



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“POTENCIAL DEL HIDRÓGENO ELECTRÓLITO EXCEDENTE DE LA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA ABANICO UBICADA EN LA PROVINCIA DE MORONA
SANTIAGO”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera Eléctrica

AUTORA: SAMANTHA MARIUXI AROSTEGUI GUTIÉRREZ

TUTOR: ING. EDGAR ANTONIO BARRAGÁN ESCANDÓN, PHD.

Cuenca - Ecuador

2024

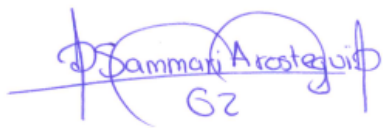
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Samantha Mariuxi Arostegui Gutiérrez con documento de identificación N° 1400645154, manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 17 de enero de 2024

Atentamente,



Samantha Mariuxi Arostegui Gutiérrez

1400645154

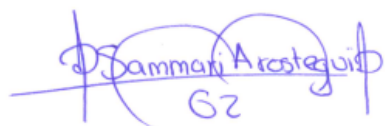
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Samantha Mariuxi Arostegui Gutiérrez con documento de identificación N° 1400645154, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Proyecto técnico enfoque investigativo: “Potencial del hidrógeno electrólito excedente de la central hidroeléctrica Abanico ubicada en la provincia de Morona Santiago”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Eléctrica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 17 de enero de 2024

Atentamente,



Samantha Mariuxi Arostegui Gutiérrez

1400645154

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Edgar Antonio Barragán Escandón con documento de identificación N° 0102516457, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “POTENCIAL DEL HIDRÓGENO ELECTRÓLITO EXCEDENTE DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ABANICO UBICADA EN LA PROVINCIA DE MORONA SANTIAGO”, realizado por Samantha Mariuxi Arostegui Gutiérrez con documento de identificación N° 1400645154, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico enfoque investigativo que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 17 de enero de 2024

Atentamente,



Ing. Edgar Antonio Barragán Escandón, PhD.

0102516457

AGRADECIMIENTO

Agradezco de manera especial a la Universidad Politécnica Salesiana por haberme dado la oportunidad de formarme como profesional; a todos los docentes que conocí a lo largo de estos pocos años quienes me brindaron su conocimiento y muchos de ellos palabras de aliento que siempre me permitieron salir adelante. A IEEE, a mis amigos, compañeros, que por ellos se volvió más bonita la vida universitaria, siempre les tendré presente.

DEDICATORIA

A Dios, por una vida bendecida, a mi papi Iván y mi mami Bella, por su sacrificio, amor incondicional y apoyo constante que me han brindado en todas mis decisiones; a mi hermano Iván, por ser siempre mi compañía; a Isabella, por ser la luz de mi vida; a mis familiares y amigos, que siempre estuvieron a mi lado acompañándome en cada uno de mis logros.

Con cariño, Samantha.

Contenido

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	9
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE ECUACIONES	11
RESUMEN	12
ABSTRACT	12
1 INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 ANTECEDENTES	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	17
CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO	20
CENTRAL HIDROELÉCTRICA	20
2.1 Energía eléctrica en el Ecuador	20
2.2 Capacidad de generación hidroeléctrica en el Ecuador	21
2.3 Tipos centrales hidroeléctricas	24
2.3. 1 Central hidroeléctrica de embalse.....	24
2.3.2 Central hidroeléctrica con agua afluyente o filo de agua	24
2.3.3 Central hidroeléctrica por bombeo	25
2.4 Datos de la central hidroeléctrica Abanico.....	25
2.4.1 Descripción del funcionamiento.....	25

2.5 Importancia del hidrógeno.....	28
2.5.1 Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno	30
2.6 Casos de producción de hidrógeno en el mundo	31
2.7 Formas de obtener hidrógeno	32
2.7 Producción de hidrógeno por electrólisis	33
2.7.1 Tipos de electrólisis	34
2.8 Análisis energético	37
2.9 El hidrógeno como combustible.....	38
2.10 Programa de control y monitoreo	39
CÁPITULO 3 METODOLOGÍA.....	41
3.1 Esquemas.....	41
3.1.1 Esquema del proyecto.....	41
3.1.2 Esquema de operaciones.....	42
3.2 Descripción de la planta prototipo.....	43
3.3 Obtención de datos	44
3.4 Producción de hidrógeno mediante electrolizador PEM.....	45
3.5 Análisis de costos	46
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
4.1 Resultados de la producción de hidrógeno.....	49
4.2 Discusión	51
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
5.1 Conclusiones.....	52

5.2 Recomendaciones	52
Bibliografía.....	54
ANEXOS	69
Anexo 1. Precios de generadores privados en el Ecuador.....	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: MAPA DE UBICACIÓN DE LA CENTRAL HIDROABANICO	18
ILUSTRACIÓN 2: PROYECCIÓN DE COSTOS DE ELECTROLIZADORES ALCALINOS (AEL) Y PEM (PEMEL) AÑOS 2020 A 2030.	19
ILUSTRACIÓN 3: HISTÓRICO DE PRODUCCIÓN ELÉCTRICA EN EL ECUADOR 1999 - 2021 ...	23
ILUSTRACIÓN 4: ENERGÍA PRODUCIDA POR CADA CENTRAL HIDROELÉCTRICA EN EL ECUADOR	24
ILUSTRACIÓN 5: TUBERÍA DE PRESIÓN	26
ILUSTRACIÓN 6: BIFURCADORES	27
ILUSTRACIÓN 7 TURBINAS INSTALADAS.....	27
ILUSTRACIÓN 8 CASA DE MÁQUINAS	28
ILUSTRACIÓN 9: CLASIFICACIÓN DEL HIDRÓGENO POR COLORES	32
ILUSTRACIÓN 10: ELECTROLIZADORES COMERCIALES DE LA MARCA NEL	37
ILUSTRACIÓN 11 – ESQUEMA DEL PROYECTO.....	41
ILUSTRACIÓN 12: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL PROYECTO.....	43
ILUSTRACIÓN 13: TIPOS DE ELECTROLIZADORES	44
ILUSTRACIÓN 14: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE.....	46
ILUSTRACIÓN 15 - PRECIOS HIDROELÉCTRICAS PRIVADAS.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL ECUADOR	22
TABLA 2 PRODUCCIÓN PROMEDIO Y PORCENTAJE REQUERIDO	50
TABLA 3 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.....	50

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 2 ECUACIÓN GENERAL DE LA ELECTRÓLISIS	34
ECUACIÓN 6 SEMI REACCIÓN ALCALINA ANÓDICA	35
ECUACIÓN 7 SEMI REACCIÓN ALCALINA CATÓDICA	35
ECUACIÓN 8 REACCIÓN ALCALINA COMPLETA.....	35
ECUACIÓN 9 SEMI REACCIÓN ANÓDICA MÉTODO PEM	36
ECUACIÓN 10 SEMI REACCIÓN CATÓDICA MÉTODO PEM.....	36
ECUACIÓN 11 REACCIÓN COMPLETA MÉTODO PEM	36

RESUMEN

El estudio se centra en la evaluación de un proyecto de generación de hidrógeno a partir de la energía generada por Hidroabanico. A lo largo de un período de 13 años, se analizó la producción energética mensual promedio y se determinó el 20% de esta energía para ser destinada a la producción de hidrógeno. Se proporcionó una descripción detallada del funcionamiento de la planta prototipo, basada en la tecnología de electrolizadores PEM. Este sistema tiene una demanda energética anual de 62 439 MWh, lo que resulta en una producción de 11 239 kg de hidrógeno.

ABSTRACT

The study focuses on the evaluation of a hydrogen generation project from the energy generated by Hidroabanico. Throughout a period of 13 years, the average monthly energy production was analyzed and 20% of this energy was determined to be used to produce hydrogen. A detailed description of the operation of the prototype plant, based on PEM electrolyser technology, was provided. This system has an annual energy demand of 62,439 MWh, which results in the production of 11,239 kg of hydrogen.

1 INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento en la economía global ha hecho que los diferentes sectores energéticos requieran más recursos. Esto ha provocado graves consecuencias que ha influido negativamente en aspectos ambientales y sociales (Wang, Xing, & Chen, 2019) (Zhu, Li, Li, & Zhou, 2020).

Uno de los principales impulsores del desarrollo industrial es el acceso a la energía basada en fuentes no renovables como el petróleo o el carbón para la producción de energía eléctrica. Su uso intensivo ha causado un deterioro ambiental local y global. Por ello se requiere disminuir su uso para disminuir los efectos del cambio climático. Estos sistemas que utilizan recursos no renovables para la generación de energía (Liu, y otros, 2023), y producen emisiones de gases de efecto invernadero provocando un impacto negativo en el aire de las ciudades (Khrouz, Gkanas, Du, & Wood, 2018) (Yao, y otros, 2022). Esta es una de las razones por la que muchos países se han puesto como objetivo la reducción del carbono en su producción de energía (Kim, Kim, Byun, & Lim, 2021).

Conscientes de esta problemática, en el año 2018 la inversión mundial en energías renovables alcanzó los 289 000 millones de dólares y la financiación para la nueva capacidad de generación fue casi tres veces más que el sector del carbón y el gas (BloombergNEF, 2020). En el caso de América Latina, la inversión en 2019 alcanzó los US\$ 19,6 mil millones, la más alta de los últimos 5 años, liderada por Brasil con el 35% de contribución (Re, Dong, Xu, & Hu, 2020). Ecuador no es ajeno a esta situación, durante la última década, la capacidad instalada de las centrales hidroeléctricas aumentó en un 148%. El aporte de las energías que emplean recursos renovables, que era el 43,5% de la demanda eléctrica del país en 2006 (CONELEC, 2007), pasó a ser del 78,13% en 2019 (ARCONEL, 2020).

La búsqueda de opciones para realizar el reemplazo de la matriz energética actual basada en el uso de combustibles fósiles es muy variada. Esto ha propiciado el desarrollo de tecnologías como la eólica, solar e hidroeléctrica, las cuales por el momento no alcanzan a satisfacer toda la demanda. Por lo que se buscan alternativas para almacenar la energía producida.

Uno de los grandes problemas de la generación energética con este tipo de tecnología es su intermitencia, ya que al depender de factores climáticos variables no se tiene una producción constante (Rehman, Al-Hadhrami, & Alam, 2015). Ante este escenario, la

obtención de energía a partir de fuentes renovables se ha convertido un aliado imprescindible frente al calentamiento global (Dala Catumba , y otros, 2023). Actualmente se plantean alternativas para el almacenamiento de energía con la finalidad de almacenarla en las horas de alta demanda (Morante, 2014). Por lo que la utilización del hidrógeno (H_2) como vector energético está siendo considerada cada vez con mayor intensidad, pues proporciona una alternativa idónea para complementar la producción de energía renovable hidroeléctrica, al ser versátil y no contaminante.

1.1 ANTECEDENTES

Los sistemas energéticos están cambiando en todo el mundo debido a una variedad de factores, que incluyen:

- Aumento de la demanda de energía provocada por la globalización y el crecimiento económico de los países;
- Mayor participación de las energías renovables en la matriz energética global;
- La implementación de restricciones a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) incluida la reducción de CO₂ en la producción de energía;
- La necesidad de limitar la contaminación atmosférica local y global;
- Cumplir con los requisitos de seguridad y confiabilidad energética;

El hidrógeno es un elemento químico que está presente de manera abundante en la naturaleza y puede obtenerse de fuentes renovables y no renovables (Behroozsarand, Zamaniyan, & Ebrahimi, 2010). La producción de energía eléctrica mediante el uso de hidrógeno es una opción, que en la actualidad está siendo investigada y desarrollada por la comunidad científica internacional.

Con el almacenamiento de energía se pretende mejorar las capacidades de generación de los sistemas energéticos (Villagrán, 2017). Existen algunas tecnologías de almacenamiento de energía siendo las más representativas térmica, gravitacional (sistemas hidráulicos) y la química (baterías e hidrógeno) (San Martín, Zamora, San Martín, Aperribay, & Eguía, 2011).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar el potencial y los posibles usos del hidrógeno, obtenido de la central hidroeléctrica Abanico, ubicado en la provincia de Morona Santiago.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener información histórica sobre la producción de energía eléctrica de la central hidroeléctrica Abanico.
- Calcular el potencial del hidrógeno electrolito y definir las aplicaciones posibles a realizarse a partir de la energía obtenida mediante el proceso de electrólisis del hidrógeno.
- Realizar un análisis técnico y económico de la infraestructura requerida para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Actualmente es urgente descarbonizar el sector energético, particularmente la producción de electricidad, lo que ha impulsado el desarrollo y uso de fuentes de energía renovables. Sin embargo, por naturaleza, estas fuentes son intermitentes y no siempre se adaptan a la demanda energética variable de la sociedad. Todo esto implica que el uso eficiente de estos recursos primarios de fuentes de energía debe contemplar la incorporación de tecnologías de almacenamiento de energía para mejorar el desempeño de la infraestructura existente (Posso Rivera, Zalamea, Espinoza, & Gonzalez, 2022).

En este proyecto analiza la producción de hidrógeno electrolítico a partir de la generación de la central hidroeléctrica Abanico. Esta central está ubicada al suroriente del Ecuador, en la provincia de Morona Santiago a una distancia aproximada de 15 kilómetros de la ciudad de Macas. Hidroabanico tiene cinco turbinas proporcionando una potencia total de 37,50 MW de energía renovable. Esta central no tiene un embalse es decir el caudal excedente es descargado por vertedero y desagües de fondo (Hidroabanico, 2021).

La central está ubicada en las coordenadas 2°15'30'' norte y 78°11'54''sur (PUCE, 2014). Se encuentra en una zona de bosque húmedo en la cordillera del Tigrillo. El río Abanico es el que abastece de agua a la central y forma parte de la cuenca hidrográfica de Santiago. Las estructuras pertenecientes a la central están situadas a una altura aproximada de 940 a 1 500 m.s.n.m. (Worldbank, 2004) (GADMCS, 2014). La Ilustración 1 muestra la ubicación de la central de hidro-electricidad Abanico.

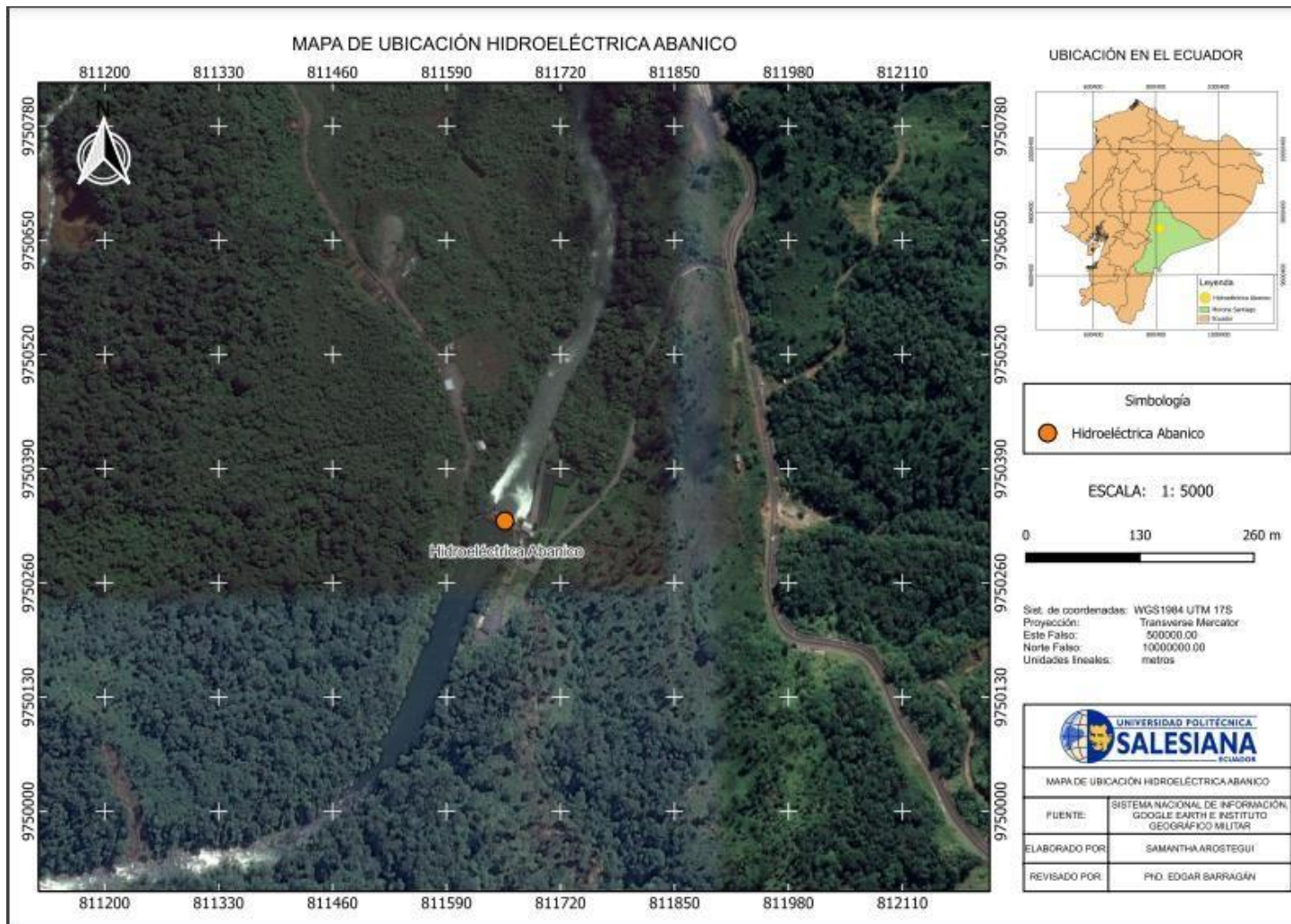


Ilustración 1 de ubicación de la central Hydroabanico

Fuente: (Autora)

El análisis de este trabajo se enfoca en plantear un escenario en el que se destine un porcentaje de la energía para la producción de H₂. Es por esto que se va a utilizar el 20% ya que la empresa Hidroabánico solicitó este porcentaje para su valoración de la energía hidráulica que ingresa a la central. Esta energía va a abastecer a un sistema de almacenamiento de energía con la finalidad de aprovechar parte de la producción de generación de este proyecto hidroeléctrico.

Para la producción de H₂ se seleccionó un electrolizador PEM por sus beneficios técnicos y económicos. Según el estudio realizado por (Resksten, Thomassen, Møller-Holst, & Sundseth, 2022), de la comparación de costos entre electrolizadores alcalinos y PEM en función de la capacidad eléctrica de la planta. Se concluyó que los costos de capital para los sistemas PEM disminuyen significativamente en plantas de mayor capacidad. En la Ilustración 2 se muestra la curva resultante de la proyección del estudio de costos en el año 2020 y 2030. Por otra parte, la tasa de aprendizaje consiguiente es del 36% para los PEM y del 25% para los alcalinos.

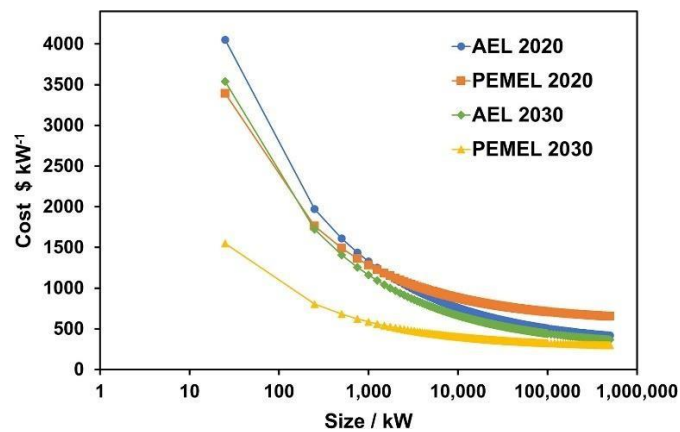


Ilustración 2: Proyección de costos de electrolizadores alcalinos (AEL) y PEM (PEMEL) años 2020 a 2030.

Fuente: (Resksten, Thomassen, Møller-Holst, & Sundseth, 2022)

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

CENTRAL HIDROELÉCTRICA

2.1 Energía eléctrica en el Ecuador

Para el 2020, alrededor del mundo más de 14 000 centrales hidroeléctricas se encontraban operativas. Esta tecnología es ampliamente conocida y utilizada en más de 180 países ya que se ha adaptado a las condiciones de cada región. Generando un gran beneficio para la sociedad con la producción de energía (Llamosa & Sovacool, 2021) (ICOLD, 2021). La Agencia Internacional de Energías Renovables estableció que en 2016 más de 1 000 millones de personas cubrieron su demanda de energía con hidroeléctrica, siendo la tercera fuente de generación eléctrica y la primera de las renovables (IRENA, 2019).

Las nuevas expectativas en torno a la energía primaria son la disminución de la demanda hasta 2060. Mientras que la demanda per cápita alcanzará su punto máximo antes del 2030 como resultado de las nuevas tecnologías y políticas energéticas (WEC, 2017).

La energía hidroeléctrica producida está representada por el 52% de las necesidades energéticas de Latinoamérica y el Caribe, teniendo una capacidad instalada de 47% de la capacidad de generación en la región (Roca, 2018). Según los datos históricos en 1999 Ecuador alcanzo a cubrir con las necesidades de energía eléctrica al 88% de la población. Luego paso a 97,33% en el año 2017, ubicando al país entre los países con mayor cobertura en Latinoamérica y el Caribe (Tejeda, Durán, Jiménez, & Doyle, 2017).

En los últimos años Ecuador ha promovido la diversificar las fuentes energéticas siendo las renovables las de mayor crecimiento e importancia. Mediante esta implementación se busca reducir la dependencia de combustibles fósiles en el sector energético (Senplades, 2018). Gracias a esta producción el país ha logrado cierta soberanía energética e incluso ha exportado energía a naciones vecinas. En el año 2011 el Sistema Nacional Interconectado tenía 2 338 megavatios y paso a tener 4 715 megavatios en 2017 de potencia instalada. Duplicando así la capacidad de generación eléctrica (MEER, 2017). Actualmente se tiene una participación del 92% las centrales hidráulicas, 7% de térmicas y el 1% restante de fuentes no convencionales (MEM, 2020). Existe controversia en torno a las grandes centrales hidráulicas ya que por su tamaño causan un mayor impacto ambiental. Es por esto que algunos autores consideran que estas centrales no se calificarían dentro de las energías renovables.

Actualmente las 5 centrales hidroeléctricas más grandes del Ecuador son: Coca Codo Sinclair, Paute-Molino, Sopladora, Minas-San Francisco y San Francisco con una potencia nominal de 1 500 MW, 1 075 MW, 487 MW, 275 MW y 230 MW respectivamente. De las centrales mencionadas Paute-Molino es la única central que cuenta con embalse, las otras son de pasada (Chanataxi, Montalván, & Santillan, 2021).

2.2 Capacidad de generación hidroeléctrica en el Ecuador

Desde el año 2007 a 2017, el país invirtió cerca de USD 6 mil millones en ocho proyectos hidroeléctricos (Manduriacu, Sopladora, Delsitanisagua, Mazar Dudas, Minas-San Francisco, Quijos, Toachi Pilatón y Coca Codo Sinclair) para duplicar su capacidad de generación (MERNNR, 2018). Según la Asociación Internacional de Energía Hidroeléctrica, Ecuador ocupó el tercer lugar después de China y Brasil entre los países que agregaron nueva capacidad en 2016 (IHA, 2020).

Mediante datos oficiales en el Ecuador el consumo eléctrico promedio por persona en el año 2021 fue de 1 537 kWh (ARCERNNR, 2022). La demanda de energía eléctrica de una ciudad, región, o país, tiene una variación a lo largo del día. Esta variación es función de muchos factores, entre los que se destacan:

- Tipos de industrias existentes en la zona y turnos que estas realizan en su producción;
- Tipo de cocina doméstica que se utiliza más frecuentemente;
- Tipo de calentador de agua que se utilizan en domicilios;
- La estación del año;
- La hora del día en que se considera la demanda.

La generación de energía eléctrica varía de acuerdo con una curva de demanda. Es por esto que a medida que aumenta el consumo de energía en ciertas horas del día, también la producción de energía eléctrica deberá incrementarse. Por lo tanto, se puede iniciar el funcionamiento con unidades adicionales en una misma central. También se puede comenzar la generación en centrales de reserva.

En la Tabla 1 se detallan las hidroeléctricas más importantes por el aporte energético. Se especifica su ubicación, tipo de central y la potencia que genera cada una. Toda esta infraestructura aporta energía al Sistema Nacional Interconectado (SNI).

Tabla 1 Centrales hidroeléctricas del Ecuador

Fuente: (Observatorio de la electricidad, 2021)

Hidroeléctricas	Ubicación	Tipo	Potencia nominal (MW)	Potencia efectiva (MW)
Coca Codo Sinclair	Napo- El Chaco	Pasada	1.500,00	1.476,00
Paute – Molino	Azuay- Sevilla de Oro	Embalse	1.075,00	1.100,00
Sopladora	Azuay- Sevilla de Oro	Pasada	487,00	486,00
Minas san Francisco	Azuay- Pucara	Pasada	275,50	274,50
San Francisco	Tungurahua- Baños de Agua Santa	Pasada	230,00	212,00
Delsitanisagua	Zamora Chinchipe- Zamora	Pasada	180,00	180,00
Mazar	Azuay- Sevilla de Oro	Embalse	170,00	170,00
Agoyàn	Tungurahua- Baños de Agua Santa	Embalse	160,00	156,00
Pucará	Tungurahua- Píllaro	Embalse	73,00	73,00
Manduriacu	Imbabura- Cota cachi	Pasada	63,36	65,00
Marcel Laniado	Guayas- El Empalme	Embalse	213,00	213,00
Hidro San Bartolo	Morona Santiago- Santiago	Pasada	49,98	49,95
Due	Sucumbíos- Gonzalo Pizarro	Pasada	49,71	49,71
Normandía	Morona Santiago- Morona	Pasada	49,58	49,58
Baba	Los Ríos- Buena Fe	Embalse	42,20	42,00
Cumbayá	Pichincha- DMQ	Pasada	40,00	40,00
Pusuno	Napo- Tena	Pasada	38,25	38,25
Abanico	Morona Santiago- Morona	Pasada	38,45	37,99
Topo	Tungurahua- Baños de Agua Santa	Pasada	29,20	27,00
Ocaña	Cañar- Cañar	Pasada	26,10	26,10

En la Ilustración 3 se detalla la producción energética histórica del país desde el año 1999 a 2021, las centrales hidroeléctricas han sido fundamentales ya que representan el mayor porcentaje del consumo energético de Ecuador. El crecimiento de la producción energética mediante proyectos hidráulicos desde 1999 a 2021 se ha quintuplicado haciendo que el país tenga un gran porcentaje de participación de energías renovables. Las grandes hidroeléctricas han provocado que se disminuya la dependencia de las centrales termoeléctricas para la producción energética.

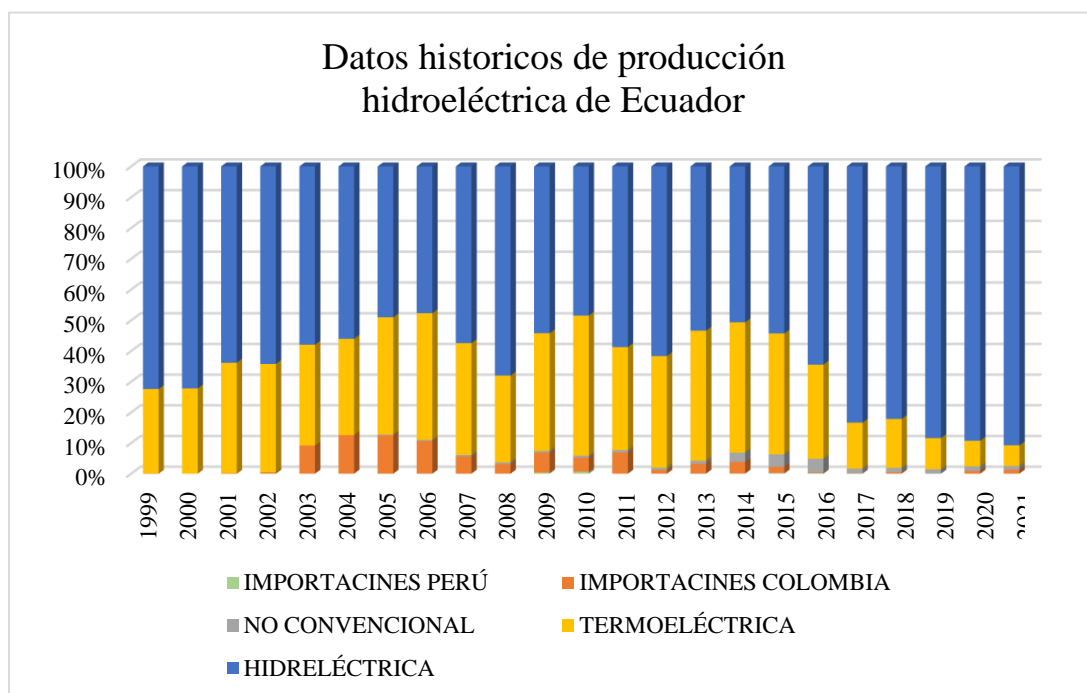


Ilustración 3: Histórico de producción eléctrica en el Ecuador 1999 - 2021

Fuente: adaptado de (CENACE, 2021)

En el año 2021 Ecuador produjo 28 023,24 GWh de energía eléctrica bruta. Teniendo una participación de 25 429,18 GWh de las centrales hidroeléctricas (CENACE, 2021). En el Ilustración 4 se representa la producción anual bruta del año 2021 de las centrales que operan en el país siendo las dos más grandes Coca Codo Sinclair y Paute. Por otra parte, Hidroabanico género en ese año 1,46 % con respecto al total de la producción hidroeléctrica del país. Por las condiciones climáticas de la región el estado ha invertido en este tipo de tecnología desde hace más de 20 años ya que las condiciones hídricas son favorables para este tipo de procesos de producción eléctrica.

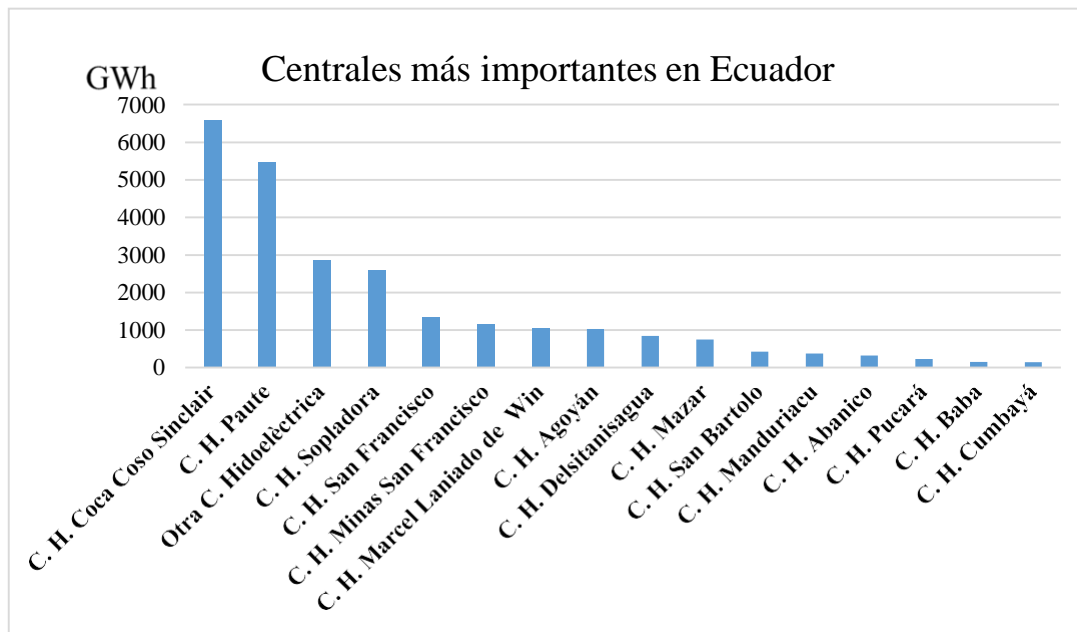


Ilustración 4: Energía producida por cada central hidroeléctrica en el Ecuador

Fuente: adaptado de (CENACE, 2021) 2.3 Tipos centrales hidroeléctricas

Las hidroeléctricas se pueden clasificar de diferentes maneras ya que poseen características semejantes como su construcción, tecnología, capacidad de generación y tipo de turbina, entre otras. Es por esto que hay distintos tipos de centrales y se las clasifican según las condiciones del proyecto (Sanz , y otros, 2016). En este documento se analiza tres tipos de hidroeléctricas que son las más representativas y usuales en Ecuador y el mundo.

2.3. 1 Central hidroeléctrica de embalse

La manera de operación de estas centrales es en el aprovechamiento de la energía potencial del agua que está contenida en un embalse. Se conduce el fluido por tuberías, transformando la energía potencial en energía cinética, para que ingresen en las turbinas con la finalidad poder generar energía eléctrica (Villagrán, 2017). Este sistema funciona por el aprovechamiento de la gravedad y la altura neta en que se encuentra el agua (Forsund, 2015). Estas centrales tienen la capacidad de seleccionar el periodo de tiempo en que van a producir energía. Una característica que define a este tipo de tecnología es la capacidad de almacenar grandes cantidades de agua. Gracias al embalse se puede regular caudales de ríos, evitar inundaciones, abastecimiento de agua para el consumo humano, riego y usos industriales (Sanz , y otros, 2016).

2.3.2 Central hidroeléctrica con agua afluente o filo de agua

La principal característica de este tipo de centrales es que no tiene una represa o reservorio. Aprovechando el caudal del río en donde están emplazadas para la generación energética (Hernández & Hernández , 2017). El agua sobrante se derrama por el aliviadero o desagüe y sigue el cauce del río. Las principales peculiaridades de estas hidroeléctricas es la poca altura y el gran caudal (Ceballos & Macas , 2012). Es común que estas centrales tengan un canal y un azud. El primero sirve para conducción del agua para ser turbinada. Por su parte del azud se lo utiliza con la finalidad aumentar el nivel del agua para que la central tenga un caudal constante (Sanz , y otros, 2016).

2.3.3 Central hidroeléctrica por bombeo

Este tipo de tecnología es utilizada para almacenar energía. El concepto de este tipo de centrales es el aprovechamiento de la diferencia de altura entre dos cuerpos de agua para almacenar energía hidráulica potencial (Deane, Ó Gallachóir, & McKeogh, 2010) (Dursun & Alboyaci, 2010). Poseen un embalse convencional o deposito superior y un reservorio que generalmente se encuentra en la parte inferior del proyecto. Teniendo la capacidad de bombear agua del embalse inferior al superior (Cabrales , 2015).

2.4 Datos de la central hidroeléctrica Abanico

La empresa ecuatoriana Hidroabanico (2021) fue creada en el año 2003 mediante capital de inversionistas privados. La producción energética de esta hidroeléctrica reduce el consumo de 23 millones de galones de diésel por año. Evitando de esta manera que se genere 195 570 toneladas de dióxido de carbono (CO₂). Como se mencionó anteriormente esta central está ubicada a 15 kilómetros de la ciudad de Macas. El caudal requerido del río Abanico es de 12,5 m³/s, el mismo que se utiliza para alimentar a 5 turbinas. Esta central se construyó en dos fases, la primera con una potencia de 15 MW y la segunda de 22,5 MW entregando un total de 37,5 MW de energía renovable. Esta es una central de agua afluyente o de filo de agua. Este proyecto cuenta con un tanque de carga de 1 897 m³ que alimenta al túnel de carga de 490 metros de longitud con un diámetro de 2,5 metros. Las turbinas son tipo Pelton y tienen una capacidad máxima de procesar 12,5 m³ por segundo. Hidroabanico entrega energía al SIN (Sistema Nacional Interconectado).

2.4.1 Descripción del funcionamiento

El sistema de captación es lateral y posee una rejilla de ingreso al canal de captación rectangular. El agua es conducida a un tanque sedimentador en donde se realiza un tratamiento primario de la captación del río. En el que sedimentan las partículas de

diámetro mediano y pequeño. Otra cara el tanque posee doble cámara (Hidroabánico, 2021).

Al final del sedimentador se ubica el tanque regulador, que permite regular el caudal de agua que ingresa a las tuberías de conducción. Las dimensiones de este tanque son de 35 m de longitud y 10 m de ancho para obtener un volumen útil de 1850m³ (Aguilera, 2013).

En la Ilustración 5 se representa la tubería metálica de conducción del agua de 2.3 kilómetros de longitud y diámetros entre los 1.50 y 1.80 metros hacia el poso o tanque de carga que es un depósito para almacenar el agua en un volumen máximo de 1897.00 metros cúbicos, los cuales se van a turbinar.



Ilustración 5: Tubería de presión

Fuente: (SIPETROL S.A, 2008)

El agua captada de río se conduce mediante tubería de presión de acero, (longitud de 490 m, un desnivel de 350 m y diámetro de 2.50 m). En la Ilustración 6 está el bifurcador en donde es distribuida el agua a las tuberías de presión en el que están instalados los diferentes inyectores. Los que expulsan el agua hacia las paletas de las cinco turbinas Pelton ubicadas en casa de máquinas como se muestra en la Ilustración 7.



Ilustración 6: Bifurcadores
Fuente: (SIPETROL S.A, 2008)



Ilustración 7 Turbinas instaladas
Fuente: (SIPETROL S.A, 2008)

La Ilustración 8 es encuentra la casa de máquinas que es un proyecto esencial para el proyecto hidroeléctrico. Esta casa de máquinas alberga los paneles y el sistema automatizado utilizado para el control y operación de todo el proyecto. Estos sistemas permiten tener un mejor control y monitoreo de los procesos.



Ilustración 8 Casa de máquinas

Fuente: (SIPETROL S.A, 2008)

Una vez que el agua ha cumplido su cometido de mover las turbinas y al no haberse visto alterada en sus propiedades físicas ni químicas. Los $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ son evacuados por dos tuberías de descarga al río Balaquepe, que tiene una longitud de 3.3 km. Este fue reconformado con muros-gaviones, piedra y la construcción de 42 rompe velocidades. El Balaquepe desemboca en el río Jurumbaino que desemboca en el río Upano. La subestación Hidroabánico cuenta con un transformador de 18 MVA para la primera etapa y un transformador de 27 MVA para la segunda etapa. Se conectan con la línea de transmisión de 69 kv y una longitud de 12 kilómetros a la subestación Macas, en río blanco propiedad de Transelectric, en donde se conecta al Sistema Nacional Interconectado (SIN).

La energía producida de Hidroabánico es entregada al SNI. Teniendo prioridad de consumo esta energía ya que es una central que no tiene embalse y por lo tanto no se puede almacenar. Según los datos históricos de CENACE (2021) esta hidroeléctrica tiene un factor de planta (FP) de 94,67%. Esto hace que este proyecto tenga uno de los FP más altos del país. Este factor ha sido variable en el transcurso de los años, pero no ha bajado del 90% desde donde se tiene datos.

2.5 Importancia del hidrógeno

La energía se ha convertido en una necesidad básica en los seres humanos a lo largo de la historia y cada vez se requiere más. Aunque los recursos fósiles han sido tradicionalmente los más representativos en el mercado energético las energías renovables han alcanzado un gran desarrollo (Peszko, y otros, 2020). Es por esto que cada vez diferentes países del mundo van diversificando los procesos de producción energética (Chalvatzis & Ioannidis, 2017). Se necesitan sistemas energéticos a gran escala que ayuden a disminuir los gases de efecto invernadero y las fuentes renovables son una gran opción.

El hidrógeno desempeña un papel valioso para almacenar energía dentro de los sistemas energéticos des carbonizados. Por lo tanto, para hacer la transición a una economía de hidrógeno debe analizarse el almacenamiento adecuado. Consiguiendo ser producido por diferentes procesos, en este momento se está dando énfasis en los procesos que tiene bajas emisiones (Ruth, y otros, 2020) (Wolff-Boenisch, Abid, Tucek, Keshavarz, & Iglauer, 2023). El hidrógeno fue descubierto como un elemento en 1671 por Robert Boyle y es representado por el símbolo H (Moeckel, 2018). Actualmente una de las maneras de producción de H₂ es mediante electrólisis con la finalidad de posteriormente usarlo en celdas de combustible de hidrógeno, mezcla con gas natural y subsiguientemente generar electricidad (Dumont, y otros, 2020) (Amil & Zeki, 2020).

Las principales ventajas del almacenamiento de energía con H₂ es la gran capacidad de contención de energía, largos periodos de almacenamiento, no contaminante y limpio (Qin, y otros, 2023). Una de las peculiaridades de este tipo de sistemas es la capacidad de integración con los diferentes tipos de energías renovables (Zhou, y otros, 2022). Acoplado esta tecnología a las fuentes renovables se mejora significativamente la eficiencia para la producción de hidrógeno (Kiryanova, Matrenin, Mitrofanov, Kokin, & Safaraliev, 2022).

Haciendo una comparación con las baterías electroquímicas que son usadas ampliamente en sectores como el transporte, electrónica y red eléctrica. Estos sistemas tienen gran versatilidad, son económicos y confiables (Zhang, Campana, Lundblad, & Yan, 2017) (Hajiaghahi, Salemnia, & Hamzeh, 2019). Pero la producción de estas baterías de ion de litio genera una gran contaminación en su producción y disposición final. Por este motivo el hidrógeno verde se perfila como una solución para descarbonizar los sistemas energéticos. Teniendo una alta densidad energética y bajas emisiones de carbono (Yue, y otros, 2021). Una de las principales ventajas es que se puede almacenar por largos periodos

de tiempo y no cambia sus propiedades (Le, Nguyen, Bui, & Ngo, 2023). Por el contrario las baterías pierden su capacidad de almacenamiento.

2.5.1 Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno

Se mencionan a continuación:

- Estado: A 25°C y 1 atm (101,325 kPa) está en estado gaseoso.
- Temperatura de fusión: $T^{\circ fu} = -259,2^{\circ}C$
- Temperatura de ebullición: $T^{\circ eb} = -252,77^{\circ}C$
- Temperatura crítica: $T^{\circ cri} = -239,96^{\circ}C$
- Masa atómica: $MH = 1,007940 \text{ kg/kmol}$
- Masa molecular: $MH_2 = 2,01588 \text{ kg/kmol}$
- Constante específica del gas: $R' = 4.124,3 \text{ J/ (kgK)}$
- Constante de difusión: $D = 0,61$
- Calor específico a presión constante: $C_p = 28,623 \text{ kJ/(KmolK)}$
- Calor específico a volumen constante: $C_v = 20,309 \text{ kJ/ (kmolK)}$
- Densidad del gas: A 20°C y 1 atm, $\rho_{gas} = 0,0899 \text{ kg/m}$
- Densidad del líquido: A -253°C y 1 atm, $\rho_{liq} = 70,8 \text{ kg/m}^3$

Los isótopos naturales del H₂ que se pueden encontrar son tres:

- ❖ Protio, con una abundancia del 99.98% de los átomos de hidrógeno
- ❖ Euterio, con una abundancia de 0.02%
- ❖ Tritio, que sólo puede ser obtenido por el bombardeo de neutrones

El H₂ ha sido estudiado como un aportador de energía diferente que las tecnologías tradicionales. Tiene una alta densidad energética que puede proporcionar tres veces más energía por unidad de masa que la gasolina (Nicoletti, Arcuri, Nicoletti, & Bruno, 2015).

Mediante el proceso de la licuefacción se altera las propiedades del gas haciendo que su transporte sea más fácil. Aplicando bajas temperaturas se logra que el hidrógeno cambie su estado gaseoso a líquido. La gran ventaja de hacer este proceso es la reducción de espacio en los contenedores donde se va a almacenar (Moeckel, 2018). Pero este proceso consume grandes cantidades de energía lo que le hace poco eficiente.

Además, la cualidad de vector energético le otorga un gran potencial como instrumento para el almacenamiento energético y la integración sectorial industrial. Por lo que se

debería considerar esencial la creación y el fomento de un entorno favorable para la oferta y demanda de hidrógeno verde.

Cualquier nuevo marco ha de priorizar, en la primera fase de despliegue, los proyectos de producción de hidrógeno renovable vinculados al uso final de la industria, así como los de movilidad sobre otras opciones. En este sentido, jugará un papel muy importante la creación de “valles o clústeres de hidrógeno”, donde se concentre espacialmente la producción, transformación y consumo aprovechando la aplicación del concepto de economías de escala, así como el desarrollo de proyectos piloto vinculados, entre otros, a los sistemas energéticos aislados y al sector transporte. La industria que utiliza hidrógeno como materia prima (refino de petróleo, fertilizantes y productos químicos, entre otros) tiene un gran potencial para impulsar la producción de hidrógeno renovable a corto plazo (MITERD, 2020).

2.6 Casos de producción de hidrógeno en el mundo

En la búsqueda constante de soluciones energéticas más limpias y sostenibles, el hidrógeno emerge como una alternativa prometedora en diversas partes del mundo. Ejemplos concretos de su adopción y aplicaciones se presentan en distintos contextos, destacando la versatilidad y potencial de esta fuente de energía.

Como es el caso de Turquía que utiliza el 1,6% de la energía instalada en forma de hidrógeno, este gas se utiliza principalmente para la producción de amoníaco. La planta de hidrógeno establecida en la ciudad de Haliç produce hasta 65 kg diarios con un electrolizador alimentado por energía renovable y puede almacenar hasta 100 kg (Amil & Zeki, 2020). Por otra parte, un estudio realizado en Níger donde se analizaron 3 escenarios para la producción de H₂. La opción que tuvo mejores resultados fue la que tenía un potencial de generación de 1959 TWh. Con la tecnología PEM se proyectó una producción de 35,58 millones de toneladas de H₂. Teniendo una demanda de agua de 641,87 millones de m³ (Bhandari, 2022). En la federación rusa se contempla un plan de producción de hidrógeno para la industria de la siderurgia. La capacidad del electrolizador PEM es de 500 kW teniendo una producción aproximada de 16 200 kg/año (Galitskaya & Zhdaneev, 2022).

Un caso muy particular de producción de H₂ es el de la empresa japonesa Hydro Q-Bic que plantea una planta piloto para el abastecimiento energético para un edificio de comercial. Este estudio se lo realizó con la finalidad de reducir las emisiones teniendo

una disminución del 50% en comparación con una edificación común. Este sistema produjo 3,56 kg de hidrógeno por día (Segawa, Endo, Shimoda, & Maeda, 2022).

2.7 Formas de obtener hidrógeno

La producción u obtención del hidrógeno se la realiza mediante la separación de los átomos de una molécula. Con la utilización de sustancias hidrogenadas, como el agua, el metano, hidrocarburos y también, por reformado de combustibles fósiles, mediante la utilización de una gran variedad de tecnologías. Basadas principalmente en la electrólisis y en procesos termoquímicos.

Existen muchas técnicas para obtener hidrógeno y según su proceso se clasifica por colores. En la Ilustración 9 se menciona a los tres tipos (principales) el gris, verde y azul. El H₂ gris se fabrica quemando combustibles fósiles por lo general gas natural o carbón. El hidrógeno verde es el que utiliza energías renovables para alimentar a un electrolizador. El azul se deriva de los combustibles fósiles. Sin embargo, absorbe parte del CO₂ producido (Patanaik, Pattanaik, Bagal, & Rath, 2023).

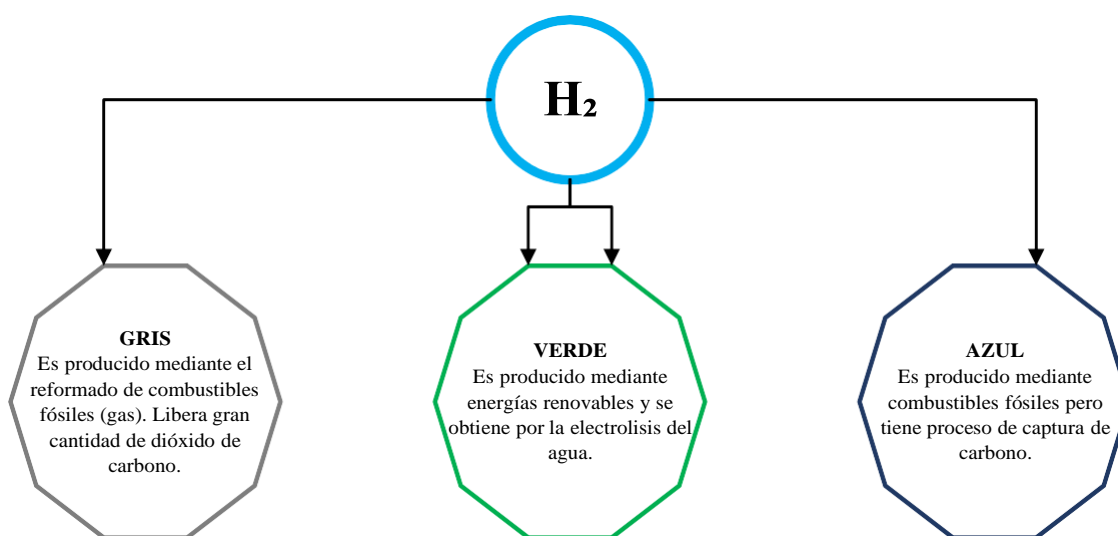


Ilustración 9: Clasificación del hidrógeno por colores

Fuente: Adaptado de (Departamento Técnico, 2018)

El H₂ verde es amigable con el medio ambiente ya que tiene bajas emisiones de carbono y es generado con energías renovables. Se le considera el más limpio de esta clasificación y el de más importancia para esta investigación. Mientras que el gris es el más nocivo ya que su producción tiene una gran carga contaminante. Por su parte el hidrógeno azul dentro de su proceso tiene captura y secuestro de CO₂ disminuyendo las emisiones en su producción (AlNouss, McKay, & Al-Ansari, 2020).

Es particularmente deseable obtener hidrógeno de fuentes renovables, siendo esta tecnología la más benigna para el medio ambiente en comparación con los muchos otros métodos (Basak, y otros, 2020). Pero estas tecnologías tienen menor competitividad con respecto a los costos y eficiencias. La demanda mundial de H₂ es abastecida mediante combustibles fósiles (Siddiqui & Dincer, 2021). La tecnología más utilizada en los últimos años es el reformado de vapor del gas natural, seguido por el reformado del petróleo y la gasificación del carbón (Rodríguez & Kruse, 2018) (Faraji & Saidi, 2021).

Como se mencionó la mayoría de hidrógeno en la actualidad proviene de combustibles fósiles en lugar de energía renovable (Seçer, Faki, Üzden, & Hasanoğlu, 2020). Sin embargo, los métodos de electrólisis y termólisis se desarrollan constantemente teniendo una mejora significativa. Basan su funcionamiento en la descomposición del agua para obtener H₂ en estado gaseoso (Piazzini, Menin, Antolini, Patuzzi, & Baratieri, 2021).

En la actualidad, constituye un porcentaje minoritario de la extracción total de hidrógeno. Pero cuenta con la ventaja de que puede generarse bajo un marco de producción sostenible con el ambiente. Sin embargo, la electrólisis del agua está recibiendo atención especial como posible actor relevante en el campo de almacenamiento de energía. Ya que los electrolizadores podrían operar cuando la generación de electricidad está disponible a precios bajos o cuando hay excesos de la producción debido a la introducción de renovables (Moeckel, 2018).

Se analiza la producción de hidrógeno mediante el uso de la tecnología de la electrólisis. Aplicada a una central hidroeléctrica prototipo como fuente de la energía primaria para realizar el proceso de separación del hidrógeno y el oxígeno del agua. Con esto se puede incrementar la capacidad instalada de generación de fuentes de energía renovables.

Se están estudiando tecnologías para reducir en costos y potenciar en el uso de energías renovables para la producción de hidrógeno. Esto podría ayudar a implantar las mismas en nuestro país y que el Ecuador se posicione como uno de los productores de hidrógeno a bajo costo. Ya que el costo de la energía en el país es relativamente bajo. Asimismo, se espera que el desarrollo de esta industria contribuya a impulsar una reactivación económica respetuosa con el medioambiente y sostenible.

2.7 Producción de hidrógeno por electrólisis

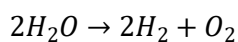
Los países de América del Sur se centran en la reducción del consumo de energía, fomentando una matriz energética más limpia y además reducir la dependencia energética

sobre todo de combustibles fósiles. La hidroelectricidad está presente en muchas zonas de esta región siendo esta tecnología más usada en promedio que el resto del mundo (del Mar Rubio & Tafunell, 2014) (Silvero, Rodrigues, Montelpare, Spacone, & Varum, 2019).

Con la disminución del costo de la electricidad renovable, existe un creciente interés en la producción de hidrógeno electrolítico. Este proceso consume electricidad para extraer H₂ en estado gaseoso (Yue, y otros, 2021). El agua es la mejor fuente de hidrógeno, aunque el proceso de electrólisis del agua se conoce desde hace más de un siglo. Según datos de la Agencia Internacional de Energía EIA, se produce el 4% (63 millones de toneladas) de hidrógeno con este proceso debido al elevado coste de producción. Una posibilidad para la generación de este gas es el uso de energía de fuentes renovables, como turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos y turbinas hidráulicas (Belloti, Rivarolo, Magistri, & Massardo, 2015). En algunos países en desarrollo se caracterizan por poseer una amplia disponibilidad de recursos naturales entre ellos el agua, que es usada para la generación de eléctrica (Rivarolo, Magistri, & Massardo, 2014).

La electrolisis es un proceso particular en el que la molécula de H₂O se divide en hidrógeno y oxígeno producto de la reacción electroquímica. El agua se disocia cuando la energía suministrada es lo suficientemente alta (Burton, Padilla, Rose, & Habibullah, 2021). La corriente continua (CC) alimenta a los electrodos para la división molecular. Actualmente existen algunos tipos de electrolizadores, pero las tecnologías más desarrolladas hasta el momento son dos. Entre ellos, se contemplan los electrolizadores alcalinos (AEL) y electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) (Muñoz, Beleño, Díaz, 2022).

La ecuación química que se produce durante la electrólisis es la siguiente:



Ecuación 1 Ecuación general de la electrólisis

2.7.1 Tipos de electrólisis

Durante el proceso de extracción de hidrógeno por electrólisis se producen dos tipos de reacciones químicas:

Electrolisis alcalina: La reacción empieza cuando la molécula de agua se reduce en el cátodo, generando una molécula de hidrógeno y dos iones de hidroxilo (Lei, Wang, Wang, & Liu, 2019) (Escorihuela, Garcia-Bernabe, & Compañ, 2020). Los iones de hidroxilo se mueven hacia el ánodo a través del diafragma poroso debido a la CC aplicada en los electrodos del sistema, liberando oxígeno y una molécula de agua (Lambert, Pahon, Roche, Jemei, & Hissel, 2021). Este tipo de tecnología utiliza una solución de KOH al 30% en peso o una de NaOH al 25% en peso con una temperatura de funcionamiento de 30 a 80 °C (Wang, Xing, & Chen, 2019). Actualmente, es el más difundido y utilizado en la industria logrando compensar los problemas de corrosión. Pero tiene inconvenientes de baja pureza del gas, densidad de corriente limitada y bajo rango de presión operativa (Li & Baek, 2021) (Lambert, Pahon, Roche, Jemei, & Hissel, 2021).

Semi reacción anódica: $2 OH (aq) \rightarrow 1/2 O_2 + H_2O (liq) + 2e^-$

Ecuación 2 semi reacción alcalina anódica

Semi reacción catódica: $2H_2O (liq) + 2e^- \rightarrow H_2 (g) + 2 OH^-$

Ecuación 3 semi reacción alcalina catódica

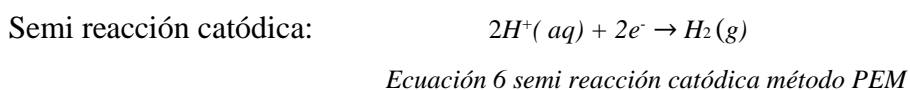
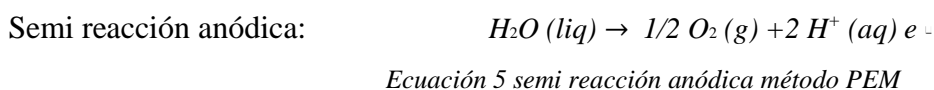
Reacción completa: $H_2O (liq) \rightarrow H_2 (g) + 1/2 O_2 (g)$

Ecuación 4 reacción alcalina completa

Membranas poliméricas o de intercambio de protones PEM (por sus siglas en inglés: proton exchange membrane). Las PEM son utilizadas ampliamente en celdas de combustible para producir electricidad y electrolizadores para producir hidrógeno. Esta tecnología tiene gran popularidad ya que posee una alta conductividad iónica, termo estabilidad, buena resistencia mecánica, estabilidad química, durabilidad a bajas temperaturas y a altos niveles de humedad relativa (Rahim, Salami, Kamarudin, & Hanapi, 2016) (Sun, y otros, 2018) (Escorihuela, Garcia-Bernabe, & Compañ, 2020). Sin embargo, estos electrolizadores tienen algunos inconvenientes dependiendo de la marca.

Requieren mucho tiempo en el proceso, altos precios (catalizador y membrana) y temperatura que no supere los 90 °C ya que afecta a su eficiencia (Dong, y otros, 2017) (Ying, Kamarudin, & Masdar, 2018) (Sun, Simonsen, Norby, & Chatzitakis, 2019). Además, requieren metales como el platino haciendo que el sistema sea más caro (Millet, y otros, 2011).

Los componentes principales de una celda PEM son: las placas finales, placas mono polares, placas bipolares, capas de fusión de gas, capas catalíticas, membrana, colectores actuales y sellos (Escobedo , y otros, 2023). La reacción comienza cuando los iones de hidrógeno se mueven hacia el cátodo a través del PEM debido al potencial eléctrico que es suministrado a los electrodos, liberando media molécula de oxígeno y electrones mediante el proceso de división del agua. Se completa la reacción cuando los iones de hidrógeno se reducen en el cátodo, liberando una molécula de H₂ (Kamaroddin, y otros, 2021).



Para esta investigación se considera la mejor opción los electrolizadores de contenedor. Se consideran una elección favorable por lo que no necesitan mayor inversión en el momento su instalación. En la Ilustración 10 se muestra algunos modelos de este tipo de electrolizadores. Cada modelo tiene distintas capacidades y dimensiones. Los sistemas que se encuentran representados en el esquema son de la empresa (Nel, 2023). Esta tecnología es flexible y puede ser configurados para adaptarse a las condiciones particulares de cada ubicación. Existen 4 tipos de electrolizadores series M, C, H, S. Cada modelo tiene características diferentes lo que permite que se acoplen a los requerimientos del proyecto.

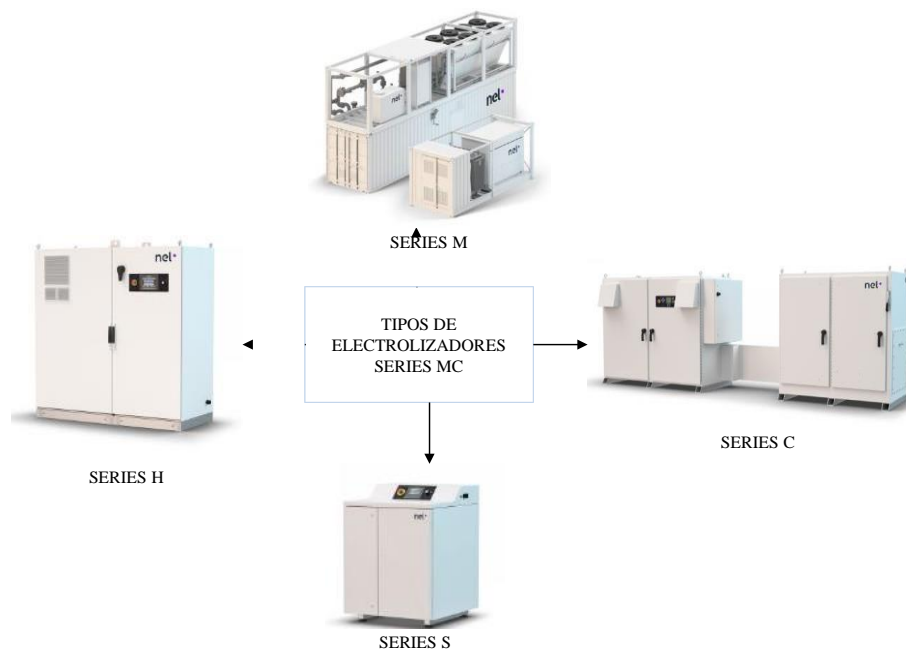


Ilustración 10: Electrolizadores comerciales de la marca Nel

Fuente: (Autora), imágenes tomadas de (Nel, 2023)

2.8 Análisis energético

En definitiva, el hidrógeno ofrece a largo plazo un escenario de ciclo energético cerrado intrínsecamente limpio que constituye el atractivo de este portador de energía. Se trata de tomar agua de la naturaleza, separarla en sus componentes (oxígeno e hidrógeno). Posteriormente mediante electricidad de origen renovable, almacenar el hidrógeno, transportarlo, distribuirlo y finalmente, al utilizarlo. Con procesos termoquímicos o electroquímicos novedosos, devolver a la naturaleza una cantidad de agua similar que fue usada en el proceso (Moeckel, 2018).

El proceso de producción en una planta de hidrógeno a partir de energía eléctrica ya alcanzó eficiencias entre 64-80% (COSKUN et al, 2012; DOE, 2015), y la utilización del hidrógeno para generación de energía eléctrica mediante células a combustible ha ganado mayor credibilidad en los últimos años. El proceso necesita aproximadamente 0,8m³ de hidrógeno para producir 1kWh de energía eléctrica (MATOS, 2013), con eficiencias entre 50-70% para células de intercambio protónico PEMFC, 40% y hasta 90% para células a ácido fosfórico con cogeneración (BADWAL et al, 2014). Sin embargo, se espera que estas eficiencias puedan ser mejoradas significativamente a través de perfeccionamientos en el diseño de componentes, materiales y avances en el control y la integración de procesos (JIANJUN, 2015)

La alianza que el H₂ puede hacer con las energías renovables para la producción de las mismas no tiene limitantes, ya que, siendo un elemento energético de excelentes características electroquímicas, se puede almacenar lo cual contribuye a resolver uno de los inconvenientes principales de la mayoría de dichas energías que es su carácter de intermitencia.

2.9 El hidrógeno como combustible

La electrificación del hidrógeno mediante la combustión se refiere a la generación de electricidad a partir de H₂. Similar al funcionamiento de los motores a gasolina de combustión interna. Algunos motores o turbinas pueden funcionar directamente con H₂. Sin embargo, los motores que combustionan hidrógeno tienen una eficiencia termodinámica de 20% a 25%. Esto provoca que este tipo de tecnología sea menos competitiva que la mencionada anteriormente (Hosseini & Butler, 2019). Esto se debe al hecho que el hidrógeno tiene relativamente un bajo volumen de densidad de energía. Además, estos sistemas de combustión generan óxidos de nitrógeno (Yip, y otros, 2019).

Su principal ventaja en el campo energético es la alta densidad de energía por unidad de masa que está en el rango de:

120 MJ/kg, poder calorífico inferior,

142 MJ/kg poder calorífico superior

Comparado a 11.953 kcal/gr del gas natural, 10.780 kcal/gr de la gasolina, 10.932 kcal/gr del butano y 10.0792 kcal/gr del propano, razón por la cual es utilizado como combustible en las naves espaciales (Nicoletti, Arcuri, Nicoletti, & Bruno, 2015). La mayor desventaja que presenta en su forma gaseosa es el de ser muy liviano, con densidad en condiciones normales de 0.0899 kg/m relativa al aire que es de 0.075kg/m; por lo tanto, con muy baja concentración de energía lo cual hace que en caso de fuga se disuelva inmediatamente en el aire y no exista la posibilidad de explosión en ambientes cerrados al contrario de otros tipos de combustibles (Belloti, Rivarolo, Magistri, & Massardo, 2015).

Estas características hacen que se lo emplee a muy altas presiones, con valores de 15 MPa para uso industrial y de 35 a 70 MPa para uso de combustible en vehículos, aspecto crítico para aplicaciones del H₂ en el transporte. El hidrógeno es un gas no

tóxico para el ser humano y no tiene riesgos de generar contaminación al medio ambiente.

2.10 Programa de control y monitoreo

Para esta investigación se plantea un sistema de control y monitoreo requiere múltiples sensores en varios puntos de operación de la planta de hidrógeno. Estos sensores monitorean el estado del sistema y lo envían a un centro de control. Haciendo posible la resolución del problema de manera más efectiva y segura. Esto explica la variedad de opciones de software disponibles. Monitoreo remoto, control de procesos y análisis de datos son algunos de estos programas.

Control del electrolizador: Para garantizar que el electrolizador, en este caso un electrolizador PEM, funcione al máximo potencial, se requiere un sistema de control. Para monitorear las condiciones de funcionamiento y ajustar los parámetros de operación según sea necesario, este sistema puede incluir sensores de temperatura, presión y caudal. Además, puede haber sistemas de control automático para mantener el voltaje y la corriente eléctrica dentro de los rangos predeterminados. asegurando una producción de hidrógeno segura y eficiente.

Monitoreo de calidad del hidrógeno: es crucial garantizar que el hidrógeno producido cumpla con los estándares de calidad. Para ello, se pueden usar sensores y analizadores para medir la presencia de impurezas y la pureza del hidrógeno. Esto garantiza la idoneidad del hidrógeno verde para su uso en las aplicaciones planificadas.

Control de almacenamiento: Para mantener la presión y la temperatura en los tanques de almacenamiento, el sistema de almacenamiento de hidrógeno necesitará un control. Para mantener las condiciones de almacenamiento dentro de rangos seguros y establecidos, los sensores de presión y temperatura pueden enviar señales al sistema de control central. Además, puede haber sistemas de alarma que alerten sobre situaciones anormales como fugas o fluctuaciones extremas en las condiciones de almacenamiento.

Monitoreo de distribución: si el hidrógeno verde se distribuye a través de una red de tuberías u otros medios, es necesario un sistema de monitoreo que monitoree los flujos y la presión en la red de distribución. Para garantizar un suministro adecuado y evitar problemas como obstrucciones o fugas, se pueden usar sensores de presión y caudal en puntos clave de la infraestructura de distribución.

Sistema de control central: Los elementos mencionados anteriormente se pueden integrar en un sistema de control centralizado. Este sistema puede recibir datos de los sensores y analizadores en tiempo real, lo que puede proporcionar información importante sobre el estado y el rendimiento del sistema en su conjunto. Además, puede permitir la configuración de configuraciones de control y la configuración de alarmas o notificaciones en caso de eventos anormales.

Es importante tener en cuenta que los detalles específicos del esquema de control y monitoreo pueden variar según el diseño y la implementación del sistema de producción de hidrógeno. Los sistemas avanzados pueden incluir tecnologías de automatización, comunicación y análisis de datos para una gestión más eficiente. Cabe destacar que este programa fue realizado por la autora de este escrito.

CÁPITULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Esquemas

3.1.1 Esquema del proyecto

Para llevar a cabo el presente estudio, se impone la necesidad de emplear una serie de análisis y procedimientos que posibiliten la adquisición de la información esencial para la ejecución del proyecto experimental de generación de hidrógeno. En contexto presentado en la Ilustración 11, se delinearán tres etapas primordiales: levantamiento de información, obtención de datos y cálculo de resultados. Cada etapa es crucial para poder realizar la investigación planteada y de esta manera representar los resultados obtenidos.

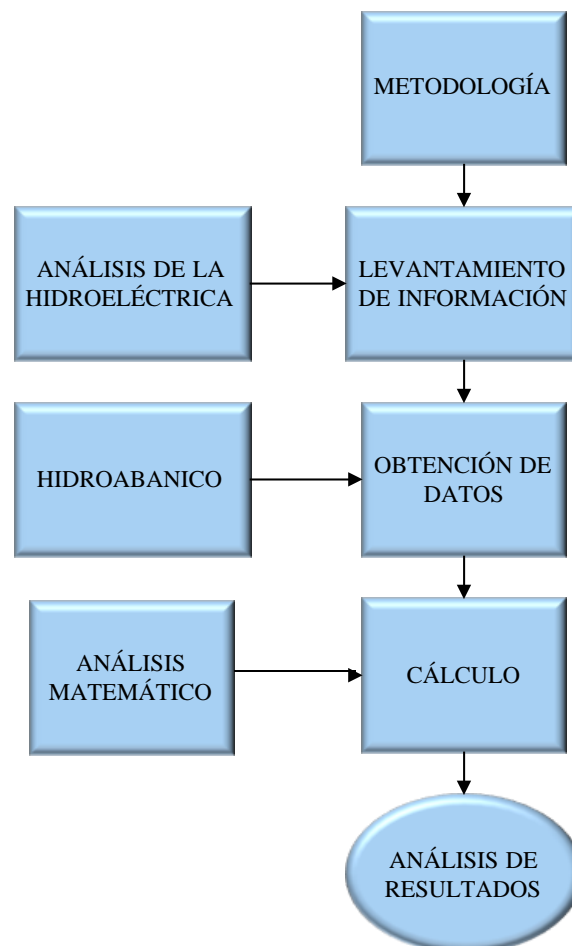


Ilustración 11 – Esquema del proyecto.

Fuente: (Autora).

3.1.2 Esquema de operaciones

En esta sección se describe el proceso que se va a realizar y se detallan las etapas principales que se van a analizar. En la Ilustración 12 se plantea un sistema para la producción de H₂ verde, incluyendo la producción, almacenamiento, distribución, control y monitoreo. Estas etapas se consideran las más relevantes para el abastecimiento de hidrógeno. La energía hidroeléctrica se utiliza como fuente de electricidad para alimentar un electrolizador PEM. Esta tecnología utiliza una membrana polimérica conductora de protones como catalizador para la reacción. Una vez producido, este gas se almacena para ser utilizado cuando se requiera. En la actualidad existen dos métodos (más usados) de almacenamiento en estado líquido y en gaseoso. El primero no se consideró en esta investigación ya que consume mucha energía. Por lo tanto, el segundo método es el más factible para este trabajo. Ya que se puede utilizar infraestructura ya existente como los tanques de GNL esféricos u otro tipo de contenedores que utilizan las industrias para sus procesos. Con el almacenamiento del hidrógeno se puede distribuir para los usuarios finales. Este puede ser por tuberías, camiones cisterna y por cilindros. Finalmente, para garantizar el óptimo funcionamiento de cada parte del sistema es fundamental contar con una etapa de control y monitorización. Esto implica la supervisión de la producción de H₂, monitoreo de la calidad del gas, cálculo de la capacidad de almacenamiento, medición de la presión y temperatura.

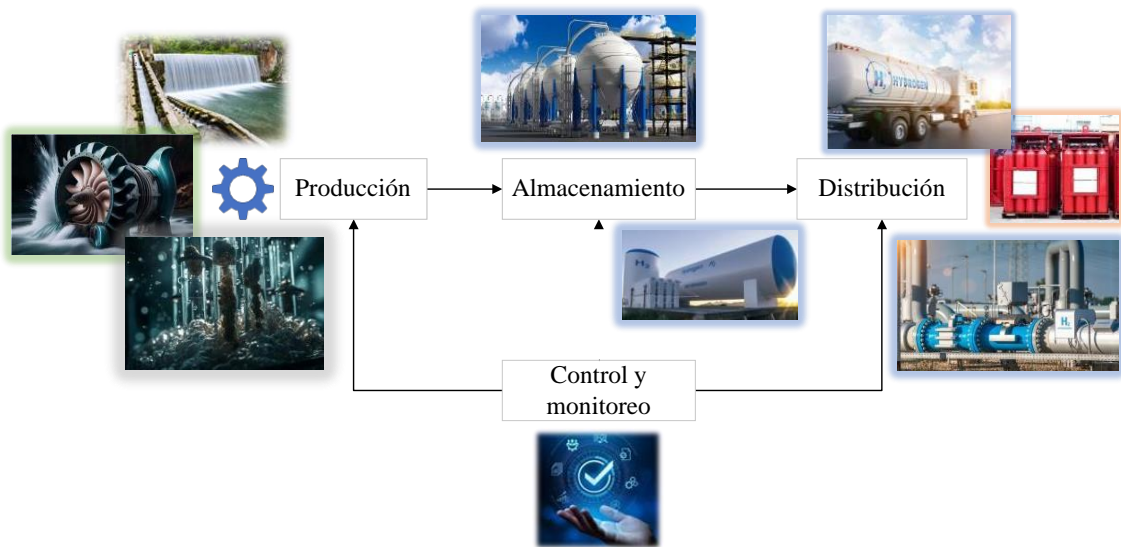


Ilustración 12: Esquema de funcionamiento del proyecto.

Fuente: (Autora).

Es importante tener en cuenta que la implementación específica de este sistema puede variar según el tamaño y los requisitos de la instalación, así como los estándares y regulaciones locales. Actualmente en el país no existe ninguna regulación sobre la producción de hidrógeno. Además, se deben considerar aspectos relacionados con la seguridad, como sistemas de detección de fugas y procedimientos de respuesta ante emergencias.

3.2 Descripción de la planta prototipo

La planta que se examina para este estudio consta de algunas partes, características y requisitos. Se va a evaluar y describir algunas propiedades de esta tecnología, así como las diversas opciones que tiene el mercado. Para el funcionamiento de estas instalaciones se debe tener acceso a energía y agua. En esta instancia la central Hidroabánico es la generadora de energía eléctrica para este proceso. En cuanto al suministro de agua, existen varias opciones disponibles. Puede provenir de la red local, del río u otra fuente. La elección de la fuente de agua dependerá de su calidad y disponibilidad. Por otra parte, se debe evaluar el tipo de electrolizador PEM que se va a utilizar. Esto depende de las condiciones del lugar, requerimientos técnicos y uso final. Haciendo una comparativa de los diferentes modelos que ofrecen los fabricantes.

En la actualidad existen algunos tipos de electrolizadores PEM. Cada fabricante tiene mejoras tecnológicas frente a su competencia. Es por esto que algunas características

difieren en cada modelo. En la Ilustración 13 se muestra dos sistemas, modular escalable y modular de contenedor. El primero se utiliza para instalaciones industriales o para plantas de hidrógeno de pequeña y gran escala. Este método puede ser instalado en una nave industrial, en edificios o cuartos de máquinas entre otros. Por el contrario, para los sistemas modulares de contenedores su instalación se puede realizar en patios, explanadas, terrenos y cualquier lugar con el suficiente espacio. Esta tecnología tiene la facilidad de que se puede instalar al aire libre ya que sus componentes se encuentran dentro del contenedor.

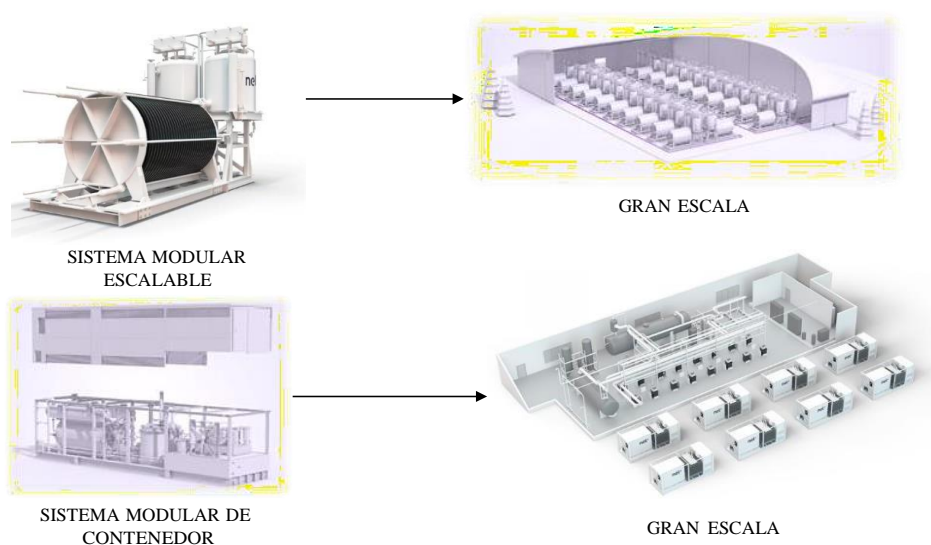


Ilustración 13: Tipos de electrolizadores.

Fuente: (Autora), imágenes tomadas de (Nel, 2023)

3.3 Obtención de datos

Los datos que se usaron para este estudio fueron suministrados por la empresa Hidroabánico. La información fue obtenida por unidades de medición de energía eléctrica de facturación PowerLogic ION8600 como medidor principal y el medidor de respaldo ION8650. Estos medidores son utilizados para centrales de generación energética teniendo gran precisión y pudiendo medir la energía bidireccionalmente en los diferentes tipos de modos de uso.

Se analizó los valores mensuales de producción desde el 2007 a 2021. El año 2007 no se utilizó para los cálculos ya que en esa época solo estaban 3 unidades operativas. Por otra parte, en el periodo de 2011 no se proporcionaron datos y de esta manera no se tomó en

cuenta esta etapa. Se obtuvo un promedio por cada mes y de esta manera poder calcular el 20% de energía que se va a utilizar. Con este cálculo se procedió a realizar una estimación de la potencia requerida.

3.4 Producción de hidrógeno mediante electrolizador PEM

Las propiedades del hidrógeno han hecho que se convierta en un intermediario importante para la transición energética. Haciendo que el uso de este gas se re electrifique para proporcionar electricidad al sistema. Las tecnologías como la electrólisis, pilas de combustible, almacenamiento de H₂ son claves para el desarrollo de esta industria energética (Yue, y otros, 2021). Muchos de los electrolizadores que ofrece el mercado son los alcalinos que funcionan con una solución de sales al 30% de peso. Teniendo una presión del gas generado que varía de 5 bar (electrolizadores normales) y de 10 a 30 bar para los más desarrollados (Stojic, Grozdić, Umićević, & Maksić, 2008).

En esta investigación se utilizó los parámetros de un electrolizador PEM, pro que se consideró las grandes ventajas que ofrece esta tecnología. Estos sistemas son modulares lo que facilita su transporte e instalación, ya que los componentes se encuentran en contenedores (ANDRITZ, 2023). Esta tecnología tiene la capacidad de operar a altas densidades de corriente con alto voltaje y producir un hidrógeno de gran pureza, hasta el 99% aproximadamente (Hitam & Jalil, 2020).

En la Ilustración 14 describe al sistema de funcionamiento de una planta de generación de H₂. Un electrolizador PEM es alimentado mediante energía hidroeléctrica. Esta energía ingresa a un rectificador para la transformación de CA a CC. Después de la rectificación de la corriente esta ingresa el electrolizador. Dentro de este dispositivo se realiza la división molecular de H₂O. El agua ingresa en el ánodo donde se produce la electrolisis liberando iones de H⁺, este pasa por la membrana formándose hidrógeno molecular. Después de esto, en el cátodo se acumula el gas para ser almacenado (Valdivieso, 2023). Finalmente, el gas está listo para ser distribuido mediante los sistemas mencionados en la sección 6.1.

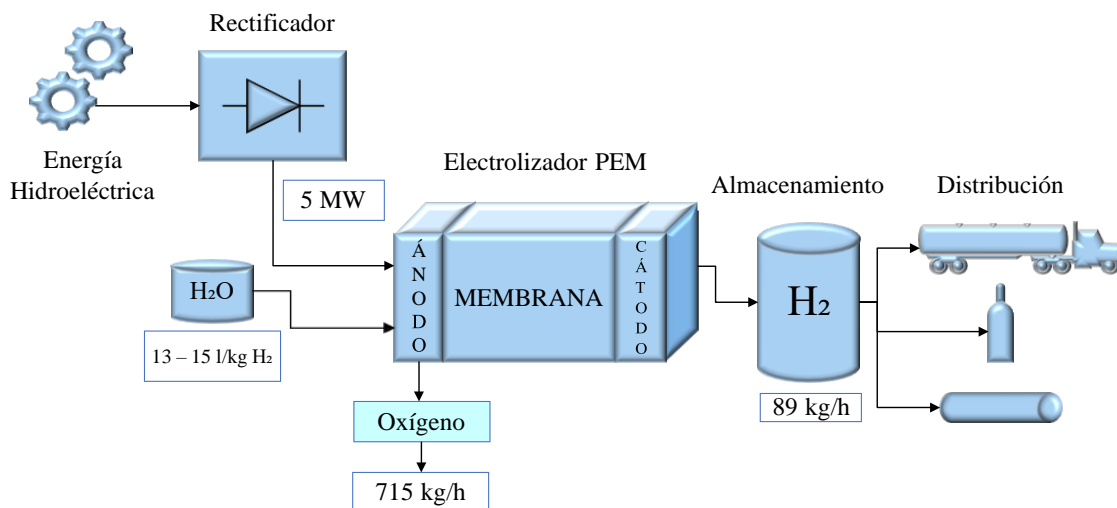


Ilustración 14: Esquema de funcionamiento para la producción de hidrógeno verde

Fuente: adaptado de (Valdivieso , 2023)

Para los cálculos correspondientes se utilizó los parámetros de una planta piloto de 5 MW de energía de la marca ANDRITZ. Dicha empresa ofrece esta planta prototipo con las características mencionadas para su compra e instalación. Esta infraestructura tiene la capacidad de producir 89 kg/h con una presión de 30 bar. El sistema requiere de 13 a 15 litros de agua para su funcionamiento. El agua utilizada en este proceso debe estar libre de impurezas ya que de esto dependerá la pureza del H₂ generado (ANDRITZ, 2023).

$$H_2 = \frac{E * n}{Ee}$$

Donde:

E: energía eléctrica consumida MWh

n: es la eficiencia del rectificador (90 %)

Ee: es la demanda de energía del sistema (5 MWh/kg de hidrógeno)

Se utilizó una eficiencia de 90% del rectificador ya que se consideró un valor común dentro de estos dispositivos.

3.5 Análisis de costos

Con la literatura especializada, informes, fichas técnicas e información de la red se procedió a una valoración de las tarifas de generación de hidrógeno electrolítico. Algunos costos se omitieron por la falta de información o por su poca relevancia en la investigación. También es importante aclarar que los precios analizados corresponden a

otros países puesto que en Ecuador esta tecnología aun no es comercial. Por el momento en el país algunas universidades tienen laboratorios (pequeña escala) de producción de H₂ mediante electrolisis con fines académicos e investigativos.

Mediante un análisis realizado por (Collis & Schomäcker, 2022), donde se analizan los costos de producción del hidrógeno verde en diferentes partes del mundo. Se compararon los valores obtenidos teniendo una variación de 6,7 – 11,4 euros por kg de H₂ generado haciendo una transformación a dólares (valor referencial €1 es \$1,10) estos valores serían de 7,39 – 12,57 dólares. Para la región de los Andes se calculó un precio de \$6,39 – 8,60 teniendo uno de los valores de producción más bajos dentro de este estudio. La ubicación geográfica desempeña un papel fundamental al analizar el costo de producción de estas tecnologías, ya que su funcionamiento está estrechamente ligado a las condiciones climáticas que influyen en la generación de energía. En este contexto, la región sur del continente americano se caracteriza condiciones hídricas favorables, lo cual incide directamente en los costos asociados a la generación energética (Scafidi, Wilkinson, Gilfillan, Heinemann, & Haszeldine, 2021). Por otra parte, un estudio realizado en Chile donde se analiza los costos de producción de hidrógeno verde por electrolisis se tiene un rango aproximado de \$2 – 6 por kilogramo de H₂. En este estudio no se analizaron algunos costos (almacenamiento y transporte), también se estudiaron 4 ubicaciones con gran producción energética. Por lo que se seleccionó la mejor opción para la producción de este sector energético (Garcia & Oliva, 2023).

Para poder realizar un análisis de costos uno de los valores más relevantes es el de la energía eléctrica producida por Hidroabánico la cual tiene un precio único por kWh que es de 4,70 centavos de dólar como se representa en el Anexo 1. Estos valores están controlados por DRETSE-ARC organismo estatal que regula los valores de producción, distribución y transmisión. Cabe destacar que este es el valor que el estado paga a este proyecto.

La comparación de los costos de capital de los electrolizadores entre sistemas es difícil porque a menudo falta información de parámetros importantes. Sin embargo, cuando se ajusta a la inflación, las reducciones de costes en los métodos alcalinos han sido moderadas en los últimos años. Mientras que los sistemas PEM las reducciones de precios ha sido significativas, haciendo que los costos sean más competitivos con la tecnología alcalina. Estas reducciones de costos se han logrado principalmente por la investigación y desarrollo, en ausencia de una intervención significativa en el mercado (IEA, 2022). Es

por esto y las ventajas tecnológicas que se considera a los sistemas PEM dentro de esta investigación como se menciona en la Sección 4.

Independientemente de las características de cada tipo de electrolizadores, los costos medios para la implementación de una unidad de 1MW de potencia varían significativamente entre 450 \$/kW para tecnologías alcalinas y para los PEM de 870 \$/kW. Es importante destacar que estos valores pueden variar según diversos factores, como la escala de instalación, ubicación geográfica, disponibilidad del recurso y los avances tecnológicos (Patonia & Poudineh, 2022).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de la producción de hidrógeno

La planificación y ejecución de proyectos energéticos sostenibles se ha convertido en un objetivo de vital importancia en la actualidad. En este contexto, la utilización eficiente de fuentes renovables ha generado un marcado interés en la comunidad científica y en el sector industrial. La presente investigación se centra en la evaluación de la viabilidad de un proyecto que involucra la producción de hidrógeno a partir de la energía generada por la central hidroeléctrica Hydroabanico.

Mediante el análisis de producción de energía durante un extenso período de 13 años. Este periodo de tiempo ha sido la base de datos para calcular el promedio mensual de generación de energía eléctrica. Dicha información es fundamental para desarrollar los cálculos necesarios y, por consiguiente, obtener el promedio de producción eléctrica correspondiente a cada uno de los 12 meses del año.

La investigación se ha desarrollado bajo las directrices establecidas por la empresa, considerando específicamente el aprovechamiento del 20% de la energía total generada. Esta metodología ha permitido establecer de manera precisa y coherente la producción de hidrógeno en el marco de este proyecto. Los resultados obtenidos presentan implicaciones significativas para la eficiencia y sustentabilidad de la producción de energía a partir de fuentes renovables. En este escrito, se presentarán detalladamente el enfoque metodológico, los cálculos realizados y los resultados obtenidos, ofreciendo una visión integral de este innovador proyecto.

En la Tabla 2 exhibe los promedios de generación energética de los 12 meses teniendo una producción anual promedio de 312 195 MWh. En la tercera columna, se lleva a cabo el cálculo el 20 % de la energía promedio de los meses correspondientes. De esta manera, el agregado total de energía destinado a la producción de hidrógeno se cifra en 62 439 MWh.

Tabla 2 Producción promedio y porcentaje requerido.

Fuente: (Autora).

Mes	Promedio (MWh)	20% (MWh)
Enero	27062	5412
Febrero	25169	5034
Marzo	26373	5275
Abril	25199	5040
Mayo	26003	5201
Junio	25333	5067
Julio	26956	5391
Agosto	26803	5361
Septiembre	25523	5105
Octubre	25367	5073
Noviembre	25568	5114
Diciembre	26841	5368
Total	312195	62439

La Tabla 3 detalla el cálculo de la producción de hidrógeno a lo largo de un año, presentando los valores mensuales correspondientes. En el marco de esta investigación, se logró determinar una cantidad total de producción de hidrógeno que asciende a 11 239 kg, lo que resalta la viabilidad y el potencial de esta propuesta de generación. También resaltan los meses de mayor producción (enero, julio y diciembre).

Tabla 3 Producción de hidrógeno.

Fuente: (Autora).

Mes	Hidrógeno (kg)
Enero	974
Febrero	906
Marzo	949
Abril	907
Mayo	936
Junio	912
Julio	970
Agosto	965
Septiembre	919

Octubre	913
Noviembre	920
Diciembre	966
Total	11239

4.2 Discusión

La producción de hidrógeno verde a partir de fuentes renovables ha emergido como una alternativa prometedora en la búsqueda de soluciones sostenibles para el suministro de energía. En el contexto de creciente preocupación por la reducción de emisiones y la transición hacia matrices energéticas más limpias, la investigación presente se enfoca en evaluar los resultados obtenidos en relación a la producción de hidrógeno verde a través de un proceso electroquímico alimentado por energía renovable.

Los resultados de esta investigación ofrecen un profundo análisis de los aspectos técnicos y económicos de la producción de hidrógeno verde. Estos resultados se encuentran enmarcados en el contexto de la optimización de la eficiencia de conversión de energía, la evaluación de la sostenibilidad ambiental y la viabilidad económica en relación con los métodos tradicionales de producción de hidrógeno.

En la siguiente sección, se discutirán detalladamente los hallazgos y conclusiones derivadas de los experimentos y análisis realizados. Este análisis permitirá una comprensión más profunda de los logros y desafíos encontrados en el proceso de producción de hidrógeno verde, así como su contribución potencial al panorama energético global y la mitigación del cambio climático.

En el estudio realizado por (Le, Nguyen, Bui, & Ngo, 2023) se enfoca en un sistema de producción de hidrógeno verde mediante un electrolizador PEM, orientado hacia el almacenamiento de energía. De estos casos, el caso de referencia es el segundo, ya que contiene similitudes con el electrolizador PEM y su investigación, el cual presenta una producción de 4 525 kg de H₂. Es importante destacar que este valor contrasta con los resultados obtenidos en el presente proyecto. Por otra parte, el caso de estudio finlandés

donde se analiza la producción y rentabilidad de este gas mediante tecnologías fotovoltaicas y eólicas. Este estudio concluyó el precio de 6,77 \$/kg para el escenario más favorable (El-Emam & Özcan, 2019). Se analizaron diferentes condiciones de producciones de hidrógeno de (50, 100, 200) kg de H₂ al día (Moradpoor, Syri, & Santasalo-Aarnio, 2023). Aunque ambas investigaciones comparten similitudes en términos de la tecnología y el proceso empleado, surge una diferencia significativa en la potencia evaluada. En concreto, los hallazgos de este estudio indican una potencia menor en comparación con los casos de estudio de referencia. Esta discrepancia puede ser atribuida a diversas variables, como la configuración específica del sistema, las condiciones operativas y los parámetros de diseño.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La evaluación de la generación de hidrógeno verde a partir de la central hidroeléctrica Hidroabanico presenta resultados alentadores. Mediante el análisis de producción de energía a lo largo de 13 años, se obtuvo un promedio mensual de generación eléctrica, siendo esta base para calcular el 20% de energía destinada a la producción de hidrógeno. Este enfoque garantiza una producción sostenible y coherente.

La elección de un electrolizador PEM se basó en su modularidad, facilidad de transporte e instalación, alta eficiencia y producción de hidrógeno de alta pureza. El cálculo de producción de hidrógeno a lo largo de un año reveló un total de 11 239 kg, demostrando la factibilidad del proyecto y su potencial para contribuir a la matriz energética sostenible.

Los análisis de costos, aunque basados en valores de otros países debido a la falta de regulación en Ecuador, indican que la producción de hidrógeno verde puede ser competitiva con otras tecnologías. La ubicación geográfica y las condiciones climáticas influyen significativamente en los costos de producción.

5.2 Recomendaciones

Para futuras investigaciones y desarrollo, se recomienda proponer una regulación local y las condiciones específicas del país para obtener datos precisos sobre costos y regulaciones de producción de hidrógeno. Además, sería valioso realizar estudios comparativos con otras tecnologías de producción de hidrógeno para establecer una base sólida de viabilidad técnica y económica.

Dado que la producción de hidrógeno verde se muestra prometedora en términos de sostenibilidad y reducción de emisiones, se sugiere a las autoridades gubernamentales y a la industria energética considerar políticas de apoyo y promoción de esta tecnología, lo que podría conducir a una transición más rápida hacia una economía de bajo carbono.

Bibliografía

- Aguilera, R. (2013). *Generacion de un Catalogo de las Centrales Hidroelectricas del Ecuador*. Sangolqui.
- AlNouss, A., McKay, G., & Al-Ansari, T. (2020). Enhancing waste to hydrogen production through biomass feedstock blending: A techno-economic-environmental evaluation. *Applied Energy*, 114885.
- Amil, C., & Zeki, M. (2020). The importance of hydrogen for energy diversity of Turkey's energy production: 2030 projection. *International Journal of Hydrogen Energy*, 19935-19946.
- ANDRITZ. (2023). *Proton Exchange Membrane (PEM)*. Obtenido de <https://www.andritz.com/products-en/metals/green-hydrogen/pem>
- ARCERNNR. (08 de 2022). *Balance energético nacional 2021*. Obtenido de https://www.rekursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2022/08/Presentacio%CC%81n_opt.pdf
- ARCONEL. (2020). *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano*. Obtenido de <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/Estad%20C3>
- Argyrou, M., Christodoulides, P., & Kalogirou, S. (2018). Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 804-821.
- Basak, B., Jeon, B., Kim, T., Lee, J., Chatterjee, P., & Lim, H. (2020). Dark fermentative hydrogen production from pretreated lignocellulosic biomass: Effects of inhibitory byproducts and recent trends in mitigation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110338.

- Behroozsarand, A., Zamaniyan, A., & Ebrahimi, H. (2010). Industrial hydrogen production and CO₂ management. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 192-196.
- Belloti, D., Rivarolo, M., Magistri, L., & Massardo, A. (2015). Thermo-economic comparison of hydrogen and hydro-methane produced from hydroelectric energy for land transportation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2433-2444.
- Bhandari, R. (2022). Green hydrogen production potential in West Africa – Case of Niger. *Renewable Energy*, 800 - 811.
- BloombergNEF. (16 de 01 de 2020). *Clean Energy Investment Trends, 2019*. Obtenido de <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BloombergNEF-Clean-Energy-Investment-Trends-2019.pdf>
- Burton , N., Padilla , R., Rose, A., & Habibullah, H. (2021). Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110255.
- Cabrales , S. (2015). *Análisis del comportamiento de centrales hidroeléctricas de bombeo en la operación de sistemas interconectados*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Carvajal Osorio, H. (2019). *Estudio sobre producción de H con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia*. Bogota.
- Ceballos , J., & Macas , D. (2012). *Análisis de la complementariedad hidrológica de las vertientes del Amazonas y del Pacífico en el Ecuador considerando las nuevas centrales hidoeléctricas proyectadas hasta el año 2016*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.

- CELEC. (14 de 01 de 2021). *CELEC EP genera y transmite más del 90 por ciento de la energía eléctrica limpia que consume el país y exporta a los países vecinos*. Obtenido de <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/sala-de-prensa/noticias/722-celec-ep-genera-y-transmite-mas-del-90-por-ciento-de-la-energia-electrica-limpia-que-consume-el-pais-y-exporta-a-los-paises-vecinos#:~:text=En este sentido%2C de la,a través de cen>
- CENACE. (2021). *Informe anual 2021*. Quito: Operador nacional de electricidad .
- Chalvatzis, K., & Ioannidis, A. (2017). Energy supply security in the EU: Benchmarking diversity and dependence of primary energy. *Applied Energy*, 465-476.
- Chanataxi, H., Montalván, M., & Santillan, J. (26 de 04 de 2021). *Centrales hidroeléctricas del Ecuador*. Obtenido de <https://observatorioelc.ister.edu.ec/2021/04/26/centrales-hidroelectricas-del-ecuador/>
- Collis, J., & Schomäcker, R. (2022). Determining the Production and Transport Cost for H2 on a Global Scale. *Front. Energy Res.*
- CONELEC. (2007). *Plan maestro de electrificación, 2007-2016*. Quito: Consejo Nacional de Electricidad .
- Corrales and Rosales. (Septiembre de 2022). *Blog Corrales and Rosales*. Obtenido de <https://corralrosales.com/hidrogeno-verde-la-energia-del-futuro/>
- Dala Catumba , B., Bessa Sales , M., Tavares Borges, P., Ribeiro Filho, M., Sanders Lopez, A., Sousa Rios, M., . . . Sousa Santos, J. (2023). Sustainability and challenges in hydrogen production: An advanced bibliometric analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 7975-7992.

- Deane, J., Ó Gallachóir, B., & McKeogh, E. (2010). Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant. *Renew Sustain Energy*, 1293-1302.
- del Mar Rubio, M., & Tafunell, X. (2014). Latin American hydropower: A century of uneven evolution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 323-334.
- Departamento Técnico, A. (2018). *Acciona*. Obtenido de https://www.acciona.com/es/hidrogeno-verde/?_adin=02021864894#2
- Dong, Y., Liu, J., Sui, M., Qu, Y., Ambuchi, J., Wang, H., & Feng, Y. (2017). A combined microbial desalination cell and electrodialysis system for copper-containing wastewater treatment and high-salinity-water desalination. *Journal of Hazardous Materials*, 307-315.
- Dumont , O., Frate, G., Pillai, A., Lecompte, S., De Paepe, M., & Lemort, V. (2020). Carnot battery technology: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage*, 10156.
- Dursun, B., & Alboyaci, B. (2010). The contribution of wind-hydro pumped storage systems in meeting Turkey's electric energy demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1979-1988.
- El-Emam, R., & Özcan, H. (2019). Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, 593-609.
- Escobedo , E., Garcia , D., Ruiz, M., Izquierdo , A., Pacheco-Catalan, D., & Ordoñez, L. C. (2023). Design, construction, and performance of a próton exchange membrane water electrolyzer (PEM-WE). *International Journal of Electrochemical Science*.

- Escorihuela, J., Garcia-Bernabe, A., & Compañ, V. (2020). A Deep Insight into Different Acidic Additives as Doping Agents for Enhancing Proton Conductivity on Polybenzimidazole Membranes. *Polymers*, 1374.
- Espinoza, J. L. (2015). *Energias renovables en el ecuador*. Cuenca.
- Faraji, M., & Saidi, M. (2021). Hydrogen-rich syngas production via integrated configuration of pyrolysis and air gasification processes of various algal biomass: Process simulation and evaluation using Aspen Plus software. *International Journal of Hydrogen Energy*, 18844-18856.
- Forsund, F. (2015). *Hydropower economics*. New York: Springer.
- Funez Guerra, Reyes, Bozo, C. (2020). *El hidrógeno como vector energético*. Santiago de Chile.
- GADMCS. (13 de noviembre de 2014). *Diagnostico plan de desarrollo y ordenamiento territorial*. Obtenido de https://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/DIAGNOSTICO_15-11-2014.pdf
- Galitskaya, E., & Zhdaneev, O. (2022). Development of electrolysis technologies for hydrogen production: A case study of green steel manufacturing in the Russian Federation. *Environmental Technology & Innovation*.
- Garcia, M., & Oliva, S. (2023). Technical, economic, and CO2 emissions assessment of green hydrogen production from solar/wind energy: The case of Chile. *Energy*.
- Guerrero, A. (2010). *Interconexion de la central Hidroabanico al sistema nacional interconectado*. quito.

- Hajiaghahi, S., Salemnia, A., & Hamzeh, M. (2019). Hybrid energy storage system for microgrids applications: A review. *Journal of Energy Storage*, 543-570.
- Hernández, T. E., & Hernández, S. (2017). *Impactos ambientales de las pequeñas centrales hidroeléctricas a filo de agua en montañas andinas. Caso "El Edén"-Pensilvania - Caldas*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Manizales.
- Hidroabánico. (2021). *Hidroabánico - Estamos comprometidos con el crecimiento del Ecuador*. Obtenido de <https://hidroabánico.com.ec/proyecto/>
- Hitam, C., & Jalil, A. (2020). A review on biohydrogen production through photo-fermentation of lignocellulosic biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*.
- Hosseini, S., & Butler, B. (2019). An overview of development and challenges in hydrogen powered vehicles. *International Journal of Green Energy*, 13-37.
- ICOLD. (19 de 05 de 2021). *General Synthesis of World register of dams*. Obtenido de https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/general-synthesis
- IEA. (09 de 2022). *Electrolysers – Analysis - IEA*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/electrolysers>
- IHA. (2020). Hydropower Status Report 2020. *International Hydropower Association*, 1-83.
- IRENA. (31 de 03 de 2019). *Renewable Energy Capacity Highlights 2019*. Obtenido de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/RE_capacity_highlights_2019.pdf?la=en&hash=BA9D38354390B001DC0CC9BE03EEE559C280013F

- Kamaroddin, M., Sabli, N., Abdullah, T., Siajam, S., Abdullah, L., Jalil, A., & Ahmad, A. (2021). Membrane-Based Electrolysis for Hydrogen Production: A Review. *Membranes*.
- Khzouz, M., Gkanas, E., Du, S., & Wood, J. (2018). Catalytic performance of Ni-Cu/Al₂O₃ for effective syngas production by methanol steam reforming. *Fuel*, 672-683.
- Kim, H., Kim, A., Byun, M., & Lim, H. (2021). Comparative feasibility studies of H₂ supply scenarios for methanol as a carbon-neutral H₂ carrier at various scales and distances. *Renewable Energy*, 552-559.
- Kiryanova, N., Matrenin, P., Mitrofanov, S., Kokin, S., & Safaraliev, M. (2022). Hydrogen energy storage systems to improve wind power plant efficiency considering electricity tariff dynamics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 10156-10165.
- Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111180.
- Le, T., Nguyen, T., Bui, D., & Ngo, T. (2023). Optimal sizing of renewable energy storage: A techno-economic analysis of hydrogen, battery and hybrid systems considering degradation and seasonal storage. *Applied Energy*, 120817.
- Lei, Q., Wang, B., Wang, P., & Liu, S. (2019). Hydrogen generation with acid/alkaline amphoteric water electrolysis. *Journal of Energy Chemistry*, 162-169.
- Li, C., & Baek, J.-B. (2021). The promise of hydrogen production from alkaline anion exchange membrane electrolyzers. *Nano Energy*, 106162.

- Liu, M., Yao, Z., Gu, J., Li, C., Huang, X., Zhang, L., . . . Fan, M. (2023). Issues and opportunities facing hydrolytic hydrogen production materials. *Chemical Engineering Journal*, 141918.
- Llamosa, C., & Sovacool, B. (2021). The future of hydropower? A systematic review of the drivers, benefits and governance dynamics of transboundary dams. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 110-124.
- MEER. (2017). *LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES 2011 a 2017 en Ecuador*. Quito : MEER.
- MEM. (2020). *Ecuador consolida la producción eléctrica a partir de fuentes renovables*. Obtenido de <https://www.recursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/>
- MERNNR. (2018). *Plan Nacional de Eficiencia Energética 2018*. Obtenido de https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/images/PLANEE_INGLES/NationalEnergyEfficiencyPlan20162035_2017-09-01_16-00-26.html
- Millet, P., Mbemba, N., Grigoriev, S. A., Fateev, V., Aukauloo, A., & Etievant, C. (2011). Electrochemical performances of PEM water electrolysis cells and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4134-4142.
- MITERD, M. p. (2020). *energia.gob.es*. Obtenido de https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf
- Moeckel, A. C. (2018). *Producción de hidrógeno a partir del excedente de energía eléctrica proveniente de renovables*. Sevilla.
- Moradpoor, I., Syri, S., & Santasalo-Aarnio, A. (2023). Green hydrogen production for oil refining – Finnish case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

- Morante, J. (2014). *El almacenamiento de la electricidad*. Barcelona: Fundación Gas Natural Fenosa.
- Muñoz, Beleño, Díaz, J. (2022). *Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia*. Santander Colombia: Enero.
- Nel. (2023). *Water electrolyzers / hydrogen generators*. Obtenido de <https://nelhydrogen.com/water-electrolysers-hydrogen-generators/>
- Nicoletti, G., Arcuri, N., Nicoletti, G., & Bruno, R. (2015). A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. *Energy Conversion and Management*, 205-213.
- O Khurshid, S. S. (2019). *Power generation by hybrid ap-proach solar PV/battery power hydrigen generation / fuel cell*. International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering CECCE.
- Observatorio de la electricidad. (2021). *Estudio de la oferta y la demanda energética*. Quito.
- Patanaik, D., Pattanaik, A., Bagal, D., & Rath, A. (2023). Reducing CO2 emissions in the iron industry with green hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Patonia, A., & Poudineh, R. (2022). Cost-competitive green hydrogen: how to lower the cost of electrolyzers? *The Oxford Institute for Energy Studies*.
- Peña, J. (2020). *Productos financieros para la transición energética*. Madrid: Funcas.
- Peszko, G., Mensbrughe, D., Golub, A., Ward, J., Zenghelis, D., Marijs, C., . . . Midgley, A. (2020). *Diversification and cooperation in a decarbonizing world*. Washington: World Bank.

- Piazzzi, S., Menin, L., Antolini, D., Patuzzi, F., & Baratieri, M. (2021). Potential to retrofit existing small-scale gasifiers through steam gasification of biomass residues for hydrogen and biofuels production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 8972-8985.
- Posso Rivera, F., Zalamea, J., Espinoza, J., & Gonzalez, L. (2022). Sustainable Use of Spilled Turbinable Energy in Ecuador: Three Different Energy Storage Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112005.
- PUCE. (07 de marzo de 2014). *Enyalioides praestabilis*. Obtenido de <https://bioweb.bio/portal/QCAZ/Especimen/52109>
- Qin, Y., Wang, Y., Liu, C., Wang, Y., Dong, H., Ma, Z., & Lin, Y. (2023). Synergistic planning of an integrated energy system containing hydrogen storage with the coupled use of electric-thermal energy. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Quevedo, C. (2002). *Desarrollo de las Fuentes Renovables de Energías*. Quito.
- Rahim, A., Salami, A., Kamarudin, S., & Hanapi, S. (2016). An overview of polymer electrolyte membrane electrolyzer for hydrogen production: Modeling and mass transport. *Journal of Power Sources*, 56-65.
- Re, X., Dong, L., Xu, D., & Hu, B. (2020). Challenges towards hydrogen economy in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34326-34345.
- Rehman, S., Al-Hadhrami, L., & Alam, M. (2015). Pumped hydro energy storage system: a technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 586-598.
- Resksten, A. H., Thomassen, M. S., Møller-Holst, S., & Sundseth, K. (2022). Projecting the future cost of PEM and alkaline water electrolyzers; a CAPEX model

- including electrolyser plant size and technology development. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38106-38113.
- Rivarolo, M., Magistri, L., & Massardo, A. (2014). Hydrogen and methane generation from large hydraulic plant: Thermo-economic multi-level time-dependent optimization. *Applied Energy*, 1737-1745.
- Roca, J. (2018). *Las 10 mayores centrales hidroeléctricas de Latinoamérica- El Periódico de la Energía*. Obtenido de <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-centrales-hidroelectricas-de-latinoamerica/>
- Rodriguez, C., & Kruse, A. (2018). Supercritical water gasification of biomass for hydrogen production – Review. *The Journal of Supercritical Fluids*, 573-590.
- Rosas Iglesias, M. (2019). *Hidrógeno como vector energético. Elementos y usos*. Malaga.
- Ruth, M., Jadun, P., Gilroy, N., Connelly, E., Boardman, R., Simon, A., . . . Zuboy, J. (2020). The Technical and Economic Potential of the H2 Scale Hydrogen Concept within the United States. *National Renewable Energy Lab*.
- San Martín, J., Zamora, I., San Martín , J., Aperribay, V., & Eguía, P. (2011). Energy storage technologies for electric applications. . *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*.
- Sanz , J., Almécija, C., Bludszuweit, H., Fraile, J., Garcia , D., Navarro, M., . . . Puértolas , P. (2016). *Energía hidroeléctrica: serie energías renovables*. Zaragoza: Prensa de la Universidad de Zaragoza .
- Scafidi, J., Wilkinson, M., Gilfillan, S., Heinemann, N., & Haszeldine, R. (2021). A quantitative assessment of the hydrogen storage capacity of the UK continental shelf. *International Journal of Hydrogen Energy*, 8629-8639.

- Seçer, A., Faki, E., Üzden, S., & Hasanoğlu, A. (2020). Hydrothermal co-gasification of sorghum biomass and çan lignite in mild conditions: An optimization study for high yield hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2668-2680.
- Segawa, Y., Endo, N., Shimoda, E., & Maeda, T. (2022). Pilot-scale hydrogen energy utilization system demonstration: A commercial building case study on on-site green hydrogen production and use. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15982 - 15991.
- Senplades. (2018). Examen Nacional Voluntario Ecuador 2018. Quito: Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo .
- Siddiqui, O., & Dincer, I. (2021). Design and assessment of a new solar-based biomass gasification system for hydrogen, cooling, power and fresh water production utilizing rice husk biomass. *Energy Conversion and Management*, 114001.
- Silvero, F., Rodrigues, F., Montelpare, S., Spacone, E., & Varum, H. (2019). The path towards buildings energy efficiency in South American countries. *Sustainable Cities and Society*, 646-665.
- SIPETROL S.A. (2008). *Informe de Construcción de la Central Hidroabánica*. Macas.
- Song, M., Zhang, L., An, Q., Wang, Z., & Li, Z. (2013). Statistical analysis and combination forecasting of environmental efficiency and its influential factors since China entered the WTO: 2002–2010–2012. *Journal of Cleaner Production*, 42-51.

- Stojic, D., Grozdić, T., Umićević, B., & Maksić, A. (2008). A comparison of alkaline and proton exchange membrane electrolyzers. *Russian Journal of Physical Chemistry A, Focus on Chemistry*, 1958-1960.
- Sun, X., Simonsen, S., Norby, T., & Chatzitakis, A. (2019). Composite Membranes for High Temperature PEM Fuel Cells and Electrolysers: A Critical Review. *Membranes*, 83.
- Sun, X., Xu, K., Fleischer, C., Liu, X., Grandcolas, M., Strandbakke, R., . . . Chatzitakis, A. (2018). Earth-Abundant Electrocatalysts in Proton Exchange Membrane Electrolyzers. *Catalysts*.
- Tejeda, J., Durán, G., Jiménez, R., & Doyle, M. (09 de 2017). *Incrementando la eficiencia del sector eléctrico: lecciones sobre la reducción de pérdidas eléctricas en Ecuador*. Obtenido de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/viewer/Incrementando-la-eficiencia-del-sector-el%C3%A9ctrico-Lecciones-sobre-la-reducci%C3%B3n-de-p%C3%A9rdidas-el%C3%A9ctricas-en-Ecuador.pdf>
- Torres&Arana, M. (2010). *Energía eólica: Cuestiones jurídicas, económicas y ambientales*. Navarra - España.
- U.S. Department of Energy. (2017). *Cadena de valor del hidrogeno verde*.
- Valdivieso, L. F. (2023). *Evaluación del potencial del proyecto eólico minas de Huascachaca para la producción de hidrogeno verde*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- Villagrán, C. (2017). *Modelo de optimización para una central hidroeléctrica de bombeo*. Instituto Politécnico Nacional, México.

- Wang, S., Xing, L., & Chen, H. (2019). Impact of marine industrial structure on environmental efficiency. *Management of Environmental Quality*, 111-129.
- WEC. (2017). *World energy scenarios 2016*. Obtenido de https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World-Energy-Scenarios-2016_Full-Report.pdf
- Wolff-Boenisch, D., Abid, H., Tucek, J., Keshavarz, A., & Iglauer, S. (2023). Importance of clay-H₂ interactions for large-scale underground hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 13934-13942.
- Worldbank. (marzo de 2004). *Estudio de impacto ambiental proyecto hidroabánico*. Obtenido de <https://documents1.worldbank.org/curated/en/161691468751784970/text/E10950v10EC10Umbrella0Abanicopdf.txt>
- Wu, J., Zhu, Q., & Liang, L. (2016). CO₂ emissions and energy intensity reduction allocation over provincial industrial sectors in China. *Applied Energy*, 282-291.
- Yao, Z., Liang, Z., Xiao, X., Qi, J., He, J., Huang, X., . . . Chen, L. (2022). Achieving excellent cycle stability in ZrNbeCoeNi based hydrogen isotope storage alloys by controllable phase transformation reaction. *Renewable Energy*, 500-587.
- Ying, Y., Kamarudin, S., & Masdar, M. (2018). Silica-related membranes in fuel cell applications: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 16068-16084.
- Yip, H., Srna, A., Yin, A., Kook, S., Taylor, R., Yeoh, G., . . . Chan, Q. (2019). A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion. *Appl. Sci.*

- Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111180.
- Zhang, Y., Campana, P., Lundblad, A., & Yan, J. (2017). Comparative study of hydrogen storage and battery storage in grid connected photovoltaic system: Storage sizing and rule-based operation. *Applied Energy*, 397-411.
- Zhou, J., Li, S., Zhou, X., Li, C., Xiong, Z., Zhao, Y., & Liang, G. (2022). Operation optimization for gas-electric integrated energy system with hydrogen storage module. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36622-36639.
- Zhu, Q., Li, X., Li, F., & Zhou, D. (2020). The potential for energy saving and carbon emission reduction in China's regional industrial sectors. *Science of the Total Environment*, 135009.

ANEXOS

Anexo 1. Precios de generadores privados en el Ecuador.

EMPRESA	TIPO	Periodo Enero - Junio			Periodo Julio - Diciembre	
		Precio Único ¢USD/kWh	Cargo Potencia USD/kW	Plus Energía ¢USD/kWh	Cargo Fijo - PUP USD/kW	Cargo Variable ¢USD/kWh
GENEROCA	Generadora		5,70	1,70	13,21	0,992
HIDALGO & HIDALGO	Generadora		5,70	4,50	13,21	0,992
ECOLUZ	Generadora		5,70	1,70	13,21	0,992
ENERMAX	Autogeneradora	4,70				0,992
HIDROABANICO	Autogeneradora	4,70				0,992
CEMENTOS LA FARGE	Autogeneradora	5,15				0,992

Ilustración 15 - Precios hidroeléctricas privadas

Fuente:(ARCRNNR, 2020)