

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño y evaluación de un sistema energético propulsado por hidrógeno
para tractores agrícolas”.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Steven Moisés Campuzano Ronquillo

Christian Oswaldo Palacios Loor

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

El presente proyecto es dedicado a todas las personas que han sido parte de mi formación académica durante todos estos años, como lo son mis padres Elvin Campuzano Molina y Katty Ronquillo Nieto, también a mi novia Viviana Nuñez Castro que me ha brindado su apoyo moral en las más difíciles situaciones.

Steven Campuzano

Este proyecto de graduación está dedicado a mis padres, Oswaldo y Maira, quienes me enseñaron el trabajo digno desde muy pequeño; a mis hermanas menores, Salomé y Judith, ellas son la fuerza que me motivan a seguir adelante y a todos mis amigos que me acompañaron a lo largo de mi carrera universitaria.

Christian Palacios

AGRADECIMIENTO

Expreso mi agradecimiento a mis familiares y amigos que a lo largo de la carrera contribuyeron a mi formación en diferentes maneras, a todos los profesores de la ESPOL, que han contribuido con un grano de conocimiento para poder llegar a estas instancias en mi preparación como profesional. Al Ing. Jordy Santana y al PhD. Mayken Espinoza por la guía brindada en la realización del proyecto.

Steven Campuzano

Un enorme agradecimiento a todas las familias que me abrieron las puertas de su hogar en esta larga travesía, en especial a la familia Zambrano Boderó, quienes me brindaron un espacio y me hicieron sentir un miembro más. A mi mejor amigo, Gonzalo, que me motivó a ingresar a esta prestigiosa institución. A mis compañeros Steven, Adrián y Hugo por toda la motivación durante la carrera.

Christian Palacios

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Christian Palacios* y *Steven Campuzano* damos nuestro consentimiento para que la ESPOLE realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Steven Moises
Campuzano Ronquillo



Christian Oswaldo
Palacios Loo

EVALUADORES

PhD. QUILAMBAQUI JARA MIGUEL

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. ESPINOZA ANDALUZ MAYKEN

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo estudiar la viabilidad de implementación de un sistema energético propulsado por hidrógeno como combustible para un tractor agrícola con la finalidad de disminuir la emisión de gases de efectos invernaderos a la atmósfera. Como punto de partida se establecieron los requerimientos del cliente, los cuales son la potencia requerida por el motor del tractor, teniendo los valores tanto de voltaje, corriente y potencia de cada componente se procedió a seleccionar los equipos (motor AC, inversor de corriente, celda de combustible, electrolizador, tanque de hidrógeno, panel fotovoltaico); por último, se realizaron simulaciones con el Software HOMER PRO que es una herramienta de análisis económico y sostenibilidad. Los resultados obtenidos luego de la simulación revelaron el alto costo de la implementación de este sistema en el Ecuador; sin embargo, se logra evitar una emisión de alrededor 5 toneladas de CO₂ y sus derivados por año. El sistema energético es 99% amigable con el medio ambiente y las emisiones de gases de efecto invernadero son de 0.8 kilogramos por año, a diferencia del sistema tradicional con Diesel.

Palabras Clave: Hidrógeno, Tractor, Agricultura, Medio Ambiente, Viabilidad, Sostenibilidad, Celda de combustible.

ABSTRACT

The current research work aims to study the feasibility of implementing an energy system powered by hydrogen as fuel to an agricultural tractor to reduce the emission of greenhouse gases into the atmosphere. As a starting point, the client's requirements were established, which are the power required by the tractor engine, having the values of voltage, current and power of each component, it proceeded to select the equipment (AC motor, current inverter, Fuel Cell, Electrolyzer, Hydrogen Tank, Photovoltaic Panel). Finally, simulations were carried out with the HOMER PRO Software, which is a financial and sustainability analysis tool. The results obtained after the simulation revealed the high cost of implementing this system in Ecuador, these large amounts were reflected in the capital investment cost and the maintenance cost per year, in a hypothetical case obtaining the 50% discount on the cost of the equipment, the life cycle cost over the 25 years of the project costs around \$ 66,000. The energy system is 99% friendly to the environment, greenhouse gas emissions are 0.8 kilograms per year, unlike the traditional diesel system that would generate 5 tons per year of harmful gases.

Keywords: Hydrogen, Tractor, Agriculture, Environment, Feasibility, Sustainability, Fuel Cell.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Definición del Problema	2
1.2 Justificación del proyecto	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 El sector agrícola en el Ecuador	3
1.4.2 Contaminación debido a motores de combustión interna.....	3
1.4.3 Pilas de combustible	4
1.4.4 Funcionamiento de las pilas de combustible	4
1.4.5 Características generales de las pilas.....	5
1.4.6 Motores asíncronos utilizados en vehículos eléctricos	6
1.5 Obtención de hidrógeno	8
1.5.1 Combustible fósil reformado	9
1.5.2 Gasificación del carbono.....	9

1.5.3	Electrólisis de alta temperatura	10
1.5.4	Electrólisis PV	10
1.5.5	Electrólisis del agua	11
CAPÍTULO 2		14
2.	METODOLOGÍA.....	14
2.1	Levantamiento de información	14
2.2	Presentación y selección de propuestas de solución.....	14
2.3	Descripción del sistema energético	14
2.4	Cálculos teóricos para los requerimientos de los equipos.	15
2.5	Selección de equipos	19
2.6	Simulación del sistema energético utilizando el software HOMER PRO con generación de Hidrógeno.....	22
2.7	Simulación del sistema energético utilizando el software HOMER PRO sin generación de Hidrógeno	25
CAPÍTULO 3		27
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	27
3.1	Resultado de la simulación.....	27
3.2	Análisis de costos del sistema suponiendo descuentos.	28
3.2.1	Primer caso (precio sin subsidio).	28
3.2.2	Segundo caso (precio con subsidio del 25%).	29
3.2.3	Tercer caso (precio con subsidio del 50%).	29
3.2.4	Análisis del costo neto en general.....	30
3.2.5	Análisis del costo neto anualizado	31
3.3	Análisis de tipo de costo a lo largo de la vida útil.....	32
3.4	Producción de Hidrógeno	33
3.5	Consumo de Hidrógeno	34
3.6	Emisiones	34

3.7	Análisis del sistema generando hidrogeno VS el sistema comprando hidrogeno VS el sistema común de Diesel	35
3.8	Equivalencias de gases efecto invernadero con respecto al sistema común a Diesel	36
3.9	Emisiones GEI	37
3.10	Emisiones CO ₂ de:	38
CAPÍTULO 4		40
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
4.1	Conclusiones.....	40
4.2	Recomendaciones.....	41
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICE		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ARCONEL	Agencia de Regulación y Control de Electricidad
MAGAP	Ministerio de Agricultura y Ganadería
APPICE	Asociación Españolas de Pilas de Combustible
NPC	Total Net Present Cost
COE	Levelized Cost of Energy
HOMER	Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables
PV	Pilas Voltaicas
EPA	Agencia de Protección Nacional de los Estados Unidos
GEI	Gases de efecto invernadero
PIB	Producto interno bruto
AWE	Alkaline water electrolysis
PEWE	Polymer electrolyte water electrolyzers
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
O&M	Costo de mantenimiento y operación

SIMBOLOGÍA

m	Metro
V	Voltio
m ³	Metro cúbico
kg	Kilogramo
Cu	Cobre
Ni	Níquel
C	Carbono
Mn	Manganeso
P	Fósforo
A	Amperio
NO	Monóxido de Nitrógeno
H ₂	Hidrógeno
SO	Monóxido de Azufre
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
CH ₄	Metano

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Funcionamiento de pila de combustible.....	5
Figura 1.2 Tipos de motores utilizados en vehículos eléctricos.	8
Figura 1.3 Formas de producción de hidrógeno	9
Figura 2.4 Diagrama del sistema energético propuesto.....	15
Figura 2.5 Esquemático del sistema ingresado en HOMER.	22
Figura 2.6 Cargas en kW ingresadas en HOMER.	23
Figura 2.7 Perfil diario de consumo de energía durante las horas del día.	23
Figura 2.8 Carga pico y carga promedio.....	24
Figura 2.9 Esquemático sin generación de hidrógeno.	26
Figura 2.10 Propiedades del diésel.	26
Figura 3.11 Arquitectura del sistema seleccionada por HOMER.	27
Figura 3.12 Análisis del costo total del proyecto.....	30
Figura 3.13 Análisis de costo total anual.	31
Figura 3.14 Tipo de costo en vida útil.....	32
Figura 3.15 Producción de Hidrógeno.	33
Figura 3.16 Consumo de hidrógeno	34
Figura 3.17 Emisiones del Sistema optimizado.	34
Figura 3.18 Emisiones del sistema común.	36
Figura 3.19 Emisiones generadas por el sistema convencional.	37
Figura 3.20 Equivalencias en CO ₂	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Especificaciones tractor 5045D TS/DT.	14
Tabla 2.2 Matriz de decisión.....	14
Tabla 2.3 Características del panel fotovoltaico seleccionado.....	20
Tabla 2.4 Características del electrolizador seleccionado.	20
Tabla 2.5 Características del tanque de hidrógeno seleccionado.....	20
Tabla 2.6 Características del inversor seleccionado.....	21
Tabla 2.7 Características del motor seleccionado	21
Tabla 2.8 Características de la celda de combustible seleccionada.	21
Tabla 2.9 Precio de los equipos seleccionados	24
Tabla 2.10 Parámetros ingresados en HOMER.....	25
Tabla 3.11 Resultados de costos y arquitectura del sistema - primer caso.....	28
Tabla 3.12 Resultados de costos y arquitectura del sistema segundo caso.	29
Tabla 3.13 Resultados de costos y arquitectura del sistema - tercer caso.....	30
Tabla 3.14 Costos totales del proyecto.	31
Tabla 3.15 Costo anual del proyecto.	32
Tabla 3.16 Comparación final.....	35

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura es una de las principales actividades económicas que sostienen al Ecuador, lo que significa que en nuestro país hay gran presencia de maquinarias agrícolas que son utilizadas para las diferentes actividades como labrado de la tierra, fumigación, siembra, cosecha, etc.

Los datos del III Censo Nacional Agropecuario del año 2000, según el Informe de Diagnóstico Territorial, mencionan que hace veinte años existían en el Ecuador 12928 tractores de ruedas, 1724 tractores de oruga y 1994 cosechadoras trilladoras. Al presente año, no existen datos actualizados, pero debe ser notorio que las cifras se han incrementado (*Resumen Ejecutivo*, 2019).

Estas cifras ayudan a tener un panorama de la cantidad de combustibles fósiles que se utiliza en la operación de estas maquinarias y de la contaminación que se está generando; por lo tanto, la finalidad de este proyecto propone un sistema energético que ayude a disminuir dicha contaminación.

Favorablemente el estado Ecuatoriano está proponiendo nuevas regulaciones que incentiven a la utilización de nuevas fuentes de energías limpias; por ejemplo, las regulaciones ARCERNNR-001/2021 y ARCERNNR-002/2021 que en el primer punto mencionan el artículo 15 de la Constitución, el cual preceptúa que el Estado promoverá a los sectores privados y públicos el uso de tecnologías limpias y de energías no contaminantes de bajo impacto (ARCERNNR, 2021).

1.1 Definición del Problema

Las altas emisiones de gases de carbono que inciden en el cambio climático y el calentamiento global demandan gran interés e importancia en la actualidad. Uno de los sectores que más contribuye con estas emisiones es el de transporte pesado como lo son los tractores agrícolas. En Ecuador existe una transición en la eliminación de los subsidios en combustibles fósiles como diésel, gasolina y el gas licuado de petróleo; por ello, a futuro, los costos se irán incrementando y no hay certidumbre de que los sectores agrícolas que trabajan con transporte pesado serán la excepción. Por tal motivo, es necesario evaluar posibles alternativas para tractores propulsados por combustibles fósiles y una alternativa con gran proyección es la aplicación de sistemas de pilas de combustibles cuya fuente energética sea el hidrógeno.

1.2 Justificación del proyecto

El recambio hacia sistemas energéticos a bajas emisiones es de gran importancia y está acorde con los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU. Ecuador en base a las políticas establecidas en la constitución se compromete a impulsar sistemas de energías renovables no contaminantes que de acuerdo con las estadísticas del ARCONEL (2015) se tiene cubierto aproximadamente un 51.78% con energías de este tipo. Uno de los sectores productivos que tiene escasa contribución con esta política pública es el sector de transporte, parte de ello, es el sector de transporte pesado de tractores agrícolas, cuyo principal combustible es el diésel liberando miles de toneladas de gases de carbono al ambiente; esto, sumado con la posible eliminación de los subsidios, fomenta el cambio hacia sistemas descarbonizados que puedan suplir la demanda energética. No obstante, para llegar a esto, es necesario realizar estudios de factibilidad y diseño de sistemas energéticos sostenibles que puedan ser un punto de partida para su aplicación in situ.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y evaluar la implementación de un sistema energético propulsado por pilas de combustibles de hidrógeno en tractores agrícolas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar una pila de combustible comercial para su implementación como sustituto de motores de combustión interna en tractores agrícolas.
- Diseñar el sistema energético necesario para energizar a un tractor agrícola convencional.
- Realizar la simulación del sistema energético.
- Evaluar la viabilidad del proyecto para su implementación.
- Proponer medidas claves para el desarrollo a gran escala.

1.4 Marco teórico

1.4.1 El sector agrícola en el Ecuador

El sector agrícola en el Ecuador tiene una gran incidencia en el desarrollo del país. El PIB de la agricultura proporciona un 8% a la economía, por consiguiente, genera trabajo para agricultores, obreros, operadores de maquinaria pesada, vendedores y eleva los niveles de exportación de los productos hacia diferentes partes del mundo; así como también, la distribución local del mismo. No obstante, la agricultura en el Ecuador seguirá aportando de manera significativa al desarrollo del país (MAGAP, 2020).

1.4.2 Contaminación debido a motores de combustión interna

La lucha contra el calentamiento global sigue en marcha, el uso de los contaminantes de dióxido de carbono no deja pasar por desapercibida esta realidad que con el transcurrir del tiempo afectan

directamente a nuestra capa de ozono y calidad de vida de las personas.

Según una investigación de las emisiones de CO_2 a nivel mundial, Ecuador se encuentra en el puesto número 119 en el ranking de emisiones; de dicha manera, se han producido en el 2018, 40.700 kilotoneladas de CO_2 , lo cual a pesar de ser un país con 17 millones de habitantes representa un valor significativo. (Crippa et al., 2019).

1.4.3 Pilas de combustible

Las pilas de combustible son dispositivos similares a las baterías con una gran tecnología, la cual convierte energía química en energía eléctrica sin que exista combustión alguna o procesos termodinámicos relacionados; por ello, ofrecen una más alta eficiencia. A diferencia de una batería común y corriente, la cual almacena energía química por dentro y una vez que se termina dicha energía se desecha; estas pilas funcionan de manera continua siempre y cuando desde su exterior se le siga suministrando gas combustible para luego transformarla en electricidad. Por lo tanto, se define a una pila de combustible como un dispositivo de conversión de energía, la cual está constituida por celdas electroquímicas que oxidan al combustible y reducen de manera simultánea a un oxidante y se encuentran ambos en su mayoría en el estado gaseoso. Cada pila tiene dos electrodos, el cátodo y el ánodo, éstos se encuentran separados por un electrolito (Ruiz-Morales et al., 2006).

1.4.4 Funcionamiento de las pilas de combustible

La principal reacción se genera cuando el suministro de combustible ingresa por el ánodo, es ahí donde se produce la oxidación de este; por consiguiente, los electrones se liberan al circuito externo, entonces se genera electricidad debido al flujo de electrones que van

desde el ánodo hacia el cátodo. El electrolito es el medio por donde fluyen las cargas positivas. Debido a una alta reactividad electroquímica el combustible mayormente usado es el hidrógeno y en cuanto al oxidante, es el oxígeno debido a que se puede obtener fácilmente. En dicha circunstancia si se emplea como combustible e hidrógeno el único residuo a partir de la reacción será agua (Corominas, 2001).

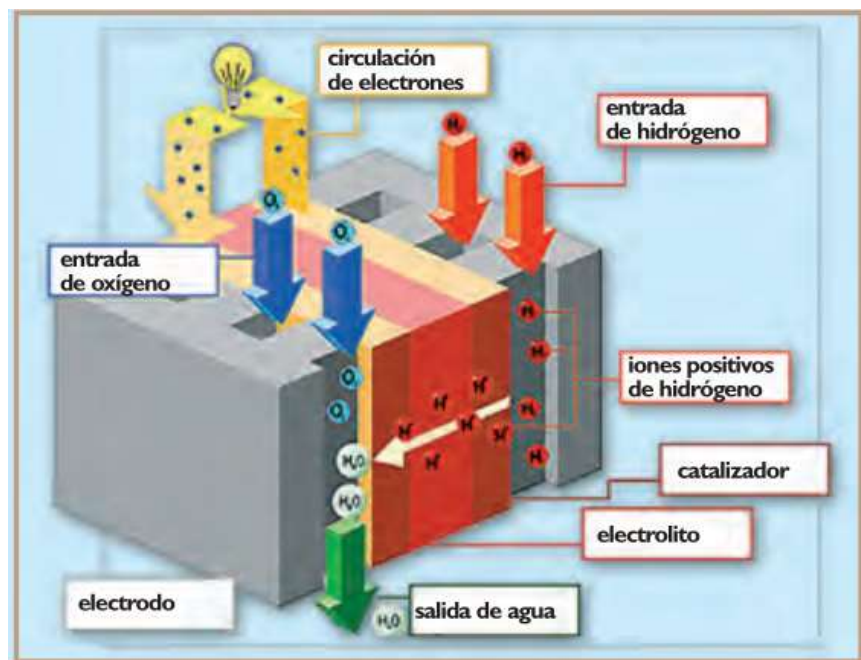


Figura 1.1 Funcionamiento de pila de combustible, entradas, salidas, oxidante y combustible [APPICE].

1.4.5 Características generales de las pilas

Las características son las siguientes:

- **Alta eficiencia.** En todo el proceso de conversión de energía se puede conseguir una eficiencia que oscila entre 40% - 60%, adicional si se llegase a añadir una cogeneración podría llegar hasta un 85%, esto se da ya que no existen las típicas pérdidas por calor (Ruiz-Morales et al., 2006).
- **Compatibilidad medioambiental.** También se pueden usar otros combustibles tradicionales con menor daño al

medioambiente. Los generadores de energía eléctrica que se usan con frecuencia producen mayores contaminantes con respecto a los combustibles tradicionales de menor impacto. Dichos contaminantes que se generan, los gases *NO* (*monóxido de nitrógeno*) y *SO* (*monóxido de azufre*) también se reducen en gran escala.

- **Modularidad.** El tamaño de las pilas de combustible puede adaptarse a los diferentes requerimientos de potencia, con esto se puede aumentar o disminuir el número de celdas.
- **Facilidad de emplazamiento.** Las pilas no tienen partes móviles por lo cual son muy silenciosas y fáciles de trasladar e insertar (zonas residenciales o urbanas) en diferentes emplazamientos, cabe recalcar que existe ausencia de contaminación acústica por lo anterior mencionado.
- **Versatilidad de combustible.** Se pueden utilizar ciertas cantidades de combustibles siempre y cuando se cumpla todo lo anterior mencionado y que dicho combustible tenga un compuesto que pueda ser oxidado.

1.4.6 Motores asíncronos utilizados en vehículos eléctricos

Se realizará la correcta descripción de los motores eléctricos más comunes en vehículos, para este caso se va a tomar en consideración los siguientes: motores de inducción asíncronos con rotor jaula de ardillas, motores de inducción asíncronos con rotor bobinado (se muestra una clasificación mejor detallada en la figura 1.2).

En cuanto a los motores asíncronos que funcionan por inducción, sus principales partes son: rotor, estator y un entrehierro que los

separa. El rotor es el elemento móvil del motor, se encuentra formado por un grupo de barras donde se traslada la corriente alterna a través de inducción. El estator es el elemento que se mantiene estático, el cual tiene chapas metálicas y encima de él se coloca el devanado trifásico; los devanados se encuentran separados por 120°. El funcionamiento empieza bajo el campo magnético que se produce en el estator debido a las corrientes que fluyen por las barras del rotor. Existen dos tipos de motores asíncronos, los cuales son jaula de ardilla o de rotor bobinado con las máquinas eléctricas más usadas (W, 2012).

1.4.6.1 Motor de Inducción Jaula de Ardilla

El devanado para el tipo motor jaula de ardilla marca la diferencia ya que está formado por un conjunto de barras, las cuales puede variar en su material, pues puede ser de aluminio o cobre. Dichas barras están unidas por anillos soldados en cada extremo, tanto arriba como abajo del rotor. Con esta clase de configuración los motores son más confiables y de menor costo (M, 2008).

1.4.6.2 Motor de inducción de rotor bobinado

La configuración de este tipo de motores funciona usando anillos rozantes y escobillas, por tal motivo no es tan usual en la industria de vehículos ya que necesita mantenimientos preventivos constantes, en otras clases de aplicación si es factible (Pablo, 2010).

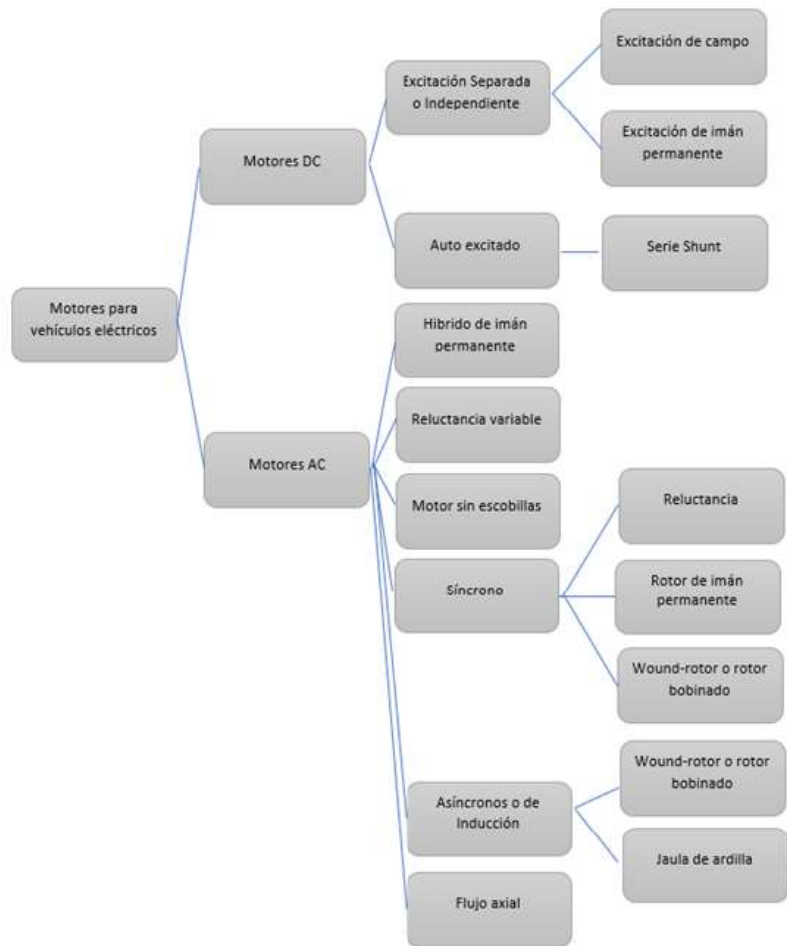


Figura 1.2 Tipos de motores utilizados en vehículos eléctricos [Gerardo Israel Pelafox Alvarado, 2009].

1.5 Obtención de hidrógeno

El hidrógeno es el elemento que se encuentra con mayor cantidad en la naturaleza, el hidrógeno puede cambiar de estados líquido, gaseoso o ser

una mezcla, por lo tanto, se va a mostrar una clasificación en la figura 1.3 a continuación:

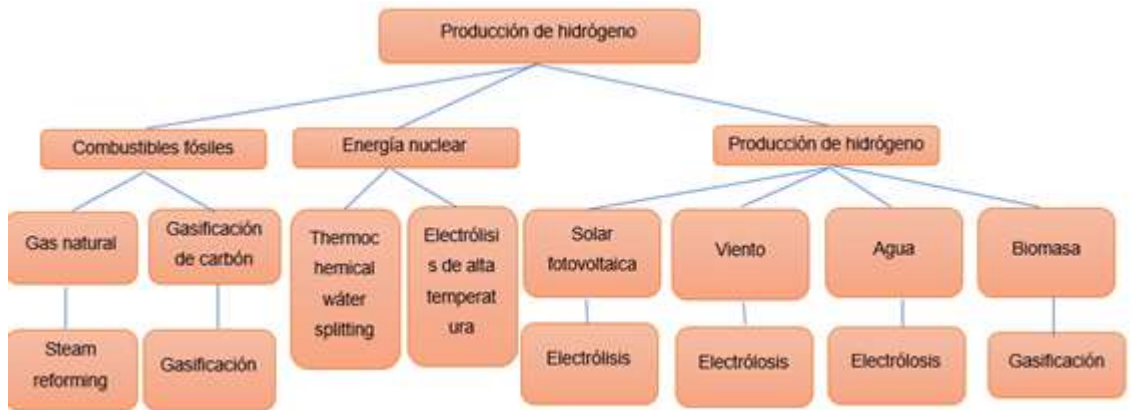


Figura 1.3 Formas de producción de hidrógeno [Gerardo Israel Pelafox Alvarado, 2009) (C. Acar, 2013)].

1.5.1 Combustible fósil reformado

Se obtiene hidrógeno a través de combustibles fósiles, es un procedimiento mucho menos costoso y más común. Se genera lo siguiente en este proceso: Hidrógeno (H_2), Monóxido de carbono (CO), y Dióxido de Carbono (CO_2). El gas natural (CH_4) se combina con el carbón que luego fluye por un reactor (C. Acar, 2013).

1.5.2 Gasificación del carbono

Existen grandes reservas a nivel mundial de carbono por lo cual producir de esta manera hace que sea viable en proyectos de gran magnitud, este proceso se debe tener en cuenta que el carbón junto con el vapor y oxígeno se oxidan de manera parcial, van directo hacia un reactor con altas presiones y temperaturas.

En este proceso de gasificación como se había mencionado anteriormente el carbón se oxida junto con el vapor, el producto principal de esta reacción química es el hidrógeno H_2 , CO y CO_2 (gas de síntesis). Dicho Dióxido de carbono que es el gas de síntesis

actúa en una reacción en la cual desplaza el oxígeno con el objetivo de incrementar la circulación de hidrógeno.

También se generan azufre elemental o ácido sulfúrico esto se puede recuperar y limpiar. Una desventaja de este método son las altas emisiones de Dióxido de carbono esto debido al carbono presente en el carbón (C. Acar, 2013).

1.5.3 Electrólisis de alta temperatura

Este método consiste en separar el H_2 y O_2 a grandes temperaturas entre 700 °C y 1000 °C a través del vapor. Usando energía térmica el agua se convierte en vapor. No se requiere de mayor consumo eléctrico ya que se utiliza la transferencia de calor para el suministro de vapor. Una gran ventaja es que se puede tender a alcanzar cero emisiones de gases de efecto invernadero siempre y cuando la fuente de calor primaria sea limpia (solar, geotérmica, y/o nucleares).

1.5.4 Electrólisis PV

El método de electrólisis PV (Pilas Voltaicas) para la producción de hidrógeno es uno de los métodos más caros, con un aproximado de 25 veces mayor con respecto a la alternativa de combustible fósiles. No es un método viable para la generación de hidrógeno. El proceso químico fotocátalisis transforma la energía solar que irradia el sol en energía química, en otras palabras, en hidrógeno.

“La energía transportada por el fotón es proporcional a la frecuencia de la radiación dada por $(h\eta)$ donde h es la constante de Planck y η es la frecuencia. Cuando un fotón golpea el fotocatalizador, un par electrón-hueco se genera y se obtiene carga eléctrica que se utiliza para disociar agua.” (Fernando Patricio Miño Montaña, n.d.). Para que se pueda separar el agua y obtener hidrógeno el fotocatalizador

debe tener una brecha de banda adecuada que se ubiquen en las bandas de circulación para la reducción y oxidación. Se plantean las siguientes ecuaciones, en donde se detalla la foto reducción y la foto oxidación.



1.5.5 Electrólisis del agua

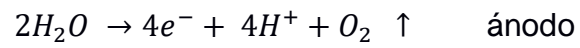
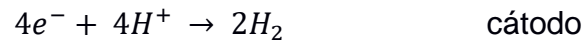
Para este proceso solo se necesita aplicar una corriente directa DC, por tal motivo la generación de hidrógeno se torna bastante sencilla. Este proceso electroquímico ayuda a descomponer el agua por lo cual es confiable y limpia. La generación de hidrógeno tiene un porcentaje bastante elevado de alrededor 99,99% (Fernando Patricio Miño Montaña, n.d.).

De acuerdo con el nivel de pH (Potencial de hidrógeno) que contiene el agua, el proceso de electrólisis se divide en dos: AWE (medio alcalino) o PEWE (medio ácido) (C. Acar, 2013).

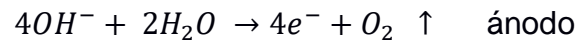
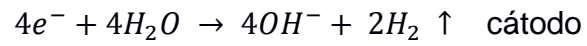
De manera industrial la electrólisis de agua alcalina ha sido utilizado en gran porcentaje para diferentes aplicaciones, por otro lado, la electrólisis del agua PEWE es muy limitada debido a la vida útil y al alto porcentaje de corrosión en las celdas.

Los principios de oxidación o reducción usados para la electrólisis se describen de la siguiente manera:

PEWE



AWE



La densidad, eficiencia y calidad de corriente son aspectos de mucha importancia en la electrólisis. A través de catalizadores como el platino son de importante uso para aumentar la velocidad de las reacciones en la electrólisis.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo se hará la formulación de las diferentes alternativas que reemplacen al sistema energético convencional que usan los tractores agrícolas en muchos países, pero como caso de estudio se realizará en el país de Ecuador. Al existir una amplia variedad de modelos tractores agrícolas, el estudio se basará en sólo un modelo de tractor, siendo este el Tractor John Deere 5045D TS/DT, que es usado comúnmente en el sector arrocero ecuatoriano.

2.1 Levantamiento de información

Antes de poder establecer posibles soluciones al problema, primero es necesario conocer las características y especificaciones que demanda la problemática en el sistema convencional que tienen los tractores agrícolas. Como ya se detalló en el capítulo anterior se debe reemplazar el motor de combustión interna, por un motor eléctrico el cuál debe ser alimentado por una celda de combustible.

Se obtuvo la ficha técnica del tractor John Deere 5045D TS/DT en la página web oficial de John Deere, que es la empresa que distribuye esta línea de tractores agrícolas en el país. En la *tabla 2.1* se detallan los datos más relevantes para el estudio.

Tabla 2.1 Especificaciones tractor 5045D TS/DT [Autor].

PERFORMANCE	
Potencia del motor en la rotación nominal – Hp (kW)	45 (34) *
Rotación nominal del motor -rpm	2100
Torque	288 Nm @ 1400 - 1500 rpm

2.2 Presentación y selección de propuestas de solución.

Para poder seleccionar una celda de combustible que sea óptima para el sistema que se desea plantear, primero es necesario saber a qué motor eléctrico va a alimentar. Es por tal que, en base a factores, como la potencia requerida por parte del tractor en estudio, el costo de operación, y el tamaño del motor eléctrico se realizó la siguiente matriz de decisión para poder elegir entre dos grupos de motores eléctricos:

Tabla 2.2 Matriz de decisión [Autor]

FACTORES	Potencia	Costo de operación	Tamaño	PUNTUACIÓN
PESO	5	4	1	
MOTOR ELÉCTRICO MONOFÁSICO DC	$1*5=5$	$4*4=16$	$2*1=2$	33
MOTOR ELÉCTRICO TRISÁFICO AC	$5*5=25$	$3*4=12$	$4*1=4$	41

Los motores eléctricos monofásicos no generan una potencia suficiente como para poder impulsar un tractor agrícola. Este es el factor decisivo por cuál el motor eléctrico trifásico AC obtuvo la mejor puntuación.

2.3 Descripción del sistema energético

Un tractor agrícola se compone esencialmente de tres partes principales, motor, caja reductora y sistema de distribución. Para este caso de estudio la caja reductora y la distribución ya están diseñadas para producir el torque necesario que el tractor necesite en sus diferentes labores. Por lo tanto, el análisis se centró en el motor, es decir ya no será el cigüeñal del motor de combustión que proporcione la potencia a la caja reductora, sino el eje del motor eléctrico, que será alimentado por una celda de combustible.

En base a lo anterior se propuso un sistema energético que consta de paneles solares, electrolizador, tanques reservorios de hidrógeno, celda de combustible, inversor DC-AC y finalmente el motor eléctrico. El sistema

planteado es la unión de dos subsistemas en el primero se utilizan los paneles solares fotovoltaicos para la captación de energía solar, luego un electrolizador consume esta energía para obtener hidrógeno. El hidrógeno obtenido se almacena en tanques para su posterior uso.

El otro subsistema es el que se monta en el tractor agrícola, se instala un motor eléctrico que provee de torque a los demás componentes mecánicos, motor es alimentado por una celda de combustible que a su salida tiene un inversor DC-AC y que a su entrada toma el hidrógeno de los tanques de hidrógeno que forman parte del tractor. Análogo a los tanques de diésel de los motores de combustión interna. A continuación, se presenta un esquema de lo que es el sistema energético propuesto, cuyos datos teóricos son analizados en la siguiente sección.

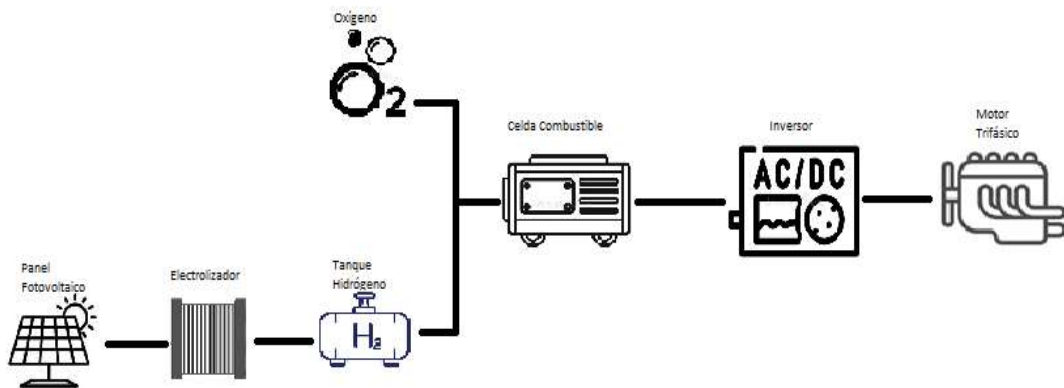


Figura 2.4 Diagrama del sistema energético propuesto [Autor].

2.4 Cálculos teóricos para los requerimientos de los equipos.

De la *tabla 2.1*, se conoce que el nuevo sistema debe ser capaz de proporcionar una potencia nominal de 34 kW a 2100 rpm, en base a la matriz de decisión realizada en la *tabla 2.2*, se seleccionó un motor eléctrico trifásico con la codificación (5045D TS/DT) de corriente alterna, que genere estas mismas condiciones en operación. Esto se lo realizó en la tabla de motores del fabricante SIEMENS (ver apéndice K).

Una vez seleccionado el motor se tomó en consideración la eficiencia y la potencia teórica, esto para poder encontrar la potencia útil. La potencia útil es la potencia que en realidad se aprovecha del motor.

$$P_{teorica} = \frac{P_{util}}{\eta} \quad (2.1)$$

$$P_{util} = P_{teorica} * \eta$$

$$P_{util} = (37 \text{ kW}) * (0.936)$$

$$P_{util} = 35.56 \text{ kW}$$

La siguiente ecuación representa la potencia consumida de un motor.

$$P_{nominal} = \sqrt{3} V I_{nom} \cos\phi \quad (2.2)$$

De la *ecuación 2.2* se despejó la corriente, dicha corriente de línea que es la corriente que requiere el motor en operación. Cabe mencionar que 0.86 es el “factor de potencia” que se define como coseno del ángulo ϕ el cual se lo encontró en la tabla del fabricante (ver apéndice K). Se procedió a despejar la corriente de trabajo haciendo de la *ecuación 2.2*.

$$P_{nominal} = \sqrt{3} V I_{nom} \cos\phi$$

$$I_{nom} = \frac{P_{nominal}}{\sqrt{3} * V * \cos\phi} \quad (2.3)$$

$$I_{nom} = \frac{37 \text{ KW}}{\sqrt{3}(460V)(0.86)}$$

$$I_{nom} = 54 \text{ A}$$

Debido a que existen pérdidas también en la corriente, se toma en cuenta la eficiencia nominal a plena carga del manual del fabricante (ver apéndice K),

lo cual para este caso en particular es del 93.6%, a continuación, se plantea otra ecuación que relaciona la corriente real y la corriente nominal:

$$I_{real} = \frac{I_{nom}}{\eta} \quad (2.4)$$

$$I_{real} = \frac{54}{0.936}$$

$$I_{real\ de\ trabajo} = 57\ A$$

El valor calculado anteriormente tiene mucho sentido ya que en el caso ideal o nominal se requiere 54 amperios, el caso real demandará más corriente, necesitando 57 amperios. La corriente que se acaba de calcular es una corriente trifásica alterna. Las pilas de combustible proveen corriente directa por lo cual se requiere utilizar algún dispositivo electrónico que logre convertir la corriente de directa en alterna. En el libro "Mohán" (Circuitos de Alta Potencia) en el capítulo 8 llamado "Inversores" (Mohan, n.d.). se puede encontrar el dispositivo que permitirá realizar el cambio de tipo de corriente requerido.

El dispositivo usado es un inversor trifásico de onda cuadrada. Las ecuaciones de voltaje y corriente que gobiernan el circuito dieron como resultado la potencia de salida que debe manejar la celda de combustible. A continuación, se presentan las ecuaciones, primero la de voltaje y luego la de corriente:

$$V_{LL} = \frac{\sqrt{3} * 4 * V_d}{\sqrt{2} * \pi * 2} \quad (2.5)$$

$$I_d = 3 * \frac{V_{LL} * I_{real\ de\ trabajo}}{V_d} * \cos\phi \quad (2.6)$$

Las nuevas variables para utilizar son las siguientes:

$V_d =$ Voltaje a la salida de la pila de combustible

$V_{LL} =$ Voltaje de línea a línea

$V_0 =$ voltaje a la entrada del motor (lo proporciona el fabricante)

$I_0 =$ corriente a la salida del inversor (corriente entrada al motor)

$I_d =$ corriente de salida de la pila de combustible

Para poder seleccionar la pila de combustible las variables a encontrar son V_d y I_d , la primer la variable se la puede obtener haciendo uso de la ecuación 2.5:

$$V_{LL} = 0.78 V_d$$

El voltaje de línea a línea V_{LL} se lo encontró en la tabla del fabricante (460 V), despejando se tiene:

$$V_d = \frac{460 V}{0.78}$$

$$V_d = 589 V$$

La corriente a la salida de la pila de combustible se la despeja de la ecuación 2.6, el factor de potencia para este caso es 0.85:

$$I_d = 3 * \frac{V_{LL} * I_{real\ de\ trabajo}}{V_d} * \cos\phi$$

$$I_d = 3 * \frac{(460 V)(57 A)}{589 V} (0.85)$$

$$I_d = 114 A$$

Conocidas las dos variables se puede encontrar la potencia que maneja el inversor DC-AC y su vez la potencia que debe tener a la salida la celda de combustible a seleccionar, para ello se hace uso de la siguiente ecuación:

$$P = I * V \quad (2.7)$$

$$P = 114 A * 589 V$$

$$P = 67 kW$$

Cabe mencionar que la cantidad de hidrógeno que consumirá el sistema la dará la celda de combustible que se seleccionará.

2.5 Selección de equipos

Una vez determinada la potencia teórica del motor, se obtuvieron valores de voltaje y corriente tanto de entrada y salida del motor, inversor DC-AC y de la pila de combustible. Basándose en lo anterior mencionado se detallan los dispositivos que se seleccionaron para que así se cumplan las diferentes especificaciones, (ver apéndices F, G, H, I, J).

- Pila de combustible
- Electrolizador
- Tanque de hidrógeno
- Motor AC
- Inversor PWM onda cuadrada
- Panel fotovoltaico

Luego de una búsqueda, se seleccionaron los dispositivos adecuados para el sistema planteado, a continuación, se presentan tablas con los datos técnicos más relevantes de los equipos en cuestión:

Tabla 2.3 Características del panel fotovoltaico seleccionado [Autor]

Panel Fotovoltaico Peimar SG200M5		
Características	Magnitud	Unidad
Potencia Nominal	200	[kW]
Voltaje máximo	37	[V]
Corriente a la máxima potencia	5.41	[A]
Eficiencia	18.74	[%]
Número de celdas	72	--
Dimensiones	1580x808x35	[mm]

Tabla 2.4 Características del electrolizador seleccionado [Autor].

Electrolizador Cawola		
Características	Magnitud	Unidad
Pureza del hidrógeno	99.99	[%]
Voltaje de Alimentación	220	[V]
Corriente	20	[A]
Tasa de producción	660	[ml/min]
Peso	2.5	[kg]
Dimensiones	240X220X240	[mm]

Tabla 2.5 Características del tanque de hidrógeno seleccionado [Autor].

Tanque de Hidrógeno SINOMA		
Características	Magnitud	Unidad
Máxima Presión	37	[mPa]
Volumen	9	[litros]
Energía almacenada	3200	[Wh]
Altura	640	[mm]
Diámetro	170	[mm]

Tabla 2.6 Características del inversor seleccionado [Autor].

SUNSYS PCS IM		
Características	Magnitud	Unidad
Potencia Nominal	66	[kW]
Voltaje de Alimentación	400	[V]
Corriente de entrada	160	[A]
Dimensiones	600 x 795 x 1400	[mm]
Frecuencia	50	[Hz]
Máxima eficiencia	93.6	[%]

Tabla 2.7 Características del motor seleccionado [Autor].

Motor 365T		
Características	Magnitud	Unidad
Potencia Nominal	37	[kW]
Voltaje de Alimentación	460.00	[V]
Corriente de entrada	57	[A]
Torque	201	[N·m]
RPM	2100	[RPM]

Tabla 2.8 Características de la celda de combustible seleccionada [Autor].

Fcmove-HD		
Características	Magnitud	Unidad
Potencia Nominal	72	[kW]
Voltaje de salida	590	[V]
Eficiencia	90	[%]
Consumo	39	[l/min]
Temperatura de Operación	55	[°C]
Dimensiones	955 x 1525 x 690	[mm]
Pureza de hidrogeno	99.98	[%]

2.6 Simulación del sistema energético utilizando el software HOMER PRO con generación de Hidrógeno.

HOMER PRO es un software de estándar mundial para optimizar el máximo desempeño en redes de energías renovables para cualquier sector energético orientado a sistemas híbridos. HOMER cuenta con tres grandes herramientas las cuales son: Simulación, Mejoramiento y Análisis de Sensibilidad. Por lo que fue el programa ideal para la comprobación del sistema energético diseñado. A continuación, se presente el esquemático del sistema energético que ha sido estudiado y que fue ingresado en HOMER:

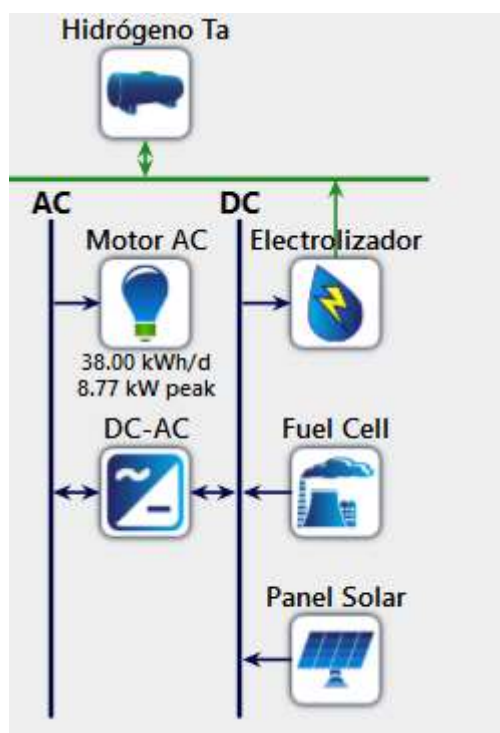


Figura 2.5 Esquemático del sistema ingresado en HOMER [Autor].

Primero se llenaron los datos de la carga, en HOMER se ingresan datos de carga de un día de cada mes, una vez llenado los datos, el programa graficó un perfil diario de energía, además calculó un promedio anual de consumo de energía por día.

Para llenar los datos de la carga se asume que el tractor agrícola trabaja desde las 6 am hasta las 4pm, que es lo que normalmente se trabaja en el sector agrícola ecuatoriano. Se presenta la tabla de la carga:

Yearly Load Data

Hour	Weekdays											
	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
7	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
8	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
9	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
10	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
11	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
12	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
13	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
14	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
15	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
16	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Figura 2.6 Cargas en kW ingresadas en HOMER [Autor].

Con los datos ingresados se obtuvo el siguiente perfil diario de consumo de energía del tractor agrícola:

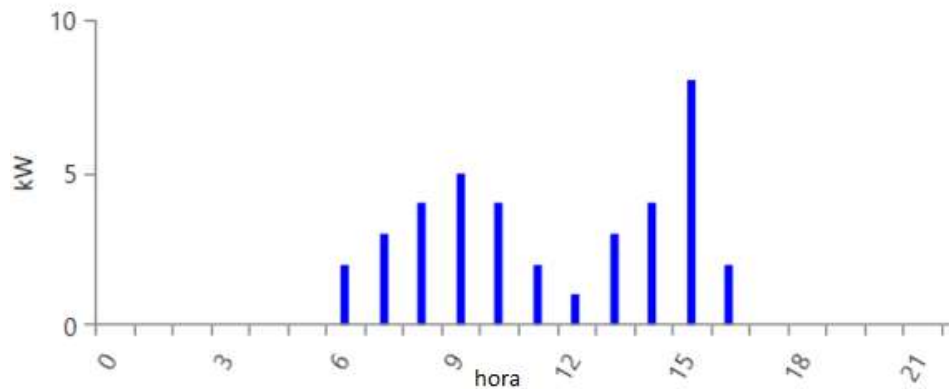


Figura 2.7 Perfil diario de consumo de energía durante las horas del día [Autor].

La carga total que calculó el software se presenta a continuación:

Metric	Baseline	Scaled
Average (kWh/day)	38	38
Average(kW)	1.58	1.58
Peak (kW)	8.77	8.77
Load factor	.18	.18

Load Type: AC DC

Scaled Annual Average (kWh/day):

Figura 2.8 Carga pico y carga promedio [Autor].

La carga promedio anual calculada es de 38kWh/día. HOMER permite ingresar valores de sensibilidad en el precio de los equipos, en este caso se utilizó valores de 0.5, 0.75 y 1. Lo que significa que analizó valores de descuento de los equipos del 50%, 25% y sin descuento cuando el valor fue 1, que es el 100% del precio. Para cada equipo ingresado en el esquemático de HOMER se tuvieron que poner los precios capitales, el valor de reemplazo del equipo y precio de mantenimiento, a continuación, se presenta la siguiente tabla con los precios de los equipos, obtenidos previo a cotizaciones:

Tabla 2.9 Precio de los equipos seleccionados [Autor].

Componente	Precio
Panel Fotovoltaico Peimar SG200MS	\$ 640,00
Electrolizador Cawola	\$ 2.000,00
Tanque de Hidrógeno SINOMA	\$ 2.203,00
Pila de combustible Fcmove-HD	\$ 8.000,00
Inversor de corriente SUNSYS PCS IM	\$ 8.640,00
Motor trifásico Siemens Motor 365T	\$ 2.120,00

Para ingresar de manera correcta los valores en cada componente y carga en el software HOMER se requirió realizar ciertos cálculos relacionando el precio del valor capital para poderlo adquirir con respecto a cuánto vale cada Kilowatt del precio capital, por ejemplo si se seleccionó un panel fotovoltaico

de precio \$100 y con una potencia de 10 Kilowatt entonces se ingresa al HOMER el precio de un solo Kilowatt ósea 1 KW= \$10, de manera análoga se ingresaron los valores de los demás componentes. Cabe mencionar que en ciertos componentes solo se permitió ingresar el valor total de su costo ya que estos componentes son (auto-size) es decir son adaptables en potencia a lo que requiere HOMER. En la tabla 2.10 se muestran los valores de los parámetros utilizados para la simulación y optimización del sistema eléctrico que se planteó, además se pueden ver a más detalle los valores ingresados al programa en los anexos A, B, C, D y E (Barzola-Monteses & Espinoza-Andaluz, 2019), (Barzola et al., 2016).

Tabla 2.10 Parámetros ingresados en HOMER [Autor].

Equipo	Tamaño [kW]	Capital (\$)	Precio de reemplazo (\$)	O&M (\$/año)	Intervalos (kW) a optimizar	Tiempo de vida	Variables de sensibilidad del capital
Celda de combustible	1	151	151	0.02	0 - 9.9	40000 h	0.5 - 0.75 - 1
Tanque de hidrógeno	0.6	2203	0	0.02	0.6 - 3	25 años	
Electrolizador	1	450	450	30	50-300	15 años	
Inversor	1	100	100	25	0-14	10 años	
Panel solar	66	5148	5148	0	0-200	30 años	

2.7 Simulación del sistema energético utilizando el software HOMER PRO sin generación de Hidrógeno

De manera análoga también se realizó la debida simulación adquiriendo el hidrógeno de algún proveedor con la finalidad de ahorrar gastos de adquisición y mantenimiento por año de los otros equipos (electrolizador y panel fotovoltaico). Se debe tener en cuenta que el hidrógeno es un vector energético lo que significa que almacena o provee energía, pero requiere de otros componentes para poder ser utilizada, eso generó un problema inicial en HOMER ya que si al esquemático de la figura 2.5 se le remueve el

electrolizador y panel fotovoltaico la simulación no puede ejecutarse por lo anteriormente mencionado. Para llevar a cabo la correcta simulación se realizó un cambio en el auto generador lo cual se eligió como combustible el Diesel, pero se colocaron las características del hidrógeno tales como poder calorífico y emisiones de carbono y azufre como se puede ver en la figura 2.10. El nuevo esquemático se encuentra en la figura 2.9.

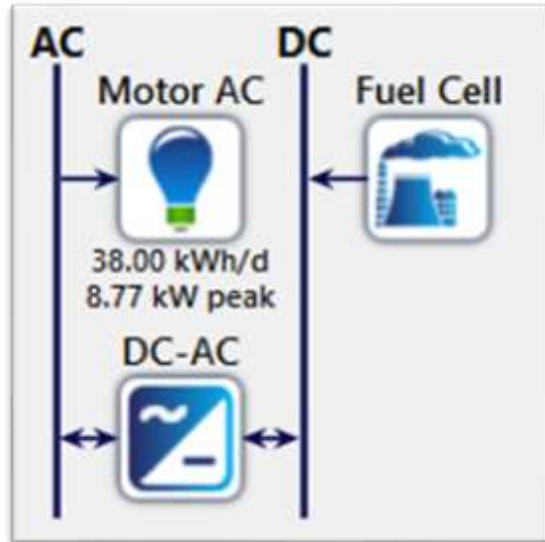


Figura 2.9 Esquemático sin generación de hidrógeno [Autor].

PROPERTIES	
Lower Heating Value (MJ/kg):	120
Density (kg/m ³):	0.09
Carbon Content (%):	0
Sulfur Content (%):	0

Figura 2.10 Propiedades del diésel [Autor].

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se presentan los datos obtenidos correspondientes al diseño propuesto en el capítulo anterior. Posterior se realiza el análisis de estos resultados, esto con la finalidad de validar el sistema estudiado y validar viabilidad del diseño en términos de funcionabilidad, así como del cumplimiento de las especificaciones requeridas. De igual forma se realiza un análisis de costos para así mismo determinar si la solución cumple con los presupuestos de los clientes para su implementación.

3.1 Resultado de la simulación

El programa utilizado al final de la simulación provee una solución siendo la mejor en aspectos tantos de diseño como de fiabilidad económica, esto debido que se ingresaron rangos de parámetros presentándose más de unas soluciones factibles, pero HOMER acoge la mejor de todas, esto se debe a que también los valores de entrada y salida de cada componente pueden variar, ya sea en flujo volumétrico, corriente tanto de entrada como salida, voltaje de entrada y salida u otras variables. HOMER gracias a su algoritmo de optimización eligió las siguientes capacidades de operación de cada componente como las mejores, a continuación, se muestra:



Figura 3.11 Arquitectura del sistema seleccionada por HOMER [Autor].

3.2 Análisis de costos del sistema suponiendo descuentos.

3.2.1 Primer caso (precio sin subsidio).

El NPC es el costo actual neto o mejor conocido como el costo del ciclo de vida, el costo neto de un artículo o componente es el valor en dólares donde se considera la instalación y operación de uno o varios componentes a lo largo de toda su vida útil a excepción de todos los ingresos que son valores presentes que se dan dentro de la vida útil. HOMER define al COE como el costo nivelado de energía promedio por cada kWh de energía producida por el sistema, este se obtiene dividiendo el costo anual de la producción de energía eléctrica entre la carga eléctrica total producida. En la tabla 3.11 se muestran los costos para cuando no se obtiene ningún descuento de los equipos:

Tabla 3.11 Resultados de costos y arquitectura del sistema - primer caso [Autor].

Equipos	Variable de sensibilidad del Costo Capital	Arquitectura del sistema	NPC [\$]	COE [\$]	Capital inicial [\$]	Consumo de hidrógeno	Producción de energía
Panel Solar		200 [kW]	79.435	0,436	44.920	108 [kg]	803 [kW]
Fuel Cell		9,90 [kW]					
DC-AC	1,00	9,19 [kW]					
Tanque de hidrógeno	1,00	1,2 [Kg]					
Electrolizador	1,00	50 [kW]					

El costo total neto de todo el sistema a lo largo de los 25 años de vida útil de todo el proyecto es aproximadamente de \$79.435, el costo capital de inversión es alrededor de \$44.920 esto es debido al componente se los adquiere con el 100% de su valor tal cual como son ofertados por su fabricante, el consumo de hidrógeno es de 108 kg y la producción de energía de todo el sistema es de 803 kW. Esto

se lo logró con las variables de sensibilidad que se ingresaron en el costo del capital, presentado anteriormente en la tabla 2.10.

3.2.2 Segundo caso (precio con subsidio del 25%).

Analizando el siguiente caso cuando la sensibilidad es igual 0,75 esto se traduce a que cada componente se lo va a adquirir con un 25% de descuento de su valor inicial, se presentan los siguientes valores:

Tabla 3.12 Resultados de costos y arquitectura del sistema segundo caso [Autor].

Equipos	Variable de sensibilidad del Costo Capital	Arquitectura del sistema	NPC [\$]	COE [\$]	Capital inicial [\$]	Consumo de hidrógeno	Producción de energía
Panel Solar		200 [kW]	72.479	0,398	37.973	108 [kg]	803 [kW]
Fuel Cell		9,90 [kW]					
DC-AC	0,75	9,19 [kW]					
Tanque de hidrógeno	0,75	1,2 [Kg]					
Electrolizador	0,75	50 [kW]					

El costo actual neto es de \$72.479 variando con una diferencia de casi \$7.000 con respecto al caso anteriormente mencionado, la inversión capital también disminuye hasta llegar a una cantidad de \$37.973, el consumo de hidrógeno y producción de energía se mantienen constantes debido a que el sistema optimizó de mejor forma los recursos.

3.2.3 Tercer caso (precio con subsidio del 50%).

Por último, se va a detallar el sistema con una sensibilidad de 0,5 que se traduce a que el costo de la compra de los componentes se conseguirá en un 50% de su valor inicial, este sería un caso hipotético suponiendo que el estado subsidie el restante, con los

actuales programas que impulsan la utilización de energías verdes en proyectos como el analizado:

Tabla 3.13 Resultados de costos y arquitectura del sistema - tercer caso [Autor].

CASO OPTIMIZADO							
Equipos	Variable de sensibilidad del Costo Capital	Arquitectura del sistema	NPC [\$]	COE [\$]	Capital inicial [\$]	Consumo de hidrógeno	Producción de energía
Panel Solar		200 [kW]	66.523	0.360	31.007	108 [kg]	803 [kW]
Fuel Cell		9,90 [kW]					
DC-AC	0,50	9,19 [kW]					
Tanque de hidrógeno	0,50	1,2 [Kg]					
Electrolizador	0,50	50 [kW]					

Para el caso optimizado que sugiere la simulación como la mejor opción, el NPC o el costo actual neto es de \$66.523 y el costo de capital inicial es de \$31.007, esto de aquí se da en el mejor de los casos ósea cuando la variable de sensibilidad es de 0,50.

3.2.4 Análisis del costo neto en general.

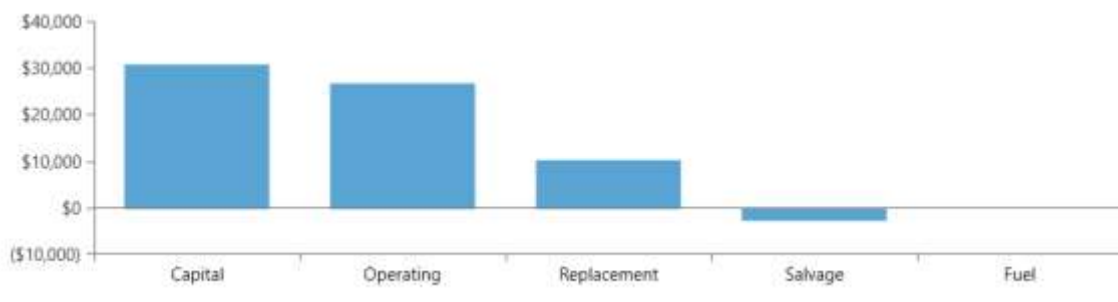


Figura 3.12 Análisis del costo total del proyecto [Autor].

Partiendo de la imagen anterior que es el costo neto general a lo largo de 25 años de toda la vida útil del proyecto y que corresponde al caso optimizado, se puede observar que el valor del capital inicial es el valor mayor seguido de cerca con el valor del costo de operación esto se debe a que se requiere una producción constante

de hidrógeno en el sistema. Los datos de la gráfica también se los puede evidenciar en la tabla 3.14.

Tabla 3.14 Costos totales del proyecto [Autor].

Equipo	Capital	Valor de reemplazo	O&M	Salvage	Total
Carga	\$ 1.494,90	\$ -	\$ 834,91	\$ 297,77	\$ 2.032,04
Electrolizador	\$ 11.250,00	\$ 9.774,42	\$ 19.701,18	\$ 1.868,85	\$ 38.856,75
Tanque de hidrógeno	\$ 2.203,00	\$ -	\$ 0,53	\$ -	\$ 2.203,53
Otros	\$ -	\$ -	\$ 3.284,03	\$ -	\$ 3.284,03
Panel solar	\$ 15.600,00	\$ -	\$ -	\$ 647,87	\$ 14.952,13
Inversor	\$ 459,28	\$ 829,27	\$ 3.017,20	\$ 114,47	\$ 4.191,28
Sistema	\$ 31.007,18	\$ 10.603,69	\$ 26.837,85	\$ 2.928,96	\$ 65.519,76

En la tabla 3.14 se puede observar que el mayor costo capital es para los paneles fotovoltaicos y el electrolizador, lo que indica que fabricar el hidrógeno sube considerablemente la aplicación del proyecto. Esto se debe a que aún los equipos de obtención de hidrógeno utilizando energías verdes son relativamente caros. Además, se necesita gran cantidad de recursos para obtener una pequeña cantidad de hidrógeno.

3.2.5 Análisis del costo neto anualizado

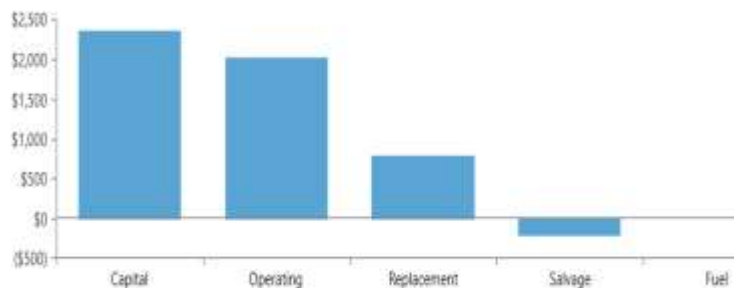


Figura 3.13 Análisis de costo total anual [Autor].

En la figura 3.13 se puede observar que en el año número uno la inversión capital sigue siendo mayor con un valor de \$2.360,46 y el costo de mantenimiento por año es de \$2.043,29 que es un valor

muy cercano del valor capital, el costo del remplazo es de \$807,22 que es un valor relativamente bajo.

Tabla 3.15 Costo anual del proyecto [Autor].

Equipo	Capital	Valor de reemplazo	O&M	Salvage	Total
Carga	\$ 118,80	\$ -	\$ 63,56	\$ 22,67	\$ 154,69
Electrolizador	\$ 856,42	\$ 744,09	\$ 1.500,00	\$ 142,27	\$ 2.958,24
Tanque de hidrógeno	\$ 167,71	\$ -	\$ 0,04	\$ -	\$ 167,75
Otros	\$ -	\$ -	\$ 250,00	\$ -	\$ 250,00
Panel solar	\$ 1.187,57	\$ -	\$ -	\$ 49,32	\$ 1.138,25
Inversor	\$ 34,97	\$ 63,13	\$ 229,69	\$ 8,71	\$ 319,07
Sistema	\$ 2.360,46	\$ 807,22	\$ 2.043,29	\$ 222,97	\$ 4.988,00

En la tabla 3.15 se demuestra en valor anual del costo del proyecto, dando un valor total de \$4.988. Como se ya mencionó el costo de mantenimiento anual es un valor alto, se observa que este valor se incrementa debido al mantenimiento del electrolizador, este es un equipo complejo en su funcionamiento por lo que mantenerlo en óptimo estado tendrá un costo adicional elevado.

3.3 Análisis de tipo de costo a lo largo de la vida útil



Figura 3.14 Tipo de costo en vida útil [Autor].

Se muestran en la imagen los valores de reemplazo, costo capital, costo de operación y valor salvado a lo largo de cada año hasta el año número veinticinco, se puede apreciar que para el año cero el valor del costo inicial es el capital que supera un poco más de los \$30.000, desde el año número 1 hasta el año catorce los valores que se mantienen en pequeña proporción es del costo de operación menor a \$2.000, para el año número quince varios componentes deben ser reemplazados ya que llegan al máximo de su vida útil y el costo es de \$25.000, luego del año dieciséis hasta el año veinte y cuatro se siguen manteniendo los costos de operación, para el año número veinte y cinco la barra va hacia arriba por lo que según los colores mostrados a la izquierda es el valor salvado o valor de rescate, cabe recalcar que todos los componentes sufren una depreciación lineal por año por lo que el valor rescatado es un poco más de \$10.000 lo que quiere decir es que luego de los veinticinco años algún componente puede seguir funcionando y se lo podría implementar en cualquier otro proyecto a futuro.

3.4 Producción de Hidrógeno

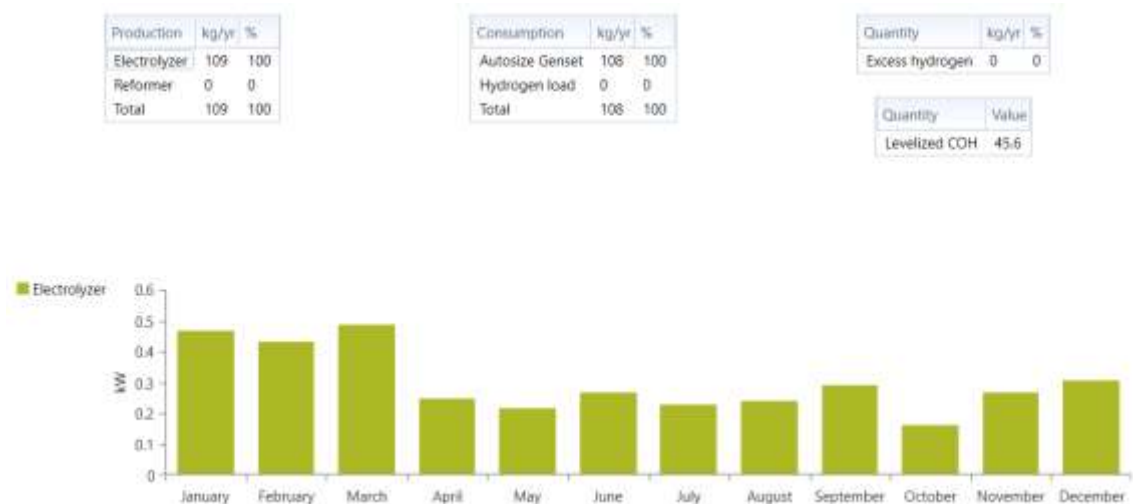


Figura 3.15 Producción de Hidrógeno [Autor].

La figura 3.15 muestra la producción de hidrógeno por parte del electrolizador, la producción neta es de 109 kg por año y el consumo es de 108 kg por año, por lo tanto, casi el 100% de la producción de hidrógeno es

consumida por la pila de combustible, por lo tanto, no existe un exceso de hidrógeno, esto se debe a que HOMER logró optimizar los recursos.

3.5 Consumo de Hidrógeno

Quantity	Value	Units
Total fuel consumed	108	kg
Avg fuel per day	0.297	kg/day
Avg fuel per hour	0.0124	kg/hour

Figura 3.16 Consumo de hidrógeno

En la figura 3.16 se muestra el consumo de hidrógeno por parte de la pila de combustible tanto por año, día y hora. Si el proveedor de tanques de almacenamiento de hidrógenos tiene a disposición tanques con volumen de 7 m³ con un peso de 0,6 kg entonces por día se deberían requerir al menos 2 tanques de almacenamiento de hidrógeno o diseñar un tanque de almacenamiento de 14 m³.

3.6 Emisiones

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	-1.11	kg/yr
Carbon Monoxide	0.705	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0.0780	kg/yr
Particulate Matter	0.0531	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	6.29	kg/yr

Figura 3.17 Emisiones del Sistema optimizado [Autor].

Como se detalla en la figura 3.17, se tienen porcentajes muy bajos de gases contaminantes, tanto el monóxido de carbono, los hidrocarburos no quemados y las partículas de materias son menores a 1 kg por año, la emisión del dióxido de sulfuro es netamente cero, lo particular en esta figura

es que en vez de emanarse dióxido de carbono a la atmosfera un componente (Pila de Combustible) del sistema lo está absorbiendo y lo hace con un caudal 1.1 kg por año. El sistema en general no contamina al medio ambiente.

3.7 Análisis del sistema generando hidrogeno VS el sistema comprando hidrogeno VS el sistema común de Diesel

Tabla 3.16 Comparación final [Autor].

	Sistema generando Hidrogeno	Sistema comprando Hidrogeno	Sistema común con Diesel
Capital	\$31,007.28	\$1,943.34	\$0
Costo de operación	\$26,840.84	\$16,672.22	\$13,515.89
Reemplazo	\$10,603.67	\$2,162.66	\$1,325.80
Combustible	\$0	\$112,650.8	\$11,017.32
Valor recuperado	\$2,928.96	\$294.50	\$179.07
Total	\$65,522.85	\$133,134.10	\$26,038.08

Vamos a llamar al sistema que genera hidrógeno como “sistema 1” y el sistema que se compra hidrógeno como “sistema 2”. Observando la tabla 3.16 en esta sección se puede observar que el sistema 1 tiene un costo de ciclo de vida de \$65,522.85 a diferencia del sistema 2 es de \$133,134.10. Se puede denotar que existe una gran diferencia en el valor total del ciclo de vida. Analizando de manera un poco más minuciosa la tabla partiendo del costo capital existe una gran diferencia de valores, en el sistema 1 el costo es de \$31,007.28 al contrario en el sistema 2 el costo de inversión es menor ya que solo se requiere la pila de combustible y el inversor de corriente más no el electrolizador y panel fotovoltaico. El costo de operación también tiene una diferencia relevante de aproximadamente \$10,000, esto se debe a que el sistema 1 tiene mayor número de componentes que requieren más recursos para poderlo operar. Por último, mucho más relevante y sobresaliente es el costo del combustible, el sistema 1 tiene un valor de \$0

ya que se genera el hidrógeno, pero en el sistema 2 en el cual se compra los tanques de hidrógenos el valor que se gasta es de \$112,650.8 es un valor demasiado elevado. Para, se tiene el sistema común y tradicional en el cual el combustible es el Diésel, podría decirse que este sistema cuesta el 50% menos que el sistema 1 pero lo que se debe tener en cuenta es la magnitud de gases de efecto invernadero que se liberan a la atmosfera con un total 4.539 kilogramos por año (ver figura 3.18). En la adquisición del combustible Diesel para luego quemarlo dentro del motor se gastaría \$11,017.32 es un valor significativamente bajo para los veinticinco años de vida del proyecto.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	4,417	kg/yr
Carbon Monoxide	10.9	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	1.21	kg/yr
Particulate Matter	0.822	kg/yr
Sulfur Dioxide	10.8	kg/yr
Nitrogen Oxides	97.3	kg/yr

Figura 3.18 Emisiones del sistema común [Autor].

3.8 Equivalencias de gases efecto invernadero con respecto al sistema común a Diesel

Partiendo de la figura 3.18 que son todas las emisiones liberadas al medio ambiente en el sistema tradicional como combustible a Diesel en un año, se realizó un cálculo de equivalencias de gases de efectos invernaderos emitidos a la capa de ozono. El mecanismo utilizado para realizar estos cálculos fue a través de la página “EPA”. La página describe los cálculos utilizados para convertir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero en diferentes tipos de equivalencias las cuales se van a describir.

- Reducciones de electricidad (Kilovatio-hora)
- Galones de gasolina consumidos

- Galones de Diesel consumidos
- Vehículos de pasajeros por año
- Milla Recorrida por el vehículo pasajero promedio
- Barriles de petróleo consumido
- Consumo de electricidad en el hogar
- Uso energético en el hogar
- Cantidad de plántulas de árboles urbanos crecidas durante 10 años

3.9 Emisiones GEI



Figura 3.19 Emisiones generadas por el sistema convencional [Autor].

Las emisiones GEI generadas por el sistema convencional de combustible Diesel según la organización EPA se traducen alrededor de 7.3 vehículos de pasajeros que conducen durante un año y a 84,148 millas recorridas por un solo vehículo.

3.10 Emisiones CO₂ de:



Figura 3.20 Equivalencias en CO₂ [Autor].

De manera análoga con la sección anterior las emisiones de CO₂ provocadas por el sistema convencional las relaciona con otros casos de mayor similitud como, por ejemplo, las 5 toneladas de CO₂ que se generan podrían equivaler a 77.5 barriles petróleo como también 3,289 galones de Diesel consumidos, etc. Los resultados han sido tomados de la Agencia de Protección ambiental de los Estados Unidos con respecto a un motor de combustión interna para un tractor que consume Diesel como combustible (figura 3.19 y 3.20), (EPA, 2021). Existe un impuesto destinado a compensar a países más afectados o vulnerables por el cambio climático lo cual se debe por las toneladas de CO₂ que se liberan a la atmosfera, según la CIAT (Centro Interamericano de Administraciones Tributarias) el costo de cada tonelada emitida al medio ambiente tiene un valor de \$30 y que para finales

del año 2028 el precio de cada tonelada podría aumentar entre \$60 hasta \$100 dependiendo de cuán contaminado se encuentre la atmósfera para ese tiempo a futuro. Entonces si el sistema tradicional a Diesel tiene un promedio de 5 toneladas por año como impuesto del daño ambiental causado se tendría que cancelar el valor anual de \$150. (Tributario, 2009) (Andre Dumoulin, 2021).

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones al caso estudiado sobre el diseño de un sistema energético a base de hidrógeno que reemplace el sistema convencional en tractores agrícolas en el Ecuador.

4.1 Conclusiones

- El programa HOMER encuentra una solución optimizada del sistema planteado, lo que indica que sí es posible reemplazar un motor de combustión en un tractor agrícola, por uno eléctrico que funciona a base de hidrógeno.
- Se necesita una gran inversión en la generación de hidrógeno. La inversión elevada significa que se deben utilizar un número considerable de paneles solares y electrolizadores en serie, para producir la cantidad necesaria de hidrógeno requerida por el sistema.
- Desde el punto de vista medioambiental el proyecto es 100% viable, las emisiones GEI (gases de efecto invernadero) al ambiente son casi nulas en el sistema planteado.
- Las celdas de combustibles constituyen un equipo capaz de generar la energía necesaria para la operación de un motor eléctrico de gran potencia que sea utilizado en un tractor agrícola.
- El sistema propuesto es un punto de partida para su implementación en tractores agrícolas de diferentes potencias.
- El costo total del ciclo de vida del sistema con generación de hidrógeno es el 50% menos costoso que comprando hidrógeno almacenado.

4.2 Recomendaciones

- Realizar incentivos desde los gobiernos, como por ejemplo subsidiar el valor de los equipos para abaratar el costo capital de su implementación.
- Analizar más sistemas en los que no sólo se usen paneles solares para la captación de energía.
- Fabricación en masa de los componentes utilizados en el sistema, esto para reducir el precio de los equipos.
- Se recomienda empezar a fabricar dentro del entorno industrial de nuestro país los diferentes componentes tales como electrolizador, inversor de corriente y pilas de combustibles para así reducir costos de importación.

BIBLIOGRAFÍA

- ARCERNNR. (2021). *Resolución Nro. ARCERNNR-013/2021*.
- Andre Dumoulin. (6 de enero de 2021). *Centro Interamericano de Administraciones Tributarias*. Obtenido de Centro Interamericano de Administraciones Tributarias: <https://www.ciat.org/ciatblog-taller-de-la-onu-sobre-impuestos-al-carbono-parte-1-en-paises-en-desarrollo/>
- Asociación Española de Pilas de combustible. (s.f.). *Asociación Española de Pilas de combustible*. Obtenido de Asociación Española de Pilas de combustible: www.appice.es
- Barzola-Monteses, J., & Espinoza-Andaluz, M. (2019). Performance analysis of hybrid solar/H₂/battery renewable energy system for residential electrification. *Energy Procedia*, 158, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.024>
- Barzola, J., Espinoza, M., Pavón, C., & Cabrera, F. (2016). *Solar-Wind Renewable Energy System for Off-Grid Rural Electrification in Ecuador*. July 2016, 20–22. <https://doi.org/10.18687/laccei2016.1.1.056>
- Corominas, J. (2001). Pilas de combustible. *Alambique: Didáctica de Las Ciencias Experimentales*, 102(27), 115–118.
- Crippa, M., Gabriel, O., Diego, G., Marilena, M., Edwin, S., Eleonora, L. V., Efisio, S., Fabio, M.-F., & Jos, O. (2019). Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries. In *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (Vol. 105, Issue D2). <https://doi.org/10.2760/56420>
- C. Acar, I. D. (2013). *ScienceDirect Comparative assessment of hydrogen production methods from*
- Fernando Patricio Miño Montaña. (n.d.). *Análisis de motores utilizados en vehículos eléctricos*. Retrieved June 16, 2021, from [https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2164/1/Tesis \(Recuperado 3\).pdf](https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2164/1/Tesis%20(Recuperado%203).pdf)
- EPA. (28 de abril de 2021). *Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos*. Obtenido de Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos-y>
- Gerardo Israel Pelafox Alvarado. (2009). *Diseño y construcción de un vehículo eléctrico*

- con variador de velocidad mediante un convertidor CD-CD* [Universidad Técnica Mixteca]. http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/10990.pdf
- MAGAP. (2020). *Agricultura, la base de la economía y la alimentación – Ministerio de Agricultura y Ganadería*. Gobierno de La República Del Ecuador. <https://www.agricultura.gob.ec/agricultura-la-base-de-la-economia-y-la-alimentacion/>
- Mohan. (n.d.). Inversores De Cc-Ca De Modo Conmutado : Cc ~ Ca. In *Circuitos de alta potencia* (pp. 176–208).
- M, R. (2008). *Maquinas Asincronas*. Cantabria.
- Pablo, A. (2010). *Vehículos eléctricos y redes para su carga*. Madrid.
- Resumen ejecutivo*. (2019). 11–30. <https://doi.org/10.18356/7cdf7b83-es>
- Ruiz-Morales, J., Martínez, J., ... D. L.-A. de la R., & 2006, U. (2006). Pilas de combustible. *Dialnet.Unirioja.Es*. www.rseq.org
- Tributario, A. (2009). *En el caso del CO2 se fija un impuesto de US\$5 por cada tonelada*.
- W, G. (2012). *Máquina de Inducción*. Lima.

APÉNDICE

HYDROGEN TANK

Name: Hydrogen Tank Abbreviation: Hydrog [Remove](#)
[Hydrogen Tank](#) [Copy To Library](#)

Properties

Name: Hydrogen Tank
 Abbreviation: Hydrogen Ta
 Manufacturer: Generic
www.hydrogen.com
 Notes:
 This is a generic hydrogen tank.

Costs

Item ID	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
00	\$2,200.00	\$0.0	\$0.000

[Click here to add new item](#)

Multiplier:

Lifetime (years):

Capacity Optimization

Size (kg)

0.6
0.2
0.8
0.4
1

Initial Tank Level

Relative to tank size (%)
 Absolute amount (kg)

Require your real tank level to equal or exceed initial tank level

Apéndice A. Setup del Tanque de Hidrógeno [Autor].

ELECTROLYZER

Name: Generic Electrolyzer Abbreviation: Electro [Remove](#)
[Generic Electrolyzer](#) [Copy To Library](#)

Properties

Name: Generic Electrolyzer
 Abbreviation: Electroizador
 Manufacturer: Generic
www.hydrogen.com
 Notes:
 This is a generic electrolyzer.

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$450.00	\$450.00	\$30.00

[Click here to add new item](#)

Multiplier:

Capacity Optimization

Size (kW)

50
100
150
200
250
300

Apéndice B. Setup del Electrolizador [Autor].

Add/Remove: Poinar SG200MS

PV Name: Poinar SG200MS Abbreviation: Poinar S [Remove](#)
[Poinar SG200MS](#) [Copy To Library](#)

Properties

Name: Poinar SG200MS
 Abbreviation: Panel Solar
 Panel Type: Flat plate
 Rated Capacity (kW): 200
 Temperature Coefficient: -0.4
 Operating Temperature (°C): 25
 Efficiency (%): 15.7
 Manufacturer: Poinar Inc.
www.poinar.com
 Notes:
 14.5 kg, Footprint: 1.277 m2

Cost

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
00	\$,148.00	\$,148.00	0.00

[Click here to add new item](#)

Lifetime (years):

Site Specific Input: Derating Factor (%):

String

HOMER Optimizer™
 Search Space

Size (kW)

0
200

Electrical Bus

AC DC

[Advanced...](#)

Apéndice C. Setup del Panel Solar [Autor].

Add/Remove: Autotize Genset

GENERATOR Name: Autotize Genset Abbreviation: Fuel Cell Remove Copy To Library

Properties
 Name: Autotize Genset
 Generator is auto-starting
 Fuel: Stored Hydrogen
 Fuel curve intercept: 0.165 kg/hr
 Fuel curve slope: 0.0077 kg/hr/MW
Emissions
 CO (g/kg fuel): 6.3
 Unburned HC (g/kg fuel): 0.72
 Particulates (g/kg fuel): 0.49
 Fuel Sulfur to PM (SO): 2.2
 NOx (g/kg fuel): 58

Generator Cost
 in \$/kW of capacity
 Initial Capital (\$): 151.00
 Replacement (\$): 151.00
 O&M (\$/op. hour): 0.000
 Fuel Price (\$/kg): \$

Optimization
 Simulate systems with and without this generator
 Include in all systems

Electrical Bus
 AC DC

Site Specific
 Minimum Load Ratio (%): 25.00 CHP Heat Recovery Ratio (%): 0.00 Lifetime (Hours): -40,000.00 Minimum Runtime (Minutes): 0.00
 Serial Inverter

Apéndice D. Setup Fuel Cell [Autor].

SUNSYS PCS1 OG 66kVA TL Name: SUNSYS PCS1 OG 66kVA TL Remove Copy To Library

CONVERTER Complete Catalog Abbreviation: DC-AC

Properties
 Name: SUNSYS PCS1 OG 66kVA TL
 Abbreviation: DC-AC
<https://www.socomec.com/en/energy-power-converter-system-storage-renewable>
 Notes:
 "To be used with Socomec's local EMS. Contact SOCOMEC to see our privileged battery partners."
 Both grid-form and follow

Code

Code	Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)	DC
1		\$100.00	\$100.00	\$25.00	<input checked="" type="checkbox"/>

Click here to add new item

Capacity Optimization
 HOSDK Optimizer™
 Search Space
 Advanced

SOCOMEC

Multiplier

Inverter Input
 Lifetime (years): 10.00
 Efficiency (%): 97.60

Rectifier Input
 Relative Capacity (%): 0.00
 Efficiency (%): 95.00

Parallel with AC generator?

Apéndice E. Setup Inversor [Autor].



Apéndice F. Motor Eléctrico AC [Autor].



Apéndice G. Inversor de corriente [Autor].



Apéndice H. Pila de combustible [Autor].



Apéndice I. Tanque de Hidrógeno [Autor].



Apéndice J. Panel Fotovoltaico [Autor].

HP	Velocidad		Amazón	Corriente (A)			kVA/HP	Eficiencia nominal %			Factor de potencia %			Par			Conexión
	RPM sincrona	RPM a plena carga		en vacío	plena carga	Rotor bloq.		1/2	3/4	plena carga	1/2	3/4	Nom.	Nom. lb-ft	Rotor Bloq.	Max.	
40	3600	3530	324TS	12.0	45.0	290	G	94.0	94.1	93.6	80	87	89	60.0	150%	250%	D
	1800	1770	324T	15.0	47.0	290	G	94.0	94.2	93.6	77	82	85	119.0	190%	240%	D
	1200	1180	364T	24.0	52.0	290	G	93.6	93.9	93.6	59	71	77	178.0	170%	230%	D
	900	885	365T	36.0	63.0	290	G	90.7	92.0	91.7	49	60	65	237.0	150%	200%	D
50	3600	3530	326TS	15.0	55.0	363	G	94.1	94.2	93.6	82	89	91	74.0	150%	250%	D
	1800	1770	326T	18.0	58.0	363	G	94.1	94.2	93.6	77	87	86	148.0	190%	240%	D
	1200	1180	365T	30.0	66.0	363	G	94.0	94.2	93.6	60	71	76	223.0	170%	230%	D
	900	885	404T	28.0	67.0	363	G	92.3	92.4	91.7	64	73	76	297.0	140%	200%	D
60	3600	3565	364TS	19.0	68.0	435	G	93.8	94.1	93.6	80	86	88	89.0	160%	250%	D
	1800	1775	364T	21.0	71.0	435	G	93.9	94.1	93.6	74	82	85	178.0	160%	240%	D
	1200	1185	404T	26.0	74.0	435	G	94.1	94.5	94.1	70	78	81	266.0	150%	200%	D
	900	885	405T	30.0	78.0	435	G	92.3	92.4	91.7	67	76	79	256.0	140%	200%	D
75	3600	3565	365TS	22.0	85.0	543	G	94.3	94.5	94.1	81	86	88	111.0	160%	260%	D
	1800	1775	365T	27.0	87.0	543	G	94.4	94.6	94.1	74	83	85	222.0	155%	240%	D
	1200	1185	405T	34.0	93.0	543	G	94.7	94.9	94.5	68	77	80	332.0	150%	200%	D
	900	885	444T	37.0	94.0	543	G	92.9	93.3	93.0	67	76	80	445.0	135%	200%	D
100	3600	3570	405TS	19.0	108.0	725	G	94.6	94.7	94.1	90	92	92	147.0	120%	200%	D
	1800	1780	405T	30.0	113.0	725	G	95.0	95.2	94.5	80	85	87	295.2	160%	200%	D
	1200	1185	444T	38.0	117.0	725	G	94.6	94.9	94.5	75	82	85	443.0	140%	200%	D
	900	885	445T	48.0	123.0	725	G	94.2	94.5	94.1	70	78	81	593.0	130%	200%	D

Apéndice K. Catálogo de motores Siemens [Autor].