMS developed and described in section 2.3 is carried out. For this purpose, an experimental validation was carried out on a commercial vehicle, specifically, a Mercedes-Benz® Sprinter 311 CDI light refrigerated truck, Fig. 11a. It was equipped with the Thermo King® V-200 electric refrigeration system shown in Fig. 11b, and with the isothermal refrigerated box shown in Fig. 11c. Fig. 11 shows the vehicle as it came from

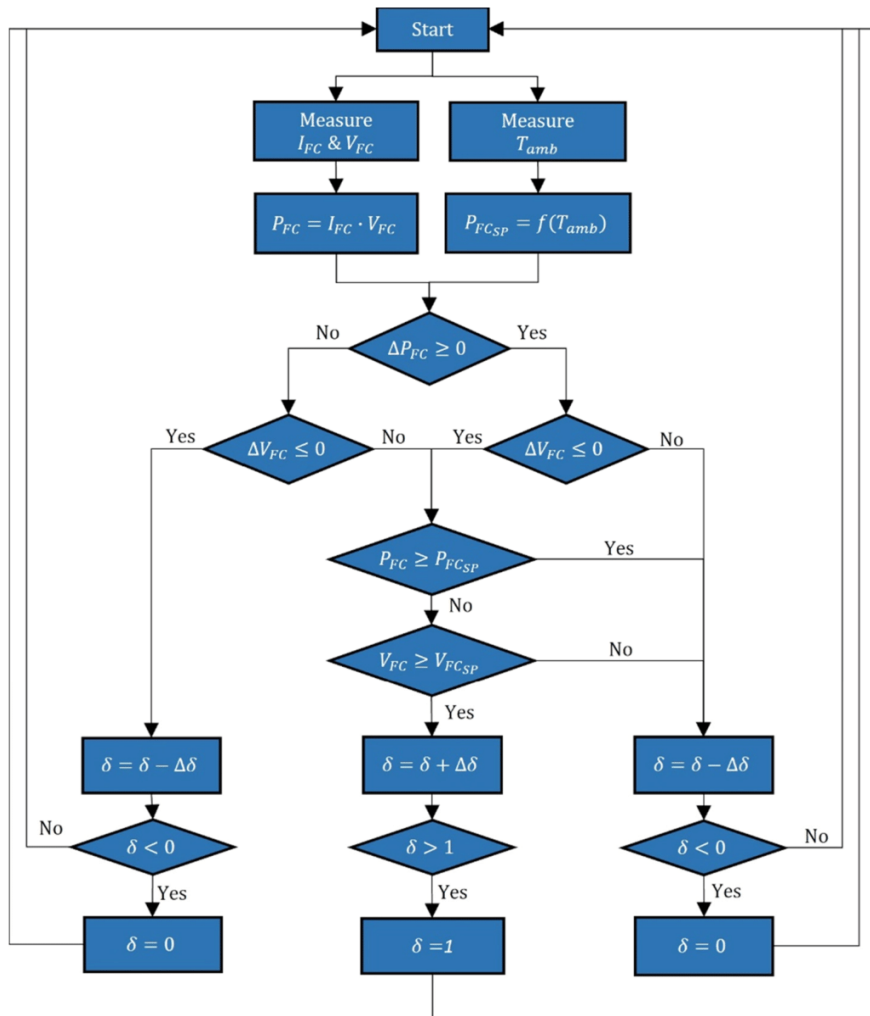


Fig. 9. P&OM algorithm developed to track the MPP of the PEMFC.

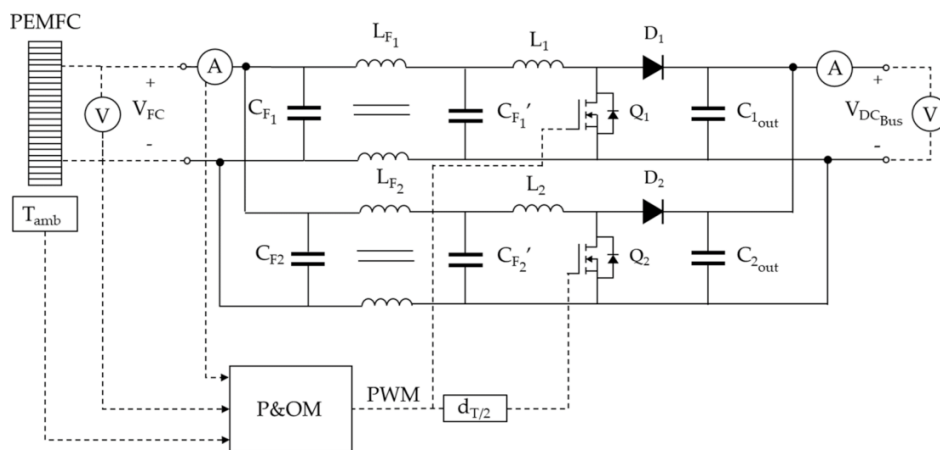


Fig. 10. Schematic diagram of PEMFC and DC/DC converter assembly with P&OM.



Fig. 11. (a) Detail of the light refrigerated truck; (b) electric refrigeration system; (c) isothermal cool box.

the factory, just purchased.

On the other hand, Fig. 12 shows the final assembly of the developed HPRS on the vehicle. Fig. 12a shows all the elements inside the isothermal box manufactured for this purpose, housed in the vehicle's refrigeration box (note the detail of the external ventilation duct). Fig. 12b shows the detail of part of the developed electronics, specifically the control unit and the interleaved DC/DC boost converter. Finally, Fig. 12c shows the hydrogen storage system located on the vehicle frame in a specially designed metal box, according to the location described in section 2.2 and shown in Fig. 4.

The experimental test consisted of subjecting the vehicle to a normal working day, in accordance with the characteristics set out in the first paragraph of section II, where the design conditions are established. Since the vehicle was not yet approved for use on public roads and urban areas, the experimentation was conducted on a circuit closed to traffic of approximately 2.5 km in length, covering a university campus and its surroundings, Fig. 13.

The duration of the test was the equivalent of one working day, 8 h, starting at 7:00 am and ending at 15:00 pm. The vehicle was loaded with fruit and the set point temperature of the RS was set at 4 °C. During the test, travel times at controlled speed (urban, <50 km/h), vehicle stops, parking for unloading the goods and isothermal box door opening times were carried out, always following the indications provided by a company specialized in this type of transport. Throughout the working day, the HRPS operating profile was as shown in Fig. 14. This Figure is to be interpreted as follows: when the vehicle is in motion, the HPRS is off (state = 0) and the compressor of the refrigeration system (the mechanical one in this case, see Fig. 1) is powered by the VPE. When the vehicle stops and its engine shuts down, the HPRS is activated (state = 1), powering the compressor of the refrigeration system (the electrical one in this case, see Fig. 1).

The initial conditions were set at the usual working values: 80% of the battery SOC and 6 m³ of stored hydrogen, corresponding to 85% of the maximum hydrogen capacity.

The results obtained in the experimental test are shown in Figs. 15–19. Specifically, Fig. 15 shows the power supplied/consumed of the elements that compose the HPRS: PEMFC + DC/DC boost converter,

battery, DC/AC converter and auxiliary consumptions for the entire experimental test. Remember that the DC/AC power corresponds to the power of the electric compressor, considering its corresponding efficiency. Null values of DC/AC converter power correspond to periods of the vehicle in motion since the RS is supported by the mechanical compressor. Non-zero values correspond to the power consumption of the RS, supported by the electric compressor when the vehicle is stopped for food delivery. The sign criteria are as follow: current and power variables will be considered positive if they are injected to the DC bus, while current or power variables will be considered negative if they are extracted from the DC bus.

Fig. 16 shows the electrical variables of the battery, i.e., the DC bus voltage together with the characteristic and limits values defined in Table 3, as well as its charging/discharging current.

Fig. 17 shows the time evolution of the battery SOC, and the level of hydrogen stored in the bottles during the experimental test.

Finally, Figs. 18 and 19 show the main operating variables of the PEMFC, i.e., voltage, current and power, as well as the value of the voltage and power set points as function of the ambient temperature inside the isothermal enclosure, according to the P&OM algorithm defined in section 2.3.

4. Discussion

As an initial premise for understanding the control strategy developed, it has been considered that the PEMFC must guarantee the correct SOC of the battery, which is controlled by its terminal voltage. Thus, as defined in the control logic developed and presented in Figs. 5 and 6, the PEMFC start-up criterion is set as a function of the voltage at the terminals of the lithium-ion battery pack, not the route time or the energy demanded. The minimum voltage value at which the PEMFC starts to operate (V_{BatFC}) has been selected considering the SOC and the minimum operating voltage ranges to ensure the correct power supply to the refrigeration unit while the PEMFC start-up protocol takes place. Thus, when the battery voltage, due to the progressive discharge, reaches the predefined value of 54.4 VDC, the EMS performs the controlled start-up of the PEMFC, see Figs. 15 to 19 ($t = 190$ min).

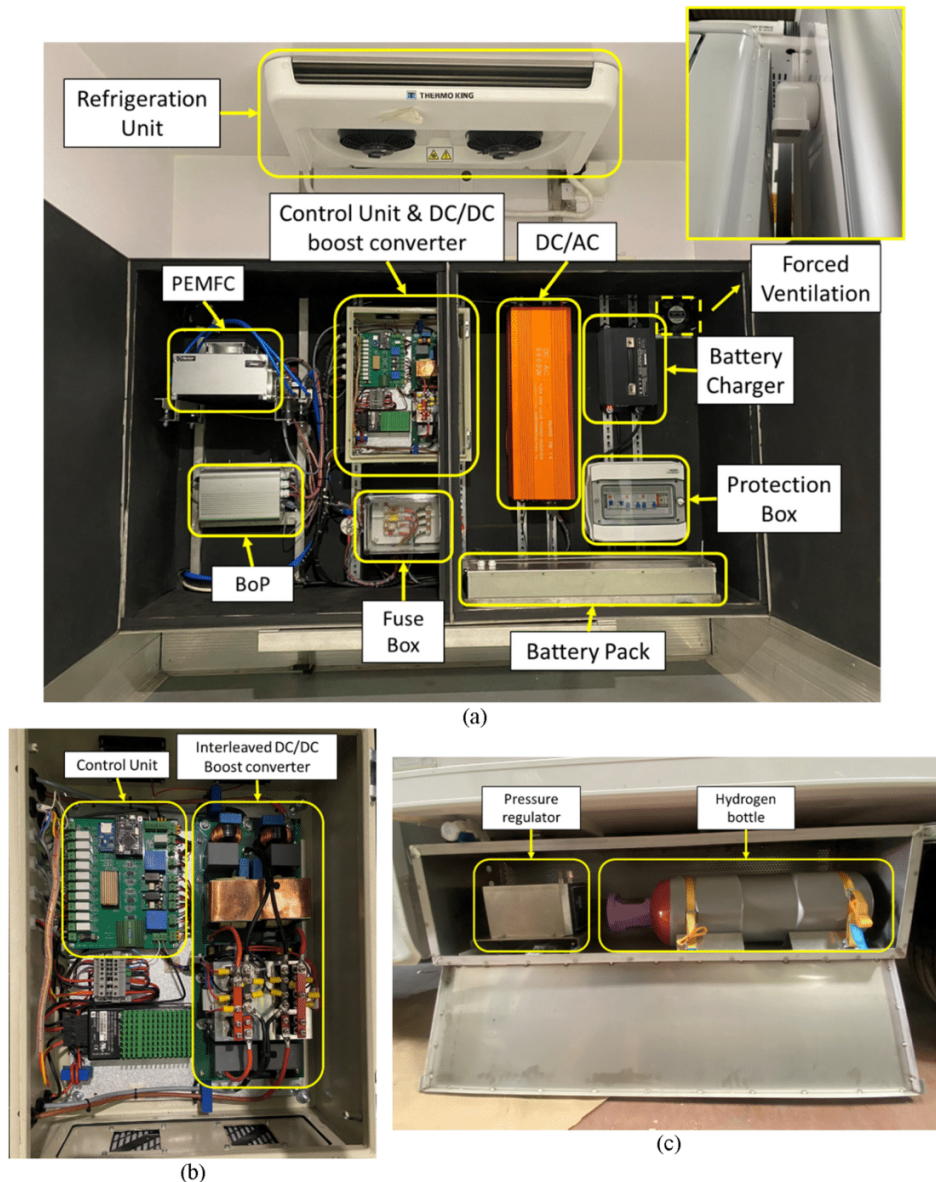


Fig. 12. Distribution and final assembly of the developed hydrogen-powered refrigeration system on the vehicle. (a) Detail of the control unit and the interleaved DC/DC boost converter. (c) hydrogen bottle, pressure regulator and security pipeline.

Another important aspect to take into account before discussing the results is that, since the objective of the research is to demonstrate the technical and economic feasibility of the proposal through a real application example, for the sizing criteria of the HPRS, the authors have relied on their experience in other similar projects, where a compromised solution that guarantees a correct operation is a homogeneous distribution in terms of energy between the battery pack and the hydrogen system. Thus, for the sizing of the battery pack and the hydrogen system, an approximate energy split of 50% has been considered. Of course, it is assumed and understood that, although it works very well, this is an empirical decision. It would be interesting to face in future works, with detailed knowledge of the trajectory and the driving and stopping times for a given application, to apply optimisation techniques to solve the multi-objective sizing problem that guarantees

the lowest cost of the HPRS with the greatest autonomy.

Considering the results obtained, Fig. 15 represents the RS operation of the vehicle during an 8 h working day (480 min). While the VPE is running, the mechanical compressor ensures the RS operation, but when the vehicle stops, the RS is powered by the electric compressor through the DC/AC converter. Therefore, the P_{DCAC} shows the demand profile of the electric compressor and, ultimately, the profile to be ensured by the HPRS. Based on the above, adding up all the time the electric compressor is on (state = 1 in Fig. 14, and $P_{DCAC} \neq 0$ in Fig. 15), it is observed that practically half of the time the vehicle is stopped for varying time intervals, corresponding to stops for food delivery, specifically 4.2 h, compared to 3.8 h when the vehicle is in motion.

Initially, the DC bus voltage is $V_{DCBus} > V_{Batmin} = 50$ VDC, Fig. 16, and the battery SOC is high (greater than 80%, Fig. 17), so the battery

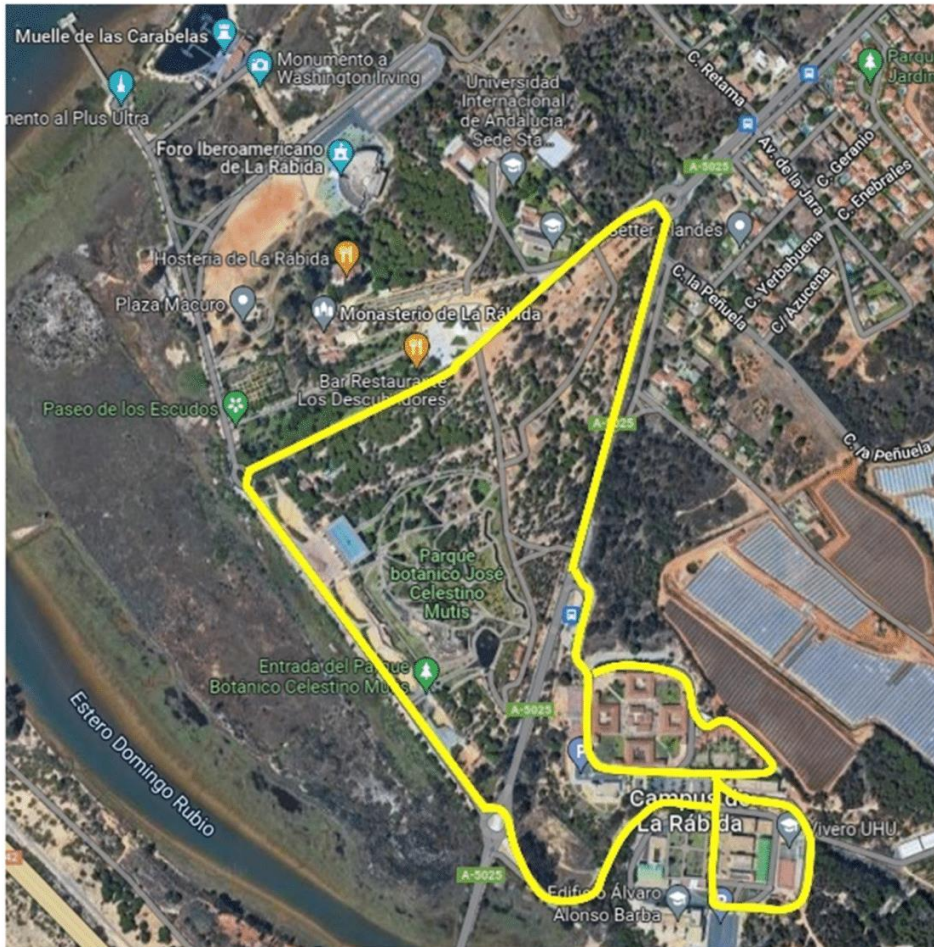


Fig. 13. Circuit closed to traffic used for the experimental test.

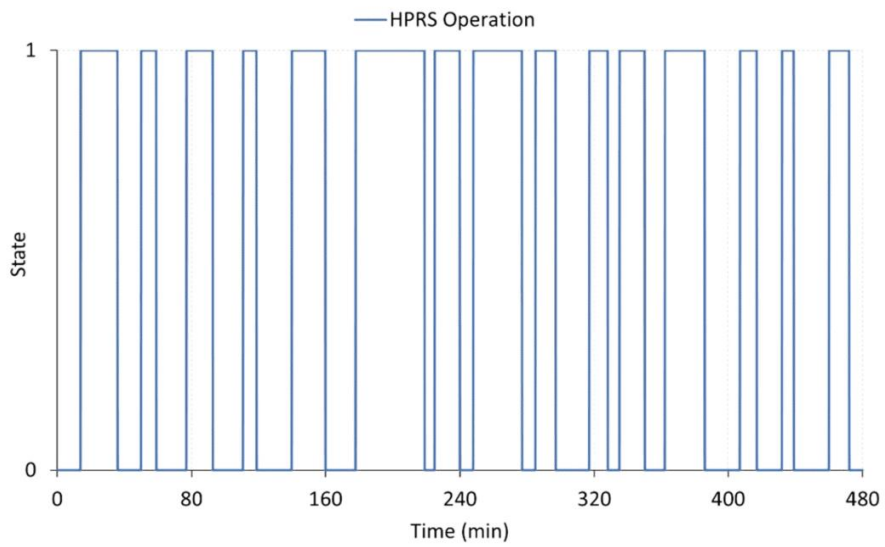


Fig. 14. Operating states of the HPRS system during the experimental test.

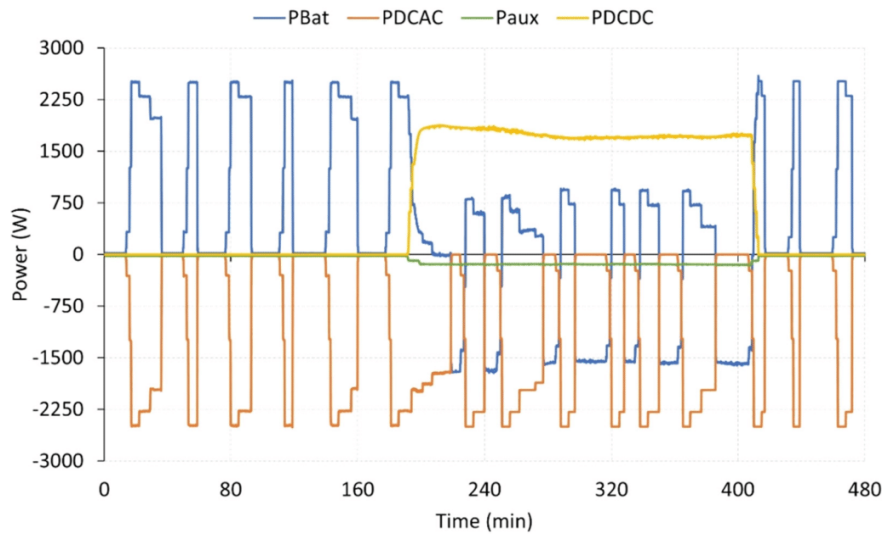


Fig. 15. Battery power (PBat), DC/AC converter power (PDCAC), auxiliary equipment power (Paux) and boost DC/DC converter power (PDCDC) during the experimental test.

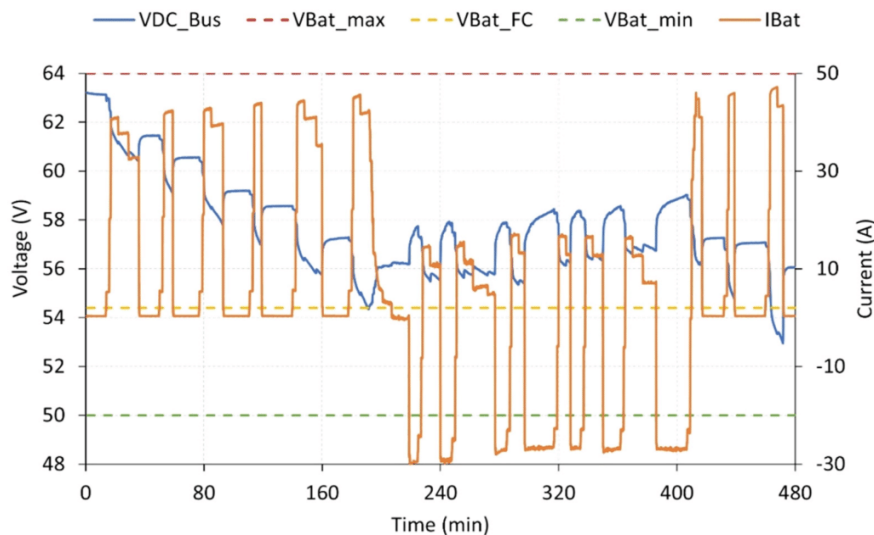


Fig. 16. DC Bus voltage and battery current during experimental test.

supplies the power demanded by the electric compressor, Fig. 15. Consequently, this causes the battery to discharge, which is reflected in the evolution of the DC bus voltage and the SOC level, until the preset safety value is reached, $V_{DC_{Bus}} = V_{Bat_{FC}} = 54.4 \text{ VDC}$, $t = 190 \text{ min}$, Figs. 16 and 17 respectively. This determines the start-up of the PEMFC, according to the control logic and diagram described in section 2.3.1 and Fig. 6 respectively. During this stage, the consumption of the auxiliary equipment is very low, and is associated with the power consumption required to ensure the operation of the control and power electronics, $P_{aux} < 15 \text{ W}$, Fig. 15.

To start up the PEMFC, the hydrogen volume available in the bottles is estimated by measuring the pressure, obtaining a value of approximately 6,000 L (85% of the maximum volume), much higher than the minimum established, Fig. 17, so the PEMFC activation protocol is established. This protocol is characterised by a controlled start-up of the

PEMFC by imposing a staircase-type rising power profile, with 500 W increments and 2 min long, Fig. 18. This profile seeks to reduce thermal, water and electrical stress due to sudden changes in the operating power of the PEMFC. Similarly, the operation of PEMFC requires power supply for its BoP, mainly for its oxidant/cooling system, so there is an increase in the power consumption of the auxiliary equipment to a value close to 300 W, see P_{aux} , Fig. 15. The power required from the DC bus is provided by the PEMFC through the interleaved DC/DC boost power converter, P_{DCDC} .

During PEMFC operation, the control logic recalculates in real time the preset operating point of the PEMFC according to the P&OM algorithm described in section 2.3.2. Thus, in the initial instants, the ambient temperature inside the enclosure is relatively low ($T_{amb} \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$) and, therefore, according to expression (17), the power setpoint ($P_{FC,sp}$) is higher than the maximum power of the PEMFC, so it does not establish a

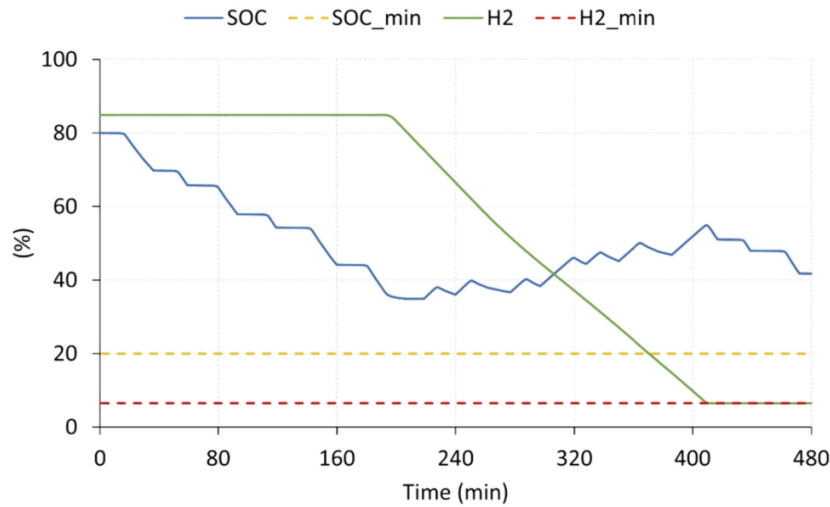


Fig. 17. Battery SOC and Hydrogen level (H2) during experimental test.

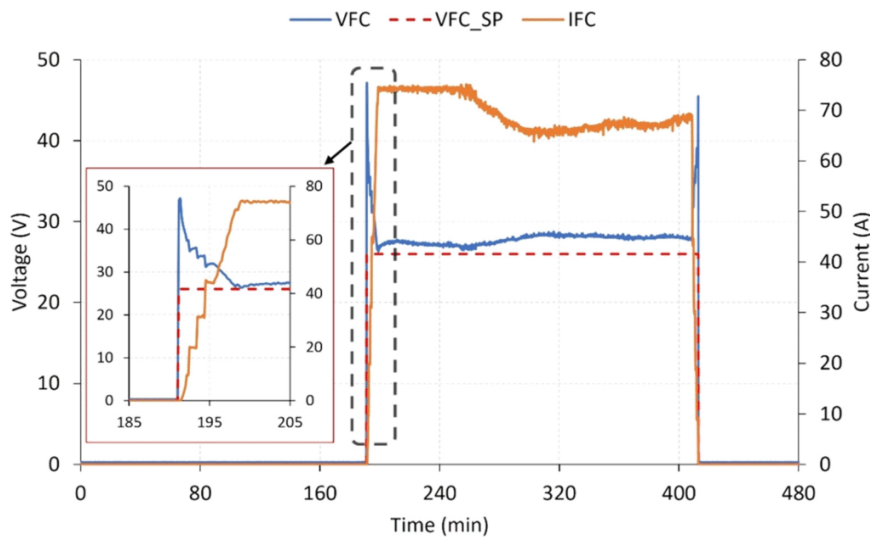


Fig. 18. PEMFC voltage and current profile (VFC and IFC respectively), as well as the voltage set point (VFC_SP) according to the P&OM control law.

limiting condition, Fig. 19. Similarly, the operating voltage of the PEMFC at its MPP is higher than the established minimum voltage, so it also does not establish a limiting condition, Fig. 18. This allows the PEMFC operates at its MPP, maintaining a constant power profile.

As the operation of the PEMFC is prolonged over time, its heat production (efficiency at rated power is around 40%, producing approximately 3,000 W of heat) causes an increase in the internal temperature of the enclosure, see T_{amb} , Fig. 19. This causes the power setpoint of the PEMFC to be reduced to prevent its safety shutdown. Thus, from $t = 240$ min, the power setpoint equals and limits the maximum extractable power of the PEMFC, Fig. 19, to reduce the uncontrolled rise in ambient temperature that would cause its shutdown. The correction of the power setpoint, in accordance with the control law imposed by the P&OM algorithm, achieves the proposed objective and allows stabilizing the ambient temperature at approximately 37 °C, while guaranteeing the operation of the PEMFC, in this case at a power of approximately 1,850 W, Fig. 19. Note that the PEMFC works at nearly constant power, which

determines a nearly constant hydrogen consumption rate as well, Fig. 17.

Considering the operation of the developed interleaved DC/DC boost converter, it is demonstrated from Figs. 15, 18 and 19 that it allows the correct integration of the PEMFC into the DC bus, while accurately implementing the developed P&OM algorithm. Finally, from the instantaneous values of PEMFC output power and DC/DC boost converter output power, Figs. 19 and 15 respectively, the instantaneous efficiency of the power converter can be determined, which is approximately 92% ($\frac{P_{DCDC}}{P_{FC}} = \frac{1702W}{1850W}$).

Now, considering the power balance, during vehicle stopping, the power demand of the electric compressor is supplied by both the PEMFC and the battery, Fig. 15. Thus, as the demand profile is higher than the power generated by the PEMFC, the battery is discharged to ensure the power balance on the DC bus, $P_{DCAC} + P_{aux} = P_{Bat} + P_{DCDC}$. Therefore, the PEMFC acts as a range extender. On the other hand, when the vehicle

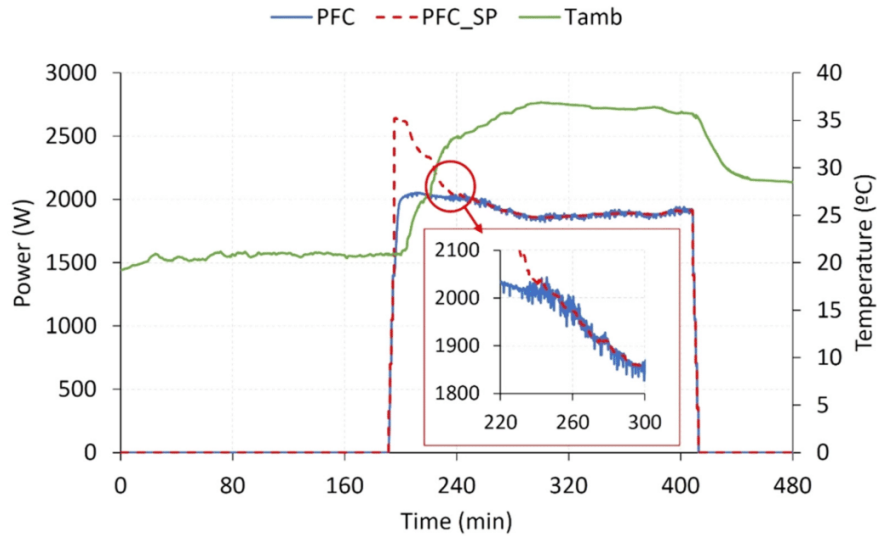


Fig. 19. PEMFC power profile (PFC) and power set point (PFC_SP) according to the P&OM control law and the ambient temperature in the environment of the PEMFC (T_{amb}).

is in motion, all the energy produced by the PEMFC is fully used to charge the battery, Fig. 15. This is clearly reflected in the DC bus voltage profile and the battery SOC, Figs. 16 and 17 respectively.

According to the EMS developed in Section 2.3, the operation of the PEMFC is maintained over time if the hydrogen level is higher than the minimum set, the DC bus voltage is lower than the maximum preset value ($V_{DC_{Bus}} < V_{Bat_{max}} = 64\text{VDC}$) and the DC/DC boost converter is operating below its maximum temperature. In this case, the PEMFC was kept operational for approximately 220 min, until $t = 410$ min, Figs. 15, 18 and 19. At that time, the minimum preset value of the volume of hydrogen stored in the bottles was reached, set at 400 L, which corresponds to a pressure of 10 bars (a hydrogen volume of approximately 5% with respect to the maximum capacity), Fig. 17. This value is sufficient to perform the controlled shutdown protocol of the PEMFC. This protocol is defined by the use of a staircase-type descending power profile, with 500 W steps and 2 min long, Fig. 18. As at start-up procedure, this profile reduces the thermal stress on the PEMFC in the event of a sudden variation in its operating power, especially when the temperature of the PEMFC is high, allowing the BoP's cooling system to progressively cool the PEMFC. After shutting down the converter, the PEMFC, its BoP and its local controller, the solenoid valve in the supply line at the inlet of the two-stage regulator (23, Fig. 4) is closed, isolating the hydrogen bottles, and thus preventing possible hydrogen leaks inside the enclosure.

From $t = 413$ min (Fig. 15), the vehicle continues with its delivery route, however, as the hydrogen resource is not available, the demand profile is guaranteed by the battery, according to the defined EMS. Thanks to the charging previously performed by the PEMFC, the battery voltage and its SOC is considerably higher than the established minimums, $V_{DC_{Bus}} = 59\text{VDC}$ and $\text{SOC} = 53\%$ (Figs. 16 and 17), thus allowing its use without any restriction. Therefore, until the last stop at $t = 472$ min, coinciding practically with the end of the working day, it is only the battery that supplies the energy required by the electric compressor, Fig. 15. Logically, this operation results in a progressive discharge of the battery, with the consequent reduction of the DC bus voltage and the SOC to a final value of 56 VDC and 41% respectively, Figs. 16 and 17, both values higher than the preset minimums.

From the experimental results, the correct operation of developed HPRS and EMS is validated. It has been demonstrated that it is possible to guarantee the objective of 4 h of autonomy, operating safely, continuously, and smoothly throughout a full working day in a real

environment.

Finally, once the correct operation of the developed HPRS has been verified, the analysis in terms of fuel savings, emissions and economic cost will be carried out considering the use of the developed HPRS.

Thus, for the daily consumption profile (7660 Wh) for a working day of 8 h, with parking periods for food delivery of approximately half of the route (4.2 h parked and 3.8 h in motion in the test performed), considering an average energy input per unit volume of 10.7 kWh/litre of diesel, and a thermal efficiency of the diesel engine of approximately 40%, a fuel saving of approximately 1.8 L per day is estimated. If it is also considering that in the case of the exclusive use of the mechanical compressor, it is necessary to keep the VPE started to ensure the operation of the RS during stops, with an estimated consumption of 0.8 L/h according to the manufacturer's data, it results in an extraordinary consumption of 3.4 L per day. Consequently, the use of the developed HPRS provides fuel savings of approximately 5.2 L/day.

Furthermore, if, according to the manufacturer's specifications, an average intercity consumption of 12.8 L/hour is considered, an 8-hour working day results in a daily consumption of 48.64 L/day, therefore, the developed HPRS saves 10.7% of fuel.

In summary, assuming that the average annual delivery routes are similar to the test route and that the working week is 5 days, the annual fuel saving is approximately 1,352 L/year (the conversion into money saved will logically be given by the price of diesel in each country; in the case of Spain at the date of the experiment, 2,433 €). This amount of diesel saved, and therefore not burned, means not emitting 3,650 kg of CO_2 /year. Of course, from an environmental point of view, not an economic one, the use of the proposed solution only makes sense if the hydrogen used is green, which currently means hydrogen produced by electrolysis from renewable energy sources.

Finally, considering that the investment made in the developed system has been approximately 12,500 euros (this cost would be much cheaper for subsequent units, since a prototype – artisanal – is much more expensive than mass-produced units), it is easy to perform a simple payback analysis of the investment. Savings in diesel fuel is about 3,289.5 €/year. The average consumption of hydrogen is 5.542 Nm^3 /day, i.e., about 0.5 kg/day or 130 kg/year. Today it is possible to buy green hydrogen between 8 and 10 €/kg; then, considering an average price of 9 €/kg, hydrogen expenditure is 1,170 €/year. Therefore, the approximate payback is slightly < 6 years. That said, a system such as the

one developed, industrialized and commercialized, would cost less than half that of the prototype. Add to this the fact that the diesel trend is upward, and the hydrogen trend is downward, the payback would be drastically reduced.

As a conclusion to this discussion section, the design proposed in this work (following the hybridization concept, the design considers the energy balance, not the power balance), although it cannot be considered mathematically optimal, it is probably, based on our experience, one of the most economical and efficient. This is because: (1) the PEMFC always operates at rated power, without any disturbances that could cause it to deteriorate prematurely; (2) the PEMFC is low-power, which means low hydrogen consumption and, therefore, greater autonomy for the cooling system; (3) this translates into less hydrogen to carry on board and therefore less weight in hydrogen cylinders; (4) a small power PEMFC implies a DC/DC converter at its output, also of small power; (5) all these features together lead to a smaller, lighter, more durable and less expensive HPRS. This ensures a quick return on investment.

5. Conclusions

The growth of cities and their suburbs, with the consequent increase in the consumption of goods and food in urban environments, has led to a significant increase in demand in the short-haul transport sector, particularly in the refrigerated food transport sector. Considering that refrigerated delivery vehicles maintain the cold chain using exclusively fossil fuel energy (gasoline/diesel), there is a serious threat to the environment in this field.

In this work, the design, step-by-step development, and experimental validation of a hydrogen-powered refrigeration system (HPRS) for use in refrigerated light trucks for the food delivery sector has been carried out. The main contributions focus on the design of the HPRS architecture, the necessary electronics (acquisition, control, and power supply) for its correct operation, as well as an energy management system (EMS) and a novel algorithm oriented to maximize the performance of the HPRS in terms of operability, power and lifespan.

Focusing on the experimental results obtained on an experimental prototype based on a commercial vehicle, it can be summarized that:

- (1) Hydrogen technologies enable the development of technically feasible and safe solutions with zero net emissions for use in the refrigerated food transport sector.
- (2) The design philosophy used allows easy integration into the current vehicle fleet, minimizing the economic and research efforts for the promotion and use of hydrogen technologies in the refrigerated food transport sector.
- (3) The design of the HPRS and EMS architecture guarantees the required autonomy for use in short-range refrigerated vehicles without refuelling stops.
- (4) The use of the developed HPRS presents great advantages in terms of economic savings and environmental care, since, for the vehicle tested, its use allows reducing the average annual fuel consumption by more than 10% and reducing CO₂ emissions by up to 3650 kg.

Future work is oriented in two directions. On the one hand, to try to transfer the developed technology so that refrigerated vans and light trucks that base their cooling systems on the use of hydrogen can begin to be manufactured in series. On the other hand, based on the technology developed, to design HPRS of greater power and autonomy, viable for assembly in heavy refrigerated trucks used in national and international transport. Furthermore, although a cost-sensitive analysis was not within the scope of this work, given current diesel prices (a major problem for the transport sector), it is certainly a challenge for future work.

The pedagogy used in this work and its replicability allows researchers, manufacturers, stakeholders, and policy makers to use it as a

starting point for the design of new models or solutions for the existing fleet of refrigerated delivery vehicles, to move towards sustainable mobility and demonstrate the feasibility of using hydrogen technologies.

CRedit authorship contribution statement

F. Segura: Investigation, Conceptualization, Methodology, Writing – original draft. **F.J. Vivas:** Investigation, Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Software, Writing – original draft. **J.M. Andújar:** Conceptualization, Writing – review & editing, Project administration, Supervision. **M. Martínez:** .

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

No data was used for the research described in the article.

Acknowledgement

This work is a contribution of the two following Projects: “H2Integration&Control. Integration and Control of a hydrogen-based pilot plant in residential applications for energy supply”, Ref. PID2020-116616RB-C31 supported by the Spanish State Program of R + D + I Oriented to the Challenges of Society; and “SALTES: Smartgrid with reconfigurable Architecture for testing control Techniques and Energy Storage priority contaminant waste”, Ref. P20-00730 supported by Andalusian Regional Program of R + D + I. Funding for open access charge: Universidad de Huelva/CBUA.

References

- [1] Kookana RS, Drechsel P, Jamwal P, Vanderzalm J. Urbanisation and emerging economies: issues and potential solutions for water and food security. *Sci Total Environ* 2020;732:139057. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139057>.
- [2] Urbanization - Our World in Data n.d.
- [3] Pandya B, El-Kharouf A, Venkataraman V, Steinberger-Wilckens R. Comparative study of solid oxide fuel cell coupled absorption refrigeration system for green and sustainable refrigerated transportation. *Appl Therm Eng* 2020;179:115597. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115597>.
- [4] MITECO. Gases de efecto invernadero. Serie 1990-2019. Informe resumen 2021: 7–7.
- [5] Di Trolio P, Di Giorgio P, Genovese M, Frasci E, Minutillo M. A hybrid power-unit based on a passive fuel cell/battery system for lightweight vehicles. *Appl Energy* 2020;279:115734. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115734>.
- [6] Yang Z, Tate JE, Morganti E, Shepherd SP. Real-world CO₂ and NO_x emissions from refrigerated vans. *Sci Total Environ* 2021;763:142974. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142974>.
- [7] Commission E. CO₂ emission performance standards for cars and vans n.d.
- [8] Tassou SA, De-Lille G, Ge YT. Food transport refrigeration - approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport. *Appl Therm Eng* 2009;29:1467–77. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.06.027>.
- [9] Garde R, Jiménez F, Larriba T, García G, Aguado M, Martínez M. Development of a fuel cell-based system for refrigerated transport. *Energy Procedia* 2012;29:201–7. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.09.025>.
- [10] Mac KM, Razeghi G, Samuelsen S. The role of fuel cells in port microgrids to support sustainable goods movement. *Renew Sustain Energy Rev* 2021:147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111226>.
- [11] Meneghetti A, Dal Magro F, Romagnoli A. Renewable energy penetration in food delivery: coupling photovoltaics with transport refrigerated units. *Energy* 2021; 232:120994. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120994>.
- [12] Union T, Journal O, Union E. Regulation 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 2017;10:1–21.
- [13] DGT. No Title; 2019.
- [14] Comissiomn E. Assessment of the final national energy and climate plan of Spain. 2020.
- [15] Zhuang W, Li (Eben) S, Zhang X, Kum D, Song Z, Yin G, et al. A survey of powertrain configuration studies on hybrid electric vehicles. *Appl Energy* 2020; 262. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114553>.
- [16] Mat ZBA, Madya, Kar YB, Hassan SHBA, Talik NAB. Proton exchange membrane (PEM) and solid oxide (SOFC) fuel cell based vehicles-a review. In 2017 2nd IEEE

- International Conference on Intelligent Transportation Engineering, ICITE 2017; 2017. p. 123–6. 10.1109/ICITE.2017.8056893.
- [17] Venkataraman V, Pacey AW, Steinberger-Wilckens R. Coupling of a solid oxide fuel cell auxiliary power unit with a vapour absorption refrigeration system for refrigerated truck application. *Fuel Cells* 2016;16:273–93. <https://doi.org/10.1002/fuce.201500124>.
- [18] Yang B, Li Y, Li J, Shu H, Zhao X, Ren Y, et al. Comprehensive summary of solid oxide fuel cell control: a state-of-the-art review 2022;vol. 7. <https://doi.org/10.1186/s41601-022-00251-0>.
- [19] Malik V, Srivastava S, Bhatnagar MK, Vishnoi M. Comparative study and analysis between Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) and Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell – a review. *Mater Today: Proc* 2021;47:2270–5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.203>.
- [20] de las Heras A, Vivas FJJ, Segura F, Andújar JMM. How the BoP configuration affects the performance in an air-cooled polymer electrolyte fuel cell. Keys to design the best configuration. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:12841–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.051>.
- [21] Marx N, Hissel D, Harel F, Pahon E, Courteille B, Chaillou F. On the design of a hybrid fuel cell – Battery genset for a refrigerated semi-trailer truck. In 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2018 – Proceedings; 2019. 10.1109/VPPC.2018.08605015.
- [22] Baghzouz Y, Hurt R, Boehm RF. Evaluation of a fuel cell for powering the electrical load of ICE vehicles. In 2007 International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP '07; 2007. p. 74–7. 10.1109/ICCEP.2007.384189.
- [23] Vivas FJ, de las Heras A, Segura F, Andújar JM. Cell voltage monitoring All-in-One. A new low cost solution to perform degradation analysis on air-cooled polymer electrolyte fuel cells. *Int J Hydrogen Energy* 2019;44:12842–56. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.172>.
- [24] Marx N, Hissel D, Harel F, Courteille B. Experimental testing of a hydrogen genset used in a refrigerated semi-trailer truck application. In IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC); 2019. p. 5. 10.1109/VPPC46532.2019.8952231.
- [25] PNNL project with Nuvera. Plug power for refrigerated trucks. *Fuel Cells Bull* 2013; 2013:4. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(13\)70311-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(13)70311-0).
- [26] Chang Y, Zhao J, Shahgaldi S, Qin Y, Yin Y, Li X. Modelling of mechanical microstructure changes in the catalyst layer of a polymer electrolyte membrane fuel cell. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45:29904–16. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.157>.
- [27] Calderón AJ, Vivas FJ, Segura F, Andújar JM. Integration of a multi-stack fuel cell system in microgrids: a solution based on model predictive control. *Energies* 2020; 13. <https://doi.org/10.3390/en13184924>.
- [28] Uddin MN, Nageshkar VV, Asmatulu R. Improving water-splitting efficiency of water electrolysis process via highly conductive nanomaterials at lower voltages. *Energy Ecol Environ* 2020;5:108–17. <https://doi.org/10.1007/s40974-020-00147-5>.
- [29] Napole C, Derbeli M, Barambones O. A global integral terminal sliding mode control based on a novel reaching law for a proton exchange membrane fuel cell system. *Appl Energy* 2021;301:117473. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117473>.
- [30] Andujar JM, Vivas FJ, Segura F, Calderon AJ. Integration of air-cooled multi-stack polymer electrolyte fuel cell systems into renewable microgrids. *Int J Electr Power Energy Syst* 2022;142:108305. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108305>.
- [31] Benagoune K, Yue M, Jemei S, Zerhouni N. A data-driven method for multi-step-ahead prediction and long-term prognostics of proton exchange membrane fuel cell. *Appl Energy* 2022;313:118835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118835>.
- [32] Uno M, Tanaka K. Pt/C catalyst degradation in proton exchange membrane fuel cells due to high-frequency potential cycling induced by switching power converters. *J Power Sources* 2011;196:9884–9. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.08.030>.
- [33] Ma T, Yang H, Lu L. Development of hybrid battery-supercapacitor energy storage for remote area renewable energy systems. *Appl Energy* 2015;153:56–62. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.008>.
- [34] Vivas FJ, De Las HA, Segura F, Andújar JM. A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;82:126–55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.014>.
- [35] Enrique JM, Durán E, Sidrach-de-Cardona M, Andújar JM. Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies. *Sol Energy* 2007;81:31–8. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.006>.
- [36] Enrique JM, Andújar JM, Bohórquez MA. A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications. *Sol Energy* 2010;84:79–89. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.011>.
- [37] Collong S, Kouta R. Fault tree analysis of proton exchange membrane fuel cell system safety. *Int J Hydrogen Energy* 2015;40:8248–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.101>.
- [38] Andújar JM, Segura F, Isorna F, Calderón AJ. Comprehensive diagnosis methodology for faults detection and identification, and performance improvement of Air-Cooled Polymer Electrolyte Fuel Cells; 2018. 10.1016/j.rser.2018.02.038.

ANEXO IV. Estudio inferencial

ANEXO IV.A. Análisis de los indicadores de validez convergente y discriminante de las variables cuantitativas

Análisis factorial	Alumnado de Primaria				Alumnado de Secundaria				Alumnado Universitario				Graduados Universitarios			
	Mean (SD)	Load	AVE	Alfa	Mean (SD)	Load	AVE	Alfa	Mean (SD)	Load	AVE	Alfa	Mean (SD)	Load	AVE	Alfa
<i>Motivos (MO)</i>																
Las matemáticas, ciencias y tecnología son divertidas	4.22 (1.59)	0.62	0.50	0.49	3.01 (1.29)	0.79	0.73	0.84	3.49 (1.31)	0.79	0.71	0.78	3.93 (1.15)	0.85	0.81	0.89
Comprendo bien las matemáticas, ciencias y tecnología	4.50 (1.33)	0.85			3.14 (1.26)	0.90			3.31 (1.09)	0.93			3.64 (1.09)	0.94		
Saco buenas notas en matemáticas, ciencias y tecnología	4.70 (1.06)	0.64			2.92 (1.27)	0.86			2.99 (0.96)	0.80			3.57 (1.03)	0.91		
<i>Expectativas (EX)</i>																
Si me esfuerzo mucho en matemáticas, ciencias y tecnología aprenderé y sacaré buenas notas	4.98 (0.28)	0.71	0.54	0.18	2.66 (1.35)	0.92	0.85	0.82	3.94 (0.95)	0.90	0.81	0.78	4.18 (1.02)	0.90	0.81	0.78
Puedo estudiar lo suficiente para aprobar el próximo examen de matemáticas, ciencias y tecnología	4.88 (0.67)	-0.71			4.20 (1.13)	0.92			3.80 (1.05)	0.90			3.93 (1.05)	0.90		

Anexo IV

Valor incentivo (VI)																	
Ser bueno o buena en ciencias, matemáticas y tecnología es importante para mí	4.72 (1.03)	0.67	0.48	0.44	3.58 (1.27)	0.79	0.64	0.81	3.24 (1.21)	0.78	0.60	0.68	3.82 (1.06)	0.83	0.79	0.82	
Ser bueno o buena en ciencias, matemáticas y tecnología me ayudará el resto de años en mis estudios	4.86 (0.74)	0.76			3.99 (1.19)	0.77			3.22 (1.4)	0.81			3.46 (1.32)	0.89			
Lo que aprendemos sobre matemáticas, ciencias y tecnología es bueno para mi vida	4.84 (0.79)	0.64			3.58 (1.26)	0.82			-				-				
Los conocimientos que adquiero de matemáticas, ciencias y tecnología me ayudarán en mi profesión	-	-			3.70 (1.33)	0.83			3.16 (1.53)	0.74			3.25 (1.29)	0.86			
Estereotipos sobre Competencias y Capacidades (ECC)																	
Los hombres hacen mejor las tareas técnicas y mecánicas que las mujeres	2.05 (1.76)	0.75	0.53	0.68	1.15 (1.27)	0.72	0.61	0.87	1.63 (0.94)	0.75	0.57	0.84	1.43 (0.96)	0.58	0.61	0.83	
Las mujeres son más organizadas y colaboran mejor con otras personas que los hombres	2.89 (2.00)	0.55			2.76 (1.46)	0.73			2.47 (1.37)	0.68			1.89 (1.07)	0.54			
A las mujeres se les dan mejor estudiar carreras de letras	1.88 (1.66)	0.82			1.90 (1.22)	0.80			1.7 (1.07)	0.82			1.57 (1.17)	0.91			

(como: Idiomas, Historia, Magisterio, etc) que a los hombres																		
A los hombres se les dan mejor estudiar carreras relacionadas con la ciencia que a las mujeres (ejemplo: Informática, Electrónica, etc)	1.68 (1.51)	0.76			1.73 (1.05)	0.83			1.47 (0.82)	0.78			-	-				
En el mercado laboral las mujeres son mejores en profesiones relacionadas con cuidados personales y servicios sociales	-	-	-		2.03 (1.18)	0.73			1.96 (1.15)	0.69			1.61 (1.03)	0.91				
En el mercado laboral los hombres son mejores en profesiones relacionadas con la informática, la electrónica, la industria y la construcción	-	-	-		2.10 (1.35)	0.86			1.68 (0.96)	0.81			1.64 (1.19)	0.87				
<i>Estereotipos sobre Responsabilidad Social (ERS)</i>																		
Los hombres son los responsables de mantener económicamente a sus familias	1.80 (1.61)	0.86	0.74	0.65	1.54 (1.09)	0.93	0.87	0.85	1.16 (0.61)	0.85	0.72	0.60	1.21 (0.83)	0.99	0.98	0.1		
Las mujeres deben preocuparse de la casa y del cuidado de sus hijos	2.43 (1.92)	0.86			1.58 (1.17)	0.93			1.32 (0.88)	0.85			1.21 (0.83)	0.99				

ANEXO IV.B. Análisis de frecuencias

	Alumnado de Secundaria		Alumnado Universitario		Graduados Universitarios	
	Mean (SD) Mujeres	Mean (SD) Hombres	Mean (SD) Mujeres	Mean (SD) Hombres	Mean (SD) Mujeres	Mean (SD) Hombres
Motivos (MO)						
Las matemáticas, ciencias y tecnología son divertidas	2.94 (1.27)	3.08 (1.30)	3.30 (1.42)	3.66 (1.18)	3.81 (1.17)	4.08 (1.16)
Comprendo bien las matemáticas, ciencias y tecnología	2.94 (1.27)	3.34 (1.21)	3.06 (1.20)	3.54 (0.93)	3.56 (1.15)	3.75 (1.05)
Saco buenas notas en matemáticas, ciencias y tecnología	2.80 (1.27)	3.04 (1.26)	2.96 (1.11)	3.02 (0.82)	3.50 (1.15)	3.67 (0.88)
Expectativas (EX)						
Si me esfuerzo mucho en matemáticas, ciencias y tecnología aprenderé y sacaré buenas notas	4.09 (1.75)	4.31 (1.07)	3.85 (1.06)	4.02 (0.84)	4.19 (0.83)	4.17 (1.27)
Puedo estudiar lo suficiente para aprobar el próximo examen de matemáticas, ciencias y tecnología	3.99 (1.29)	4.10 (1.19)	3.75 (1.16)	3.85 (0.94)	4.06 (0.93)	3.75 (1.21)
Valor incentivo (VI)						
Ser bueno o buena en ciencias, matemáticas y tecnología es importante para mí	3.57 (1.34)	3.59 (1.21)	2.98 (1.25)	3.47 (1.14)	3.63 (1.02)	4.08 (1.08)
Ser bueno o buena en ciencias, matemáticas y tecnología me ayudará el resto de años en mis estudios	3.97 (1.23)	4.01 (1.15)	2.96 (1.41)	3.46 (1.36)	3.19 (1.47)	3.83 (1.03)
Lo que aprendemos sobre matemáticas, ciencias y tecnología es bueno para mi vida	3.60 (1.31)	3.56 (1.21)	-	-	-	-

Los conocimientos que adquiero de matemáticas, ciencias y tecnología me ayudarán en mi profesión	3.68 (1.38)	3.73 (1.27)	3.11 (1.35)	3.20 (1.36)	3.19 (1.42)	3.33 (1.15)
<i>Estereotipos sobre Competencias y Capacidades (ECC)</i>						
Los hombres hacen mejor las tareas técnicas y mecánicas que las mujeres	1.48 (0.90)	2.22 (1.47)	1.64 (0.94)	1.61 (0.95)	1.19 (0.54)	1.75 (1.29)
Las mujeres son más organizadas y colaboran mejor con otras personas que los hombres	2.56 (1.38)	2.96 (1.51)	2.45 (1.29)	2.49 (1.45)	2 (1.03)	1.75 (1.14)
A las mujeres se les dan mejor estudiar carreras de letras (como: Idiomas, Historia, Magisterio, etc) que a los hombres	1.62 (1.07)	2.19 (1.30)	1.66 (1.02)	1.73 (1.13)	1.50 (1.09)	1.67 (1.30)
A los hombres se les dan mejor estudiar carreras relacionadas con la ciencia que a las mujeres (ejemplo: Informática, Electrónica, etc)	1.45 (0.80)	2.02 (1.19)	1.40 (0.72)	1.54 (0.90)		
En el mercado laboral las mujeres son mejores en profesiones relacionadas con cuidados personales y servicios sociales	1.77 (1.06)	2.31 (1.23)	1.91 (1.11)	2 (1.19)	1.50 (1.09)	1.75 (0.96)
En el mercado laboral los hombres son mejores en profesiones relacionadas con la informática, la electrónica, la industria y la construcción	1.64 (1)	2.56 (1.49)	1.64 (0.94)	1.71 (0.98)	1.44 (0.81)	1.92 (1.56)
<i>Estereotipos sobre Responsabilidad Social (ERS)</i>						
Los hombres son los responsables de mantener económicamente a sus familias	1.23 (0.77)	1.85 (1.27)	1.08 (0.27)	1.24 (0.79)	1 (0)	1.50 (1.24)
Las mujeres deben preocuparse de la casa y del cuidado de sus hijos	1.31 (0.87)	1.85 (1.36)	1.19 (0.52)	1.44 (1.10)	1 (0)	1.50 (1.24)

ANEXO IV.C. Prueba de Chi-cuadrado

	χ^2 género			
	Alumnado de Primaria	Alumnado de Secundaria	Alumnado Universitario	Graduados Universitarios
Motivos (MO)				
Las matemáticas, ciencias y tecnología son divertidas	0.56	0.38	0.30	0.57
Comprendo bien las matemáticas, ciencias y tecnología	0.69	0.04	0.03	0.54
Saco buenas notas en matemáticas, ciencias y tecnología	0.65	0.34	0.07	0.65
Expectativas (EX)				
Si me esfuerzo mucho en matemáticas, ciencias y tecnología aprenderé y sacaré buenas notas	0.34	0.25	0.60	0.48
Puedo estudiar lo suficiente para aprobar el próximo examen de matemáticas, ciencias y tecnología	0.47	0.78	0.43	0.30
Valor incentivo (VI)				
Ser bueno o buena en ciencias, matemáticas y tecnología es importante para mí	0.35	0.14	0.30	0.12
Ser bueno o buena en ciencias, matemáticas y tecnología me ayudará el resto de años en mis estudios	0.79	0.23	0.36	0.59
Lo que aprendemos sobre matemáticas, ciencias y tecnología es bueno para mi vida	0.90	0.13	-	-
Los conocimientos que adquiero de matemáticas, ciencias y tecnología me ayudarán en mi profesión	-	0.33	0.10	0.59
Teoría del Rol Social (TS)				
¿A quién corresponderían estas actividades, a los hombres, a las mujeres o a ambos? ... Dedicarse a la agricultura	0.03	0.00	0.21	-

... Política	0.61	0.00	0.62	0.35
... Mecánica	0.48	0.00	0.49	0.75
... Pilotar aviones	0.42	0.00	0.79	0.24
... Conducir autobuses	0.58	0.00	0.63	0.83
... Hacer las camas	0.44	0.00	0.63	0.24
... Dedicarse a la peluquería	0.06	0.00	0.34	0.38
... Dirigir un banco	0.98	0.02	0.41	0.24
... Reparar cosas en la casa	0.34	0.00	0.94	0.24
... Conducir camiones	0.58	0.00	0.32	0.83
... Cuidar enfermos-as	0.44	0.00	0.63	0.24
... Tender la ropa	0.14	0.00	0.63	0.24
... Limpiar la casa	0.43	0.01	0.37	0.24
... Coser	0.58	0.00	0.26	0.38
... Dedicarse a la ingeniería	0.11	0.02	0.32	0.83
... Lavar platos	0.29	0.01	0.37	0.24
... Planchar	0.56	0.00	0.63	0.83
... Cocinar	0.65	0.01	0.37	0.24
<i>Estereotipos sobre Competencias y Capacidades (ECC)</i>				
Los hombres hacen mejor las tareas técnicas y mecánicas que las mujeres	0.03	0.00	0.88	0.48
Las mujeres son más organizadas y colaboran mejor con otras personas que los hombres	0.27	0.06	0.31	0.38
A las mujeres se les dan mejor estudiar carreras de letras (como: Idiomas, Historia, Magisterio, etc) que a los hombres	0.00	0.00	0.72	0.52
A los hombres se les dan mejor estudiar carreras relacionadas con la ciencia que a las mujeres (ejemplo: Informática, Electrónica, etc)	0.02	0.00	0.64	-
En el mercado laboral las mujeres son mejores en profesiones relacionadas con cuidados personales y servicios sociales	-	0.00	0.88	0.26

Anexo IV

En el mercado laboral los hombres son mejores en profesiones relacionadas con la informática, la electrónica, la industria y la construcción	-	0.00	0.69	0.21
<i>Estereotipos sobre Responsabilidad Social (ERS)</i>				
Los hombres son los responsables de mantener económicamente a sus familias	0.07	0.00	0.34	0.24
Las mujeres deben preocuparse de la casa y del cuidado de sus hijos	0.00	0.00	0.20	0.24