



espol

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“SISTEMA DE ALIMENTACIÓN BASADO EN FUEL CELL PARA
MOTOR DE UN VEHÍCULO DE CABLE VÍA”**

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería en Electrónica y Automatización Industrial

Presentado por:

Jonathan Estuardo Bustamante Apolo

Víctor Adolfo Lucio Lara

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

El trabajo efectuado va dedicado a mis padres y hermanos. A mis amigos y demás conocidos que me han brindado su apoyo.

Víctor Lucio

El presente trabajo se lo dedico a toda mi familia que siempre estuvo presente, en especial a mis padres y hermana. A mis compañeros y amigos.

Jonathan Bustamante

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi sincero agradecimiento a mis familiares, por ser el motor de mi inspiración y a mis amigos, los cuales me han acompañado durante mi formación. A Jonathan Bustamante por el soporte y compromiso brindado.

El personal profesional de ESPOL, quienes constantemente incentivaron y contribuyeron durante este largo proceso. Al Ing. Wiltón Agila y al Ing. Gomer Rubio por sus apoyos durante el desarrollo del proyecto.

Víctor Lucio

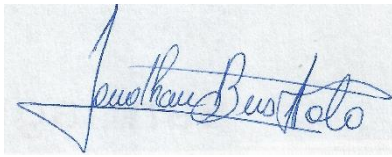
Le agradezco a la ESPOL, sus profesores y al Ing. Wiltón Agila y al Ing. Gomer Rubio, tutores de este trabajo, por la guía en el camino a ser un profesional. A mis amigos y compañeros les agradezco todo el esfuerzo y compañía brindado durante todo este tiempo. A Víctor por ser compañero y respaldo de este trabajo

Especial agradecimiento a mis padres que siempre han dado todo para que yo llegue hasta este punto en mi vida y familia por el apoyo constante.

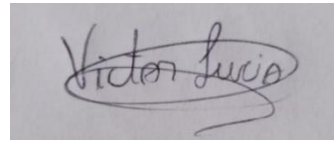
Jonathan Bustamante

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Jonathan Bustamante, Víctor Lucio y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL 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"

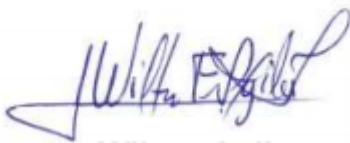


Jonathan Estuardo
Bustamante Apolo



Víctor Adolfo
Lucio Lara

EVALUADORES



Wilton Agila

PROFESOR DE LA MATERIA



Gomer Rubio

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En busca de fuentes de energía eléctrica, alternativas y amigables con el medio ambiente, en el siguiente trabajo se plantea el diseño de un sistema de alimentación basado en celdas de combustible para un vehículo cable vía con motores de corriente continua; con el fin de comprobar su fiabilidad desde el punto de vista económico y funcional, para lograr una operación más limpia dentro de las bananeras. Para el diseño y evaluación del sistema se empleó el software Simulink de MATLAB, en donde se implementó un modelo de celda y motor basados en parámetros reales, junto con un controlador para la regulación de voltaje. Se realizó el diseño del vehículo referente a la posición de los equipos, en donde se analizó factores de seguridad para su ubicación y correcto funcionamiento. Se observó que las celdas son fuentes de energía altamente confiables y de alta densidad de potencia, capaces de alimentar los motores de forma continua mientras haya combustible. Sin embargo, la obtención de su combustible y forma de suministración consiste en una de las principales pruebas a superar.

Palabras Clave: Celda de Combustible, Hidrogeno, Oxígeno, Bananera, Transporte.

ABSTRACT

Searching for new sources of electric energy, that where friendly with the environment, the following work presents the design of an electric supply system based on fuel cell technology for cableway vehicles using electric DC motors, to verify its viability considering economic and functional parameters, to get a cleaner operation in banana crops. For design and evaluation of the system, the software Simulink from MATLAB was used, where a fuel cell and motor model based on real parameters was implemented, together with a controller for voltage regulation. The design of the vehicle was carried out regarding the position of the equipment, where safety factors were analyzed for its location and correct operation. The cells were found to be highly reliable, high-power-density energy sources, capable of powering engines continuously as long as there is fuel. However, obtaining its fuel and supply method is one of the main tests to pass.

Keywords:

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| RESUMEN..... | I |
| ABSTRACT | II |
| ÍNDICE GENERAL | III |
| ABREVIATURAS..... | V |
| SIMBOLOGÍA | VI |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | VIII |
| CAPÍTULO 1..... | 9 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 9 |
| 1.1. Descripción del problema..... | 10 |
| 1.2. Justificación del problema | 11 |
| 1.3. Objetivos | 11 |
| 1.3.1. Objetivo General | 11 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos..... | 11 |
| 1.4. Marco teórico | 12 |
| 1.4.1. El sector Bananero del Ecuador hacia el mercado internacional | 12 |
| 1.4.1.1. Certificados de calidad para el mercado internacional | 12 |
| 1.4.2. Normas ambientales enfocadas en derrames de combustibles fósiles..... | 13 |
| 1.4.3. Mecanismo de Transporte de las racimas de banano | 14 |
| 1.4.4. Celdas de Combustible..... | 15 |
| 1.4.4.1. Funcionamiento y Estructura | 15 |
| 1.4.5. Tipos de celdas de combustible y características | 17 |
| 1.4.5.1. Aplicaciones | 18 |
| CAPÍTULO 2..... | 20 |
| 2. METODOLOGÍA | 20 |
| 2.1. Levantamiento de información. | 20 |
| 2.2. Presentación y selección de propuestas de solución..... | 21 |
| 2.3. Calculo de Requerimientos para los equipos | 21 |
| 2.4. Selección de equipos. | 24 |
| 2.5. Fuente de Combustible | 29 |
| 2.5.1. Consideraciones de seguridad..... | 30 |
| 2.6. Descripción del vehículo | 31 |
| 2.6.1. Panel de Control | 32 |

| | |
|---|----|
| 2.7. Implementación del sistema mediante software de Simulación. | 32 |
| 2.7.1. Parametrización de los elementos | 34 |
| 2.7.2. Topología del sistema | 35 |
| CAPITULO 3..... | 38 |
| 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 38 |
| 3.1. Comportamiento del sistema..... | 38 |
| 3.2. Análisis del consumo de energía del sistema | 45 |
| 3.3. Análisis de consumo de combustible | 47 |
| 3.4. Análisis de comportamiento general | 48 |
| 3.5. Análisis de implementación y costos..... | 49 |
| CAPITULO 4..... | 50 |
| 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 50 |
| 4.1. Conclusiones..... | 50 |
| 4.2. Recomendaciones | 51 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 52 |

ABREVIATURAS

| | |
|-------|--|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| MAGAP | Ministerio de Ganadería Acuicultura y Pesca |
| AEBE | Asociación de Exportadores de Banano del Ecuador |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| DC | Direct Current |
| PEM | Protonic Exchange Membrane |
| AFC | Alkaline Fuel Cell |
| KOH | Hidróxido de Potasio |
| DMFC | Direct Methanol Fuel Cell |
| PAFC | Phosphoric Acid Fuel Cell |
| SOFC | Solid Oxide Fuel Cell |
| MCFC | Molten Carbonate Fuel Cell |
| PEMFC | Protonic Exchange Membrane Fuel Cell |
| CIDIS | Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Sistemas computacionales |
| CAN | Controller Area Network |

SIMBOLOGÍA

| | |
|-----------------|------------------------|
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| CO | Monóxido de Carbono |
| H+ | Potencial de Hidrógeno |
| m | Metro |
| N·m | Newton-metro |
| V | Voltios |
| rad | Radianes |
| s | Segundos |
| min | Minutos |
| W | Vatios |
| lpm | Litros por minuto |
| A | Amperios |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Ejemplo de cable vía usado en plantaciones de banano. | 13 |
| Figura 1.2 Diseño de soportes para el paso del cable vía. | 14 |
| Figura 1.3 Estructura interna de la celda de combustible PEM. | 16 |
| Figura 2.1 Carretón empleado en el vehículo cable vía. | 22 |
| Figura 2.2 Diagrama de fuerzas del sistema cable vía. | 22 |
| Figura 2.3 Diagrama de Flujo de energía del sistema. | 25 |
| Figura 2.4 Reductor a emplear con el motor. | 26 |
| Figura 2.5 Motor DC de imán permanente y alto par. | 27 |
| Figura 2.6 Controlador para motor DC, de dos canales. | 27 |
| Figura 2.7 Placa de manejo para el controlador. | 28 |
| Figura 2.8 Celda de combustible seleccionada. | 28 |
| Figura 2.9 Cilindro de hidrogeno (H ₂). | 30 |
| Figura 2.10 Tarjeta de detección de hidrógeno. | 31 |
| Figura 2.11 Diseño del vehículo cable vía. | 31 |
| Figura 2.12 Diseño del panel para el vehículo. | 32 |
| Figura 2.13 Bloque de celda de combustible en Simulink. | 33 |
| Figura 2.14 Modelo interno de la celda de combustible. | 33 |
| Figura 2.15 Bloque de motor DC en Simulink. | 34 |
| Figura 2.16 Cuadro de parametrización de la celda de combustible con los datos obtenidos. | 34 |
| Figura 2.17 Selección de motor de imanes permanentes. | 35 |
| Figura 2.18 Cuadro de parámetros constructivos del motor seleccionado. | 35 |
| Figura 2.19 Diagrama de bloques del sistema creado en Simulink. | 36 |
| Figura 2.20 Celda de combustible con selección de datos a mostrar. | 36 |
| Figura 2.21 Circuito Buck-Boost DC para el control del motor. | 37 |
| Figura 2.22 Motor de imanes permanentes con muestra de datos. | 37 |
| Figura 3.1 Parámetros de salida de la celda de combustible. | 38 |
| Figura 3.2 Parámetros de salida del motor. | 39 |
| Figura 3.3 Parámetros de salida del controlador. | 40 |
| Figura 3.4 Parámetros de salida de la celda de combustible. | 41 |
| Figura 3.5 Eficiencia de la celda de combustible. | 41 |
| Figura 3.6 Parámetros de salida del motor. | 42 |
| Figura 3.7 Parámetros de salida del controlador. | 43 |
| Figura 3.8 Parámetros de salida de la celda de combustible. | 43 |
| Figura 3.9 Parámetros de salida del motor. | 44 |
| Figura 3.10 Parámetros de salida del controlador. | 44 |
| Figura 3.11 Rendimiento del sistema basado en Fuel Cell. | 48 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1.1 Tipos de pilas de combustible y características [15]..... | 17 |
| Tabla 1.2 Aplicaciones de las celdas de combustible. [16]..... | 18 |
| Tabla 2.1 Tabla de parámetros de referencia del sistema cable vía. | 200 |
| Tabla 2.2 Características del motor seleccionado para el sistema cable vía..... | 26 |
| Tabla 2.3 Datos nominales de la celda de combustible..... | 29 |
| Tabla 3.1 Datos del sistema de movimiento empleado para el vehículo cable-vía..... | 45 |
| Tabla 3.2 Determinación de la velocidad final del vehículo a carga nominal..... | 45 |
| Tabla 3.3 Determinación de la velocidad final del vehículo sin carga. | 46 |
| Tabla 3.4 Determinación del consumo de energía del vehículo. | 46 |
| Tabla 3.5 Determinación del consumo de energía del vehículo. | 47 |
| Tabla 3.6 Listado de elementos equipos del sistema. | 49 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales actividades económicas del Ecuador, se basa en la exportación de productos agropecuarios, siendo el banano uno de los principales productos dentro de esta actividad. Es por ello, que existe una gran variedad de empresas que se dedican a este sector de la agricultura predominantemente en la región litoral del país. Inclusive se llegó a registrar un alza en el porcentaje de exportación de banano, cerca del 10%, para el primer trimestre del año 2020; representando un total aproximado de 104.731.409 cajas de banano [1].

De hecho, existe un interés notorio por posicionar al Ecuador como uno de los principales exportadores de banano, con lo cual resulta importante proporcionar un enfoque amigable con el ecosistema, que permita la certificación de calidad del producto para el comercio internacional. Empresas como UBESA, REYBANPAC, ECUAGREENPRODEX S.A., ORODELTI S.A. poseen el mayor porcentaje de exportación del país, siendo reconocidas por la calidad del producto [2].

En general, el método empleado para recolectar las racimas de banano se basa en el uso de cables vías, en donde para acelerar el proceso de recolección, convencionalmente se emplean burros de cargas o motores de combustión. Pero estos sistemas pueden presentar ciertos inconvenientes como se detalla en la descripción del problema [3]. Por esta razón se busca medios alternativos de mejorar el sistema de cable vía, cambiando la fuente de energía del mismo; de modo que cumpla con las exigencias del sistema, pero, además evite los problemas de los métodos tradicionales expuesto en el primer capítulo.

1.1. Descripción del problema

Debido a la topología y ubicación de las bananeras en el país, muchas recurren al uso de sistemas mecánicos para el traslado de los racimos (cable vía), donde se suele utilizar la fuerza humana, animal o de motores de combustión como fuente de fuerza motriz. Sin embargo, los dos primeros involucran un gran esfuerzo y fatiga por lo que se recurre al uso de motores de combustión cuyas fuentes de energía provienen del uso de combustibles fósiles como lo es el diésel. El uso de estos motores implica la producción de CO₂, CO y otros gases contaminantes que caen sobre el producto a lo largo de su recorrido.

Esta contaminación consiste en un problema para las bananeras debido a que conlleva al uso extra de recursos, tiempo para la limpieza y protección del producto o incluso deteriorando la calidad del mismo; lo que deriva en un leve incremento en el porcentaje de rechazo que a representa un déficit en las bananeras. Además, puede implicar un riesgo a largo plazo, para salud de los empleados y especialmente para el conductor de este vehículo. A pesar de esto, resulta difícil encontrar un sistema de alimentación de energía que evite estos inconvenientes debido a los siguientes aspectos:

- Movilidad del proceso.
- Espacio disponible en el vehículo.

1.2. Justificación del problema

Muchas de las empresas de productos agrícolas, desean entregar un producto de calidad que cumpla con todos los estándares requeridos que permitan su venta a nivel nacional; así como a nivel internacional. Incluyendo en este contexto, la garantía de cuidado del medio ambiente debido al gran movimiento por la conservación del planeta.

El principal conflicto es la contaminación sobre el producto, que se produce debido al uso de motores a diésel; provocando un gasto extra en limpieza, dificultad en la obtención de certificados y un declive en la imagen del mismo, limitando su área de mercadeo. Con esto, la problemática de encontrar un medio de alimentación de energía eficaz que permita mantener los niveles de producción cuidando el medio ambiente y sin incurrir en costos elevados.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Diseñar un sistema de alimentación de energía, basado en el uso de celdas de combustible, para el motor de corriente continua del vehículo cable vía usado en el transporte de banano.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Dimensionar la pila de combustible apropiada para la alimentación del sistema.
- Simular el comportamiento del sistema mediante el software Simulink, evaluando su funcionamiento.
- Determinar la factibilidad del proyecto, considerando los costos de implementación.

1.4. Marco teórico

1.4.1. El sector Bananero del Ecuador hacia el mercado internacional

La exportación de banano en Ecuador refleja una de las fuentes más predominantes de economía, dado que se ha mantenido durante más de 60 años en el mercado internacional y representado cerca del 30% de las exportaciones a nivel mundial [4]. El alcance que posee Ecuador en las exportaciones durante los últimos años apunta hacia una contribución en el aspecto social, al proveer fuentes de trabajo a la sociedad, teniendo un mayor impacto en la región costera.

Las bananeras representan cerca del 20% de la economía activa para el sustento de la población del país. En donde, el 61% de las bananeras son consideradas como pequeños productores, en tal sentido se presenta la necesidad de brindar el apoyo y el seguimiento necesario de parte del sector privado [5].

1.4.1.1. Certificados de calidad para el mercado internacional

Durante la última década se ha dado interés hacia las técnicas empleadas en el sector agricultor, en relación al impacto ambiental de las mismas. Con ello, al analizar la huella de carbono e hídrica se garantiza un producto de calidad y que cumple con las normas medioambientales establecidas tanto a nivel nacional como internacional [6].

La producción de banano a un nivel de carbono central, se relaciona con cualquier tipo de contaminación por emisiones de carbono, el cual puede afectar vías acuáticas, la calidad del producto, la fertilidad de suelos, incluso poniendo en riesgo el bienestar de los trabajadores de la bananera. Con lo cual se pretende presentar un sistema eficiente, de forma que se obtenga un producto de mejor calidad [7].

El mercado internacional posee estándares de calidad que se requieren cumplir para efectuar exportaciones, cabe mencionar que cada región puede diferir en las normas medioambientales que permiten la venta de banano en sus territorios. De esta forma surgen 2 pilares importantes, el primero hace referencia a los laboratorios, los cuales

permiten la obtención de certificados adecuados en las bananeras del país; mientras que por otro lado se encuentran los organismos nacionales, cuyo objetivo es presentar sistemas agronómicos sostenibles y amigables al ambiente [8].



Figura 1.1 Ejemplo de cable vía usado en plantaciones de banano.

El Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) se enfoca en brindar capacitaciones al personal de bananeras para promover la importancia de llevar a cabo los estándares de calidad, por medio de normas ambientales [9]. A pesar de lo cual, se han presentado casos en donde se ha visto reflejado el incumplimiento de estas normas, lo cual deriva en multas por contaminación ambiental. Entre los principales impactos ambientales se encuentra la contaminación de lagos y suelos; los cuales son derivados del tratamiento de combustibles fósiles [10].

1.4.2. Normas ambientales enfocadas en derrames de combustibles fósiles

La Asociación de Exportadores de Banano del Ecuador (AEBE) y otros organismos han resuelto que los derrames de combustible en el sector bananero provocan pérdida en el nivel de productividad del banano; esto se debe a que el mismo posee concentraciones de metales pesados en su composición, lo cual inhibe la absorción idónea de los nutrientes del suelo. Cabe resaltar, que la bioremediación de los suelos resulta costosa para ciertas empresas adicionalmente es necesaria la inactividad durante unos meses [11].

Existen distintas organizaciones cuyo objetivo es la evaluación de las condiciones de agricultura de un determinado producto, entre estas se encuentra Rainforest Alliance la

cual asegura la protección de los recursos naturales mediante capacitaciones en prácticas del uso sostenible de los suelos. Por otra parte, GlobalGAP se enfoca en las técnicas de producción de banano, mientras que EurepGAP propone incrementar el nivel de confianza del consumidor en relación a la sanidad de los productos. Estas certificaciones evalúan el impacto ambiental de las bananeras, con lo cual se consigue posicionar a Ecuador como uno de los principales exportadores de banano [12].

1.4.3. Mecanismo de Transporte de las racimas de banano

Dadas las topologías de las bananeras comúnmente se emplean cables vía para agilizar el transporte de las racimas bananos, desde los terrenos de cultivo hacia las empacadoras. Los cables vías consisten en una infraestructura en la cual se despliega un cable templado hecho de acero recubierto por varias capas de zinc; esto con la finalidad de obtener un producto más resistente a las condiciones del entorno, La Figura 1.2. muestran un esquema de la estructura para vehículos de cables vía. La estructura de los cables vía se encuentra sostenida por torres, las mismas que se encuentran incrustadas en el suelo y espaciadas a una distancia máxima de 10 metros entre ellas [13].

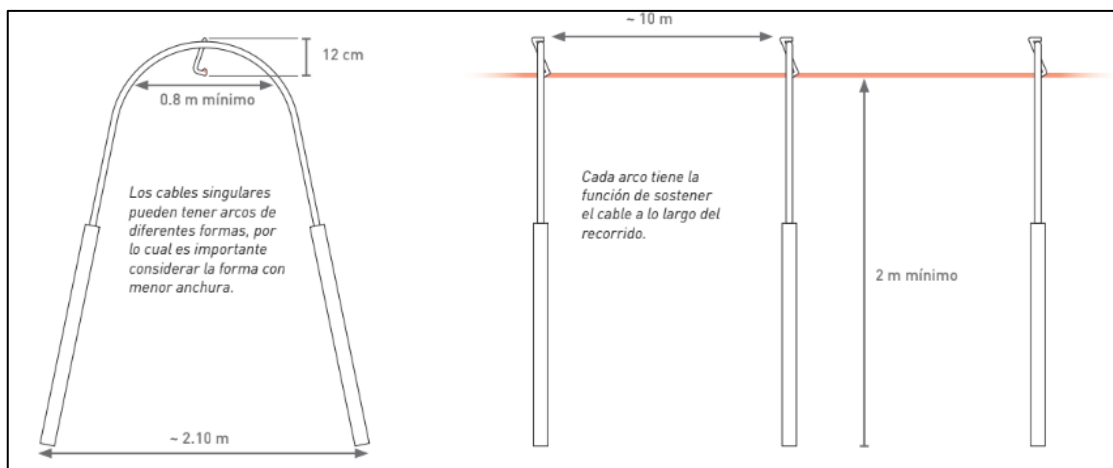


Figura 1.3 Diseño de soportes para el paso del cable vía.

1.4.4. Celdas de Combustible

El uso de las celdas de combustible, como un sistema de suministro de energía, se ha extendido a lo largo de diferentes mercados en los últimos años; mas no se trata de un descubrimiento reciente. Estos dispositivos datan su descubrimiento, ya como una tecnología definida, en el año de 1839 por William Grove; sin embargo, alcanzaron un gran desarrollo por el movimiento espacial desarrollado en 1960. En este año, la NASA establecería las pilas de combustible como fuente de energía para sus vehículos espaciales debido al peligro que presentaban antiguas tecnologías como los reactores nucleares [14].

De forma básica, las celdas de combustibles son equipos capaces de generar electricidad empleando un medio oxidante y otro elemento como combustible que suele ser el hidrógeno. Se puede definir que las celdas de combustible son equipos electroquímicos que cuentan con la capacidad de generar electricidad y calor. Es por esto que las celdas de combustible se han llegado a considerar como una las principales tecnologías para la generación energética en aplicaciones móviles; sin producir emisiones de gases o residuos contaminantes para el ambiente [15].

1.4.4.1. Funcionamiento y Estructura

EL comportamiento de las celdas de combustible consiste básicamente de reacciones electroquímicas, sin la presencia de un proceso de combustión, entre dos elementos principales. El primer elemento corresponde a un carburante basado en hidrógeno y el segundo un oxidante como lo es el oxígeno del aire. Como resultado de estas reacciones se obtiene electricidad y calor, agregando la producción de un elemento neutro que dependerá del tipo de pila empleada. Su funcionamiento es similar al de una batería, ya que genera electricidad de tipo continua o DC, con la capacidad de suministrar energía de forma ininterrumpida mientras cuente con un flujo de combustible sin la generación de ningún tipo de contaminante al medio ambiente durante el proceso [14].

Para cumplir con su función las celdas de combustible están constituidas primordialmente por los siguientes elementos [16]:

- Electrodo.
- Membrana electrolítica.
- Conexión eléctrica externa.

Posee dos electrodos, uno positivo y otro negativo, denotados como cátodo y ánodo respectivamente, tal como se representa en la Figura 1.4. Estos electrodos se encuentran separados por una membrana electrolítica, la cual puede variar de material o composición de acuerdo a las diversos diseños o aplicaciones para las cuales esté determinada.

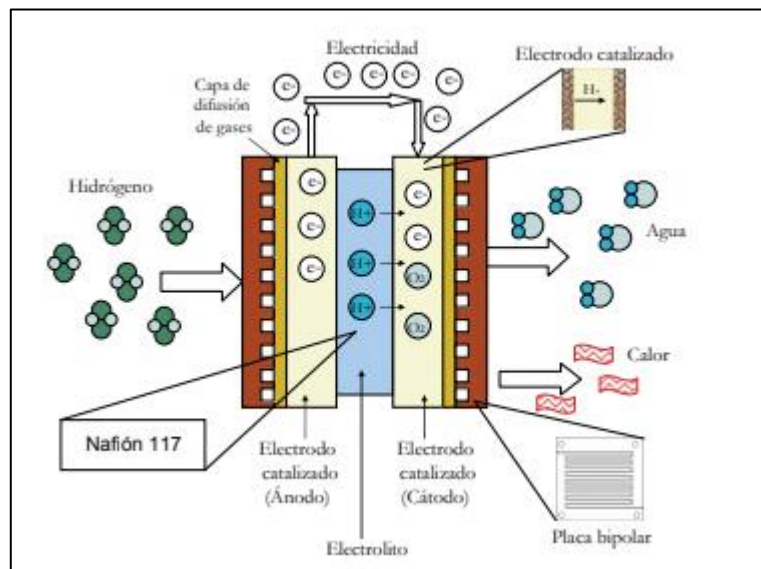


Figura 1.5 Estructura interna de la celda de combustible PEM [17].

La reacción ocurrida en las pilas de combustible se considera como un proceso de electrolisis inversa. En el ánodo, se recibe el combustible, donde se somete a una etapa de oxidación que resultara en la producción de iones positivos y electrones debido a la interacción del mismo con un catalizador. Los electrones generados no pueden pasar por la membrana electrolítica dispuesta entre los electrodos, por esto toman el camino dispuesto por las conexiones externas de la pila generando así un flujo de corriente. En el ánodo, el elemento oxidante pasa por un proceso de reducción generando iones oxido gracias a los electrones ganados del catado. Finalmente existe el movimiento de los iones oxido o de lo protones, por la membrana, y este movimiento dependerá del material electrolítico empleado entre los electrodos [18].

Dando un ejemplo específico; para las celdas de combustible tipo PEM que cuentan con una membrana de un polímero, los protones hidrógenos liberados en el ánodo se mueven al cátodo a través de la membrana donde reaccionan con los iones óxidos y electrones para formar agua tal como se observa en figura. Las reacciones involucradas en los procesos de oxidación y reducción serían las siguientes respectivamente [16].



1.4.5. Tipos de celdas de combustible y características

Existen diferentes clasificaciones para las celdas de combustibles, basándose en diferentes aspectos siendo uno de los más empleados el tipo de material electrolítico usado. En la Tabla 1.1 se puede observar las clasificaciones, el ion que se mueve a través de ellas y sus temperaturas de operación.

Tabla 1.1 Tipos de pilas de combustible y características [15].

| Tipo | Ion Móvil | Temperatura de operación |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Alcalina | OH- | 50°C-200°C |
| Membrana de Intercambio protónico | H+ | 30°C-100°C |
| Metanol directo | H+ | 20°C-90°C |
| Ácido fosfórico | H+ | 220°C |
| Carbonato fundido | CO ₃ ²⁻ | 650°C |
| Óxido Sólido | O ²⁻ | 500°C-1000°C |

Las pilas alcalinas o AFC, se caracterizan por poseer una solución acuosa (KOH) como electrolito con eficiencias de hasta un 70 % sin embargo sufren de la contaminación de

dióxido de carbono si el combustible o el aire presentan impurezas. Las celdas de metanol directo o DMFC, como su nombre lo indica se caracterizan por usar metanol como combustible que resulta en la producción de agua, pero además de CO₂. De igual manera cada una de las siguientes celdas; PAFC, SOFC, MCFC, PEMFC cuenta con sus propias ventajas, aplicaciones y singularidades respecto a las demás [16].

1.4.5.1. Aplicaciones

Como se puede pensar, existe una variedad de aplicaciones para las celdas de combustible acorde al tipo que de celda que se disponga. Las celdas se encuentran en distintos equipos ya sea móviles o estacionarios, en la industria militar, especial, energética y de transporte [19], tales aplicaciones se detallan en la Tabla 1.2.

Tabla 1.3 Aplicaciones de las celdas de combustible. [16]

| Tipo | Eficiencia con sistema combinado | Aplicación |
|-----------------------------------|---|---|
| Alcalina | >80 | -Militar -Espacial |
| Membrana de Intercambio protónico | 70-90 | Energía portátil -Distribución de baja energía -Vehículos espaciales -Transporte |
| Metanol directo | 80 | -Computadoras y otros servicios portátiles |
| Ácido fosfórico | >85 | Distribución de energía |
| Carbonato fundido | >80 | -Alta distribución de energía |
| Óxido Sólido | <90 | -Potencia auxiliar -Alta distribución de energía |

Para celdas de combustible tipo PEM o de membrana de intercambio protónico, se detallan una gran variedad de aplicaciones y es una de las más empleadas gracias a su baja corrosión por su membrana de estado sólido [20]. Los sistemas de generación con este tipo de pilas se pueden integrar con sistemas híbridos que permitan mejores consumos de hidrógeno, tiempos de calentamiento y la recuperación o almacenamiento de energía [18].

Se ha determinado que este tipo de celdas de combustible, son de gran utilidad para la generación de electricidad y calor en viviendas, pero se ha detallado su gran potencial en aplicaciones de vehículos. Esto último es gracias a su gran densidad de potencia y operación a temperaturas menores que otros tipos de celdas, fácil construcción y arranque rápido [21].

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo se detallará la información requerida y los procedimientos empleados para la ejecución del estudio del sistema de suministro de energía planteado como solución para el uso en cable-vías en bananeras. El problema se centrará en los estudios y estado actual de una bananera determinada.

2.1. Levantamiento de información.

Previo a establecer una solución adecuada al problema planteado, es importante conocer las características y demandas del sistema actualmente empleado. Como se detalló en el primer capítulo, el cable vía se suele mover mediante la fuerza de arrastre provista por personal humano o animal y mediante el uso de motores de combustión que pretenden incrementar el nivel de recolección. Estos mecanismos deben cumplir los requerimientos del sistema como una carga mínima de arrastre, velocidad de traslación, tiempo de trabajo y llegar a tener una relación favorable entre trabajo realizado y energía consumida.

Por medio de datos recolectados en una bananera en el sector de Valencia provincia de Los Ríos, provistos por el Centro de Investigación Desarrollo e Innovación de Sistemas, CIDIS, se conoce ciertos parámetros de referencia del trabajo que se realiza y son presentados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.2 Tabla de parámetros de referencia del sistema cable vía.

| Parámetros | Magnitud | Unidad |
|---|----------|--------|
| Pendiente | 5,00 | [°] |
| Número de racimas de banano a transportar | 55.00 | -- |
| Masa promedio de racimas de banano(raquis) | 40.00 | [kg] |
| Masa de garrucha para racimas de banano | 5.00 | [kg] |
| Masa del vehículo aprox. | 210.00 | [kg] |

| | | |
|--------------------------------|-------|-------|
| Distancia del recorrido | 2.40 | [km] |
| Diámetro de Poleas | 0.08 | [m] |
| Velocidad con carga | 0.583 | [m/s] |
| Velocidad sin carga | 1.333 | [m/s] |

2.2. Presentación y selección de propuestas de solución.

Entre los métodos de solución se encuentran la reducción de las concentraciones de azufre en los combustibles mediante técnicas de refinación. Por otra parte, se propone cambiar el motor de combustión interna por uno de corriente continua y optar por métodos de alimentación de energía no contaminantes; como lo son baterías, paneles solares y celdas de combustible. En base a lo mencionado se analiza que, los paneles solares pueden llegar a ocupar un gran espacio y las baterías son equipos contaminantes, mientras que la refinación del combustible solo contribuye a reducir el impacto ambiental debido a emisiones de gases durante la combustión, sin proveer una solución efectiva a largo plazo.

Sin embargo, la tecnología de celdas de combustible ha tenido grandes avances en los últimos años, demostrando tener grandes eficiencias en aplicaciones de movilidad [21]; ciertamente las celdas tipo PEM, han sido ampliamente utilizadas en las aplicaciones automotrices como los vehículos híbridos. Por esta razón se plantea el uso de este tipo de celdas y verificar su eficiencia con el motor DC del vehículo cable vía, como una alternativa de alimentación para el sistema de traslado de racimos en las bananeras.

2.3. Calculo de Requerimientos para los equipos

En primera instancia se procede con la determinación de las masas de las principales partes del sistema del vehículo de cable vía. En primer lugar, se establece la masa de la carga que observa el vehículo, correspondiente a los racimos y los mecanismos usados para su acople al sistema (M_c) y luego se considera la masa del vehículo y su contenido (M_v).

$$M_c = (\text{Masa de racimas} + \text{Masa de garruchas}) * \text{Numero de racimas} \quad (2.1)$$

$$M_r = (40 + 5) * 55 \text{ [kg]}$$

$$M_r = 2475 \text{ [kg]}$$

$$M_v = (\text{Masa estructura} + \text{Masa de contenido}) \quad (2.2)$$

$$M_v = 210 \text{ [kg]}$$

Posteriormente se realiza el cálculo de la fuerza necesaria para el arrastre de esta carga considerando que existe una pendiente en el arrastre, una fuerza de fricción entre el vehículo y el cable, y otra fuerza de fricción entre el cable y el grupo conformado por las garruchas de los racimos o fricción de la carga, como se presenta en la Figura 2.1

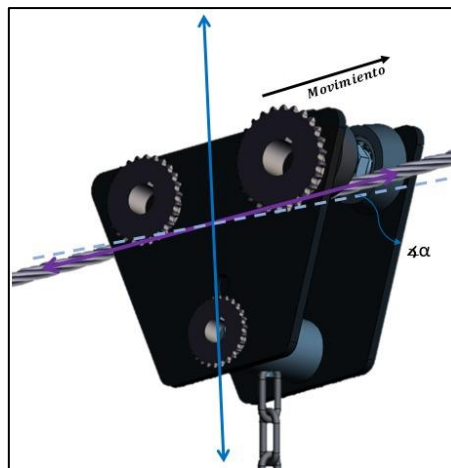
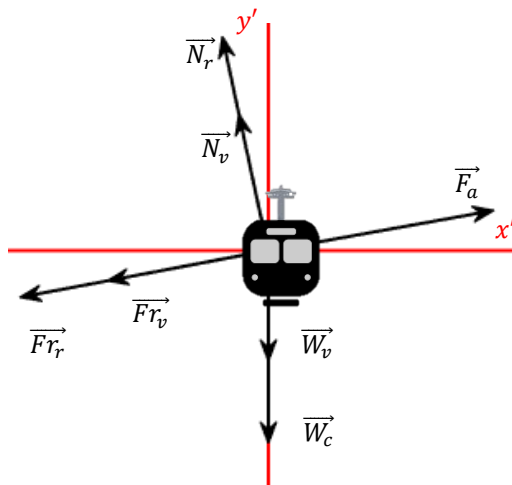


Figura 2.1 Carretón empleado en el vehículo cable vía.



- \vec{W}_c = Peso de la carga
- \vec{W}_v = Peso del vehículo
- \vec{F}_{r_c} = Fricción de la carga
- \vec{F}_{r_v} = Fricción del vehículo
- \vec{N}_v = Normal del vehículo
- \vec{N}_c = Normal de la carga
- \vec{F}_a = Fuerza de arrastre

Figura 2.2 Diagrama de fuerzas del sistema cable vía.

Se considera un coeficiente de rozamiento estático entre el cable vía y las garruchas de acero de 0.07, mientras que el coeficiente de rozamiento cinético corresponde 0.059. De igual forma para el coeficiente de rozamiento estático entre el cable vía y las poleas, con lo cual es posible establecer la tensión ejercida por parte del peso entre garruchas y las racimas transportadas. Cabe mencionar que estos valores corresponden cuando las poleas se encuentran debidamente lubricadas [13].

- **Calculo de fuerzas de fricción:**

En las ecuaciones 2.3 y 2.4, se detalla la obtención del cálculo de las fuerzas de fricción para la carga completa y del vehículo respectivamente por acción del rozamiento con el cable vía.

$$\overrightarrow{Fr_c} = (Masa\ total\ racimas+garruchas) * g * Ks1 * \cos(\alpha) \quad (2.3)$$

$$\overrightarrow{Fr_c} = 2475Kg * 9.8m/s^2 * 0.07 * \cos(1^\circ)$$

$$\overrightarrow{Fr_c} = 1697.6 [N]$$

$$\overrightarrow{Fr_v} = (Masa_{vehiculo}) * g * Ks2 * \cos(\alpha) \quad (2.4)$$

$$\overrightarrow{Fr_v} = 210Kg * 9.8m/s^2 * 0.07 * \cos(1^\circ)$$

$$\overrightarrow{Fr_v} = 144.03 [N]$$

- **Equilibrio de fuerzas del sistema:**

En la ecuación 2.5 se muestra el balance de fuerzas en el eje de movimiento del vehículo cable vía, obteniendo la fuerza necesaria para su movimiento venciendo las fuerzas de fricción y peso.

$$\overrightarrow{F_a} = \overrightarrow{Fr_{vehiculo}} + \overrightarrow{Fr_{carga}} + \overrightarrow{Wx_{carga}} + \overrightarrow{Wx_{vehiculo}} \quad (2.5)$$

$$\overrightarrow{F_a} = \overrightarrow{Fr_{vehiculo}} + \overrightarrow{Fr_{carga}} + (Masa\ total\ racimas+garruchas + Masa_{vehiculo}) * g * \sin(\alpha)$$

$$\overrightarrow{F_a} = 144.03N + 1697.6N + (2475Kg + 210Kg) * 9.8m/s^2 * \sin(1^\circ)$$

$$\overrightarrow{F_a} = 2300.9 [N]$$

- **Fuerza por garrucha**

La fuerza total debe dividirse para cada uno de los soportes del vehículo, tal como se realizó en la ecuación 2.6, en este caso dos, de forma que el esfuerzo se encuentra dividido de forma equitativa para cada motor en los soportes.

$$\vec{F}_G = \frac{\vec{F}_{Total}}{2} \quad (2.6)$$

$$\vec{F}_G = \frac{2300.85N}{2}$$

$$\vec{F}_G = 1150.425 [N]$$

- **Calculo de torque necesario**

Conociendo la fuerza necesaria de movimiento, se realizó el cálculo del torque necesario para el motor, como se expresa en la ecuación 2.7 y 2.8. Se consideró el radio de la polea principal en la garrucha para luego mediante relación de radios determinar el torque final en el eje del motor-reductor.

$$T_G = \vec{F}_G * R_{Polea} ; \text{considerando a } R_{Polea} \text{ como el radio de la polea} \quad (2.7)$$

$$T_{Garruchas} = 1150.425N * 0.08m/2$$

$$T_{Garruchas} = 46.017Nm$$

$$T_{Motor} = T_{Garruchas} \left(\frac{R_{Motor}}{R_{Polea}} \right) \quad (2.8)$$

$$T_{Motor} = 46.017 [N \cdot m] * \left(\frac{0.02}{0.04} \right)$$

$$T_{Motor} = 23 [N \cdot m]$$

2.4. Selección de equipos.

Una vez determinado el torque necesario del motor, se logró obtener la potencia eléctrica que debía tener la celda de combustible para alimentar el sistema. En base a esto se procedió con la búsqueda de equipos reales que cumplan con los requerimientos establecidos.

- Batería
- Controlador
- Celda de combustible
- Tanque de Hidrogeno
- Componentes auxiliares
- Motor
- Reductor
- Panel de control

En la Figura 2.3 se representa un diagrama de flujo del proceso que interviene en el suministro de energía para el vehículo de cable vía. Inicialmente comprende la etapa del ingreso de hidrogeno y oxígeno a la celda de combustible; cabe mencionar que adicionalmente se incluye una batería que permitirá el arranque inicial del sistema. La pila de combustible proporciona la energía requerida para el variador de los motores DC. Por otra parte, el variador adquiere una señal del sistema de control y mando, los cuales establecen las condiciones de velocidad y dirección del vehículo del cable vía; tal sistema requiere a su vez de la tensión proporcionada por la batería.

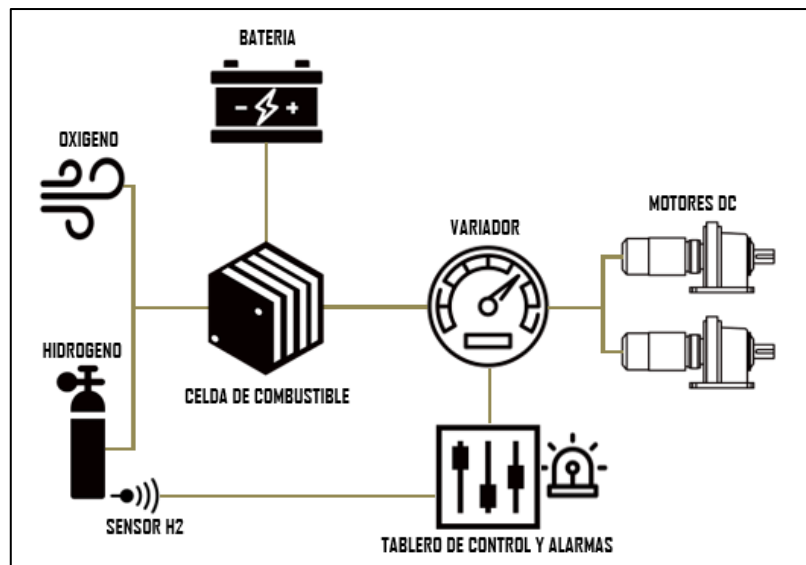


Figura 2.3 Diagrama de Flujo de energía del sistema.

Dado que el torque que se requiere es superior a la mayoría de los que se encuentran disponibles en el mercado, de esta forma se ha optado por emplear un reductor que permita incrementar el nivel del torque de salida, por medio de un sistema de engranajes.

Seguidamente se ha seleccionado el reductor que se muestra en la Figura 2.4, el cual posee un factor de reducción 5:1.

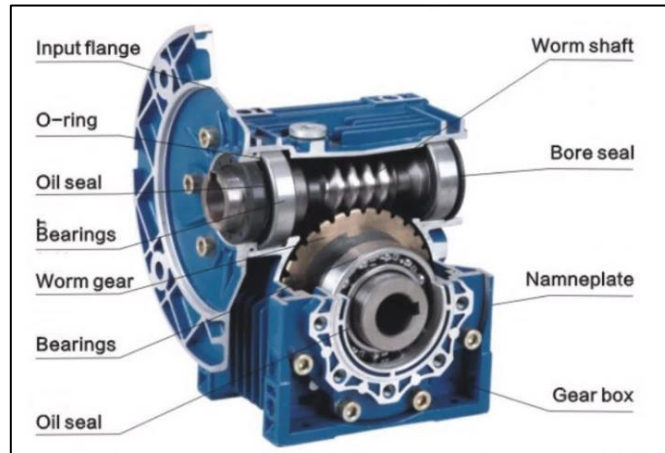


Figura 2.4 Reductor a emplear con el motor.

Por otra parte, una vez definido el factor de reducción es necesario redefinir las nuevas características que debe tener el motor para satisfacer las necesidades del proyecto. Al analizar el nuevo sistema, se considerará un nuevo torque de al menos 4.6 N·m y con una velocidad que cumpla con las referencias establecidas como requerimientos. Con lo cual se ha optado por trabajar con motores DC sin escobillas, los cuales son usados en gran medida en el sector agrícola. En la Tabla 2.2 se presenta el motor que se tiene como propuesta, con los datos de placa del mismo.

Tabla 2.3 Características del motor seleccionado para el sistema cable vía.

| Motor 110BS0408-15 | | |
|---------------------------|-----------------|---------------|
| Características | Magnitud | Unidad |
| Potencia Nominal | 800.00 | [W] |
| Voltaje de Alimentación | 48.00 | [V] |
| Corriente de entrada | 16.67 | [A] |
| Torque | 5 | [N·m] |
| RPM | 1500 | [RPM] |
| Peso | 7.8 | [Kg] |

| | | |
|------------------|-----|----------------------|
| Rotor de Inercia | 281 | [Kg m ²] |
|------------------|-----|----------------------|



Figura 2.5 Motor DC de imán permanente y alto par.

En base a esta selección se encontró la recomendación del controlador ilustrado en la Figura 2.6, el cual nos brinda la ventaja de permitir el control de dos motores DC de forma simultánea, ideal para la aplicación del sistema a utilizar. Este permitirá tener un control sobre el sentido de giro de los mismos además de brindarnos la capacidad de detectar alarmar por fallas y la velocidad de estos.



Figura 2.6 Controlador para motor DC, de dos canales.

Conjuntamente se realizó el diseño de un circuito de control de la Figura 2.7 para el manejo del controlador anterior, con el fin de facilitar el manejo de todas sus características y parámetros. Entre las principales funciones de este circuito consiste en establecer una interfaz de comunicación entre el controlador y los diferentes dispositivos

actuadores e indicadores como lo son las botoneras e indicadores led. Entre los parámetros que se controlaran se encuentran el encendido y apagado, reversa, freno, acelerador y 6 alarmas, las mismas que representan eventos de sobrecorriente, sobretensión y sobrecalentamiento del par de motores. Es importante resaltar que también cuenta con la interfaz CAN y RS232 como medida de programación.

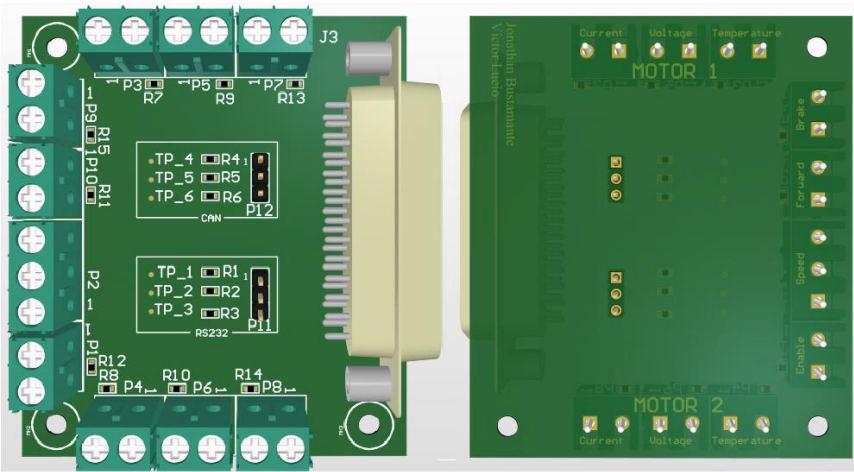


Figura 2.7 Placa de manejo para el controlador.

Dado que se emplearán 2 motores de 800W para el sistema, los cuales se encuentran alimentados por un controlador cuya eficiencia es del 96% y considerando los picos de corriente durante el arranque del vehículo; se ha optado por elegir una celda de combustible capaz que abastecer una potencia de 3000W. La celda de combustible que se tomará como fuente de alimentación será la siguiente, de igual forma se presenta la Tabla 2.4 con los valores de funcionamiento relevantes.



Figura 2.8 Celda de combustible seleccionada.

Tabla 2.5 Datos nominales de la celda de combustible.

| Pila de combustible 2000W-24V VET | | |
|--|-----------------|---------------|
| Características | Magnitud | Unidad |
| Potencia Nominal | 3000 | [W] |
| Voltaje de salida | 48 | [V] |
| Eficiencia | 40 | [%] |
| Consumo | 39 | [L/min] |
| Temperatura de Operación | 35 | [°C] |
| Dimensiones | 418 x 350 x 183 | [mm] |
| Pureza de hidrogeno | 99.9 | [%] |

Finalmente se requiere de un batería que servirá para alimentar el sistema de electroválvulas de la celda combustible, que supla una potencia de aproximadamente 60 W a un nivel de tensión de 12V.

En la sección de Anexos se encuentran detalladas las características y parámetros eléctricos del equipo que conformaran la ficha técnica, cabe mencionar que los datos han sido definidos enfocados a una aplicación bananera de tamaño medio. De esta forma se permite efectuar una validación del equipo, en términos de las capacidades de torque y velocidad del vehículo de cable vía.

2.5. Fuente de Combustible

En busca de alternativas amigables con el ambiente, se seleccionó la celda de combustible como fuente de energía eléctrica, la cual requiere de hidrogeno para su funcionamiento. En la presente aplicación, se requiere del suministro del hidrogeno (H₂) a una presión de 0.45 a 0.55 [bar], para esto se seleccionó tanques de almacenamiento con válvulas de presión regulables.



Figura 2.9 Cilindro de hidrogeno (H_2)

2.5.1. Consideraciones de seguridad

El gas hidrogeno, es un compuesto altamente inflamable, por lo que requiere de un manejo cuidadoso cuando es usado bajo presión. Este no debe ser usado sin ningún tipo de regulación y las válvulas deben ser abiertas de forma cuidadosa. Al tener una gran afinidad con el oxígeno, se debe cuidar de posibles fugas o exposición a este que no sean dentro de la celda.

Bajo este contexto, la bombona de H_2 debe ser ubicado en lugares apartados a sitios de alta temperatura o fuentes de ignición, con el fin evitar posibles explosiones. Lo que implica que, no se debe almacenar en lugares de exposición directa al sol. Por esta razón se plantea una ubicación segura y cubierta con el fin de evitar estos problemas.

Para una mayor seguridad, se implementó, además, un sensor para la detección de fugas de hidrógeno ilustrado en la Figura 2.10 con el fin de evitar algún accidente grave. Este se conectó al controlador de los motores con el fin de obtener la alimentación eléctrica que requiere. Este se encuentra ubicado cerca de tanque con el fin de realizar una medición correcta y dentro de tiempos cortos en caso de fuga mediante el uso de un sensor MQ-7. La placa cuenta con un manejo de la señal enviando una alerta digital en base a comparaciones previamente establecidas en su configuración.

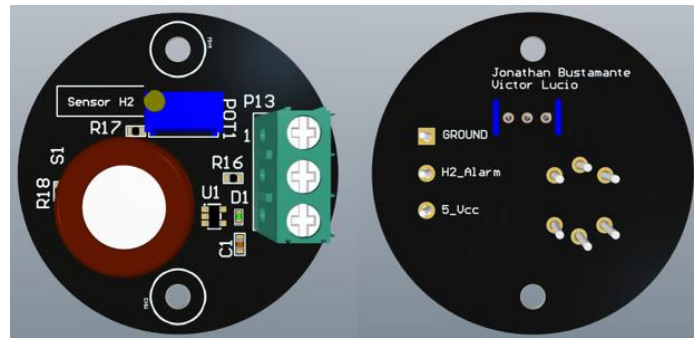


Figura 2.10 Tarjeta de detección de hidrógeno.

2.6. Descripción del vehículo

La Figura 2.11 muestra el vehículo el cual se encuentra constituido de un metal resistente y ligero, que le permita soportar grandes cargas. El sistema cuenta con un panel de control que contiene luces indicadoras, interruptores y palanca que permitirán el control del motor. Por otra parte, en el sector inferior se encuentra el acelerador que permite regular el nivel de velocidad del vehículo. Cabe mencionar que el vehículo posee un control de encendido por medio de una llave, le cual le brinda seguridad de forma que solo el personal autorizado puede acceder a manipular el sistema.

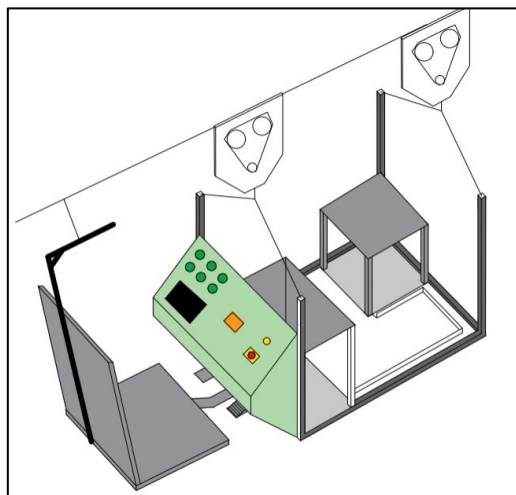


Figura 2.11 Diseño del vehículo cable vía.

En el apartado de Anexos se encuentra establecida la documentación relacionada al montaje y distribución de los componentes que forman parte del sistema del vehículo de cable vía. Lo cual sirve como guía para analizar y efectuar la distribución eléctrica y mecánica de los elementos del sistema.

2.6.1. Panel de Control

Se implementó un panel al vehículo, con el fin de facilitar su manejo y obtener una vista apropiada de los diferentes elementos indicadores y de control que se necesitan para el funcionamiento de los motores, como se muestra en la Figura 2.12. En este se implementó indicadores led de las alarmas que el controlador dual permite asignar; además de los controles de encendido, avance de los motores. Cabe mencionar que se colocó una pantalla para la presentación de los parámetros de la celda de combustible.



Figura 2.12 Diseño del panel para el vehículo.

Finalmente, una guía de usuario ha sido elaborada para facilitar el estudio del equipo, esta cuenta con instrucciones para el encendido y manejo del equipo; de igual forma presenta los buses de programación del controlador, medios de mantenimiento, estados de la celda de combustible del sistema y elementos de mando y alarmas del tablero de control.

2.7. Implementación del sistema mediante software de Simulación.

Matlab es una herramienta computacional matemática, donde mediante su plataforma Simulink, permite la simulación de diferentes sistemas gracias a su amplia gama de librerías. En este caso particular se empleará de manera especial la librería Simscape con sus modelos de motor y celdas de combustible.

El bloque de celda combustible que se dispone en Simscape permite observar el comportamiento de la misma basado en modelos genéricos parametrizados y que tienen como fuente de alimentación el hidrogeno y aire; como es el caso de la celda PEM que se escogió como solución para la problemática planteada.

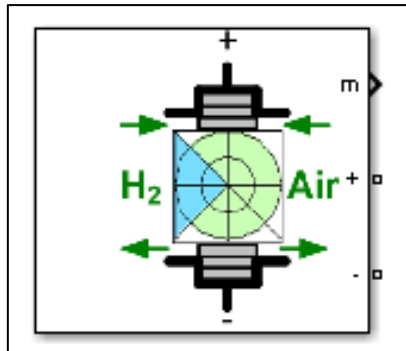


Figura 2.13 Bloque de celda de combustible en Simulink.

El modelo empleado en este bloque se detalla en la figura 2.14, cuyos principales parámetros consisten en el volumen y presión de entrada tanto del hidrogeno como del oxígeno, entre otros. Sin embargo, para el desarrollo del proyecto no se analizó a profundidad el detalle del modelo más únicamente la parametrización del mismo.

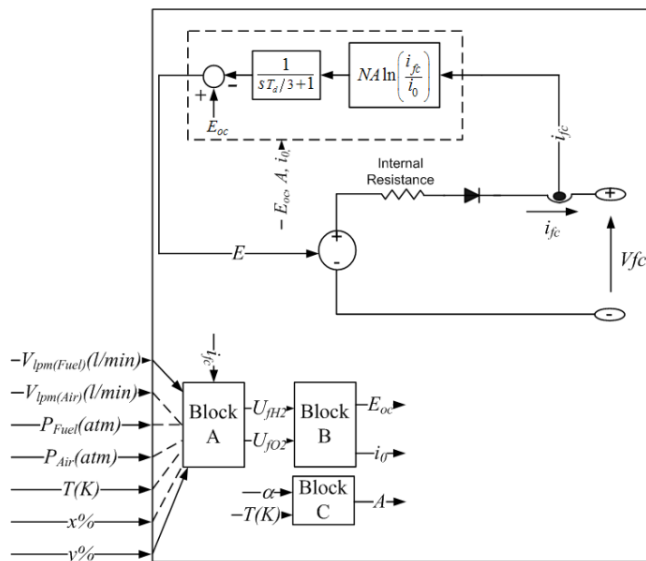


Figura 2.14 Modelo interno de la celda de combustible.

En el caso del motor, se determinó un motor de corriente continua y de imanes permanentes. Para esto se empleó el bloque DC Machine el cual permite simular el comportamiento de un motor en base a la parametrización de ciertas características.

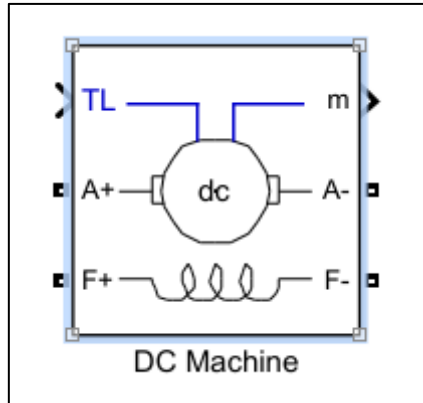


Figura 2.15 Bloque de motor DC en Simulink.

2.7.1. Parametrización de los elementos

En primer lugar, se realizó la parametrización del bloque correspondiente a la celda de combustible, para lo cual se utilizó los datos proporcionados por el fabricante de la misma, la cual se seleccionó en los puntos anteriores. Los parámetros a establecer fueron los siguientes.

| Parameters | Signal variation | Fuel Cell Dynamics |
|---|-------------------|----------------------|
| Preset model: | No (User-Defined) | |
| Model detail Level: | Detailed | |
| Voltage at 0A and 1A [V_0(V), V_1(V)] | [65 63] | |
| Nominal operating point [Inom(A), Vnom(V)] | [70 43.2] | |
| Maximum operating point [Iend(A), Vend(V)] | [78 36] | |
| Number of cells | 72 | |
| Nominal stack efficiency (%) | 40 | |
| Operating temperature (Celsius) | 65 | |
| Nominal Air flow rate (lpm) | 800 | |
| Nominal supply pressure [Fuel (bar), Air (bar)] | [0.55 1] | |
| Nominal composition (%) [H2 O2 H2O(Air)] | [99.95 21 1] | |
| Plot V_I characteristic | | View Cell parameters |

Figura 2.16 Cuadro de parametrización de la celda de combustible con los datos obtenidos.

Posteriormente se realiza la parametrización del motor, siendo en este caso de imanes permanentes y datos provistos por el fabricante del mismo. De esta forma se obtendrá un comportamiento aproximado al real que permitirá obtener datos más fiables del comportamiento de la celda de combustible previamente parametrizada.

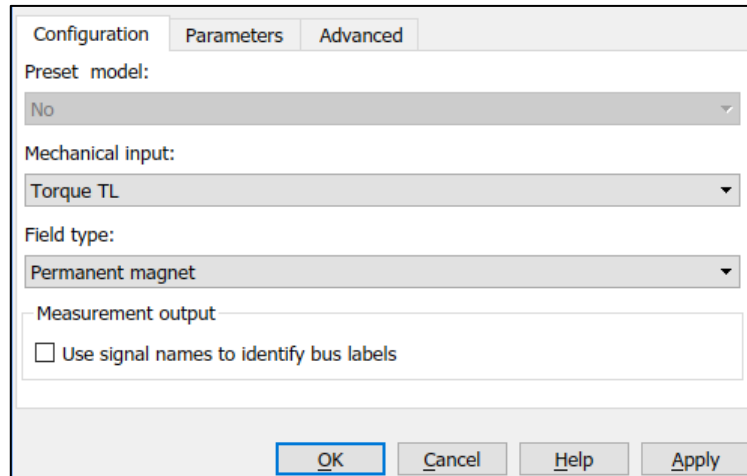


Figura 2.17 Selección de motor de imanes permanentes.

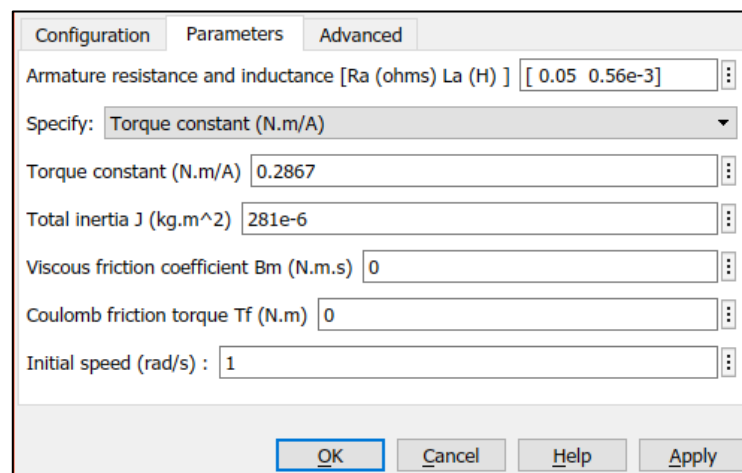


Figura 2.18 Cuadro de parámetros constructivos del motor seleccionado.

2.7.2. Topología del sistema

En la siguiente imagen se puede observar el diagrama del sistema creado en Simulink con el fin de simular el comportamiento del mecanismo de alimentación eléctrica para el vehículo de cable vía. En este se muestran los tres principales grupos de bloques que lo conforman, el primero correspondiente al sistema de suministro de energía eléctrica, el segundo grupo contiene el circuito de control y finalmente los últimos bloques corresponden a los motores seleccionados.

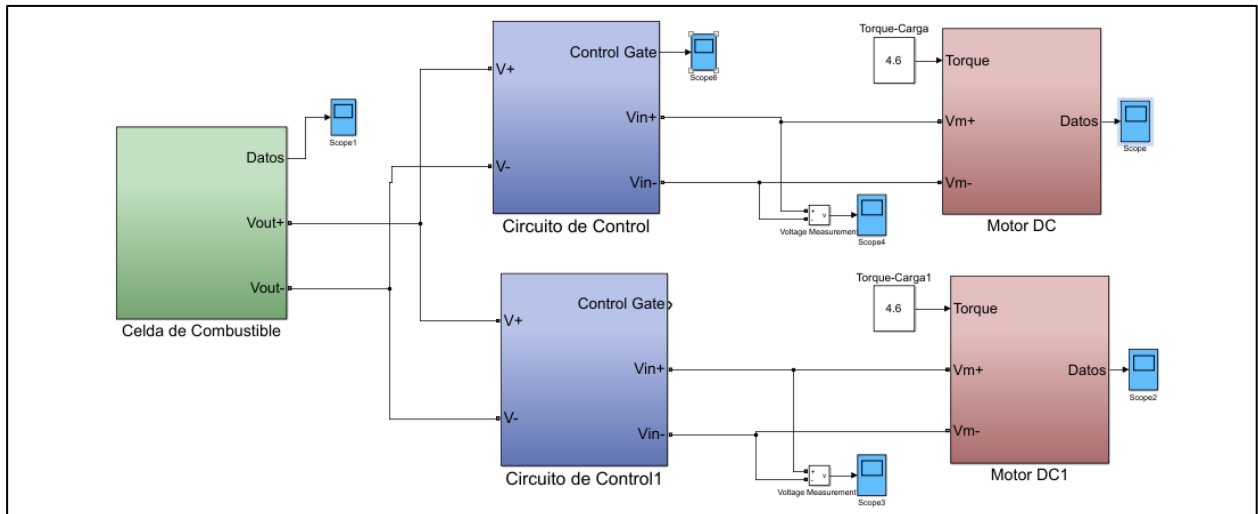


Figura 2.19 Diagrama de bloques del sistema creado en Simulink.

El primer bloque contiene el sistema de alimentación que corresponde a la celda de combustible, la cual proporciona la energía eléctrica al conjunto control-motor; además ésta entregó los datos necesarios para verificar los consumos del combustible, voltaje, corriente y demás parámetros para su estudio.

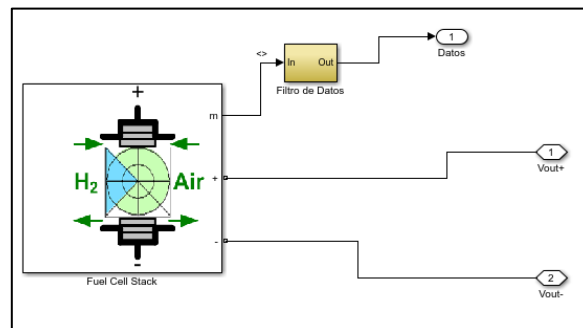


Figura 2.20 Celda de combustible con selección de datos a mostrar.

En el segundo par de bloques se encuentra la estructura empleada para el control del motor, la cual consiste en un convertidor buck-boost que permite variar el voltaje que llega al motor. Este se utiliza para simular el voltaje que llega al motor para su regulación de velocidad, más no representa de forma exacta el funcionamiento del controlador real que se sugirió. Este se utilizó con el fin de generar los perfiles de trabajo de los motores que permitieron tener referencia de la exigencia causada en la celda de combustible.

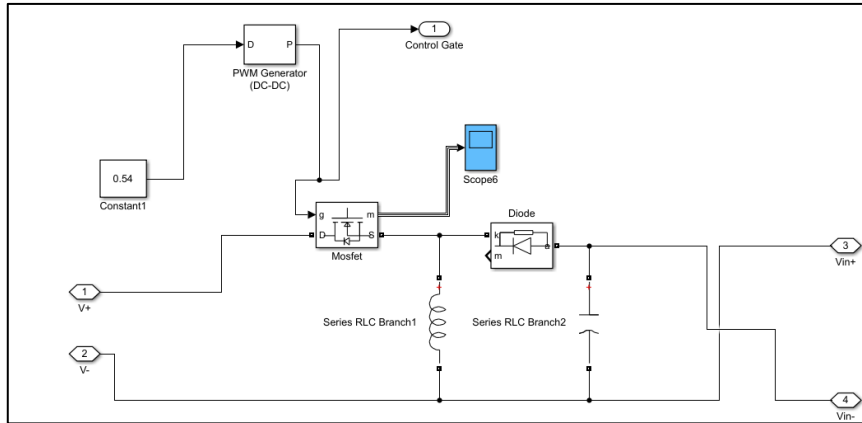


Figura 2.21 Circuito Buck-Boost DC para el control del motor.

En los últimos bloques se encuentran los motores DC de imanes permanentes que reciben su alimentación del controlador. Este recibe un torque de entrada y como salida se obtiene datos de velocidad, torque eléctrico y corriente de armadura del mismo.

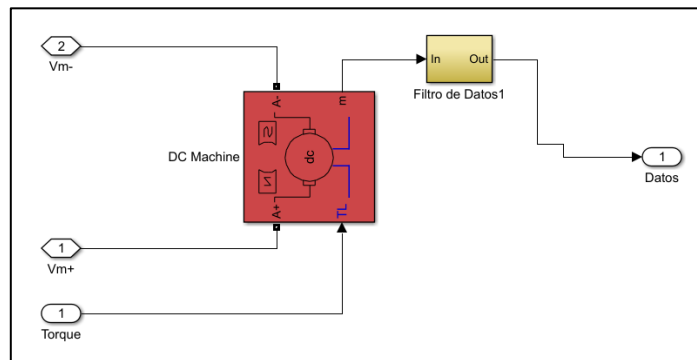


Figura 2.22 Motor de imanes permanentes con muestra de datos.

CAPITULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el siguiente capítulo se efectuará el análisis de resultados respectivos a partir de los diseños realizados en el capítulo anterior, con la finalidad de validar el sistema empleado y determinar la viabilidad del proyecto en términos del comportamiento obtenido. De igual forma se realizará el análisis de costos para la debida implementación del sistema.

3.1. Comportamiento del sistema

Una vez realizadas las simulaciones en la herramienta de Simulink, correspondiente al sistema de alimentación para un motor basado en celdas de combustible, se presentan los resultados obtenidos del mismo. Se ejecutaron varios ensayos para diferentes perfiles de esfuerzo, incluyendo dos diferentes inclinaciones.

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos para un perfil de trabajo regular, correspondiente a una pendiente del cable vía de 1 grado presentados en la Figura 3.1.

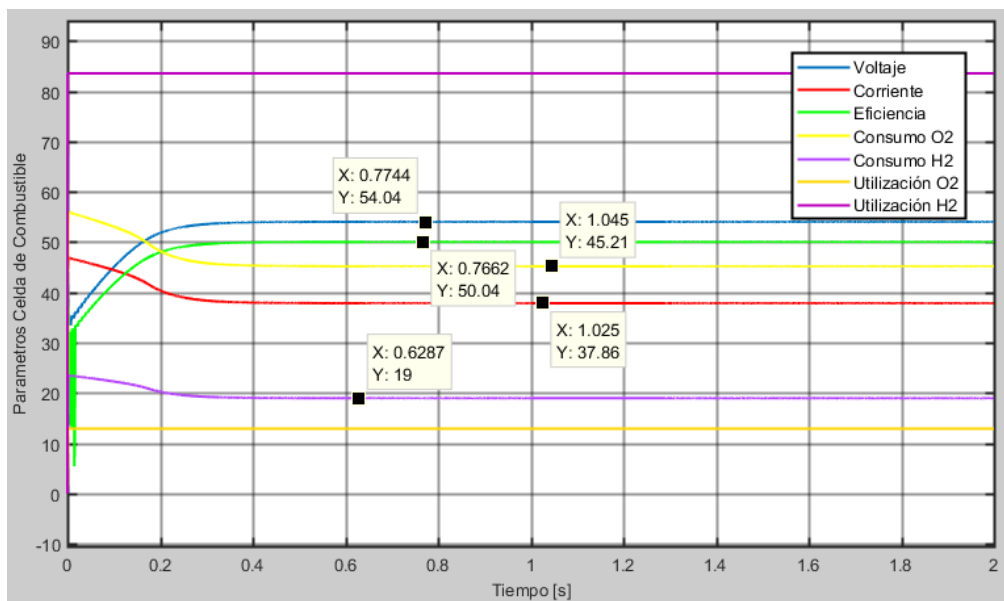


Figura 3.2 Parámetros de salida de la celda de combustible.

En la Figura 3.1 se observa el comportamiento de la celda de combustible, esperado en un régimen de trabajo normal. Los niveles de voltaje y corriente son cercanos a los valores nominales además que para el esfuerzo planteado se obtiene una eficiencia del 50 por ciento. El consumo de combustible se mantiene por debajo de los 19 lpm lo que permitirá establecer la cantidad de combustible necesaria para un recorrido completo del vehículo.

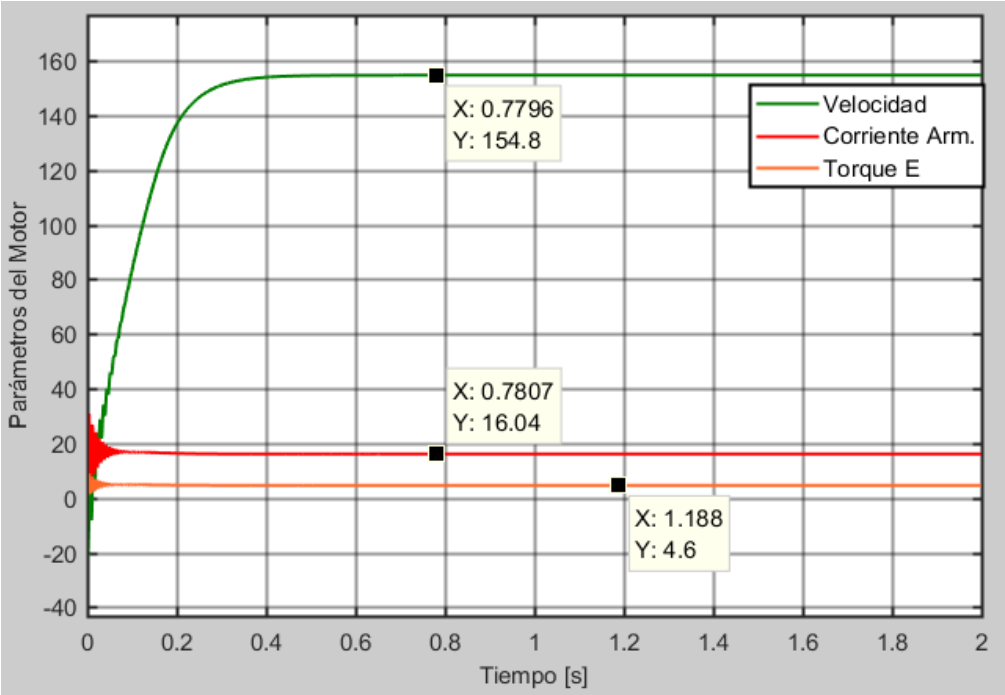


Figura 3.3 Parámetros de salida del motor.

El comportamiento de los motores se detalla en la Figura 3.2, donde ambos motores son de iguales características y sometidos al mismo esfuerzo por lo cual se usa una sola imagen para su descripción. El torque que se ejerce es valor muy próximo al nominal de acuerdo a los datos de placa. El motor consigue llegar al torque establecido exigiendo una corriente menor a la nominal, aproximadamente 16 A; sin embargo, se llega a una velocidad adecuada para el cumplimiento de los requerimientos establecidos en el traslado del producto.

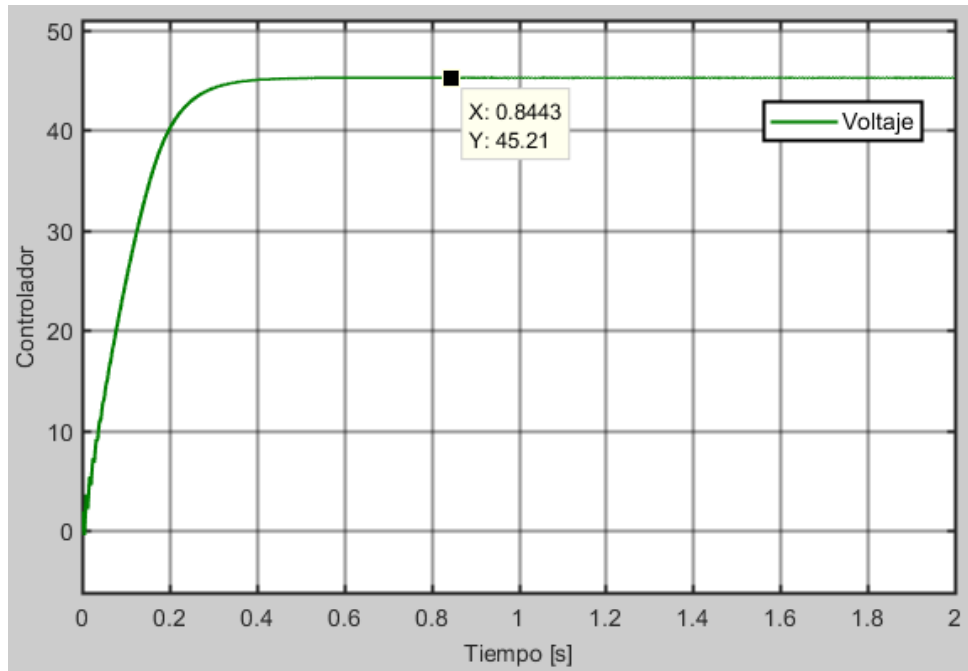


Figura 3.4 Parámetros de salida del controlador.

Para la Figura 3.3 se observa el valor de voltaje logrado por el controlador boost-buck, de forma que el motor llegue a valores de trabajo adecuados. El controlador se configuró con un ciclo de trabajo de 0.54, logrando un voltaje de salida de 45 V para cada uno de los motores del sistema.

Para el segundo perfil de trabajo se analizó el traslado y operación del vehículo sin racimos colocados, más que únicamente la estructura principal del vehículo y las garruchas, donde se consideró una carga de 0.84 [N·m] para los motores.

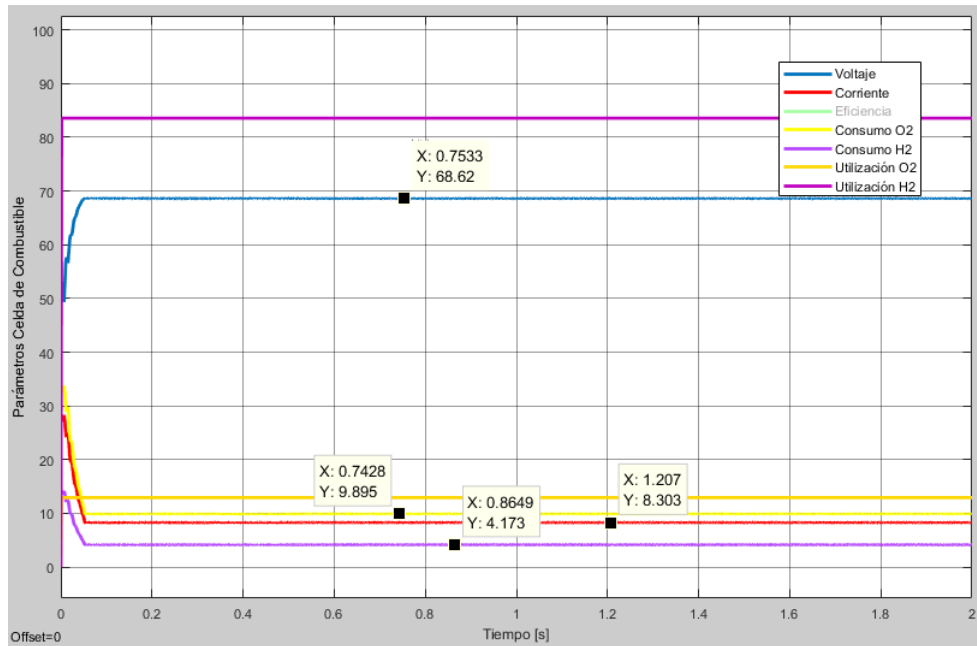


Figura 3.5 Parámetros de salida de la celda de combustible.

En este caso, en la Figura 3.4, se aprecia el comportamiento de la celda de combustible para un perfil de trabajo de esfuerzo menor, dado para un viaje sin carga en el vehículo. De esta forma, los consumos de hidrógeno y oxígeno son bajos sin superar los 2 lpm para el primero. El nivel de voltaje es superior debido al decrecimiento de la corriente que se exige en tales condiciones.

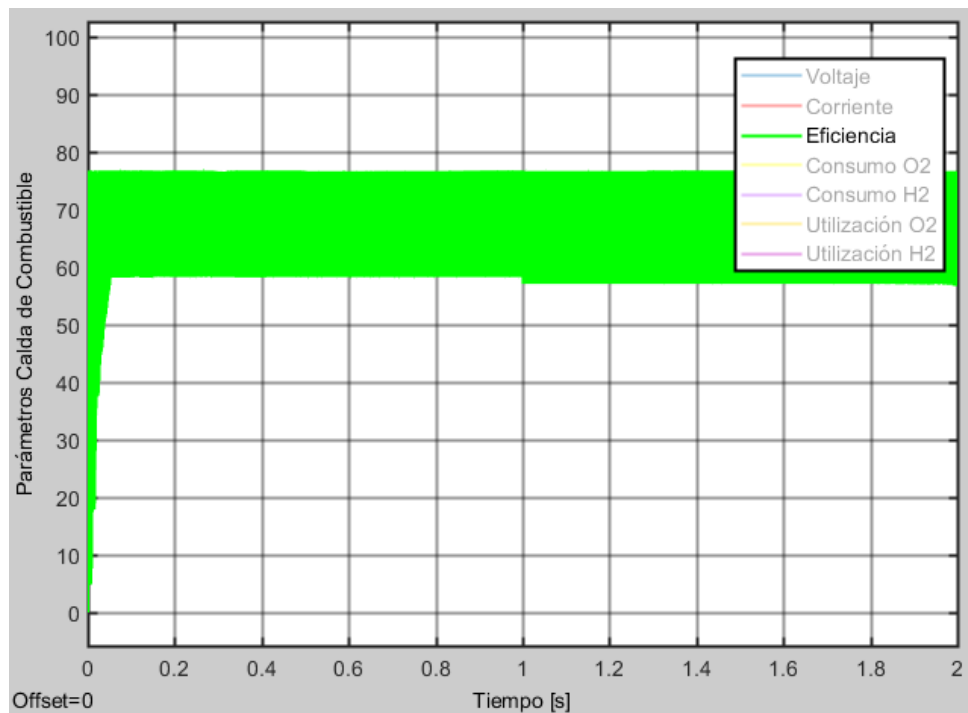


Figura 3.6 Eficiencia de la celda de combustible.

En este caso la eficiencia muestra valores alternantes cuyo promedio no se pudo obtener con la frecuencia del sistema, por esto se muestra en la Figura 3.5, su forma de onda en el tiempo; de lo cual se puede observar que con valores medidos en un rango entre 60% y 80 %, es mayor a cuando trabaja a un esfuerzo de mayor magnitud.

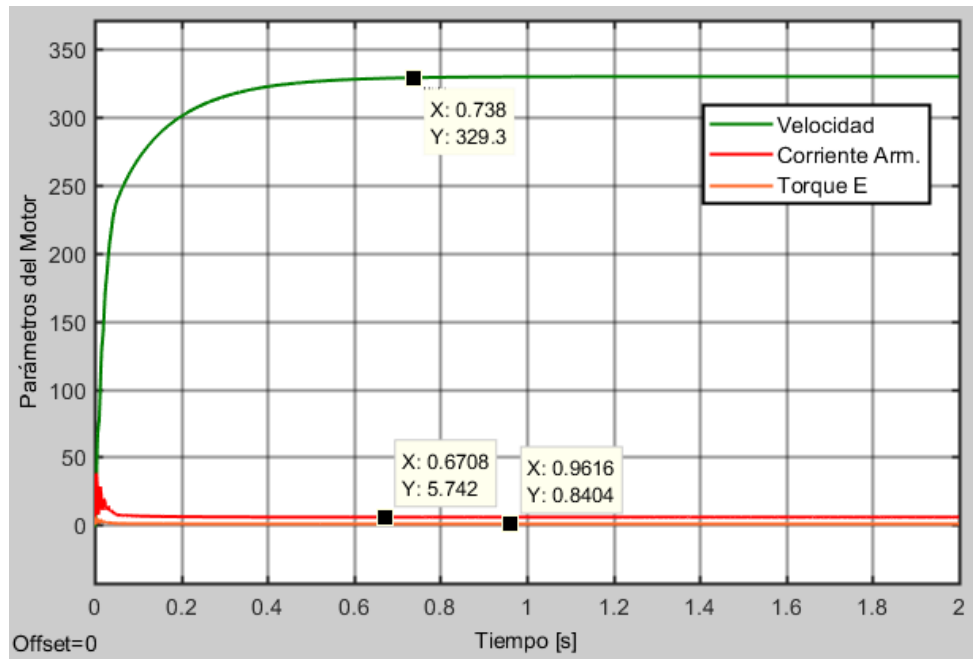


Figura 3.7 Parámetros de salida del motor.

En la Figura 3.6 se representa el comportamiento del motor cuando el vehículo se encuentra operando sin racimos, de esta forma se establece que la corriente que el motor consume es inferior debido a la reducción de la carga. Por otra parte, al reducir el nivel de la carga el vehículo puede desempeñar el trabajo con un incremento en su nivel de velocidad, lo cual facilitará la recolección al reducir el tiempo de viaje. De igual forma el consumo de hidrogeno será notoriamente inferior, lo cual reflejará un ahorro con respecto a este parámetro.

La ilustración presentada a continuación, Figura 3.7, se refiere al nivel de voltaje que el regulador inyecta en el motor, se puede inferir que no presenta grandes cambios debido a la reducción de la carga solo influyo en el nivel de la intensidad de corriente consumida por el motor.

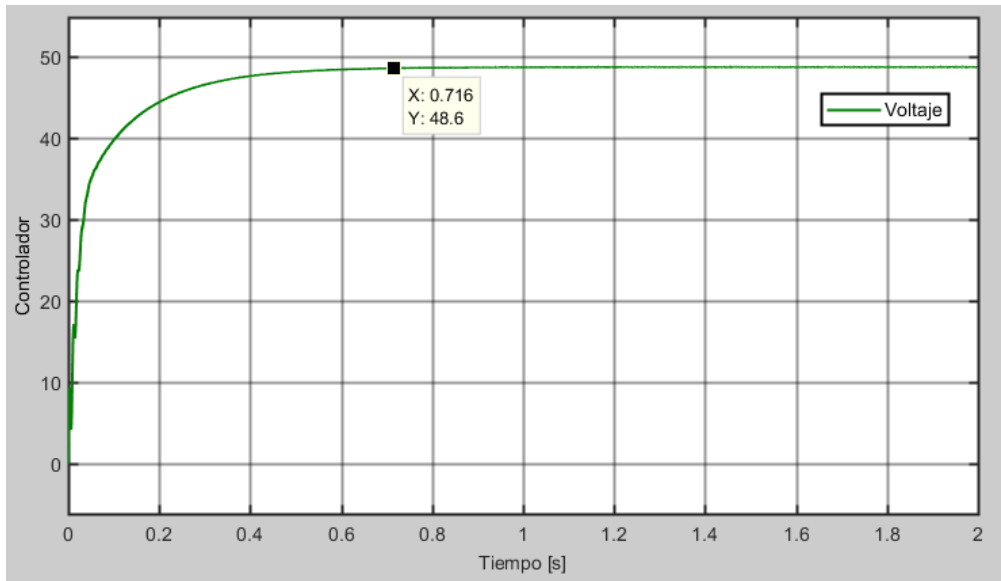


Figura 3.8 Parámetros de salida del controlador.

Finalmente se muestran los resultados que han sido obtenidos para un trabajo realizado por el sistema a un torque con mayor exigencia; considerando un grado más de inclinación para el cable vía, representando de esta forma un mayor esfuerzo para el sistema y los resultados del comportamiento del mismo se encuentran representados a continuación.

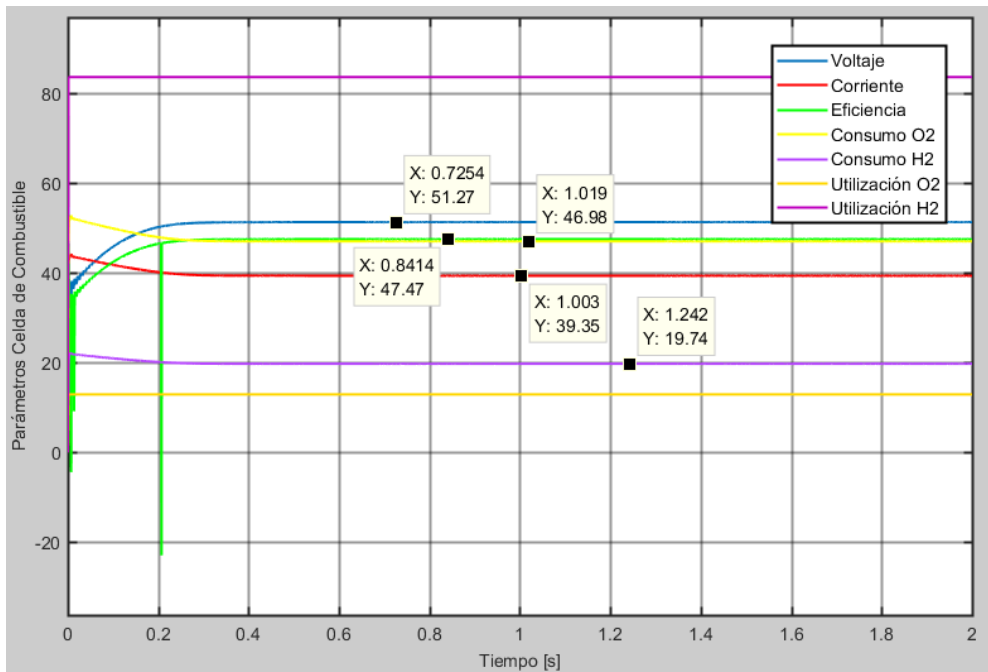


Figura 3.9 Parámetros de salida de la celda de combustible.

En la Figura 3.8 se ilustra el comportamiento de la celda de combustible al momento de exigir un mayor esfuerzo debido al incremento de la carga, bajo esas condiciones la celda requiere de un mayor consumo de hidrogeno en lpm; cabe considerar que esto también se debe a la reducción en la eficiencia de la celda. Por otra parte, el resto de parámetros se mantienen dentro de los rangos de operación común.

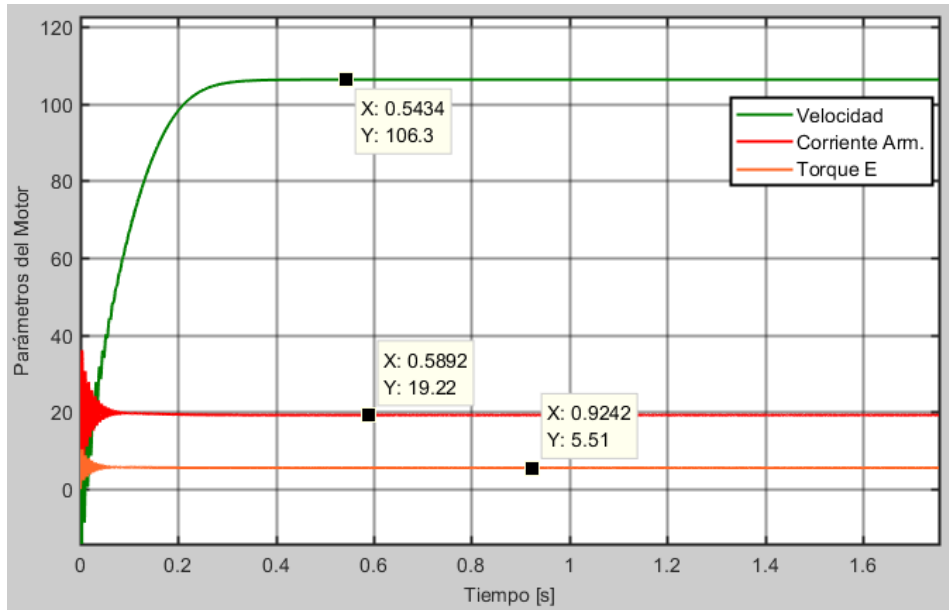


Figura 3.10 Parámetros de salida del motor.

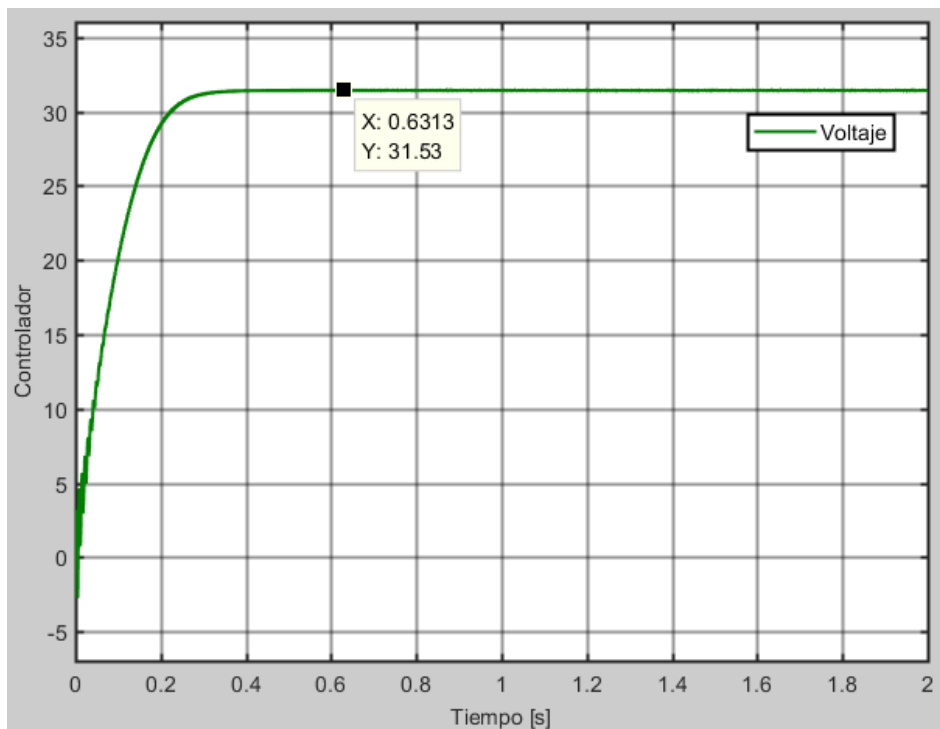


Figura 3.11 Parámetros de salida del controlador.

3.2. Análisis del consumo de energía del sistema

En la tabla 3.1 se observa los datos de placa del conjunto motor-reductor-controlador utilizado para la simulación del sistema y posterior obtención de resultados.

Tabla 3.1 Datos del sistema de movimiento empleado para el vehículo cable-vía.

| Motor | |
|----------------------|-------|
| Torque [N·m] | 4.6 |
| Revoluciones [rad/s] | 154.8 |
| Eficiencia [%] | 95,00 |
| Reductor | |
| Ratio | 1:5 |
| Variador | |
| Eficiencia [%] | 96,00 |

- **Operación con carga**

En base a los resultados de las gráficas expuestas anteriormente se realizó el cálculo de potencias y velocidades de salida; para su interpretación y obtención de conclusiones, siendo en este caso, como fue el comportamiento de los motores con carga nominal e ilustrados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.3 Determinación de la velocidad final del vehículo a carga nominal.

| Resultados | | |
|----------------------------|--------------|---------------|
| Parámetros | Valor | Unidad |
| Potencia <i>motor-mec.</i> | 712.08 | [W] |
| Potencia <i>motor ab.</i> | 741.75 | [W] |
| Torque <i>reductor</i> | 23.00 | [N·m] |
| Velocidad <i>reductor</i> | 30.96 | [rad/s] |
| Velocidad <i>polea</i> | 15.48 | [rad/s] |
| Velocidad lineal | 37.15 | [m/min] |

- **Operación sin carga**

De igual manera se presentan los resultados en la Tabla 3.3, los cuales corresponden a niveles de potencia y velocidad para los motores cuando estos operan sin carga, es decir un viaje sin racimas de banano, demostrando un incremento en la velocidad final del vehículo.

Tabla 3.3 Determinación de la velocidad final del vehículo sin carga.

| Resultados | | |
|----------------------------|--------------|---------------|
| Parámetros | Valor | Unidad |
| Potencia <i>motor-mec.</i> | 267.74 | [W] |
| Potencia <i>motor ab.</i> | 288.27 | [W] |
| Torque <i>reductor</i> | 4.20 | [N·m] |
| Velocidad <i>reductor</i> | 65.86 | [rad/s] |
| Velocidad <i>polea</i> | 32.93 | [rad/s] |
| Velocidad lineal | 79.20 | [m/min] |

El recorrido que se efectúa para recolección de las racimas de banano comprende una distancia de 2400 metros. Por otra parte, en base a los cálculos realizados en el punto anterior, se determinó el tiempo que toma realizar un viaje completo del vehículo considerando una etapa sin y con carga, incluyendo la energía requerida.

Tabla 3.4 Determinación del consumo de energía del vehículo.

| Viaje del Vehículo | | |
|---------------------------|--------------|---------------|
| Parámetros | Valor | Unidad |
| Tiempo <i>sin carga.</i> | 30.30 | [min] |
| Tiempo <i>con carga.</i> | 64.60 | [min] |
| Tiempo <i>total.</i> | 94.90 | [min] |
| Energía <i>ida</i> | 145.58 | [Wh] |
| Energía <i>regreso</i> | 798.61 | [Wh] |
| Energía <i>consumida</i> | 944.19 | [Wh] |

3.3. Análisis de consumo de combustible

De los resultados obtenidos en las simulaciones presentadas anteriormente se obtuvieron los consumos de combustible que requeriría el sistema de movilización de los racimos en casos de llevar el total de su carga o únicamente el vehículo. Los consumos se presentan en la Tabla 3.5, representando el total de hidrogeno utilizado en un viaje según el perfil especificado; en este caso primero un viaje sin carga, luego un viaje con carga y por último el consumo total de realizar estos viajes. Para lo cual, se consideró el tiempo que toma cada viaje.

Tabla 3.5 Determinación del consumo de energía del vehículo.

| Consumos en viajes | | |
|---------------------------|--------------|---------------|
| Parámetros | Valor | Unidad |
| Consumo <i>sin carga.</i> | 0.125 | [KI] |
| Consumo <i>con carga.</i> | 1.227 | [KI] |
| Consumo <i>total.</i> | 1.352 | [KI] |

Mediante estos resultados se consideró el tamaño recomendado para la bombona de combustible a utilizar, considerando el peso y tamaño de la misma. Con esto se determinó que se requiere de al menos 3 m³ para realizar mínimo dos viajes.

Considerando el uso de hidrogeno de venta al por mayor, dado que existe un consumo de hidrogeno significativo, se determinó que representa las mejores opciones para el suministro del vehículo cable vía. En donde el coste del hidrogeno está cerca de los 5 dólares el metro cubico, donde de esta forma, la ejecución de dos viajes tendría el coste de 15 dólares; siendo un precio asequible para el dueño de bananeras y su producción. Cabe recalcar que la compra regular no resulta de ninguna forma beneficiosa para su uso.

3.4. Análisis de comportamiento general

En la ilustración siguiente se detalla cómo se desempeñó el sistema en base a los resultados y análisis realizados anteriormente.

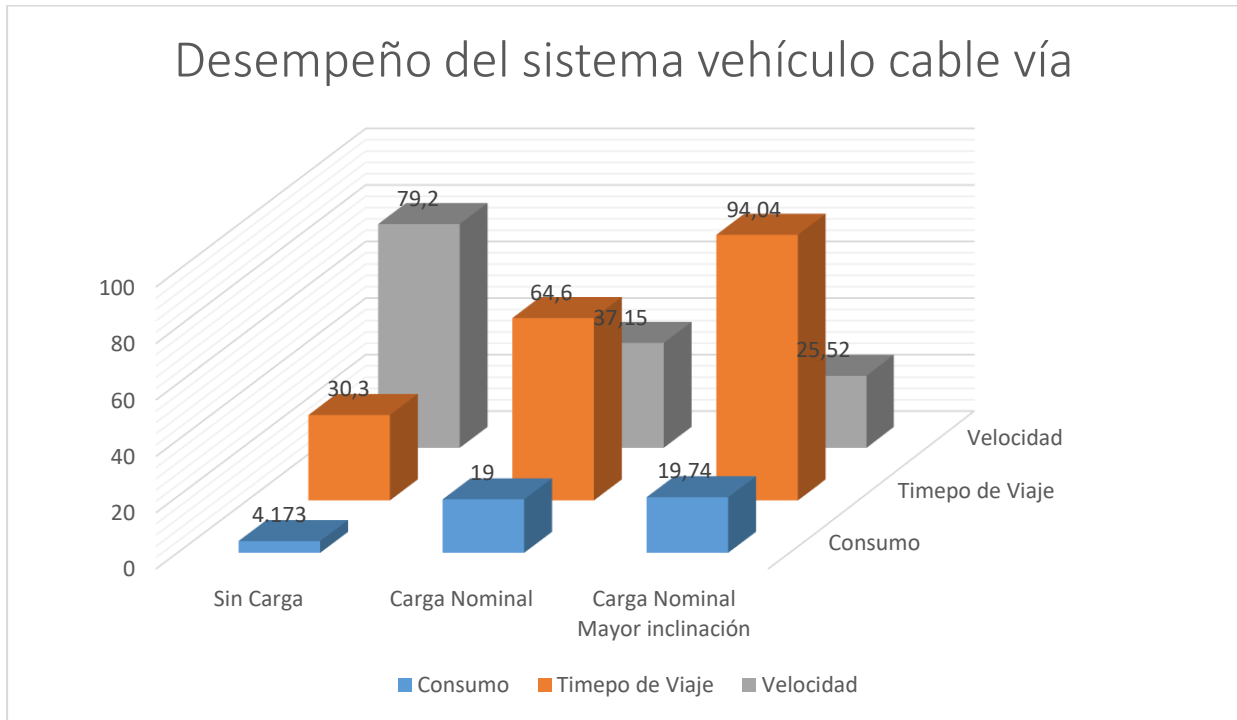


Figura 3.12 Rendimiento del sistema basado en Fuel Cell.

En rasgos generales se observó que la eficiencia de la celda mejora a medida que se acerca a valores nominales de la misma; sin embargo, existe un mayor consumo de hidrogeno que cuando opera a cargas de menor exigencia.

El controlador permitió establecer la velocidad del vehículo a los estándares establecidos como referencia, cuidando de que el consumo generado se mantenga niveles de magnitudes no exageradas.

3.5. Análisis de implementación y costos

El principal propósito del proyecto, consiste en el diseño y estudio del sistema de energía basado en pilas de combustible, por ende, es imperativo analizar el impacto económico de su uso. En la tabla 3.6 se detalla de forma general los implementos necesarios para el montaje del sistema.

Tabla 3.6 Listado de elementos equipos del sistema.

| Componente | Descripción | Modelo | Fabricante | Cant. | Precio U | Precio T |
|-------------------------|------------------------------|---------------|------------------|-------|----------|-----------|
| Celda de Combustible | 3000W PEM Fuel Cell | FCS-C3000 | Horizon | 1 | 13500 | 13500 |
| Bateria | Batería Recargable 12 V 5a | | First Power | 1 | 25 | 25 |
| Motor | Motor de CC sin escobillas | 110BS0408-15 | Keya | 2 | 220 | 440 |
| Reductor | Reductor de un solo paso | NMRV063-90B14 | | 2 | 64 | 128 |
| Controlador | Two channel motor controller | KYDBL4850-2E | Keya | 1 | 380 | 380 |
| Elementos Varios | | | | | | |
| Acelerador | Acelerador De 5v | | MagiDeal | 1 | 6,8 | 6,8 |
| Focos | Luz indicadora de Panel | | Gasher | 6 | 1,25 | 7,5 |
| DB25_Cable | Cable DB25 45cm | DB25 M-M 3 | Your Cable Store | 1 | 4,15 | 4,15 |
| DB25 Conector | 25 Position D-Sub Receptacle | DB25-SR | Adam Tech | 1 | 0,78 | 0,78 |
| DB09 Conector | CONN DSUB PLUG 9POS | A-DS 09 LL/Z | Assmann WSW | 2 | 0,5 | 1 |
| Pulsador de Freno | Botón Paro Emergencia | | MGSsystem | 1 | 3,75 | 3,75 |
| Llave de Encendido | Llave de encendido universal | 85936 | Dorman | 1 | 7,45 | 7,45 |
| Tarjeta de Comunicación | Comunicación controlador | VL1-0 | H2Move | 1 | 5,14 | 5,14 |
| Tarjeta de Sensado | Detección de hidrogeno | VL2-0 | H2Move | 1 | 8,18 | 8,18 |
| | | | | | Total | 14.517,75 |

De la Tabla 3.6, se puede observar que el costo de inversión es considerablemente alto, en referencia a la comparación de la pila de combustible con el resto de equipos. El mayor esfuerzo implica el uso de estas tecnologías. Los módulos electrónicos diseñados presentan un coste notablemente inferior al de la pila de combustible, permitiendo aminorar el impacto económico inicial al implementar esta metodología.

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones acerca del uso e implementación de las celdas de combustible, analizadas en el presente trabajo mediante el uso del programa MATLAB-Simulink.

4.1. Conclusiones

- Mediante el uso del software Simulink, y su librería SymPower System, fue posible realizar una parametrización del modelo de la celda de combustible, para el análisis de comportamiento en un sistema integrado por dos motores de corriente continua, sin escobillas.
- Al realizar las simulaciones se comprende que la celda de combustible busca siempre mantener una relación entre la corriente y voltaje de operación acorde a su potencia máxima, es decir que a medida que se exige más corriente el voltaje disminuye; pero se observó que el consumo de combustible aumentaba con el consumo de corriente. Todo esto permite conocer que en la celda de combustible la corriente es inversamente proporcional con el voltaje, pero una relación directamente proporcional con el consumo de combustible.
- La celda de combustible constituye un equipo de generación, capaz de proporcionar energía a sistemas de una potencia considerable como el vehículo planteado de forma continua mientras exista un suministro de combustible; todo sin generar residuos contaminantes lo que la convierte en una opción limpia de generación.
- El sistema propuesto posee versatilidad, de forma que pueda ser aplicado tanto a diferentes tamaños de bananeras como a otras aplicaciones como otras áreas del sector agricultor.

4.2. Recomendaciones

- Con el fin de mejorar la eficiencia del sistema, se puede establecer sistemas de control de flujo, para el combustible de acuerdo a la exigencia del traslado y la velocidad requerida.
- Se debe realizar una investigación en la producción de hidrogeno en el país con el fin de verificar sus posibilidades y que permitan la extensión del uso de pilas de combustibles como fuentes de generación de energía.
- Emplear sistemas eficaces para la detección de fugas de hidrogeno con la finalidad de proporcionar un nivel adicional en las condiciones de seguridad del sistema.
- Para la transmisión de señales usar módulos inalámbricos que permitan reducir la condensación de cables en el sistema, esto permite la detección de fallas de forma más acertada y mejorar las condiciones de seguridad.

BIBLIOGRAFÍA

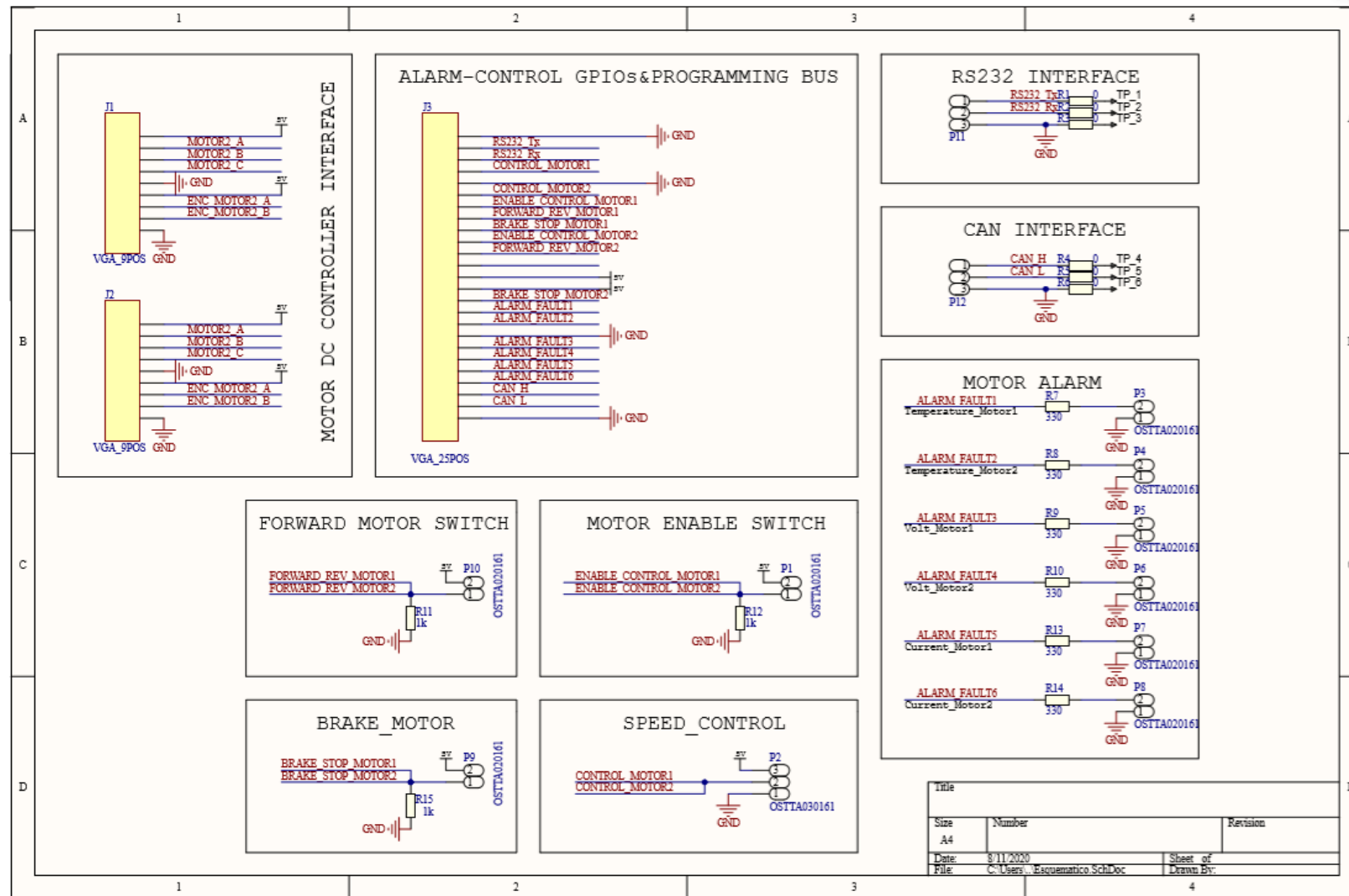
- [1] Mundo Marítimo. (2020, mayo 5). Ecuador: Exportaciones de banano crecieron un 9,92% en el primer trimestre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.mundomaritimo.cl/noticias/ecuador-exportaciones-de-banano-crecieron-un-992-en-el-primer-trimestre-de-2020>
- [2] G. Lizarzaburo. (2020, febrero 20). El top 5 de las exportadoras bananeras. [En línea]. Disponible en: <https://www.expreso.ec/actualidad/economia/son-5-exportadoras-bananeras-crecieron-5537.html>
- [3] C. A. Fontanilla D. y J. S. Castiblanco R., “Cable vía en la cosecha de palma de aceite”, *RevPalm*, vol. 30, n.º 4, pp. 53-64, ene. 2009.
- [4] L. Capa, T. Alaña, and R. Benítez, “Importancia de la producción de banano orgánico. Caso: provincia El Oro, Ecuador.”, *Universidad Y Sociedad*, vol. 8, vo. 3, pág. 64-71, septiembre 2016.
- [5] M.A.G. (2019, octubre 3). Sostenibilidad garantiza producción bananera del Ecuador. [En línea]. Disponible en: <https://www.agricultura.gob.ec/sostenibilidad-garantiza-produccion-bananera-del-ecuador/>
- [6] G. Calberto, C. Staver, and P. Silies, “An assessment of global banana production and suitability under climate change scenarios”, *Climate change and food systems: global assessments and implications for food security and trade*, Cáp. 9, pág. 268-288, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i4332e.pdf>
- [7] F. Alcívar, M. Pazmiño, “Estimación de la huella de carbono producida por la actividad bananera de la finca "Nueva Esperanza" para un manejo ambiental”, Tesis de grado, Carrera de ingeniería ambiental, ESPAM, Manabí, 2016. [En línea]. <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/527>
- [8] FAO, *Certificación orgánica para bananos*. (2017). [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i6927s.pdf>
- [9] El Telégrafo. (2017, febrero 1). Sector agropecuario mejora, pero sin solucionar problemas internos. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/8/sector-agropecuario-mejora-pero-sin-solucionar-problemas-internos>
- [10] La Hora. (2011, noviembre 16). Otra bananera con multa por contaminación ambiental. [En línea]. Disponible en: <https://lahora.com.ec/noticia/1101236827/otra-bananera-con-multa-por-contaminacin-ambiental->
- [11] A. Martínez, M. Pérez, J. Pinto, B. Gurrola, and A. Osorio, “Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes”, *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 27, no. 3, pág. 241-252, agosto 2016. [Online] Disponible en:

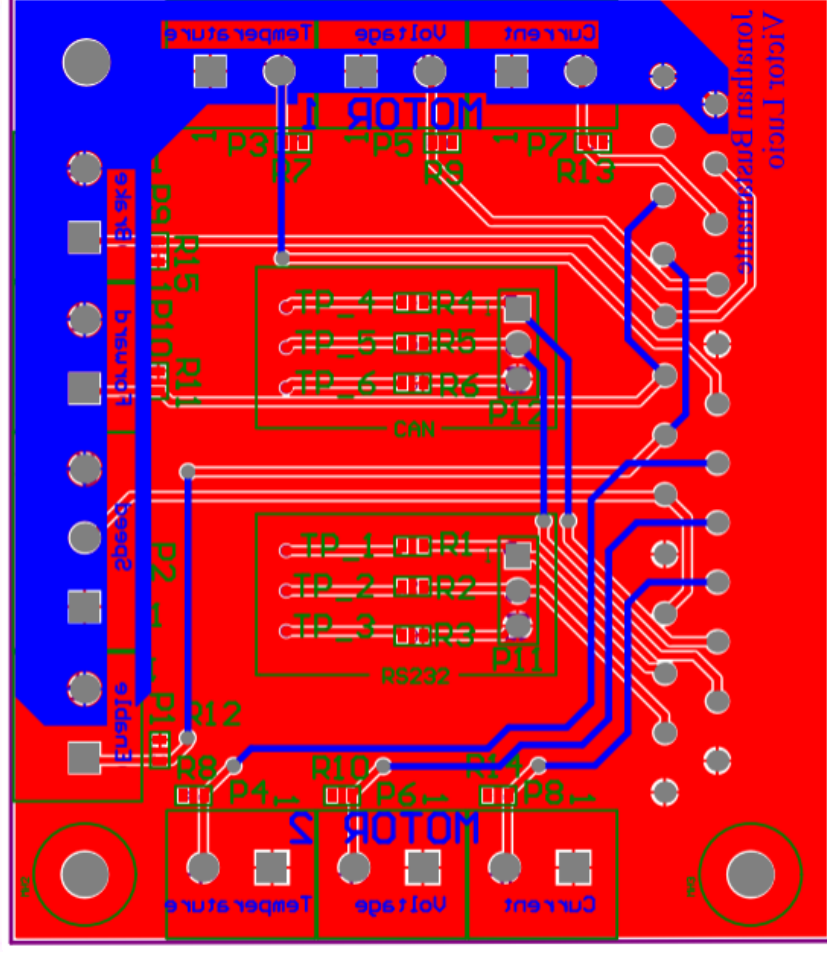
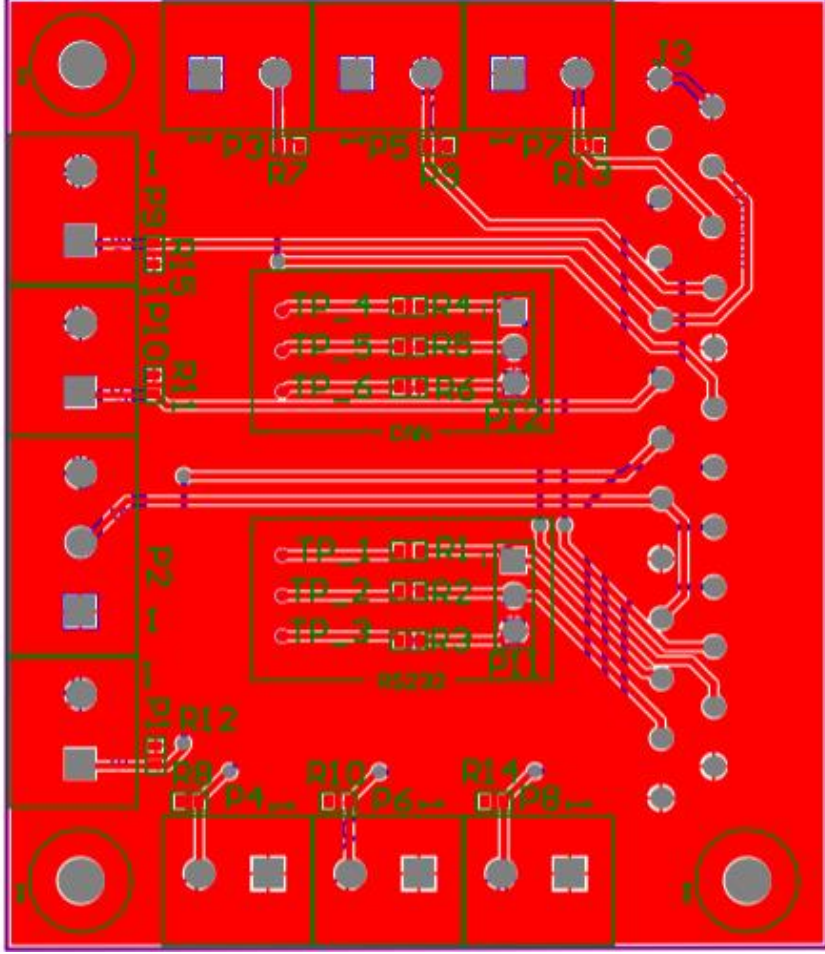
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000300009&lng=es&tlng=es

- [12] FAO, *Normas voluntarias de sostenibilidad para bananos*. (2017). [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/b-i6931s.pdf>
- [13] G. Maury, "Diseño de un vehículo eléctrico para cable vía en bananeras", Tesis de grado, Depto. de Diseño industrial, TEC, Costa Rica, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2238/10354>
- [14] J. Domínguez, "Celda de Combustible," *Anales de mecánica y electricidad*, vol. 79, no. 2 pág. 14-18, marzo-abril, 2002. [En Línea]. Disponible en: https://www.ica.es/contenidos/publicaciones/anales/pag_14-18_%28II-2002%29-619.pdf
- [15] S. Rozo, J. Tibaquirá, "Celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico." *Scientia Et Technica*, vol. XIII, no. 37, pp.279-283, dic. 2007. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84903747>
- [16] J. Alvarado, "Estudio comparativo de las diferentes tecnologías de celdas de combustible", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 52, no. 3, pág. 105-117, mayo-junio 2013. [En Línea]. Disponible en <http://boletines.secv.es/upload/20130704101206.201352105.pdf>
- [17] A. Mayandia, "Descripción y modelado de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico", Tesis de grado, Depto. de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, 2009. [En Línea]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/6055>
- [18] D. Feroldi, M. Serra, J. Riera, "Control de sistemas basados en pilas de combustible tipo PEM", *Instituto de Robótica e Informática Industrial*, Universidad Politécnica de Catalunya, España, 2006. [En Línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/30326>
- [19] S. Gómez, "Ampliación de la autonomía de vuelo de una UAV mediante pilas de combustible", Disertación de magister, Universidad de Valencia, España, sep. 2016. [En Línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/76058>
- [20] M. Rashid, M. Morshedul, T. Akhtar and M. S. Miah, "Simulink Model of Controlling Fuel Cell Powered Direct Current Motor with Comparative Performance Analysis," *2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Coimbatore, India, 2019, pp. 1631-1637. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9002577>
- [21] M. Uzunoglu, M. Alam, "Dynamic modeling, design and simulation of a PEM fuel cell/ultra-capacitor hybrid system for vehicular applications", *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pág 1544–1553. 2007. [En Línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.11.014>

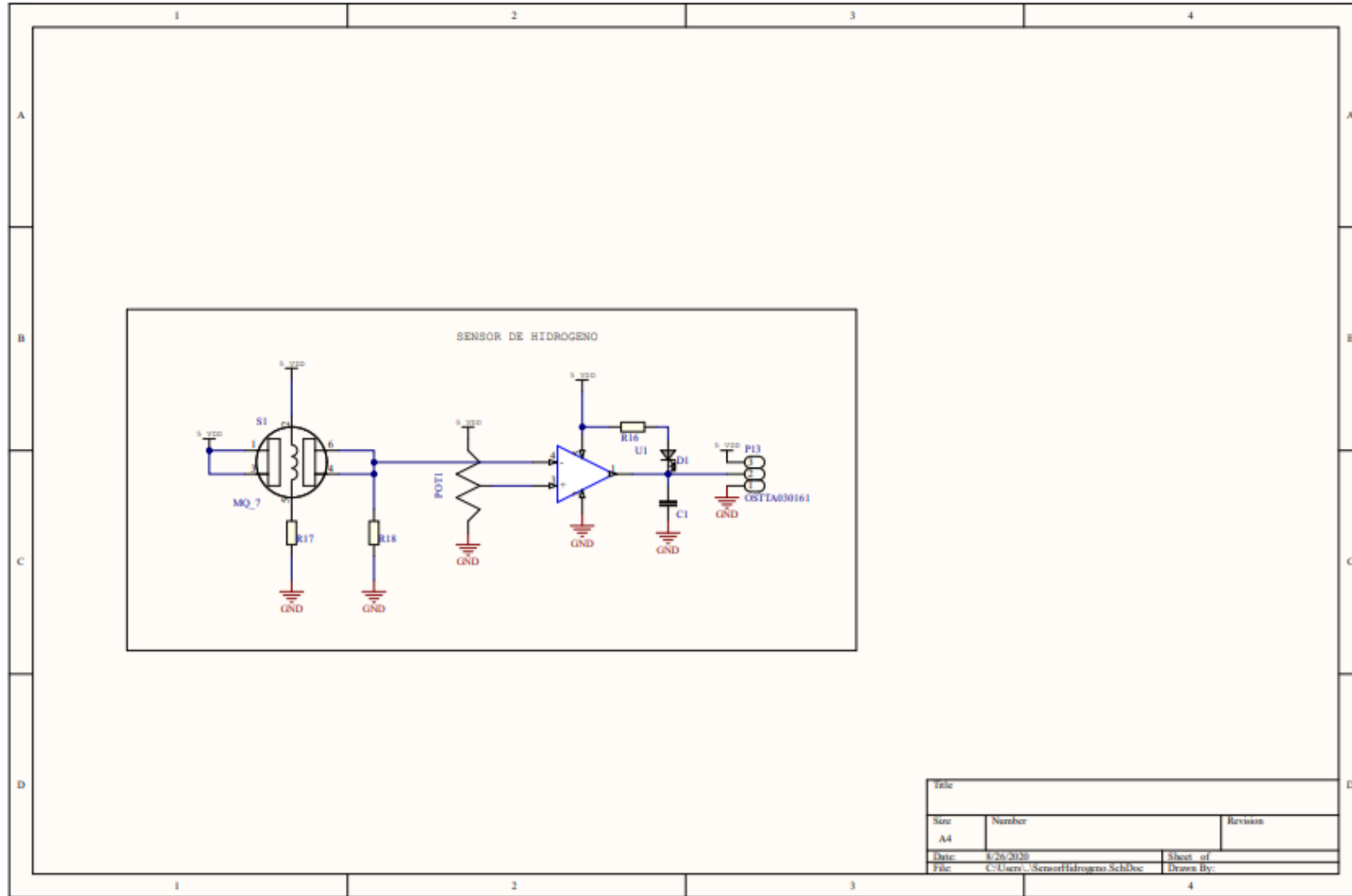
Anexos

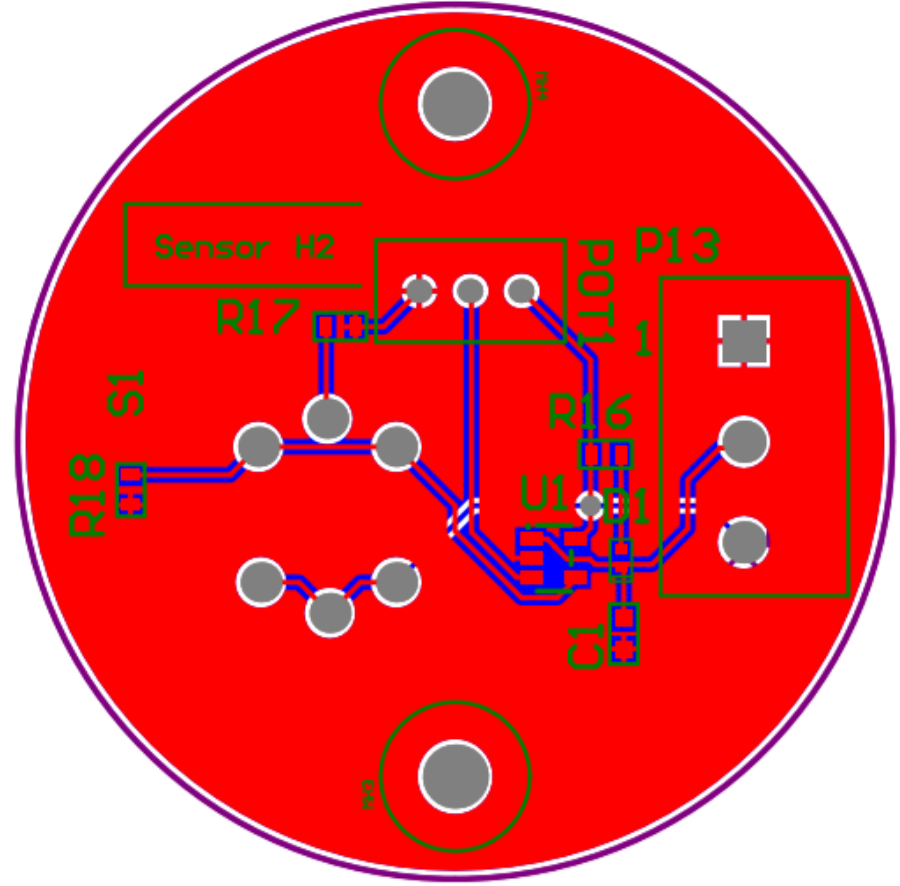
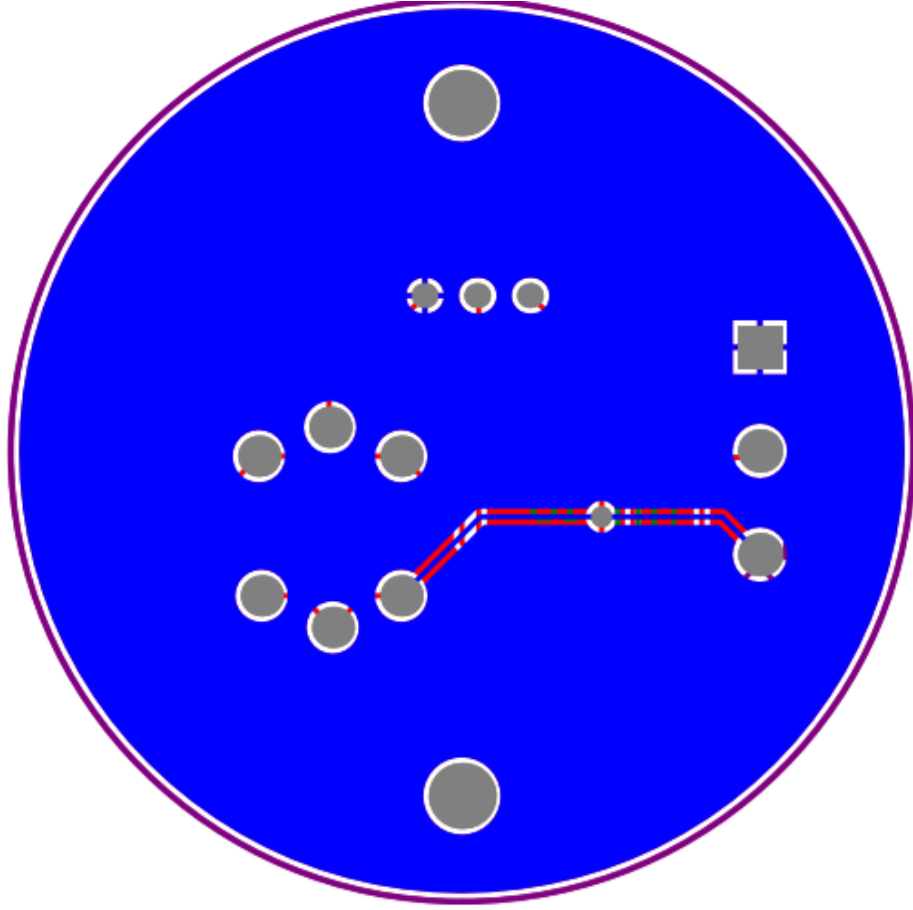
Anexo A: Diagrama esquemático y de conexión de la tarjeta de control.





Anexo B: Diagrama esquemático y de conexión del sensor de hidrógeno.





Anexo C: Cálculos de parámetros de salida correspondiente al capítulo 3.

- **Operación con carga**

$$Potencia_{Motor-mecanica} = Velocidad_{Motor} \left[\frac{rad}{s} \right] * Torque \quad (AC.1)$$

$$Potencia_{Motor-mecanica} = 154.8 \frac{rad}{s} * 4.6Nm$$

$$Potencia_{Motor-mecanica} = 712.08[W]$$

$$Potencia_{Motor-absorbida} = Potencia_{Motor-eje} / Eficiencia_{Motor} \quad (AC.2)$$

$$Potencia_{Motor-absorbida} = 712.08W / 0.96$$

$$Potencia_{Motor-absorbida} = 741.75W$$

$$Torque_{Reductor} = Torque_{Motor} * Ratio$$

$$Torque_{Reductor} = 4.6Nm * 5$$

$$Torque_{Reductor} = 23Nm$$

$$Velocidad_{Reductor} \left[\frac{rad}{s} \right] = \frac{Velocidad_{Motor} \left[\frac{rad}{s} \right]}{Ratio} \quad (AC.3)$$

$$Velocidad_{Reductor} \left[\frac{rad}{s} \right] = \frac{154.8 \frac{rad}{s}}{5}$$

$$Velocidad_{Reductor} \left[\frac{rad}{s} \right] = 30.96 \frac{rad}{s}$$

$$Velocidad_{Polea} \left[\frac{rad}{s} \right] = \frac{Velocidad_{Reductor} \left[\frac{rad}{s} \right] * Radio_{Reductor}}{Radio_{Polea}} \quad (AC.4)$$

$$Velocidad_{Polea} \left[\frac{rad}{s} \right] = \frac{30.96 \frac{rad}{s} * 0.02m}{0.04m}$$

$$Velocidad_{Polea} \left[\frac{rad}{s} \right] = 15.48 \frac{rad}{s}$$

$$Velocidad_{Lineal} = Velocidad_{Polea} \left[\frac{rad}{s} \right] * Radio_{Polea} \quad (AC.5)$$

$$Velocidad_{Lineal} = 15.48 \frac{rad}{s} * 0.04$$

$$Velocidad_{Lineal} = 0.6193m/s$$

$$Velocidad_{Lineal} = 0.6193m/s(60s/1min)$$

$$Velocidad_{Lineal} = 37.152m/min$$

- Operación sin carga

$$Potencia_{Motor-mecanica} = Velocidad_{Motor} \left[\frac{rad}{s} \right] * Torque \quad (AC.6)$$

$$Potencia_{Motor-mecanica} = 329.3 \frac{rad}{s} * 0.8404Nm$$

$$Potencia_{Motor-mecanica} = 276.744[W]$$

$$Potencia_{Motor-absorbida} = Potencia_{Motor-eje} / Eficiencia_{Motor} \quad (AC.7)$$

$$Potencia_{Motor-absorbida} = 276.744W / 0.96$$

$$Potencia_{Motor-absorbida} = 288.27W$$

$$Torque_{Reductor} = Torque_{Motor} * Ratio \quad (AC.8)$$

$$Torque_{Reductor} = 0.8404m * 5$$

$$Torque_{Reductor} = 4.2Nm$$

$$Velocidad_{Reductor} \left[\frac{rad}{s} \right] = \frac{Velocidad_{Motor} \left[\frac{rad}{s} \right]}{Ratio} \quad (AC.9)$$

$$Velocidad_{Reductor} \left[\frac{rad}{s} \right] = \frac{329.3 \frac{rad}{s}}{5}$$

$$Velocidad_{Reductor} \left[\frac{rad}{s} \right] = 65.86 \frac{rad}{s}$$

$$Velocidad_{Polea} \left[\frac{rad}{s} \right] = \frac{Velocidad_{Reductor} \left[\frac{rad}{s} \right] * Radio_{Reductor}}{Radio_{Polea}} \quad (AC.10)$$

$$Velocidad_{Polea} \left[\frac{rad}{s} \right] = \frac{65.86 \frac{rad}{s} * 0.02m}{0.04m}$$

$$Velocidad_{Polea} \left[\frac{rad}{s} \right] = 32.93 \frac{rad}{s}$$

$$Velocidad_{Lineal} = Velocidad_{Polea} \left[\frac{rad}{s} \right] * Radio_{Polea} \quad (AC.12)$$

$$Velocidad_{Lineal} = 32.93 \frac{rad}{s} * 0.04$$

$$Velocidad_{Lineal} = 1.32m/s$$

$$Velocidad_{Lineal} = 1.32m/s(60s/1min)$$

$$Velocidad_{Lineal} = 79.2m/min$$

- **Tiempo de recorrido sin carga**

$$Tiempo_{sin\ carga} = \frac{Recorrido}{Velocidad_{sin\ carga}} \quad (AC.13)$$

$$Tiempo_{sin\ carga} = \frac{2400m}{79.2m/min}$$

$$Tiempo_{sin\ carga} = 30.3\ min$$

- **Tiempo de recorrido con carga**

$$Tiempo_{con\ carga} = \frac{Recorrido}{Velocidad_{con\ carga}} \quad (AC.14)$$

$$Tiempo_{con\ carga} = \frac{2400m}{37.15m/min}$$

$$Tiempo_{con\ carga} = 64.6\ min$$

- **Tiempo en realizar un viaje**

Dado que el tiempo de recarga de los racimos en el cable vía, se ha estimado en aproximadamente 25 minutos; se ha decidido que durante este tiempo el motor DC se encuentre apagado, de esta forma, este tiempo no influye en el consumo de energía.

$$Tiempo_{viaje} = Tiempo_{sin\ carga} + Tiempo_{con\ carga} \quad (AC.15)$$

$$Tiempo_{viaje} = 30.3 \text{ min} + 64.6 \text{ min}$$

$$Tiempo_{viaje} = 94.9 \text{ min}$$

- **Energía consumida en un viaje**

$$Energia_{Ida} = Potencia_{Motor-absorbida-Ida} * Tiempo_{viaje-Ida} \quad (AC.16)$$

$$Energia_{Ida} = 288.27W * 30.3 \text{ min} \left(\frac{1h}{60min} \right)$$

$$Energia_{Ida} = 145.576[Wh]$$

$$Energia_{Regreso} = 741.75W * 64.6 \text{ min} \left(\frac{1h}{60min} \right)$$

$$Energia_{viaje} = 798.61[Wh]$$

$$Energia_{viaje} = Energia_{Ida} + Energia_{Regreso} \quad AC.17)$$

$$Energia_{viaje} = 145.576[Wh] + 798.61[Wh]$$

$$Energia_{viaje} = 944.193[Wh]$$

Anexo D: Ficha técnica de los elementos empleados en el sistema.

| | | | |
|---|--|-----------------------|---|
|  | <p>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL</p> <p>Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación</p> <p>“SISTEMA DE ALIMENTACIÓN BASADO EN FUEL CELL PARA MOTOR DE UN VEHÍCULO DE CABLE VÍA”</p> | |  |
| <p>Ficha técnica para el sistema de alimentación del vehículo cable vía, para el traslado de banano y uso en sector agrícola.</p> | | | |
| <p>Elaborado por:</p> | <p>Jonathan Bustamante ---- Víctor Lucio</p> | | |
| <p>Fecha:</p> | <p>30/08/2020</p> | <p>Código:</p> | <p>123565</p> |
| <p>Uso: Vehículo destinado al transporte de racimas de banano mediante la modalidad de cable alimentado por un sistema de energía limpio constituido por una celda de combustible a base de hidrogeno.</p> | | | |

Sistema General:

| | |
|------------------|----------------------|
| Producto: | Sistema cable vía |
| Modelo: | VCB-2020 |
| Marca: | hydrogreen |
| Año: | 2020 |
| País: | Ecuador |
| Carga: | 45 racimos |
| Peso: | 210 Kg |
| Arranque: | Eléctrico y a pedal |
| Alimentación: | Celda de Combustible |
| Longitud total: | mm |
| Ancho total: | mm |
| Alto total: | mm |

Celda de Combustible

| | |
|--------------------------|-----------------------|
| Producto: | 3000W Fuel Cell Stack |
| Modelo: | FCS-C3000 |
| Marca: | Horizon |
| Año: | 2020 |
| País: | Singapur |
| Potencia Nominal | 3000 [W] |
| Voltaje de salida | 48 [V] |
| Eficiencia | 40 [%] |
| Consumo | 39 [lpm] |
| Temperatura de Operación | 35 [°C] |
| Dimensiones | 418 x 350 x 183 [mm] |
| Pureza de hidrogeno | 99.9 [%] |

Controlador:

| | |
|-------------------------|---------------------------|
| Producto: | Controlador Dual Motor DC |
| Modelo: | KYDBL4830-2E |
| Marca: | Keya Electronic |
| Año: | 2020 |
| País: | China |
| Rango Voltaje de Entrda | 10-55 [V DC] |
| Velocidad mín. | 10 [rpm] |
| Rango señal analógica | 0-5 [V DC] |
| Impulse input range | 500-5000 [Hz] |
| Peso | 600 [g] |
| L * W * H | 142mm * 116.5mm * 34mm |

Motor:

| | |
|-------------------------|---------------------------|
| Producto: | Brushless DC Motor |
| Modelo: | 110BS0408-15 |
| Marca: | Jinan Lanjiu |
| Año: | 2020 |
| País: | China |
| Potencia Nominal | 800.00 [W] |
| Voltaje de Alimentación | 48.00 [V] |
| Corriente de entrada | 16.67 [A] |
| Torque | 5 [N·m] |
| RPM | 1500 [rpm] |
| Peso | 7.8 [Kg] |
| Rotor de Inercia | 281 [K·gm ²] |

Motor:

| | |
|-------------------------|---------------------------|
| Producto: | Brushless DC Motor |
| Modelo: | 110BS0408-15 |
| Marca: | Jinan Lanjiu |
| Año: | 2020 |
| País: | China |
| Potencia Nominal | 800.00 [W] |
| Voltaje de Alimentación | 48.00 [V] |
| Corriente de entrada | 16.67 [A] |
| Torque | 5 [N·m] |
| RPM | 1500 [rpm] |
| Peso | 7.8 [Kg] |
| Rotor de Inercia | 281 [K·gm ²] |

Detección de hidrógeno:

| | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| Producto: | Tarjeta detectora de hidrógeno |
| Modelo Sensor (chip): | LM393 – MQ7 |
| Marca: | Hydro2move |
| Año: | 2020 |
| País: | Ecuador |
| Potencia Nominal | 800.00 [W] |
| Voltaje de Alimentación | 05.00 [V] |
| Corriente de entrada | [A] |
| Dimensión radial | 4.34 [cm] |
| Dimensión sensor | 32mm x 22mm x altura 27mm ancho |
| Salida analógica sensor | 0 ~ 5 [V] |

MONTAJE DEL EQUIPO

Montaje General del equipo

En la *Figura 1* se muestra el diagrama de conexiones generales del sistema, en la cual se comprende el flujo de energía desde la celda de combustible, seguidamente esta se conecta con el controlador, el cual a su vez distribuye la potencia hacia los dos motores por medio de la señal de 3 fases.

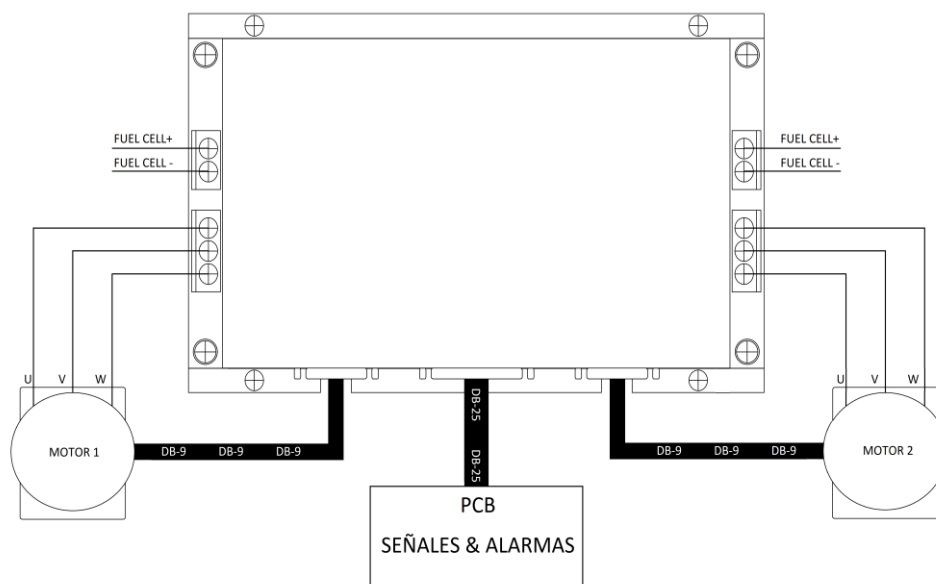


Figura 1: Diagrama general de conexiones del vehículo.

La celda de combustible se comunica con un controlador externo que permite regular el flujo de entrada y de salida. El controlador emplea una batería de 12Volts DC para alimentar las electroválvulas de la pila de combustible. Es importante mencionar que la celda, controlador externo y batería se encuentran distribuidos en un panel independiente en el vehículo de cable vía, mientras que el controlador principal se conserva en el panel de mando.

Por otra parte, en el sistema se encuentra un cilindro que suministrará el hidrógeno a la celda de combustible, en donde el flujo es regulado por medio de las electroválvulas. El cilindro de hidrogeno se encuentra debidamente aislado, con la intención de evitar riesgos de tipo incendiario en el sistema general.

Montaje del Panel

En el panel de control se requiere efectuar la conexión entre el controlador, los motores DC y la PCB del sistema; esta última comprende las señales de frenado, acelerador, encendido, apagado y alarmas que se comunican con el controlador. La conexión entre estos dispositivos es efectuada por medio de 2 cables DB09 y 1 cable DB25, como se muestra en la *Figura 2*.

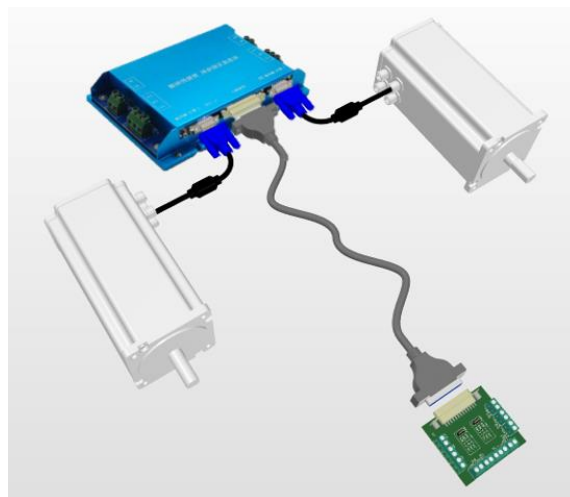


Figura 2: Diagrama de conexiones del panel de control del sistema.

La instalación de la PCB se consigue por medio de unos tornillos que permiten el ajuste mecánico entre la misma y el panel de mando del sistema. La PCB posee las borneras en donde se encuentran las señales de entradas y salidas del controlador, con lo que se consigue una mejor interfaz de usuario.

Montaje de componentes en la PCB

La PCB es el intermediario que permite mantener una comunicación entre las variables y control del motor y el controlador del sistema, en la *Ilustración3* se muestra la representación del diagrama de conexiones requerido con la placa del panel de mando. La PCB permite el control de encendido, apagado, dirección y velocidad del vehículo;

mientras que mantiene un registro de las condiciones de intensidad de corriente, tensión y temperatura con la cual se encuentran operando los motores, de esta forma en caso de acontecer una anomalía; esta será enviada al panel para su debida notificación y corrección inmediata.

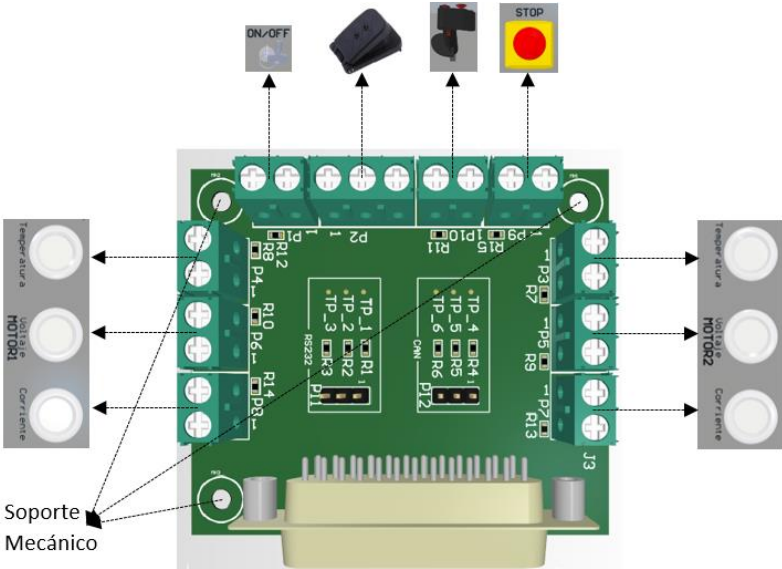


Figura 3: Diagrama de conexiones de la PCB y señales del panel de mando.

Montaje testeo de Hidrogeno

Debido a las características incendiarias del hidrogeno, se empleará un sistema capaz de detectar las posibles fugas de hidrogeno del sistema. La instalación consiste en ubicar el sensor de calidad de aire a una distancia cercana a los puntos más vulnerables de fugas de hidrogeno, como se muestra en la siguiente Ilustración4. Adicionalmente se debe efectuar la conexión entre la PCB del controlador con la PCB de testeo de Hidrogeno, con la finalidad de notificar al operador de condiciones peligrosas y efectuar el debido aislamiento del sistema.

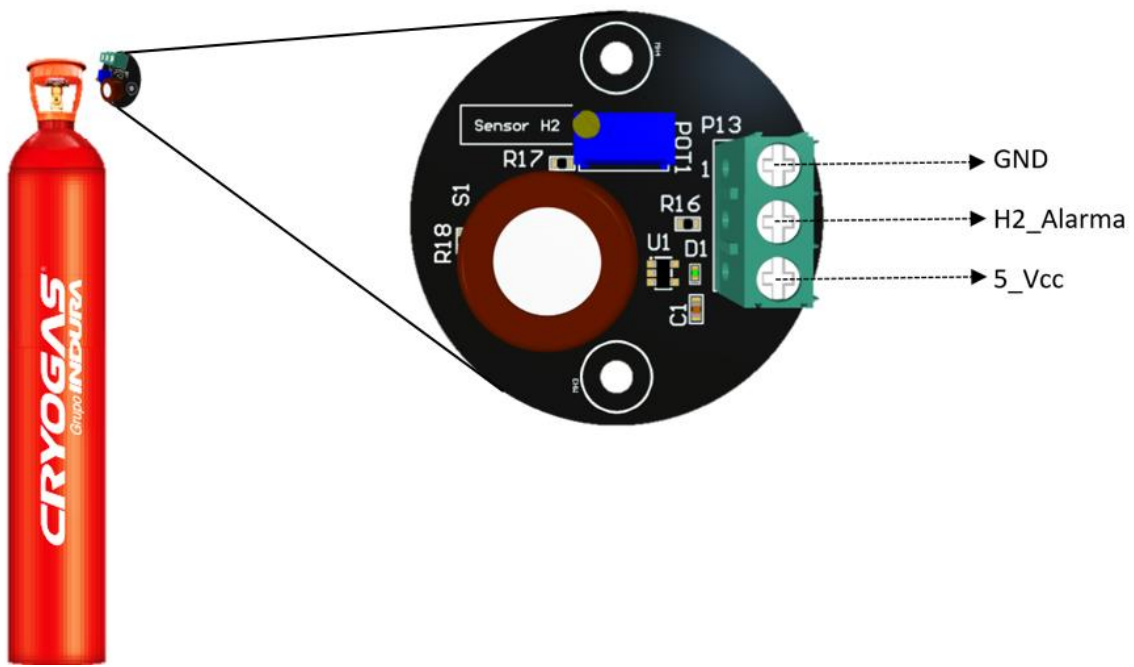


Figure 4: Instalación de sistema testeador de fugas de Hidrogeno en el vehiculo.

MANUAL DE OPERACIÓN

Componentes del sistema de control

El sistema de control se encuentra constituido de 6 partes, las cuales se encuentran representadas en la siguiente ilustración del tablero del sistema:



Figura 5: Tablero de control del sistema-Vehículo cable vía.

En primer lugar, se poseen 6 alarmas las cuales indican el estado del sistema de forma que se pueda notificar al operador de alguna falla en el sistema durante la operación. Estas permitirán efectuar mantenimientos correctivos para la celda de combustible, controlador y motores de corriente continua del sistema general.

El sistema cuenta con una pantalla LCD de color que representara el estado de suministro de energía suministrado por la celda de combustible, esto se refiere al nivel de tensión e intensidad de corriente que entrega la celda a tiempo real al controlador del sistema.

La palanca de dirección permite definir el sentido de giro del motor, lo cual es necesario establecer al momento del arranque del sistema. Por otra parte, el panel cuenta con un sistema de control de encendido por medio de una cerradura electrónica.

Finalmente, se posee un botón de paro el cual desconectará inmediatamente el controlador y motores de la celda de combustible, lo cual evita que se desencadenen accidentes que podrían ocasionar daños en los motores.

Encendido del sistema

Para el encendido del sistema se debe insertar la llave en la cerradura electrónica, lo cual permite que el sistema pueda ser encendido solo por el personal adecuado y capacitado para operar el vehículo; de esta forma se incrementa el índice de seguridad de sistema. Seguidamente es necesario definir el sentido de dirección por medio de la palanca, esta señal será enviada directamente al controlador del sistema y en su defecto a los motores de corriente continua.

Posteriormente el sistema cuenta con un acelerador en el sector inferior, de esta manera se regula el nivel de velocidad con el cual se transportará el vehículo por medio del cable vía, como lo presenta la *Figura 2*. Al momento de ocurrir alguna sobredemanda del motor, esta notificación será expuesta en el tablero de mando por medio de luces indicadoras del sistema.



Figura 6: Acelerador de vehículo de cable vía.

Alarmas del sistema

El panel de mando cuenta con una sección destinada a alarmas, las cuales permiten ilustrar condiciones de sobrecorriente, sobretensiones o calentamiento máximo en el motor. Estos valores límites son seteados por medio de la programación del controlador. Cabe mencionar que el controlador puede ser reprogramado con parámetros distintos; esto permite aplicar el proyecto con motores que poseen datos de placa distintos a los actuales. En la *Figura 3* se comprende el sistema de alarmas del vehículo.



Figura 7: Bloque de indicación de alarmas del sistema.

Estado de la Celda

El estado de la celda es presentado por medio de una pantalla LCD de color, lo cual permite ilustrar el suministro de potencia de la celda de combustible a tiempo real; de esta forma el operador puede comprobar el correcto funcionamiento del sistema durante la operación del vehículo cable vía. En la *Figura 4* se visualiza el modo de presentación del estado de la celda de combustible.

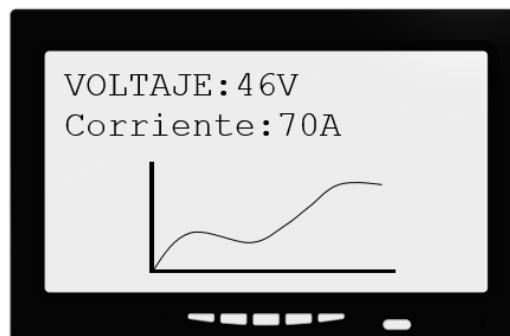


Figura 8: Pantalla LCD de estado de la celda de combustible.

Mantenimiento y Programación del controlador

La realización de mantenimientos o reemplazos de piezas del sistema puede ser efectuado por el operador, para ello se requiere tener el acceso por medio de la cerradura magnética; seguidamente extraer los tornillos hexagonales ubicados en cada extremo del panel. De esta forma se posibilita el acceso a los componentes que forman parte del panel de control y la configuración del controlador.

La programación del controlador se efectúa por medio de la PCB en el interior del panel, esta cuenta con un bus de programación por medio de RS232, por medio del cual se pueden sestionar los valores límites de operación de los motores para las alarmas.

Adicionalmente cuenta con un bus para CAN, ambos medios pueden ser visualizados en los conectores machos de la PCB que se muestra en la *Figura 5*.

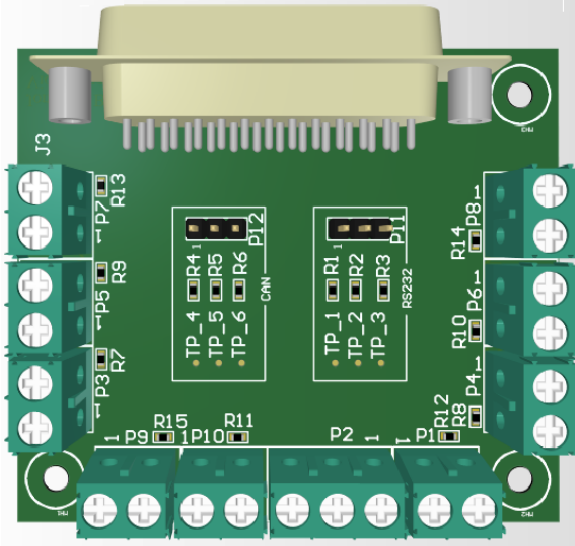


Figura 9: PCB para programación del controlador del sistema.