

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.

**ESTUDIO TÉCNICO Y AMBIENTAL DE TECNOLOGÍAS PARA LA
PRODUCCIÓN DE VAPOR SATURADO A PARTIR DE ENERGÍA SOLAR E
HIDRÓGENO. CON ESTUDIO DE CASO A INDUSTRIAS DEL SECTOR
ALIMENTICIO Y TEXTIL DEL ECUADOR.**

VECTOR ENERGÉTICO HIDRÓGENO

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.**

RICHARD LUCIANO CAMACHO GONZALEZ

richard.camacho@epn.edu.ec

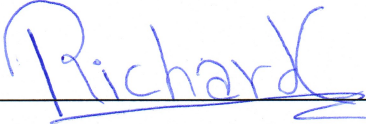
DIRECTOR: Dr. JOSÉ LUIS PALACIOS ENCALADA

jose.palacios@epn.edu.ec

14, febrero 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Richard Luciano Camacho González declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.


RICHARD L. CAMACHO GONZALEZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Richard Luciano Camacho González, bajo mi supervisión.


DR. JOSÉ LUIS PALACIOS ENCALADA
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

RICHARD LUCIANO CAMACHO GONZÁLEZ

DR. JOSÉ LUIS PALACIOS

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de integración curricular a Mirian Lourdes Camacho González, mi madre, mi Minita, quien ha sido mi inspiración, motivación y mi fuente de enseñanzas que hoy me dan la resiliencia para afrontar todas las dificultades en mi vida. El presente es la conclusión a la promesa que le hice, y desde el cielo espero que pueda saber que: ¡Lo hicimos!

AGRADECIMIENTO

Me faltaría esta página para listar a todas las personas que me han ayudado para llegar a este punto. Familia, amigos y esa persona especial, les agradezco infinitamente por haberme apoyado afectiva y económicamente. Todos sus consejos, tiempo y recursos invertidos en mí han dado frutos y lo seguirán haciendo. Ustedes ocupan un lugar muy singular en mi mente y mi corazón. Espero algún día poder ser el pilar que todos estos años han sido para mí. También quiero agradecer al Dr. José Luis Palacios Encalada por haberme guiado en este proceso investigativo. Y finalmente, a la Escuela Politécnica Nacional por haberme formado.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	I
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo General.....	1
1.2 Objetivos Específicos.....	1
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Caso de estudio INTELA S.A.....	4
1.4.2 Revisión de tecnologías	4
2 METODOLOGÍA	12
2.1 Aproximación al consumo de derivados de petróleo para la producción de vapor saturado en la empresa INTELA S.A.	14
2.2 Estimación de emisión de carbono producida por la generación de vapor en la industria textil INTELA S.A.	15
2.3 Definición de los criterios de decisión entre las soluciones para combustionar Hidrógeno (H ₂) en las calderas.	16
2.3.1 Criterios según el caso de estudio INTELA S.A.	16
2.3.2 Criterios según la opinión de expertos	18
2.4 Determinación de la prioridad de los criterios de decisión.....	20
2.5 Ponderación de los criterios de decisión	21
2.6 Elección de la solución.....	22
2.7 Análisis del combustible inyectado.....	22
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	23
3.1 Resultados.....	23
3.2 Conclusiones	24
3.3 Recomendaciones	26
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
5 ANEXOS.....	29
5.1 Extrapolación de los valores del combustible consumido por la empresa INTELA S.A. en 2022.....	29

5.2	Tabla recortada del Balance Energético Nacional del 2021	31
5.3	Tabla recortada de Emisiones Gases de Efecto Invernadero 2021	32
5.4	Ponderación criterio versus solución.....	33
5.5	Casa de la calidad	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Prioridad de cada criterio de selección	21
Tabla 2.	Ponderación criterio versus criterio.....	22
Tabla 3.	Evaluación de soluciones respecto al número de componentes.....	22
Tabla 4.	Consumo y emisiones de combustibles fósiles para la producción de vapor saturado.	23
Tabla 5.	Datos obtenidos de la Figura 3.....	29
Tabla 6.	Datos obtenidos de la Figura 4.....	30
Tabla 7.	Evaluación de soluciones respecto a la recirculación y encapsulamiento de gases.	33
Tabla 8.	Evaluación de soluciones respecto al reforzamiento de las estructuras metálicas de la caldera. 33	
Tabla 9.	Evaluación de soluciones respecto a la eficiencia de la caldera.	33
Tabla 10.	Evaluación de soluciones respecto a las emisiones de CO ₂ equivalente.	33
Tabla 11.	Evaluación de soluciones respecto al control de temperatura.....	34
Tabla 12.	Evaluación de soluciones respecto al precio.....	34
Tabla 13.	Evaluación de soluciones respecto al control de fugas	34
Tabla 14.	Evaluación de soluciones respecto a la retención de residuos en la caldera.....	34
Tabla 15.	Evaluación de soluciones respecto a la cantidad de módulos.....	35
Tabla 16.	Evaluación de soluciones respecto al control de la inyección del combustible.....	35
Tabla 17.	Evaluación de soluciones respecto al número de componentes	35
Tabla 18.	Evaluación de soluciones respecto al número de componentes	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones de CO ₂ e de la producción global de hidrógeno e intensidad media de emisiones netas cero 2019-2030 [20].	7
Figura 2. Esquema de la metodología empleada en la investigación.....	13
Figura 3. Historial de consumo de bunker de la industria INTELA S.A. [6].....	14
Figura 4. Historial de consumo de glp de la industria INTELA S.A. [6].....	14
.....	14
Figura 5. Historial de consumo de diesel de la industria INTELA S.A. [6].	14
Figura 6. Fragmento de la casa de la calidad de los criterios de selección. Ver completa en Anexo 5.1.20	
Figura 7. Tabla recortada de consumo de combustibles del Balance Energético Nacional. [54].....	31
Figura 8. Tabla recortada de emisiones de gases de efecto invernadero 2021. [54]	32

RESUMEN

La producción de vapor saturado en los procesos de la industria ecuatoriana es indispensable. En el caso de la industria textil, el vapor es usado en una gran cantidad de procesos, como es el teñido, el estriado y la prensa. Tradicionalmente, el vapor saturado se ha generado mediante la combustión de combustibles fósiles, como el bunker, diesel, glp y gas natural. Sin embargo, debido a las preocupaciones ambientales y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se están investigando alternativas más sostenibles para la producción de vapor saturado.

Uno de estos enfoques es la producción de vapor saturado utilizando hidrógeno como vector energético. El hidrógeno es considerado una fuente de energía limpia debido a que cuando es combustionado, su único subproducto es el agua. En suma, el hidrógeno se puede producir a partir de fuentes de energía renovable, como la solar o eólica.

Por otro lado, el uso del vector energético hidrógeno trae muchas bondades, pero son necesarios estudios técnicos y ambientales para evaluar la viabilidad de implementar esta tecnología en un caso de estudio específico.

Para realizar este estudio técnico y ambiental se ha aproximado el consumo de combustibles de la empresa INTELA S.A. y a partir de ello se ha estimado las emisiones de carbono equivalente asociadas a la producción de vapor saturado. Se ha usado herramientas de ingeniería de decisión para poner en contraste las necesidades de la empresa y la opinión de los expertos a través del estudio bibliográfico para elegir la mejor solución tecnológica.

Se ha llegado a la conclusión que la solución que combustiona mezcla de glp e hidrógeno (H_2) supera a la solución que solo combustiona este último. Además, pese a todas las ventajas que ofrece esta tecnología y a su disponibilidad, se considera que los beneficios directos para la empresa solo son medibles a largo plazo.

ABSTRACT

The production of saturated steam in the processes of the Ecuadorian industry is essential. In the case of the textile industry, steam is used in a large number of processes, such as dyeing, fluting and the press. Traditionally, saturated steam has been generated through the combustion of fossil fuels, such as bunker, diesel, LPG and natural gas. However, due to environmental concerns and the need to reduce greenhouse gas emissions, more sustainable alternatives for saturated steam production are being investigated.

One of these approaches is the production of saturated steam using hydrogen as an energy vector. Hydrogen is considered a "clean energy source" since when it is combusted, its only by-product is water. In short, hydrogen can be produced from renewable energy sources, such as solar or wind.

Despite all the benefits offered by the use of the hydrogen energy vector, technical and environmental studies are necessary to assess the feasibility of implementing this technology in a specific case study.

To carry out this technical and environmental study, the fuel consumption of the company INTELA S.A. has been approximated. From this, the equivalent carbon emissions associated with the production of saturated steam have been estimated. Decision engineering tools have been used to contrast the needs of the company and the opinion of experts through the bibliographical study to choose the best technological solution.

It has been concluded that the solution that combusts a mixture of LPG and Hydrogen (H₂) surpasses the solution that only combusts the latter. In addition, despite all the advantages that this technology offers and its availability, it is considered that the direct benefits for the company are only measurable in the long term.

KEYWORDS: Hydrogen, vector, solution, combustion, saturated steam, emissions, fuels.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Una de las preocupaciones de la humanidad desde hace varias décadas atrás es la obtención y uso de la energía. Ecuador, pese a ser un país petrolero, es altamente dependiente de combustibles fósiles de importación; y la preocupación acerca de la duración del petróleo deja sin sueño a muchos ecuatorianos. Es por eso que, en suma, a la corriente mundial de desarrollo tecnológico para la utilización de gas hidrógeno como un vector energético, en esta investigación se busca averiguar las implicaciones técnicas y ambientales de las tecnologías para la producción de vapor saturado haciendo uso del vector energético hidrógeno a través de tecnologías de combustión de H₂.

1.1 Objetivo General

- Realizar un estudio técnico y ambiental acerca del uso de tecnologías para la producción de vapor saturado a partir del vector energético hidrógeno aplicadas a la industria textil del Ecuador.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar una aproximación al consumo de derivados de petróleo necesarios para la producción de vapor saturado.
- Estimar la emisión de carbono producidas por la generación de vapor en la industria textil INTELA S.A
- Describir las tecnologías que usan el vector energético hidrógeno para la producción de vapor saturado en la industria textil INTELA S.A.
- Evaluar la factibilidad de la aplicación y uso de las tecnologías de vector energético hidrógeno para la producción de vapor saturado en la industria textil INTELA S.A.
- Seleccionar las tecnologías de vector energético hidrógeno adecuadas para reemplazar o combinar con las de energías no renovables.
- Evaluar los beneficios energéticos, ambientales y económicos del uso de las tecnologías seleccionadas.

1.3 Alcance

Ecuador es un país altamente dependiente del consumo de combustibles fósiles en distintos sectores, de los cuales, el industrial es el que mayor demanda de estos presenta. En la industria, la producción de vapor saturado de forma centralizada representa un alto uso de combustibles debido a la gran cantidad de procesos para el que es usado.

En el país, las industrias que tienen una mayor demanda de producción de vapor saturado son la alimenticia y la textil. Es por esta razón, que se ha escogido a la empresa INTELA S.A debido al tamaño de su producción y a la disponibilidad de la información necesaria para realizar la investigación.

De esta manera, a través de este estudio se podrá introducir a la industria ecuatoriana a la búsqueda de la reducción de su dependencia a los combustibles fósiles y a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

En el presente trabajo de integración curricular se realiza una aproximación al consumo de derivados de petróleo necesarios para la producción de vapor saturado y de las emisiones de carbono asociadas a este en la industria textil a través del caso de estudio de la empresa INTELA S.A.

Posterior a esto, se analizará la disponibilidad de la aplicación las tecnologías de vector energético hidrógeno, tanto para sustituir o combinar, en los sistemas de producción de vapor saturado por derivados del petróleo ya existentes en las mencionadas industrias.

Se realizará un estudio, acerca de la factibilidad de la aplicación y uso de las tecnologías de vector energético hidrógeno para la producción de vapor saturado en la industria ecuatoriana. Con base en los mencionado, se plantarán criterios para seleccionar las tecnologías adecuadas que permitan reemplazar las energías no renovables usadas en la producción de vapor saturado. Finalmente, se concluirá esta investigación estimando los beneficios energéticos, ambientales y económicos del uso de las tecnologías seleccionadas aplicadas al caso de estudio.

1.4 Marco teórico

El vapor saturado tiene un uso muy extenso como materia prima en la industria ecuatoriana, debido a sus ventajas para la generación de energía mecánica y eléctrica. Este es utilizado como una fuente de calor que genera potencia en centrales térmicas y termoeléctricas. En Ecuador el vapor saturado es producido a partir de energías no renovables como derivados de petróleo [1]. Con base en lo que manifiesta el Ministerio de Energías y Recursos no Renovables [2], el país consume 62.7 (MMbbl) de derivados de petróleo, equivalente al 75.5% del consumo nacional. A su vez, la industria ecuatoriana consume 14.5 millones de BEP, de los cuales el 25.6% es proveniente del diésel. Por otro lado, se estima que entre los años 2024 y 2035 Ecuador podría convertirse en importador neto de petróleo, puesto que, sus valores más altos de extracción varían de 196 a 215 (MMbbl) en los años 2014-2025 [1]. En este contexto, Ecuador resulta un país dependiente del petróleo, lo que lo califica como altamente vulnerable en seguridad energética y estabilidad económica [1].

En Ecuador dos grandes subsectores de la industria manufacturera que consumen mayor cantidad de energía son el textil y alimentario según el IPI-M [3] del país, realizado por el INEC, que mide la producción de la industria manufacturera con respecto a las actividades industriales en tiempo real. Este es un indicador de conjuntura que refleja la evolución mes a mes de la actividad productiva en Ecuador. Debido a que en Ecuador no existen registros ni estadísticas del consumo energético de cada subsector, se determina el nivel con consumo de energía de cada industria a partir de su nivel de producción. Es así que, para las industrias textil y alimentaria que son las industrias que usan mayor cantidad de vapor saturado para sus procesos, representan un 3.29 % y 2.29% [4].

El sector industrial del país es dependiente de los derivados del petróleo. No se posee información específica del consumo final de estos derivados para la producción de vapor saturado en la industria ecuatoriana. Sin embargo, de la auditoría energética a la empresa Intela S.A. [6], se estima que este es significativo, con base en la cantidad de procesos que requieren de vapor saturado. En este contexto, y considerando que en los próximos años no exista oferta de petróleo nacional para satisfacer esta demanda interna [1], es necesario la búsqueda de otras fuentes de energía para la producción de vapor saturado a nivel industrial.

Ecuador posee una gran cantidad de fuentes de energía renovable que no han sido aprovechadas. Dentro del mapa solar [7] se menciona que el país tiene un GHI anual de $2.9 \text{ kWh/m}^2 \text{ día}$ a $6.3 \text{ kWh/m}^2 \text{ día}$, los cuales son niveles suficientemente altos de radiación solar como para implementar tecnologías de aprovechamiento solar. Por otro lado, existen otras fuentes renovables no-convencionales y convencionales que pueden ser utilizadas para la producción del hidrógeno verde,

entre ellas la biomasa y la energía eólica. En Atlas Bioenergético se menciona que Ecuador posee suficiente materia orgánica proveniente de desechos (residuos de animales, agrícolas y forestales) como para la producción de energía limpia y renovable y del gas hidrógeno verde [8].

En este apartado se presenta el estado del arte de la investigación. Se ha dividido en dos grandes secciones que corresponden a información concerniente al caso de estudio (INTELA S.A.) y revisión de tecnologías.

1.4.1 Caso de estudio INTELA S.A

En esta sección se presenta la matriz energética de la empresa INTELA S.A. y características asociadas a las calderas con las que la empresa cuenta. Estos datos serán relevantes en la metodología ya que serán la base para poder realizar la estimación del consumo de combustibles y para definir los criterios de selección de la solución.

1.4.1.1 Matriz Energética de la empresa

Según Enríquez E. en [6] se muestra las principales fuentes de energía que abastecen las operaciones de la empresa INTELA S.A. Se conoce que se usa un 74.5% de combustible bunker del total de energía consumida, mientras que consume un 20.97% y 4.58% de electricidad y diesel respectivamente. También se usa una cantidad mínima de 0.0020% de glp.

1.4.1.2 Calderas usadas en la empresa

La empresa dispone de tres calderas pirotubulares de las marcas: Cleaver Brooks, Kewanee y Columbia. La capacidad de las calderas son 250 (BHP), 375 (BHP) y 250 (BHP) y operan a una presión de 150 (psig). Todas las calderas consumen bunker y diésel como combustible principal. Sin embargo, también consumen glp en el encendido de las mismas [6].

1.4.2 Revisión de tecnologías

En esta sección se abordan las soluciones tecnológicas para combustionar hidrógeno para la producción de vapor saturado en procesos industriales. Se han especificado términos inherentes a la investigación como lo es la definición de vector energético. También, se ha desarrollado el impacto ambiental y demás implicaciones que tiene el uso del hidrógeno. Finalmente se ha detallado las consideraciones que tienen que tener las soluciones tecnológicas propuestas.

1.4.2.1 Vectores energéticos

Los vectores energéticos, tal como se lo menciona en [9], son todo dispositivo, que a través de procesos fisicoquímicos, usa una sustancia como medio de almacenamiento de energía. Esta energía es liberada controladamente den un periodo futuro y en otro lugar en función de un requerimiento energético. Es importante resaltar que los vectores energéticos funcionan como baterías, es por esta razón que no pueden ser considerados como fuentes de energía. Se considera a los vectores energéticos como un eslabón clave en el cambio de la matriz energética de los países debido a que la producción de energía de fuentes como la eólica, geotérmica, mareomotriz, hidráulica, etc., puede ser almacenada en periodos donde el consumo este lejos de los valores pico y liberada en las horas pico de consumo [10].

1.4.2.2 Hidrógeno

El Hidrógeno es la base de la tabla periódica, con número atómico 1, posee un solo electrón y protón. Su forma más estable es en la molécula H_2 , conocido como gas hidrógeno [11]. Este elemento es el más abundante del universo, se conoce que el 75% de toda la materia es hidrógeno [12]. El hidrógeno como gas es inodoro, incoloro e insípido. El gas hidrógeno puede ser usado como un combustible limpio, debido a que, después de la combustión, el único subproducto es el vapor de agua [11].

1.4.2.3 El hidrógeno como vector energético

El gas hidrógeno hoy en día representa una propuesta de solución para combatir el cambio climático, la contaminación del aire y el abastecimiento de energía. La energía del hidrógeno tiene un potencial nada despreciable, sobre todo, en casos en los que se requiere de energía estacional [13]. Tal como se menciona en [11], un vector energético es una sustancia que almacena energía. El gas hidrógeno, al ser muy ligero en comparación con otros vectores energéticos, le da una ventaja como medio de almacenamiento de energía [12]. En la referencia [14] se menciona que el hidrogeno como almacenamiento de energía tiene una gran popularidad en la actualidad debido a las múltiples proyecciones e ideas de sistemas para su producción y aprovechamiento.

No todo es ventajas con el vector energético hidrógeno. El gas H_2 no se encuentra en la tierra de forma natural [11] , y para producirlo, es necesario invertir energía, que puede ser renovable como no. Tal como lo afirma Abdin Z. en [15], se puede obtener el gas hidrogeno a través de la división del agua energizada con fuentes renovables, conversión termoquímica de combustibles fósiles y procesos biológicos.

Todos los aspectos relacionados a la producción y almacenaje de gas hidrógeno no deben verse como problemas, sino como desafíos. Este vector energético requiere del diseño y construcción de una infraestructura que pueda aprovechar el hidrogeno que interviene en distintos procesos [16]. Una parte importante del estudio del hidrogeno como vector energético es el aprovechamiento del mismo. Una forma de hacerlo, que se ha investigado y desarrollado en los últimos años, es calentar calderas para generar vapor como un fluido de trabajo para distintos procesos industriales. En el siguiente apartado se muestran las distintas tecnologías asociadas al H₂ como combustible para calderas.

1.4.2.4 Impacto ambiental del vector energético hidrógeno

El vector energético hidrógeno (H₂) no es una fuente primaria, debido a que no se lo puede encontrar en forma de gas en la naturaleza. Por lo tanto, su impacto ambiental este arraigado en sus métodos de producción. Existe una gran variedad de rutas de producción de hidrógeno, no obstante, el criterio más adecuado para clasificarlas en este estudio es por la cantidad de emisiones de carbono equivalente derivadas en su proceso de transformación. En la referencia [17], Ausfelder F. se consideran las siguientes cuatro rutas: reformado de metano con vapor, reformado de metano con vapor con captura y almacenamiento de carbono, pirólisis de metano y electrólisis de membrana de polímero a las que se denomina con los colores gris, azul, turquesa y verde. Mientras que para Cheng C. [18] solo existen tres tipos de hidrogeno, gris, azul y verde. Incluso para muchos otros autores como Kilner J. [19] existen hidrógenos de otros colores, como lo es el rosa cuya materia prima principal son los residuos nucleares. Estos colores hacen referencia al grado en el que la cadena de producción de hidrógeno genera emisiones de carbono liberadas en el medio ambiente. De tal manera, que el único hidrógeno que se considera de emisiones de CO₂e cero es el verde.

Se ha descubierto que un enfoque prometedor para lograr la descarbonización es usar hidrógeno proveniente de fuentes renovables en sectores de la industria que necesitan mucha energía, tal como el transporte, la producción de energía y el sector químico. Empero, en la referencia [20] para lograr que el hidrogeno sea una fuente secundaria de energía limpia se debe emprender lo más pronto posible en un largo proceso hasta obtener un escenario de emisiones netas cero para el año 2050.

Este proceso antes mencionado debe incluir la infraestructura habilitadora para la producción del hidrógeno como tal, capacidad de generación a partir de fuentes renovables, transporte y almacenamiento [20]. Por otro lado, en [21] se prevé que las tecnologías para usar el hidrógeno como es en el caso de la combustión están siendo desarrolladas a un ritmo más acelerado.

La creación de infraestructura y desarrollo de tecnologías exige brevedad a la orden de la meta de producción total de hidrógeno verde de 95 Mt para el año 2030 propuesta en [20] y graficada en la Figura 1.

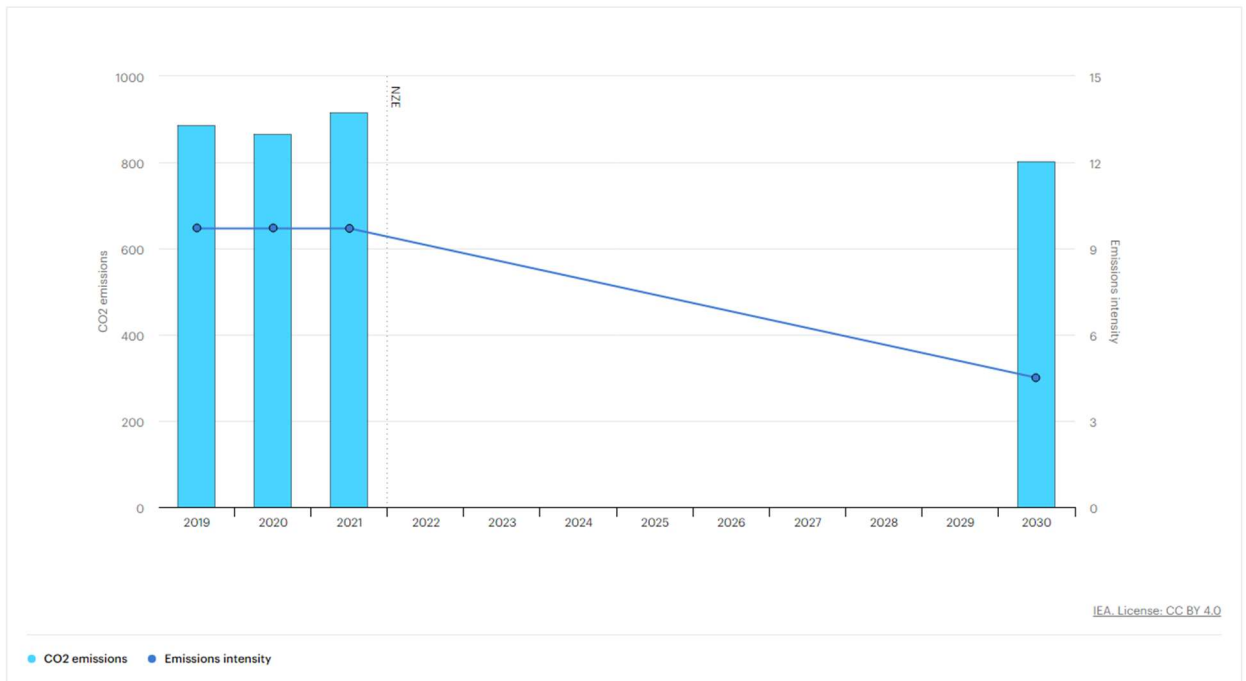


Figura 1. Emisiones de CO₂e de la producción global de hidrógeno e intensidad media de emisiones netas cero 2019-2030 [20].

Hasta ahora, la única forma de obtener hidrógeno de cero emisiones es a través de la ruta verde que es por el fenómeno de electrolisis. Eventualmente, producción actual de hidrógeno en más del 99% se basa en la quema de combustibles fósiles y en su mayoría de reformado con vapor de gas natural sin captura de carbono y la gasificación del carbono [20]. De hecho, en fuentes como [22] aseguran que la producción de hidrogeno de rutas que usan materias primas como la electricidad y la biomasa representaron tan solo un 0.2% en el año 2021.

Para lograr la meta que se propone en [20] se debe aumentar la producción de energía eléctrica en el corto plazo. Esto se traduce en que el 40% de la demanda mundial de energía para la producción de H₂ en 2030 será satisfecha con electricidad. De tal manera, que se deberá concentrar los esfuerzos en crear la infraestructura para obtener 2700 TWh de electricidad proveniente de fuentes renovables.

Comparando las dos rutas extremas de producción de hidrógeno gris y verde, es posible afirmar que las tecnologías de electrólisis como la membrana de intercambio de protones y electrocatalizadores son comerciales, sin embargo, no son una competencia frente a las tecnologías basadas en combustibles fósiles [20]. Esto induce a tratar el tema economía del hidrógeno, que será explicada en el siguiente apartado.

El transporte del hidrógeno es un reto ingenieril de elevada dificultad, para distancias relativamente cortas (5000 km), un sistema de distribución por tuberías es una opción actualmente rentable [23]. Sin embargo, para grandes distancias, ya sea que sean instalaciones nuevas o reutilizadas se deben considerar aspectos costosos de solucionar, tal como la rugosidad interna de las tuberías, la capacidad de carga y la distancia entre estaciones de compresión [24]. Las instalaciones que hoy en día transportan hidrógeno se encuentran en Estados Unidos y en Europa y cada una de ellas tiene aproximadamente 2600 km y son de propiedad privada [20]. De esta manera, es posible inferir que el hidrógeno en la gran mayoría de casos se produce y consume en el mismo lugar.

Existe una nueva propuesta de (ISO) acerca de una metodología para determinar las emisiones de gases de efecto invernadero inherentes a la producción de H₂, así como también de su transporte, para 2023 [25]. Según Schneider [26] esto permitirá que se deban buenas prácticas para los ejecutores de proyectos relacionados a la producción de hidrógeno verde. Para que de esta forma, se logre que 7 de los 16 ítems del impacto ambiental se reduzcan en un 52% y 98%, que corresponden al agotamiento de ozono y recursos energéticos y cambio climático [27].

Finalmente, para que la producción de hidrógeno tenga un impacto positivo en el medio ambiente se debe usar energía proveniente de fuentes renovables primarias. Sin embargo, en la actualidad existen muchas limitaciones para una ejecución de proyectos a corto plazo [28] [29]. Por lo que, es imperante la necesidad de desarrollar tecnologías puente, que si bien, no darán solución a largo plazo, representarán un eslabón importante en la investigación y el desarrollo de la infraestructura óptima para obtener hidrógeno verde.

1.4.2.5 Economía del hidrógeno

La economía del hidrógeno hace referencia a la unión de la geopolítica, la gestión de recursos, las altas finanzas y la sociedad en función de un mercado del hidrógeno [30]. Esta, es el resultado del cambio de la matriz energética de los países de fuentes convencionales como el petróleo y gas natural a fuentes renovables de energía almacenada en grandes pilas de hidrógeno. Según varios expertos, de entre ellos, en [31] se menciona que la economía de hidrógeno es un hecho inminente a mediano plazo. Por lo que, es prioritario que se desarrollen las tecnologías necesarias para producir hidrogeno verde en grandes cantidades para que el mercado de este pueda sostenerse. La economía del hidrógeno reemplazaría la actual economía petrolera y es una forma efectiva de introducir a todos los sectores diferentes al energético al reemplazo de los combustibles fósiles de altas emisiones de CO₂ por energía de emisiones cero [32].

1.4.2.6 Mercado de oferta del hidrógeno

Ecuador en la actualidad no produce gas hidrógeno (H_2) de forma comercial. Sin embargo, se estima que por el potencial de generación de energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos podría traducirse en una producción anual en todo el país de $2.55 \times 10^8 \text{ kg } H_2/\text{año}$ [33]. En Ecuador la obtención de hidrógeno como vector energético es una opción viable al igual que Chile debido a sus condiciones geográficas. El estado ecuatoriano ha emprendido desde hace varios años atrás en el cambio de la matriz energética del país. Tomando en consideración el amplio potencial de producción de hidrógeno que tiene el Ecuador sería importante que intervengan la academia y la empresa mediados por el estado a través de políticas energéticas para que el país se introduzca en la economía del H_2 a mediano plazo [34].

1.4.2.7 Calderas de hidrógeno

La gran mayoría de procesos industriales requieren de altas temperaturas y la necesidad de aumentar la potencia de forma instantánea. De esta manera, no es posible sustituir las calderas de combustión por energía renovable debido a que el proceso de producción de vapor sería más lento y por lo tanto dispensa de una gran acumulación de agua y una infraestructura con alta demanda de espacio.

Las calderas de hidrógeno son calderas que a diferencia de las convencionales queman gas hidrógeno para producir vapor saturado. Debido a las propiedades físicas y químicas del hidrógeno, las calderas que funcionan con este gas tienen componentes como el detector de llama y el quemador diferentes [35].

1.4.2.8 Tecnologías de uso de H_2 para calentamiento de calderas

Una propiedad importante a considerar en la propuesta de soluciones es el índice de Wobbe que mide la energía del combustible por unidad de volumen [36]. El hidrógeno se encuentra dentro de los valores normales para un gas natural permisible. Es decir que, si se buscara aumentar el índice de Wobbe del gas a través de la mezcla con otros combustibles gaseosos, solo se generarían problemas operativos como los son la combustión incompleta y el sobrecalentamiento del quemador. En Osman [37], se sugiere que una forma adecuada de abordar las soluciones es modificar los quemadores para que funcionen con hidrógeno como corriente de alimentación de combustible, tal como se plantea Bosch [38] en las soluciones que se presentan a continuación.

Combustión de hidrógeno: se asume una alta disponibilidad del gas hidrógeno. La caldera y quemador se encuentran totalmente equipados para quemar H_2 en mezcla con gas Natural o glp.

Listo para hidrógeno: la caldera se encuentra preparada para quemar solo H_2 . El suministro de gas, controles y otros componentes deben ser reemplazados o modificados de acuerdo al diseño de la caldera.

Se deben tomar en cuenta algunas consideraciones para la aplicación de estas tecnologías. Entre ellas se encuentra la densidad del gas hidrógeno (H_2), que es más baja que la de otros gases combustibles. Por esta razón, se debe diseñar inyectores en los que se pueda tener un mejor control de la velocidad de propagación de la llama [39]. Las altas velocidades de la llama, que es 8 veces mayor que los otros gases, puede originar un retroceso que puede representar un peligro para los operadores de la caldera.

Por otro lado, la temperatura de la llama al combustionar hidrógeno es más alta que la de otros gases. Tal como se menciona en [40], la temperatura del H_2 solo es de $1985\text{ }^\circ\text{C}$, con una diferencia de $170\text{ }^\circ\text{C}$ más que el gas natural. Se debe diseñar los quemadores tomando en cuenta esta característica. Esto, debido a que, de lo contrario, es probable que la vida útil de los equipos y su seguridad se vena disminuidos.

La combustión de "hidrógeno solo" genera emisiones de gases de efecto invernadero contrario a lo que se cree. Esto sucede debido a que el comburente administrado es el aire. El aire contiene un porcentaje de 78% de nitrógeno [41]. Es así que, al combustionarse el hidrógeno en presencia de aire se forman óxidos nitrosos (NO_x). Estos gases son nocivos para la salud y son más representativos que otros gases de efecto invernadero en carbono equivalente. Para [42] es importante considerar las normativas de emisiones en el diseño de la caldera, e inclusive pensar en un sistema de recirculación de gases. Esta recirculación de los gases de escape también puede ser aprovechada para aumentar la eficiencia de la caldera. Otra solución, que es mencionada por Wang L. en [43], más costosa y no viable en la actualidad, es la de inyectar aire con menor contenido de nitrógeno.

En cuanto a la seguridad, el hidrogeno no presenta mayores complicaciones de fugas que otros combustibles pese a tener una molécula más pequeña que el metano [44]. Otro aspecto importante a considerar en el diseño de los quemadores es una célula que permita la detección de la llama del hidrógeno por su espectro ultravioleta [45]. Las llamas del hidrógeno no son visibles para el ser humano, a tal punto que, es posible que se esté produciendo un incendio y pasar desapercibido completamente hasta que las consecuencias se traduzcan en pérdidas tanto materiales como humanas.

Estructuras adicionales a la caldera también deben ser modificados, como es el caso de las tuberías. En el caso de las tuberías de acero, estas deben ser reemplazadas en su totalidad, debido a que el hidrógeno corroe el acero, fenómeno que se conoce como fragilización [46]. El control de la presión a la que fluye el hidrógeno debe ser una prioridad para evitar esta fragilización. Se puede aumentar la vida útil de las tuberías si se hace circular el hidrógeno a bajas presiones [47].

2 METODOLOGÍA

En este apartado se aborda el desarrollo del presente Trabajo de Integración Curricular a través de una metodología mixta. Por tal motivo, se considerarán tanto variables cuantitativas como cualitativas. Cabe resaltar que esta metodología no es de carácter experimental, de tal manera que, la información necesaria para obtener los resultados deseados se conseguirá con base en bibliografía, recomendaciones de fabricantes y caso de estudio INTELA S.A.

El procedimiento para desarrollar este estudio inicia con la aproximación al consumo de derivados de petróleo para la producción de vapor saturado en la empresa caso de estudio. Este consumo se usa como dato de entrada para encontrar las emisiones de carbono. Para realizar la aproximación del consumo de combustible de la empresa para la producción de vapor saturado se realizan proyecciones siguiendo la tendencia de las curvas del consumo de los años 2014 a 2017.

La estimación de las emisiones de carbono producto de la combustión de combustibles fósiles se considera el consumo de los diferentes combustibles que usa la empresa y las emisiones correspondientes a esos consumos que se muestran el Balance Energético Nacional del 2021. De esta forma, se obtiene un factor de emisiones y luego se realiza una conversión de unidades usando la densidad y poder calorífico de cada combustible.

Luego se realiza la definición de los criterios de decisión entre las soluciones para combustionar gas hidrógeno en las calderas. Estos criterios se dividen en los criterios que se demanda en el caso de estudio y los propuestos por los expertos que serán evaluados a través de la herramienta House of Quality (Casa de la calidad) para darles una ponderación.

Posteriormente se compara cada criterio ponderado con las soluciones tecnológicas para el reemplazo de los módulos necesarios para combustionar hidrógeno. Luego en una tabla de soluciones versus criterios se procede a encontrar la prioridad de cada solución. Finalmente se realiza un análisis de las soluciones respecto al suministro de hidrogeno en función de su origen e impacto en el medio ambiente. En la Figura 2 se muestra un esquema de la metodología descrita.

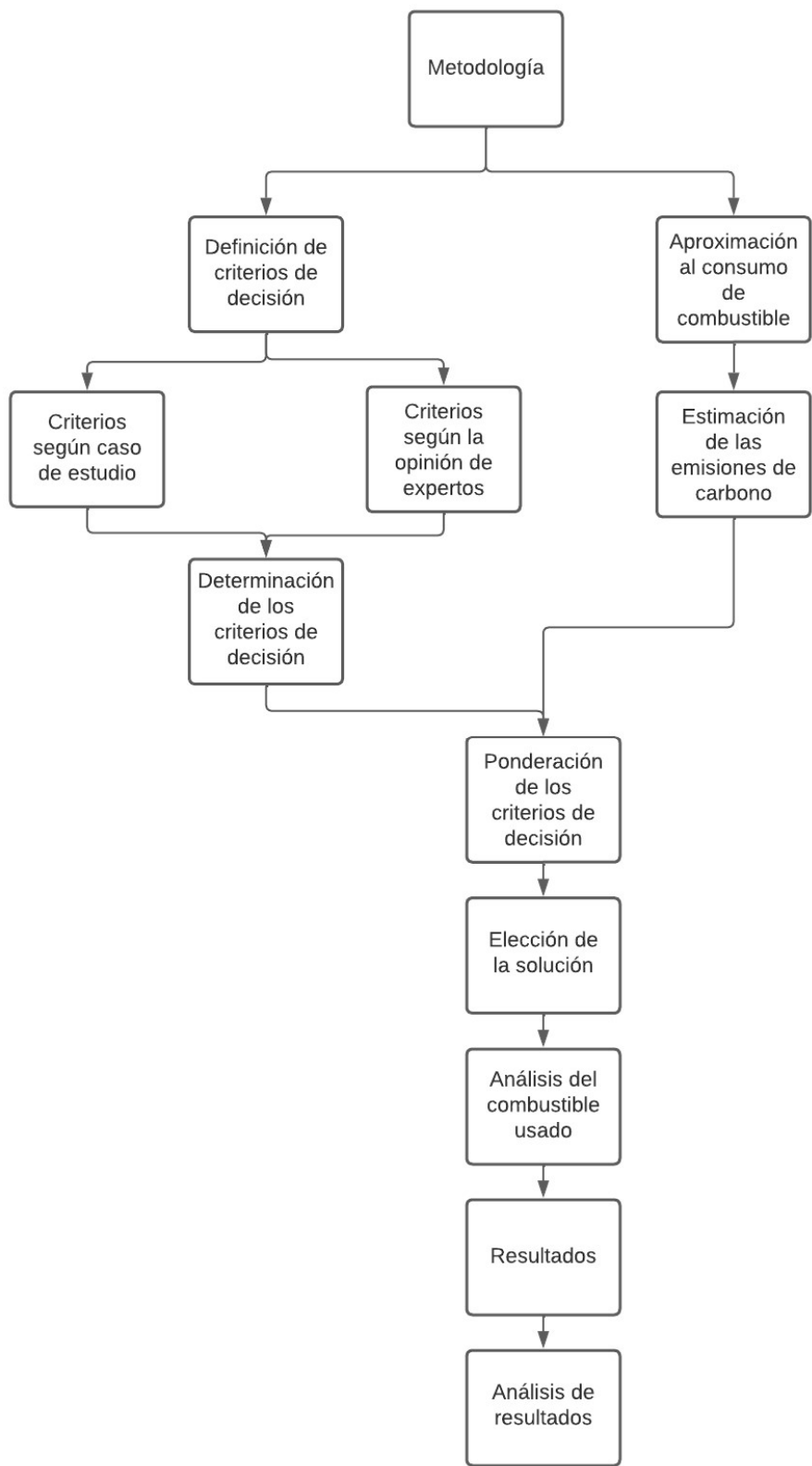


Figura 2. Esquema de la metodología empleada en la investigación.

Nota: Fuente propia

2.1 Aproximación al consumo de derivados de petróleo para la producción de vapor saturado en la empresa INTELA S.A.

En este apartado se usan las curvas del historial de consumo anual de bunker, diesel y glp del caso de estudio para extrapolar los resultados hacia 2021. Para el caso del consumo de bunker se observa una curva lineal Figura 3. por lo que se usará un sistema de ecuaciones de dos incógnitas. Para el caso del consumo de glp el comportamiento de su curva es de naturaleza cuadrática Figura 4. por lo que se usará un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas para tener un resultado con un mejor criterio de aproximación.

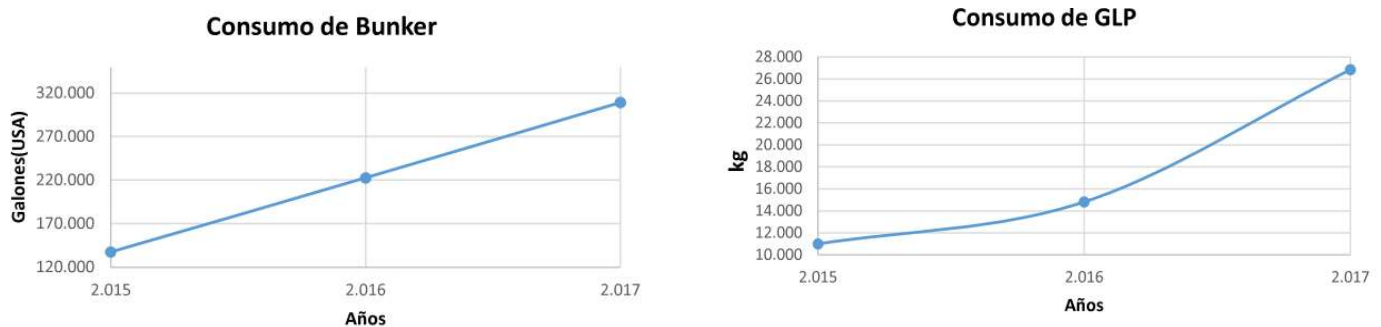


Figura 3. Historial de consumo de bunker de la industria INTELA S.A. [6]. Figura 4. Historial de consumo de glp de la industria INTELA S.A. [6].

Para el caso del consumo de combustible de diesel, que se observa en la figura 5, se considera que se ha eliminado su consumo por completo o bien se usa de manear ocasional. Por esta razón, siguiendo la tendencia de la curva del consumo de diesel se asume que para el año 2021 este valor es cero.

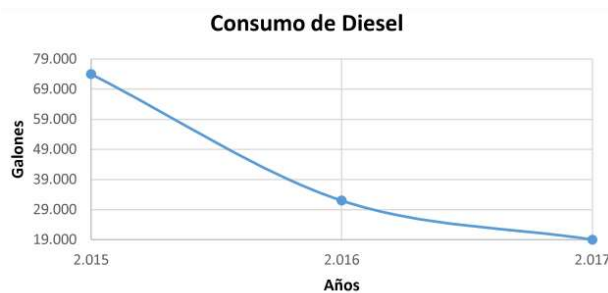


Figura 4. Historial de consumo de diesel de la industria INTELA S.A. [6].

2.2 Estimación de emisión de carbono producida por la generación de vapor en la industria textil INTELA S.A.

En este apartado se realizará la estimación de las emisiones de dióxido de carbono producidas por la combustión de los combustibles glp y bunker. La metodología que se empleará será el uso del balance energético nacional correspondiente al año 2021. Se obtendrá el factor de emisión como resultado del cociente entre las emisiones de carbono equivalente producto de la combustión de bunker (fuel oil) y glp y el consumo de los mismos por parte del sector industrial.

Caso bunker

Según la Tabla 7.11 del Balance Energético Nacional del 2021 [48], que se muestra en el Anexo 5.2, el consumo de bunker en Ecuador por parte del sector industrial durante 2021 corresponde a 1869 (kBEP). Mientras que, con base en la Tabla 8.6 [48] (Anexo 5.3), las emisiones de carbono equivalente producidas por este sector en el mismo año fueron de 842.6 kt_{CO2eq}.

El factor de emisión obtenido como resultado del cociente entre las emisiones y el consumo es de 0.45 kton CO_{2eq}/kBEP. Para poder usar este factor es necesario llevarlo a unidades de kton_{CO2eq}/gal. El primer paso para lograrlo, es llevar las unidades miles de barriles de petróleo (kBEP) a unidades en las que se puede encontrar el poder calorífico del bunker de Ecuador. Es así que el factor de emisión es de 73.67 ktCO_{2eq}/TJ. El poder calorífico del bunker según [49] es de 39.7 TJ/kt. Por lo tanto, al multiplicar el factor de emisión del bunker en unidades de energía por el poder calorífico se obtiene el factor en unidades de masa 2924.79 kton_{CO2eq}/kt_{bunker}.

El consumo de combustible de la empresa caso de estudio se encuentra en unidades de volumen. Por lo que se requiere que el factor de emisión se lleve a unidades de volumen. Para esto se sabe de la fuente [50], que los grados API del bunker en Ecuador se encuentra entre 11 y 14, lo que en promedio es 12.5° API. Para obtener la densidad del bunker se debe usar la gravedad específica en función de los grados API del combustible. Esta gravedad específica se obtiene a través de la ecuación (1) [51].

$$\text{Gravedad específica (15 °C)} = \frac{141.5}{API + 131.5} \quad (1)$$

De esta ecuación se obtiene que la gravedad específica del bunker es de 0.98. Para convertir la gravedad específica en densidad se multiplica por la densidad del agua que es 1000 kg/m^3 . La densidad del bunker entonces es de 982.6 kg/m^3 . Esta densidad es usada para determinar a cuanto equivale $1 \text{ kt}_{\text{bunker}}$ en galones a través de la fórmula de densidad. Finalmente se realiza la conversión de unidades y se obtiene que el factor de emisión del bunker es de $0.01087 \text{ kt}_{\text{CO}_2\text{eq}}/\text{gal}_{\text{bunker}}$.

Caso gas licuado de petróleo.

El consumo de gas licuado de petróleo en manos del sector industrial para el año 2021 es de 710.6 kBEP. Mientras que el valor de las emisiones de carbono equivalente es de $260.6 \text{ kt}_{\text{CO}_2\text{eq}}$. El factor de emisiones que se obtiene corresponde al valor de $0.37 \text{ kt}_{\text{CO}_2\text{eq}}/\text{kBEP}$. Se sigue la misma metodología para la transformación de unidades que en el caso del bunker. De tal manera, que los valores necesarios para llegar al resultado deseado son el poder calorífico del glp en Ecuador que corresponde a 10830 kcal/kg [52] y la densidad normalizada del glp en Ecuador [53]. Finalmente se obtiene el factor de emisión del glp en unidades de volumen de $0.006 \text{ kt}_{\text{CO}_2\text{eq}}/\text{gal}_{\text{glp}}$.

2.3 Definición de los criterios de decisión entre las soluciones para combustionar Hidrógeno (H₂) en las calderas.

En este apartado se detallan las necesidades del usuario, que en este caso es la empresa INTELA S.A. Estas se entienden como la voz del usuario y los criterios propuestos por expertos representan la voz del ingeniero.

2.3.1 Criterios según el caso de estudio INTELA S.A.

La empresa caso de estudio tiene claro que la solución tecnológica que se elija debe tener la capacidad de mantener la producción de vapor actual. Este punto es inflexible y de hecho se busca que la eficiencia y la producción puedan estar por encima del nivel que se maneja en la actualidad. Para lograr estos resultados la empresa demanda de los siguientes criterios:

Fácil mantenimiento:

La empresa busca una solución que sea fácil de mantener en el mediano y largo plazo. Además de que esta se realice con el menor costo y generación de desechos posible. INTELA S.A. le da un peso medio a este punto siendo consciente de que la tecnología es reciente.

Segura:

Se busca que las soluciones sean amigables con el personal operario y con el menor riesgo de accidentes. La salud del personal es un punto con un peso entre medio y alto. Porque si hubiese riesgos fuera del límite permisible por la empresa y por los organismos reguladores no se consideraría una solución como una opción.

Duradera:

Las tecnologías instaladas deben cumplir con una vida útil en el mediano plazo para justificar la inversión realizada. También tiene un peso entre medio y alto por su relación con los puntos acerca de la seguridad y la economía.

Económica:

El costo total de cada tecnología y el ahorro en combustibles es un punto con un peso alto, debido a que, en caso de no ser viable en mediano plazo, la empresa deberá esperar a que las soluciones sean más baratas.

Disponibilidad:

La disponibilidad es un punto que toma en consideración la empresa debido a que las soluciones son recientes y se encuentran en constante desarrollo. Además de que en Ecuador no existen empresas que las ofrezcan.

Bajo impacto para el medio ambiente:

El bajo impacto para el medio ambiente es un punto que se centra específicamente en que las soluciones generen la menor cantidad de emisiones de carbono equivalente. Tiene un peso alto como respuesta a objetivo principal del proyecto de cambio de tecnología para aportar a la lucha contra el cambio climático.

Atención a los sistemas de abastecimiento:

La atención a los sistemas de abastecimiento hace alusión al nivel de control que la empresa debe prestar a todos los subsistemas empleados para mantener las operaciones de las calderas adecuadamente. El peso de este punto es bajo debido a que el nivel de relación con otros puntos es bajo.

Baja ocupación de espacio:

La empresa expresa su necesidad de que las nuevas tecnologías no ocupen más espacio del que la empresa puede destinar a las mismas. Cada sistema de la empresa tiene sus instalaciones y una ocupación mayor de espacio implicaría un reordenamiento en el mejor de los casos y una expansión en el peor. Por lo tanto, el uso de del espacio tiene un peso medio como respuesta a su relación con otros puntos.

2.3.2 Criterios según la opinión de expertos

En respuesta a las demandas de la empresa para lograr el objetivo de superar la eficiencia y el nivel de producción de vapor saturado. Se han planteado los siguientes criterios en función de las características que los expertos en tecnologías de calderas para hidrógeno consideran clave.

Menor Número de Componentes:

Las calderas que posee la empresa INTELA S.A. en la actualidad tienen tres componentes principales que corresponden al quemador, intercambiador de calor y chimenea. Adecuar las calderas para combustionar hidrógeno implica el cambio y aumento de componentes. El caso de estudio demanda un menor número de componentes para mayor facilidad en el mantenimiento.

Menor retención de residuos en la caldera:

Las calderas que posee la empresa son pirotubulares, de manera que, una combustión incompleta representa una dificultad para mantener la caldera. Esto sucede debido a la acumulación de residuos en los conductos por donde se evacúan los gases producto de la combustión.

Control de Temperatura:

La combustión de hidrógeno se produce a temperaturas mucho más altas que otros combustibles como el glp. El calor excedente debe ser bien administrado para evitar posibles accidentes. Por esta razón el control de la temperatura es primordial para garantizar la seguridad del personal operador.

Control de la inyección del combustible:

El nivel de control de la inyección del combustible varía en función de la solución. Para el caso en el que el hidrógeno se mezcla con glp el control del suministro de hidrogeno en una proporción muy específica implica un grado de atención mayor.

Reforzamiento de las estructuras metálicas de la caldera:

Debido a que la caldera será sometida a temperaturas más altas, variables como la presión también elevan su importancia, pues, estructuras metálicas que fallen podrían ocasionar accidentes que involucren al personal. Al combustionar el hidrógeno se debe tener especial cuidado de que no existan fugas tanto por el fenómeno de retroceso de la llama como en la línea de distribución del

combustible. Las consecuencias de estas son quemaduras a los operadores e intoxicación respectivamente.

Inversión Inicial:

La inversión inicial es un factor importante, considerando que las soluciones tecnológicas actuales para implementar la combustión de hidrogeno están en desarrollo. La empresa busca obtener beneficios económicos sobre la inversión en el cambio de la tecnología, por lo tanto, que la solución sea la más rentable a corto plazo tiene un peso significativo. De igual manera, este criterio en mayor medida relaciona otros criterios tal como la cantidad de módulos y componentes, la eficiencia y reforzamiento de las estructuras metálicas.

Tecnología desarrollada y lista para instalar:

Las soluciones propuestas en este estudio están listas para ser ejecutadas en las instalaciones de INTELA S.A. y varían muy ligeramente de fabricante en fabricante. Sin embargo, por sus características, una solución tiene mayor grado de experimentación previa a la operatividad al 100%.

Menores emisiones de CO₂ equivalente:

Por sus características, las soluciones propuestas generan diferentes cantidades de CO₂ equivalente que son expulsadas al ambiente. Incluso, si no se considera el carbono equivalente, los gases de escape de cada solución son diferentes. La empresa INTELA S.A. con el afán de contribuir y sumarse al movimiento de la lucha contra el cambio climático le da un peso mayor a que la solución tenga menores emisiones de carbono.

Recirculación y encapsulamiento de gases:

Las calderas actuales no poseen recirculación de gases de escape, así como tampoco sistemas de encapsulamiento de los mismos. Los productos de la combustión son en mayor medida metano, oxígeno, dióxido de carbono y agua; y en menor medida óxidos de nitrógeno que afectan la salud de las personas que están expuestas a ellos a corto, mediano y largo plazo. Cuando se combustiona hidrógeno se genera un alto porcentaje de óxidos de Nitrógeno. Por lo tanto, el buen manejo de los productos de la combustión es un factor importante para que el nuevo sistema se pueda considerar seguro.

Menor cantidad de módulos:

En este criterio se consideran los módulos de los sistemas adicionales como lo son tuberías, sistemas de seguridad, celdas de detección de llama, almacenamiento de los combustibles, sistema de recirculación gases, etc.

Mayor eficiencia:

La eficiencia de las soluciones como ya se ha mencionado en el precio, es un criterio muy relevante. Esto se debe principalmente a que a través de este se justifican muchos de los criterios antes descritos, tanto en el eje económico como en el ambiental. Siendo así importante resaltar que menor desperdicio ahorra recursos económicos a la empresa y en esencia menores emisiones de carbono.

2.4 Determinación de la prioridad de los criterios de decisión.

En este apartado se usa la técnica casa de la calidad (HOQ), completa en el Anexo 5.5, que pertenece al despliegue de la función de calidad (QFD). Esta técnica es ideal para realizar el estudio técnico de las soluciones de combustión de hidrogeno solo y en mezcla con glp o gas natural. A través de esta técnica, se valoran los criterios que el caso de estudio exige de las soluciones, por medio de la opinión de expertos (estado del arte).

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	D demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Column #																
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
					Menor número de componentes																
					Menor retención de residuos en la caldera																
					Control de fugas																
					Control de temperatura																
					Control de la inyección del combustible																
					Reforzamiento de las estructuras metálicas de la caldera																
					Inversión inicial																
					Tecnología desarrollada y lista para instalar																
					Menores emisiones de Co2 equivalente																
					Recirculación y encapsulamiento de gases																
					Menor cantidad de módulos																
					Más eficiente																
1	9	10,0	10,0	Fácil mantenimiento	○	○	▲	▲	▲	▲									▲		
2	9	15,0	15,0	Segura		▲	○	○		○				○	▲						
3	9	15,0	15,0	Duradera		▲		○	▲	○											
4	9	20,0	20,0	Económica						○	○					○				○	
5	9	5,0	5,0	Disponible									○								
6	9	20,0	20,0	Bajo impacto para el medio ambiente										○	○					○	
7	9	5,0	5,0	Bajo control	▲		○	○	○						○	▲					
8	9	10,0	10,0	Baja ocupación de espacio	○											○					
9																					
10																					
Target or Limit Value																					
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)																					
Max Relationship Value in Column					3	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Weight / Importance					65,0	120,0	160,0	205,0	70,0	250,0	160,0	45,0	225,0	270,0	105,0	240,0					
Relative Weight					3,4	6,2	8,3	10,6	3,6	12,9	9,3	2,3	11,6	14,0	5,4	12,4					

Figura 5. Fragmento de la casa de la calidad de los criterios de selección.

Nota: Fuente propia.

Usando el método antes descrito se ha encontrado la prioridad de los criterios de diseño. De esta manera se procederá a realizar una ponderación donde se contraste cada criterio uno a uno. A continuación, se muestra la Tabla 1, donde se encuentra la prioridad de los criterios de selección de forma descendente.

Tabla 1. Prioridad de cada criterio de selección

Prioridad	Criterio	Código
1	Recirculación y encapsulamiento de gases	REG1
2	Reforzamiento de las estructuras metálicas de la caldera	REM2
3	Eficiencia	E3
4	Emisiones de Co ₂ equivalente	ECO4
5	Control de Temperatura	CT5
6	Precio (inversión inicial)	P6
7	Control de Fugas	CF7
8	Retención de residuos en la caldera	RRC8
9	Cantidad de módulos	CM9
10	Control de la inyección del combustible	CIC10
11	Número de Componentes	NC11
12	Tecnología desarrollada y lista para instalar	TDI12

2.5 Ponderación de los criterios de decisión

Una vez determinada la prioridad de los criterios, se debe encontrar una ponderación poniendo en contraste a todos los criterios entre sí. De esta forma en la Tabla 2, cuando un criterio de una fila es mayor al criterio de una columna se valora con la unidad, mientras que si es el caso de que el criterio de una fila es menor al de una columna se valora con cero. Así, al final, en cada fila se suma a los valores la unidad; y para encontrar la ponderación se divide para la suma total de los criterios. En el anexo 5.4, se encuentra el procedimiento completo de las tablas en donde se ponen en contraste las soluciones para cada criterio.

Tabla 2. Ponderación criterio versus criterio

	REG1	REM2	E3	ECO4	CT5	P6	CF7	RRC8	CM9	CIC10	NC11	TDI12	$\sum+1$	Pond.
REG1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12	0,1538
REM2	0		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	0,1410
E3	0	0		1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0,1282
ECO4	0	0	0		1	1	1	1	1	1	1	1	9	0,1154
CT5	0	0	0	0		1	1	1	1	1	1	1	8	0,1026
P6	0	0	0	0	0		1	1	1	1	1	1	7	0,0897
CF7	0	0	0	0	0	0		1	1	1	1	1	6	0,0769
RRC8	0	0	0	0	0	0	0		1	1	1	1	5	0,0641
CM9	0	0	0	0	0	0	0	0		1	1	1	4	0,0513
CIC10	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	1	3	0,0385
NC11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	2	0,0256
TDI12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	0,0128
Total													78	1
REG1 > REM2 > E3 > ECO4 > CT5 > P6 > CF7 > RRC8 > CM9 > CIC10 > NC11 > TDI12														

2.6 Elección de la solución

Una vez que se obtienen las ponderaciones criterio versus criterio y solución versus solución de cada uno de estos, en la Tabla 3 se muestra la prioridad de la solución tecnológica, que se obtiene multiplicando las ponderaciones de cada caso

Tabla 3. Evaluación de soluciones respecto al número de componentes

	REG1	REM2	E3	ECO4	CT5	P6	CF7	RRC8	CM9	CIC10	NC11	TDI12	Suma	Prioridad
Solución 1 (Mezcla)	0,051	0,094	0,086	0,038	0,051	0,060	0,038	0,043	0,017	0,013	0,017	0,009	0,517	1
Solución 2 (Solo Hidrógeno)	0,103	0,047	0,043	0,077	0,051	0,030	0,038	0,021	0,034	0,026	0,009	0,004	0,483	2

2.7 Analisis del combustible inyectado

El hidrógeno (H_2) como ya se ha mencionado tiene diferentes orígenes en función de su proceso de transformación y las materias primas empleadas. De esta manera existen cuatro soluciones en las que la empresa puede abastecerse de hidrógeno. La primera es a través de la compra de hidrógeno gris que se obtiene de combustibles fósiles y que en temas ambientales las emisiones de carbono son las mismas. La segunda, es la compra de hidrógeno azul y turquesa que de igual manera se obtiene de combustibles fósiles pero que su producción tiene un sistema de captura de carbono que reduce las emisiones del mismo al ambiente. La tercera solución es la compra de hidrógeno verde, de origen de fuentes renovables y de emisiones netas cero, pero con

un costo de más del 200% en comparación con el hidrogeno gris y muy escaso.

Finalmente, la cuarta solución y la más viable en términos de impacto al medio ambiente y costes a largo plazo es la instalación de tecnologías e infraestructura para la generación de energía eléctrica renovable a través de biomasa o energía solar fotovoltaica. Sin embargo, de esta última solución se espera el retorno de la inversión a largo plazo. Siendo este el escenario, es importante resaltar que el origen del hidrógeno usado marcará una diferencia real en el impacto de la industria INTELA S.A. en el ambiente.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Los resultados a los que se ha llegado es que, debido a la combustión de gas licuado de petróleo y bunker para la generación de vapor saturado para la industria INTELA S.A. para el año 2022, se han emitido 4248.38 kt_{CO2eq} de dióxido de carbono a la atmosfera. Se puede observar el detalle de las emisiones de cada combustible en la siguiente tabla.

Tabla 4. Consumo y emisiones de combustibles fósiles para la producción de vapor saturado.

Combustible	Consumo (gal)	Factor de emisión (kt _{CO2eq} /gal)	Emisiones (kt _{CO2eq})
bunker	374000	0.01087	4065.4
glp	30500	0.006	183
Total			4248.4

Se ha obtenido que la solución tecnológica inherente a la combustión de gas hidrógeno para la producción de vapor saturado es la denominada “Solución 1” Correspondiente a la instalación de quemadores en las calderas para combustionar una mezcla de glp e hidrógeno en una proporción que va del 20% al 30%. Esta solución presenta mayor ventaja en los criterios: reforzamiento de las estructuras metálicas, eficiencia, inversión inicial, retención de residuos en la caldera, número de componentes y tecnología desarrollada y lista para instalar. Mientras que tiene criterios en contra como: la recirculación y encapsulamiento de gases, emisiones de CO₂ equivalente, cantidad de módulos y control de inyección del combustible. También se ha encontrado que criterios como: el control de temperatura y control de fugas no representan una ventaja o desventaja de la solución 1 frente a la otra solución.

Por otro lado, y abordando netamente el tema ambiental, se propusieron 4 soluciones referente al origen del hidrógeno usado. Siendo la mejor opción a nivel ambiental el que la empresa pueda producir su propio hidrógeno verde, pero a nivel económico se considera la compra de hidrógeno gris y azul. Estas soluciones se consideran para el largo y mediano plazo respectivamente.

Las emisiones dióxido de carbono producidas por la combustión de combustibles para la producción de vapor saturado para los procesos de la industria INTELA S.A se verán reducidos en gran medida tanto en la solución de combustión de solo hidrógeno como en la solución de combustión de mezcla de H₂ y glp. Para el caso de la solución de solo hidrógeno las emisiones de carbono asociadas a la producción de vapor saturado están netamente relacionadas con el origen del hidrógeno usado. En el caso de que el hidrógeno sea de origen verde, las emisiones netas de CO₂ serían cercanas a cero. Sin embargo, en el caso de que el origen del hidrogeno sean combustibles fósiles las emisiones de dióxido de carbono serían muy similares.

Por otro lado, para el caso de la solución seleccionada, combustión de mezcla de gas hidrógeno al 30% y glp, en el caso de que el origen del hidrógeno sea verde, se logrará reducir las emisiones de carbono en un 30% que se traduce en 1274.51 kt_{CO2eq} menos. Sin embargo, igual que para la solución que solo combustiona hidrogeno, en el caso de que su origen sea de fuentes no renovables y sin mecanismos de captura de las emisiones de dióxido de carbono al ambiente se mantendrían iguales.

3.2 Conclusiones

En esta investigación se ha realizado el estudio técnico y ambiental del uso de tecnologías para la producción de vapor saturado a partir del vector energético hidrógeno aplicadas a una industria textil de Ecuador para el caso de estudio. Para lograr este cometido se ha abordado el tema desde tres dimensiones en cuanto al consumo de energía, las soluciones disponibles en el mercado y su análisis desde las necesidades de la empresa INTELA S.A.; y las emisiones de carbono de la empresa al hacer uso o no de las tecnologías de combustión de hidrógeno.

Se ha realizado la estimación del consumo de derivados de petróleo para la producción de vapor saturado a través de proyecciones basadas en la geometría de las curvas de los consumos históricos de bunker, glp y diesel de la empresa INTELA S.A. Se ha determinado que el consumo de diesel se ha reducido de tal manera que se usa en ocasiones puntuales cuando el abastecimiento de bunker se ve afectado por factores externos. Por esta razón se ha llegado a la conclusión de que el consumo de diesel es despreciable.

Las emisiones de carbono producidas por la generación de vapor para los procesos de INTELA S.A. se han calculado con base en el Balance Energético Nacional. De igual manera, otros valores como el poder calorífico y la densidad han sido tomados de entidades y organismos ecuatorianos. De esta forma, se ha obtenido en kilo toneladas de dióxido de carbono equivalente las emisiones producto de la combustión de bunker y glp. Tomando como punto de partida los factores de emisión calculados y el porcentaje de hidrógeno que se le añadirá al glp es posible afirmar que las emisiones se reducirán en 1274.51 kt_{CO2eq} que representan un 30% considerando la combustión del glp.

Se ha podido resumir las tecnologías para el uso de hidrógeno en calderas industriales en dos soluciones que han sido descritas a lo largo de la investigación. Estas soluciones proponen el reemplazo de ciertas partes y módulos según sea el caso para aprovechar al máximo la infraestructura y la capacidad instalada de la empresa. Concretamente estas soluciones son la combustión de solo hidrógeno y la combustión de la mezcla de hidrógeno y glp.

A través del uso de la herramienta casa de la calidad se pudieron encontrar los pesos relativos de los diferentes criterios de selección de la tecnología más adecuada para la aplicación en el caso de estudio. Se consideró tanto la situación interna de la empresa como el contexto del consumo y abastecimiento de los diferentes combustibles fósiles y del gas hidrogeno.

Se llegó a la conclusión de que la mejor opción es la combustión de la mezcla de glp e hidrógeno en una proporción que va el 20% al 30%. La solución seleccionada presenta mayor ventaja en los criterios de reforzamiento de las estructuras metálicas, eficiencia, inversión inicial, retención de residuos en la caldera, número de componentes y disponibilidad de la tecnología.

Los beneficios energéticos del uso de la tecnología de combustión de hidrógeno para la generación de vapor saturado es una mayor eficiencia en el consumo de combustibles. Esto se debe a que los quemadores de las calderas están optimizados para consumir el combustible de la manera más eficaz. Para la parte ambiental los beneficios de la tecnología seleccionada guardan una estrecha relación con la reducción de las emisiones de CO₂ equivalente dependiendo del origen del hidrógeno usado en la mezcla. Se considera que la proporción de hidrogeno en la mezcla corresponde al porcentaje de disminución de las emisiones de carbono equivalente. Finalmente, los beneficios económicos del uso de la tecnología de combustión de mezcla de glp e hidrógeno no pueden ser estimados a corto plazo. Sin embargo, en una futura economía del hidrógeno, esta tecnología instalada será una importante fuente de ahorro en combustible y en impuestos por la huella de carbono de la empresa.

3.3 Recomendaciones

Se recomienda evaluar las emisiones de carbono equivalente asociadas al uso de la tecnología de combustión de mezcla de hidrógeno en el caso de usar gas natural. En Ecuador no se tiene gas natural propio, sin embargo, en los últimos meses se ha estado importando gas natural en el país a un precio menor que el de la importación y producción de glp.

Se recomienda con carácter indispensable el estudio de factibilidad de la producción de hidrógeno local. Es decir, que las empresas que requieran usar hidrógeno puedan producirlo en sus instalaciones. Se evitaría problemas de transporte y almacenamiento, de tal forma, que el uso de hidrógeno sea más rentable.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. S. Espinoza, J. Fontalvo, J. Martí-Herrero, P. Ramírez, y I. Capellán-Pérez, «Future oil extraction in Ecuador using a Hubbert approach», *Energy*, vol. 182, pp. 520-534, sep. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.061.
- [2] Ministerio de Energía y Recursos Naturales no renovables, «Instituto de Investigación Geológico y Energético-IIGE, Balance Energético Nacional 2020», 2021.
- [3] INEC, «Resultados índice de producción de la industria manufacturera.» 2022. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/nu9g2>
- [4] INEC, «Resultados: índice de producción de la Industria Manufacturera., Quito», 2020.
- [5] R. Ordoñez, «Incidencia de las características del vapor saturado en el proceso de peletizado. Propuesta de un plan para mejorar la eficiencia en el proceso de peletizado.», 2018. <https://n9.cl/7fml3o> (accedido 23 de enero de 2023).
- [6] E. M. Enríquez Lozano y F. D. Otero Lastra, «Auditoría energética e implementación de un plan de mejoras basado en la norma ISO 50001 para el sistema de tinturación de telas y calderos de la industria textil latinoamericana “Intela”», may 2019, Accedido: 20 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20212>
- [7] D. Vaca y F. Ordoñez, «Mapa Solar del Ecuador 2019», *Scinergy*, p. 10, 2019.
- [8] Esin Consultora, «Atlas Bioenergético del Ecuador», *Instituto Nacional de Preinversión*, pp. 9-12, 2014.
- [9] J. G. J. Pérez, *Puesta en marcha y regulación de instalaciones caloríficas. IMAR0408*. IC Editorial, 2022.
- [10] M. S. A. Zepeda *et al.*, *Anuario Iberoamericano de Derecho de la Energía: Vol. IV hacia un derecho Global de la energía*. Universidad Externado, 2022.
- [11] M. J. M. Ayora, «Análisis Técnico-Económico-Normativo acerca de la producción de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaico y su inyección en gasoducto de gas natural.», p. 25.
- [12] A. R. Bachiller, *Tecnología del hidrógeno y pilas de combustible*. Editorial Elearning, S.L., 2019.
- [13] L. Herenčić, M. Melnjak, T. Capuder, I. Andročec, y I. Rajšl, «Techno-economic and environmental assessment of energy vectors in decarbonization of energy islands», *Energy Conversion and Management*, vol. 236, p. 114064, may 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114064.
- [14] A. Rafiee, K. R. Khalilpour, J. Prest, y I. Skryabin, «Biogas as an energy vector», *Biomass and Bioenergy*, vol. 144, p. 105935, ene. 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105935.
- [15] Z. Abdin, A. Zafaranloo, A. Rafiee, W. Mérida, W. Lipiński, y K. R. Khalilpour, «Hydrogen as an energy vector», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, p. 109620, mar. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109620.

- [16] S. Barrett, «The European hydrogen and fuel cell Strategic Research Agenda and Deployment Strategy», *Fuel Cells Bulletin*, vol. 2005, n.º 5, pp. 12-19, may 2005, doi: 10.1016/S1464-2859(05)70631-3.
- [17] F. Ausfelder y A. Bazzanella, «Hydrogen in the Chemical Industry», en *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*, John Wiley & Sons, Ltd, 2016, pp. 19-40. doi: 10.1002/9783527674268.ch02.
- [18] C. K. Cheng y K. H. Ng, «Editorial SI: Progress in grey, blue and green hydrogen», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n.º 98, p. 41373, dic. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.268.
- [19] J. Kilner, «Métodos de producción de hidrógeno y sus colores», 2022. <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores> (accedido 30 de noviembre de 2022).
- [20] IEA, «Hydrogen Supply – Analysis», IEA, septiembre de 2022. <https://www.iea.org/reports/hydrogen-supply> (accedido 17 de noviembre de 2022).
- [21] Y. Lyu *et al.*, «Study of turbulent flame characteristics of water vapor diluted hydrogen-air micro-mixing combustion», *Renewable Energy*, vol. 189, pp. 1194-1205, abr. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.03.093.
- [22] M. M. Soltani, P. Ahmadi, y M. Ashjaee, «Techno-economic optimization of a biomass gasification energy system with Supercritical CO₂ cycle for hydrogen fuel and electricity production», *Fuel*, vol. 333, p. 126264, feb. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126264.
- [23] C. Tsiklios, M. Hermesmann, y T. E. Müller, «Hydrogen transport in large-scale transmission pipeline networks: Thermodynamic and environmental assessment of repurposed and new pipeline configurations», *Applied Energy*, vol. 327, p. 120097, dic. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120097.
- [24] R. M. Andrews, N. Gallon, y O. J. C. Huising, «Assessing damaged pipelines transporting hydrogen», *Journal of Pipeline Science and Engineering*, vol. 2, n.º 3, p. 100066, sep. 2022, doi: 10.1016/j.jpse.2022.100066.
- [25] F. Birol, «The Future of Hydrogen, Seizing today's opportunities». report prepared by the IEA for the G20, 82-83. Japan, June., 2019.
- [26] S. Schneider, S. Bajohr, F. Graf, y T. Kolb, «State of the Art of Hydrogen Production via Pyrolysis of Natural Gas.», 2020. <https://acortar.link/d53sxo> (accedido 17 de noviembre de 2022).
- [27] M. Hermesmann y T. E. Müller, «Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems», *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 90, p. 100996, may 2022, doi: 10.1016/j.pecs.2022.100996.
- [28] R. Moliner, M. J. Lázaro, y I. Suelves, «Analysis of the strategies for bridging the gap towards the Hydrogen Economy», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, n.º 43, pp. 19500-19508, nov. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.202.
- [29] L. Weger, A. Abánades, y T. Butler, «Methane cracking as a bridge technology to the hydrogen economy», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, n.º 1, pp. 720-731, ene. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.029.
- [30] T. Amirthan y M. S. A. Perera, «The role of storage systems in hydrogen economy: A review», *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 108, p. 104843, dic. 2022, doi: 10.1016/j.jngse.2022.104843.
- [31] K. J. Dillman y J. Heinonen, «A 'just' hydrogen economy: A normative energy justice assessment of the hydrogen economy», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167, p. 112648, oct. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112648.
- [32] P. Woods, H. Bustamante, y K.-F. Aguey-Zinsou, «The hydrogen economy - Where is the water?», *Energy Nexus*, vol. 7, p. 100123, sep. 2022, doi: 10.1016/j.nexus.2022.100123.
- [33] F. Posso, J. Sánchez, y J. Siguencia, «Estimación del Potencial de Producción de Hidrógeno a partir de Energía Solar Fotovoltaica en Ecuador». 2016. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/qrvie>
- [34] F. Rivera y J. Sánchez, «Hydrogen Economy in Ecuador: opportunities and barriers.» AVANCES, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/swbm9>
- [35] T. Ichihara, Y. Amano, y M. Machida, «Hydrogen damage in a power boiler: A study of damage selectivity and conditions», *Engineering Failure Analysis*, vol. 143, p. 106842, ene. 2023, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106842.

- [36] P. S. Roy, C. Ryu, y C. S. Park, «Predicting Wobbe Index and methane number of a renewable natural gas by the measurement of simple physical properties», *Fuel*, vol. 224, pp. 121-127, jul. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.03.074.
- [37] A. I. Osman *et al.*, «Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review», *Environ Chem Lett*, vol. 20, n.º 1, pp. 153-188, feb. 2022, doi: 10.1007/s10311-021-01322-8.
- [38] «Webinar: Calderas industriales de hidrógeno», *4e Chile*, 6 de agosto de 2020. <https://4echile.cl/webinar/webinar-calderas-industriales-de-hidrogeno/> (accedido 20 de junio de 2022).
- [39] T. G. Reichel y C. O. Paschereit, «Interaction mechanisms of fuel momentum with flashback limits in lean-premixed combustion of hydrogen», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, n.º 7, pp. 4518-4529, feb. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.018.
- [40] L. Yang y Z. Chen, «Effects of cryogenic temperature on premixed hydrogen/air flame propagation in a closed channel», *Proceedings of the Combustion Institute*, oct. 2022, doi: 10.1016/j.proci.2022.08.091.
- [41] S. P. M. Bane, R. Mével, S. A. Coronel, y J. E. Shepherd, «Flame burning speeds and combustion characteristics of undiluted and nitrogen-diluted hydrogen–nitrous oxide mixtures», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, n.º 16, pp. 10107-10116, ago. 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.04.232.
- [42] A. Colorado, V. McDonell, y S. Samuelsen, «Direct emissions of nitrous oxide from combustion of gaseous fuels», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, n.º 1, pp. 711-719, ene. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.202.
- [43] L.-Q. Wang, T. Li, y H.-H. Ma, «Explosion behaviors of hydrogen-nitrous oxide mixtures at reduced initial pressures», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 153, pp. 11-18, sep. 2021, doi: 10.1016/j.psep.2021.07.010.
- [44] K. Liu, C. He, Y. Yu, C. Guo, S. Lin, y J. Jiang, «A study of hydrogen leak and explosion in different regions of a hydrogen refueling station», *International Journal of Hydrogen Energy*, ene. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.267.
- [45] B. Li, D. Zhang, X. Li, Q. Gao, M. Yao, y Z. Li, «Strategy of interference-free atomic hydrogen detection in flames using femtosecond multi-photon laser-induced fluorescence», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, n.º 6, pp. 3876-3880, feb. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.294.
- [46] J. Du, H. Ming, J. Wang, y E.-H. Han, «Hydrogen embrittlement of 20# seamless steel in medium and low pressure gaseous hydrogen», *Materials Letters*, vol. 334, p. 133734, mar. 2023, doi: 10.1016/j.matlet.2022.133734.
- [47] H. Li, R. Niu, W. Li, H. Lu, J. Cairney, y Y.-S. Chen, «Hydrogen in pipeline steels: Recent advances in characterization and embrittlement mitigation», *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 105, p. 104709, sep. 2022, doi: 10.1016/j.jngse.2022.104709.
- [48] Ministerio de Energía y Minas, «Balance Energético Nacional 2021», 2022. <https://www.rekursyenergia.gob.ec/5900-2/> (accedido 19 de diciembre de 2022).
- [49] L. Haro, «Factor de emisión de CO2 del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador», *Ministerio del Ambiente*, 2020, Accedido: 19 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/r38vn>
- [50] PETROECUADOR, «Informe Estadístico Enero-Abril 2022», 2022, Accedido: 19 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/uxDQYG>
- [51] R. L. Mott, *Applied Fluid Mechanics*. Pearson Educación, 2006.
- [52] PETROECUADOR, «Hoja de Seguridad del Gas Licuado de Petróleo.» 2017. Accedido: 20 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/jfqnd>
- [53] INEN, «Norma INEN 684:2013: GAS LICUADO DE PETRÓLEO. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA.» 2013. Accedido: 20 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/0d5rj>
- [54] Instituto de Investigación Geológico y Energético- IIGE, «BALANCE ENERGÉTICO NACIONAL 2021.» 2021, [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/yybq>

5 ANEXOS

5.1 Extrapolación de los valores del combustible consumido por la empresa INTELA S.A. en 2022

Caso bunker

Tabla 5. Datos obtenidos de la Figura 3

Año	Consumo de bunker (gal USA)
2015	140000
2016	220000
2017	310000

Se realiza la extrapolación siguiendo el modelo matemático de la recta

$$y = ax + b \quad (2)$$

De donde se obtiene la matriz

$$\left(\begin{array}{cc|c} a & b & c \\ x_1 & 1 & y_1 \\ x_2 & 1 & y_2 \end{array} \right)$$

La matriz obtenida de los datos de la Tabla 17.

$$\left(\begin{array}{cc|c} 2016 & 1 & 220000 \\ 2017 & 1 & 310000 \end{array} \right)$$

El resultado del sistema de ecuaciones es:

$$\left(\begin{array}{l} a = 90000 \\ b = -18.122 \times 10^7 \end{array} \right)$$

El modelo matemático de la curva es:

$$y = 89249.8763x - 1.8 \times 10^8$$

De esta forma el consumo de bunker para el año 2021 se aproxima a 374000 galones estadounidenses.

Caso gas licuado de petróleo

Tabla 6. Datos obtenidos de la Figura 4

Año	Consumo de bunker (gal USA)
2015	11000
2016	14500
2017	27000

Se realiza la extrapolación siguiendo el modelo matemático de la parábola:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (3)$$

De donde se obtiene la matriz:

$$\begin{pmatrix} a & b & c & | & d \\ x_1^2 & x_1 & 1 & | & y_1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 & | & y_2 \\ x_3^2 & x_3 & 1 & | & y_3 \end{pmatrix}$$

La matriz obtenida de los datos de la Tabla 18:

$$\begin{pmatrix} 4060225 & 2015 & 1 & | & 11000 \\ 4064256 & 2016 & 1 & | & 14500 \\ 4068289 & 2017 & 1 & | & 27000 \end{pmatrix}$$

El resultado del sistema de ecuaciones es:

$$\begin{pmatrix} a = 4500 \\ b = -18136000 \\ c = 1.82730385 \times 10^{10} \end{pmatrix}$$

El modelo matemático de la curva es:

$$y = 4500x^2 - 1.81 \times 10^7x + 1.827 \times 10^{10}$$

De esta forma el consumo de glp para el año 2021 se aproxima a 30500 galones estadounidenses.

5.2 Tabla recortada del Balance Energético Nacional del 2021



Tabla 7.11: Balance Energético Nacional 2021 (kBEP)

ACTIVIDAD	ELECTRICIDAD	GAS LICUADO DE PETRÓLEO	GASOLINA	KEROSENE / JET FUEL	DIÉSEL OIL	FUEL OIL
MARÍTIMO	-	-	3,4	-	2.054,0	-
AÉREO	-	-	34,0	407,3	-	-
INDUSTRIA	7.051,6	710,6	178,8	-	3.532,3	1.869,0
RESIDENCIAL	4.931,5	6.874,6	-	-	-	-
COMERCIAL, SERV. PÚBL.	4.331,4	410,1	40,8	-	756,0	54,2
COMERCIAL	2.318,6	410,1	-	-	756,0	54,2
SERVICIOS	2.012,8	-	40,8	-	-	-
AGRO, PESCA, MINERÍA.	-	188,9	931,7	-	-	-
CONSTRUCCIÓN, OTROS.	388,9	1.485,1	3.496,6	315,6	543,5	-
CONSUMO ENERGÉTICO	16.710,0	9.764,2	26.254,9	722,9	28.440,4	1.923,2
NO ENERGÉTICO	-	-	-	-	-	-
CONSUMO FINAL	16710,0	9764,2	26254,9	722,9	28440,4	1923,2

Figura 6. Tabla recortada de consumo de combustibles del Balance Energético Nacional. [54]

5.3 Tabla recortada de Emisiones Gases de Efecto Invernadero 2021



Tabla 8.6: Emisiones Gases de Efecto Invernadero 2021 (kton CO₂ eq.)

ACTIVIDAD	ELECTRICIDAD	GAS LICUADO DE PETRÓLEO	GASOLINA	KEROSENE /JET FUEL	DIÉSEL OIL	FUEL OIL
MARÍTIMO	-	-	13,7	170,8	-	-
INDUSTRIA	-	260,6	72,2	-	1.524,8	842,6
RESIDENCIAL	-	2.525,5	-	-	-	-
COMERCIAL, SERV. PÚBL.	-	150,6	16,5	-	326,5	24,4
COMERCIAL	-	150,6	-	-	326,5	24,4
SERVICIOS	-	-	16,5	-	-	-
AGRO, PESCA, MINER.	-	69,4	377,3	-	-	-
CONSTRUCCIÓN, OTR.	-	545,6	1.415,9	132,1	234,7	-
CONSUMO ENERGÉTICO	-	3.587,4	10.724,3	302,9	12.293,9	867,0
NO ENERGÉTICO	-	-	-	-	-	-
CONSUMO FINAL	-	3.587,4	10.724,3	302,9	12.293,9	867,0
TOTAL EMISIONES	-	3.663,4	10.773,4	312,9	13.913,3	2.484,2

Figura 7. Tabla recortada de emisiones de gases de efecto invernadero 2021. [54]

5.4 Ponderación criterio versus solución

Tabla 7. Evaluación de soluciones respecto a la recirculación y encapsulamiento de gases.

	Solución 1	Solución 2	$\sum+1$	Ponderación
Solución 1 Mezcla		0	1	0.333
Solución 2 Hidrogeno solo	1		2	0.667
Total			3	1
Solución 2 > Solución 1				

Tabla 8. Evaluación de soluciones respecto al reforzamiento de las estructuras metálicas de la caldera.

	Solución 1	Solución 2	$\sum+1$	Ponderación
Solución 1 Mezcla		1	2	0.667
Solución 2 Hidrogeno solo	0		1	0.333
Total			3	1
Solución 1 > Solución 2				

Tabla 9. Evaluación de soluciones respecto a la eficiencia de la caldera.

	Solución 1	Solución 2	$\sum+1$	Ponderación
Solución 1 Mezcla		1	2	0.667
Solución 2 Hidrogeno solo	0		1	0.333
Total			3	1
Solución 1 > Solución 2				

Tabla 10. Evaluación de soluciones respecto a las emisiones de CO₂ equivalente.

	Solución 1	Solución 2	$\sum+1$	Ponderación
Solución 1 Mezcla		1	1	0.333
Solución 2 Hidrogeno solo	0		2	0.667
Total			3	1
Solución 2 > Solución 1				

Tabla 11. Evaluación de soluciones respecto al control de temperatura.

	Solución 1	Solución 2	$\sum+1$	Ponderación
Solución 1 Mezcla		0.5	1.5	0,5
Solución 2 Hidrogeno solo	0.5		1.5	0.5
Total			3	1
Solución 2 = Solución 1				

Tabla 12. Evaluación de soluciones respecto al precio.

	Solución 1	Solución 2	$\sum+1$	Ponderación
Solución 1 Mezcla		1	2	0.667
Solución 2 Hidrogeno solo	0		1	0.333
Total			3	1
Solución 1 > Solución 2				

Tabla 13. Evaluación de soluciones respecto al control de fugas

	Solución 1	Solución 2	$\sum+1$	Ponderación
Solución 1 Mezcla		0.5	1.5	0.5
Solución 2 Hidrogeno solo	0.5		1.5	0.5
Total			3	1
Solución 2 = Solución 1				

Tabla 14. Evaluación de soluciones respecto a la retención de residuos en la caldera.

	Solución 1	Solución 2	$\sum+1$	Ponderación
Solución 1 Mezcla		1	2	0.667
Solución 2 Hidrogeno solo	0		1	0.333
Total			3	1
Solución 1 > Solución 2				

Tabla 15. Evaluación de soluciones respecto a la cantidad de módulos.

	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1 Mezcla		1	1	0.333
Solución 2 Hidrogeno solo	0		2	0.667
Total			3	1
Solución 2 > Solución 1				

Tabla 16. Evaluación de soluciones respecto al control de la inyección del combustible

	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1 Mezcla		1	1	0.333
Solución 2 Hidrogeno solo	0		2	0.667
Total			3	1
Solución 2 > Solución 1				

Tabla 17. Evaluación de soluciones respecto al número de componentes

	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1 Mezcla		1	2	0.667
Solución 2 Hidrogeno solo	0		1	0.333
Total			3	1
Solución 1 > Solución 2				

Tabla 18. Evaluación de soluciones respecto al número de componentes

	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1 Mezcla		1	2	0.667
Solución 2 Hidrogeno solo	0		1	0.333
Total			3	1
Solución 1 > Solución 2				

5.5 Casa de la calidad

