

Cogeneración a través del uso de Celdas de Combustible



**Edición:**

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Friedrich-Ebert-Allee 40
53113 Bonn • Alemania
Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn • Alemania

Nombre del proyecto:

Proyecto Reducción de Emisiones a través de la Aplicación
de Cogeneración en los Sectores de la Industria y el Comercio en Chile
Merchant Pereira 150
7500654 Providencia
Santiago • Chile
+56 22 30 68 600
www.giz.de

Responsables:

Rainer Schröer / Cecilia Figueroa

Título:

Cogeneración a través de Celdas de Combustible

Autor:

Bernhard Peters, Carlos Jorquera
Edición y revisión de contenidos: Cecilia Figueroa / Raúl Gálvez / Marco Céspedes

Aclaración:

El presente informe fue preparado por encargo del proyecto “Proyecto Reducción de Emisiones a través de la Aplicación de Cogeneración en los Sectores Industrial y Comercial en Chile” implementado por el Ministerio de Energía, Agencia Sostenibilidad Energética y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Sin perjuicio de ello, las conclusiones, opiniones y recomendaciones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. De igual forma, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar no constituye en ningún caso una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ. Se autoriza la reproducción parcial o total, siempre y cuando se cite la fuente de referencia.

Santiago de Chile, noviembre de 2020.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	6
.....	7
2. COGENERACIÓN Y CELDAS DE COMBUSTIBLE	7
1.1.1. Subvención para la generación de energía innovadora de la KfW	8
1.1. Resultados de programas de fomento e incentivos en Europa.....	10
1.3.1. Proyecto ENE.FIELD.....	11
1.3.2. Proyecto PACE	20
3. COGENERACIÓN CON CELDAS COMBUSTIBLES DE HIDRÓGENO	23
2.1. Revisión de la tecnología de celdas combustibles de hidrógeno.....	25
2.2. Fabricantes de tecnología de cogeneración con celda combustible	29
2.3. Madurez Tecnológica de las Celdas Combustibles	32
4. ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	34
3.1. Revisión de costos sistemas de cogeneración de celda combustible	34
6.1.1. Otros costos a considerar.....	34
3.2. Condiciones comerciales para la aplicabilidad de la tecnología	35
3.3. Evaluación de caso de estudio.....	38
6. EXPERIENCIAS EN LA UTILIZACIÓN DE LA COGENERACIÓN.....	40
4.1. Contexto para proyectos de cogeneración con celdas combustibles en Chile.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3 Herramienta de Cálculo de Subvención para Sistemas de Cogeneración de la KFW	10
Figura 5 Estrategia para alcanzar la masificación de la micro-cogeneración en Europa	11
Figura 6 Ubicación de los sistemas de micro-cogeneración, Noviembre 2016	12
Figura 7 Configuración sistema de micro-cogeneración, proyecto ENE.FIELD	13
Figura 8 Socios en el proyecto ENE.FIELD	14
Figura 9 Ejemplo de modelos de equipos de micro-cogeneración utilizados en el proyecto	15
Figura 10 Distribución de fallas registradas en el proyecto Callux	17
Figura 11 Comparación de ahorro de emisiones de CO2-equivalentes para los sistemas de micro-cogeneración respecto a calderas de condensación a gas	19
Figura 12 Países suscritos al proyecto PACE	21
Figura 13 Evolución esperada del mercado de la micro-cogeneración de celda combustible.....	21
Figura 14 Encuesta de percepción realizada a usuarios que instalaron sistemas de micro-cogeneración bajo el marco del proyecto PACE.....	23
Figura 16 Presentación esquemática de la celda combustible SOFC	27
Figura 17 Representación esquemática de la celda combustible PEMFC	28
Figura 18 Sistema de cogeneración BlueGen BG-15.....	31

Figura 19 Sistema de cogeneración Vaillant G5+.....32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 10 Subvención para sistemas de cogeneración - KFW	9
Tabla 11 Comparación de eficiencias reales y de diseño.....	16
Tabla 13 Resumen características celdas combustibles	26
Tabla 14 Fabricantes sistemas de cogeneración de celda combustible	29
Tabla 15 Equipo de cogeneración de celda combustible SOLIDpower.....	31
Tabla 16 Equipo de cogeneración de celda combustible Vaillant	31
Tabla 34 Costo combustible referencial	38
Tabla 35 Costo de Cogeneración en función del combustible.....	38
Tabla 36 Costo de cogeneración celdas combustible, para gas natural y H2	39
Tabla 37 Costos de inversión y mantenimiento para tecnologías de cogeneración	39
Tabla 38 Costo de operación horaria para sistema de cogeneración.....	39
Tabla 39 Resultados evaluación del costo de cogeneración.....	39
Tabla 40 Resumen comparativo de las tecnologías de cogeneración	40

1. Introducción

En Europa, hasta ahora, la promoción en el caso de la tecnología de cogeneración con hidrógeno incluye programas de subsidios y de créditos favorables para el sector residencial, ya que son los propietarios de las viviendas quienes realizan las inversiones en la tecnología de cogeneración y actualmente esta industria está en desarrollo.

La Ley de Cogeneración es quizás el principal motor de esta industria y establece el pago de incentivos a la generación de electricidad con sistemas de cogeneración, y en la última actualización de julio de 2020 se incluyó el fomento a los sistemas de acumulación de energía y a la conexión en redes de calor.

Dentro de las tecnologías de celdas combustibles utilizadas para la cogeneración en el alcance de este estudio, destacan las de óxido sólido (SOFC) y las de membrana electrolítica de polímero (PEMFC). Las SOFC destacan porque operan a altas temperaturas (600 – 850 °C) y se construyen a partir de materiales cerámicos (óxido sólido), mientras que las PEMFC, operan a bajas temperaturas (60 – 160°C) y se construyen a partir de materiales de polímeros.

Dada la indisponibilidad actual de un sistema de distribución de hidrógeno a nivel residencial y pequeña industria, las celdas combustibles reforman el gas natural para la producción de H₂ y así poder operar con H₂. Mientras la infraestructura de distribución no esté disponible, se utilizará el gas natural como fuente primaria de combustible en este tipo de tecnología.

La tecnología alcanzará su nivel de madurez cuando exista una baja en los costos de compra, ya que las líneas de producción de sistemas de cogeneración de este tipo aún están siendo adecuadas para su producción en masa. El año 2021 se espera que se logre el inicio de la fabricación en masa de este tipo de sistemas de micro-cogeneración.

Lo particular de esta tecnología es que no tiene emisiones asociadas a la combustión directa del hidrógeno y que en todos los casos se produce electricidad y calor (cogeneración), más otros productos como el agua. La tecnología es adecuada para aplicaciones de escala residencial y de pequeña industria, logrando altas eficiencias globales al suministrar electricidad y calor a la vez. Las aplicaciones más típicas son aquellas donde existe una demanda simultánea de electricidad y calor o bien existe la posibilidad de inyectar la electricidad o el calor a la red. Del punto de vista del suministro del hidrógeno, el futuro está en **el hidrógeno verde o libre de emisiones, lo que permitirá tener electricidad y calor sin emisiones asociadas**.

2. Cogeneración y Celdas de Combustible

En el caso de las celdas combustibles, un programa para la generación de energía innovadora del Banco KfW, impulsa su desarrollo e implementación en el sector económico de las edificaciones, tanto para las existentes como para nuevas edificaciones (viviendas y no viviendas) en Alemania. Este programa se financia del Estado a través del programa de incentivos de eficiencia energética y la subvención de hasta 34.300 Euros, dependiendo de la potencia eléctrica del equipo y se limita para equipos de 0,25 hasta 5,0 kW eléctricos [1].

La combinación en la producción de calor y electricidad, o cogeneración, es una tecnología utilizada para mejorar la eficiencia energética a través de la generación de calor y electricidad en la misma planta. Esquemáticamente, la cogeneración de celda combustible se presenta en la Figura 4, donde un combustible (gas de la red o biogás o hidrógeno) alimenta la celda combustible, la que produce calor y electricidad de forma simultánea.

El calor producido en las plantas de cogeneración se puede utilizar en procesos industriales o para la calefacción de edificaciones o espacios en cualquier sector de la actividad económica, incluyendo al sector residencial. La cogeneración reduce o evita el consumo de combustible adicional para la generación de calor y con ello evita impactos ambientales, como las emisiones de CO₂ al ambiente.

La tecnología de cogeneración con celda combustible aún no alcanza el grado de madurez que le permita ser competitiva en el mercado. Los esfuerzos están puestos en aplicaciones en el sector económico de edificaciones (proyectos europeos ENE-FIELD y PACE).

Se espera que para el 2021, los fabricantes de sistemas de micro-cogeneración de celda combustible hayan logrado adecuar sus líneas de fabricación y mejorado el diseño de sus productos, para la fabricación en masa y con ello ver los efectos de las economías de escala en el costo final de los sistemas de cogeneración para uso residencial. Además, se realizan esfuerzos de investigación y desarrollo para eliminar o reducir al mínimo la utilización de metales preciosos, como el platino, de forma de hacer más competitiva la tecnología.

Por el lado del suministro de hidrógeno, el costo de transporte y almacenamiento del hidrógeno es del orden de 3 veces el del costo del gas natural para la misma cantidad de energía (poder calorífico para el H₂ es de 2,99 kWh por m³ v.s. ~10,0 kWh por m³ para el gas natural), y mientras aquello

continúe ocurriendo, las celdas combustibles continuarán operando en Europa principalmente con gas natural.

En Alemania, la apuesta de futuro de esta tecnología se relaciona a la operación virtual de una red de generación eléctrica para aportar estabilidad y flexibilidad a la red eléctrica, que tienen una alta penetración de energía solar y eólica, ambas del tipo variable.

1.1.1. Subvención para la generación de energía innovadora de la KfW

El programa de subvención para la generación de energía innovadora del Banco KfW [2], ha impulsado el desarrollo de la implementación de celdas combustibles en el sector económico de las edificaciones, tanto para el parque existente, como para las edificaciones nuevas (viviendas y edificios terciarios). Este programa se financió con aportes del Estado, a través del programa de incentivos de eficiencia energética.

El programa está destinado a financiar el costo del sistema de cogeneración de celda combustible y su instalación, la totalidad de los costos de mantenimiento durante los primeros 10 años y los costos de los servicios de los expertos de eficiencia energética, listados en un registro de la Agencia de Energía Alemana (DENA) [3]. Además, la subvención financia un máximo del 40% de los costos establecidos como elegibles por el programa.

El monto de la subvención se determina a partir de la suma de un monto fijo de 5.700 Euros, más 450 Euros por cada 100 W (totales o parciales) de potencia eléctrica iniciada¹ [18] (por ejemplo, un sistema de 250 W percibe un total de 5.700 + 450 x 3, equivalentes a 7.050 euros).

Adicionalmente, KfW ofrece otro tipo de productos financieros [4] [5] [6] [7] (créditos de bajo costo), que permiten financiar la totalidad del proyecto.

La subvención está destinada a personas naturales, comunidades de propietarios de departamentos (edificio), trabajadores independientes, empresas nacionales e internacionales, empresas ESCOS,

¹ El concepto de “potencia eléctrica iniciada” se refiere a que 50 W se contabilizan como 100 W para efectos de la subvención. En el caso de un equipo de 250 W, el beneficio de 450 Euros aplica para los primeros 100 W, para los segundos 100 W (100-200 W) y también completo para los 50 W finales (200-250 W).

comunas, empresas comunales, asociaciones de autoridades locales, organizaciones sin fines de lucro.

El resumen de la subvención se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Subvención para sistemas de cogeneración - KfW

Potencia Eléctrica	Subvención en Euros	Potencia Eléctrica	Subvención en Euros
0,25 kW	7,050	2,6 kW	17,400
0,30 kW	7,050	2,7 kW	17,850
0,4 kW	7,500	2,8 kW	18,300
0,5 kW	7,950	2,9 kW	18,750
0,6 kW	8,400	3,0 kW	19,200
0,7 kW	8,850	3,1 kW	19,650
0,8 kW	9,300	3,2 kW	20,100
0,9 kW	9,750	3,3 kW	20,550
1,0 kW	10,200	3,4 kW	21,000
1,1 kW	10,650	3,5 kW	21,450
1,2 kW	11,100	3,6 kW	21,900
1,3 kW	11,550	3,7 kW	22,350
1,4 kW	12,000	3,8 kW	22,800
1,5 kW	12,450	3,9 kW	23,250
1,6 kW	12,900	4,0 kW	23,700
1,7 kW	13,350	4,1 kW	24,150
1,8 kW	13,800	4,2 kW	24,600
1,9 kW	14,250	4,3 kW	25,050
2,0 kW	14,700	4,4 kW	25,500
2,1 kW	15,150	4,5 kW	25,950
2,2 kW	15,600	4,6 kW	26,400
2,3 kW	16,050	4,7 kW	26,850
2,4 kW	16,500	4,8 kW	27,300
2,5 kW	16,950	4,9 kW	27,750
		5,0 kW	28,200

En la página web del KfW se encuentra una herramienta de cálculo de la subvención, que utiliza como parámetros de entrada la potencia eléctrica y el monto de la inversión asociado a los costos elegibles. Una imagen de la herramienta se muestra en la Figura 1.



Figura 1 Herramienta de Cálculo de Subvención para Sistemas de Cogeneración de la KfW

Link a la herramienta de cálculo de la subvención referencial a postular. El monto resultante es sólo indicativo y no representa un compromiso o una oferta de parte de KfW:

- [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffiziente-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-\(433\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffiziente-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-(433)/)

1.1. Resultados de programas de fomento e incentivos en Europa

A nivel europeo, las reducciones de emisiones de CO₂ equivalentes en el sector industrial han caído cerca de un 27% desde el año 1990. De las reducciones, cerca del 60% se logran vía transacciones en el Sistema de Comercio de Emisiones y cerca del 40% a través del Esquema de Decisiones Compartidas, siendo estos los principales mecanismos de alcance internacional para el sector industrial.

El mercado global para las tecnologías ambientales y de eficiencia se estima en 2.500 millones de Euros y las estimaciones prevén que esta cifra al menos se duplique para el año 2025. Esta expectativa de mercado, junto a las ambiciosas metas climáticas definidas, justifican que tanto a nivel de la Unión Europea y de los países miembros se esté fomentando la investigación e innovación, con el objetivo de rápidamente avanzar con la tecnología hacia el nivel de desarrollo comercial, cual es el caso de la tecnología de la cogeneración con celda combustible y el desarrollo del transporte a hidrógeno.

Ejemplos de estos esfuerzos transversales, son el proyecto ENE.FIELD y el proyecto PACE, que se describen más adelante, donde este último aún en ejecución y que corresponde a un esfuerzo a

nivel de 10 países de la Unión Europea, se encuentra próximo a lograr el objetivo para que la tecnología de micro-cogeneración de celda combustible sea competitiva en el mercado europeo. Esto incluye el perfeccionamiento de la tecnología, capacitación de instaladores, promoción de la tecnología en los segmentos de mercado de impacto y el acompañamiento de la industria europea en este proceso. Al final del proyecto, se espera que a contar del año 2021 se comience a comercializar anualmente del orden de 10.000 unidades de micro-cogeneración. La Figura 2 muestra el proceso en curso para este propósito.

Además, Alemania cuenta con un programa de alcance nacional en la investigación de tecnologías del hidrógeno. Más información en el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Figura 2 Estrategia para alcanzar la masificación de la micro-cogeneración en Europa

1.3.1. Proyecto ENE.FIELD

El proyecto ENE.FIELD (European-wide field trials for residential fuel cell micro-CHP [8]) fué un proyecto demostrativo, desarrollado en 11 Estados miembros de la Unión Europea, donde se estudiaron más de mil sistemas residenciales de micro-cogeneración con celda combustible y es uno de los más grandes proyectos demostrativos de alcance Europeo realizado hasta ahora en 10 países y que se muestran en la Figura 6. El proyecto se extendió entre los años 2012 hasta 2017 y en octubre de 2017 se publicó el Informe [9] acerca de las lecciones aprendidas durante la ejecución

del programa. Posteriormente se desarrolló el Proyecto PACE que es un proyecto de cinco años que desplegará más de 2.800 unidades de micro-cogeneración en 10 países europeos hasta el año 2021.

El contexto de la micro-cogeneración con celda combustible está definido para sistemas con potencias eléctricas inferiores a 50 kW. La micro-cogeneración está pensada y diseñada para reemplazar las calderas a gas y generar electricidad y calor simultáneamente. Típicamente, en el segmento de la micro-cogeneración, los sistemas para aplicaciones residenciales y de pequeños comercios, utilizan potencias eléctricas de hasta 5 kW y las soluciones son de tipo individuales (1 equipo por vivienda).

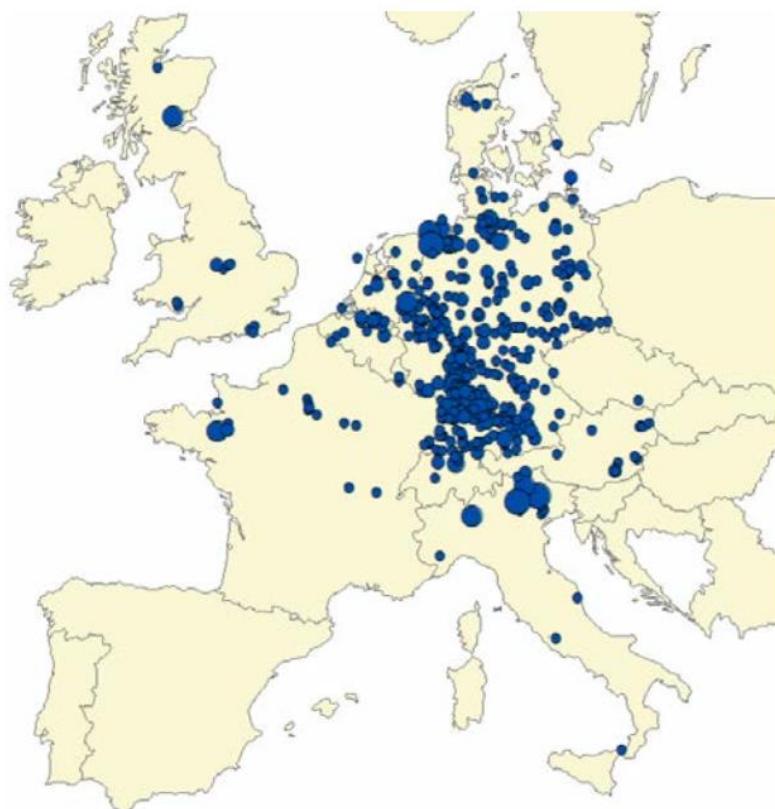


Figura 3 Ubicación de los sistemas de micro-cogeneración, Noviembre 2016

Del punto de vista técnico, la eficiencia de conversión de este tipo de celdas combustibles es superior al 90%, comparable con celdas combustibles de mayor tamaño. Al ser equipos instalados al lado de la demanda, se reducen las pérdidas de transmisión de la electricidad y de calor desde sistemas centralizados de cogeneración, además de reducir la carga en los sistemas de distribución e incluso proveer de potencia de punta y asistir en el balance de la red eléctrica. La configuración típica de los sistemas de micro-cogeneración se muestra en la Figura 4.

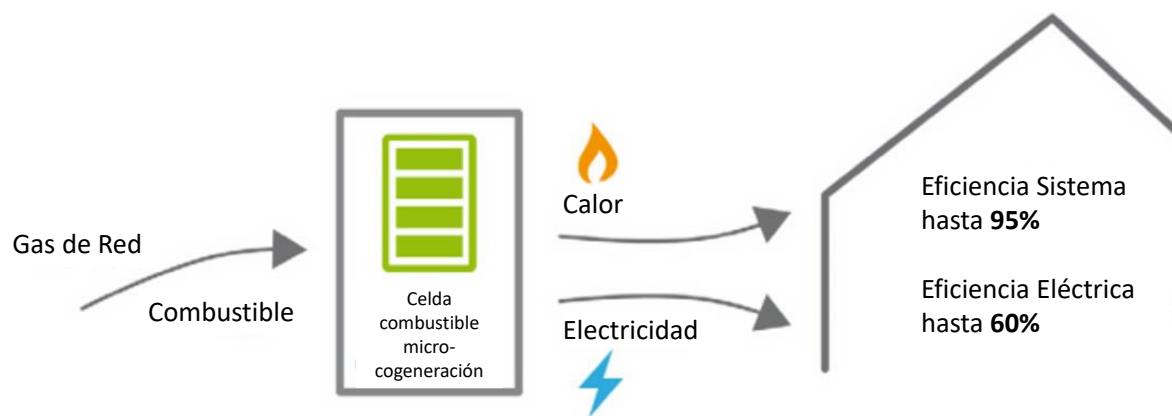


Figura 4 Configuración sistema de micro-cogeneración, proyecto ENE.FIELD

El proyecto involucró a más de 27 partes, donde participaron fabricantes de celdas combustibles, institutos de investigación, empresas de distribución, entre otros. El consorcio de entidades involucradas en el proyecto se muestra en la Figura 5.

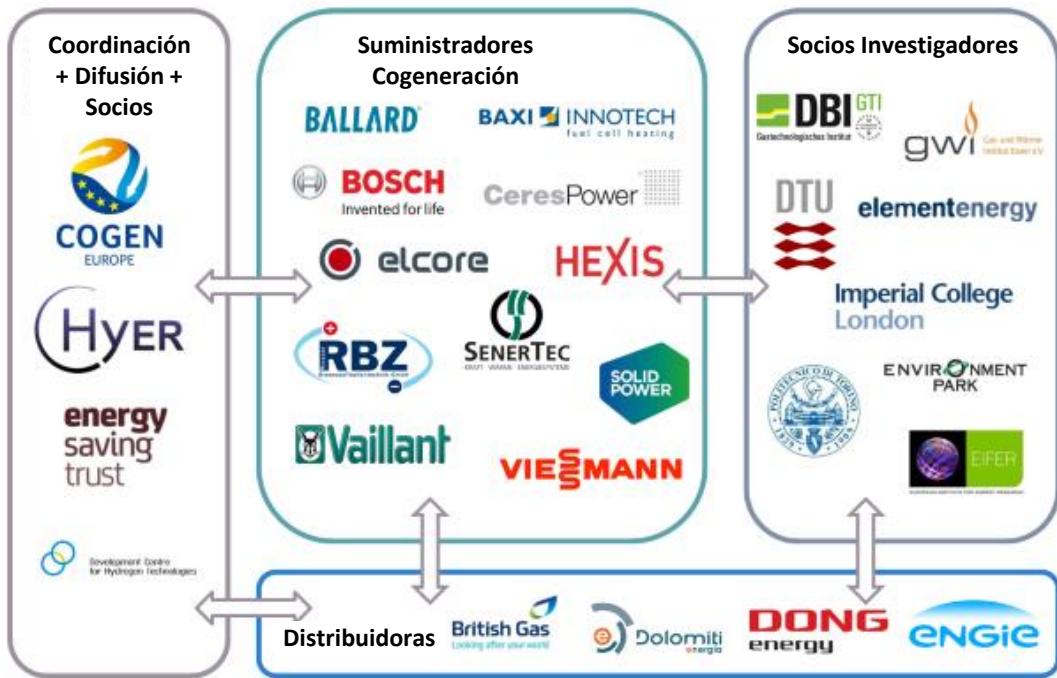


Figura 5 Socios en el proyecto ENE.FIELD

El proyecto logró registrar más de 5,5 millones de horas de operación de sistemas de cogeneración con celdas combustibles, que produjeron más de 4,5 millones de kWh de electricidad, con una capacidad instalada para generación eléctrica distribuida de 1,1 MW. Dentro de los equipos utilizados, se utilizaron 603 modelos de tecnología SOFC y 443 de tecnología PEM.

- Dentro de la categoría de los equipos de **tecnología SOFC**, las potencias eléctricas de estos variaron entre 0,7 y 2,5 kW; potencia térmica 0,6 – 25 kW; eficiencia eléctrica: 35 – 60%; eficiencia global: 80 – 95%.
- Dentro de la categoría de los equipos de **tecnología PEM**, las potencias eléctricas de estos variaron entre 0,3 - 5,0 kW; potencia térmica 1,4 – 22 kW; eficiencia eléctrica: 35 – 38%; eficiencia global: 85 – 90%.

Algunos ejemplos de los equipos utilizados en el proyecto se listan en la Figura 9.

Elcore 2400	Dachs InnoGen	Cerapower FC10 Logapower FC10	Vitovalor	SteelGen	Galileo 1000 N	Vaillant G5+	PEMmCHP G5	BLUEGEN	ENGEN 2500	Inhouse 5000+
PEM 300W	PEM 700W	SOFC 700W	PEM 700W	SOFC 700W	SOFC 1kW	SOFC 1kW	PEM 2kW	SOFC 2kW	SOFC 2.5kW	PEM 5kW
Natural Gas	Natural Gas	Natural Gas, Gas	Natural Gas	Natural Gas	Natural gas+ Biogas	Natural Gas	Natural Gas + Biogas	Natural Gas	Natural Gas	Natural gas + Biogas + H2
Elcore	SenerTec	Bosch Thermotechnik	Viessmann	Ceres Power	Hexit	Vaillant	Ballard Power	Solid Power		RBZ

Figura 6 Ejemplo de modelos de equipos de micro-cogeneración utilizados en el proyecto

El foco de análisis del proyecto fue la revisión de las brechas de la tecnología para alcanzar una penetración masiva en el mercado (tecnología competitiva sin necesidad de incentivos) y los principales resultados, ordenados por temas, se describen a continuación.

- **Ruta al mercado:** la estrategia más exitosa para la venta de los sistemas de cogeneración (80% de las ventas) fue a través de los canales establecidos de los instaladores de sistemas de calefacción, ya que se gatilla en ellos una motivación directa para aumentar el portafolio de productos y las ventas.

Alternativamente se revisó el acceso al cliente final a través de empresas de venta de servicios de energía (ESCO), donde la motivación de estas empresas está enfocada en el potencial del modelo de negocio y tuvo menos éxito que en caso anterior, principalmente por el tamaño del negocio (1 persona, 1 equipo pequeño).

También se demostró que la venta a través de empresas distribuidoras de energía fue muy complicada, a no ser que se dispusiera de fondos específicos o subsidios para proyectos demostrativos, que fue el caso de los primeros proyectos ejecutados en Alemania (por ejemplo, el proyecto Callux [10]).

De los 10 países, donde se ejecutó el proyecto, Alemania fue el mercado más exitoso en términos de instalaciones y proyectos realizados, totalizando cerca de 750 sistemas instalados. La razón que explica este resultado es el apoyo financiero que el gobierno alemán

destinó a subvención de la inversión y, con ello, favoreció el escalamiento del número de instalaciones. Además, los clientes finales disponen de un mejor conocimiento acerca de la tecnología y de esquemas financieros de largo plazo, al igual que los instaladores y empresas ESCO, todo lo cual favoreció una mayor penetración y mejor aceptación de la tecnología.

- **Desempeño técnico:** de acuerdo a la información recolectada, los tamaños de 1 kW eléctrico desarrollan una mejor cobertura de la demanda de calor y los sistemas de 2,5 kW eléctrico en operación continua logran la mayor eficiencia eléctrica. En términos de equipos individuales, el informe no entrega conclusiones específicas y sólo se refiere a conclusiones generales respecto las eficiencias teóricas y las registradas. La Tabla 2 resume los resultados de eficiencia² obtenidos para los distintos equipos.

Tabla 2 Comparación de eficiencias reales y de diseño

	SOFC		PEM	
	Condición óptima de laboratorio	Datos reales de las pruebas de campo	Condición óptima de laboratorio	Datos reales de las pruebas de campo
Eficiencia térmica promedio	53%	46%	57%	57%
<i>Intervalo Desviación Estándar</i>		30 – 59%		48 – 66%
Eficiencia eléctrica promedio	42%	37%	32%	32%
<i>Intervalo Desviación Estándar</i>		28 – 47%		28 – 39%

Respecto a la disponibilidad de los sistemas de cogeneración analizados, se estudió en detalle una muestra de 67 unidades, donde los resultados muestran que durante el primer año la disponibilidad alcanzó el 100%, aunque el 55% de los sistemas tuvo más de un fallo de muy corto período de tiempo (este tipo de falla se incluye dentro del ítem balance de planta). De forma global, el 90% de los sistemas de micro-cogeneración de celda combustible alcanzó una disponibilidad superior al 95%.

Respecto las fallas encontradas, sólo el 1-2% de estas tienen que ver con el núcleo de la celda combustible, cifra consistente con la información provista por los fabricantes acerca de la robustez tecnológica. El 86% de las fallas no está relacionada al componente celda combustible (lugar donde ocurre la combustión del hidrógeno) y el 12% de las fallas encontradas tienen que ver con el reformador de gas (donde el gas natural se transforma en

² La eficiencia térmica se calculó utilizando el Poder Calorífico Inferior (LHV)

hidrógeno) y el inversor (equipo que transforma la corriente continua en corriente alterna). La Figura 7 muestra de forma agregada la distribución estadística de las fallas registradas.

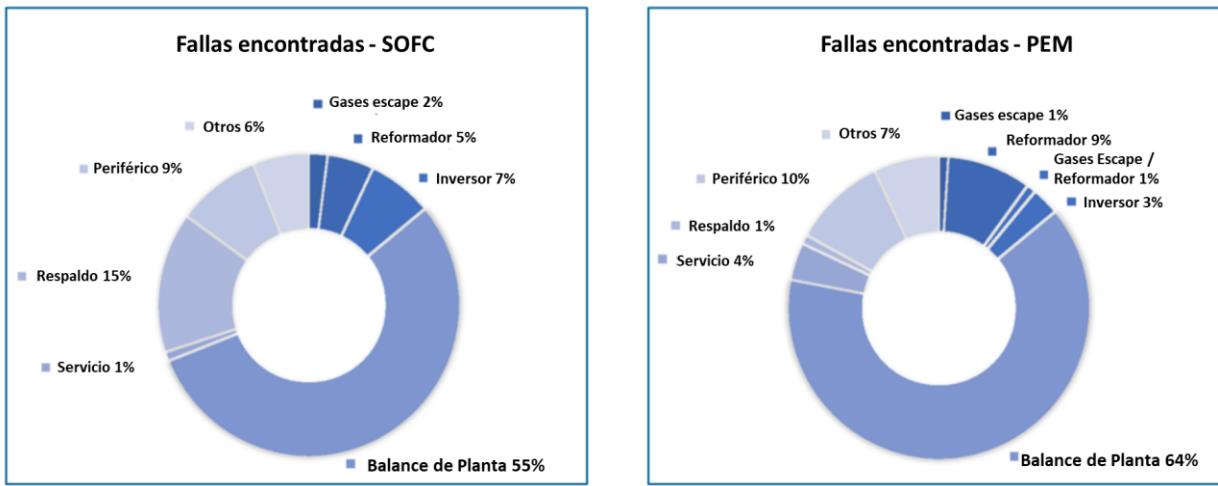


Figura 7 Distribución de fallas registradas en el proyecto Callux

Nota: el Balance de Planta se refiere a los componentes y sistemas auxiliares que requiere el sistema de cogeneración para el suministro de electricidad y calor.

Los sistemas de micro cogeneración de celda combustible, mostraron estar muy bien equipados para la integración en redes inteligentes (smart grids). Se pueden operar y controlar de forma remota, se puede ajustar en segundos a la demanda de calor y electricidad requeridos, lo que las hace adecuadas para generación distribuida en redes inteligentes, pudiendo limitar las pérdidas de transmisión de la red. Estos sistemas son adecuados para configurar plantas de generación virtual.

Los instaladores reportaron que el **proceso de instalación** es relativamente simple y tomó al menos 2 días la instalación del equipo, siendo el mayor tiempo de instalación entre 4-6 días. Comparativamente a una caldera, esta toma 2 días la instalación. Una vez madure el mercado de las celdas combustibles, se espera que el tiempo de instalación se normalice en 2 días, en la medida que los instaladores vayan ganando experiencia. La estandarización de componentes y el entrenamiento de instaladores, son los procesos requeridos para la reducción del tiempo en la instalación, de acuerdo al estudio. La capacitación fue realizada por los mismos fabricantes.

La **conexión** de los sistemas de cogeneración con celda combustible que operan con gas de red, se conectan a la red de gas y a la red de electricidad. Se constató que los procedimientos de instalación son similares en los 10 países estudiados y las regulaciones

tienen algunos requerimientos específicos, como por ejemplo actuadores eléctricos adicionales en instalaciones exteriores, de forma que el operador de la red pueda siempre acceder al actuador (conectar-desconectar de la red pública).

Los problemas más frecuentes registrados en el inversor tienen que ver con el ruido existente en la red y cortes súbitos del suministro eléctrico. Estas condiciones ocasionan la parada repentina del sistema de cogeneración, ya que el inversor gatilla el sistema de seguridad (protecciones) y con ello baja (apaga) todo el sistema de cogeneración.

- **Evaluación del Ciclo de Vida:** el desempeño ambiental de los sistemas se analizaron en varios escenarios, presentando una variabilidad muy amplia en aplicaciones de calefacción residencial dependiendo de la ocupación, nivel de aislación de la vivienda y la zona climática. Los principales resultados obtenidos son:

- En general, el ciclo de vida de los gases efecto invernadero de los sistemas de micro-cogeneración de celda combustible son menores que los de calefactores por condensación y bombas de calor, en todos los escenarios analizados.
- Las emisiones de los sistemas de micro-cogeneración conducen a menores emisiones de contaminantes del aire respecto a sistemas alternativos, en la medida que la electricidad producida por la micro-cogeneración tenga menos emisiones que las reemplazadas de la red eléctrica. La Figura 8 muestra la comparación de escenarios, para tres referencias de emisiones:
 - i. Planta eléctrica a carbón con emisiones promedio de 909 gramos de CO₂ por kWh eléctrico producido.
 - ii. Emisiones del mix eléctrico Alemán 504 gramos de CO₂ por kWh eléctrico producido.
 - iii. Emisiones del mix de la Red Europea de Gestores de Redes de Transporte de Electricidad (ENTSO-E) con 452 gramos de CO₂ por kWh eléctrico producido.

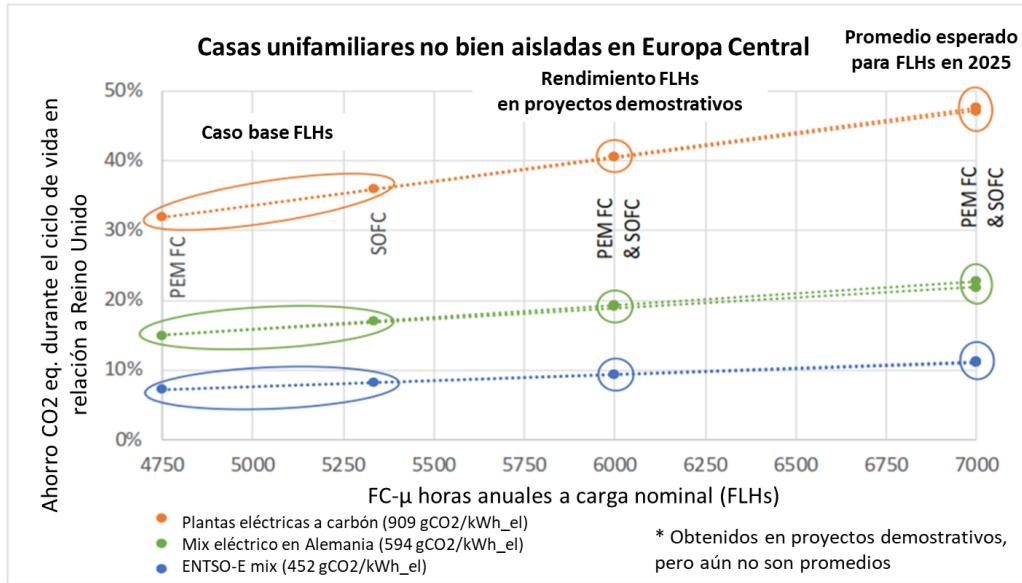


Figura 8 Comparación de ahorro de emisiones de CO₂-equivalentes para los sistemas de micro-cogeneración respecto a calderas de condensación a gas

- La eficiencia y las horas de operación a plena carga a lo largo del año, son las características que definen la evaluación del ciclo de vida ambiental de la tecnología.
- Los beneficios ambientales son mayores y evidentes en escenarios de utilización en edificios multifamiliares, que respecto a casas individuales.
- La disminución de las emisiones está definida por:
 - ante una menor demanda de calefacción en la casa, se disminuye el uso de la caldera de respaldo (que opera a gas), y
 - el reemplazo de electricidad producida intensivamente con carbón.
- **Aspectos económicos:** los sistemas de micro-cogeneración de celda combustible son significativamente más costosos que las tecnologías tradicionales. Con el inicio de la producción en serie de estos equipos, aparecerán las economías de escala y con ello, los estudios realizados en torno al proyecto, se espera que los costos caigan significativamente. Del punto de vista del análisis de los costos del ciclo de vida, se tienen los siguientes resultados:
 - El aumento en el volumen de la producción impactará en la reducción de costos (economías de escala), lo cual es crucial para la masificación de esta tecnología.
 - La micro-cogeneración tiene un mejor desempeño económico en edificaciones con una alta demanda de calor.

- En producción a gran escala, la micro-cogeneración puede volverse económicamente competitiva.
- Los subsidios pueden mejorar la rentabilidad económica de la micro-cogeneración, pero puede tener el mismo efecto relativo cuando las tecnologías con que compite también tienen subsidios asignados.

1.3.2. Proyecto PACE

El proyecto **PACE** (“Pathway to a Competitive European Fuel Cell Micro-Cogeneration Market”) [11] u hoja de ruta hacia un mercado europeo competitivo para la micro-cogeneración de celda combustible, es hoy en día el principal proyecto europeo en ejecución, buscando impulsar el desarrollo de lo último en tecnología de soluciones energéticas inteligentes para el sector residencial, a través de la micro-cogeneración de celda combustible. Este proyecto es parte de la estrategia de masificación de las soluciones de micro-cogeneración y es cofinanciado por Fuel Cells e Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), iniciativa que agrupa a los fabricantes Europeos, distribuidoras e instituciones de investigación, a lo largo de 10 países Europeos indicados en la Figura 9.

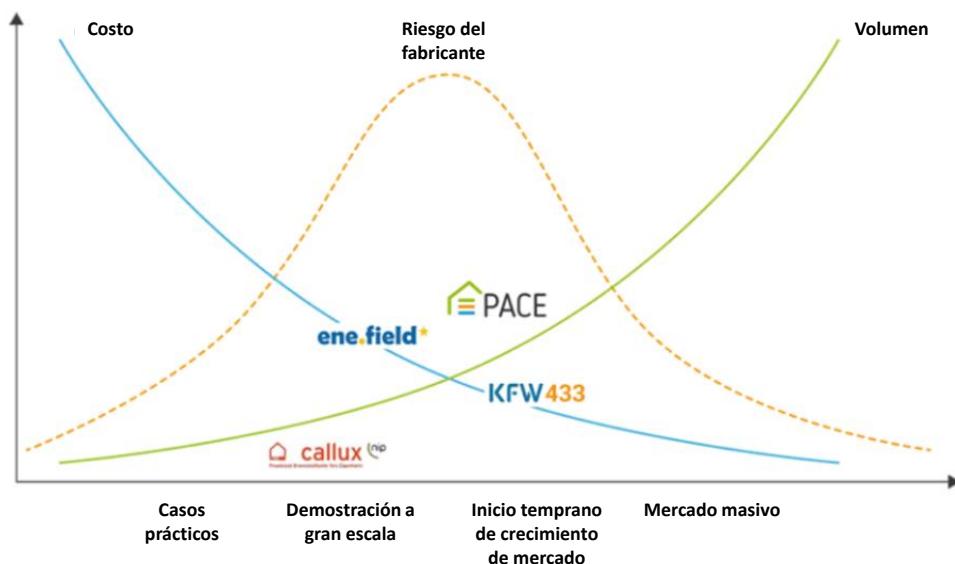


Figura 9 Países suscritos al proyecto PACE

PACE tiene un alcance de 2.800 casas a lo largo de 10 países Europeos y tiene por objetivos que los fabricantes de tecnología de celda combustible avancen hacia la industrialización, se fortalezcan el desarrollo del mercado a nivel nacional, y se involucre a las partes relacionadas, como los constructores profesionales y la comunidad energética. El proyecto tiene un presupuesto de 90 millones de Euros y se extiende entre el año 2016 – 2021, considerando una comercialización equivalente a 500 unidades por fabricante durante el período.

El proyecto utiliza tecnología de celdas combustibles de última generación, para producir calor y electricidad de forma eficiente, empoderando así a los consumidores en sus opciones energéticas.

El proyecto PACE busca alcanzar un mayor escalamiento de la tecnología para pasar el punto de máximo riesgo en la comercialización de nuevos productos. Actualmente el volumen de comercialización es bajo y existe un alto potencial para la reducción de costos al avanzar con la tecnología hacia una propuesta comercial. En este sentido, PACE espera aumentar los volúmenes en el orden de 10.000 unidades después de finalizado el proyecto en el año 2020. La Figura 10 muestra el proceso esperado de adopción de la tecnología de micro-cogeneración de celda combustible en el mercado europeo.

**Figura 10 Evolución esperada del mercado de la micro-cogeneración de celda combustible**

Los objetivos de PACE para escalar la tecnología incluyen:

- **La reducción de costos y mejoras en la competitividad.** La cuota de 500 sistemas por fabricante a quienes se les exige un avanzado nivel de automatización, permitirá a estos traspasar la etapa de aprendizaje y consolidar el proceso de producción, de forma de asegurar los suministros e industrialización. Esto acelerará el cambio de escala en el proceso de diseño y producción, permitiendo la reducción de costos de forma significativa, en al menos un 30%. Además, como parte del proyecto, cada fabricante elevará su capacidad de producción a un mínimo de 1.000 sistemas para el año 2018, con opción de agregar capacidad adicional de forma flexible en función de la demanda.
- **Mejora del rendimiento:** cada fabricante implementará nuevas mejoras al estado tecnológico de sus sistemas de micro-cogeneración de celda combustible, con el objetivo de alcanzar optimizaciones en los costos totales para el dueño y mejoras en el rendimiento del equipo.
- **Establecer una estandarización en la tecnología de micro-cogeneración de celdas combustibles.** Como parte del proyecto, cada fabricante preparará equipos de especialistas para prestar apoyo a los sistemas instalados y se certificarán esquemas de capacitación y entrenamientos para la instalación de sistemas. Cada fabricante desarrollará sus propios canales de venta existentes, para incorporar la micro-cogeneración como un producto estándar para el sector de calefacción doméstica.

En paralelo, PACE se preocupará de la competitividad futura del sector a nivel Europeo y creará un grupo de trabajo que tiene por propósito de aumentar la estandarización en los componentes y de la unidad (por ejemplo mejores prácticas para la instalación). Esto permitirá establecer estrategias entre los fabricantes involucrados en PACE y así tener una interacción más eficiente con la cadena de suministro europea.

- **Sensibilización de la micro-cogeneración de celda combustible.** Los resultados de PACE se utilizarán para identificar y estimular los cambios requeridos a nivel industrial, de política pública y regulatorio, los que permitirán alcanzar el siguiente nivel de industrialización de la tecnología.

Los socios se pondrán en contacto con los reguladores y los actores que componen la cadena de valor para el suministro de calefacción doméstica en 4 países seleccionados, para poner en marcha el marco que permitirá un amplio despliegue de la tecnología.

Los resultados preliminares del programa en marcha, han mostrado que del total de los clientes finales que han adoptado esta tecnología, más del 90% está muy contento con el rendimiento ambiental, el confort y calor que provee, la alta disponibilidad y los bajos costos operacionales de sus sistemas de micro-cogeneración de celda combustible. La Figura 11 muestra los resultados de la encuesta de percepción realizada a los usuarios finales del proyecto PACE.

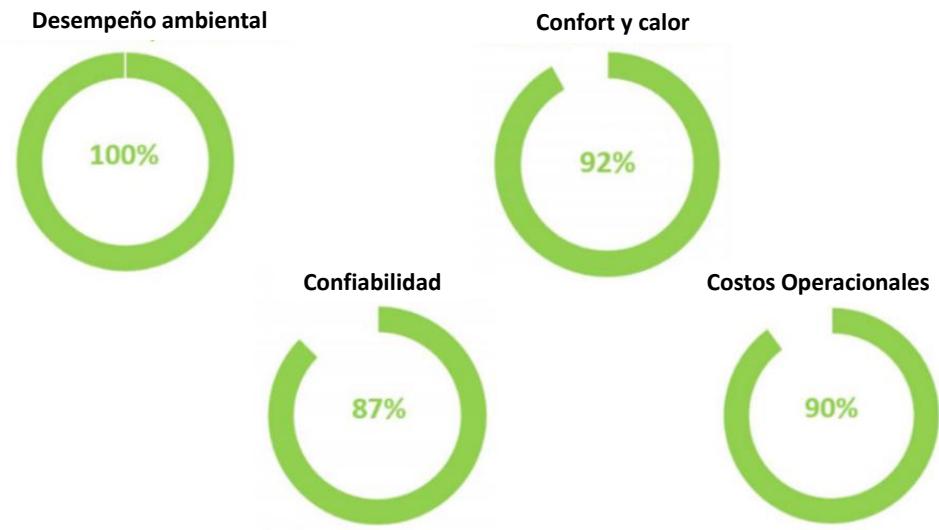


Figura 11 Encuesta de percepción realizada a usuarios que instalaron sistemas de micro-cogeneración bajo el marco del proyecto PACE

Además, las eficiencias globales logradas por los sistemas están por sobre el 90%, registrando eficiencias eléctricas de hasta 60%, lo que permite que esta tecnología pueda desarrollar significantes reducciones de consumo de energía y de emisiones de CO₂. En promedio en Europa, el ahorro es de aproximadamente 1 tonelada de CO₂ por kW-instalado por año, lo que significa reducciones de emisiones de CO₂ de más de 32 millones de toneladas hasta el año 2030.

Esta tecnología flexible en combustible, progresivamente se irá alimentado de fuentes renovables, como el hidrógeno y gas renovable, haciéndola aún más efectiva desde el punto medio ambiental.

3. Cogeneración con Celdas Combustibles de Hidrógeno

La cogeneración con celda combustible ocurre del proceso de transformación de un combustible (gas de la red, biogás o hidrógeno) que alimenta la celda combustible donde se produce calor y

electricidad de forma simultánea. El proceso se presenta esquemáticamente en la Figura 4 de este informe.

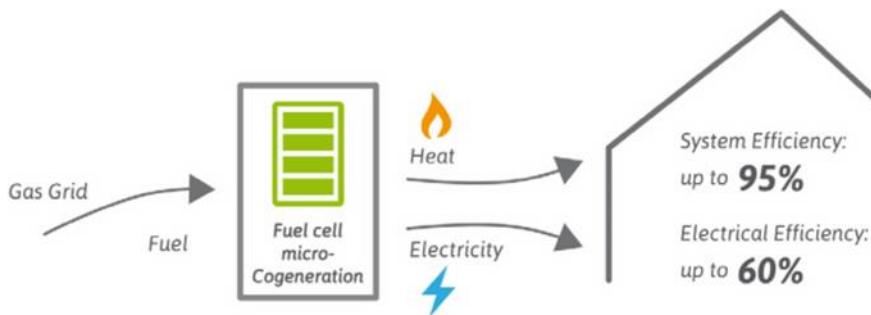


Figura 4 Configuración sistema de micro-cogeneración, proyecto ENE.FIELD

Las celdas combustibles de hidrógeno operan convirtiendo el hidrógeno en agua, produciendo electricidad y calor, y a la fecha el gas natural es la fuente de combustible más común por su disponibilidad a nivel de la demanda. El gas natural antes de ingresar a la celda combustible es reformado, proceso en el cual el gas natural se transforma en H₂, permitiendo así que la celda combustible opere con H₂. En la industria actual para el H₂, con un precio de venta de 9.50 Euros por kg (equivalente a 317 centavos de Euro por kWh y comparativamente más costoso que el gas natural con un precio referencia del 5.82 centavos de Euros por kWh), el H₂ no es un commodity. Además, aún no existen redes de suministro de H₂ a nivel residencial, lo que condiciona el uso del gas natural en las celdas de combustible a hidrógeno, mientras se desarrolle la infraestructura del hidrógeno a nivel nacional.

En 2017, el Informe de Promoción de la Cogeneración del KfW [12] reporta el apoyo a un total de 1.558 iniciativas con celdas combustible, de las cuales 1.237 estaban siendo utilizadas en aplicaciones de mejoramiento de edificaciones. En el informe del año 2018, estas aplicaciones aumentaron a 3.030, de un total de 3.625 aplicaciones que recibieron apoyo de KfW.

En Alemania, excepto por un sistema de celdas de combustible de 1,4 MW de potencia eléctrica instalado en una aplicación industrial, muy pocos sistemas de celdas de combustible se encuentran actualmente en el rango superior de kilovatios de tres dígitos. Las celdas combustibles en Alemania se desarrollan casi exclusivamente en el rango de potencia por debajo de 10 kW de potencia eléctrica.

2.1. Revisión de la tecnología de celdas combustibles de hidrógeno

Una celda combustible es similar a una batería en el sentido que genera electricidad a partir de una reacción electroquímica. Una celda combustible utiliza un suministro externo de energía química y con ello puede operar indefinidamente, mientras exista el suministro de hidrógeno y oxígeno (usualmente del aire). La fuente de hidrógeno o el tipo de electrolito generalmente otorgan el nombre a la celda combustible, a pesar de que no ocurre una combustión en el proceso. La oxidación del hidrógeno ocurre en un ambiente electroquímico y de manera muy eficiente. Durante la oxidación, los átomos de hidrógeno reaccionan con los átomos de oxígeno para formar agua y calor, y en el proceso se liberan electrones que fluyen a través de un material conductor como corriente eléctrica.

Las celdas combustibles varían en tamaños, desde unidades que sólo producen algunos watts de potencia (como las utilizadas en laboratorios de colegios para fines demostrativos) hasta grandes unidades eléctricas con potencias en el rango de los mega watts. En el alcance de este estudio de celdas combustibles para la utilización en cogeneración, los tamaños típicos de equipos comerciales se ubican entre 0,3 hasta 5 kW de potencia eléctrica.

Todas las celdas combustibles se construyen en base a un diseño central que utiliza dos electrodos separados por un electrolito sólido o líquido, que es el medio que transporta las cargas eléctricas entre los electrodos. Para acelerar el proceso de oxidación del H₂ se utilizan catalizadores, como el platino, que facilita la disociación del hidrógeno en electrones y protones (H⁺). Los protones son conducidos a través del electrolito hasta el cátodo, donde reaccionan con el oxígeno y los electrones del lado del cátodo, formando agua y calor que deben ser removidos de la celda combustible. Los electrones generados en el ánodo son conducidos a través de un circuito externo para alimentar de corriente eléctrica un dispositivo eléctrico.

Las celdas combustibles, se clasifican de acuerdo a la naturaleza del electrolito que utilizan, que además define la materialidad de la celda y el tipo de combustible para la operación, siendo los combustibles más comunes el hidrógeno, gas natural, biogás, metano, propano y gas sintético. Algunas de ellas utilizan un reformador para transformar el gas combustible en hidrógeno, mientras que otras celdas combustibles operan directamente con varios tipos de gases combustibles (como se mostrará más adelante).

Existen varios tipos de celdas combustibles, donde las más utilizadas son las celdas combustibles de óxido sólido (SOFC) y las de membrana electrolítica de polímero (PEMFC). Un resumen de las principales características de estas celdas se presenta en la

Tabla 3.

Las características del combustibles y condiciones de seguridad de las instalaciones que utilizan el hidrógeno como combustible quedan definidas en las siguientes regulaciones:

- Regulación Técnica: DVGW 491:2020-04
- Norma: ISO 14687:2019-11
- Implementación Pautas Europeas de Equipos a Presión 2014/68/EU
- Regulación Técnica: VDI 3475 Blatt 3:2006-12

Tabla 3 Resumen características celdas combustibles

Celda Combustible	Temperatura de Operación °C	Electrolito	Eficiencia %	Aplicaciones típicas	Ventajas	Requerimiento
De óxido sólido (SOFC)	500 – 1.000	Óxido de circonio	Eléc.: 50 – 60 Term.: 30 - 59 Global: >80	Unidades eléctricas de respaldo, cogeneración	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere de catalizador • No requiere de reformador • Variedad de hidrocarburos • CO no es problema 	<ul style="list-style-type: none"> • Vulnerable al sulfuro • Mayores tiempos de partida • Materiales resistentes al calor
De membrana de intercambio de protones (PEMFC)	60 – 160 Típico: 80	Membrana de polímero ácido	Eléc.: 28 – 39 Term.: 48 - 66	Tecnología de consenso para el transporte terrestre (autos, buses, camiones), aplicaciones estacionarias	<ul style="list-style-type: none"> • Alta densidad de energía • Alcanza rápidamente la temperatura de operación • Platino puede ser reciclado 	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioro de membrana a alta temperatura de operación • Utiliza platino (mayor costo) • Remoción de CO
Alcalina (AFC)	A: 100 – 250 B: 23 - 70	Hidróxido de potasio	Eléc.: 60%	Tecnología aeroespacial. Aplicaciones estacionarias (en desarrollo)	<ul style="list-style-type: none"> • Agua que genera es bebestible • Celda de menor costo de fabricación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible al CO₂ que se encuentra en el aire
De metanol directo (DMFC)	60 - 130	Membrana de polímero	Sin información	Aplicaciones de baja potencia (dispositivos electrónicos móviles, cargadores). Vehículos eléctricos (en desarrollo)	<ul style="list-style-type: none"> • Alternativa a la celda PEMFC • Uso directo de metanol • No requiere de reformador • Aplicaciones en vehículos eléctricos 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza platino-rutenio (mayor costo)
De ácido fosfórico (PAFC)	150 - 200	Ácido fosfórico	Global:70%	Aplicaciones estacionarias Uso directo para calefacción	<ul style="list-style-type: none"> • Menos sensible al CO que las celdas PEMFC y AFC • Opera con combustibles con contenido de CO 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza platino (mayor costo)
De carbonato fundido (MCFC)	>650	Sales de carbonato fundido	Eléc.60% Global: 85%	Generación de electricidad, aplicaciones industriales y militares.	<ul style="list-style-type: none"> • No utiliza metales preciosos (menor costo) • Opera con gas natural, biogás, gas sintético, metano y propano 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor vida útil por temperatura de operación • Baja densidad energética • Electrolito agresivo (corrosión)

A continuación, se presentan características específicas para las celdas combustibles SOFC y PEMFC. En el Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentra el detalle de los demás tipos.

- **Celda combustible de óxido sólido (SOFC)**, esta celda opera a altas temperaturas, típicamente entre 500 y 1.000 °C y se construyen a partir de materiales cerámicos (óxido sólido). La Figura 12 muestra esquemáticamente la celda combustible SOFC.

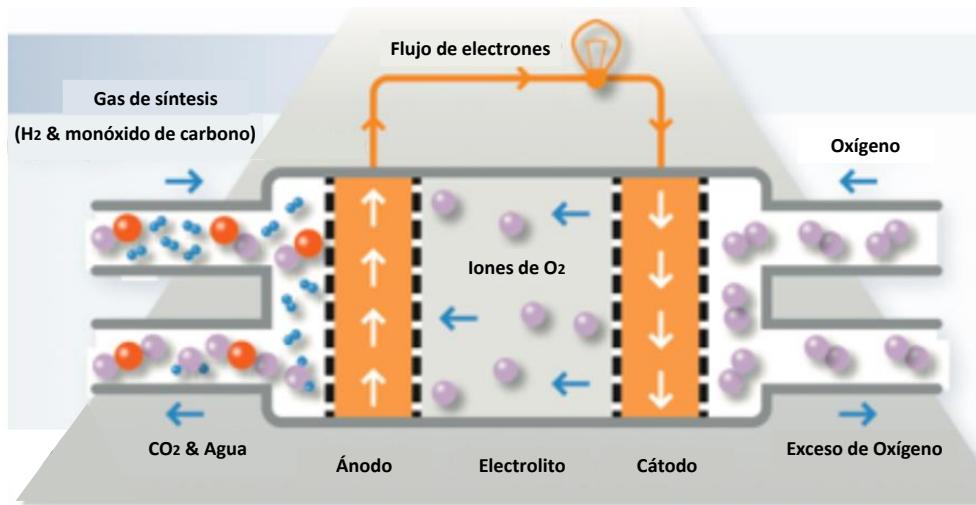


Figura 12 Presentación esquemática de la celda combustible SOFC

(Fuente: <https://hydrogeneurope.eu/fuel-cells>)

Las SOFC utilizan un cerámico duro y no poroso como electrolito, como el óxido de circonio estabilizado con óxido de itrio, lo que le permite tener geometrías múltiples respecto las demás celdas combustible. Las celdas SOFC alcanzan eficiencias de 50% - 60% en la conversión del combustible en electricidad, pudiendo alcanzar eficiencias globales por sobre el 80% cuando el calor es utilizado

Su característica principal es la alta temperatura de operación, pudiendo llegar hasta los 1.000 °C. A estas temperaturas, las SOFC no requieren de un catalizador metálico, como el platino, para que ocurra la reacción del hidrógeno y no requieren de un reformador dentro de la celda combustible, permitiéndose el uso de una variedad de hidrocarburos como combustible. Estas celdas no son vulnerables a la intoxicación del catalizador por monóxido de carbono (desactivación por impurezas). Sin embargo, se ha detectado vulnerabilidad al sulfuro, el cual debe ser removido antes de entrar a la celda utilizando lechadas adsorbentes u otros medios.

Consecuencia de la alta temperatura los tiempos de partida de estas celdas es mayor, ya que requiere alcanzar la temperatura de operación y son más robustas en su construcción, utilizan materiales resistentes al calor y deben estar aisladas térmicamente para prevenir pérdidas de calor.

Estas celdas tienen una amplia variedad de aplicaciones, desde unidades eléctricas de respaldo hasta unidades de respaldo en vehículos, con potencias típicas entre 100 W hasta 2 MW.

La alta temperatura de operación de la SOFC las hace adecuada en aplicaciones como en plantas de cogeneración (electricidad y calor) que permiten aumentar la eficiencia global de la celda.

- **Celda combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC)**, esta celda opera a bajas temperaturas (60 – 160°C) y se construyen a partir de una membrana de polímero ácido como electrolito. También es conocidas como celda combustible de electrolito de polímero. La Figura 13 muestra esquemáticamente la celda combustible PEMFC.

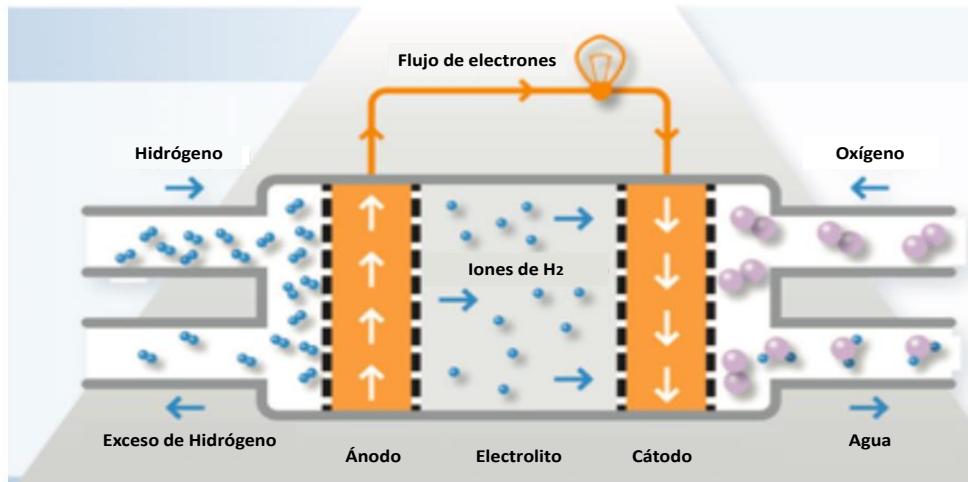


Figura 13 Representación esquemática de la celda combustible PEMFC

(Fuente: <https://hydrogogeneurope.eu/fuel-cells>)

Las celdas PEMFC logran una alta densidad de potencia y tiene una serie de ventajas relacionadas a su bajo peso y volumen, comparado con otras celdas combustibles. Las PEMFC utilizan una membrana de polímero como electrolito y electrodos porosos de carbono que contienen un catalizador de platino. Este tipo de celdas sólo necesita de hidrógeno, oxígeno (del aire) y agua para operar y su operación no contiene fluidos corrosivos como en otras celdas combustibles. Consecuencia de la baja temperatura de operación y del uso de materiales preciosos en los electrodos, este tipo de celda operan con hidrógeno puro proveniente de tanques de almacenamiento de hidrógeno.

Operan a temperaturas cercanas a los 80°C y son adecuadas para aplicaciones móviles y otros usos que requieren inicialmente una alta demanda de electricidad (alta densidad). En la actualidad estas celdas no operan a alta temperatura ya que se deteriora la membrana, y esto resulta una limitante en algunas aplicaciones de estas celdas combustible. La operación a baja temperatura tiene una importante ventaja y también algunos inconvenientes. La

principal ventaja es que la celda rápidamente puede alcanzar la temperatura de operación, partiendo desde la temperatura ambiental. Por otro lado, el principal problema es que necesita para operar la presencia de platino como catalizador, lo que aumenta el costo. Además, el catalizador de platino es muy sensible al CO, haciendo obligatorio el uso de un reactor adicional para reducir el CO del gas combustible, cuando el hidrógeno proviene de un alcohol o combustible de hidrocarburo. Esta etapa adicional hace aún más costosa esta tecnología. Las investigaciones en curso se esfuerzan en reducir o eliminar el uso del platino y han permitido reducir la cantidad de platino utilizado en las PEMFC de forma sustancial. Adicionalmente el catalizador de platino puede ser reciclado.

Actualmente, la PEMFC es la celda de consenso en aplicaciones para el transporte terrestre (autos, buses, camiones, etc) y también se utiliza en aplicaciones estacionarias.

2.2. Fabricantes de tecnología de cogeneración con celda combustible

En el desarrollo de este trabajo, se hizo un levantamiento (Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) de fabricantes de equipos o sistemas de cogeneración de celda combustible y motores a combustión de H₂. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el listado y página web de cada uno y a continuación se muestran algunos ejemplos de los modelos que ofrecen.

Tabla 4 Fabricantes sistemas de cogeneración de celda combustible

Fabricante	Página web
SOLID Power	https://www.solidpower.com/
Vaillant Group	https://www.vaillant-group.com/
Ballard & Dantherm Power	https://www.ballard.com/fuel-cell-solutions
RBZ,	www.rbz-fc.de
Elcore	www.elcore.com
Hexitis	http://www.hexitis.com/en/fuel-cell-technology
BDR Thermea	
Sunfire	
Remeha	

Bosch	https://www.senertec.de/dachs-0-8/
Viessmann	https://home.sunfire.de/de/
Catálogo PACE	https://www.remeha.de/fachpartner/produkte/neubau-modernisierung/hybridsystem-waerme-strom/electa-300# https://www.buderus.de/de/produkte/catalogue/alle-produkte/108941_brennstoffzelle-bluegen https://www.viessmann.co.uk/products/combined-heat-and-power/fuel-cell/vitovvalor http://www.pace-energy.eu/wp-content/uploads/2020/04/PACE-D1.7-FV.pdf
Información Adicional Listados de expositores: Exhibitor List Hydrogen + Fuel Cells EUROPE at HANNOVER MESSE 2019	https://www.h2fc-fair.com/hm19/exhibitors/index.html

Fabricante	Modelo	Potencia (kW)		Eficiencia		
		Eléctrica	Térmica	Eléctrica	Térmica	Global
SOLIDpower Bosch	BlueGen BG-15	0,5 - 1,5	0,85	55%		88%
Vaillant Group	Vaillant G5+	1,0	2,0			>90%
RBZ	Inhouse 5000+	4,2	7,5	34%		92%
Elcore	Elcore 2400	0,3	0,7	32%	72%	104%
Hexis	1000 N	1,0	1,8	35%		95%
BDR Thermea	Dachs 0.8	0,75	1,1	38%		92%
Sunfire	Sunfire-Home	0,75	1,25	39,7%		89%
Remeha	eLecta300	0,75	1,1	38%		92%
Viessmann	Vitovvalor PT2	0,75	1,1			80%

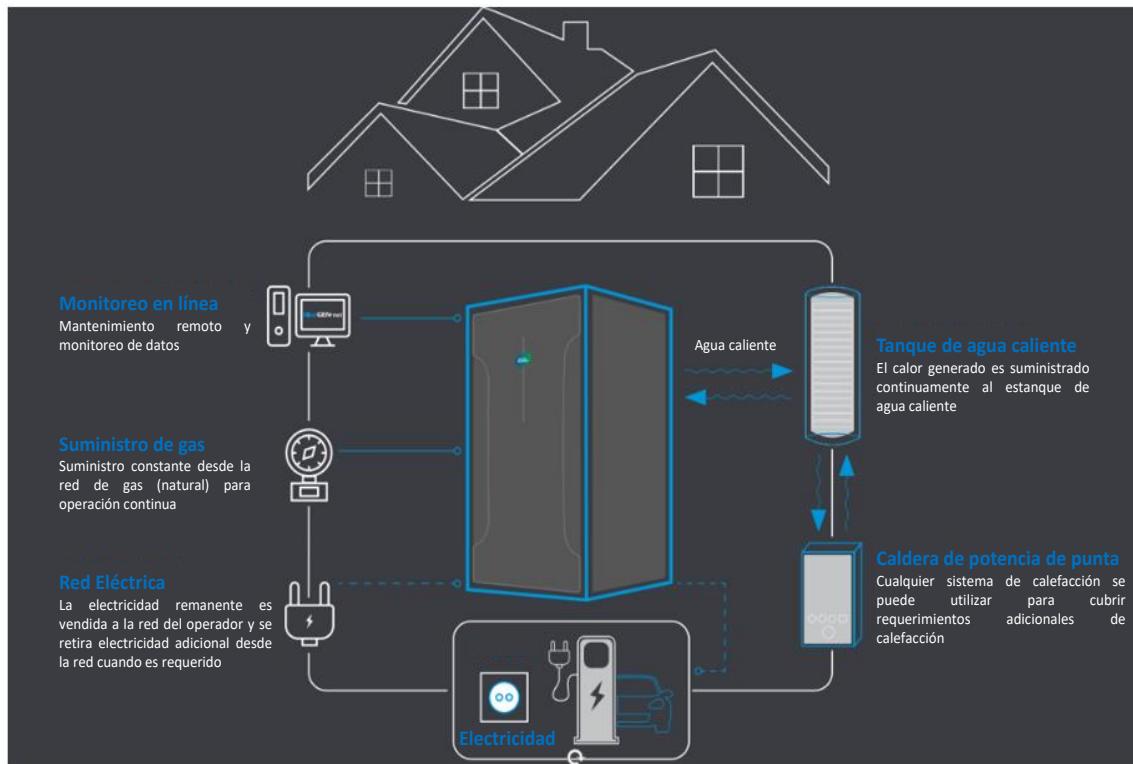
Ejemplos sistemas de cogeneración con celda combustible

- **SOLIDpower** (<https://www.solidpower.com/>)

Fabricante internacional de equipo de cogeneración de celda combustible, fundada en Italia y con filiales en Alemania, Suiza y Austria. La empresa se especializa en el sector de la micro-cogeneración para el sector vivienda y edificaciones de comercio. La empresa comercializa el equipo BlueGen BG-15, de 1,5 kW de potencia eléctrica.

Tabla 5 Equipo de cogeneración de celda combustible SOLIDpower

Modelo	Combustible	Potencia (kW)		Eficiencia		
		Eléctrica	Térmica	Eléctrica	Térmica	Global
BlueGen BG-15 (SOFC)	Gas natural, biogas, metano	0,5 - 1,5	0,85	55%		88%


Figura 14 Sistema de cogeneración BlueGen BG-15

- **Vaillant Group** (<https://www.vaillant-group.com/>)

Tabla 6 Equipo de cogeneración de celda combustible Vaillant

Modelo	Combustible	Potencia (kW)		Eficiencia		
		Eléctrica	Térmica	Eléctrica	Térmica	Global
Vaillant G5+ (SOFC)	Gas natural, biogas, metano	1,0	2,0			>90%



Figura 15 Sistema de cogeneración Vaillant G5+

2.3. Madurez Tecnológica de las Celdas Combustibles

La tecnología de celdas de combustible para aplicaciones de cogeneración a pequeña escala, todavía está en la fase de investigación y desarrollo con avances a nivel de proyectos piloto de alcance Europeo, donde los proyectos más relevantes en el ámbito de este informe corresponde a los proyectos ENE.FIELD y PACE, que se revisaron en el Capítulo 1.1, junto a las actividades de investigación y desarrollo que desarrolla la Helmholtz Gemeinschaft, con foco en aplicaciones para el transporte terrestre, marítimo y aéreo, en la transformación a combustibles CO₂-neutros (Power-to-X) y a la producción de algunos energéticos como el amoniaco y el metanol. De acuerdo al proyecto PACE, proyecto en ejecución, para el año 2021 se espera que los fabricantes de celdas combustibles hayan transformado sus líneas de producción, para así ver internalizado en los costos de compra el efecto de las economías de escala.

El desarrollo de las celdas de combustible está directamente relacionado con dos factores: i) el costo de la celda de combustible y ii) el costo del hidrógeno. Para soluciones como las plantas de cogeneración, el costo del gas natural en la actualidad es de alrededor de un tercio (30%) del costo del hidrógeno para la misma cantidad de energía y el aumento de la eficiencia lograda con un sistema de cogeneración de hidrógeno no compensa la diferencia en los costos de la misma planta operada con gas o biogás. El costo del hidrógeno es el factor que más ha impedido el inicio y despegue de esta industria, inclusive en el sector del transporte eléctrico, y los proyectos pilotos en



curso se basan en sistemas de celdas combustibles de hidrógeno con reformador, para así utilizar el gas de red, disponible a nivel de los usuarios.

4. Análisis de costos de inversión, operación y mantenimiento

3.1. Revisión de costos sistemas de cogeneración de celda combustible

Los costos totales de un sistema de cogeneración de celda combustible para calefacción, se desglosa en varios componentes. Los principales elementos a considerar en la estimación del costo total son:

- Sistema de cogeneración de celda combustible
- Una caldera de potencia de punta, en el caso que no esté integrada en el sistema de cogeneración de celda combustible.
- Conexión a la red de gas, un desagüe de agua, una campana extractora de gases, un inversor, almacenamiento de respaldo y otros componentes de acuerdo con las necesidades del cliente.
- Costos de instalación, montaje y puesta en marcha.

Todos estos ítems sumados, dan como resultado un costo total para el sistema de cogeneración a motor de combustión entre 1.550 y 17.000 €/kW, como se detalla en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Esta cifra considera los costos de conexión a la red de gas o alternativamente considera la operación de la celda combustible con gas licuado de petróleo (LPG), toda vez que no exista una conexión a la red de gas en el lugar que se ubica el sistema.

Los costos de conexión a la red de gas para una celda combustible varían entre 1.500 – 2.500 euros y no dependen del tamaño del equipo.

6.1.1. Otros costos a considerar

En el proceso de planificación de los costos de un sistema de cogeneración para calefacción, se deben considerar otros componentes adicionales como un acumulador intermedio de agua caliente, un acumulador de electricidad o batería eléctrica o la conexión a la red eléctrica y un inversor.

Cuando el diseño del sistema de cogeneración se orienta a la generación de electricidad, el foco se centra en la generación de una gran cantidad de electricidad que trae consigo la generación de una gran cantidad de calor. Este calor usualmente no puede ser utilizado de forma directa y se tiene que

acumular para que no se pierda. Para esto se utiliza un acumulador intermedio. Esto permite de forma cómoda tener acceso en cualquier momento al calor almacenado.

Cuando el diseño del sistema de cogeneración se orienta a la generación de calor, el foco se centra en la producción de calor. De forma opcional, eventualmente, puede hacer sentido invertir en un acumulador de electricidad que funciona como una batería, y un inversor de carga, donde la electricidad generada se pueda almacenar y ser utilizada posteriormente cuando se requiera.

En regla general, los costos de almacenamiento de electricidad en un sistema de cogeneración son altos, pero valdrá la pena, cuando el costo del kWh almacenado sea menor que el pago de la tarifa residencial, especialmente en Alemania y considerando que el costo de almacenamiento en batería está disminuyendo aceleradamente. Como se vio anteriormente, el precio de la electricidad para el cliente final en Alemania es de 30 centavos de Euro por kWh, el segundo más caro de Europa.

El sistema de cogeneración debe considerar además un ducto para gases de escape, los que son necesarios en los sistemas de cogeneración modernos. En edificios existentes, se puede evaluar la utilización de ductos de escapes o chimeneas existentes, previa restauración y verificación del cumplimiento con las especificaciones del equipo. En el caso de las chimeneas convencionales, estas no están diseñadas para trabajar con gases de escape a bajas temperaturas y tampoco son resistentes al vapor de agua.

3.2. Condiciones comerciales para la aplicabilidad de la tecnología

Costo de inversión: la inversión considera todas las compras y actividades hasta la puesta en marcha del sistema. Esto considera los costos de planificación y los intereses durante el período de construcción. En el caso de los pequeños sistemas de cogeneración se considera que el equipo tiene incorporado un sistema de recuperación de calor en los gases de escape; desde 500 kW se incluye un generador de vapor de baja presión de 2 bares de sobrepresión en el intercambiador de calor de los gases de escape.

El costo de inversión incluye el costo del equipo de cogeneración (basado en información del año 2018 de 44 fabricantes y 577 equipos de cogeneración a gas natural), el transporte, montaje y puesta en marcha, al igual que las conexiones técnicas a la redes de gas y eléctrica. En el caso de sistemas de cogeneración inferiores a 10 kW, raramente se utilizan servicios de empresas de ingeniería, por lo que los costos de planificación son del orden

entre 250 hasta 1.000 Euros. Para un sistema de 50 kW esta partida se estima en 25.000 Euros y para uno de 100 kW en 40.000 Euros.

Desde el año 2019, con la modificación del marco regulatorio, los sistemas de cogeneración a motor de combustión deben considerar equipamiento adicional para el cumplimiento con la regulación de emisiones, por lo que se agrega al equipo un catalizador-SCR y un acumulador de urea. Adicionalmente, para equipos sobre 135 kW eléctricos se especifica la certificación del equipo, que incluye una declaración de conformidad, de acuerdo a la ordenanza VDE-AR-N 4110 [13]

Los costos de inversión también incluyen la protección contra ruido, para dar cumplimiento con la normativa de ruido (TA Lärm) [14]. Esto incluye una cápsula de aislamiento acústico, dos silenciadores de escape, desacoplamiento del ruido transmitido por la estructura, así como silenciadores de aire de suministro y escape.

En términos constructivos, existen medidas especiales de construcción, como la existencia de una base de hormigón (desacoplada acústicamente) para el sistema de cogeneración, así como aberturas en la pared y perforaciones en losas o pilares estructurales. En sistemas más grandes, de hasta 2 MW se incluye una parte (un tercio) de los costos relacionados a la extensión del edificio para la sala de máquinas.

En los costos de transporte y montaje, se considera el llenado y puesta en marcha del equipo, además de los costos asociados al combustible requerido y para la realización de las conexiones (electro técnico). Para sistemas mayores a 5 kW se considera un medidor ultrasónico para el calor, un medidor de gas y un medidor de electricidad. Además, se considera una alarma de humo y CO (monóxido de carbono). Para sistemas por sobre 500 kW también se tiene en cuenta la conexión de estos elementos al sistema central de alarma contra incendio, incluido el sistema de advertencia de gas.

Para evitar la operación intermitente se considera en los costos de inversión un acumulador de calor aislado y líneas de conexión, de capacidad de almacenamiento equivalente a 1 hora de operación del equipo.

Los costos de conexión para potencias hasta 100 kW alcanzan cifras cercanas a 40 – 60 % del costo del módulo de cogeneración y en potencias mayores entre 45 – 75 %.

No está considerado en la estimación del costo de inversión, sistemas de adsorción para la generación de frío.

La inversión para las distintas categorías de potencia eléctrica, tienen una dispersión razonable de $\pm 15\%$.

- **Costos fijos de operación:** en esta partida de costos se contabilizan los costos de administración, seguros, costos de servicios de acuerdo a la ordenanza VDI Richtlinie 2067 Hoja 1 [15]. En la medida que lo exija la ley, se incluyen actividades como las mediciones recurrentes de protección de las emisiones, costos de limpieza de la chimenea e informes de expertos relacionados a estas actividades. Además, hay gastos administrativos adicionales como la preparación y presentación de informes de acuerdo a la Ordenanza de Transparencia Fiscal de Energía, el informe del recargo por la Ley de Energías Renovables (EEG), los informes anuales de acuerdo a la Ley de Cogeneración y el registro e informe de precios negativos de la electricidad.

Estos costos son independientes de la operación del sistema de cogeneración y por ello se estiman en euros por potencia al año.

- **Costos variables de operación:** en esta partida de costos se contabilizan los costos de inspección, mantenciones periódicas, tanto las reparaciones como la inspección básica, incluidos todos los materiales y consumibles, como por ejemplo el aceite lubricante. Los costos de mantenimiento se basan en una evaluación de 345 ofertas de servicios, que tienen como alcance los servicios indicados en la ordenanza VDI 4680 [16] de plantas de cogeneración – principios para el diseño de contratos de servicio.

En la estimación de los costos variables, se considera que el mantenimiento y reparaciones corresponden a contratos de servicios. Costos de personal de la empresa no se consideran dentro de los costos de mantenimiento. Los costos por parte del operador de la planta para el control y operación, están incluidos dentro de los costos fijos de operación. Los costos de reacondicionamiento mayor, después de 40.000 hasta 70.000 horas de operación, se tienen incluidos dentro de los costos variables de operación y se estiman en 30 – 35 % del costo del módulo de cogeneración. Por ejemplo, para un sistema de 2 MW se considera un monto de 300.000 Euros neto y para un sistema de 500 kW, 110.000 Euros.

En el caso de módulos compactos, los costos operacionales incluyen todos los elementos suministrados por el proveedor del sistema de cogeneración, lo que incluye los catalizadores.

Costos adicionales para operar un convertidor catalítico SCR se consideran de acuerdo a información facilitada por el fabricante, aunque se supone una compensación parcial del 50% de los costos operativos debido al aumento de la eficiencia eléctrica cuando se opera con menos exceso de aire.

Además, se considera aparte de los costos de mantenimiento y reparación, un costo de 1,5 % de los costos de conexión por año, como se indica en la ordenanza VDI 2067 en la Hoja 1.

En la realidad los costos variables para las plantas de cogeneración, presentan un rango de variabilidad no despreciable, que depende del fabricante, del sistema de cogeneración y de la distancia entre la ubicación del prestador del servicio respecto la ubicación del sistema de cogeneración (tiempo y costo de desplazamiento).

3.3. Evaluación de caso de estudio

Se evalúa la implementación de un sistema de cogeneración, con las distintas tecnologías revisadas, en un casino minero. El foco de esta evaluación es determinar el costo de suministro energético (electricidad y calor) para una operación de 7.000 horas al año del sistema.

En esta evaluación se utiliza la información más actualizada a la que se tuvo acceso durante el desarrollo de este informe.

- **Costo Combustible referido a precios en Chile**

Tabla 7 Costo combustible referencial

Combustible	Costo Referencial			
Gas Natural	0,97	€/m3	0,09	€/kWh
LPG	1,02	€/L	0,17	€/kWh
H2	9,50	€/kg	3,17	€/kWh
pellet	0,23	€/KG	0,048	€/kWh
Diesel	0,39	€/l	0,04	€/kWh

- **Costo de cogeneración en función del combustible utilizado**

Se considera una eficiencia eléctrica del 35% y una eficiencia térmica del 50%

Tabla 8 Costo de Cogeneración en función del combustible

Costos de Cogeneración de acuerdo al combustible	Precio electricidad	Crédito Calor por kWh eléctrico	Precio electricidad al operar 100% cogeneración	
Eficiencia Cogeneración	35,00	%	50,00	%
Gas Natural	0,25	€/kwh	0,13	€/kwh
LPG	0,48	€/kwh	0,24	€/kwh
H2	9,06	€/kwh	4,53	€/kwh
pellet	0,14	€/kwh	0,07	€/kwh
Diesel	0,11	€/kwh	0,06	€/kwh

Para el caso de las celdas combustibles, se considera una eficiencia eléctrica del 60% y una eficiencia térmica del 25%

Tabla 9 Costo de cogeneración celdas combustible, para gas natural y H2

Costos de Cogeneración de acuerdo al combustible	Precio electricidad		Crédito Calor por kWh-eléctrico	Precio electricidad al operar 100% cogeneración	
Celda combustible	60,00	%	25,00	%	
Gas Natural	0,15	€/kwh	0,04	€/kwh	0,11 €/kwh
H2	5,29	€/kwh	1,32	€/kwh	3,96 €/kwh

Tabla 10 Costos de inversión y mantenimiento para tecnologías de cogeneración

Costos Equipo Cogeneración	Inversión		Mantenimiento	
Cogeneración a gas natural - LPG	900	€/kWel	0,80	ct/kWel
Cogeneración a hidrógeno	2.000	€/kWel	0,95	ct/kWel
Celda combustible	4.000	€/kWel	1,50	ct/kWel
Gas de madera	3.000	€/kWel	2,00	ct/kWel

- Costo Operación horaria

Tabla 11 Costo de operación horaria para sistema de cogeneración

Sistema para Casino Minería - Aislado de la red	150 kW					
	Costo electricidad horario	Costo electricidad con cogeneración	Costo equipo	Mantenimiento por hora de operación	Costo operacional total a plena carga	
Gas Natural	37,79 €/h	18,90 €/h	135.000 €	1,20 €/h	20,10 €/h	
LPG	71,43 €/h	35,71 €/h	135.000 €	1,20 €/h	36,91 €/h	
H2	1359,41 €/h	679,70 €/h	300.000 €	1,43 €/h	681,13 €/h	
pellet	20,54 €/h	10,27 €/h	450.000 €	3,00 €/h	13,27 €/h	
Diesel	17,06 €/h	8,53 €/h	135.000 €	1,20 €/h	9,73 €/h	
Celda combustible CH4	22,05 €/h	16,53 €/h	151.169 €	0,57 €/h	17,10 €/h	
Celda combustible H2	792,99 €/h	594,74 €/h	285.714 €	1,07 €/h	595,81 €/h	

- Resultados Evaluación Económica

Los resultados muestran que los sistemas de cogeneración más económicos corresponden a los sistemas diesel, gas de madera (pellet), gas natural y cogeneración con celda combustible operada con gas natural.

La operación con suministro directo de hidrógeno es más alta, dado el costo del hidrógeno. Considerando la expectativa de Chile para un precio del hidrógeno a 2 Euro/kg, las alternativas de cogeneración con motor a H₂ y celda combustible a H₂, el costo total queda en 1,0 Euro por kW-el y 0,9 Euro por kW-el, respectivamente.

Tabla 12 Resultados evaluación del costo de cogeneración

Evaluación Económica						
Costos anuales de cogeneración (por año de operación)	Depreciación		Costos Operacionales		Costo Total por kWel	
Cogeneración a gas natural	15.750	€	140.673	€	0,15	€
Cogeneración a gas LPG	15.750	€	258.400	€	0,26	€
Cogeneración motor H2	35.000	€	4.767.905	€	4,57	€
Cogeneración Gas de madera	52.500	€	92.875	€	0,14	€
Cogeneración con Diesel	15.750	€	68.094	€	0,08	€
Cogeneración con Celda combustible CH4	70.000	€	119.707	€	0,18	€
Cogeneración con Celda combustible H2	13.227	€	4.170.689	€	3,98	€

Nota: la evaluación se centra exclusivamente en los costos asociados a la tecnología y no considera otros costos como el transporte, ubicación remota, costo de combustible en zona remota.

Considerando los costos actuales de la tecnología de celda combustible operada con H₂, para que el costo de cogeneración se equipare al de cogeneración con LPG, el combustible H₂ debe ubicarse en 0,5 Euros por kg.

Las expectativas actuales para el precio del H₂ en Chile, se sitúan en el largo plazo en torno a los 2 Euros por kg. En este escenario, se requiere además que la industria alcance pronto el nivel de madurez para que las economías de escala de la fabricación de los equipos, se vean reflejadas en una disminución del precio de compra de los equipos de cogeneración.

6. Experiencias en la utilización de la cogeneración

De la revisión de experiencias de utilización de la cogeneración vistas en este informe, centradas en Alemania, Austria y Suiza, se contextualizarán a experiencias útiles para la realidad en Chile.

Las principales características de las tecnologías analizadas se resumen en forma comparativa en la Tabla 13.

Tabla 13 Resumen comparativo de las tecnologías de cogeneración

- ★ CC: Celda combustible a hidrógeno
- ★ MC: Motor de combustión a gas de biomasa

Concepto	Bajo	Medio	Alto	
1 Tamaño equipo cogeneración	★	★	★	CC típicas bajo 10 kW la unidad
2 Costo inversión	★	★	★	CC no es una tecnología madura; conexión a red de gas
3 Costo de mantenimiento	★	★	★	MC requiere mayor mantenimiento (biogas)
4 Costo de operación	★	★	★	H2 más caro que biomasa
5 Costo combustible	████████	████	████	CC con gas natural o H2; MC con biomasa o pellet
6 Utilización en vivienda	★	★	★	MC requiere espacio para almacenamiento biomasa
7 Adecuado para micro-cogeneración (0,3 - 5 KW)	★	★	★	MC es para potencias más altas
8 Aporta flexibilidad a la red eléctrica	★	★	★	CC tiene alta capacidad para modificar mezcla H2/aire y con ello potencia eléctrica
9 Facilidad en la operación	★	★	★	CC opera de forma automática todo el año; MC requiere tratamiento de biomasa y mayor mantenimiento
10 Complejidad tecnológica	★	★	★	MC la tecnología se basa en un motor a gas y en el gasificador; CC es de mayor tecnología
11 Temperatura operación	████████	████	████	Hay CC de alta y baja temperaratura
12 Generación de CO2	★	★	★	MC con biomasa es CO2 neutral
13 Emisiones sólidos	★	★	★	MC emite cenizas
14 Posibilidad utilizar variedad de materias primas	★	★	★	MC puede acceder a distintos tipos de biomasa
15 Manejo de residuos	★	★	★	MC la biomasa y gas de madera tiene muchos componentes
16 Acondicionamiento del combustible	★	★	★	MC la biomasa debe alcanzar contenido de humedad (<20%)
17 Frecuencia de mantenimiento	★	★	★	MC cada 500 - 800 horas operación; CC 1 vez al año
18 Nivel de ruido en la operación	★	★	★	MC requiere de silenciadores en el ducto de los gases de escape
19 Madurez de la tecnología	★	★	★	CC en fase de pilotaje e I+D; MC tecnología madura
20 Existencia de canales de comercialización	★	★	★	CC canales de comercialización en desarrollo
21 Número de fabricantes	★	★	★	CC fabricantes tecnológicos a nivel piloto e I+D
22 Actividad de I+D	★	★	★	MC enfocado en problema del alquitrán
23 Incentivos al I+D	★	★	★	MC principalmente remoción alquitrán; CC reducir uso metales preciosos (tecnología)
24 Subvención a la inversión	★	★	★	CC puede utilizar subvención del KFW
25 Subsidio a la electricidad generada	★	★	★	La Ley no diferencia por tecnología
26 Subsidio al calor generado	★	★	★	No hay; En Suiza los apoyos son a la generación térmica

En Chile, en generación eléctrica con potencias hasta los 2 MW, existen tres alternativas para vender la electricidad a la red, como alternativa al autoconsumo.

- Hasta potencias de 300 kW existe la opción de vender los excedentes de electricidad bajo la Ley de Netmetering (Ley 20.571) [17].
- Para potencias de 100 kW hasta 2 MW (límite de potencia considerado en este informe), existen dos alternativas de vender la electricidad como un Pequeño Medio de Generación Distribuido (PMGD) o como Pequeño medio de Generación (PMG) [18]. En el caso de los PMGD la conexión se realiza en sistemas de distribución en 12 o 23 kV, mientras que los PMG en redes de distribución de 23 kV o más.

4.1. Contexto para proyectos de cogeneración con celdas combustibles en Chile

En el contexto de la revisión de la tecnología de cogeneración de celdas combustibles, esta es la tecnología se presenta como una alternativa muy flexible y confiable para el futuro del desarrollo de la red eléctrica en la transición energética hacia la carbono neutralidad al 2050. La tecnología está altamente digitalizada, puede operar en modo “on demand” y ajustarse remotamente a los requerimientos eléctricos de la red y en pequeñas potencias, es adecuada para el suministro de calor desde tamaños de viviendas individuales.

La condición actual del mercado del H₂ en Chile es incipiente y se requiere del desarrollo de la industria del H₂ a nivel de producción y desarrollo de la infraestructura de transporte y distribución. Es de esperar que el costo del H₂ sea superior al del gas natural o biogás, por lo que cualquier solución de cogeneración con celda combustible debiera considerar la operación con gas natural o gas licuado de petróleo.

Una característica diferenciadora entre las tecnologías analizadas es que los equipos de celda combustible debieran ser una solución mucho más estándar para todo el país y queda supeditada a la calidad del gas que se utilice en su operación.

La tecnología de celda combustible por el momento no se ha masificado, por lo que los costos de inversión son altos aún, y se espera que a contar del año 2021 en el mercado europeo se alcance el grado de madurez, comenzando recién a verse los impactos de las economías de escala en el precio final de los sistemas.

A pesar de lo costoso de la tecnología, esta es muy apropiada con los lineamientos de carbono neutralidad que persigue Chile para el año 2050 y se presenta como una alternativa a tener presente, dado su impacto a nivel residencial y empresas de menor tamaño.

Referencias

- [1] KfW. [Online]. Available: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-\(433\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-(433)/).
- [2] „Programa KfW,“ [Online]. Available: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-\(433\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-(433)/).
- [3] „Listado expertos energéticos,“ [Online]. Available: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-\(433\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-(433)/).
- [4] „Productos financieros para la cogeneración del KfW (1/4),“ [Online]. Available: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilien/Finanzierungsangebote/Energieeffizient-Sanieren-Kredit-\(151-152\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilien/Finanzierungsangebote/Energieeffizient-Sanieren-Kredit-(151-152)/).
- [5] „Productos financieros para la cogeneración del KfW (2/4),“ [Online]. Available: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-\(153\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-(153)/).
- [6] „Productos financieros para la cogeneración del KfW (3/4),“ [Online]. Available: <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/EE-Bauen-und-Sanieren-Unternehmen-276-277-278/>.
- [7] „Productos financieros para la cogeneración del KfW (4/4),“ [Online]. Available: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Unternehmen/Kommunale-Geb%C3%A4ude/Energieeffizient-Sanieren-kommunale-Unternehmen-\(220-219\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Unternehmen/Kommunale-Geb%C3%A4ude/Energieeffizient-Sanieren-kommunale-Unternehmen-(220-219)/).
- [8] „Proyecto ENE.FIELD,“ [Online]. Available: <http://enefield.eu/>.
- [9] „Informe resumen proyecto ENE.FIELD,“ [Online]. Available: <http://enefield.eu/wp-content/uploads/2017/10/ene.field-Summary-Report.pdf>.
- [10] „Proyecto Callux,“ [Online]. Available: <http://www.callux.net/>.
- [11] „Proyecto PACE,“ [Online]. Available: <http://www.pace-energy.eu/>.
- [12] „Informe Kompetenzatlas Wasserstoff,“ [Online]. Available: https://www.helmholtz.de/fileadmin/user_upload/01_forschung/01_Energie/Wasserstoffatlas_Mai2020.pdf.
- [13] „Ordenanza VDE-AR-N-4110: La ordenanza regula técnicamente la conexión eléctrica en medio voltaje,“ [Online]. Available: <https://www.vde.com/en/fnn/topics/technical-connection-rules/tcr-for-medium-voltage>.
- [14] „Ordenanza técnica de ruido,“ [Online]. Available: <https://www.juraforum.de/lexikon/geraeuschimmissionen#bundesimmissionsschutzgesetz-laerm>.
- [15] „VDI Richtlinie 2067,“ [Online]. Available: https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/richtlinien/inhaltsverzeichnisse/2768779.pdf.
- [16] „VDI 4680,“ [Online]. Available: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4680-blockheizkraftwerke-bhkw-grundsaezze-fuer-die-gestaltung-von-servicevertraegen>.
- [17] „Ley 20.571,“ [Online]. Available: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1038211&buscar=20571>.
- [18] „Decreto Supremo que define los PMGD y PMG,“ [Online]. Available: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1079055>.

- [19] „Cuarto Informe de Avance de Abril 2019,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/publications/4th-state-energy-union_en.
- [20] „Energía limpia para todos los europeos,“ [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/clean-energy-all-europeans>.
- [21] „Estrategia de la Unión Energética: COM/2015/080,“ [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2015:80:FIN>.
- [22] „Un planeta limpio para todos,“ [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/TXT/?uri=CELEX%3A52018DC0773>.
- [23] „Plan Nacional de Energía y Clima,“ [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/national-energy-climate-plans>.
- [24] „EU Effort Sharing Decision (ESD),“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/effort/implementation_en.
- [25] „Tarifas eléctrica distribuidora ENEL Distribución,“ [Online]. Available: <https://www.enel.cl/content/dam/enel-cl/es/personas/informacion-de-utilidad/tarifas-y-reglamentos/tarifas/tarifas-vigentes/Tarifas%20Suministros%20Clientes%20Regulados%20Julio%202020.pdf>.
- [26] „Plan de Acción Climático 2050, Alemania,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/sites/its/its_de_en.pdf.
- [27] „Esquema de transacciones de emisiones,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en.
- [28] „Estándar energético de edificaciones (EnEG),“ [Online]. Available: <http://www.gesetze-im-internet.de/eneg/EnEG.pdf>.
- [29] „Ordenanza de ahorro energético (EnEV),“ [Online]. Available: http://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/EnEV.pdf.
- [30] „Ley de Cogeneración - Fomento,“ [Online]. Available: https://asue.de/sites/default/files/asue/aktuelles_presse/2020/NL_07-20/20200708_ASUE-Neues-KWKG.pdf.
- [31] „Informe Evaluación de la Cogeneración,“ [Online]. Available: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/evaluierung-der-kraft-waerme-kopplung.pdf?__blob=publicationFile&v=6.
- [32] „Ley Energías Renovables (EEG 2017),“ [Online]. Available: http://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf.
- [33] „Subvención a la cogeneración en Austria,“ [Online]. Available: https://www.oem-ag.at/fileadmin/user_upload/Dokumente/gesetze/FRL_2020_KWKW_MWK_KWK.pdf.
- [34] „Ley de Cogeneración de Austria,“ [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20005916>.
- [35] „Tarifas eléctrica reguladas en Austria,“ [Online]. Available: https://www.oem-ag.at/fileadmin/user_upload/Dokumente/gesetze/Oekostrom-EinspeisetarifVO_2018.pdf.
- [36] „Incentivos para la cogeneración en Suiza,“ [Online]. Available: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/energieeffizienz/waerme-kraft-kopplung-wkk.html>.
- [37] „Regulación TA Luft,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/reduction_napcp/DE_Final_EN_w_cover.pdf.
- [38] „Estructura precio electricidad para el consumidor final,“ [Online]. Available: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/so-setzt-sich-der-strompreis-zusammen-268122>.

