DISEÑO DE UN MODELO DE GESTIÓN ENERGÉTICA ENFOCADO AL SECTOR INDUSTRIAL BASADO EN ECUACIONES ESTRUCTURALES

Nicolas Stivens Ruiz Albarracin

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá, Colombia
2023

DISEÑO DE UN MODELO DE GESTIÓN ENERGÉTICA ENFOCADO AL SECTOR INDUSTRIAL BASADO EN ECUACIONES ESTRUCTURALES

Nicolas Stivens Ruiz Albarracin

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Electrónico

Director:
José Luis Paternina Duran
Codirector:
Edwin Francisco Forero García

Modelado-Electrónica-Monitoreo (MEM)
Línea de Investigación: Energías
Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá, Colombia
2023

Autoridades de la universidad

RECTOR GENERAL

R.P. FRAY ÁLVARO JOSÉ ARANGO RESTREPO, O.P

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL

R.P. FRAY LUIS FRANCISCO SASTOQUE POVEDA, O.P.

VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL

R.P. FRAY EDUARDO GONZALEZ GIL, O.P.

SECRETARIO GENERAL

Dra. INGRID LORENA CAMPOS VARGAS

DECANO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

FRAY JAVIER ANTONIO HINCAPIÉ ARDILA, O.P.

SECRETARIA DE DIVISIÓN

E.C. LUZ PATRICIA ROCHA CAICEDO

DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ING.CARLOS ANDRÉS TORRES PINZÓN

Nota de aceptación

Firma del tutor

Firma del jurado

Firma del jurado

BOGOTÁ D.C. _____ DE 2023

ADVERTENCIA

La Universidad Santo Tomás no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados en el trabajo de grado, solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no tenga ataques personales y únicamente se vea el anhelo de buscar la verdad científica.

Capítulo III –Art. 46 del Reglamento de la Universidad Santo Tomás.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo de grado a mis padres, Julia y Silvino, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. A mi madre, quiero agradecerle por su constante aliento y confianza en mí. Su amor incondicional y su apoyo han sido mi fuerza motivadora para enfrentar cada desafío y superar obstáculos.

A mi padre, quiero expresar mi profunda gratitud por sus enseñanzas, sus sabios consejos y por ser mi mayor inspiración. Su dedicación, esfuerzo y perseverancia me han mostrado el valor del trabajo arduo y la importancia de perseguir mis metas con determinación.

Ambos han sido un ejemplo de valentía, sacrificio y amor incondicional. A través de su ejemplo, he aprendido a nunca rendirme y a siempre esforzarme por alcanzar mis sueños. Sin su amor, apoyo y orientación, no estaría donde estoy hoy.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por guiarme y darme la oportunidad de crecer tanto profesional como personalmente a lo largo de estos años. Cada día ha sido un regalo, lleno de nuevas lecciones y descubrimientos que me han enriquecido.

Agradezco a mi familia, en especial a mis hermanas mayores, por su apoyo incondicional a lo largo de mi trayectoria. Han sido mi guía, alentándome a alcanzar todos mis sueños y a esforzarme cada día para ser la mejor versión de mí mismo.

Agradezco a la fundación Inalta por otorgarme la oportunidad de ser parte de su programa de becas. Gracias a su generosidad y apoyo, he podido convertir mi sueño de estudiar ingeniería electrónica en una realidad.

Agradezco a mis directores por su invaluable contribución y apoyo en la elaboración de este proyecto. Su conocimiento, experiencia y orientación han sido fundamentales para el desarrollo y éxito de este trabajo.

Contenido

Resumen ..... **X**
Abstract ..... **XI**
Lista de Figuras ..... **XII**
Lista de Tablas ..... **XIII**
Glosario ..... **XIV**
1. Introducción. **1**
1.1. Planteamiento del Problema 1
1.2. Objetivos 3
1.2.1. Objetivo General 3
1.2.2. Objetivos Específicos 3
1.3. Justificación 4
1.4. Impacto Social 4
2. Estado del Arte **5**
2.1. Gestión Energética con Power-to-X 5
2.2. Modelado de sistemas en entornos industriales 7
2.3. Ecuaciones estructurales como técnica de modelado 7
3. Marco Teórico **8**
3.1. Fundamentos de modelado de ecuaciones estructurales (SEM) 8
3.1.1. Variables observables y variables latentes 8
3.1.2. Técnica de mínimos cuadrados parciales en modelado de ecuaciones estructurales (PLS-SEM) 10
3.1.3. Algoritmo PLS 15
3.1.4. Software SmartPLS 4 16
3.2. Principios de la gestión energética Power-to-X 17
3.2.1. Sistemas de gestión energética basados en hidrogeno 18
3.2.2. Celdas de electrolisis tipo PEM 19
3.2.3. Pilas de combustible PEM 21
4. Diseño Metodológico **23**
4.1. Fases y Metodología 23
4.1.1. Revisión Bibliográfica y desarrollo de ejemplos sobre ecuaciones estructurales 23

4.1.2. Búsqueda de información e identificación de variables de la gestión energética de una industria para construcción de un modelo basado en ecuaciones estructurales 23
4.1.3. Definir y modelar una industria 24
4.1.4. Poner aprueba el modelo realizado 24
4.2. Cronograma 24
5. Desarrollo Conceptual 25
5.1. Construcción modelo sistema Power-to-Hydrogen 25
5.2. Construcción modelo sistema Hydrogen-to-Power 30
5.3. Construcción modelo de gestión energética en una industria 34
6. Resultados y Discusión 37
6.1. Industria sin sistema de gestión energética 37
6.2. Industria con sistema de gestión Power-to-H 38
6.3. Industria con sistema de gestión Power-to-H-to-Power 39
7. Conclusiones y Trabajos futuros 40
7.1. Conclusiones 40
7.2. Trabajos futuros 41
8. Anexos 41
8.1. Anexo 1 datos sistema electrolizador 41
8.2. Anexo 2 datos sistema pila de combustión 43
8.3. Anexo 3 Datos generación y consumo industria 45
9. Referencias Bibliográficas 45

Resumen

Contexto:
La actividad industrial genera una gran cantidad de energía y es una fuente significativa de emisiones de efecto invernadero tanto a nivel mundial como nacional, por lo que es necesario implementar estrategias de gestión energética efectivas.

Método:
El objetivo de este proyecto es desarrollar un modelo de gestión energética para el sector industrial utilizando tecnologías Power-to-x que transforman la energía eléctrica en energía química para su uso en la industria. Este modelo se basará en ecuaciones estructurales.

Resultados:
La técnica empleada permite identificar las principales fuentes de consumo de energía de la industria y analizar las variables que las afectan. Para desarrollar un modelo de ecuaciones estructurales y evaluar el impacto de la gestión energética propuesta en el aprovechamiento de fuentes renovables y las emisiones de gases de efecto invernadero, se recopilaron datos sobre el consumo de energía de una empresa del sector industrial.

Conclusiones:
La reducción del consumo de energía de la red convencional, lo que contribuye a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, es uno de los beneficios destacados. Además, el uso del modelo de gestión energética aumenta la eficiencia y la competitividad de las industrias al disminuir los costos operativos.

La técnica Power-to-X en el modelo fomenta el acople sectorial y la utilización de residuos y subproductos como fuentes primarias de energía, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y promoviendo la sostenibilidad. Esto permite una gestión más eficiente y sostenible de la energía en el sector industrial.

Palabras clave: SEM, PLS-SEM, Modelado, Power-to-X, Power-to-H, H-to-Power

Abstract

Context:
Industrial activity generates a large amount of energy and is a significant source of greenhouse emissions both globally and nationally, so effective energy management strategies need to be implemented.

Method:
The aim of this project is to develop an energy management model for the industrial sector using Power-to-x technologies that transform electricity into chemical energy for industrial use. This model will be based on structural equations.

Results:
The technique used enables the main sources' identification of energy consumption in the industry and analyze the variables that affect them. To develop a model of structural equations and evaluate the impact of the proposed energy management on the utilization of renewable sources and greenhouse gas emissions, data on the energy consumption of an industrial company was collected.

Conclusions:
Reducing conventional grid energy consumption, which contributes to the reduction of greenhouse gas emissions, is one of the outstanding benefits. In addition, the use of the energy management model increases the efficiency and competitiveness of industries by decreasing operating costs.

The Power-to-X technique in the model encourages sectoral coating and the use of waste and by-products as primary energy sources, reducing reliance on fossil fuels and promoting sustainability. This enables more efficient and sustainable energy management in the industrial sector.

Keywords: SEM, PLS-SEM, Modeling, Power-to-X, Power-to-H, H-to-Power, H-to-Power

Lista de Figuras

Figura 3.0. Símbolo variable observable 9
Figura 3.1. Símbolo variable latente. 9
Figura 3.2. Símbolo relación directa entre variables. 9
Figura 3.3. Símbolo correlación entre variables 10
Figura 3.4. Ejemplo simbología sistema causa-efecto. 10
Figura 3.5. Modelos de medida 11
Tabla 3.5. Clasificación del hidrogeno por colores. 18
Figura 3.6. Etapas para la producción de hidrogeno verde 19
Figura 3.7. Proceso de electrolización celda PEM. 20
Figura 3.8. Proceso de pilas de combustible tipo PEM 21
Figura 4.0. Metodología propuesta. 23
Figura 4.1. Cronograma de actividades 24
Figura 5.0. Especificación modelo estructural P2H 25
Figura 5.1. Sistema electrolizador para toma de datos 26
Figura 5.2. Estimación del modelo P2H 26
Tabla *5.1*. Evaluación modelo de *medida sistema P2H.* 27
Tabla 5.2. Evaluación modelo del modelo estructural sistema P2H 28
Figura 5.2. Trayectoria potencia y agua 29
Figura 5.3. Trayectoria potencia, agua e hidrogeno. 29
Figura 5.4. Especificación modelo estructural H2P 30
Figura 5.5. Sistema pila de combustible con PEM para toma de datos 31
Figura 5.6. Estimación del modelo H2P 31
Tabla *5.3*. Evaluación modelo de *medida sistema H2P.* 32
Tabla 5.4. Evaluación modelo del modelo estructural sistema H2P 32
Figura 5.7. Trayectoria hidrogeno y potencia. 34
Figura 5.8. Caracterización de consumo y generación de la industria. 35
Figura 5.9. Consumo, generación y excedentes de la industria en Matlab. 36
Figura 5.10. Modelo de gestión energética. 37
Figura 6.0. Proceso de producción de hidrogeno y consumo de agua. 38
Figura 6.1. Resultado sistema P2H2P. 40

Lista de Tablas

Tabla 3.*1*. Tamaños de muestra sugeridos 122
Tabla 3.2. Evaluación de modelos de medida formativos 12
Tabla 3.3. Evaluación del modelo estructural 13
Tabla 3.4. El algoritmo PLS para el método básico de análisis LVP 15
Tabla 3.5. Clasificación del hidrogeno por colores 18
Tabla *5.1*. Evaluación modelo de *medida sistema P2H* 27
Tabla 5.2. Evaluación modelo del modelo estructural sistema P2H 28
Tabla *5.3*. Evaluación modelo de *medida sistema H2P* 322
Tabla 5.4. Evaluación modelo del modelo estructural sistema H2P 322

Glosario

Gases de efecto invernadero (GEI): Son sustancias presentes en la atmósfera como el metano (CH4) y el dióxido de carbono (CO2), que atrapan el calor del sol y contribuyen al calentamiento global.

Fuentes de Energía Renovable No Convencionales (FERNC): Son fuentes de energía sostenibles que no dependen de combustibles fósiles, como la energía solar, eólica, geotérmica y la biomasa.

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG): es el organismo encargado de supervisar y regular el sector energético y de gas en Colombia.

POWER-TO-X (P2X): Una serie de tecnologías utilizadas para convertir la energía eléctrica en otras formas de energía, como hidrógeno, metano o productos químicos.

Power-to-Gas (P2G): La conversión de energía eléctrica en gas, como hidrógeno o metano, para su almacenamiento o uso posterior se conoce como conversión de energía a gas.

Power-to-Hydrogen (P2H): Proceso de conversión de energía eléctrica en hidrógeno para su almacenamiento o uso posterior.

Power-to-Gas-to-Power (P2G2P): Proceso en el que se convierte la energía eléctrica en gas, se almacena y luego se vuelve a convertir en electricidad cuando sea necesario.

Power-to-Methane (P2M): Proceso de producción de metano a partir de energía eléctrica, generalmente utilizando dióxido de carbono (CO2) y hidrógeno (H2).

Hydrogen-to-Power (H2P): Proceso de generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno, a menudo mediante una celda de combustible.

Power-to-Hydrogen-to-Power (P2H2P): Sistema que convierte la energía eléctrica en hidrógeno, lo almacena y luego lo convierte nuevamente en electricidad cuando sea necesario.

Power-to-Chemicals (P2C): Proceso de transformación de energía eléctrica en productos químicos a través de reacciones químicas controladas.

Modelado de ecuaciones estructurales (por sus siglas en inglés SEM): Método estadístico utilizado para analizar las relaciones entre variables observables y latentes en un modelo.

Mínimos cuadrados parciales (por sus siglas en inglés PLS): Algoritmo utilizado en el modelado de ecuaciones estructurales para estimar las relaciones entre variables.

Modelado de ecuaciones estructurales con mínimos cuadrados parciales (por sus siglas en inglés PLS-SEM): Técnica que combina el modelado de ecuaciones estructurales y el algoritmo PLS para analizar relaciones complejas en datos.

Modelación de ecuaciones estructurales de covarianza (por sus siglas en inglés CB-SEM): Método de modelado estadístico utilizado para analizar la covarianza entre variables en un modelo.

El factor de inflación de la varianza (por sus siglas en inglés VIF): Medida utilizada para evaluar la multicolinealidad en un modelo, es decir, la correlación alta entre las variables predictoras.

1. Introducción.

1.1. Planteamiento del Problema

El cambio climático es una consecuencia directa de la producción descontrolada de Dióxido de Carbono CO2 por parte de la humanidad. La presencia de este compuesto junto con otros gases conforma el grupo de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales hacen que la temperatura del planeta aumente por la captura de radiación infrarroja proveniente del sol y reflejada por la superficie terrestre. Este fenómeno es nombrado efecto invernadero, el cual es tratado como una problemática en los acuerdos de París de 2015 en donde se marcó la meta de mantener el aumento de la temperatura promedio de la superficie en 2°C para el año 2050 [1]. Si bien el efecto invernadero es un proceso natural y permite regular la temperatura promedio en la tierra para facilitar la vida entre otros beneficios, el aumento desbordado de las emisiones de CO2 permiten pronosticar que, si no se toman medidas respecto a la producción de dichos gases, la temperatura promedio de la superficie puede llegar a aumentar aproximadamente 4°C para el año 2050, provocando grandes afectaciones a la vida tal cual como se conoce.

Existen distintos sectores que generan gases de efecto invernadero. Entre los más relevantes se encuentra la producción energética con un 77.01% de las emisiones en el mundo, seguido por el sector industrial, agricultura y gestión de residuos (que generan un 9.10%, 10.55% y 3.32% respectivamente) [2]. Tal como se observa, es notable el predominio del sector energético, lo cual indica que este sector es el principal responsable de los niveles de contaminación. Sin embargo, este sector es fundamental en la cadena de valor de muchas otras actividades económicas. Por ejemplo, gran parte de la producción energética en el mundo se destina al sector transporte y a su vez, otra porción significativa también se destina al sector industrial, teniendo en este agente un actor relevante para la contribución de las metas de descarbonización.

Por ejemplo, en el contexto nacional la industria aporta un 11% de las emisiones en Colombia [3] y consume el 26.39% de la energía producida [4], lo cual reafirma que con este sector se pueden generar soluciones y metodologías que aporten significativamente a la disminución de la huella de carbono y contribuyan a la consecución de las metas de descarbonización.

Desde el Ministerio de ambiente de Colombia se busca desarrollar planes de acción sectorial que aporten a la meta de la reducción de un 51% de emisiones de GEI para el año 2030 (mediante la ley 2169 de 2022), para así alcanzar la carbono neutralidad a 2050 (de acuerdo con los acuerdos de París de 2015). Así mismo, se busca establecer presupuestos de carbono para el periodo 2020-2030 a más tardar en 2023, reducir las emisiones de carbono negro en un 40% respecto a 2014 (lo que representa una máxima de carbono negro de 9.195 toneladas en 2030 excluyendo incendios forestales), reducir la deforestación neta de bosque natural a 0 hectáreas/año a 2030 (a partir de la implementación tanto de herramientas de

política, como de medidas cooperativas y de mercado), además de implementar a 2030 estrategias, acciones o proyectos de adaptación al cambio climático en el 10% de las empresas de todos los tamaños [5].

Sin embargo, diferentes autores como [6] han manifestado que el cumplimiento de las metas de descarbonización están fuertemente ligadas a un esfuerzo conjunto entre diferentes sectores, bajo el denominado “Acople Sectorial”.

Este nuevo paradigma busca que diferentes vectores energéticos (como gas, hidrógeno, calor, etc.) se integren con la electricidad, considerando un contexto donde existan energías renovables para la producción de energía eléctrica y sea necesario gestionar sus excedentes con la ayuda de otro vector energético. Considerando lo anterior (que la fuente energética primaria son los excedentes de electricidad provenientes de renovables), este modelo recibe el nombre de *Power – To – X* [7].

A grandes rasgos este sistema consiste en aprovechar los excedentes de energías renovables para convertirlos (por ejemplo) en gas sintético. Para ilustrarlo mejor, se puede emplear el principio de la electrólisis para aprovechar los excedentes energéticos de fuentes renovables y así producir Hidrógeno verde. Finalmente, este Hidrógeno puede combinarse con alguna fuente de CO2 con el fin de producir metano (el cual puede ser utilizado para procesos industriales o para sistemas de cogeneración) [7].

Estas y otras medidas buscan apoyar sistemas de unificación sectorial fomentando entre otras cosas, la producción de subproductos, (por ejemplo, para una industria cualquiera su subproducto podría ser el gas sintético generado mediante un sistema *Power-to-Gas*).

Siendo el sector industria el segundo mayor demandante de energía y la producción de energía el factor más contaminante, es lógico que si se busca una reducción de las emisiones de los GEI se debe crear un cambio en la generación de la energía utilizada en las industrias. De esta manera nace la ley 1715 del año 2014 que tiene como objetivos diversificar el sistema energético actual, invertir en tecnologías que permitan la diversificación de la matriz energética nacional, reducir el impacto ambiental y fomentar la economía [8]. Para ello, se proponen una serie de incentivos tributarios que están dirigidos a personas naturales y jurídicas, para impulsar la inversión en Fuentes de Energía Renovable No Convencionales (FERNC). Evidentemente, serán las industrias quienes mayor rédito podrán obtener de estos beneficios, ya que cuentan con la infraestructura y recursos necesarios para el montaje de sistema de autogeneración, con los cuales podrían sustentar sus necesidades energéticas a partir de fuentes renovables. Sin embargo, estos sistemas de autogeneración (por ejemplo, un sistema fotovoltaico interconectado a la red) tienen problemas en la relación de oferta y demanda pues los momentos de generación máxima no coinciden necesariamente con los momentos de mayor consumo. Esta situación provoca la presencia de excedentes energéticos, los cuales representan grandes retos en la operación de los sistemas eléctricos, razón

por la cual se ha tenido especial cuidado con el marco regulatorio, buscando limitar la entrega de estos excedentes a escala de autogeneración (impactando paradójicamente la inversión en FERNC). En este contexto se anexa a la ley 1715 el hidrógeno como vector energético y de almacenamiento (mediante el Decreto 1476 de 2022). Gracias a esta modificación se amplía el panorama de gestión de excedentes energéticos, ya que estos se pueden tratar en su forma eléctrica o emplearse para la producción del llamado hidrógeno verde, el cual también puede emplearse para otras tareas como el transporte o la producción de gas metano. Con esto la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) puede fortalecer y unificar el funcionamiento de los sectores productores de energía y gas, entre muchos otros beneficios [9].

Con lo expuesto anteriormente se muestra que el sector industrial es un actor clave para la consecución de metas relacionadas al carbono neutralidad, pues mediante tecnologías *Power–to–X* podría permitir un acople sectorial para el aprovechamiento de los excedentes de las FERNC y producir Hidrógeno verde (e inclusive, gas metano mediante estrategias de aprovechamiento de sus propias emisiones de CO2).

Para esto, es necesario proponer modelos de la industria mediante los cuales se contemplen aspectos ambientales y multi – energéticos, razón por la cual este trabajo pretende responder a la siguiente pregunta problema:

¿Cómo modelar la operación energética de una industria para la disminución de emisiones mediante el acople sectorial?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Diseñar el modelo de gestión energético de una industria con capacidad de FER instalada para la disminución de las emisiones resultantes de su operación mediante ecuaciones estructurales.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Establecer las principales características asociadas al modelado de Ecuaciones Estructurales con base en una revisión bibliográfica para la construcción de un modelo asociado a la operación de una industria.
- Identificar las variables de interés para el desarrollo de proyectos que permitan la gestión energética (mediante acople sectorial) a nivel industrial con base en el análisis de estudios ya realizados.
- Proponer un modelo basado en Ecuaciones Estructurales que permita la gestión energética en una industria con presencia de FER para la disminución de emisiones.

- Evaluar el modelo propuesto mediante simulación con base en índices normalizados que permitan la cuantificación de las emisiones en una industria

1.3. Justificación

En la actualidad, el mundo atraviesa una carrera contra el cambio climático, encontrando en las energías renovables una herramienta para contrarrestar las consecuencias que ha traído este fenómeno. La industria juega un papel fundamental en la ruta de descarbonización, debido a su consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero producto de sus procesos.

Por ende, es necesario desarrollar proyectos como el actual, donde se busca facilitar la gestión de excedentes energéticos de fuentes de energía renovable (FER) y de CO2 propios del entorno industrial, mediante nuevos mecanismos de acoplamiento (como lo es P2X) para una mayor contribución a la descarbonización de procesos.

Para lograr este objetivo, es necesario el modelado de los procesos de una industria, ya que esto permite realizar pruebas en un entorno digital controlado que conlleva a la posibilidad de realizar estudios sin poner en riesgo máquinas, equipos, capital e incluso personas; permitiendo interactuar con los excedentes energéticos y las emisiones de gases como variables. Esto facilita la gestión de los recursos anteriormente mencionados. La generación de un entorno virtual facilitará la aplicación de sistemas *Power-to-X* para industrias que estén interesadas en implementar tecnologías de acoplamiento sectorial, deseen tener una red de cogeneración o estén interesadas en vender sus excedentes energéticos en forma de gas, entre otras aplicaciones.

1.4. Impacto Social

La electrificación está experimentando un crecimiento acelerado en todo el mundo, lo que aumenta la demanda de recursos naturales y provoca cambios climáticos que afectan a todas las regiones del mundo. La producción descontrolada de gases de efecto invernadero por parte de la generación de energía con combustibles fósiles conlleva efectos adversos como el aumento de la temperatura y la mala calidad del aire, entre otros. Para mitigar el crecimiento de estos problemas, se plantea un plan de transición energética en los Acuerdos de París de 2015, que establece las energías renovables como reemplazo de los combustibles contaminantes.

El sector industrial es uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero, por lo cual se está fomentando el uso de energías renovables para satisfacer las demandas energéticas. Además, es necesario controlar las emisiones de dióxido de carbono, por ejemplo, mediante la implementación de un sistema de

almacenamiento de gas comprimido para este compuesto. El objetivo es utilizar este gas como un vector energético junto con el hidrógeno verde para acoplar los sectores de electricidad y gas. La unión de estos sectores ayudará a reducir la huella de carbono existente, lo cual será beneficioso para el cambio climático y las comunidades afectadas por él.

Este proyecto impulsará a las industrias hacia modelos amigables con el medio ambiente mediante la adquisición de herramientas de simulación basadas en el modelado de sus procesos. Esto les permitirá realizar pruebas en diferentes entornos sin poner en riesgo sus equipos y obtener información para futuras aplicaciones de sistemas *Power-to-X* en sus instalaciones, orientados al desarrollo del acoplamiento sectorial. Con la implementación de estos sistemas, el sector industrial reducirá considerablemente su huella de carbono y contribuirá a los planes propuestos por el Ministerio de Minas y Energía.

2. Estado del Arte

2.1. Gestión Energética con Power-to-X

El almacenamiento de los excedentes en la energía renovable principalmente eólica y fotovoltaica, es un reto relevante en la transición energética por la que atraviesa el mundo para mitigar el cambio climático. Como una posible solución Schmid y Sterner presentan en la 16ª Conferencia Europea de Biomasa los sistemas *Power-to-X* como sistemas de almacenamiento o transformación de la energía, para después en el año 2009 patentar el modelo *Power-To-Gas* implementándolo por primera vez en la industria, gracias a la compañía SolarFuel GmbH. El mayor sistema *Power-to-Gas* construido hasta la fecha consta de una entrada eléctrica de 6MW y es de la propiedad de Audi AG, construido con el fin de suministrar energía a 1.500 vehículos con emisiones de CO2 neutro [7].

Alemania es el país de nacimiento de este sistema y, por ende, es el foco de la producción de estudios y aplicaciones técnicas, debido a que en los últimos años ha tenido crecimiento en sus suministros de energías renovables en su mayoría eólica. Por esto, los autores presentan un artículo titulado “Gestión de la congestión de la red de transmisión alemana a través del acoplamiento de sectores: un enfoque de modelado” en el cual se presenta el sistema *Power-to-Gas* como una gran oportunidad para hacer que la transmisión de energía sea más flexible y confiable en el futuro a partir del uso de la infraestructura de gas de Alemania. Esto a partir de una modelación matemática basado en los cálculos de flujo de carga basados en series de tiempo, que permiten que este modelo pueda estar conectado a la red de gas [10]. Mostrando un proyecto implementable a gran escala dando un panorama favorable a dichas tecnologías para su aplicabilidad en ciudades y/o regiones con redes de gas interconectadas.

En otros países como Italia también estudian y aplican esta alternativa, ya que sus investigaciones arrojan que emplear los sistemas Power-to-Gas permite una disminución de emisiones de CO2 y el acoplamiento de los sectores gas y electricidad. Los autores [11] proponen en su artículo el análisis termodinámico de una planta productora de metanol a partir de CO2 e Hidrogeno. Además, también realizan un estudio económico de este procedimiento, demostrando que el metanol sometido a altas presiones por medio del sistema de compresión, tendrá un rendimiento del 131% lo cual se ve directamente reflejado en una mejora para los costos, ya que aunque el aumentar la presión genera una subida de los costes fijos y variables, la producción de metanol es mayor haciendo que los costes de producción se reduzcan; las presiones que muestran un mejor resultado oscilan entre los 30 bar y los 80 bar. Este articulo aporta en la factibilidad del acople sectorial desde la parte económica ya que sin ella los proyectos solo quedarían en la teoría. Adicionalmente, la modelación del sistema desde el enfoque de la termodinámica conllevó al análisis de la respuesta del sistema con diferentes presiones sin la necesidad de poner en riesgo los equipos.

Hasta este punto es notable que Europa tiene una fuerte apuesta por las tecnologías que permitan el acople sectorial, sin embargo, es pertinente conocer los estudios y aplicaciones de países cercanos al nuestro como por ejemplo Estados Unidos, donde existen propuestas para sistemas de cogeneración *Power-To-Gas-To-Power*, con el fin de fortalecer el almacenamiento de energías renovables, robustecer los proyectos de electrificación y hacer de los modelos de transición energética más rentables, al reducir excedentes energéticos no aprovechados de las fuentes de generación [12]. Asimismo, la parte técnica también tiene estudios para su implementación, como por ejemplo el crecimiento de fuentes de energías renovables basados en inversores variables, este es un sistema prometedor para la futura predominancia de la generación renovable variable, no obstante, de este modelo surgen problemáticas de cómo planificar y operar estos sistemas. En otros trabajos, los autores presentan un estudio respecto a las aplicaciones de *Power-to-X*, analizando su estabilidad y rentabilidad, para tener como resultado modelos para una mejor implementación [13].

Respecto al contexto nacional existe una ruta de descarbonización fomentada por la ley 1715 de 2014, que propone normas e incentivos para la aplicación de sistemas con bajas emisiones de GEI [5]. Además, para el año 2022 se ha publicado el decreto 1476 para la aplicación del hidrogeno como vector energético [9]. Por ende, se tiene un panorama prometedor para la aplicación del acople sectorial en Colombia, donde la mayor cantidad de investigaciones se centran en utilizar *Power-to-X* como sistemas de almacenamiento de energía renovable intermitente como lo son la eólica o la solar fotovoltaica. Un ejemplo de estos avances es el articulo [14], en el cual se plantea que los sistemas *Power-to-X* son implementables en Colombia y serán esenciales en la ruta de la descarbonización, denotando preferencia en los sistemas de generación con biomasa debido a que estas plantas de generación son muy comunes en lugares aislados en donde se aprovechan los residuos de las cosechas como lo es el aceite de palma que tiene una capacidad de almacenamiento de hidrogeno de entre el 3.5% y 6.5% en peso.

2.2. Modelado de sistemas en entornos industriales

Un aspecto importante de los temas tratados hasta este punto es el hecho de que el modelado de las plantas de *Power-to-X* es un tema relevante en la mayoría de las investigaciones, por lo cual es pertinente analizar este aspecto a nivel general, y también es importante llevar a cabo estudios específicos a nivel nacional para comprender mejor su impacto y características dentro de contextos específicos. Para el contexto internacional se tiene un estudio realizado en Croacia en donde se modela la incertidumbre del consumo de una industria alimentada por múltiples fuentes de energía. La modelación se basa en técnicas de optimización robusta y mediante la optimización estocástica se obtiene un 18% de reducción en los gastos energéticos de la industria [15].

Una de las herramientas que posibilitan la construcción de modelos dinámicos es Matlab y su extensión Simulink para sistemas neumáticos, térmicos, mecánicos y eléctricos; en la Universidad de Warwick ponen a prueba esta herramienta al modelar el sistema de almacenamiento adiabático de acumulación de energía por medio del aire comprimido. Este modelo encontró como resultado un sistema simulado con el cual se implementó un algoritmo de control dinámico, que permitió obtener resultados en la simulación que después serán los esperados en la planta física [16].

Es resaltable que la modelación es muy usada para el análisis de sistemas *Power-to-X*, ya que permite analizar los resultados de diferentes sistemas en distintos entornos: y desde el año 2017 es notable el crecimiento de estudios relacionados a esta temática, lo cual marca una ruta desarrollo para la implementación y el mejoramiento de plantas P2G, P2H, P2G2P Y P2X.

2.3. Ecuaciones estructurales como técnica de modelado

Las ecuaciones estructurales como método de modelación (SEM) combinan dos métodos estadísticos: el análisis factorial confirmatorio y el análisis de ruta. El primero tiene su origen en la psicometría ya que permite estimar rasgos psicológicos latentes como la satisfacción o la actitud. Por otro lado, el análisis de ruta tiene como base la biometría debido a que tiene como objetivo encontrar la relación causal entre las variables mediante la creación de un diagrama de ruta (técnica utilizada para cuantificar la interacción entre múltiples variables) [17].

Esta técnica de modelación se puede aplicar en diferentes campos del conocimiento. Por ejemplo, en el área de la ecología el autor [18] plantea un sistema de ecuaciones estructurales para modelar un ecosistema compuesto por humedales afectados por distintas variables como: los cambios climáticos, propiedades del suelo, el terreno y las acciones humanas; el realizar un modelo basado en SEM permitió a los autores conocer los comportamientos del ecosistema ante diferentes estímulos (variables del modelo).

En la gestión energética no es muy común encontrar modelos basados en ecuaciones estructurales, sin embargo, es totalmente aplicable en esta área. Por ejemplo, otro trabajo plantea el uso de las ecuaciones estructurales para construir un modelo de medición en una planta de energía en Irak. Este modelo se usaría junto con la inteligencia artificial para mejorar el rendimiento de las centrales eléctricas en el mundo [19].

3. Marco Teórico

3.1. Fundamentos de modelado de ecuaciones estructurales (SEM)

El modelado de ecuaciones estructurales es una técnica matemática que se utiliza para representar, caracterizar y probar un sistema de variables medidas y estimar variables latentes. Su principal objetivo es permitir la abstracción de variables de un sistema físico para predecir y simular su comportamiento. En otras palabras, se busca obtener un modelo matemático que sea dinámico y que permita entender la relación causa-efecto entre las variables latentes y observables del sistema o del estudio.

La principal característica del modelado de ecuaciones estructurales es su capacidad para analizar el comportamiento de sistemas complejos y predecir cómo responderán ante diferentes estímulos y condiciones. Esto se logra a través de la representación matemática de las relaciones entre las variables del sistema (latentes y observables), lo que permite simular su comportamiento y entender cómo las variables se afectan entre sí.

Con base en lo anterior, el modelado de ecuaciones estructurales es una herramienta valiosa para la ingeniería, la física, la química y otras disciplinas científicas que trabajen con sistemas complejos. Además, esta técnica también se utiliza en la investigación social para analizar la relación entre variables abstractas como actitudes, valores y creencia.

3.1.1. Variables observables y variables latentes

En el contexto del presente proyecto se utiliza SEM para el modelado de sistemas electroquímicos por lo cual las variables observables pueden ser medidas mediante sensores o instrumentos de medición, en cambio las variables latentes son aquellas que no podemos medir directamente, pero dependen del comportamiento de las variables observables. La representación de las variables está dada por la simbología característica de SEM que se muestra a continuación.

En la figura 3.0 se presenta la simbología utilizada para representar una variable observable. Esta variable se distingue por tener una forma cuadricular en la representación gráfica. Esta variable en particular corresponde a las observaciones o muestras que han sido tomadas del sistema al que está relacionada. Las observaciones o muestras son datos concretos obtenidos de mediciones o experimentos, y son utilizadas para analizar el rendimiento, el comportamiento o cualquier otro aspecto relevante del sistema estudiado.

Figura 3.0. Símbolo variable observable. Fuente: Elaboración propia

Para la variable latente, se utiliza la simbología representada en la figura 3.1, la cual se caracteriza por tener una forma ovalada. Esta simbología específica se utiliza para representar una variable que no es directamente observable o medida, sino que se infiere o estima a partir de otras variables o indicadores.

Figura 3.1. Símbolo variable latente. Fuente: Elaboración propia

Existen dos posibles relaciones entre variables. La primera es una relación directa de causa y efecto que se establece a través de la varianza. La figura 3.2 ilustra esta relación. En este tipo de relación, una variable se considera la causa y otra variable se considera el efecto. La varianza entre las variables indica que existe una influencia directa de una variable sobre la otra. Esto significa que un cambio en la variable causa producirá un cambio correspondiente en la variable efecto

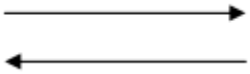

Figura 3.2. Símbolo relación directa entre variables. Fuente: Elaboración propia

La segunda relación entre variables se da a través de correlaciones o covarianzas, lo que implica que ambas variables se ven afectadas mutuamente. Esta relación se ilustra en la figura 3.3. En este tipo de relación, las variables están interconectadas y se influyen mutuamente. Los cambios en una variable se reflejan en cambios en la otra variable, y viceversa. En lugar de una relación de causa y efecto directa, hay una asociación o dependencia entre las variables, donde los valores de una variable están relacionados estadísticamente con los valores de la otra variable.

Figura 3.3. Símbolo correlación entre variables. Fuente: Elaboración propia

Para comprender mejor la simbología utilizada en la figura 3.4, se presenta un ejemplo de un sistema causa-efecto en el que la variable latente F1 actúa como causa del efecto en la variable observable V1. Este ejemplo representa un modelo mediado reflectivo, que será explicado con más detalle posteriormente.

En el sistema mencionado, la variable latente F1 se considera la causa que influye en el efecto observado en la variable observable V1. Esto implica que los cambios en la variable latente F1 resultan en cambios correspondientes en la variable observable V1.

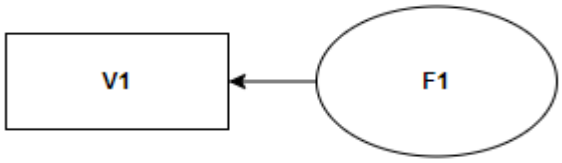

Figura 3.4. Ejemplo simbología sistema causa-efecto. Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Técnica de mínimos cuadrados parciales en modelado de ecuaciones estructurales (PLS-SEM)

La técnica de modelación de ecuaciones estructurales con mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM) se fundamenta en la varianza para la construcción del modelo. Esta técnica presenta una ventaja significativa en comparación con otras técnicas SEM, ya que no requiere supuestos paramétricos estrictos en la estimación del modelo empírico, especialmente en la distribución de los datos. Según [21], la modelación de ecuaciones estructurales PLS-SEM no exige las mismas restricciones impuestas por el método tradicional de ecuaciones estructurales por covarianza (CB-SEM) en relación con las distribuciones estadísticas, como la normalidad de los datos o el tamaño de la muestra relacionado con las variables observadas. En cambio, se utilizan pruebas no paramétricas.

El enfoque PLS-SEM evolucionó como método para evaluar las complicadas interacciones entre variables latentes con el fin de explicar las muestras observadas y el análisis predictivo como componente importante en la investigación. El método PLS se creó para representar las circunstancias empíricas y teóricas en las ciencias sociales y el comportamiento. Las técnicas matemáticas y estadísticas son rigurosas y robustas; sin embargo, el modelo matemático se caracteriza por su flexibilidad en el enfoque de que no establece reglas rigurosas en la distribución de los datos, el tamaño de la muestra o la escala de medición.

Para decidir si emplear la técnica PLS-SEM, los autores [20] afirman que es necesario comenzar por definir el objetivo del estudio. Si el objetivo principal es pronosticar constructos, se recomienda esta técnica; sin embargo, si el objetivo principal es corroborar o apoyar una hipótesis, se recomienda la CB-SEM. El PLS-SEM tiene menos requisitos para medir la dispersión y el tamaño de la muestra. En

los últimos años, la investigación de mercados y, más ampliamente, las ciencias sociales han apoyado mucho esta técnica. La investigación predictiva (exploratoria) y explicativa pueden realizarse con la técnica PLS. Un modelo explicativo se utiliza para probar hipótesis causales que explican cómo y por qué ocurre un fenómeno empírico específico. Un modelo que tiene como objetivo anticipar observaciones o acontecimientos nuevos o futuros se conoce como modelo predictivo. La capacidad de un modelo para hacer predicciones precisas de nuevas observaciones determina su poder predictivo.

Para hacer uso de esta técnica PLS-SEM los autores [20] plantean la siguiente metodología:

1. Especificación del modelo estructural:

   Se debe llevar a cabo la especificación del modelo estructural, lo que implica definir las relaciones entre las variables y las hipótesis causales a investigar. Este paso es fundamental para establecer una base sólida en la construcción del modelo.

2. Definir modelo de medida entre formativo o reflectivo:

   Definir si el modelo de medida será formativo o reflectivo. En un modelo formativo, las variables latentes se componen de indicadores que tienen una influencia causal directa en la construcción de la variable latente. Por otro lado, en un modelo reflectivo, los indicadores son simplemente una manifestación o reflejo de la variable latente. Esta distinción es importante, ya que influye en cómo se analizarán los datos y se interpretarán los resultados como se ve en figura 3.5.

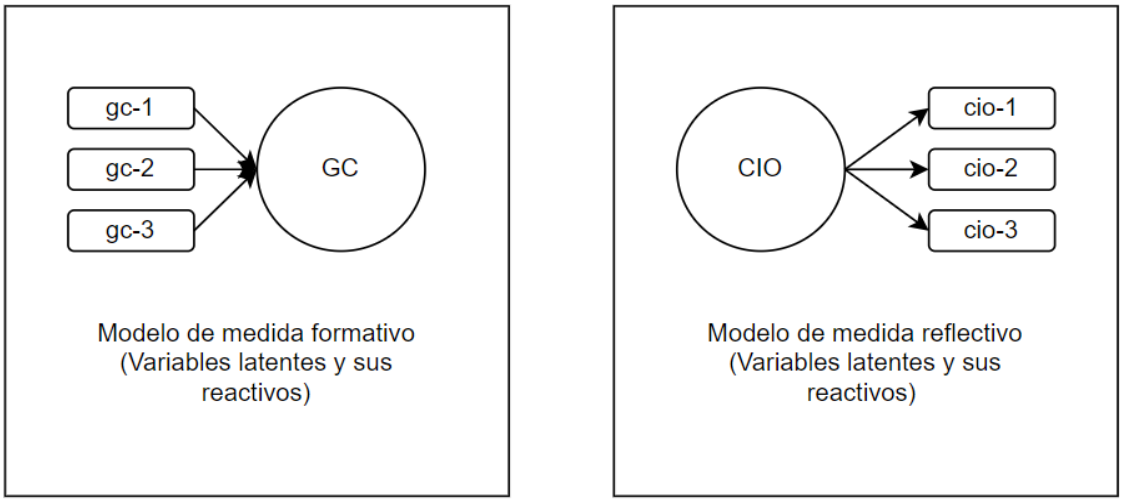

Figura 3.5. Modelos de medida. Fuente: Elaboración propia

3. Recolección de datos:

   El tercer paso se centra en la recolección de datos necesarios para el análisis. Es crucial seleccionar adecuadamente la muestra y utilizar métodos de recolección de datos apropiados para obtener información relevante y representativa de la población objetivo como lo muestra la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Tamaños de muestra sugeridos. Fuente: [20]

Número mínimo de observaciones de muestra	Numero de relaciones en el modelo estructural
52	2
59	3
65	4
70	5
75	6
80	7
84	8
88	9
91	10

4. Estimación del modelo:

   En este paso, se utilizan técnicas estadísticas para ajustar el modelo a los datos y obtener estimaciones de los parámetros del modelo.

5. Evaluación de modelos de medida formativos:

   En un modelo formativo, se examina la validez y confiabilidad de los indicadores utilizados para construir las variables latentes. Esto implica analizar la consistencia interna de los indicadores y su capacidad para capturar adecuadamente las dimensiones teóricas que representan.

Tabla 3.2. Evaluación de modelos de medida formativos. Fuente: [20]

Evaluación	Método
Validez convergente	El grado en que una medida reflexiva del mismo constructo está vinculada positivamente con otra medida se utiliza para evaluar los modelos de medición formativa. En otras palabras, se crea un constructo formativo mediante la combinación de una variable predictora (variable exógena), una variable latente endógena y uno o más indicadores reflejantes. Para evaluar esta forma de validez, es necesario establecer un elemento o reactivo en el instrumento de medida que contenga todas las medidas del constructo. Este

	artículo se conoce como artículo global. Contener la sustancia de la variable latente formativa para que pueda reemplazar a la variable exógena es el objetivo de este artículo global. Con esta información, se crea un nuevo modelo para cada constructo formativo y se implementa el algoritmo de PLS. Para esta evaluación se toma los factores de correlación existente en cada trayectoria.
Colinealidad entre indicadores	se refiere a la alta correlación que existe entre las variables observables que se utilizan para evaluar una variable latente. En un modelo de regresión múltiple, se utiliza el factor de inflación de la varianza (VIF) para evaluar la colinealidad. La presencia de colinealidad se indica con un VIF superior a 1. Se cree que un VIF superior a 5 o 10 indica una colinealidad problemática. Los valores altos de VIF indican una inflación de la varianza de los coeficientes de regresión debido a la colinealidad entre los indicadores.
Significancia y relevancia de los pesos	Debe utilizarse un procedimiento de remuestreo o bootstrapping para analizar los pesos factoriales de los indicadores y su significación; si los indicadores tienen una significación superior a 0.05, deben descartarse. Sin embargo, antes de eliminar un indicador formativo, hay que asegurarse de que no se pierde el significado del constructo. En consecuencia, [21] recomienda incorporar la indicación al modelo. En la misma línea, aconsejan adoptar un enfoque flexible si los pesos factoriales son superiores a 0.05 para evitar que se pierda la significación del constructo sometido a prueba.

6. Evaluación del modelo estructural: en el análisis de estructuras estructurales, se evalúa la calidad del modelo propuesto, es decir, si el modelo se ajusta a los datos observados y si los parámetros estimados tienen sentido teórico. La evaluación del modelo estructural implica una variedad de pasos y métodos para determinar la validez del modelo y la bondad de ajuste. Las siguientes son algunas de las principales técnicas utilizadas para evaluar el modelo estructural:

Tabla 3.3. Evaluación del modelo estructural. Fuente: [20]

Evaluación	Método
Coeficientes de determinación	Evaluando el factor R^2 que es el coeficiente de determinación del modelo de regresión. Representa la proporción de varianza de la variable dependiente que puede ser explicada por el conjunto de predictores en el modelo.
Relevancia predictiva	Determinando el factor Q^2 del modelo La fórmula para calcular el Q^2 es:

	$$Q^2 = 1 - \frac{Press}{n-P}$$ (1) Donde: $Press$: Suma de los errores de predicción al cuadrado (Predicted Residual Sum of Squares). Es la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. n: Número total de observaciones en la muestra. P: Número de parámetros estimados en el modelo.
Tamaño y significancia de los coeficientes path	El tamaño de los coeficientes de ruta se refiere a la magnitud de la relación entre las variables. Un coeficiente de ruta grande indica una relación fuerte, mientras que un coeficiente pequeño indica una relación débil. Los coeficientes de ruta se estandarizan para permitir una comparación directa de la magnitud de las relaciones entre diferentes variables.
Tamaños de efectos	Mediante el factor f^2, es una medida utilizada en el análisis de ecuaciones estructurales para evaluar el tamaño del efecto de un predictor en el modelo de regresión. La fórmula para calcular f^2 es: $$f^2 = \frac{R^2}{1-R^2}$$ (2) Donde: R^2 : Coeficiente de determinación del modelo.
Tamaños de efectos	Determinando el factor q^2,es una medida utilizada en el análisis de ecuaciones estructurales para evaluar la capacidad predictiva de un modelo de regresión. El q^2,se calcula mediante la siguiente fórmula: $$q^2 = 1 - \frac{1-R^2}{n-p-1}$$ (3) Donde: R^2: Coeficiente de determinación del modelo. n: Número total de observaciones en la muestra. p: Número de parámetros estimados en el modelo.

3.1.3. Algoritmo PLS

El algoritmo PLS (*Partial Least Squares*) es, en esencia, una secuencia de regresiones basadas en vectores de peso. Fue desarrollado por Wold en el año 1992, Durante su ejecución, los vectores de peso convergen y satisfacen las ecuaciones de punto fijo. Este algoritmo se compone de las siguientes etapas fundamentales según los autores [21]:

1. Estimación iterativa en ella se utiliza un proceso iterativo de cuatro pasos para obtener las puntuaciones de las variables latentes, que se repite hasta que se logra la convergencia (o se alcanza el número máximo de iteraciones).

   (1) Un enfoque externo para las puntuaciones de la variable latente
   (2) Estimación de los pesos internos,
   (3) Aproximación interna de las puntuaciones de las variables latentes
   (4) Estimación de los pesos exteriores

2. Calcular los pesos externos, los coeficientes de carga y la trayectoria.
3. Estimación de parámetros de ubicación.

En la tabla 3.4 se muestra formalmente el algoritmo PLS-SEM de Wold presentado por Lohmöller en 1989, tal como se expone en [21].

Tabla 3.4. El algoritmo PLS para el método básico de análisis LVP. Fuente: [21]

Escenarios	Procesos
Primer escenario	Estimación iterativa de las ponderaciones y de las puntuaciones LV a partir del paso #4, repetir los pasos #1 a #4 hasta obtener la convergencia. #1 Pesos internos: $v_{ji} = \begin{cases} sign\ cov\ (Y_j; Y_I)\ , si\ son\ \ adyacentes \\ 0, \qquad en\ caso\ contrario \end{cases}$ #2 Aproximación interior: $\widetilde{Y_j} := \sum_i v_{ji} Y_i$ (4) #3 Pesos externos; resolver para w_k , en: $\tilde{Y}_{jn} = \sum_i v_{ji}\, Y_i$(5) en un bloque de modo A $y_{kjn} = \widetilde{w}_{kj} \tilde{Y}_{jn} + e_{kjn}$(6) en un bloque de modo B #4 fuera de aproximación:

$$y_{jn} := f_j \sum_{kj} \widetilde{w}_{kj} y_{kjn} \quad (7)$$

Segundo escenario	Estimación de los coeficientes de trayectoria y carga
Tercer escenario	Estimación de los parámetros de loca

3.1.4. Software SmartPLS 4

SmartPLS 4 es una herramienta de software utilizada para el análisis de ecuaciones estructurales basada en el método de mínimos cuadrados parciales. Es una versión actualizada y mejorada de SmartPLS. Esta herramienta permite a los investigadores realizar análisis de ecuaciones estructurales de manera sencilla. Permite modelar y analizar relaciones complejas entre variables latentes y observables, y proporciona herramientas para estimar los coeficientes de regresión, evaluar la significancia estadística, realizar pruebas de hipótesis y generar gráficos visuales que ayudan a comprender las relaciones entre variables del modelo estructural [21]. Este software permite hacer uso del algoritmo PLS siguiendo las siguientes etapas preliminares a su ejecución, ya que en ellas se definen los parámetros necesarios para ejecutar el algoritmo en el modelo estructural dado por el investigador:

1. Esquema de ponderación: PLS-SEM permite aplicar tres esquemas de ponderación del modelo estructural:

   (1) Esquema de ponderación de factores
   (2) Esquema de ponderación de la ruta (por defecto)
   (3) Análisis de componentes principales (PCA).

Aunque los resultados muestran pocas diferencias entre los esquemas de ponderación de factores y rutas, se recomienda utilizar la ponderación de rutas como enfoque preferido. Este esquema de ponderación ofrece el valor R^2 más alto para las variables latentes endógenas y es aplicable en general a todas las especificaciones y estimaciones del modelo de ruta PLS. Además, los investigadores tienen la opción de utilizar el análisis de componentes principales (PCA), que utiliza los resultados de un PCA para estimar el modelo de manera más precisa.

2. Iteraciones máximas: determina la cantidad máxima de iteraciones utilizadas para calcular los resultados de PLS. Se recomienda que este número sea lo suficientemente grande, por ejemplo, 300 iteraciones. Al evaluar los resultados de PLS-SEM, es importante asegurarse de que el algoritmo no se haya detenido debido al límite máximo de iteraciones, sino por el criterio de parada establecido. Se debe tener en cuenta que seleccionar 0 como número máximo de iteraciones permite obtener resultados utilizando el enfoque de suma de puntajes.

3. Criterio de parada: Cuando el cambio en los pesos externos entre dos iteraciones consecutivas es menor que el valor predeterminado como criterio de parada, o cuando se alcanza el número máximo de iteraciones, el algoritmo PLS se detiene. Para garantizar una convergencia precisa y efectiva del algoritmo, este valor de criterio de parada debe ser lo suficientemente pequeño.

4. Pesos exteriores iniciales: Por defecto los pesos exteriores se establecen en +1, sin embargo, el software ofrece dos opciones si el investigador requiere hacer uso de ellas:

   (1) Configuración propuesta por Lohmöller, se sugiere utilizar +1 como peso externo inicial para todos los indicadores en el modelo de medición, excepto para el último, que utiliza un peso externo inicial de -1. Esta elección de pesos iniciales acelera la convergencia del algoritmo PLS-SEM. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta inicialización puede resultar en coeficientes de ruta estimados en los modelos de medición y/o en el modelo estructural que pueden presentar signos opuestos a la intuición.

   (2) Configuraciones individuales, se permite configurar pesos externos iniciales individuales para cada indicador en el modelo de ruta PLS. Esto significa que se pueden asignar pesos iniciales específicos a cada indicador según su importancia relativa. Por ejemplo, un indicador particularmente importante puede recibir un peso externo inicial de +1, indicando una relación positiva fuerte con la variable latente supuesta, mientras que los otros indicadores en el mismo modelo de medición pueden recibir un peso externo inicial de 0, indicando una relación neutra o desconocida. Esta flexibilidad permite ajustar la inicialización de los pesos externos según el conocimiento previo y las expectativas teóricas para cada indicador en particular.

3.2. Principios de la gestión energética Power-to-X

La gestión energética se refiere al conjunto de actividades, estrategias y procesos destinados a optimizar el uso y la eficiencia de los recursos energéticos en un sistema o una organización. Implica la planificación, supervisión y control de la energía generada y/o consumida en diferentes sectores, como residencial, comercial, industrial y transporte, con el objetivo de minimizar el consumo energético, reducir los costos, mejorar la sostenibilidad y mitigar los impactos ambientales.

Debido a esto, el concepto de *Power-to-X* se basa en la conversión de energía eléctrica en energía química o térmica. Este proceso se puede lograr mediante reacciones químicas como la electrólisis *Power-to-X* se dividide en distintos

enfoques, como *Power-to-Hydrogen* (P2H), *Power-to-Methane* (P2M) y *Power-to-Chemicals* (P2C). Cada uno de estos enfoques tiene aplicaciones y desafíos particulares.

Una característica esencial de *Power-to-X* es la combinación de energía eléctrica y energía química. Como resultado de esta integración, se pueden producir combustibles sintéticos como hidrógeno y metano sintético. Estos combustibles pueden servir como sustitutos de los combustibles fósiles en áreas como el transporte y la industria, lo que contribuye a reducir las emisiones de carbono. En particular, el hidrógeno juega un papel importante en el cambio hacia una economía más verde, como se me menciona en [7].

3.2.1. Sistemas de gestión energética basados en hidrogeno

El hidrógeno se presenta como una forma de energía versátil porque puede usarse en una variedad de áreas, como la industria y el transporte, para generar energía y almacenarla. Además, debido a que el hidrógeno solo produce vapor de agua cuando se consume, no produce gases de efecto invernadero. Esto hace que sea una alternativa atractiva para reducir la cantidad de carbono en áreas que actualmente dependen en gran medida de los combustibles fósiles.

El hidrógeno, este elemento natural, se puede obtener de una variedad de formas, lo que permite su clasificación en varias categorías según su origen y producción. La Tabla 3.5 muestra las formas principales de adquisición de hidrógeno:

Tabla 3.5. Clasificación del hidrogeno por colores. Fuente: [22]

Color de hidrogeno	Fuente de energía	Materia prima	Tecnología de producción	Consideración en materia de emisiones de GEI
Gris	Combustibles fósiles	Metano y carbón	Reformado de metano a vapor o gasificación	Ya que su base son los combustibles fósiles, presenta un alto nivel de emisiones de GEI
Azul	Combustibles fósiles	Metano y carbón	Reformado de metano a vapor con captura de carbón o gasificación de carbono con captura de carbono	Gracias a su tecnología de captura de carbono, el hidrógeno se considera menos perjudicial para el medio ambiente. Por lo tanto, se identifica como carbono neutral.
Turquesa	Energía renovable	Metano y biomasa	Pirolisis	Aunque no hay emisiones de GEI si se presenta carbono negro

Rosa	Energía nuclear	Agua	Sistemas de electrolisis acoplado con los sistemas de refrigeración de reactores nucleares	En este proceso no hay emisiones de GEI, sin embargo, existen residuos nucleares
Verde	Energía renovable	Agua	Electrolisis	El uso de energía renovable en el proceso de electrolisis la hace la tecnología mas amigable con el medio ambiente

Teniendo en cuenta esta información, el hidrógeno verde se destaca como el tipo de hidrógeno más adecuado para reducir las emisiones de GEI y se alinea perfectamente con el concepto de gestión energética. Su producción a partir de fuentes de energía renovable y su versatilidad en diversas aplicaciones lo convierten en una solución clave en la transición hacia un futuro más sostenible y libre de carbono.

La tecnología del hidrógeno verde se basa en una materia prima fundamental: el agua. A partir de este recurso abundante y ampliamente disponible, se inicia el proceso de electrólisis, que es alimentado por fuentes de energía renovable.

Por lo cual La clave del hidrógeno verde radica en que la electricidad utilizada en el proceso de electrólisis proviene de fuentes renovables, como la energía solar, eólica o hidroeléctrica. Al utilizar energías limpias y sostenibles, se asegura que la producción de hidrógeno no genere emisiones de GEI. Este proceso se describe de manera grafica en la figura 3.6.

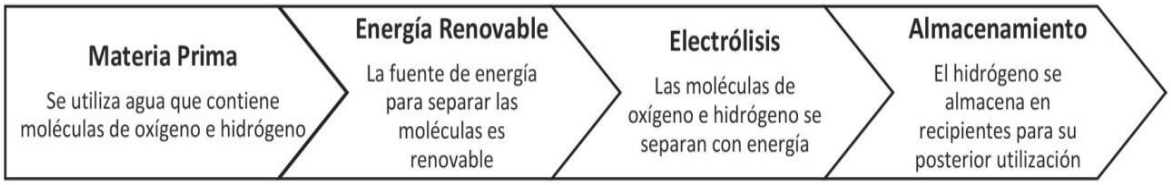

Figura 3.6. Etapas para la producción de hidrogeno verde Fuente: [22]

3.2.2. Celdas de electrolisis tipo PEM

La electrólisis PEM (*Proton Exchange Membrane*, por sus siglas en inglés) es un proceso electroquímico que utiliza una celda PEM para descomponer el agua en sus elementos químicos básicos, hidrógeno y oxígeno, mediante la aplicación de corriente eléctrica.

En la electrólisis PEM, se utiliza una celda similar a la de una pila de combustible, pero en lugar de producir electricidad a partir de hidrógeno y oxígeno, se aplica electricidad para descomponer el agua en sus elementos constituyentes. La celda PEM consta de una membrana de intercambio de protones, un ánodo y un cátodo.

Los iones de hidrógeno (protones) se desplazan hacia el cátodo a través de la membrana de la celda PEM cuando se aplica corriente eléctrica, mientras que los iones de oxígeno se desplazan hacia el ánodo. Como subproducto, los protones del cátodo se combinan con los electrones del circuito externo y los iones de oxígeno para formar moléculas de agua. Los iones de oxígeno se descargan en el ánodo y liberan oxígeno gaseoso [23].

El resultado final de la electrólisis PEM es la producción de gas hidrógeno en el ánodo y gas oxígeno en el cátodo. En la figura 3.7 se puede ver gráficamente este proceso.

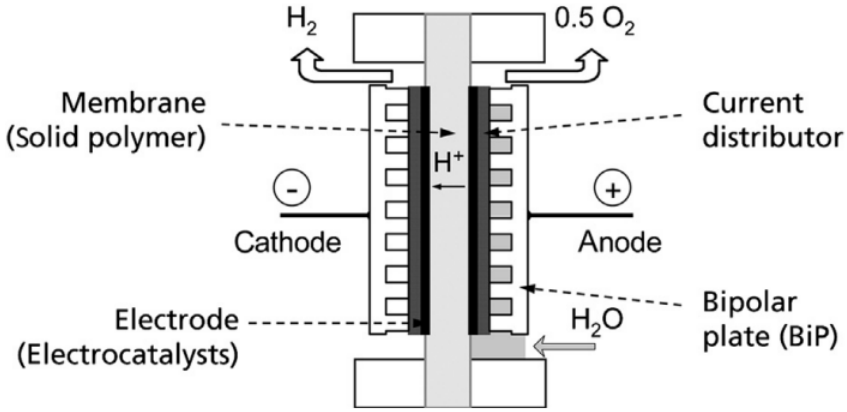

Figura 3.7. Proceso de electrolización celda PEM. Fuente: [23]

Con base en lo anterior se puede afirmar que. La electrólisis es un proceso químico que se puede representar mediante la reacción química global en la ecuación 8:

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad (8)$$

En esta ecuación, se muestra que al aplicar una corriente eléctrica a través de agua (H_2O), se obtienen dos moléculas de hidrógeno (H_2) y una molécula de oxígeno (O_2) como productos de la reacción. Este proceso se lleva a cabo en un sistema que se alimenta con agua como materia prima y se energiza con una fuente de potencia eléctrica.

El sistema de electrólisis utiliza la energía eléctrica suministrada para descomponer las moléculas de agua en sus componentes básicos, el hidrógeno y el oxígeno. El hidrógeno generado se recolecta como salida del sistema en forma de gramos de hidrógeno, teniendo como resultado un sistema *Power-to-Hydrogen*.

3.2.3. Pilas de combustible PEM

Las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM) son dispositivos electroquímicos que realizan una reacción de oxidación-reducción para convertir directamente la energía química de un combustible, como el hidrógeno, en energía eléctrica. Debido a su alta eficiencia, bajo costo y capacidad para funcionar a bajas temperaturas, estas pilas de combustible son ampliamente utilizadas [24].

Una membrana de intercambio de protones funciona como electrolito en una pila de combustible PEM. La permeabilidad de la membrana a los iones de hidrógeno, también conocidos como protones, permite que los protones se muevan selectivamente desde el ánodo al cátodo. Como se muestra en la Figura 3.8, la oxidación del hidrógeno es el resultado de la reacción química en el ánodo, mientras que la reducción del oxígeno es el resultado de la reacción química en el cátodo.

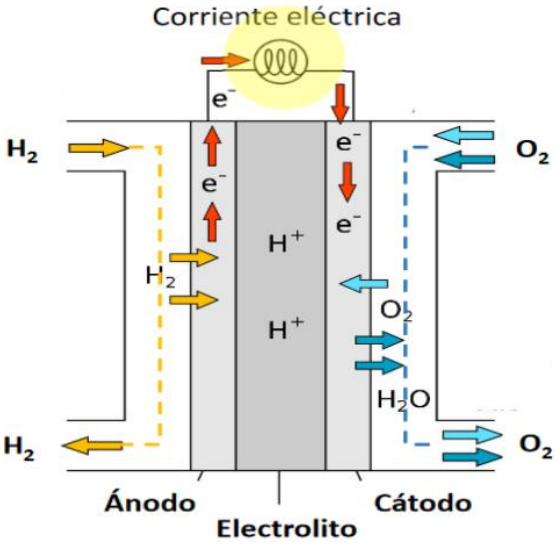

Figura 3.8. Proceso de pilas de combustible tipo PEM. Fuente: [24]

En el ánodo, se lleva a cabo la reacción expresada en la ecuación 9:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \quad (9)$$

El hidrógeno (H_2) se descompone en iones de hidrógeno (H^+) y electrones (e^-). Los iones de hidrógeno atraviesan la membrana hacia el cátodo, mientras que los electrones fluyen a través de un circuito externo, generando corriente eléctrica.

En el cátodo, se produce la reacción respectiva a la ecuación 10:

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \quad (10)$$

Los iones de hidrógeno (H^+) y los electrones (e^-) se combinan con el oxígeno (O_2) para formar agua (H_2O) como producto final. Este proceso genera energía eléctrica y calor como resultado de la reacción redox.

Las pilas de combustible PEM ofrecen numerosas ventajas, como una alta eficiencia energética, tiempos de arranque rápidos, bajas temperaturas de operación y capacidad de respuesta rápida a cambios de carga. Estas características las hacen ideales para aplicaciones de gestión energética como sistemas *Hydrogen-to-Power* (H2P).

4. Diseño Metodológico

En el desarrollo del presente proyecto se seguirán los pasos mostrados en la figura 4.0, tomando 4 etapas principales con la finalidad de cumplir cada uno de los objetivos.

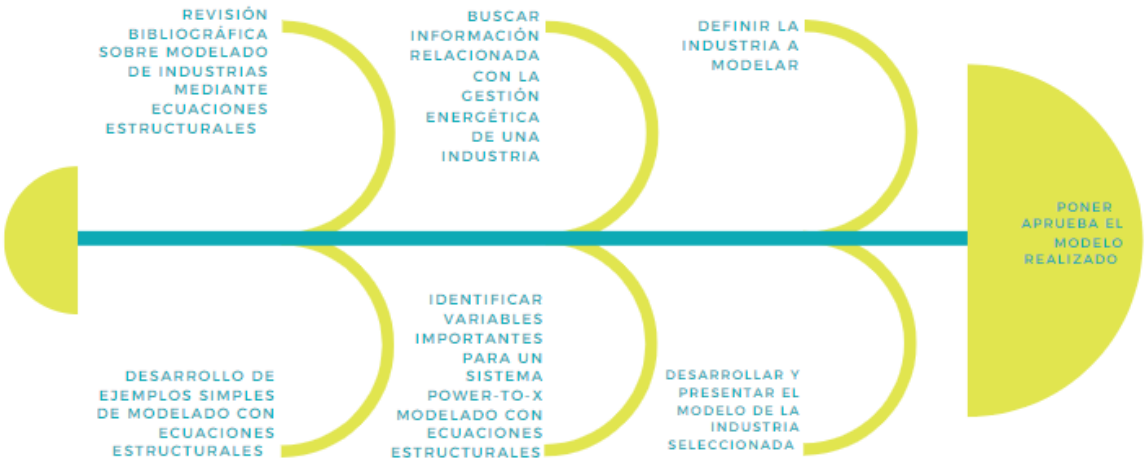

Figura 4.0. Metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe lo que se realizará en cada una de las fases de la metodología.

4.1. Fases y Metodología

4.1.1. Revisión Bibliográfica y desarrollo de ejemplos sobre ecuaciones estructurales

Se toma la información recopilada en el estado del arte, para abstraer los conceptos más relevantes en el estudio de las ecuaciones estructurales como método de modelado, para ello se toman diversas fuentes bibliográficas que permitirán la construcción de ejemplos simples a pequeña escala en el software Matlab-Simulink, como lo son un sistema *Power-to-H*, para un sistema de almacenamiento y otro para un sistema de cogeneración. Al realizar estos ejemplos se crea un primer acercamiento a la técnica de modelado seleccionada junto con la aplicación de la misma en la herramienta de simulación.

4.1.2. Búsqueda de información e identificación de variables de la gestión energética de una industria para construcción de un modelo basado en ecuaciones estructurales

La gestión energética es un concepto fundamental para este proyecto, porque con este se puede comprender a profundidad el funcionamiento de los sistemas *Power-*

to-X y sus impactos medioambientales, a partir de esto se realizó una revisión bibliográfica enfocada en esta temática teniendo en cuenta los estudios realizados en Europa, Estados Unidos, Latinoamérica y particularmente en Colombia; con el fin de encontrar características en común entre distintas aplicaciones a nivel mundial que permitan generalizar las variables utilizadas en la gestión energética del sector industria. A partir de estas variables se construye un modelo general que permita la gestión energética mediante tecnologías P2X.

4.1.3. Definir y modelar una industria

Se contacta con una industria que permita el acceso a sus datos de consumo y producción energética, junto con la información de sus emisiones de GEI; con el propósito de particularizar y construir su modelo de gestión energética. Con este modelo se pretende proponer un sistema que le facilite a la industria aprovechar más su producción de energía renovable además de disminuir sus emisiones de dióxido de carbono convirtiéndolo en gas renovable.

4.1.4. Poner aprueba el modelo realizado

Para finalizar se pone a prueba el modelo particular de la industria, mediante la cuantificación de sus emisiones después de la aplicación del sistema de gestión energética (P2X) comparándolos con los datos proporcionados por la industria referentes a su producción actual de GEI. Se espera que la disminución de sus emisiones sea de al menos de un 50%

4.2. Cronograma

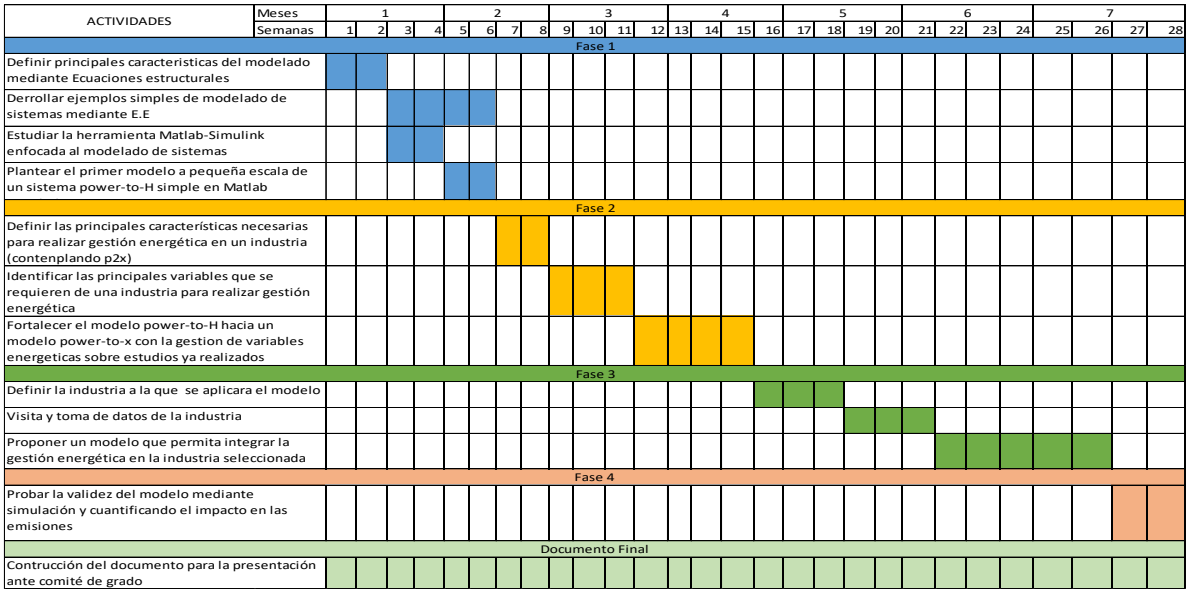

Figura 4.1. Cronograma de actividades. Fuente: Elaboración propia

5. Desarrollo Conceptual

5.1. Construcción modelo sistema Power-to-Hydrogen

Para construir un modelo PLS-SEM, es importante seguir los pasos presentados en el marco teórico. Estos pasos guían el proceso para obtener un modelo basado en ecuaciones estructurales del sistema P2H. A continuación, se inicia con la construcción del modelo:

1. Especificación del modelo estructural: En la figura 5.0 se presenta la construcción del modelo estructural inicial, basado en los referentes [22], [23] y [24]. Estos estudios destacan el agua y la potencia eléctrica como materias primas fundamentales para la producción de hidrógeno verde. El modelo describe la existencia de una potencia disponible, la cantidad de agua necesaria para aprovechar dicha potencia y, como resultado, la producción de hidrógeno.

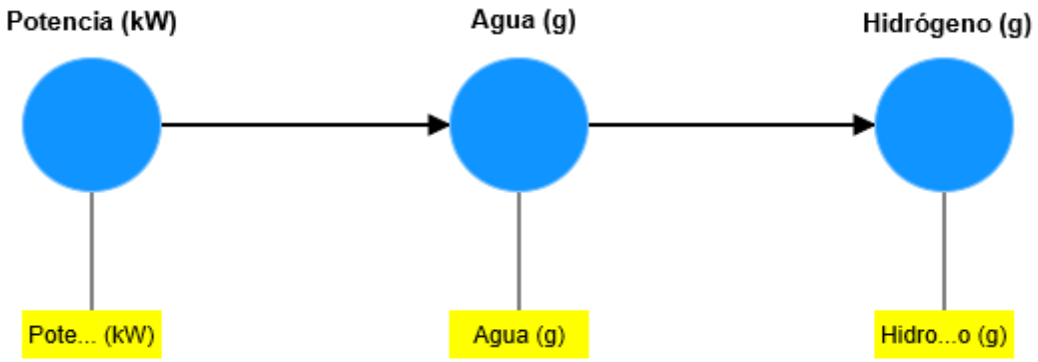

Figura 5.0. Especificación modelo estructural P2H. Fuente: Elaboración propia

2. Definir modelo de medida entre formativo o reflectivo: En este caso particular, según se muestra en la figura 5.0, se utiliza un modelo de medida formativo. Este enfoque implica utilizar variables observables o constructos para generar variables latentes que se relacionen entre sí y permitan la construcción del modelo SEM.

3. Recolección de datos: El modelo propuesto incluye tres variables interrelacionadas, según se describe en el marco teórico. Para respaldar estas relaciones, se recolectaron 59 muestras, cuyos detalles se encuentran disponibles en el Anexo 1.

   Los datos se obtienen utilizando Matlab/Simulink, ya que este software proporciona una simulación titulada "Sistema de electrólisis con PEM". Con la ayuda de los autores [26] y [27], se crea una simulación que permite emular

el comportamiento de una celda de producción de hidrógeno utilizando bloques de la librería Simscape [28]. Esta simulación permite observar el comportamiento eléctrico, térmico y químico involucrado en un electrolizador PEM. Dado el enfoque de este proyecto, se registran datos de tres variables: la potencia y el agua consumidos en el proceso, así como el hidrógeno resultante del mismo. El modelo mencionado se puede observar en la figura 5.1.

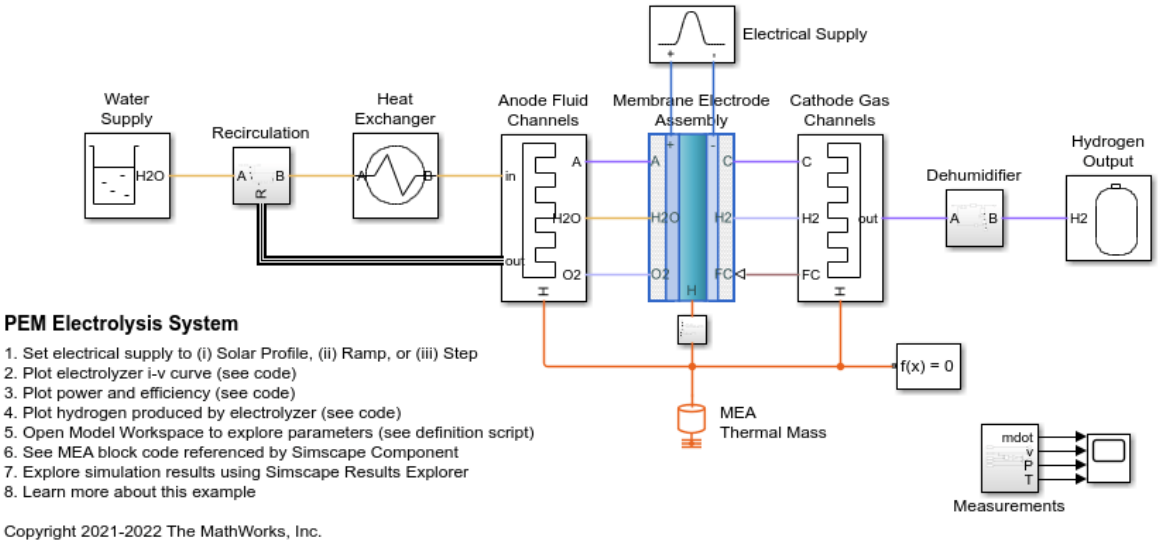

Figura 5.1. Sistema electrolizador para toma de datos. Fuente: [28]

4. Estimación del modelo: Utilizando el modelo estructural presentado en la figura 5.0 y los datos recolectados para los constructos, se lleva a cabo la ejecución del algoritmo PLS mediante el software Smart PLS 4. Este software brinda la capacidad de determinar los valores de cada trayectoria y el coeficiente que define la relación entre las variables mencionadas. De esta manera, se puede analizar de manera precisa las interacciones y las magnitudes de las relaciones entre las variables en el modelo. El resultado dado por el software ya mencionado puede verse en la figura 5.2

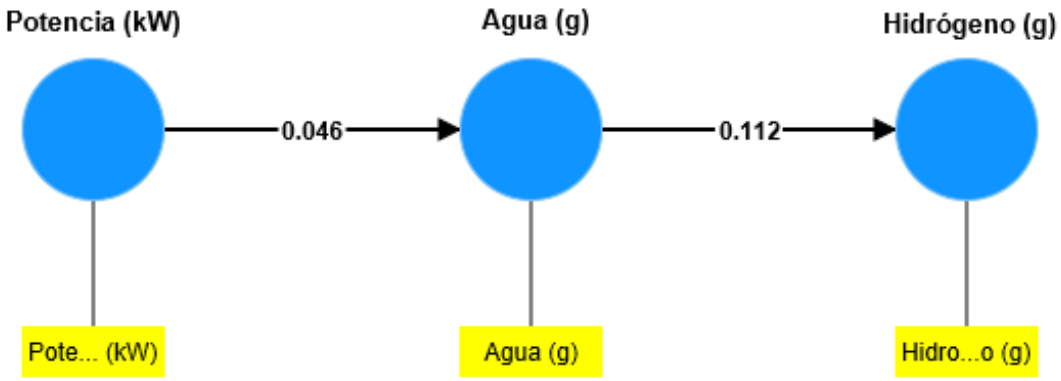

Figura 5.2. Estimación del modelo P2H. Fuente: Elaboración propia

Este resultado proporciona la base para construir dos funciones lineales que permiten predecir la producción de hidrógeno y el consumo de agua a partir de un valor de potencia de entrada. La primera función establece la relación entre la potencia y el agua, y además del valor de trayectoria, se incluye un valor de intercepción de 0.274 resultante de la ejecución del algoritmo. La función que describe esta relación se expresa en la ecuación 11:

$$H_2O = 0.046kW + 0.274 \quad (11)$$

Para la segunda trayectoria, que involucra las variables Agua e Hidrógeno, no se cuenta con ningún valor de intercepción. Por lo tanto, la función que describe esta relación se puede observar en la ecuación 12:

$$H_2 = 0.112H_2O \quad (12)$$

5. Evaluación de medidas formativas: La ejecución del algoritmo PLS también permite llevar a cabo la evaluación de las medidas formativas, las cuales fueron descritas en el marco teórico. Esta evaluación nos brinda información sobre la calidad y confiabilidad de las variables observables utilizadas para medir las variables latentes en el modelo. Estos resultados se muestran en la tabla 5.1.

Tabla *5.1*. Evaluación modelo de *medida sistema P2H.* Fuente: Elaboración propia

Evaluación	Resultados
Validez convergente	Los resultados obtenidos a través del software son tomados desde el apartado de convergencia y se representa de la siguiente manera $Potencia \rightarrow Agua : 0.999$ $Agua \rightarrow Hidrogeno: 1.00$ Un coeficiente de correlación de 0.999 en la trayectoria $Potencia \rightarrow Agua$ indica una relación muy estrecha y positiva entre estas dos variables. Esto sugiere que existe una dependencia significativa de la variable Agua respecto a la variable Potencia. En otras palabras, un aumento en la Potencia se asocia fuertemente con un incremento en la variable Agua. Del mismo modo, un coeficiente de correlación de 1.00en la trayectoria $Agua \rightarrow Hidrogeno$ indica una correlación perfecta y directa entre estas dos variables. Esto implica que la variable Hidrogeno es completamente determinada por la variable Agua. Cualquier cambio en la variable Agua se traduce en un cambio proporcional en la variable Hidrogeno

Colinealidad entre indicadores	Los resultados del factor VIF se analizan mediante la evaluación individual de cada variable, lo que arroja los siguientes resultados: $Potencia$: 0.999 $Agua$: 0.999 $Hidrogeno$: 0.999 con un valor de VIF 0.999 para cada constructo, se puede concluir que no hay problema de colinealidad en el modelo.
Significancia y relevancia de los pesos	Este apartado resulta irrelevante al existir un solo constructo o variable observable por cada variable latente.

6. Evaluación del modelo estructural

Tabla 5.2. Evaluación del modelo estructural sistema P2H. Fuente: Elaboración propia

Evaluación	Resultados
Coeficientes de determinación	$R^2 = 0.999826547$ Esto significa que aproximadamente el 99.98% de la variabilidad en los datos medidos se puede explicar por el modelo. En otras palabras, el modelo tiene un ajuste muy cercano a los datos reales y tiene la capacidad de capturar la gran mayoría de las variaciones en las variables estudiadas.
Relevancia predictiva	$Q^2 = 0.9998$ Este resultado indica que el modelo tiene una buena relevancia predictiva, ya que puede explicar aproximadamente el 99.98% de la variabilidad en los datos no utilizados para su construcción. Esto implica que el modelo es altamente confiable en términos de su capacidad para hacer predicciones precisas sobre nuevas observaciones o datos no vistos previamente
Tamaño y significancia de los coeficientes path	$Potencia \rightarrow Agua$: 0.998 $Agua \rightarrow Hidrogeno$: 0.999 Esto demuestra una relación fuerte y positiva entre las variables de potencia y agua. Un valor cercano a uno indica que un aumento en la variable agua está relacionado con un aumento en la variable potencia. Además, el coeficiente es significativo, lo que significa que la relación observada es estadísticamente significativa y no es al azar. En la segunda trayectoria, la relación entre las variables agua e hidrogeno es de 0.99. Esto demuestra una fuerte y positiva

	relación entre las variables con valores cercanos a 1. Esto significa que cuando aumenta la variable agua, también aumenta la variable hidrogeno.
Tamaños de efectos	$f^2 = 5764.247$ Este valor alto indica que las variables independientes tienen un efecto sumamente sustancial y significativo en la variable dependiente en el modelo. .
Tamaños de efectos	$q^2 = 0.999996727$ Este valor cercano a 1 indica que las variables latentes tienen un tamaño de efecto muy fuerte y significativo en las variables observables en el modelo. Indica que las variables latentes tienen una influencia sustancial sobre las variables observables, y esta influencia es estadísticamente significativa.

El último paso consiste en trasladar las funciones lineales proporcionadas por el software Smart PLS a bloques de funciones en Simulink, como se muestra en la figura 5.3. la trayectoria $Potencia \rightarrow Agua$ y en la figura 5.4 la segunda trayectoria $Potencia \rightarrow Agua \rightarrow Hidrogeno$ Esta etapa implica implementar las relaciones establecidas por el modelo en un entorno de simulación más detallado y dinámico.

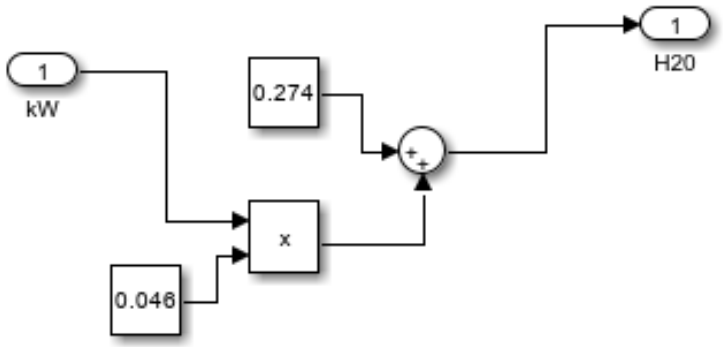

Figura 5.2. Trayectoria potencia y agua. Fuente: Elaboración propia

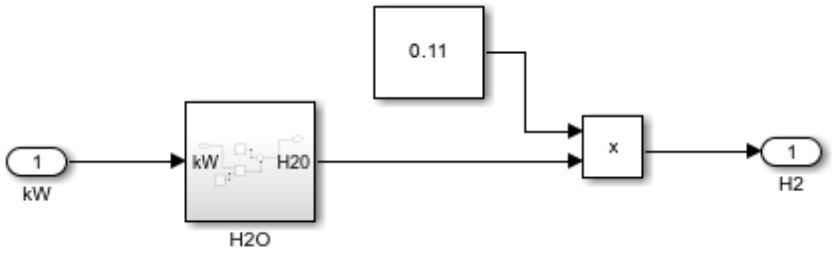

Figura 5.3. Trayectoria potencia, agua e hidrogeno. Fuente: Elaboración propia

5.2. Construcción modelo sistema Hydrogen-to-Power

Para desarrollar el modelo del sistema *Hydrogen-to-Power*, se sigue la misma metodología que se utilizó previamente en el sistema *Power-to-Hydrogen*. En consecuencia, se procede a construir el modelo utilizando el enfoque de PLS-SEM:

1. La especificación inicial del modelo estructural se presenta en la figura 5.4, basándose en los estudios de referencia [23] y [24]. Estos estudios resaltan el hidrógeno y el oxígeno del ambiente como materias primas en la producción de energía. En este modelo, se considera una cantidad de hidrógeno disponible que se convierte en energía eléctrica. A diferencia del modelo *Power-to-Hydrogen*, en este caso no se incluye el oxígeno en el modelo estructural, ya que se captura del medio ambiente sin generar costos adicionales en el proceso.

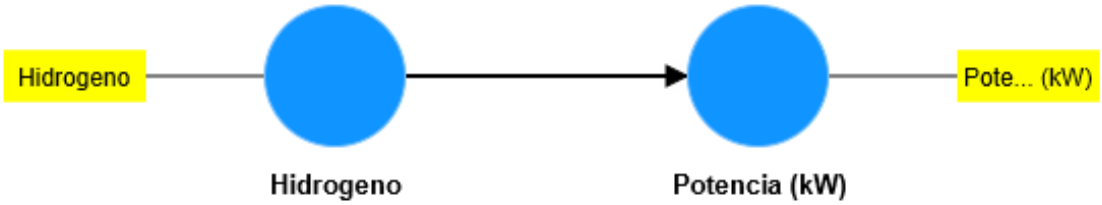

Figura 5.4. Especificación modelo estructural H2P. Fuente: Elaboración propia

2. Definir modelo de medida entre formativo o reflectivo: Basándose en la figura 5.4, se establece un modelo de medida formativo, ya que las variables observables contribuyen a la formación de las variables latentes en el sistema. En este tipo de modelo, las variables latentes son construidas por las variables observables, lo que implica que las mediciones de las variables observables son utilizadas para estimar y representar las variables latentes en el modelo.

3. Recolección de datos: El modelo incluye dos variables que se relacionan directamente entre sí. De acuerdo con lo expuesto en el marco teórico, se recolectaron 56 muestras para respaldar y analizar estas relaciones. Los detalles completos de las muestras se encuentran disponibles en el anexo 2.

   Los datos utilizados en este estudio se obtuvieron mediante el uso de Matlab/Simulink, a través de una simulación denominada "Sistema de pila de combustible con PEM". Esta simulación fue desarrollada siguiendo las referencias de los autores [29], [30], [31] y [32], y se implementó utilizando la librería Simscape [33]. El propósito de la simulación es analizar un sistema de generación de energía eléctrica a partir de una fuente de hidrógeno y oxígeno.

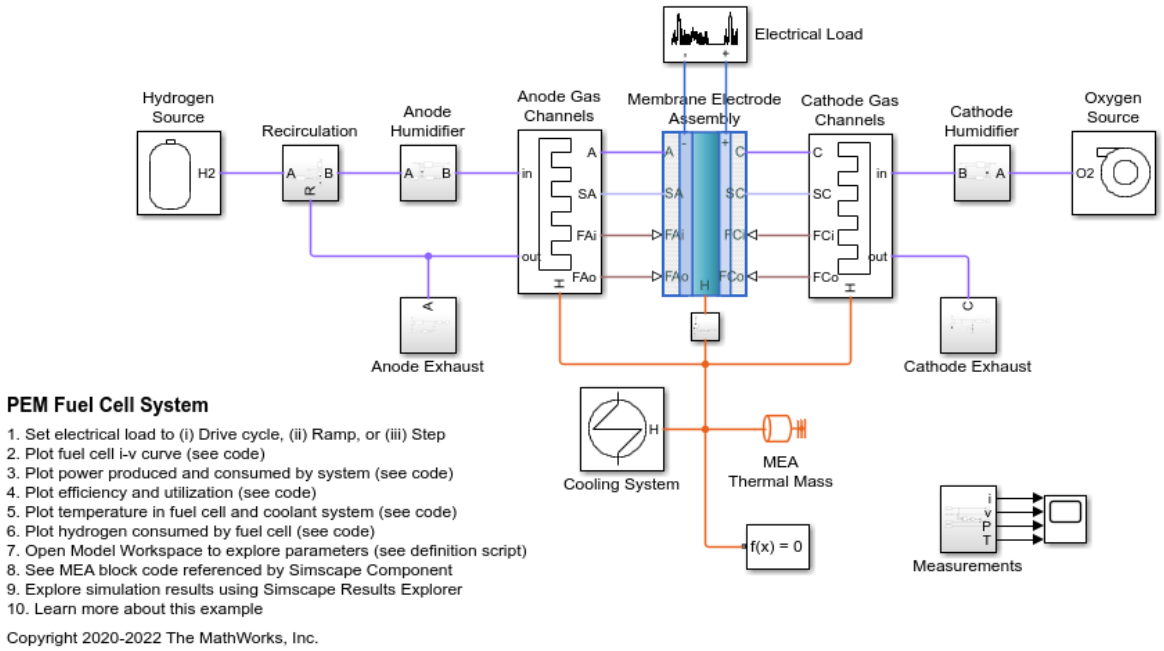

Figura 5.5. Sistema pila de combustible con PEM para toma de datos. Fuente: [33]

4. Estimación del modelo: Aplicando la misma metodología utilizada para el sistema P2H, se ejecutó el software correspondiente para obtener los valores de trayectoria y los coeficientes de relación, tal como se muestra en la figura 5.6.

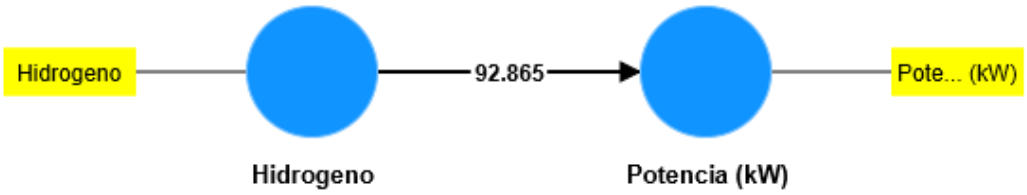

Figura 5.6. Estimación del modelo H2P. Fuente: Elaboración propia

El análisis de coeficientes de relación da como resultado la creación de un modelo lineal que puede predecir la generación de energía eléctrica en función de la cantidad de hidrógeno disponible. El coeficiente de relación, con un valor de 92.865, muestra la fuerza y dirección de la relación entre estas dos variables. Con este resultado y un intercepto de 1.674, se puede crear la función lineal de la ecuación 13 para explicar la relación entre la generación de energía eléctrica y la cantidad de hidrógeno disponible:

$$kW = 92.965\ H_2 + 1.674 \quad (13)$$

5. Evaluación de medidas formativas: La ejecución del algoritmo PLS al igual que en la construcción del modelo anterior, permite realizar la evaluación de los modelos de medida correspondientes. Estos resultados se muestran en la tabla 5.3.

Tabla *5.3*. Evaluación modelo de *medida sistema H2P.* Fuente: Elaboración propia

Evaluación	Resultados
Validez convergente	$Hidrogeno \rightarrow Potencia : 0.999$ El resultado es un coeficiente de correlación de 0.999 en la trayectoria $Hidrogeno \rightarrow Potencia$ indica una relación cercana y positiva entre estas dos variables. Lo cual indica que existe una dependencia significativa Entre las variables hidrógeno y potencia.
Colinealidad entre indicadores	Al igual que en el primer modelo los resultados del factor VIF se analizan mediante la evaluación individual de cada variable, lo que arroja los siguientes resultados: $Hidrogeno : 0.999$ $Potencia : 0.999$ con un valor de VIF 0.999 para en cada constructo, se concluye que no hay problemas de colinealidad en el modelo.
Significancia y relevancia de los pesos	Este apartado resulta irrelevante al existir un solo constructo o variable observable por cada variable latente.

6. Evaluación del modelo estructural

Tabla 5.4. Evaluación del modelo estructural sistema H2P. Fuente: Elaboración propia

Evaluación	**Resultados**
Coeficientes de determinación	$R^2 = 0.9979$ Este alto coeficiente de determinación del 99.79% indica que el modelo es altamente preciso y confiable en la predicción de los valores observados. Proporciona una representación precisa y significativa de las relaciones y patrones existentes en los datos.

Relevancia predictiva	$$Q^2 = 0.9989$$ Este resultado demuestra que el modelo tiene una alta relevancia predictiva, ya que puede explicar alrededor del 99.89% de la variabilidad en los datos que no se utilizaron para su construcción. Esto significa que el modelo es altamente confiable en términos de su capacidad para realizar predicciones precisas sobre nuevas observaciones o datos que no se hayan visto anteriormente.
Tamaño y significancia de los coeficientes path	$$Hidrogeno \rightarrow Potencia : 0.999$$ Esto revela una relación altamente positiva y fuerte entre las variables de hidrógeno y potencia. Un valor cercano a 1 indica que un incremento en la variable de hidrógeno está estrechamente asociado con un aumento proporcional en la variable de potencia. Además, el coeficiente es estadísticamente significativo, lo que implica que la relación observada no es aleatoria y tiene un respaldo sustancial en los datos.
Tamaños de efectos	$$f^2 = 475.19$$ Demuestra un gran tamaño de efecto. Esto indica que el modelo tiene un impacto significativo en cómo se explican y predicen las variables observadas. El modelo es un predictor muy efectivo porque puede explicar y capturar una gran cantidad de variabilidad en los datos.
Tamaños de efectos	$$q^2 = 0.999$$ Las variables latentes tienen un impacto significativo y significativo en las variables observables del modelo, como lo demuestra este valor cercano a 1. Esto indica que las variables latentes tienen un gran impacto en las variables observables del estudio. El hecho de que la relación entre las variables latentes y observables sea estadísticamente significativa respalda la validez y relevancia del modelo.

Para concluir, se procede a construir el modelo en Simulink basado en la función lineal que describe la relación $Hidrogeno \rightarrow Potencia$. El resultado de la implementación en el software se presenta visualmente en la figura 5.7.

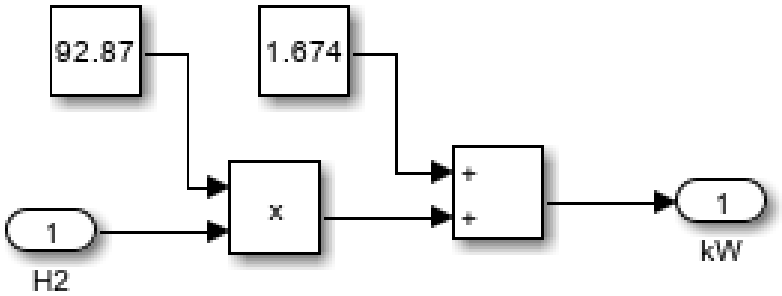

Figura 5.7. Trayectoria hidrogeno y potencia. Fuente: Elaboración propia

5.3. Construcción modelo de gestión energética en una industria

Con el objetivo de iniciar la construcción del modelo de gestión energética, se establece contacto con una empresa del sector industrial que ha proporcionado acceso a sus datos de consumo y generación de energía renovable. Esta iniciativa se fundamenta en los estudios de los referentes [34] [35], los cuales destacan la gestión energética como un enfoque para alcanzar niveles teóricos de eficiencia energética en el sector industrial. Además, se resalta la importancia del acople sectorial con sistemas *Power-to-X* para aprovechar los excedentes de sus FER.

En este sentido, se lleva a cabo la caracterización del consumo de energía en un período de 24 horas, junto con la generación de energía renovable, en particular a través de un sistema de generación fotovoltaico. Estos datos se encuentran detallados en el anexo 3 del presente estudio, proporcionando una base sólida para la posterior construcción y análisis del modelo de gestión energética. La grafica que describe estos datos se puede ver en la figura 5.8.

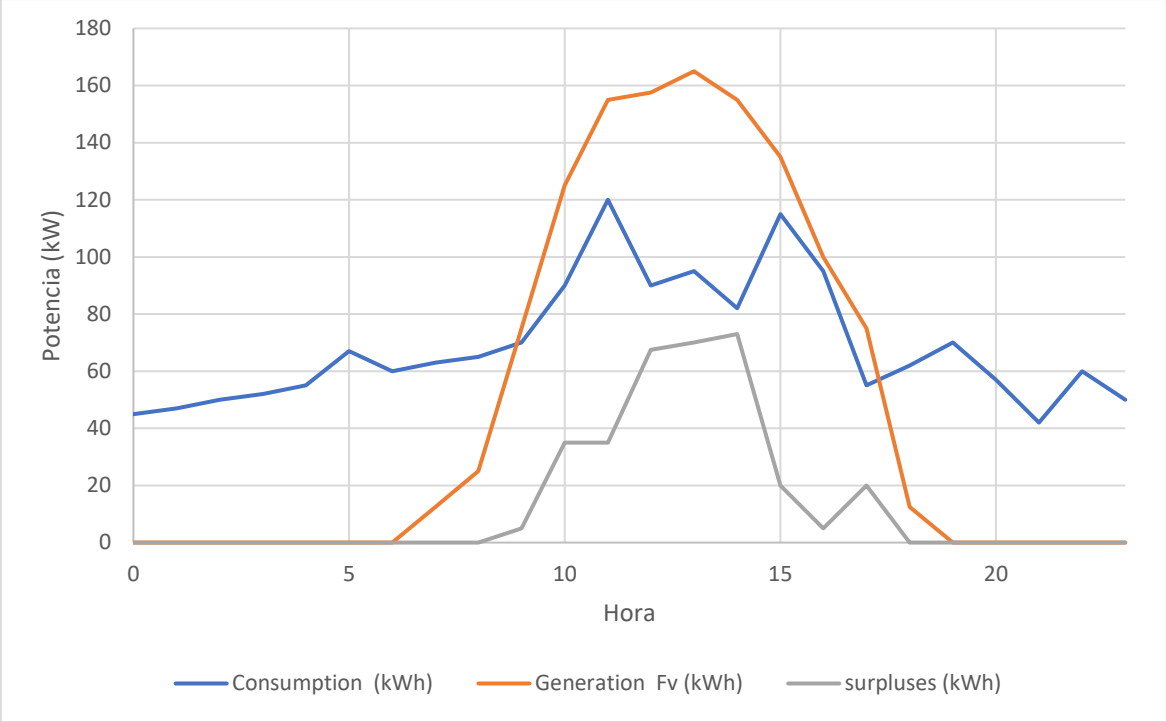

Figura 5.8. Caracterización de consumo y generación de la industria. Fuente: Elaboración propia

Una vez que se han caracterizado los datos de la industria, el siguiente paso es cargarlos en Simulink para integrarlos con los modelos de gestión energética P2H y H2P construidos anteriormente. Para llevar a cabo esta tarea, se utiliza como referencia el trabajo realizado por los autores [36], quienes afirman que es posible cargar los datos de consumo de diferentes sectores mediante un mapeo basado en datos reales. Esto permite obtener una función polinómica que describe de la manera más precisa posible el comportamiento de la curva de demanda.

Para lograr esto, se emplea la función polyfit de Matlab [37], tanto para la función de consumo como para la función de generación. Se utilizan los datos previamente mencionados como base para generar estas funciones. El resultado de este proceso se muestra en la figura 5.9, donde se visualizan las funciones resultantes que describen de manera adecuada los patrones de consumo y generación de energía en la industria.

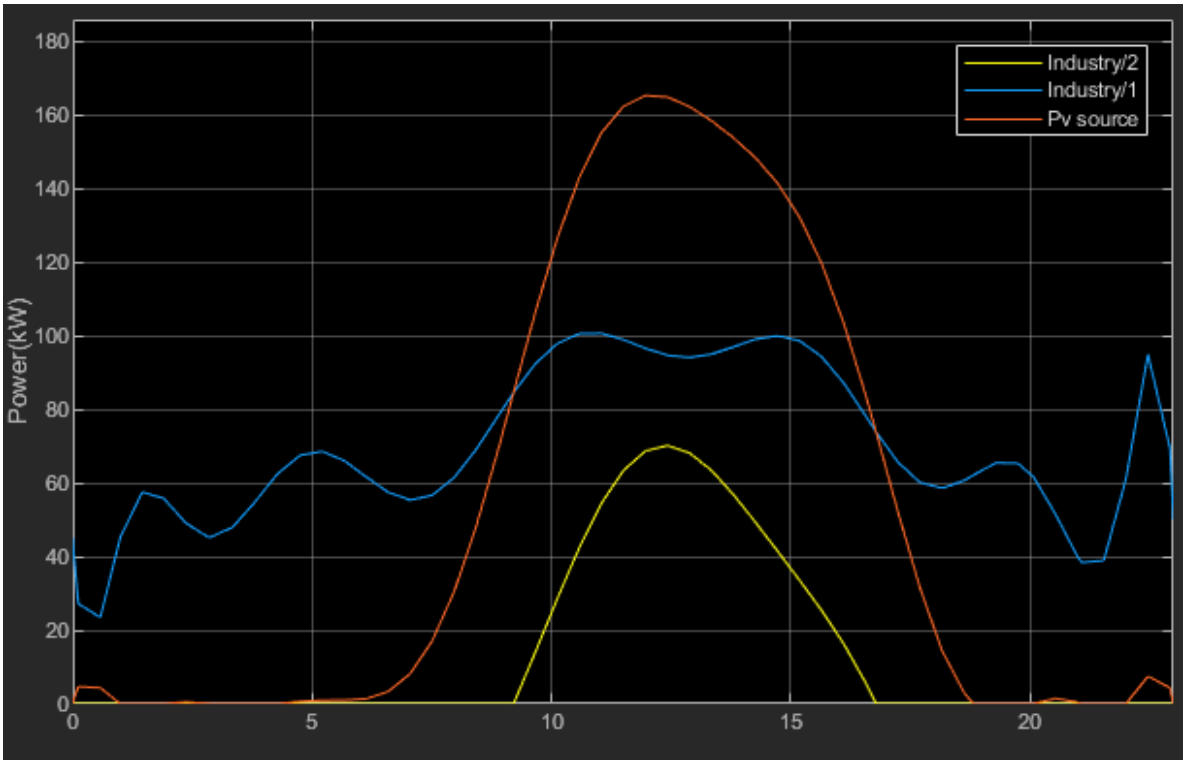

Figura 5.9. Consumo, generación y excedentes de la industria en Matlab. Fuente: Elaboración propia

Se unen los bloques relacionados con la industria y la gestión de excedentes de energía una vez que se ingresan los datos en la simulación de Simulink. Anteriormente, se crearon estos bloques utilizando el método PLS-SEM, que efectivamente modela las relaciones entre las variables.

La figura 5.10 muestra el modelo final que ilustra la interconexión de los bloques y otros elementos relevantes. El modelo incluye una sección específica que presenta la forma de las señales en cada etapa del proceso, junto con la representación de los bloques. Esto nos brinda la oportunidad de observar cómo las señales se modifican a lo largo del sistema de gestión energética.

Asimismo, el modelo incluye una sección dedicada a los totales de energía excedente, hidrógeno producido, agua utilizada en el proceso y la cantidad de energía que se puede aprovechar después de la transformación de *Power-to-Hydrogen-to-Powe*r (P2H2P). Estos datos son de suma importancia para evaluar la eficiencia y el rendimiento del sistema, así como para tomar decisiones informadas en términos de gestión energética.

.

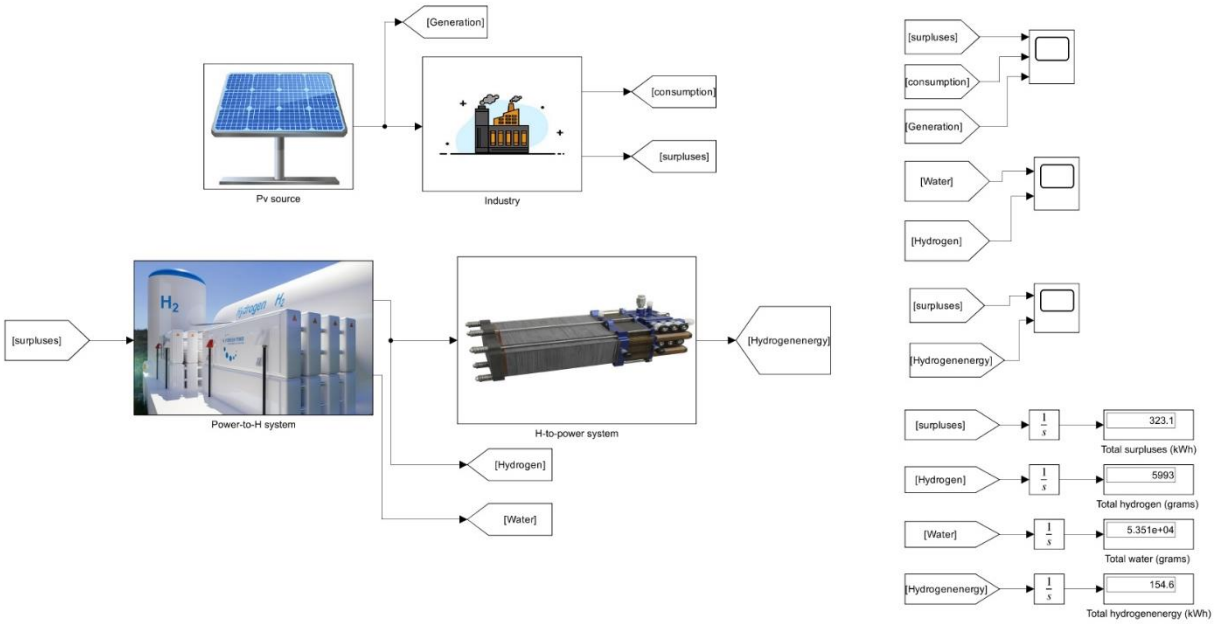

Figura 5.10. Modelo de gestión energética. Fuente: Elaboración propia

6. Resultados y Discusión

Con el fin de presentar los hallazgos y el alcance obtenidos a partir de la implementación del sistema de gestión energética mostrado en la figura 5.10. Se plantean tres escenarios con el objetivo de mostrar los resultados y el impacto que puede tener la implementación de este sistema en la industria caracterizada.

6.1. Industria sin sistema de gestión energética

En este apartado, se analiza la generación de energía renovable en la industria y se identifica un problema significativo: la falta de aprovechamiento de los excedentes generados. En otras palabras, no se cuenta con módulos de baterías u otros sistemas de almacenamiento que permitan utilizar esta energía en momentos posteriores. De acuerdo con el modelo planteado, se estima que se producen un total de 323 kWh de energía no utilizada en el día. Además, durante las horas sin luz solar, el consumo debe ser suplido por la red eléctrica convencional. Esto indica que, a pesar de la presencia de un sistema fotovoltaico, esta industria aún depende de fuentes de energía no renovables proporcionadas por la red eléctrica.

En este contexto, el caso inicial en el que se emplea el modelo es el de una industria que necesita aprovechar al máximo sus excedentes de energía para aumentar su eficiencia energética. Al hacerlo, puede reducir su dependencia de la red eléctrica convencional si se habla de un sistema P2H2P, lo que traerá beneficios tanto ambientales como económicos. Al aprovechar de manera más eficiente sus fuentes de energía renovable ya instaladas, la industria podrá maximizar sus recursos, reducir sus costos y minimizar su impacto ambiental.

6.2. Industria con sistema de gestión Power-to-H

En el segundo escenario, se implementa un sistema de producción de hidrógeno verde utilizando los excedentes generados por el sistema de generación fotovoltaica. En este modelo, se establece una relación sincronizada entre la curva de producción de hidrógeno y la generación de excedentes del sistema fotovoltaico. Mediante el uso del modelo del sistema P2H, es posible predecir la cantidad de agua necesaria para aprovechar la energía disponible y la cantidad de hidrógeno que se produce a partir de estos recursos.

Considerando el comportamiento de los excedentes mostrados en la figura 5.9, se presenta en la figura 6.0 el comportamiento de la generación de hidrógeno (azul) y la fuente de agua (amarillo) en relación con estos excedentes, donde los valores presentados en gramos para ambas variables. Al sincronizar la producción de hidrógeno con los excedentes de energía renovable, se logra aprovechar estos recursos y reducir al mínimo los desperdicios.

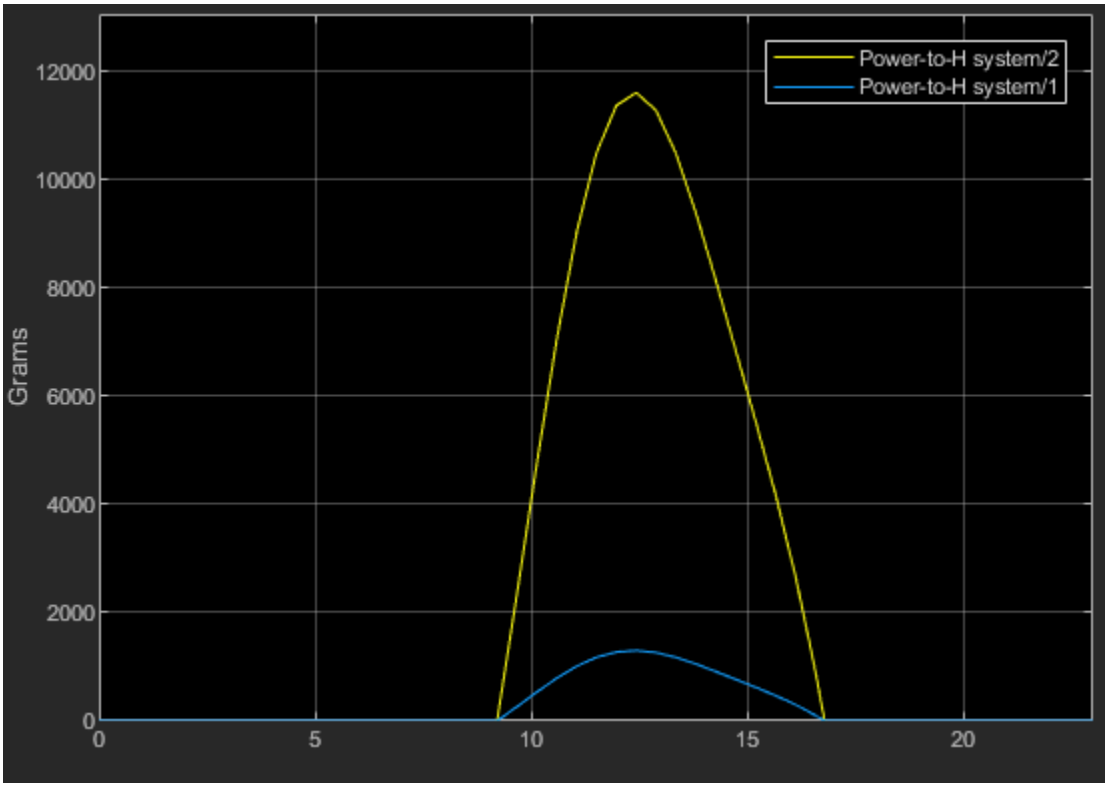

Figura 6.0. Proceso de producción de hidrogeno y consumo de agua. Fuente: Elaboración propia

La producción total resulta en 5.993 gramos de hidrógeno y un consumo total de 53.510 gramos de agua para aprovechar los 323 kWh de excedentes energéticos. Estos resultados permiten inferir que, según el modelo propuesto, se requiere aproximadamente 54 kWh para producir 1 kg de hidrógeno. Este valor se encuentra en concordancia con lo propuesto por los autores [37], [38], [39] y [40], quienes

afirman que se necesitan alrededor de 50 kWh para producir 1 kg de hidrógeno. Estos estudios respaldan la validez de los resultados de producción de hidrógeno a partir de los excedentes energéticos, al coincidir con investigaciones similares previas.

La integración del hidrógeno en la industria como una alternativa a los combustibles fósiles tiene un impacto significativo en la reducción de la huella de carbono. Al aprovechar el hidrógeno producido, se puede lograr la descarbonización de procesos que actualmente dependen de combustibles fósiles, lo que contribuye desde el sector industrial a la mitigación del cambio climático.

La implementación de hidrógeno en procesos térmicos es un ejemplo concreto de esta transición hacia un camino libre de la quema de combustibles fósiles en las industrias. Los sistemas térmicos tradicionalmente utilizan combustibles fósiles como gas natural o combustibles líquidos para generación de calor y llevar a cabo diversas actividades. Sin embargo, al reemplazar estos combustibles por hidrógeno, se evita la emisión de GEI y se reducen drásticamente las emisiones de carbono.

6.3. Industria con sistema de gestión Power-to-H-to-Power

En este último escenario se implementa un sistema de gestión energética denominado P2H2P, en el cual el hidrógeno se utiliza como una especie de batería de energía. Este sistema permite aprovechar el hidrógeno almacenado durante las horas en las que la demanda de energía supera la generación disponible, es decir, en momentos en los que no hay luz solar, reduciendo así la dependencia de la red eléctrica convencional.

Al utilizar el hidrógeno como una fuente de energía almacenada, se logra disminuir la necesidad de recurrir a la red eléctrica durante los periodos de baja generación renovable. Esto conlleva a una reducción indirecta en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), ya que se genera una menor demanda energética a la red convencional.

La figura 6.1 ilustra la cantidad de excedentes energéticos que ingresan al sistema de gestión (representados en amarillo) y la energía resultante del proceso de gestión (representada en azul). Esta representación visual destaca la diferencia de magnitud entre ambas curvas, evidenciando la eficiencia al pasar por dos etapas de transformación.

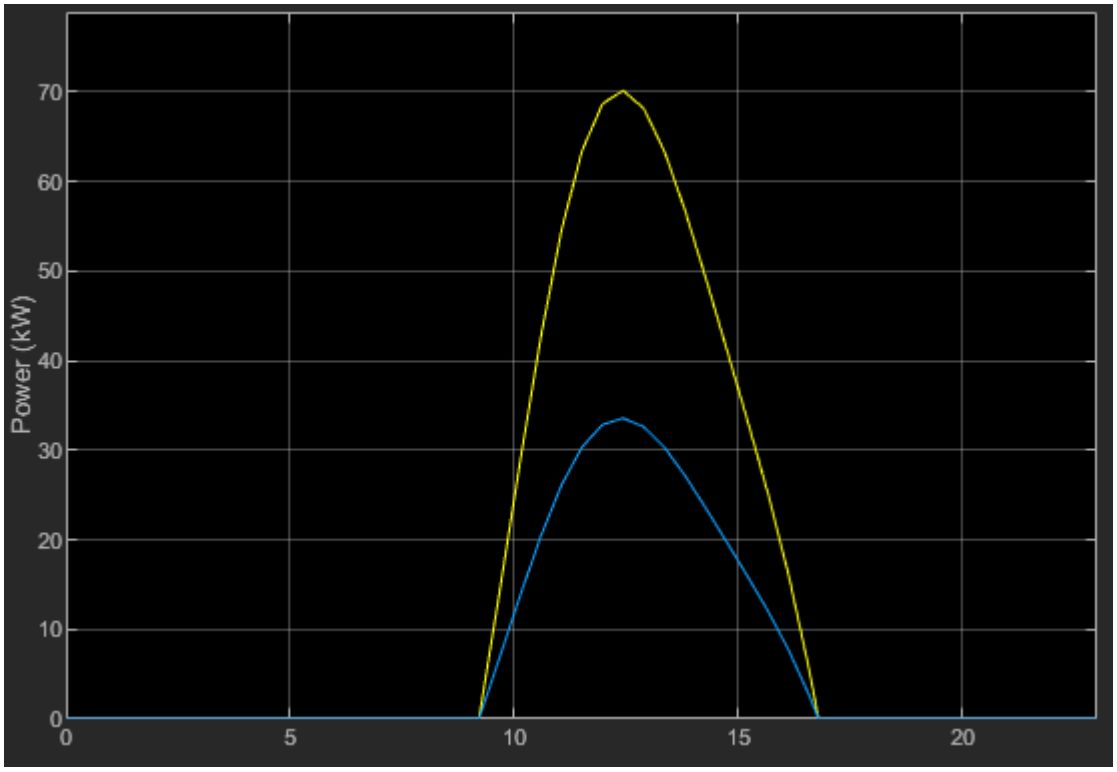

Figura 6.1. Resultado sistema P2H2P. Fuente: Elaboración propia

La industria genera un total de 323 kWh de excedentes energéticos en un día. Con la implementación del sistema de gestión, se logra recuperar 154 kWh de estos excedentes, lo que implica aprovechar 169 kWh de los 323 kWh totales que, de lo contrario, serían desaprovechados. Esto representa una reducción del 52.3% en la cantidad de energía no aprovechada, sin tener en cuenta posibles pérdidas ocasionadas por los sistemas de almacenamiento. Estos resultados demuestran la efectividad del sistema en mejorar la eficiencia de la industria al utilizar de manera más óptima sus recursos renovables.

Al reducir significativamente los niveles de energía no aprovechada, el sistema de gestión permite a la industria optimizar su operación y aumentar su eficiencia en el uso de fuentes de energía renovable. Esta reducción en la dependencia de fuentes contaminantes contribuye a un entorno industrial más sostenible y menos perjudicial para el medio ambiente.

7. Conclusiones y Trabajos futuros

7.1. Conclusiones

El uso de PLS-SEM brinda la posibilidad de desarrollar modelos de regresión robustos al someter los datos y el modelo resultante a diversas pruebas. Estas pruebas permiten al investigador reafirmar la relación entre las variables o, en caso de obtener resultados inadecuados durante la ejecución del algoritmo PLS, descartar el modelo propuesto.

La aplicación de PLS-SEM y el software Smart PLS 4 permitió desarrollar un modelo a gran señal para un sistema P2H2P, el cual posibilitó el análisis de sus etapas de manera individual. Este enfoque resultó en dos opciones de gestión energética basadas en un único elemento. Además, el modelo se destaca por su simplicidad en comparación con los utilizados para la recopilación de datos, ya que se centra exclusivamente en las variables eléctricas relevantes, lo que lo hace especialmente adecuado para este enfoque particular.

El hidrógeno, al ser un combustible limpio, puede proporcionar una fuente de calor eficiente y libre de emisiones. Su alto grado de inflamabilidad permite su utilización en una amplia gama de aplicaciones térmicas, incluyendo calderas industriales, hornos, procesos de secado y calefacción. Al hacer este cambio, las industrias que tomen la decisión de adaptar un sistema P2H, pueden aprovechar los beneficios ambientales al tiempo que mantener un rendimiento y una eficiencia similares a los sistemas basados en combustibles fósiles.

EL sistema de gestión energética P2H2P implementado permite una notable reducción en la energía no aprovechada, recuperando más de la mitad de los excedentes generados. Esto se traduce en una mayor eficiencia energética para la industria y una disminución importante de su dependencia de fuentes contaminantes. Con cada paso hacia la optimización de sus recursos renovables disponibles, la industria se acerca a un modelo operativo más sostenible y responsable con el medio ambiente.

7.2. Trabajos futuros

Como trabajos futuros, se plantea expandir los elementos de acople sectorial en el sistema, incluyendo la incorporación de tecnologías como la metanización, sistemas de almacenamiento energético y diversas fuentes de energía renovable. Este enfoque busca migrar hacia un sistema robusto que ofrezca múltiples alternativas y soluciones sostenibles para la gestión energética.

Otro posible trabajo futuro sería realizar un estudio de factibilidad exhaustivo, abordando tanto los aspectos técnicos como los económicos del sistema propuesto. Este estudio permitiría evaluar la viabilidad y el potencial de implementación del sistema en términos de su funcionalidad, rendimiento y rentabilidad

8. Anexos

8.1. Anexo 1 datos sistema electrolizador

En este anexo se encuentran las muestras tomadas para la construcción del modelo SEM (Modelo de Ecuaciones Estructurales). Estas muestras muestran los valores resultantes del sistema al variar los niveles de potencia en cada simulación. Es

decir, por cada muestra se modificó la potencia y se registraron los valores obtenidos de agua e hidrógeno.

Potencia (kW)	Hidrogeno (g)	Agua (g)
0	0	0
1,982	0,014	0,13
4,076	0,0293	0,26
6,25	0,044	0,39
8,5	0,0586	0,522
10,74	0,073	0,65
13,05	0,078	0,78
15,4	0,102	0,914
17,6	0,117	1,04
20,02	0,1315	1,17
22,36	0,1462	1,307
24,7	0,162	1,43
27,1	0,176	1,56
29,5	0,19	1,69
31,98	0,205	1,82
34,5	0,2194	1,96
37,1	0,234	2,09
39,73	0,2485	2,22
42,4	0,2632	2,35
45,1	0,278	2,48
47,8	0,2925	2,61
50,6	0,3072	2,74
53,4	0,322	2,87
56,2	0,336	3,007
59,1	0,351	3,13
62	0,365	3,26
64,91	0,38	3,39
67,9	0,395	3,52
70,9	0,41	3,65
73,95	0,4242	3,79
77,1	0,4388	3,92
80,2	0,454	4,05
83,4	0,47	4,18
86,6	0,4826	4,31
89,8	0,5	4,44
93,1	0,512	4,57
96,4	0,5226	4,7
99,8	0,542	4,83

103,2	0,55	4,96
106	0,57	5,09
109	0,587	5,22
111,8	0,6	5,35
117,6	0,63	5,62
120,4	0,6436	5,75
123,3	0,658	5,88
126,2	0,673	6,01
129	0,6876	6,14
131,8	0,702	6,27
134,6	0,717	6,4
137,5	0,732	6,53
140	0,7461	6,665
140,45	0,749	6,69
141,2	0,7534	6,73
141,4	0,7548	6,74
142,5	0,76	6,79
144,6	0,765	7,01
145,7	0,77	7,22
147,1	0,78	7,32
149,3	0,8	7,5

8.2. Anexo 2 datos sistema pila de combustión

Al igual que en el anexo 1, en este caso se realiza la toma de datos mediante la perturbación del sistema. Sin embargo, en este caso, se varía la cantidad de gramos de hidrógeno y se analiza la potencia correspondiente en un instante de tiempo.

Hidrogeno	Potencia (kW)
0	0
0,16	16,4
0,18	18
0,19	19,56
0,21	21,2
0,229	22,6
0,24	24,2
0,278	27,5
0,298	28,6
0,311	30,2
0,32	31,8
0,34	33,2

0,36	34,7
0,376	36,2
0,39	37,5
0,42	40,5
0,45	43,4
0,47	44,8
0,49	46,2
0,5	47,5
0,52	49,9
0,55	52,8
0,57	55,6
0,59	56,9
0,62	59,9
0,655	62
0,67	63,9
0,69	66,1
0,71	68,7
0,72	69,2
0,74	71,3
0,76	72,3
0,77	74,6
0,79	76,8
0,81	76,55
0,822	78,8
0,84	79,2
0,86	81,4
0,87	83,6
0,88	84,6
0,898	85,9
0,91	87,8
0,93	89,9
0,94	91,4
0,96	93,1
0,98	94,5
1,01	95,6
1,03	96,6
1,05	97,9
1,07	98,3
1,09	99,7
1,1	100,9
1,12	101,9

1,14	103
1,16	103,9

8.3. Anexo 3 Datos generación y consumo industria

En este anexo se presentan los datos proporcionados por la industria, que muestran la generación del sistema fotovoltaico y el consumo de energía de la industria a lo largo de un período de 24 horas. Se ha tomado una muestra de datos cada hora para obtener una representación precisa del rendimiento del sistema y el consumo de energía a lo largo del día.

Hora	Consumo (kWh)	Generación Fotovoltaica (kWh)
0:00	45	0
1:00	47	0
2:00	50	0
3:00	52	0
4:00	55	0
5:00	67	0
6:00	60	0
7:00	63	13
8:00	65	25
9:00	70	75
10:00	90	125
11:00	120	155
12:00	90	158
13:00	95	165
14:00	82	155
15:00	115	135
16:00	95	100
17:00	55	75
18:00	62	13
19:00	70	0
20:00	57	0
21:00	42	0
22:00	60	0
23:00	50	0

9. Referencias Bibliográficas

[1] U. Nations, «Cambio climático | Naciones Unidas,» 2015. [En línea]. Available: https://www.un.org/es/global-issues/climate-change.

[2] «Agencia Europea de Medio Ambiente,» 2019. [En línea]. Available: https://www.eea.europa.eu/es.
[3] «La republica,» 2021. [En línea]. Available: https://www.larepublica.co/economia/forestal-agro-y-transporte-sectores-que-mas-emiten-co2-2437961#:~:text=Esto%20ubica%20a%20Colombia%20en,%25%3B%20y%20transporte%20con%2011%25..
[4] D. N. d. planeación, W. B. Group y K. G. G. Parthership, «Energy Demand Situation in Colombia,» 2017. [En línea].
[5] «Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible,» 2022. [En línea]. Available: https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/estrategia-colombiana-de-desarrollo-bajo-en-carbono-ecdbc/#.
[6] M. Borasio y S. Moret, *Deep decarbonisation of regional energy systems: A novel modelling approach and its application to the Italian energy transition. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021.
[7] M. Sterner y M. Specht, *Power-to-Gas and Power-to-X—The History and Results of*, 2021.
[8] G. A. Zapata, J. A. V. Marín, P. Natiello y J. E. T. Restrepo, «Upme (Unidad de planeación minero energética),» 2017. [En línea]. Available: https://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla_IGE_Incentivos_Tributarios_Ley1715.pdf
[9] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGíA , «Presidencia de la república,» 2022 Agosto 2022. [En línea]. Available: https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%201476%20DEL%2003%20DE%20AGOSTO%20DE%202022.pdf.
[10] F. Müller, P. Hentschel, S. D. Jongh, L. Held, M. Suriyah y T. Leibried, *Congestion Management of the German Transmission Grid through Sector Coupling: A Modeling Approach*, 2020.
[11] D. Bellotti, M. Dierks, F. Moellenbruck, L. Magistri, K. Görner y G. Oeljeklaus, *Thermodynamic and economic analysis of a plant for the CO2 hydrogenation for methanol production*, 2019.
[12] H. Guannan, S. M. Dharik, A. B.-A. Clara y G. Emre, *Sector coupling: Via hydrogen to lower the cost of energy system decarbonization*, 2021.
[13] H. Hannele, K. Juha, F. Damian, S. J. Charles, O. Antje, E. P. Borre, C. Nicolaos, S. Lennart, M. Korpas, A. Estanqueiro, J. Macdowell y A. Tuohy, *System Impact Studies for Near 100% Renewable Energy Systems Dominated by Inverter Based Variable Generation*, 2022.
[14] A. R. Montenegro, M. Sanjuan y M. Carmona, *Energy storage development using hydrogen and its potential application in Colombia*, 2019.
[15] K. Matija, P. Ivan, Z. Ning y C. Tomislav, *Uncertainty modelling of an industry facility as a multi-energy demand response provider*, 2022.
[16] X. Luoa, M. Dooner, W. He, J. Wang, Y. L, D. L y O. Kiselychnyk, *Feasibility study of a simulation software tool development for dynamic modelling and transient control of adiabatic compressed air energy storage with its electrical power system applications*, 2018.
[17] Y. Fan, J. Chen, G. Shirkey, R. John, S. R. Wu, H. Park y C. Shao, *Applications of structural equation modeling (SEM) in ecological studies: an updated review*, 2016.

[18] L. Binglun, H. Yuanman, C. Yu, L. Miao, W. Wenjie, B. Rencang, S. Sixue y Q. Li, *Analysis of the factors affecting the long-term distribution changes of wetlands in the Jing-Jin-Ji region, China,* 2021.
[19] A. A. Ajmi, N. S. Mahmood, K. R. Jamaludin, H. H. A. Talib, S. Sarip y H. Kaidi, *Intelligent IntegratedModel for Improving Performance in Power Plants,* 2021.
[20] M. M. Ávila y E. F. Moreno, *Aplicación de la técnica PLS-SEM en la gestión del conocimiento: un enfoque técnico práctico,* 2018.
[21] «SmartPLS,» [En línea]. Available: https://www.smartpls.com/documentation/algorithms-and-techniques/pls. [Último acceso: 2023].
[22] M. M. Andino, Derecho de aguas, Bogotá: Universidad externado de colombia , 2023.
[23] E. Amores, A. Contreras y L. Rodríguez, «Análisis de la distribución de flujo mediante simulación CFD en celdas de,» *Iber connapice,* 2017.
[24] J. Larminie y A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, 2003.
[25] R. Bhandari y R. R. Shah, «Techno-economic assessment of decentralized hydrogen production in Germany,» *Renewable Energy,* 2021.
[26] L. Vincenzo, «Modelling and experimental analysis of a polymer electrolyte membrane water electrolysis cell at different operating temperatures,» *Energies,* 2018.
[27] M. Jingke, «Thin liquid/gas diffusion layers for high-efficiency hydrogen production from water splitting,» *Applied Energy,* 2016.
[28] «Sistema de electrólisis con PEM- MATLAB & Simulink- MathWorks,» MathWorks - Creadores de MATLAB & Simulink, [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/simscape/ug/pem-electrolysis-system.html.
[29] Dutta, Sandip, S. Shimpalee y J. W. V. Zee, «Numerical prediction of mass-exchange between cathode and anode channels in a PEM fuel cell,» *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 2001.
[30] E. T. Services, «Fuel Cell Handbook,» *US Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory,,* 2004.
[31] Pukrushpan, J. T., A. G. Stefanopoulou y H. Peng., «Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design,» *Springer-Verlag London,* 2004.
[32] Spiegel y Colleen, «PEM fuel cell modeling and simulation using MATLAB,» *Elsevier,* 2008.
[33] i. d. p. d. c. c. P.-. M. &. S.-. MathWorks, MathWorks - Creadores de MATLAB & Simulink, [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/simscape/ug/pem-fuel-cell-system.html.
[34] E. A. Ikram, K. LABADI, S. Hamaci y D. A. Moumen, «Energy Management and optimization in Manufacturing Systems,» *Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems,* 2015.
[35] M. Schulze, H. N. b, M. O. b y P. Thollander, «Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework,» *Journal of Cleaner Production,* 2016.

[36] «Ajuste programático- MATLAB & Simulink- MathWorks,» MathWorks - Creadores de MATLAB y Simulink, [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/matlab/data_analysis/programmatic-fitting.html.
[37] M. Chen, S.-F. Chou, F. Blaabjerg y P. Davari, «Overview of Power Electronic Converter Topologies Enabling Large-Scale Hydrogen Production via Water Electrolysis,» 2022.
[38] M. Zghaibeh, E. M. Barhoumi, P. C. Okonkwo, I. B. Belgacem, W. H. Beitelmal y I. B. Mansir, «Analytical model for a techno-economic assessment of green hydrogen production in photovoltaic power station case study Salalah city-Oman,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022.
[39] N. Armaroli y V. Balzani, «The Hydrogen Issue,» 2010.
[40] B. S. Thapa, B. Neupane, H.-s. Y. b y Y.-H. Lee, «Green hydrogen potentials from surplus hydro energy in Nepal,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021.