



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA.

“Dimensionamiento de una celda de combustible para un vehículo eléctrico”

Tesis

Que para obtener el título de:
Ingeniero Eléctrico Electrónico.

Presenta

Carlos Alfonso Macías Cuevas

Director de Tesis: Ing. Germán Carmona Paredes

México, D.F., 2009



<u>ÍNDICE:</u>	<u>PÁGINA</u>
1.0 OBJETIVOS	<u>3</u>
1.1 INTRODUCCIÓN	<u>3</u>
1.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL VEHÍCULO	<u>6</u>
1.2.1 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	<u>7</u>
1.2.2 TRANSMISIÓN	<u>15</u>
1.2.3 CONTROL DE VELOCIDAD	<u>16</u>
1.3 ESTIMACIÓN TEÓRICA DE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DEL VEHÍCULO. TRABAJO, ENERGÍA Y AUTONOMÍA	<u>19</u>
1.4 CARACTERIZACIÓN	<u>24</u>
1.4.1 CALIBRACIÓN DE SEÑALES	<u>28</u>
1.4.2 PROGRAMA PARA ADQUISICIÓN DE DATOS	<u>32</u>
1.4.3 PRUEBAS	<u>36</u>
1.4.4 RESULTADOS	<u>38</u>
1.5 CELDAS DE COMBUSTIBLE	<u>44</u>
1.6 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	<u>46</u>
1.7 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO	<u>55</u>
1.8 SELECCIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE Y PROPUESTA PARA EL ACOPLAMIENTO AL VEHÍCULO	<u>58</u>
1.9 ANÁLISIS DE RESULTADOS	<u>64</u>
2. CONCLUSIONES	<u>76</u>
3. GLOSARIO DE TÉRMINOS	<u>78</u>
4. ANEXOS	<u>81</u>
5. BIBLIOGRAFÍA	<u>86</u>

1.0 OBJETIVO:

La finalidad de este trabajo es el planteamiento de un sistema híbrido baterías-celda de combustible para un vehículo eléctrico, que permita aprovechar las bondades de cada sistema de suministro de energía, seleccionando adecuadamente una celda de combustible de hidrógeno que pueda acoplarse al sistema eléctrico del vehículo.

1.1 INTRODUCCIÓN

El proyecto que dio origen a este trabajo fue el proyecto de desarrollo de una motocicleta eléctrica híbrida (baterías-celda de combustible), realizado conjuntamente en el Instituto de Ingeniería, la Facultad de Ingeniería de la UNAM y el patrocinio del macroproyecto de la Ciudad Universitaria y la Energía.

En esta tesis se describirán los antecedentes de la conversión de la motocicleta de sistema de combustión interna, que tiene casi 20 años de su construcción, a tracción eléctrica, el desarrollo de la instrumentación para medir las distintas variables que permitan realizar su caracterización, así como el proceso de caracterización de la motocicleta eléctrica para obtener sus parámetros de operación (autonomía, corrientes máxima y promedio, potencias máximas y promedio).

Se darán a conocer los resultados y el análisis de las pruebas realizadas a la motocicleta eléctrica, operando únicamente con baterías. Con el análisis de los resultados se elegirá la celda de combustible adecuada para ese sistema eléctrico, así como el sistema de control, de producción y de almacenamiento de hidrógeno. Finalmente se hará el planteamiento para el acoplamiento de la celda de combustible al sistema eléctrico para lograr el sistema híbrido (baterías-celda de combustible).

El proyecto del vehículo híbrido a hidrógeno se planteó porque en el panorama energético de México y el mundo, los pronósticos anuncian escasez de petróleo en tan sólo diez años, por lo que es urgente empezar a desarrollar tecnologías alternativas para producción de energía y una opción viable como vector energético es el hidrógeno. Se puede obtener de fuentes renovables como la solar, la eólica, biomasa o energía nuclear,

entre otras y se considera fuente de energía limpia ya que en los procesos para producir energía eléctrica o trabajo mecánico, ya sea con celdas de hidrógeno o por combustión, las emisiones son solo agua y calor.

Actualmente el 90% de la producción de hidrógeno a nivel mundial se hace mediante reformación de gas natural, este proceso sigue dependiendo de los hidrocarburos, el otro 10 % se realiza mediante la electrólisis del agua, método que se puede aprovechar en el futuro utilizando energías alternas.

Un planteamiento para la producción del hidrógeno utilizando energías renovables es tener un sistema de generación que esté conectado constantemente a la red de distribución eléctrica y en los momentos que exista poca demanda, con el excedente de energía en la red se puede producir el hidrógeno utilizando electrolizadores.

También en lugares donde no exista red de distribución de energía eléctrica, se puede tener un sistema de generación distribuida donde se le pueda dar un uso eficiente al hidrógeno producido, no solo para generación de electricidad sino también para combustión.

Existen algunas ventajas hoy en día para la generación de energía utilizando hidrógeno; en las celdas de combustible se puede llegar a tener eficiencias de hasta un 80 %, aunque prácticamente es de 45-50%, que en comparación a un motor de combustión interna con eficiencias de alrededor del 25%, es bastante significativo. La producción de hidrógeno por electrólisis también tiene altos grados de eficiencia, cercanas al 90 %, esto da un sistema de producción-generación en base al hidrógeno bastante eficiente. En el futuro y con la investigación de nuevas tecnologías, las eficiencias pueden mejorar y los costos se pueden reducir, esto es importante ya que las celdas de combustible son caras y tienen una vida muy corta.

Se planteó el sistema eléctrico híbrido, baterías-celda de combustible, ya que si se combinan los dos sistemas, se llega a tener una mejor relación costo-beneficio. En nuestro caso, se elige una celda de combustible que cubra la demanda básica de potencia y en los momentos en que se tenga un pico de demanda, las baterías aportarán la potencia necesaria para cubrirlo. En el momento en que no se consuma energía por

parte del motor, la celda de combustible cargará las baterías. Así se logra tener un mejor desempeño de la celda de combustible evitando su degradación en los picos de corriente y se invierte menos dinero en ella, por ser de un tamaño menor.

El desarrollo de vehículos híbridos en la actualidad ha tenido un impacto importante en la sociedad y los fabricantes de vehículos comerciales han iniciado la comercialización de los primeros vehículos híbridos (gasolina-baterías). Como sabemos es importante empezar a actuar para evitar la contaminación ambiental, mejorar o cambiar los sistemas energéticos para evitar la desmedida explotación de hidrocarburos. La ventaja de los sistemas híbridos es que es posible aprovechar las propiedades de ambos sistemas (motor eléctrico- motor de combustión interna) y con un control inteligente para la adecuada interacción de cada elemento, brinde una mayor eficiencia, un mejor desempeño y un menor índice de contaminación. Existen complementos en el sistema híbrido como es el frenado regenerativo, donde el motor eléctrico en el momento en que el coche está en movimiento y se quiere frenar se convierte en un generador para cargar las baterías. Esto permite recuperar una pequeña parte de la energía que normalmente se disipa en las balatas. En comparación con un automóvil de combustión interna que tiene índices de consumo de gasolina promedio de 11.7 km/l, el automóvil híbrido brinda alrededor de 25 km/l, lo cual es una gran ventaja para ahorrar combustible y contaminar menos. El sistema que nosotros proponemos es un sistema híbrido puramente eléctrico, ya que no se usa el motor de combustión interna: en su lugar, la celda de combustible alimentada por hidrógeno suministrará electricidad en paralelo con las baterías al motor eléctrico. Con este diseño se propone un sistema que no dependa de los hidrocarburos para su funcionamiento.

1.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

La motocicleta eléctrica se modificó en prácticamente toda su estructura, se cambió el motor de combustión interna por un motor eléctrico, el chasis se transformó principalmente de la parte trasera, dejando un eje con dos llantas, tipo triciclo. Se agregaron amortiguadores y espacios para colocar las baterías y motor eléctrico y debajo del asiento se instaló el controlador de velocidad (modulador de ancho de pulso). La estructura está hecha con tubos y ángulos de acero. Cuenta con un freno de tambor delantero. El acelerador está típicamente colocado en el manubrio, y con un chicote llega a un acelerador electrónico (variador de voltaje) que regula el voltaje de salida del controlador de velocidad.



Dimensiones:

- Largo: 183 cm
- Ancho: 58 cm
- Alto: 93 cm
- Peso: 100 kg

1.2.1 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

El sistema eléctrico está formado por 3 componentes principales:

- Motor eléctrico
- Baterías
- Controlador

y algunos otros componentes secundarios de protección y medición, conectados como se muestra en la figura 1:

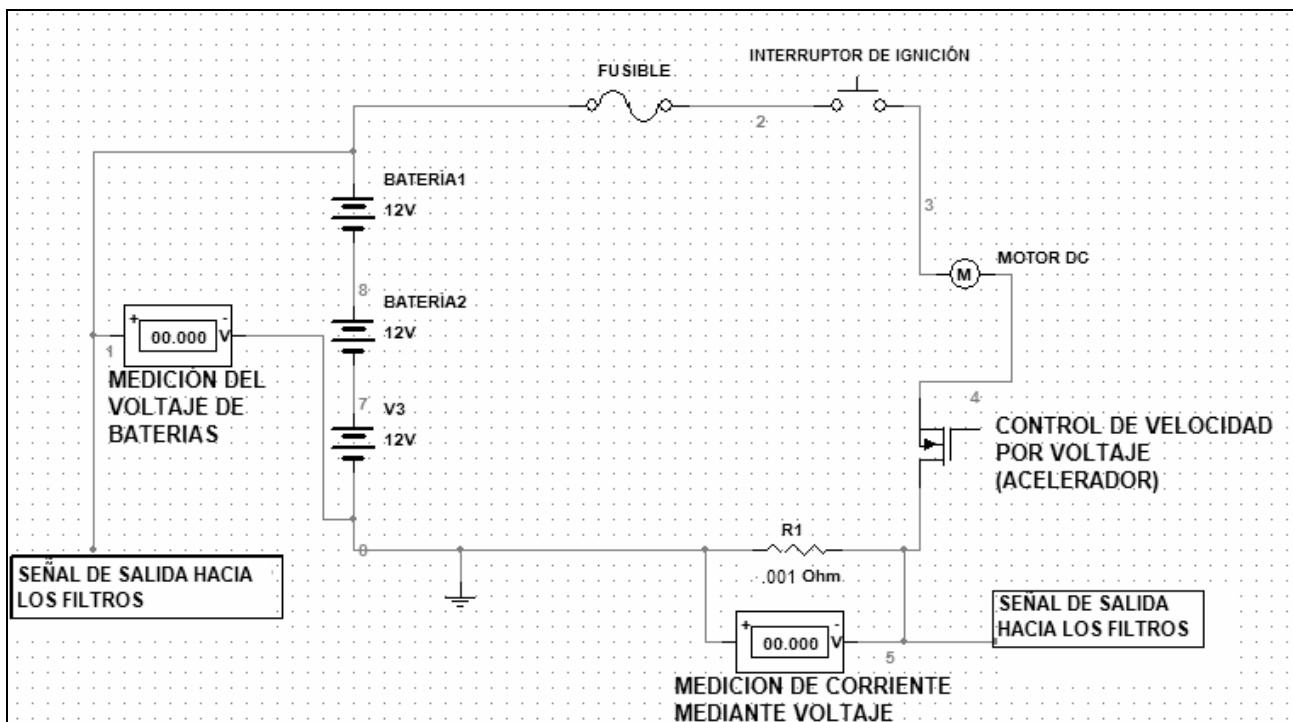


FIGURA 1. DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL VEHÍCULO

-MOTOR ELÉCTRICO

Existen diferentes tipos de motores eléctricos que se clasifican principalmente por el tipo de alimentación eléctrica a la que están conectados, en: motores de corriente alterna y motores de corriente directa. Los motores de corriente continua o directa, tienen la ventaja de que sus controladores de velocidad son sencillos, económicos y tienen altos pares de arranque. Los motores de corriente alterna son ligeros, tienen menor volumen, requieren poco mantenimiento y son más eficientes, pero sus controladores de velocidad

(inversores) son bastante más complejos y caros que los de los motores de corriente directa.

Los motores de corriente directa tienen distintas configuraciones:

-Excitación en Serie: El campo magnético lo obtiene de una bobina conectada en serie con el inducido, por lo que la misma corriente fluye en los dos circuitos. La corriente depende de la velocidad y del par. Puede ofrecer un alto par de arranque.

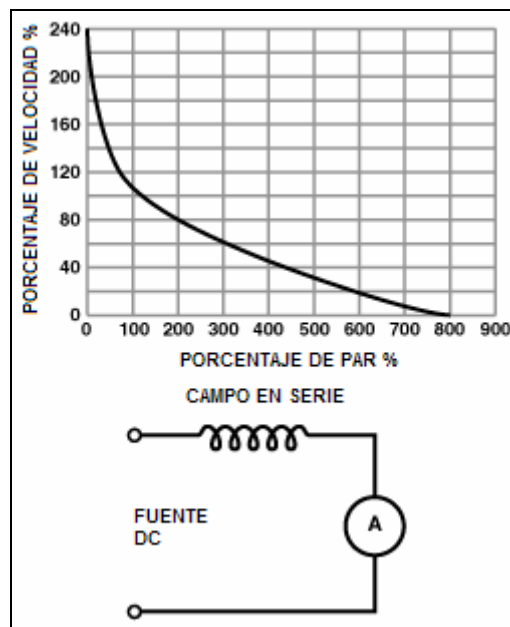


FIGURA 2: MOTOR CON CAMPO EN SERIE

-Excitación en Derivación: El campo magnético está conectado en paralelo con el circuito interno del inducido. La corriente en esta configuración es prácticamente independiente de la velocidad y la corriente es proporcional al par. No ofrece gran cantidad de par.

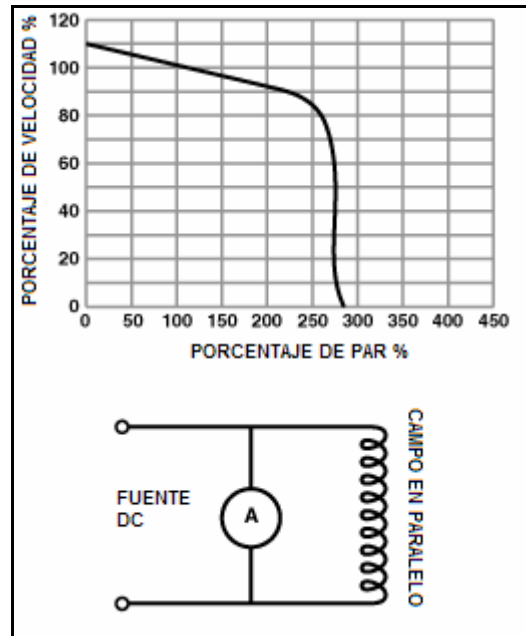


FIGURA 3: MOTOR CON CAMPO EN PARALELO

-Excitación Independiente: Reciben el campo magnético de una fuente externa a su circuito interno, ya sea una bobina o un imán permanente. Tienen un excelente par de arranque y una alta eficiencia debido al campo constante.

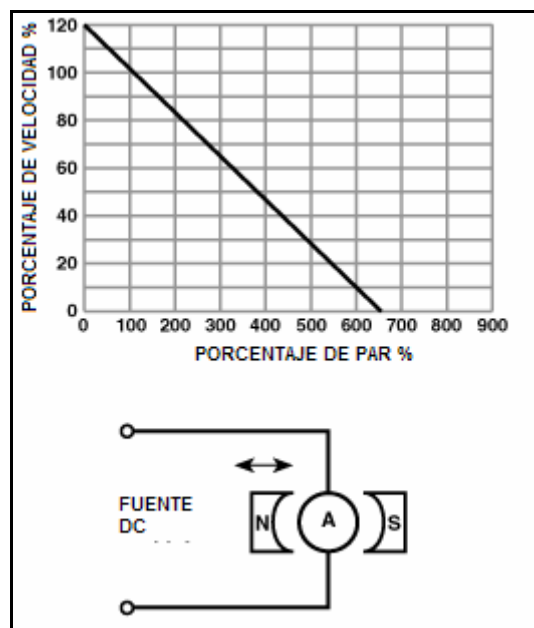


FIGURA 4: MOTOR CON CAMPO INDEPENDIENTE

-Excitación Compuesta: Tiene los dos circuitos de campo, en paralelo y en serie, por lo que da como resultado una combinación de los dos tipos de motores.

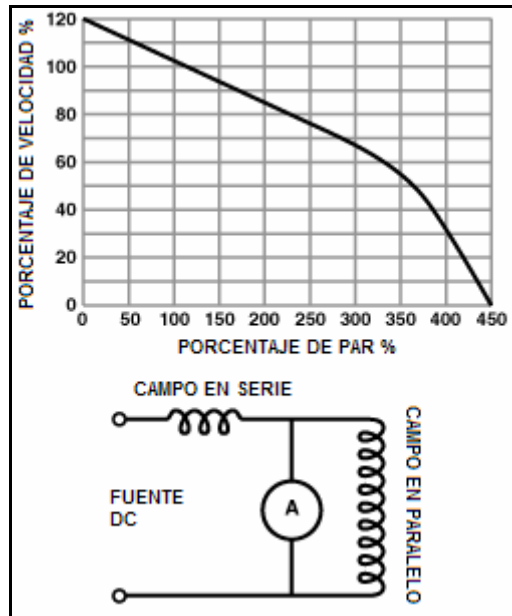


FIGURA 5: MOTOR CON CAMPO COMPUESTO

La motocicleta cuenta con un motor eléctrico de corriente directa, marca Applied Motors Inc., de tipo excitación independiente con imanes permanentes, con las siguientes características:

- Voltaje nominal: 36 V
- Corriente nominal: 35 A
- Velocidad: 3600 RPM
- Potencia nominal: 1.5 HP (1.1 kw)
- Par: 2.1 lb/ft

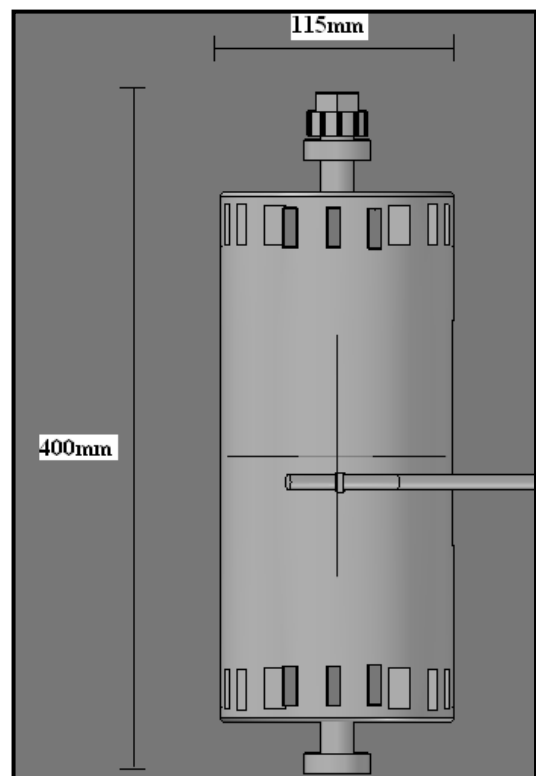


FIGURA 6: MOTOR DE IMANES PERMANENTES

-BATERÍAS

Una batería es un dispositivo electroquímico que almacena energía en forma química. Al conectar sus terminales a una carga, la energía química se convierte en energía eléctrica debido a la diferencia de potencial y al flujo de corriente en la carga eléctrica conectada a ella. Está formada por celdas que tienen dos electrodos (positivo y negativo) y se conectan en serie para aumentar el voltaje.

Las baterías tienen una resistencia interna que puede variar dependiendo de su estado de carga; normalmente se quiere que su resistencia interna sea baja para que puedan entregar mayor cantidad de energía en un determinado tiempo y tengan menos pérdidas.

Características de las baterías:

-Capacidad: La capacidad está expresada en amperes-horas (Ah) y nos dice la cantidad de corriente que se puede tomar de la batería durante un determinado tiempo. Normalmente se puede obtener este dato utilizando una gráfica que indica el tiempo de descarga y la capacidad a esta tasa de descarga. La eficiencia de la batería puede variar dependiendo del rango de descarga, si se utiliza una mayor cantidad de corriente en un determinado tiempo la eficiencia será menor, si se utiliza poca corriente en el mismo tiempo la eficiencia será mayor. Existen baterías de ciclo profundo que se pueden descargar hasta en un 80%, pero si la batería no es de este tipo puede perder hasta un 40% de su capacidad inicial.

-Voltaje Nominal: Es la suma de los voltajes producidos por cada una de las celdas que componen la batería. Para una batería Plomo-Ácido con 6 celdas, con voltajes nominales de 2 V por celda, da un voltaje nominal de 12 V.

-Vida útil: La duración de una batería está dada por los ciclos de carga-descarga a la que se somete. Normalmente una batería puede perder entre el 2 % y el 25 % de su capacidad cada año. La vida de una batería está ligada a las temperaturas de funcionamiento, si se someten a temperaturas altas en la carga o descarga los materiales con que están hechas se degradarán y su vida disminuirá.

-Densidad de energía: Nos indica la cantidad de energía por unidad de volumen: Wh/l.

-Energía específica: Nos indica la cantidad de energía por unidad de peso Wh/kg. Actualmente la batería con menor densidad de energía es la batería de plomo-ácido y la que tiene mayor densidad es la de aluminio-aire.

-Densidad de Potencia: Expresa qué tan rápidamente se puede obtener energía de una batería que tiene un volumen determinado. A partir de este dato se puede obtener la corriente máxima que puede entregar. La densidad de potencia se expresa en W/l.

-Potencia específica: Expresa qué tan rápidamente se puede obtener energía de una batería que tiene un peso determinado. A partir de este dato también se puede obtener la corriente máxima que puede entregar. La potencia específica se expresa en W/kg.

-Eficiencia: Es la relación porcentual entre la energía eléctrica recibida en el proceso de carga y la energía que la batería almacena y que puede entregar durante la descarga. La batería de plomo-ácido tiene eficiencias que pueden ser de más del 90%.

Tabla 2.1. Propiedades de baterías eléctricas para vehículos (Westbrook 2001)

Tipo de batería	Máxima densidad de energía [Wh/kg]	Máxima densidad de potencia [W/kg]	Máxima velocidad de recarga 80% [min]	Temp. de operación [C°]	Ciclos de descarga al 80% antes de reemplazar [cant.]	Estimación de costos de producción a gran escala [\$ por kWh]
Plomo-ácido	35	150	-	Ambiente	1000	60
Plomo ácido avanzado	45	250	-	Ambiente	1500	200
Plomo ácido de válvula regulada	50	150+	15	Ambiente	700+	150
Plomo ácido de lámina metálica	30	900	15	Ambiente	500+	-
Níquel-hierro	50	100	-	Ambiente	2000	150-200
Níquel-Zinc	70	150	-	Ambiente	300	150-200
Níquel-cadmio	50	200	15	Ambiente	2000	300
Níquel-hidruro metálico	70	200	35	Ambiente	2000+	250
Sodio-azufre	110	150	-	350°	1000	150
Sodio-cloruro de níquel	100	150	-	300°	700+	250
Litio-sulfuro de hierro	150	300	-	450°	1000	200
Litio-polímero sólido	200	350	-	80-120	1000	150
Litio-ion	120-150	120-150	<60	Ambiente	1000+	150
Aluminio-aire	220	30	-	Ambiente	-	-
Zinc-aire	200	80-140	-	Ambiente	200	100

FIGURA 7: COMPARACIÓN DE BATERÍAS

-Batería Plomo-Ácido:

Fueron fabricadas por primera vez por Gaston Planté en 1859. Este tipo de baterías son las más económicas del mercado ya que sus materiales son baratos y abundantes. Los electrodos internos están hechos de Plomo así como el electrodo negativo y positivo de cada placa. El material activo de la placa positiva es el óxido de plomo (PbO_2), y su electrolito es ácido sulfúrico, cuentan con separadores entre placas, para evitar el contacto e impedir que se produzca un corto circuito. Tienen una energía específica de 25 a 35 Wh/kg, lo que es bajo en comparación a las demás pero tienen una buena potencia específica, alrededor de 200 W/kg, lo cual es adecuado para la aceleración de vehículos eléctricos. Ofrece alrededor de 1000 ciclos de carga-descarga al 80%.

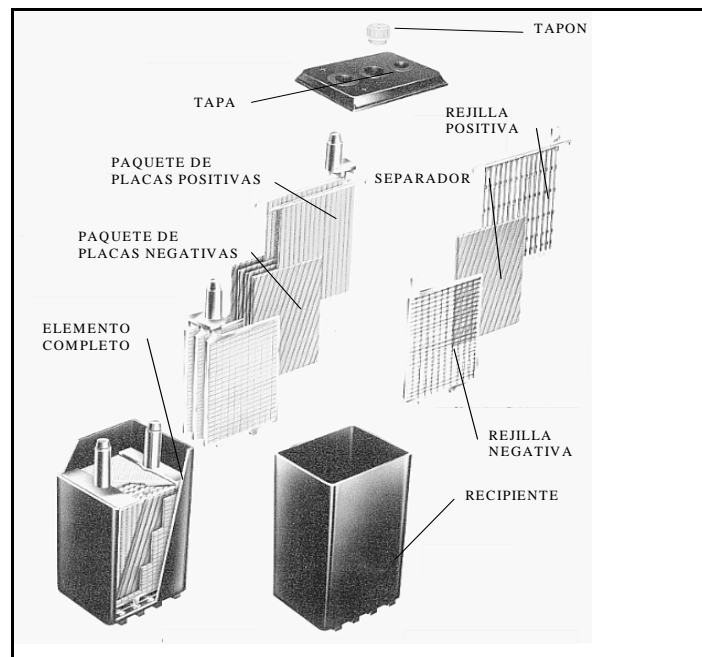


FIGURA 8: ESTRUCTURA INTERNA DE UNA BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO

Las 3 baterías usadas por la motocicleta eléctrica son del tipo Plomo-Ácido, marca B.B.BATTERY modelo BP33-12(s) con las siguientes características:

-Voltaje nominal: 12 V .

-Peso: 11.25 kg

-Resistencia interna: $<9m\Omega$

-Capacidad Nominal: 30 Ah a 20 horas ó 19.8 Ah a 1 hora

-Corriente máxima de descarga (5 seg): 495 A

-Máxima corriente de carga (contínua): 9.9 A

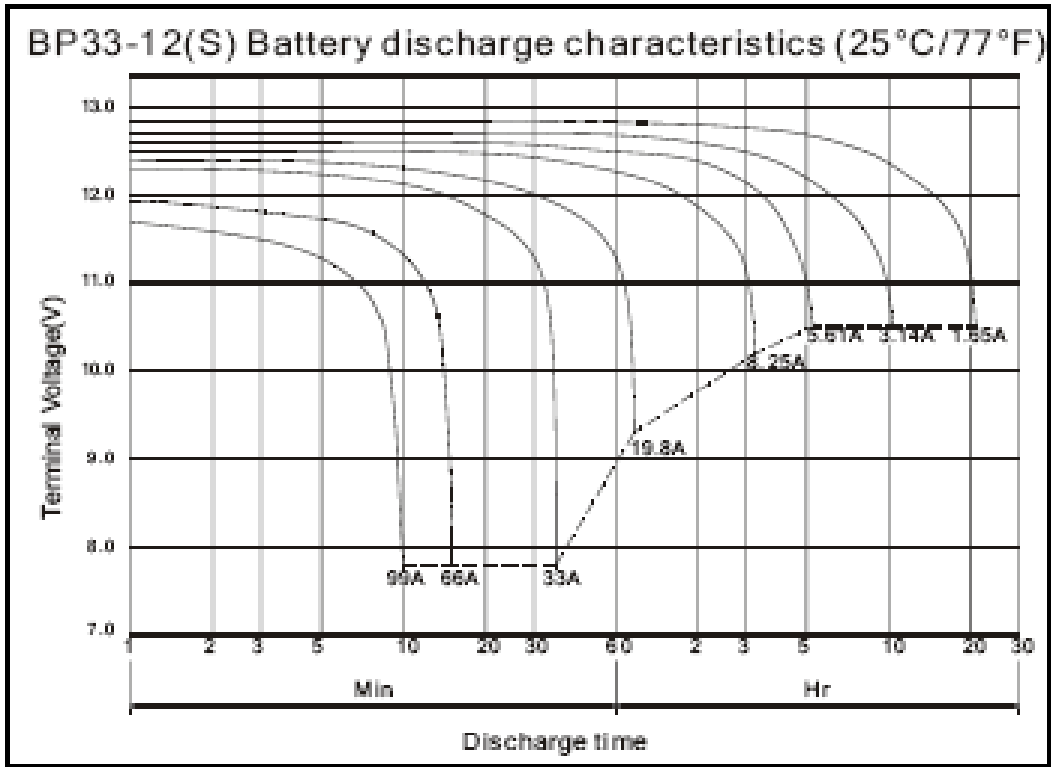


FIGURA 9: GRÁFICA DE DESCARGA DE LA BATERÍA USADA

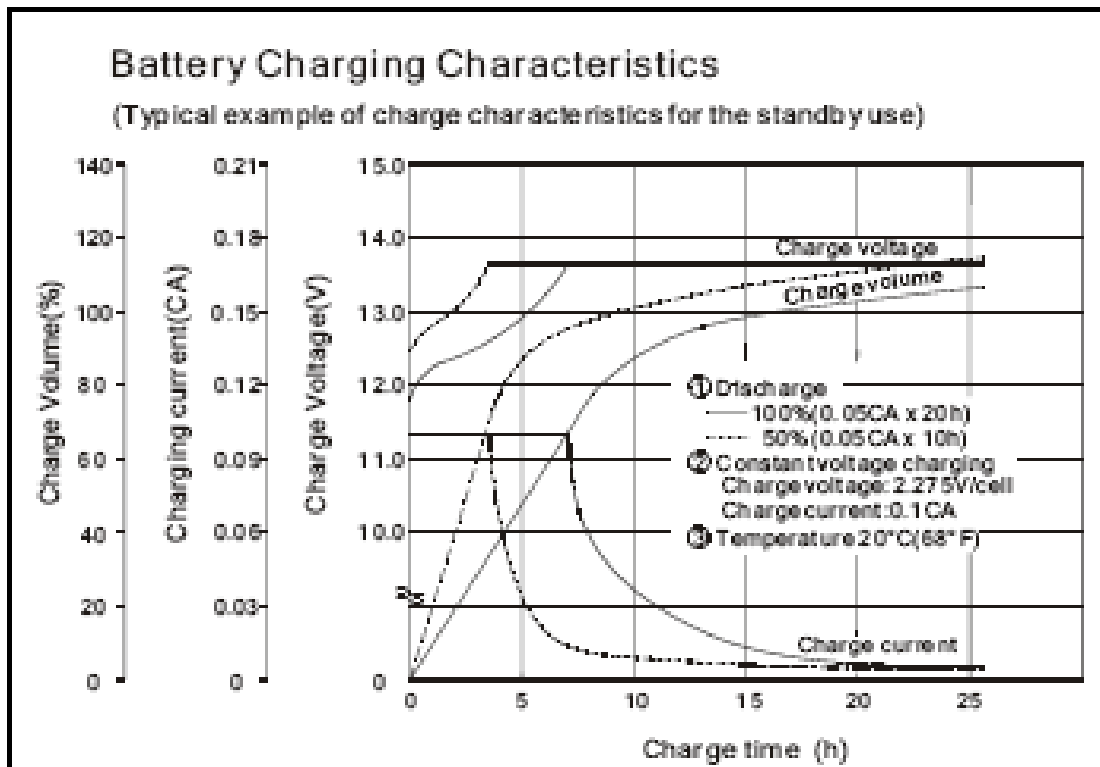


FIGURA 10: GRÁFICA DE CARGA DE LA BATERÍA USADA

1.2.2 TRANSMISIÓN

El sistema de transmisión de la motocicleta está formado por un piñón conectado directamente al motor, una cadena y una catarina unida a la llanta izquierda trasera.

El piñón cuenta con 11 dientes y la catarina con 95, por lo que la relación es de 8.6 a 1.

Para obtener la velocidad máxima de la motocicleta con esta configuración, se requiere la velocidad máxima del motor, la cual es de 3600 RPM y el perímetro de las ruedas que es de 1.25m, por lo tanto:

$$Vel(km/hr) = \frac{3600RPM}{8.6} = 418.60RPM * 1.25m = 523.25(m/Min) * 60Min/1000m = 31.39Km/hr$$

Por lo que la velocidad máxima que podrá desarrollar la motocicleta es de 31.39km/h

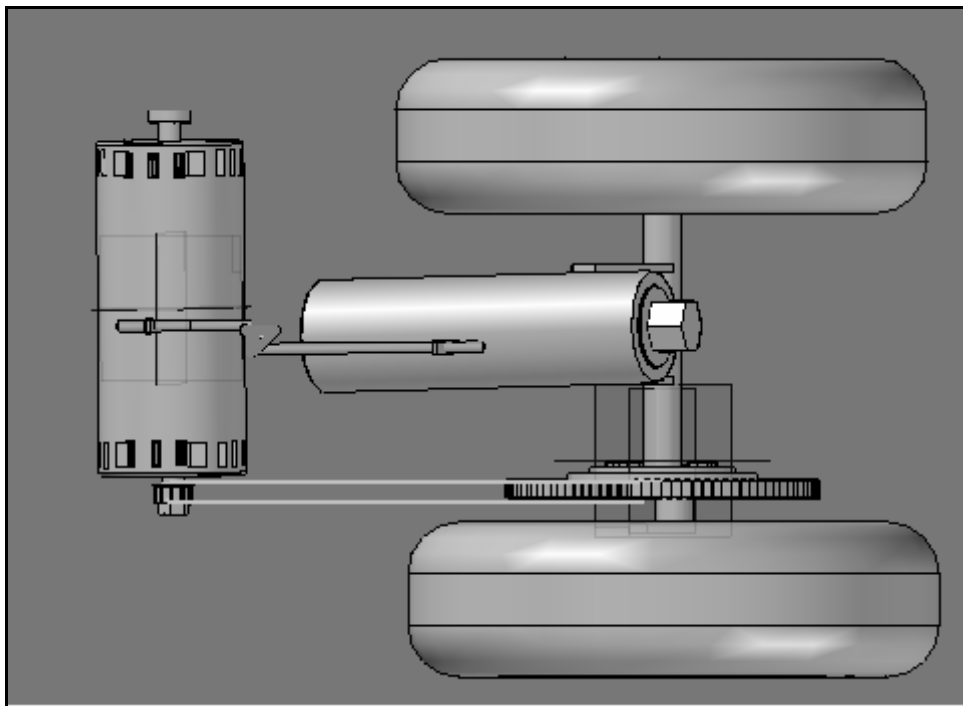


FIGURA 11: TRANSMISIÓN CON MOTOR, PIÑÓN, CATARINA Y CADENA

1.2.3 CONTROL DE VELOCIDAD:

El sistema para controlar la velocidad de la motocicleta es un dispositivo electrónico llamado Troceador, Chopper o PWM (modulador de ancho de pulso), el cual toma el voltaje de una fuente de corriente directa y en la salida la amplitud del voltaje se reduce o se amplifica, conservando la potencia de entrada. Existen 3 tipos de troceadores: elevadores, reductores y mixtos. El tipo de troceador utilizado en la motocicleta es del tipo reductor ya que su voltaje de entrada es 36 V, que es el voltaje que recibe de las baterías, y su voltaje de salida tiene un rango de 0 V a 36 V. El troceador tiene una entrada para regular la velocidad que varía también por medio de voltaje, mediante un potenciómetro conectado al acelerador de la motocicleta. La entrada debe tener una variación de voltaje de 0 a 10 V siendo 10 V el máximo valor para la máxima velocidad. Los troceadores reductores funcionan cortando la señal de directa en un determinado periodo y el promedio de voltaje o voltaje RMS es el que alimentará al motor, a esto se le llama ciclo de trabajo y se obtiene con la fórmula siguiente $CT = (t_{ON} / T) * 100$.

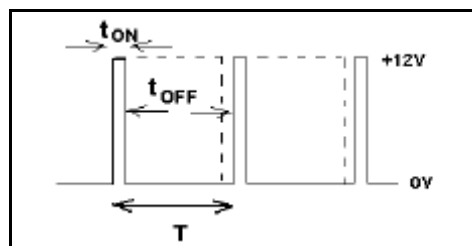


FIGURA 12: SEÑAL DE VOLTAJE CORTADA POR UN TROCEADOR

Los troceadores funcionan con transistores tipo MOSFET capaces de drenar gran cantidad de corriente, usualmente se utilizan muchos de estos transistores en paralelo para que cada uno drene una parte del total de corriente y también es utilizado para asegurar el circuito, ya que si uno de estos transistores falla los demás seguirán drenando corriente, siempre y cuando ésta no exceda el máximo de cada transistor. También se utilizan capacitores en paralelo en cada transistor para reducir el rizo de la señal de voltaje, aquí el capacitor funciona como un filtro paso bajas para el voltaje, el mismo efecto que tendrá la corriente al pasar por un inductor.

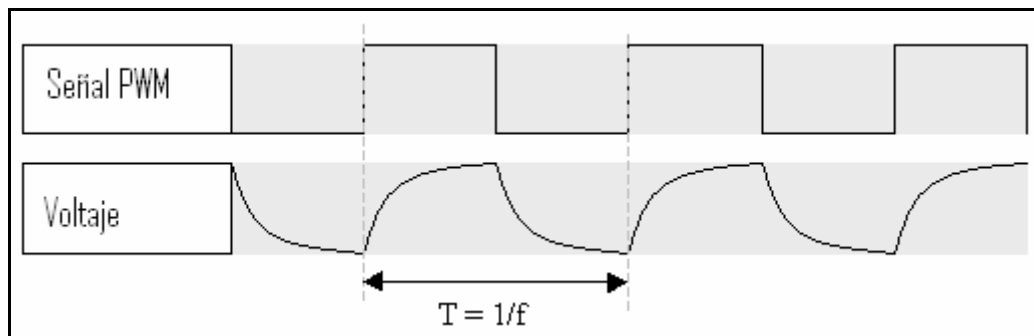


FIGURA 13: SEÑAL DE VOLTAJE DESPUES DE PASAR POR UN FILTRO

Algo importante que se debe tomar en cuenta para la utilización de los troceadores es su frecuencia de operación, la cual está determinada por distintas características del sistema. La más importante es la inercia del motor, la cual es mecánica y eléctrica, la mecánica va a depender de las características físicas del rotor, y la eléctrica se debe a la inductancia del embobinado del rotor. Si el motor presenta mucha inercia y la frecuencia de operación es baja, en el encendido del motor se presentará una notable variación de velocidad, hasta que tome una velocidad constante.

Con respecto a las pérdidas de potencia en relación a la frecuencia, encontramos que al tener una mayor frecuencia de conmutación las pérdidas en los MOSFETS serán mayores, debidas a la capacitancia interna en la compuerta de excitación, la ecuación para esta pérdida es la siguiente:

$$P_m = C_g \cdot V_g^2 \cdot F_s$$

Donde:

P_m : Es la potencia que se pierde en la compuerta del MOSFET

C_g : Es la capacitancia de la compuerta del MOSFET

V_g : Es el voltaje aplicado a la compuerta

F_s : Es la frecuencia de conmutación

Por el lado del inductor del motor, se puede tener un intervalo de frecuencias óptimas para tener una mejor eficiencia. Si la frecuencia es muy baja el motor tendrá que romper constantemente la inercia mecánica y consumirá mayor corriente y por otro lado si la frecuencia es muy alta, el inductor del motor se comportará como un filtro paso bajas para la corriente y la atenuará produciendo una pérdida en forma de calor.

Normalmente se utiliza un intervalo de frecuencias de 5 a 20 khz. Estas frecuencias dependen del tipo de sistema que se esté usando.

En la figura 14 se muestra la gráfica de un motor funcionando con un ciclo constante del 50% a diferentes frecuencias de conmutación:

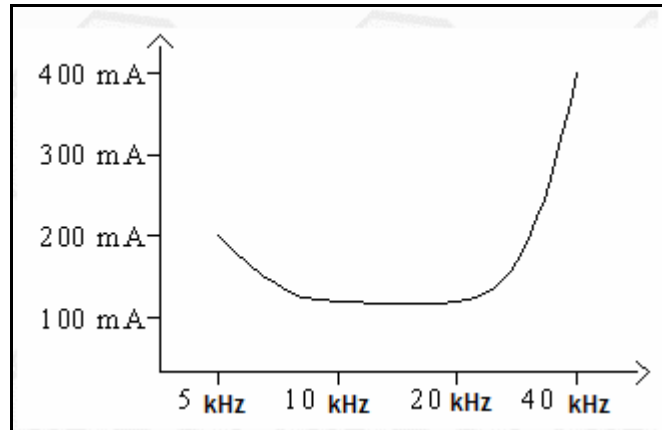


FIGURA14: GRÁFICA DE CONSUMO DE CORRIENTE CONTRA FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN

<http://www.seattlerobotics.org/encoder/200011/pwm.html>

Aquí se puede ver que el consumo de corriente sube en las partes bajas y altas del intervalo de frecuencia.

Otro factor que se debe incluir para el análisis y diseño de un troceador es el ruido producido por la conmutación, las frecuencias menores a 15kHz pueden resultar molestas para el operador del vehículo.

El Troceador utilizado por la motocicleta es marca Taylor Dunn, funciona a una frecuencia de 15 khz, tiene un rango de operación de 36-48 V y un límite de corriente de 350 A.

Uno de los problemas principales al utilizar un controlador por modulación de ancho de pulso es la interferencia por radio frecuencia, producida por los MOSFETS, la cual puede llegar a afectar cualquier sistema electrónico que se encuentre cerca o conectado al suministro principal del circuito eléctrico, en este caso las baterías. Por lo que los circuitos electrónicos deben diseñarse con filtros para evitar la interferencia en alguna medición, lo cual se tuvo que hacer para realizar la caracterización.

1.3 ESTIMACIÓN TEÓRICA DE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DEL VEHÍCULO. TRABAJO, ENERGÍA Y AUTONOMÍA

Cálculo de la energía y potencia promedio en el circuito de prueba:

-Resistencia total al avance del vehículo:

$$R_t = R + R_a$$

donde:

R: resistencia al avance (rodadura)

R_a: resistencia aerodinámica

- Resistencia al avance:

$$R = K * g * P$$

donde:

R: resistencia al avance

K: coeficiente de rodadura (K=0.032) para llantas de caucho contra asfalto⁽¹⁾

g: gravedad (g=9.81 m/s²)

P: peso (P=190 kg con conductor)

por lo que:

$$\underline{R = 59.58N}$$

- Resistencia aereodinámica

$$R_a = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2$$

donde:

C_d (coeficiente aerodinámico) para una motocicleta es aproximadamente .8 ⁽²⁾

A: Área transversal de contacto con el aire = 0.55 m^2

V: velocidad promedio = 8.5 m/seg.

ρ : constante de densidad del aire = 1.2 kg/m^3

Ra=19N

RT=19+59.58=78.58N

¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_resistance

² http://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficients

- Trabajo

$$T = R * D$$

donde:

T: trabajo (J)

RT: resistencia al avance (N)

D: distancia ($D=3100 \text{ m}$, distancia del circuito de prueba)

por lo que:

$$T = 243598 \text{ (J)}$$

-Energía consumida por vuelta

$$E = T / 3600$$

E: energía (Wh)

$$\underline{E = 67.66 \text{ (Wh)}}$$

Sabiendo que una vuelta de 3.1 km se hace en 7.9 minutos la potencia promedio será de:

$$P = E/t = 67.66\text{Wh}/0.11\text{h} = 615.14\text{W}$$

-Cálculo de la autonomía de las baterías:

$$C = \frac{Et}{Vt}$$

donde:

C: capacidad de la batería (C=19.8Ah a una hora (la mínima))

Et: energía total almacenada en la batería (Wh)

Vt: tensión de trabajo del motor (Vt=36 V)

$$Et = C * Vt$$

$$Et = 19.8\text{Ah} * 36\text{V} = 712.8 \text{ Wh totales}$$

$$N = \frac{Et}{E}$$

donde:

N: Número de vueltas al circuito

Et: Energía total almacenada en la batería (Wh)

E: Energía consumida por vuelta (Wh)

$$N = \frac{712.8}{67.69} = 10.53 \text{ . Vueltas al circuito}$$

-Autonomía

$$A = N * D$$

donde:

D: distancia del circuito

$$A = 10.53 * 3100\text{m} = 32.55\text{km}$$

Como una regla de protección para la vida útil de la batería es importante no utilizar el 100% de su capacidad, se recomienda utilizar máximo un 80% del total, de lo contrario la batería podría sufrir daño irreparable, por lo que la autonomía se redujo un 20%:

$$\underline{A = 32.55km * 0.8 = 26km}$$

-Cálculo de la potencia máxima requerida para subir una rampa

-Energía consumida en una rampa

$$R_t = R_r + R_p$$

donde:

R_t : resistencia total (N)

R_r : resistencia de rodadura (N)

R_p : resistencia en pendientes (N)

$$R_p = p * g * P$$

donde:

p : pendiente ($P = (H * 100) / L$)

H : altura de la rampa ($H = 1.7m$)

L : largo de la rampa ($L = 9.98m$)

$$p = 17.03\%$$

$$\underline{R_p = 316.54 (N)}$$

$$\underline{R_t = 316.54 + 58.58 = 375.12 (N)}$$

$$\underline{T = 3743.69(J)}$$

$$\underline{E = 1.03(\text{Wh})}$$

Potencia promedio si tardó 3 segundos en subir la rampa:

$$\underline{P = 1.03 (\text{Wh}) / .00083 = 1252.91\text{W}}$$

1.4 CARACTERIZACIÓN

El proceso de caracterización se realizó para conocer los parámetros dinámicos de operación (autonomía, corrientes máxima y promedio, potencias máximas y promedio) de la motocicleta. Es un proceso complicado ya que se deben diseñar circuitos para acoplar y filtrar las señales, además de diseñar un programa para la adquisición de datos.

Se realizó un programa para registrar las siguientes variables:

- Velocidad (km/h)
- Distancia (km)
- Voltaje (V)
- Corriente (A)
- Potencia (W)
- Energía (W*h)
- RPM (del motor)

Todas las variables son función del tiempo.

Los dispositivos para hacer la adquisición de datos son los siguientes:

- Laptop Toshiba Satellite 480
- Tarjeta de adquisición de datos *National Instruments* de 16 bits de resolución y rango de voltaje de -10 a 10 V
- Osciloscopio Digital marca Tektronix
- Programa LabView 6.01
- Circuito para acoplar y filtrar voltaje, corriente y velocidad

Las señales eléctricas que se midieron directamente fueron el voltaje de las baterías, la corriente del motor y la velocidad de giro de la catarina del motor. El voltaje total del conjunto de baterías tiene un rango de 28 a 39 V, cuando están descargadas y totalmente cargadas, respectivamente, por lo que se requirió hacer un circuito divisor de voltaje para que la variación de voltaje estuviera entre 0 y 10 V para la tarjeta de adquisición de datos.

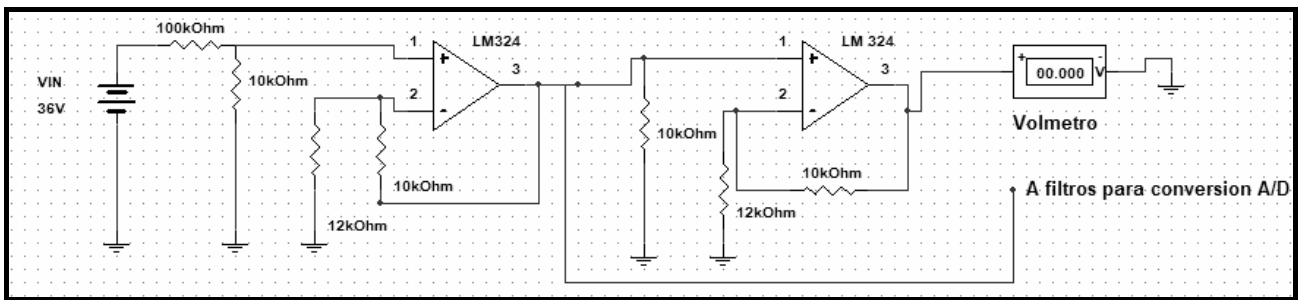


FIGURA 15: CIRCUITO PARA ACOPLAR SEÑAL DE VOLTAJE

Para poder medir la corriente demandada a las baterías, se utilizó una resistencia tipo shunt de 50 A @ 50 mV, que es un dispositivo que permite la medición de corriente mediante un voltaje proporcional a ésta, dando 1 mV por cada Ampere que fluye por ella. Esta se conecta en serie con el circuito eléctrico del controlador, baterías y motor. Posteriormente se amplifica y filtra hasta que esté en un intervalo de 0-10 V.

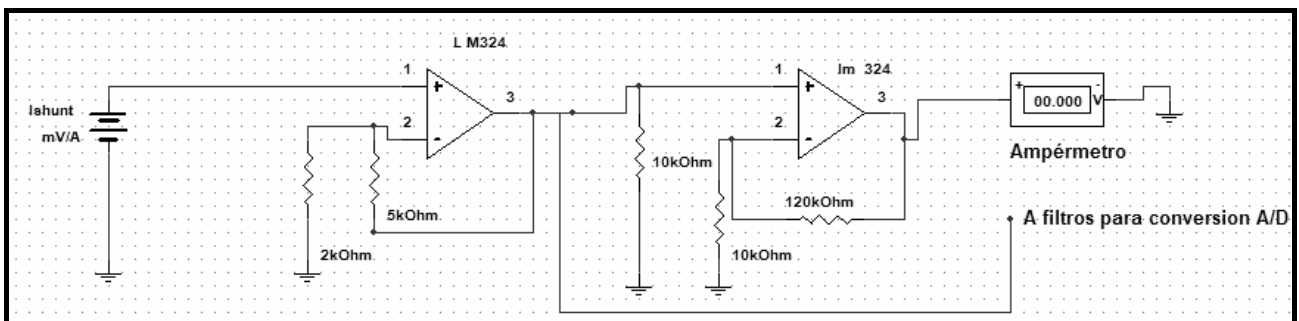


FIGURA 16: CIRCUITO PARA ACOPLAR SEÑAL DE CORRIENTE

La medición de la velocidad de giro se realizó mediante un sensor de efecto Hall que se colocó de frente a la catarina del motor para detectar el giro del motor, el resultado es una señal de corriente alterna la cual se pasará posteriormente por convertidor de frecuencia a voltaje (LM2907N), después por un filtro y un amplificador.

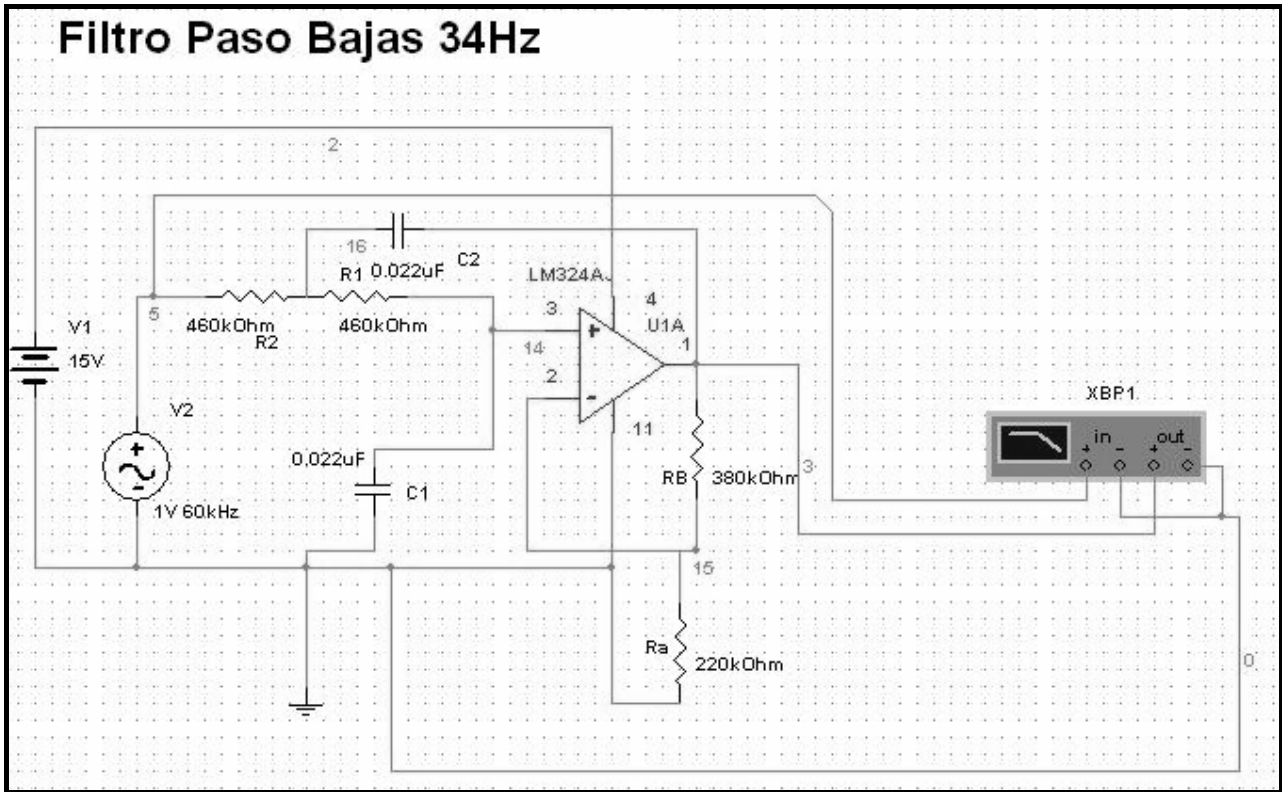


FIGURA 17: CIRCUITO PARA SIMULAR EL FILTRO PASO BAJAS A 34Hz

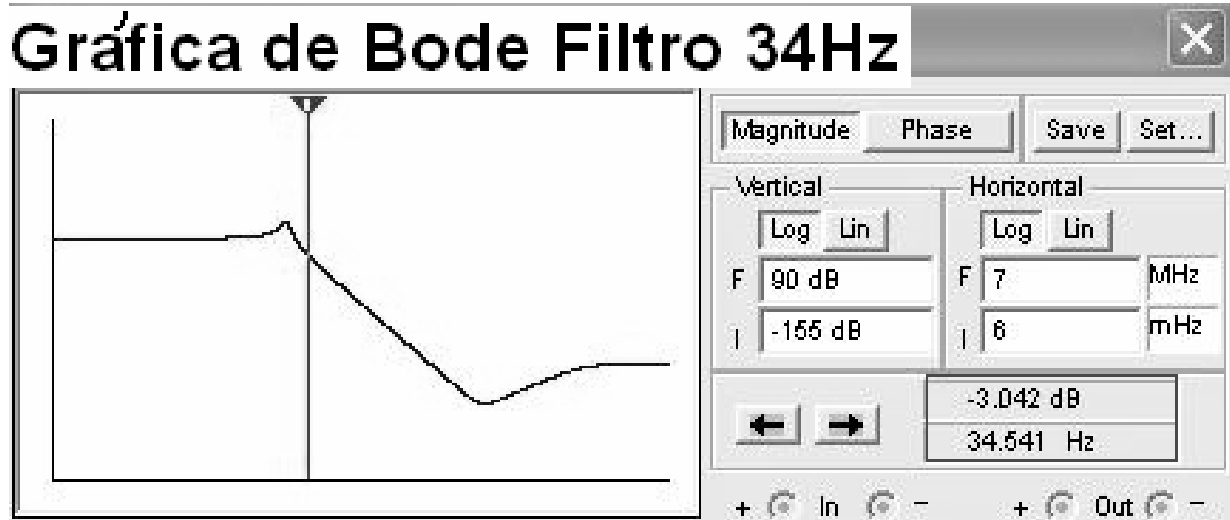


FIGURA 18: SIMULACIÓN DE FILTRO CON FRECUENCIA DE CORTE A 34 Hz

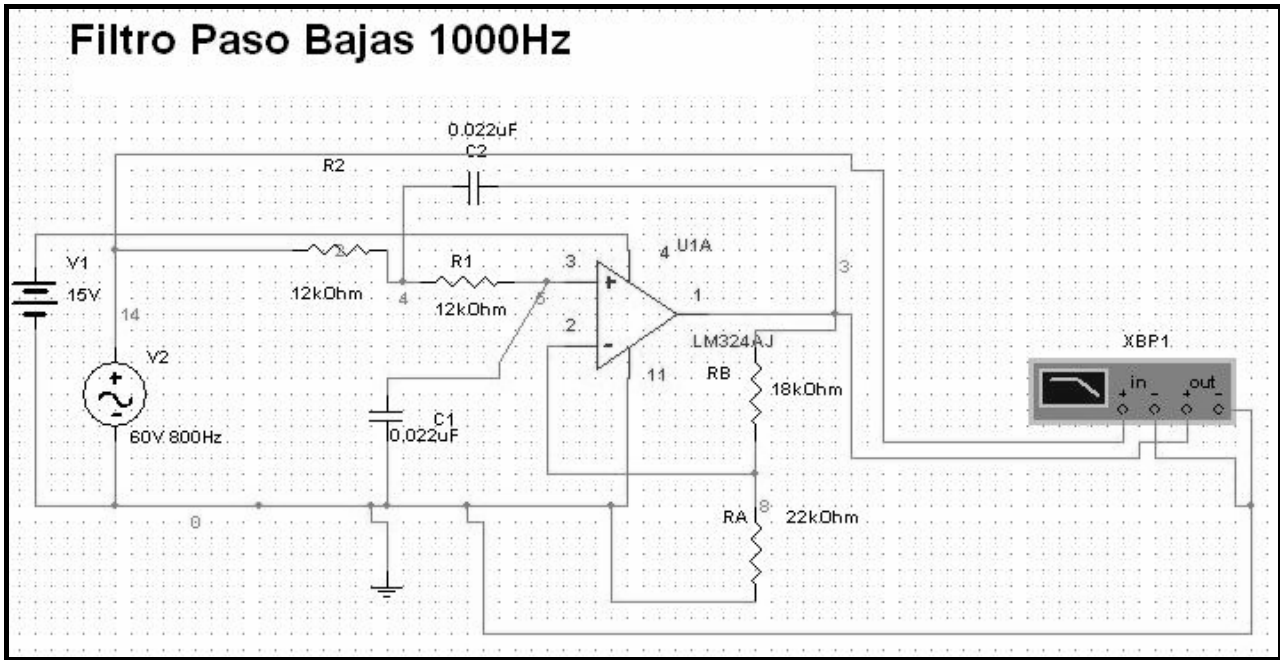


FIGURA 19: CIRCUITO PARA SIMULAR EL FILTRO PASO BAJAS A 1000Hz

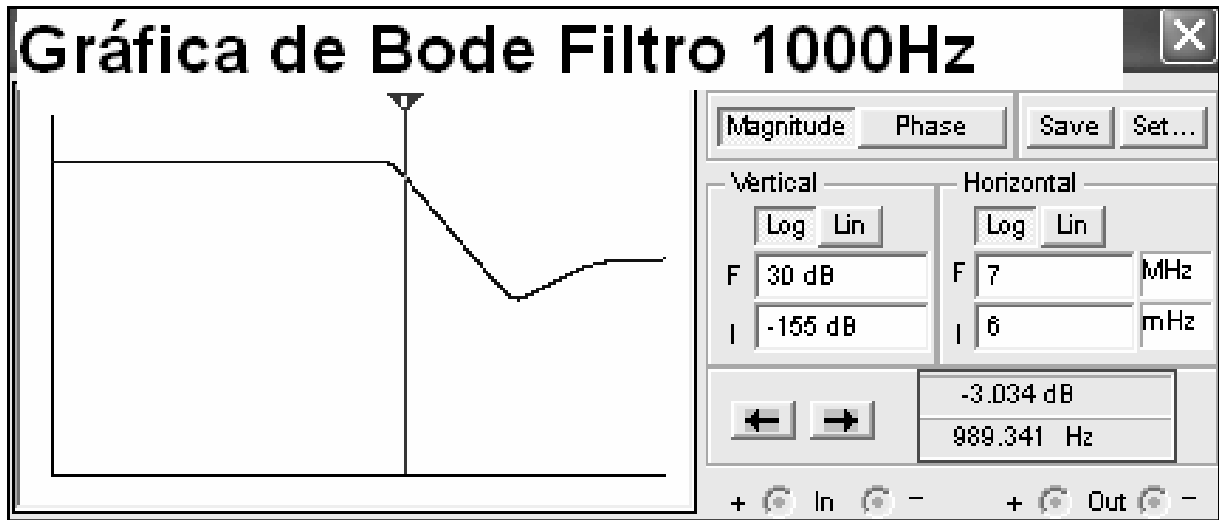


FIGURA 20: SIMULACIÓN DE FILTRO CON FRECUENCIA DE CORTE A 1000Hz

1.4.1 CALIBRACIÓN DE SEÑALES

Los circuitos para acoplar las tres señales principales (voltaje, corriente, velocidad) presentan cambios con respecto a los cálculos teóricos, debido principalmente a la precisión de los componentes electrónicos utilizados y a la filtración de la señal, además de que las frecuencias de corte se tuvieron que ajustar, por lo que se realizó una medición de los voltajes de entrada y de salida, en el caso de los filtros para la señal de voltaje y corriente, y para el caso de la velocidad del motor se midió la frecuencia de entrada, producida por un generador de señales, contra voltaje de salida. Los resultados se colocaron en una tabla para graficarlos y obtener una ecuación y una correlación para conocer la linealidad de los circuitos. Posteriormente esta ecuación la aplicamos en el programa para convertir los valores de voltaje obtenidos con la tarjeta de adquisición de datos a los valores reales de las variables que se midieron.

Tablas:

Señal de voltaje de baterías:

Voltaje salida del filtro (v)	Voltaje entrada del filtro(v)
3.91	20
4.14	21
4.54	22
4.75	23
4.75	24
4.94	25
5.13	26
5.32	27
5.52	28
5.73	29
5.93	30
6.12	31
6.32	32
6.5	33
6.7	34
6.9	35
7.1	36
7.31	37
7.39	38
7.69	39

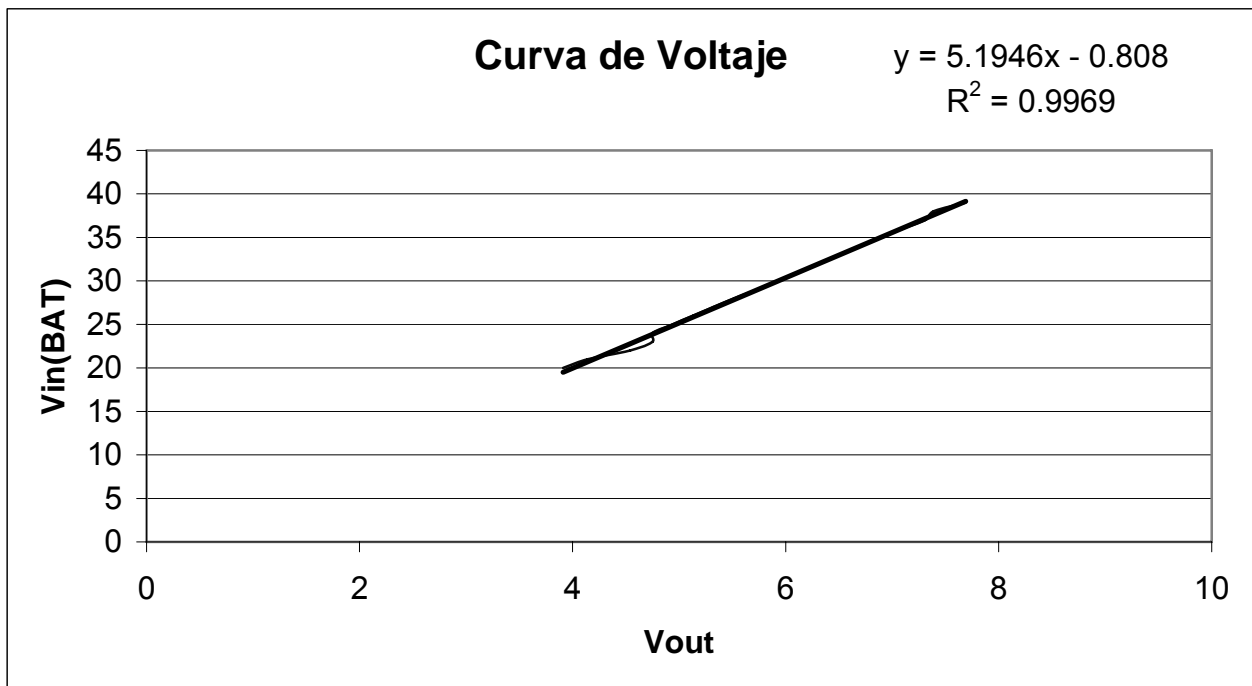


FIGURA 21: GRÁFICA CALIBRACIÓN SEÑAL DE VOLTAJE

Señal de Corriente del Motor:

Voltaje de salida del filtro (V)	Voltaje entrada al filtro (mV)
0.395	10
0.78	20
1.06	30
1.42	40
1.78	50
2.07	60
2.5	70
2.86	80
3.2	90
3.52	100
3.76	108
4.12	119
4.46	130
4.8	137
5.11	148
5.54	160
5.81	168.5
6.44	195
6.74	205
8.81	255
9.95	283

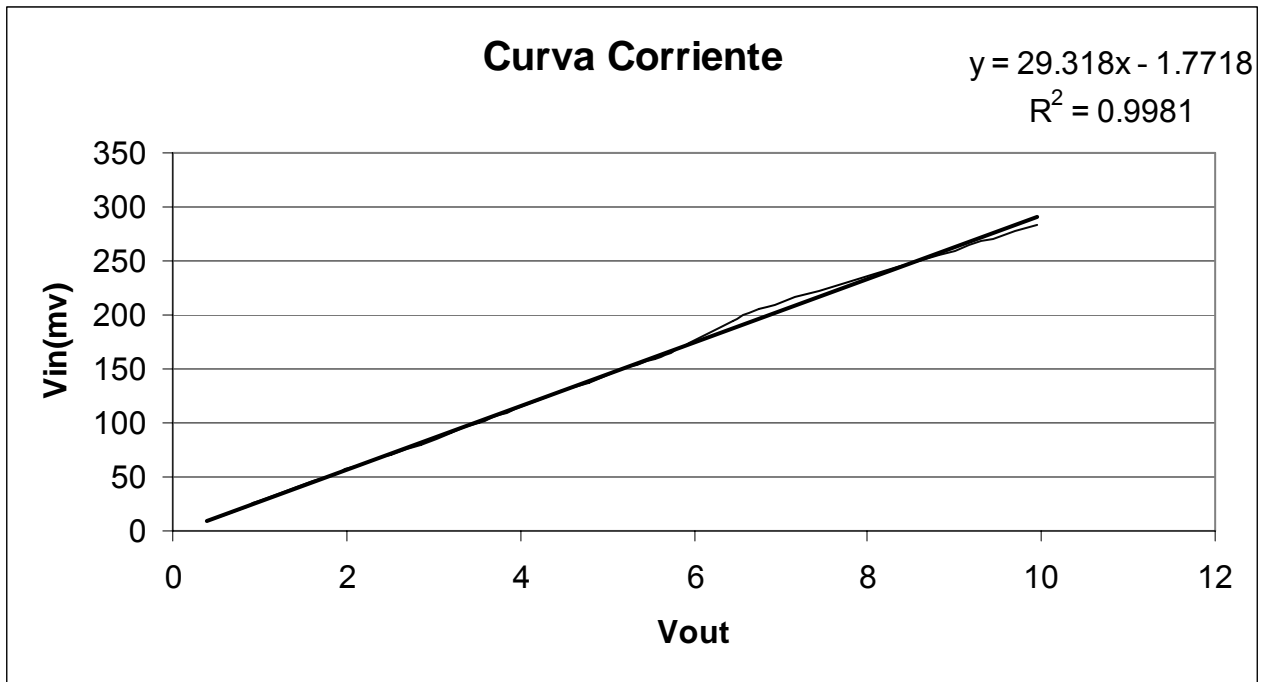


FIGURA 22: GRÁFICA CALIBRACIÓN SEÑAL DE CORRIENTE

Señal de la velocidad de giro:

Voltaje de salida	RPM
0.03	0
0.07	179
1.23	320
1.67	423
2.01	504
2.05	644
2.9	762
3.58	930
4.3	1125
5.2	1448
6.65	1776
7.6	2275
8.9	3153
9.68	3470
10.77	3679
11.55	4095

FIGURA 23: GRÁFICA CALIBRACIÓN SEÑAL DE RPM

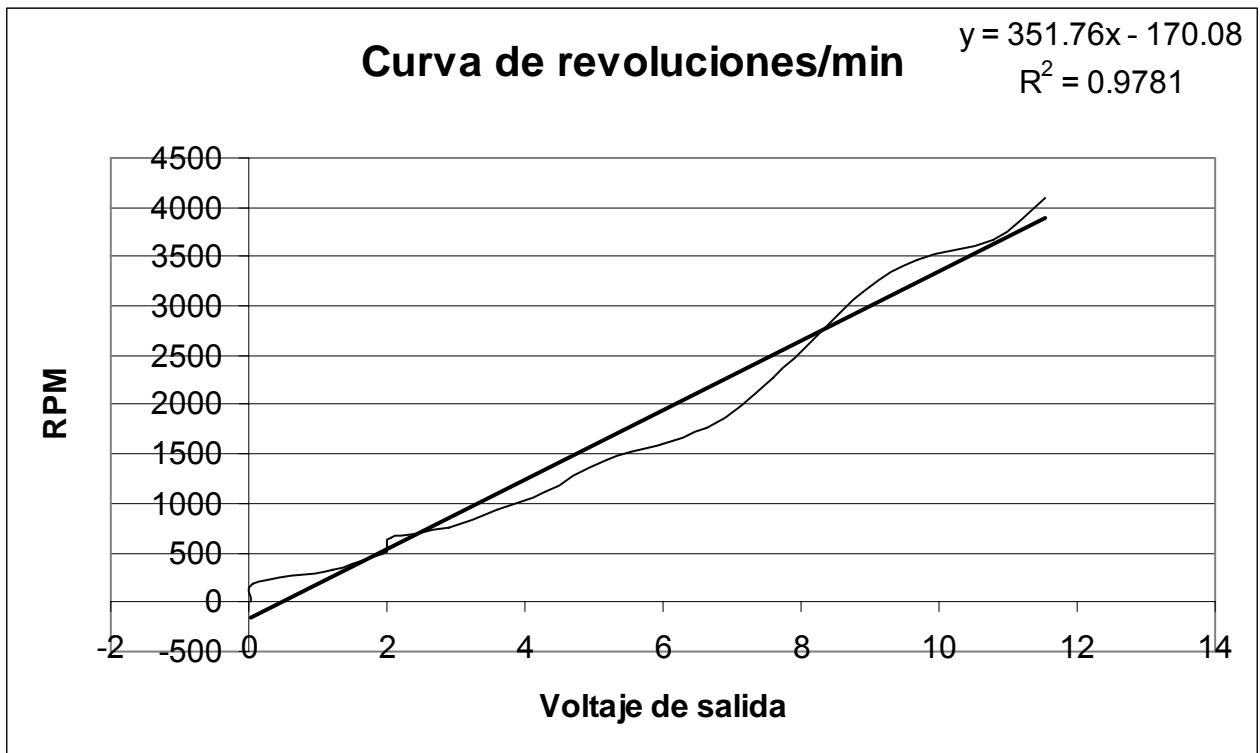


FIGURA 23: GRÁFICA CALIBRACIÓN SEÑAL DE RPM

1.4.2 PROGRAMA PARA ADQUISICIÓN DE DATOS

LabView es un programa hecho para la adquisición de datos, su ambiente gráfico facilita el desarrollo de los comandos y funciones. Existe un gran parecido con este programa y MatLab-Simulink. LabView tiene controladores para soportar distintos tipos de hardware, también tiene subprogramas para prueba y calibración del dispositivo para la adquisición de datos, con esto podemos ver si nuestra tarjeta funciona de manera adecuada. Lo primero para configurar el programa es fijar los canales de entrada (8 canales), de los cuales usamos solo tres (corriente, voltaje y velocidad de giro), posteriormente se realizan las funciones con las ecuaciones y las variables de cada señal para obtener la magnitud real de la entrada de cada canal, además de calcular otras variables como la distancia recorrida, potencia y energía.

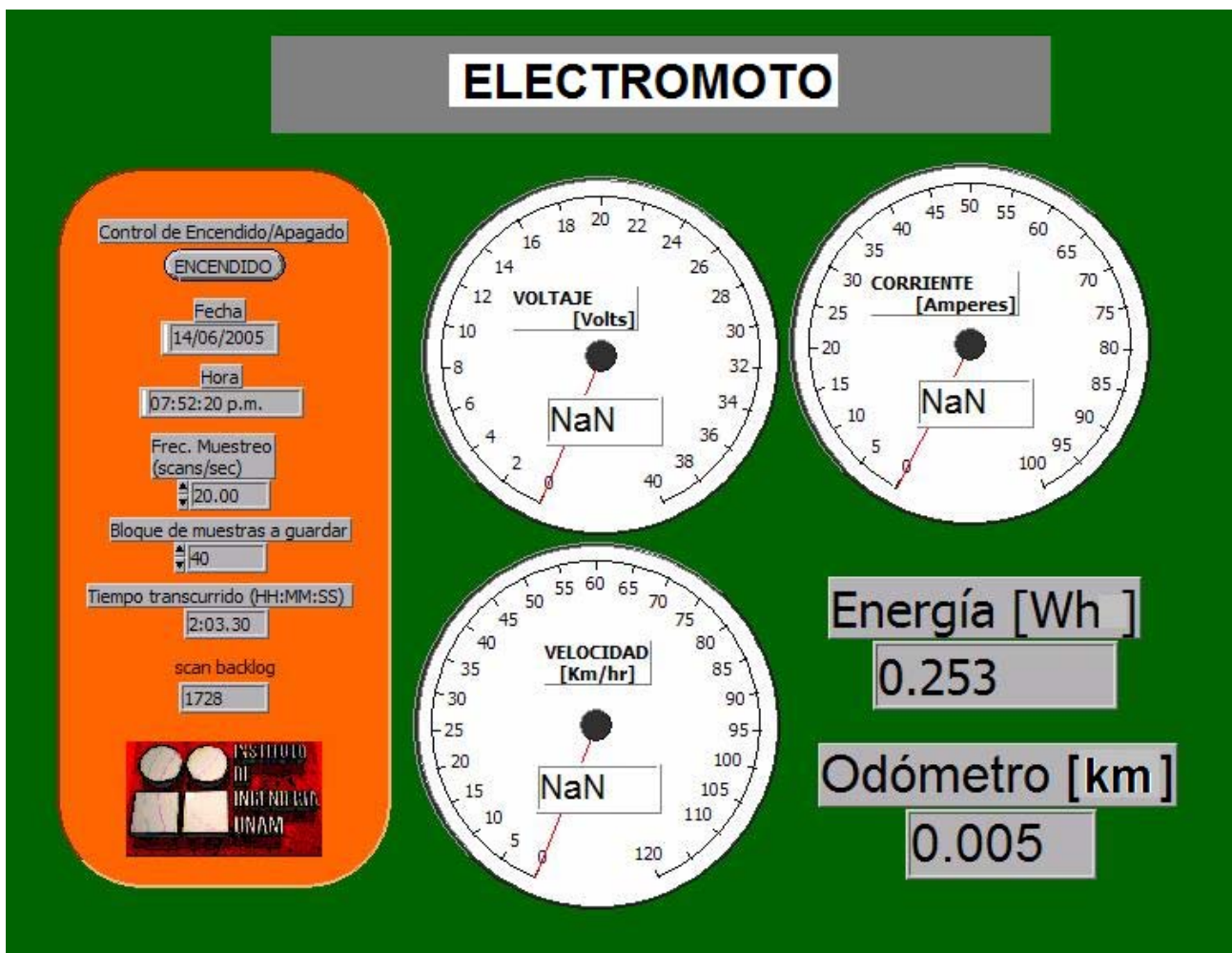


FIGURA 24: PROGRAMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS EN LABVIEW

En la pantalla principal (figura 24) del programa se inicia el programa y se configuran los tiempos de muestreo, en el caso de las pruebas de demanda de corriente máxima se utilizó una frecuencia de muestreo alta: 40 muestras por segundo, en cambio para realizar las pruebas de recorrido libre, el muestreo fue de 10 muestras por segundo.

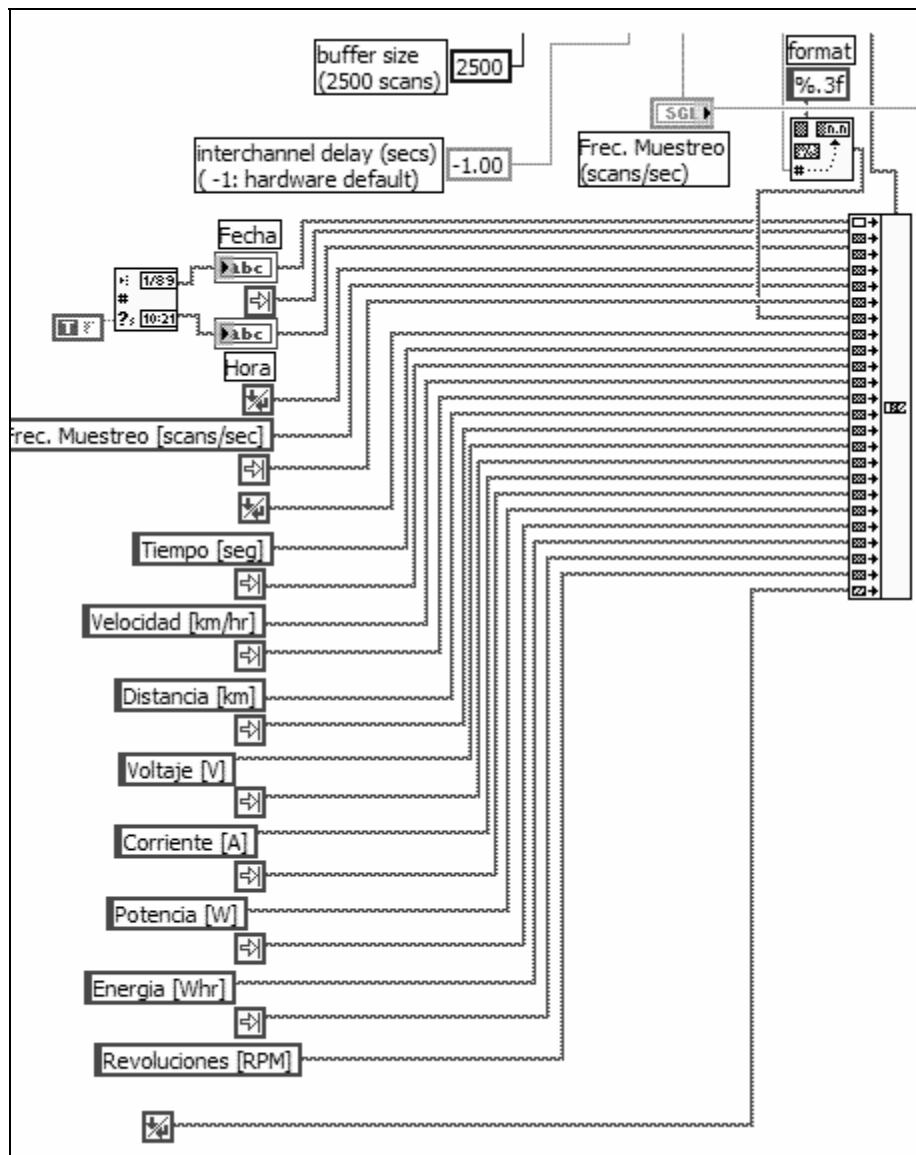


FIGURA 25: VARIABLES DE ENTRADA PARA PROGRAMA EN LABVIEW

Las variables a utilizar para realizar el registro de la adquisición fueron: la fecha, hora, frecuencia de muestreo, tiempo (en segundos), velocidad (en km/h), distancia (km), voltaje (V), corriente (A), Potencia (W), Energía (Wh) y velocidad de giro del motor (RPM).

Todas estas variables son las que se plasman en la hoja de registro, para realizar el análisis posteriormente.

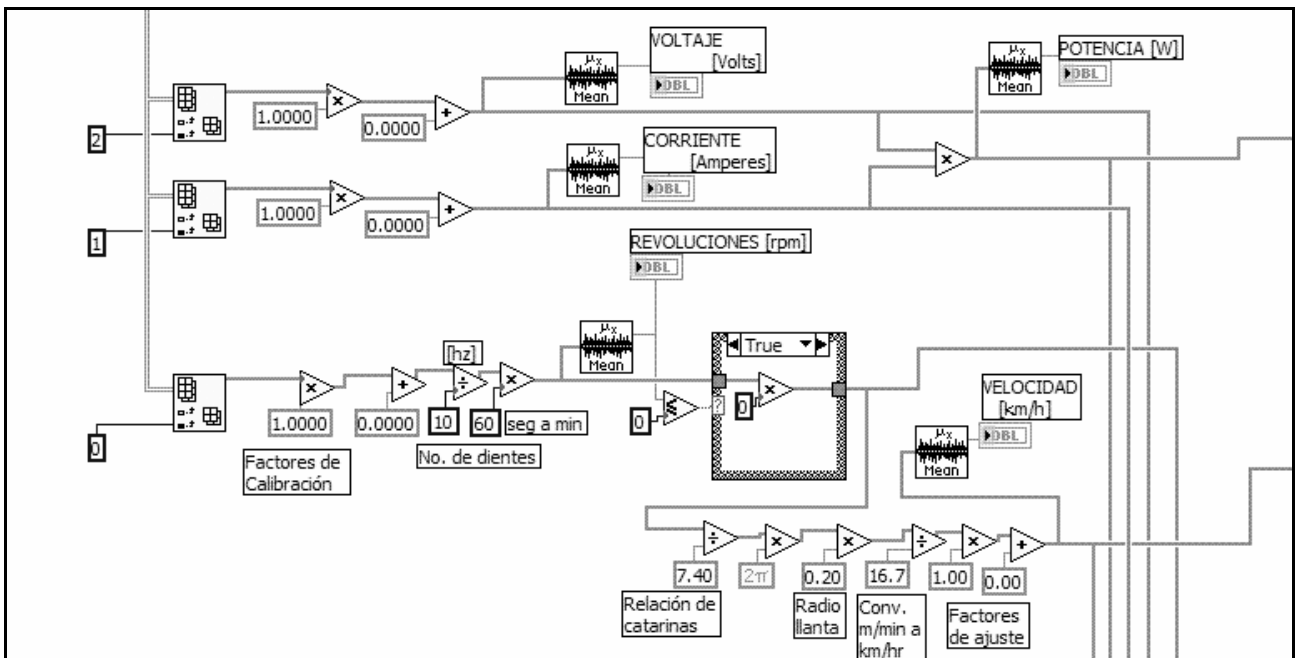


FIGURA 26: CÁLCULOS PARA OBTENCIÓN DE POTENCIA, VELOCIDAD

En la figura 26 se muestra la parte del programa donde las señales de entrada son calibradas con valores establecidos y se realizan los cálculos necesarios para obtener los valores de las variables reales, como son la potencia (producto de la corriente y voltaje), las revoluciones por minuto (que se obtiene dividiendo la señal entre el número de dientes del engrane del motor donde es medida la velocidad de giro y después multiplicada por 60). La velocidad se obtiene de multiplicar las RPM del motor por la relación entre la catarina y el piñón y después este resultado se multiplica por el diámetro de la llanta y por un factor de conversión para convertir a km/h.

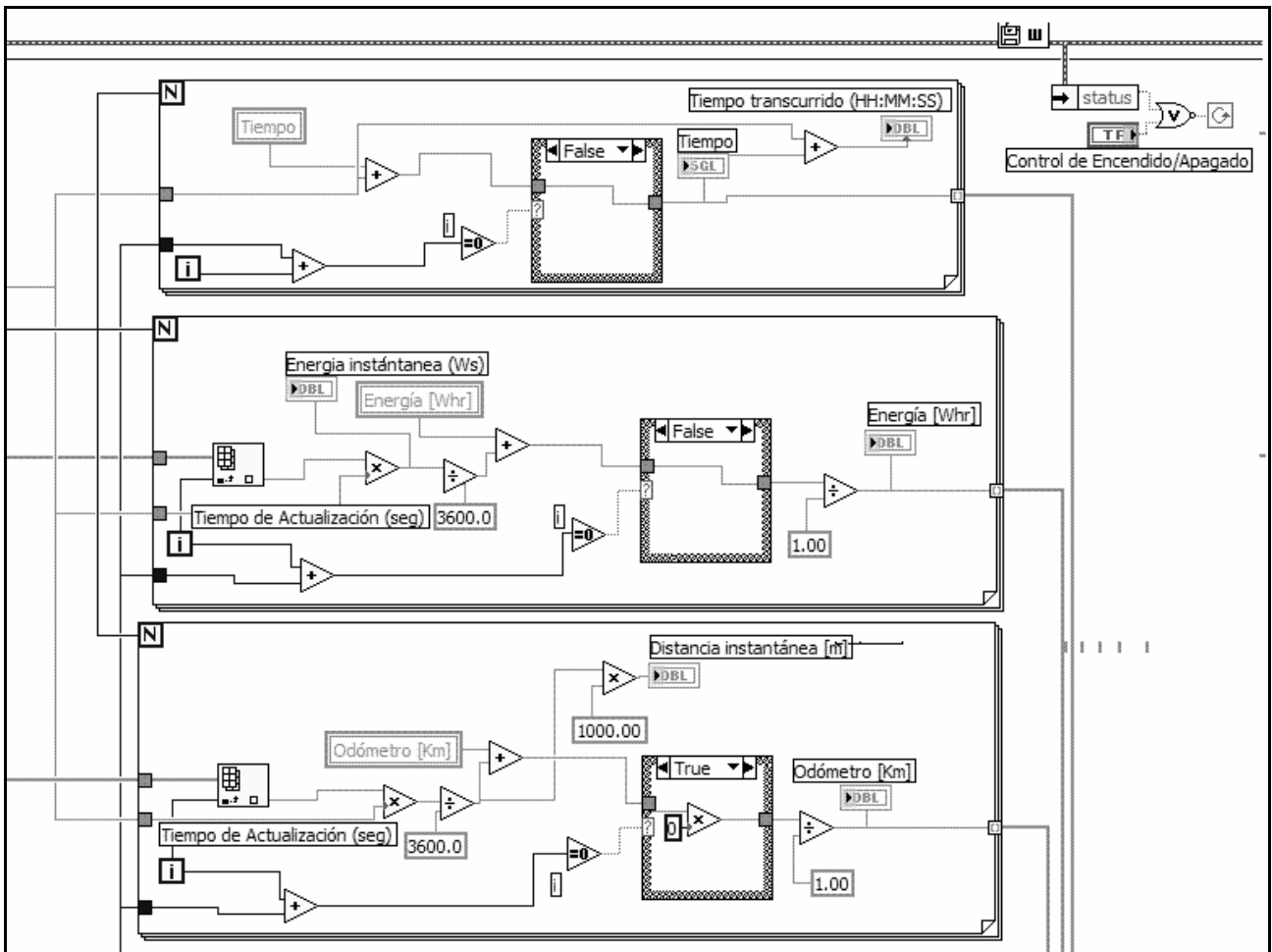


FIGURA 27: CÁLCULOS PARA OBTENCIÓN DE DISTANCIA Y ENERGÍA

En la figura 27 se muestran los cálculos en el programa donde se realiza la integración de las variables de Potencia y Velocidad con respecto al Tiempo para obtener Energía consumida (Wh) y Distancia recorrida (km), respectivamente.

Al final del programa todas las variables obtenidas son acomodadas en una matriz que ordena los datos en columnas por el tipo de dato y en los renglones coloca el dato de cada variable con respecto al tiempo transcurrido.

1.4.3 PRUEBAS

Se realizaron dos tipos de pruebas:

-Recorrido normal de 3 km: esta prueba se realizó para conocer el voltaje, corriente, potencia y energía promedio consumidos por el vehículo en un trayecto cerrado en el circuito interno de la UNAM. En este trayecto (figura 28 y 29) se encontraron pendientes con poca inclinación.

La distancia del trayecto es de 3.03 km.



FIGURA 28: RECORRIDO DE 3.1 km UBICADO EN EL CIRCUITO ESCOLAR DE CU



FIGURA 29: VISTA SATELITAL DEL RECORRIDO EN CU

-Demanda Máxima: Esta prueba se realizó para medir el consumo máximo de corriente y potencia del vehículo. Los resultados de esta prueba nos servirán para tener un control adecuado en el flujo de energía de la batería-celda de combustible al motor y no dañar ningún dispositivo. Se realizó en una pendiente de 10 grados en el estacionamiento del posgrado de ingeniería. Iniciando el recorrido sobre la pendiente de la rampa con velocidad cero.

1.4.4 RESULTADOS

Al realizar cada recorrido se le dió un nombre al archivo donde se guardaron los datos obtenidos. El archivo guardado es de tipo texto donde se separa en cada columna el tipo de dato que se está guardando además de marcar al inicio de la hoja la fecha, hora y la frecuencia con la que se guardaron los datos. Estos datos son posteriormente exportados a Excel para hacer el análisis gráfico y sacar promedios, máximos y mínimos.

Un ejemplo de 10 datos guardados en una hoja de cálculo:

07/11/2005	02:03:23 p.m.						
FREC. Muestreo [scans/sec] 20							
Tiempo [seg]	Velocidad [km/h]	Distancia [km]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Energía [Wh]	Revoluciones [RPM]
0	0.001	0	36.674	0.014	0.51	0	0.069
0.05	0.001	0	36.674	0.014	0.51	0	0.069
0.1	0.001	0	36.674	0.014	0.51	0	0.069
0.15	0.001	0	36.674	-0.129	-4.74	0	0.069
0.2	0.001	0	36.674	0.014	0.51	0	0.069
0.25	0.001	0	36.674	-0.129	-4.74	0	0.069
0.3	0.001	0	36.674	0.014	0.51	0	0.069
0.35	0.001	0	36.674	-0.129	-4.74	0	0.069
0.4	0.001	0	36.674	0.014	0.51	0	0.069

FIGURA 30: TABLA EJEMPLO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El número de datos guardados por cada recorrido asciende a 14000 y el tiempo promedio por recorrido es de 10 minutos.

Se realizaron más de 20 pruebas, de ellas se seleccionaron las 5 pruebas con la distancia recorrida más cercana a la real (3.01km) y se graficaron, con respecto al tiempo, las variables de Distancia, Voltaje, Corriente y Potencia, como se muestran a continuación:

Prueba 5

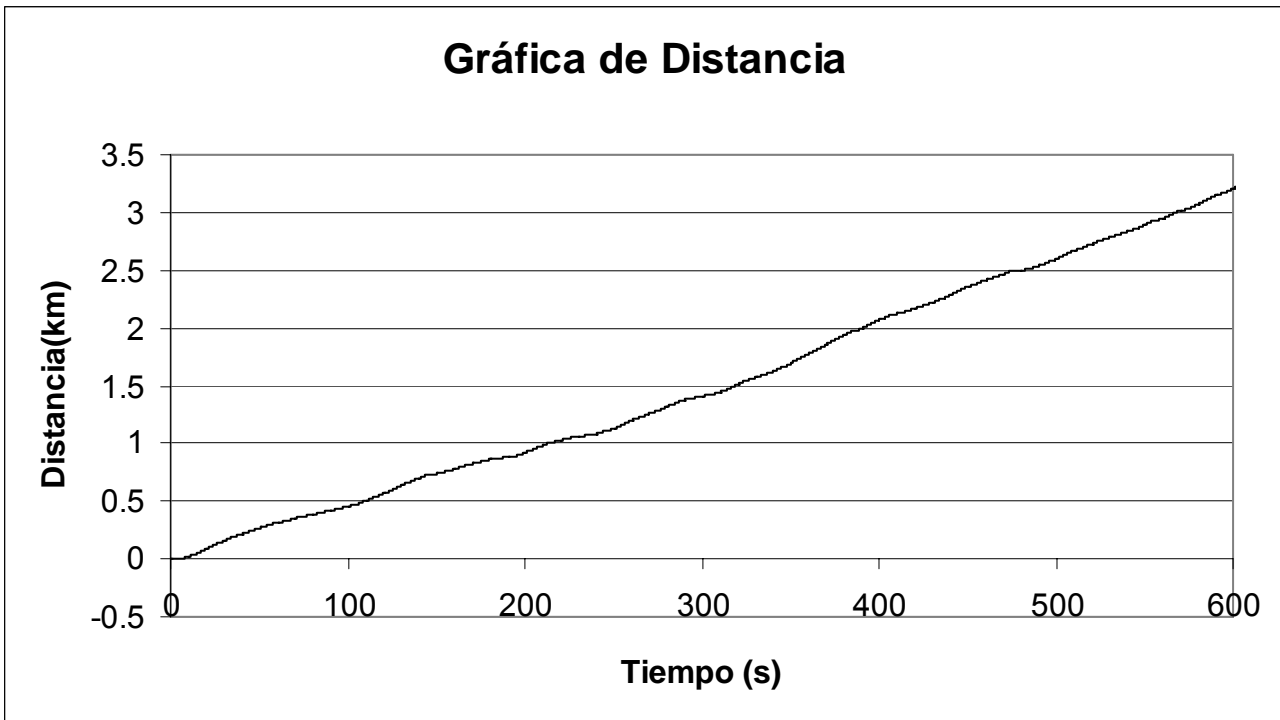


FIGURA 31: GRÁFICA DE DISTANCIA RECORIDA CONTRA TIEMPO

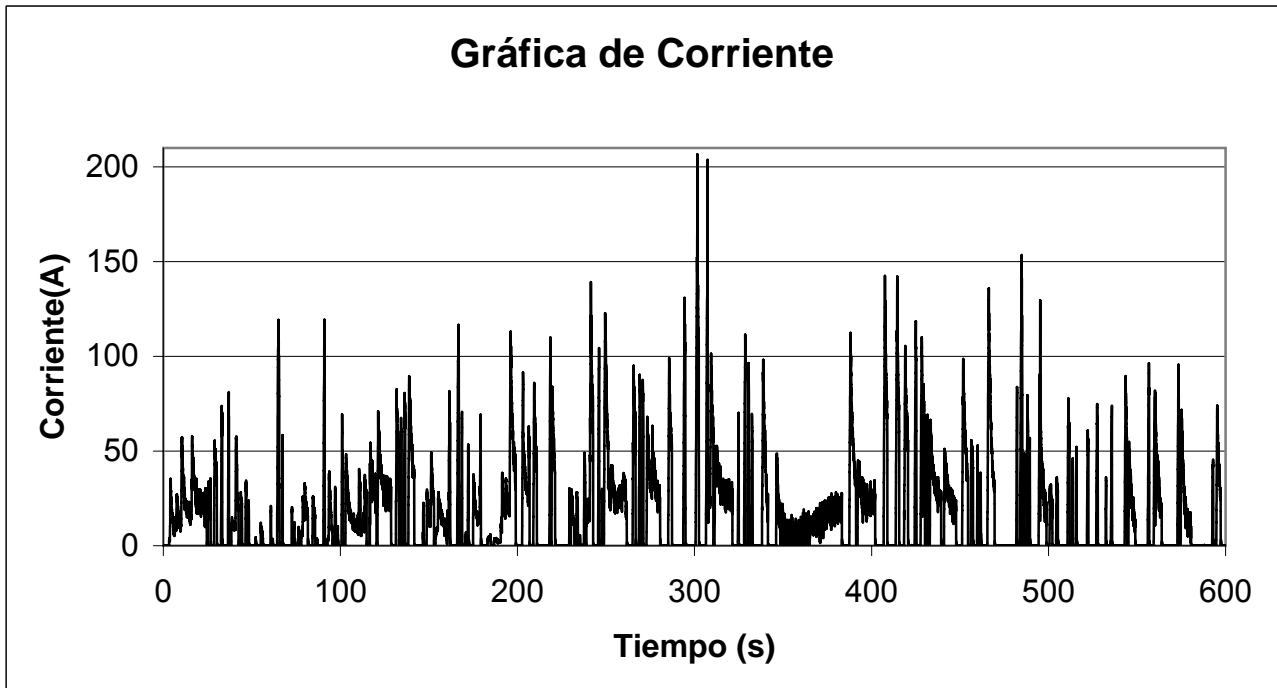


FIGURA 32: GRÁFICA DE CORRIENTE CONSUMIDA CONTRA TIEMPO

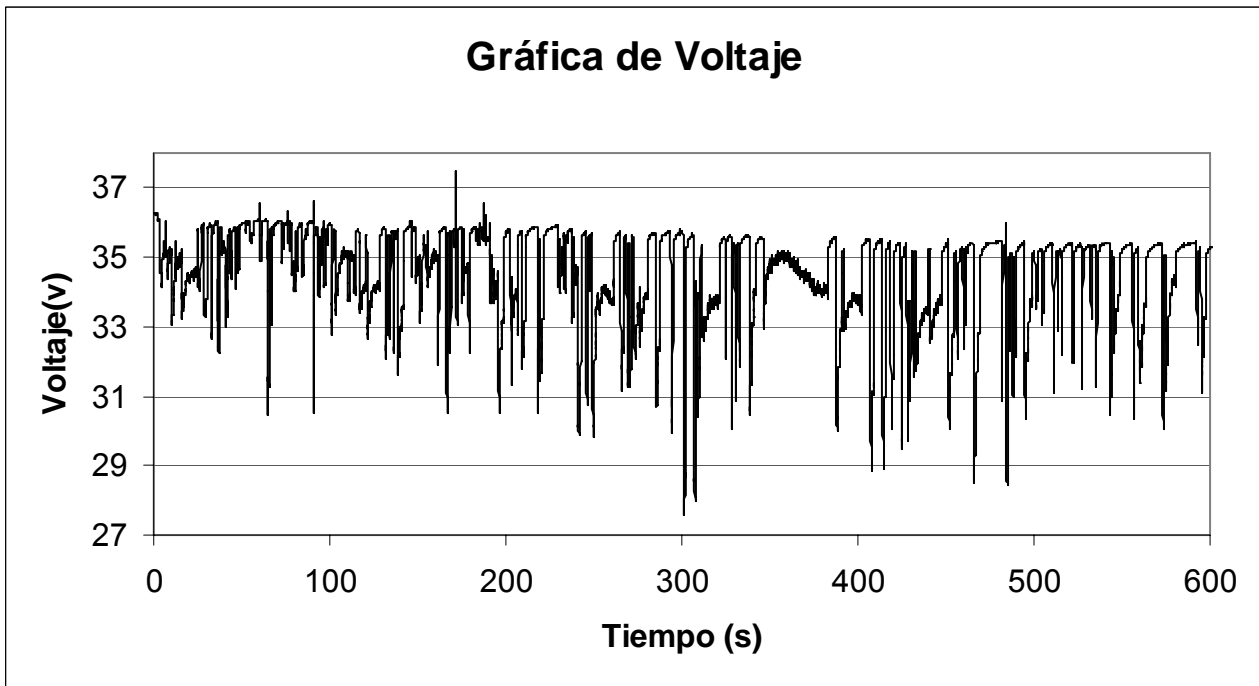


FIGURA 33: GRÁFICA DE VOLTAJE DE BATERÍAS CONTRA TIEMPO

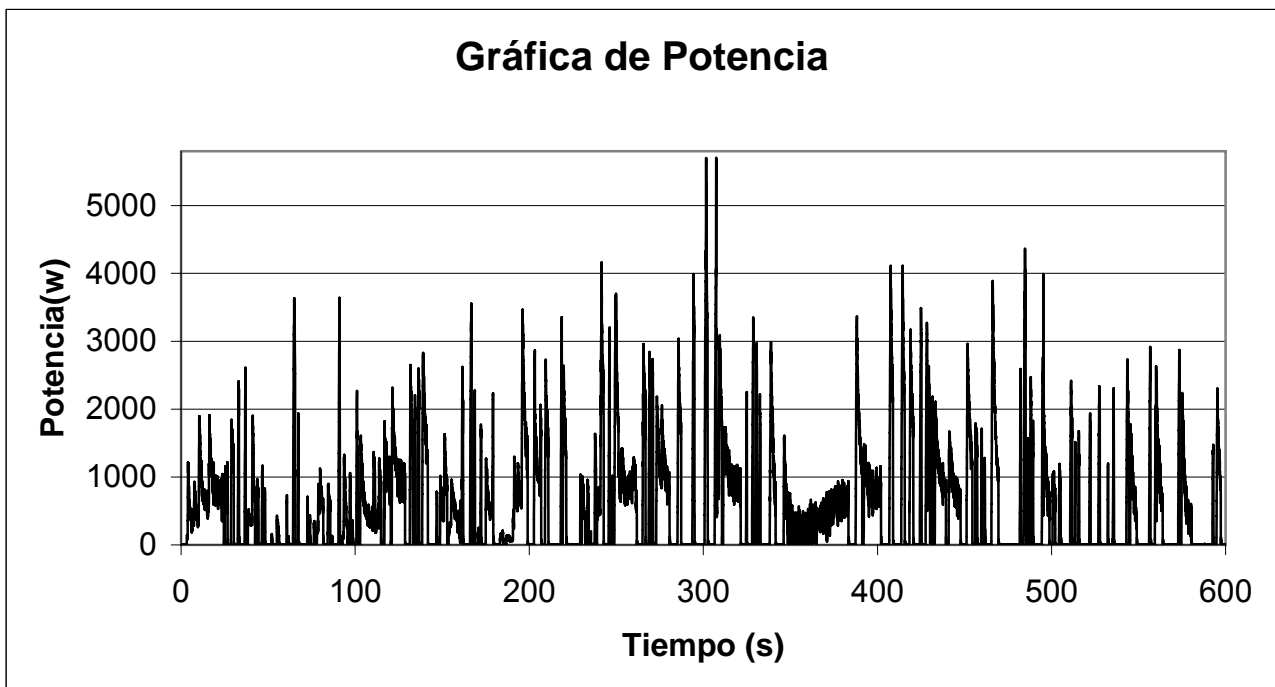


FIGURA 34: GRÁFICA DE POTENCIA CONTRA TIEMPO

Tabla de Comparación de los 5 recorridos

No. Prueba	Tiempo del Recorrido (min)	Distancia (km)	Corriente Promedio (A)	Corriente Máxima (A)	Potencia Promedio (W)	Potencia Máxima (W)	Energía (W*h)	Vel Máx km/h	Vel Prom km/h
1	10	3.153	25.16	165.35	868.13	4974.77	78.17	30.73	18.74
2	8.41	3.03	30.41	129.56	1086.34	4088.51	113.32	29.49	22.55
3	9.71	3.035	27.05	163.63	947.97	5093.114	69.81	28.62	21.14
4	8.65	3.108	25.49	139.73	880.88	4288.84	75.407	30.33	22.04
5	10.18	3.273	30.79	204.868	1005.96	5649.46	90.99	29.92	19.24

Promedio	9.39	3.119	27.78	160.55	957.85	4818.93	85.53	29.81	20.74
----------	------	-------	-------	--------	--------	---------	-------	-------	-------

FIGURA 35: TABLA DE RESULTADOS PROMEDIO DE LOS 5 RECORRIDOS

Con los resultados de la figura 35 se pudieron obtener los valores de corriente y voltaje promedio para una vuelta del recorrido

- La corriente promedio es de 27.7 A
- La velocidad promedio es de 20.74 km/h

Resultados de pruebas de Demanda Máxima:

Los resultados de las pruebas de demanda máxima tienen los mismos tipos de datos, pero la cantidad de datos es muy pequeña ya que la prueba se efectuó en unos cuantos segundos, en que la motocicleta subía una rampa. En esta prueba se utilizó el osciloscopio Tektronix para hacer una comparación del valor de voltaje real, y las gráficas de computadora (figura 36 y 37) se acompañan con las gráficas obtenidas del osciloscopio (figura 38):

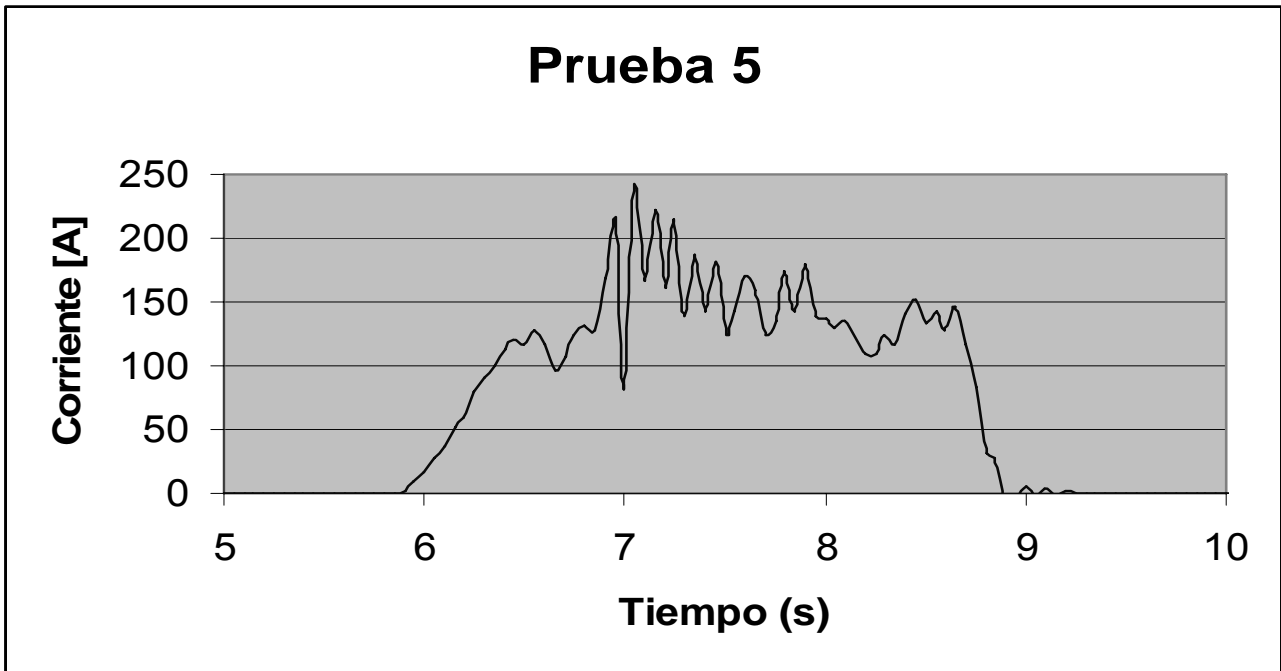


FIGURA 36: GRÁFICA DE CORRIENTE CONTRA TIEMPO (DEMANDA MÁXIMA DE CORRIENTE)

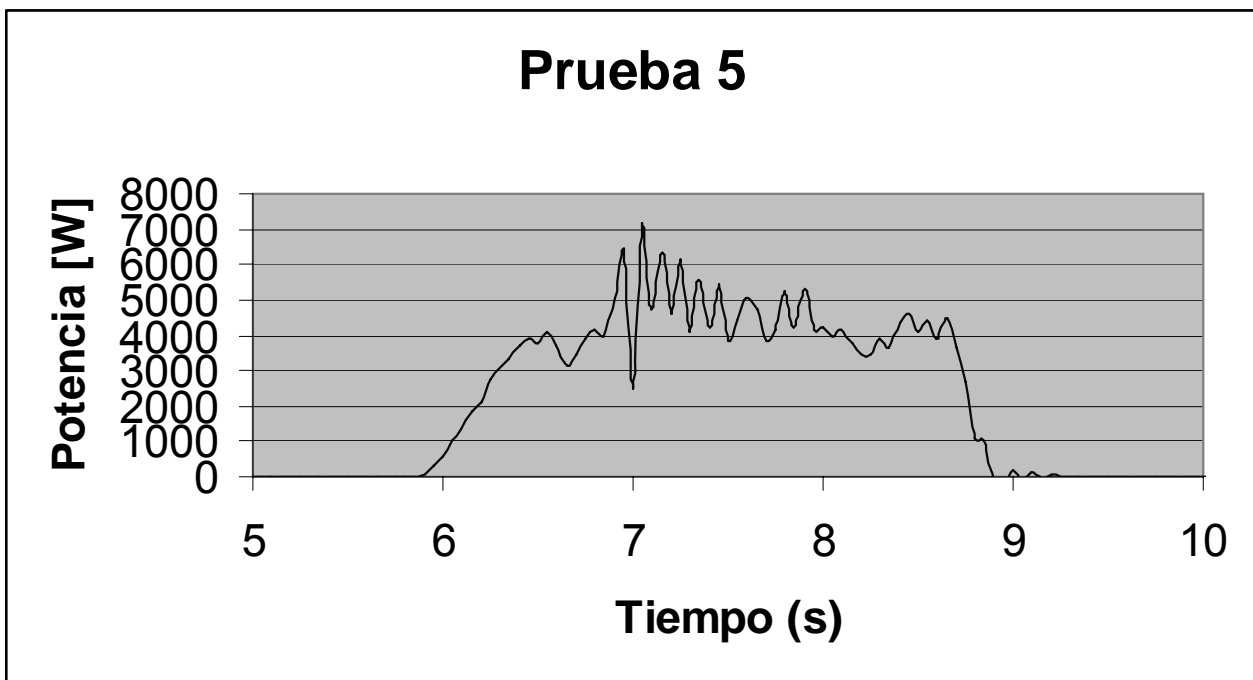


FIGURA 37: GRÁFICA DE POTENCIA CONTRA TIEMPO (DEMANDA MÁXIMA DE CORRIENTE)

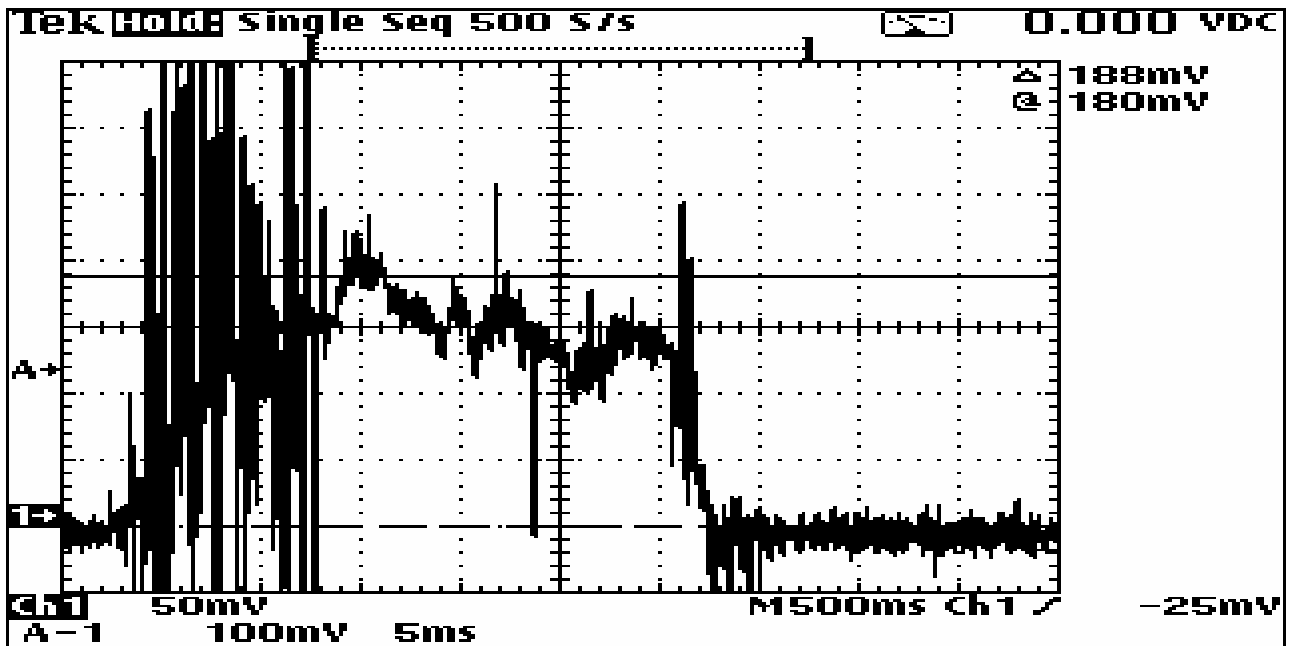


FIGURA 38: GRÁFICA DE POTENCIA CONTRA TIEMPO (DEMANDA MÁXIMA DE CORRIENTE)

PRUEBAS	$I_{MÁX}$ (A)	$P_{MÁX}$ (W)	$V_{Imáx}$ (V)
1	191.204	5553.698	29.046
2	186.368	5493.528	29.477
3	202.257	5879.873	29.071
4	198.803	6011.206	30.237
5	221.83	6353.327	28.641

FIGURA 39: TABLA DE RESULTADOS PARA LAS PRUEBAS DE DEMANDA MÁXIMA

-La mayor corriente registrada en la prueba fue de 221.83 A.

-El voltaje más bajo registrado fue de 28.64 V.

1.5 CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible es un sistema que convierte energía química a eléctrica por medio de un apilamiento de celdas internas, que utilizan como combustible el hidrógeno y el oxígeno del aire y tiene como productos: electricidad, agua y calor. Existen diferentes tipos de celdas de combustible, las más comunes son las celdas tipo PEM (membrana de intercambio protónico), ya que éstas funcionan en rangos de temperatura bajos (70° a 120° C) y su eficiencia es alta (55-70%), es por eso que son utilizadas en aplicaciones móviles como vehículos y de este tipo es la que se propone utilizar en la motocicleta híbrida. La celda tipo PEM es cara ya que el núcleo de las celdas, que es precisamente la membrana de intercambio protónico, también llamada Nafion, es una modificación del Teflón y está patentada por Dupont. Otra parte esencial de la celda tipo PEM es el baño de platino que tienen ambos lados internos de cada celda; éste funciona como electrodo y su costo es elevado, el conjunto de estos elementos forman la celda de combustible y su principio es tomar el núcleo del átomo de hidrógeno, juntarlo con el átomo de oxígeno y dejar libres los electrones del hidrógeno para que circulen por los electrodos y así generar una corriente eléctrica, al juntarse oxígeno con hidrógeno se produce agua y calor, que en nuestro caso son los remanentes de la reacción.

Existen otros tipos de celdas que se clasifican, dependiendo del electrolito que utilizan, como:

-Alcalinas (AFC): Fueron el primer tipo de celdas de combustible que se desarrollaron y fueron utilizadas en misiones espaciales de la NASA. Utilizan hidróxido de potasio diluido en agua como electrolito y pueden utilizar distintos metales no preciosos como electrodos. Funcionan en temperaturas de 100° a 250° C. La eficiencia es la más alta entre los otros tipos de celdas y su vida de duración es de 8000 horas.

-Metanol (DMFC): Utilizan metanol mezclado con vapor como combustible, son relativamente nuevas, una de sus ventajas es que el metanol se maneja de manera líquida, elimina complicaciones de almacenamiento y tiene mayor densidad energética que el hidrógeno.

-Ácido Fosfórico (PAFC): Esta celda utiliza ácido fosfórico líquido como electrolito, utiliza electrodos de platino y tiene eficiencias hasta de 42%. Es más resistente a impurezas que la celda tipo PEM, aunque es más voluminosa y pesada que otras celdas, es cara debido a los electrodos de platino, el costo por kw es actualmente de \$4000 (usd).

-Carbonatos fundidos (MCFC): Este tipo de celdas de combustible utiliza gas natural (Metano), una mezcla de sales de carbonatos fundidos, suspendidas en una matriz porosa de cerámica de litio y óxido de aluminio y es químicamente inerte. Como electrodos se pueden utilizar metales no preciosos lo que reduce el costo de la celda. Las temperaturas de operación son muy altas alrededor de 650°C. Su eficiencia es alta, aproximadamente de 60%.

-Óxidos sólidos (SOFC): Utiliza como combustible gas natural y cerámica dura no porosa como electrolito. Utiliza metales no preciosos como electrodos. Su temperatura de operación es muy alta, alrededor de 1000°C, lo que es una desventaja ya que su tiempo de funcionamiento es grande y requiere aislamiento térmico. Su eficiencia alcanza hasta un 60%.

-Regenerativas: Este tipo de celdas tiene la propiedad de funcionar en sentido inverso, como electrolizador, separando el agua cuando se le aplica electricidad de una fuente externa.

1.6 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Actualmente la principal técnica de producción de hidrógeno es la reformación por vapor del gas natural o metano, produciéndose así un 78% del total de hidrógeno en el mundo, después le sigue la gasificación del carbón con un 18% del total, y en tercer lugar se encuentra la electrólisis produciendo un 4% del total.

La meta para la generación de energía en el futuro es no depender de los combustibles fósiles, por lo que en la actualidad se realizan investigaciones para desarrollar nuevos métodos para la producción de hidrógeno, así como para hacer más eficientes los métodos que ya existen. Las energías alternas son la opción más viable para su producción mediante electrólisis, ya que no se utilizan hidrocarburos y no contamina. El hidrógeno puede funcionar como un amortiguador energético en momentos de que la energía primaria (renovable) no cubra la demanda instantánea, ésta combinación sería muy favorable en el futuro ya que actualmente la energía eléctrica no se puede almacenar.

Métodos de Producción de hidrógeno:

-Reformación de Gas: Este método consiste en romper la molécula de hidrocarburos ligeros (ya sea gas natural, metano, pentano), por medio de vapor a alta temperatura, se elimina todo el azufre que contenga, después se pasa por un catalizador y para absorber impurezas como el CO₂ (dióxido de carbono), se pasa por un complejo proceso de filtrado. El costo de la producción de hidrógeno por este método es de USD\$ 4 por kilo.

-Oxidación Parcial: En este método se utiliza cualquier combustible que contenga carbón, como desechos de jardinería, hojarasca, etc., en su composición, el cual se somete a una combustión parcial en presencia de vapor que se encuentra a una temperatura entre 1300 y 1500 grados centígrados para controlar la combustión, para después separar el hidrógeno de los demás elementos.

-Gasificación del carbón: En la gasificación del carbón el proceso se lleva a cabo mediante la inyección de vapor de agua y oxígeno a altas temperaturas y a altas presiones, de manera controlada, para romper la molécula del carbón en los compuestos

que lo forman, principalmente monóxido de carbono, hidrógeno y otros gases. Debido a la gran existencia de carbón, éste podría ser un método muy usado en el futuro para la producción de hidrógeno. Actualmente este proceso tiene un método para capturar todo tipo de contaminantes, pero es caro y complejo.

-Electrólisis: Este método utiliza energía eléctrica para producir el hidrógeno y consiste en el rompimiento de la molécula del agua al aplicar una corriente por dos electrodos rodeados de un electrolito conductor de iones. Este proceso tiene una eficiencia que va desde el 66% al 85% y se realiza en laboratorios especializados. Las pérdidas en este proceso son del tipo térmico debido a la resistencia del electrolito. La eficiencia es inversamente proporcional al voltaje del sistema. Existen muchos tipos de electrolizadores, de entre los cuales destacan el tipo Pila de Knowles que utiliza electrodos en forma de placa con una distancia de 33 mm entre los electrodos, este tipo de electrolizadores son utilizados en la industria, produciendo volúmenes de hasta 450 l de hidrógeno por hora, con corrientes de 1000 A.

Nuclear: La energía nuclear es catalogada como energía casi inagotable debido a la gran cantidad de recursos nucleares de combustible. Con los reactores nucleares es posible producir hidrógeno mediante la fractura térmica del agua a 850°C en reactores de alta temperatura. Este método puede ser viable ya que el costo es muy competitivo, tiene eficiencias de entre el 40% y 50% y no produce emisiones de dióxido de carbono ni lluvia ácida a la atmósfera.

Diseño de un electrolizador:

En el trabajo que nos ocupa, se diseñó un electrolizador para la producción de hidrógeno. Este electrolizador cuenta con dos electrodos que se conectan a una batería o una fuente de corriente directa. La corriente que se suministra a los electrodos es proporcional a la cantidad de hidrógeno que se produce en un tiempo determinado. En el electrodo negativo (cátodo) se produce el hidrógeno y en el positivo (ánodo) el oxígeno. El tipo de material usado en los electrodos determina la tensión de descomposición del agua: mientras más bajo sea este voltaje más eficiente será el electrolizador. Existe otro

concepto que es la sobretensión del electrodo, la cual se sumará a la tensión de descomposición mostrado en la figura 40. El platino permite la electrólisis a niveles de sobretensión muy bajos, alrededor de 0.6V, pero debido a su elevado costo, se prefirió usar un electrodo de acero inoxidable AISI 316, que es muy aproximado al sobrevoltaje del platino, de 0.9 a 1.2 V. Otro factor importante en el electrolizador es el electrolito que se utilice; el más usado en la industria por su mayor eficiencia, ofreciendo menor resistencia y pérdidas por calor, es el hidróxido de potasio (KOH ó potasa) diluido a un 30% en agua destilada. Una desventaja de este electrolito es que es más agresivo con los electrodos y los carcome más rápido. Los electrodos tienen una vida útil de 10 años, y es recomendable que el ánodo tenga un baño de níquel para evitar la corrosión del oxígeno. Otra característica importante es la densidad de corriente del electrodo, que se obtiene de la corriente con la que se va a alimentar y del área del electrodo. En algunos textos se menciona que la densidad de corriente óptima es de 1 A/cm².

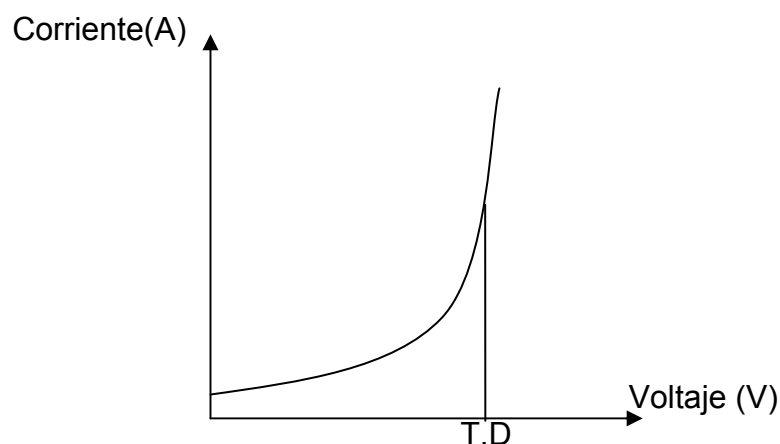


FIGURA 40: CURVA TENSIÓN DE DESCOMPOSICIÓN O SOBREVOLTAJE EN LA ELECTRÓLISIS

En el electrolizador que se realizó, mostrado en la figura 42, para el presente trabajo se utilizó tubo de acero inoxidable AISI 304, acrílico para construir los recipientes de los gases, hidróxido de potasio al 30%, y una corriente de 30 A para producir 0.36 l/min, con una densidad de corriente de 1 A/cm². Las medidas del tubo que se utilizó son: diámetro externo de 1.3 cm, diámetro interno de 1 cm, longitud de 4.3 cm. El tubo de acrílico es de 2.54 cm de diámetro externo y 3 mm de grosor.

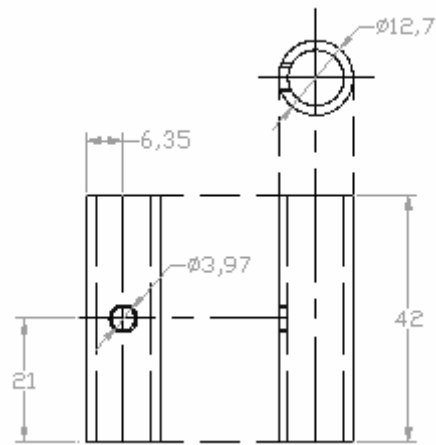


FIGURA 41: ELECTRODO DE ACERO INOXIDABLE AISI 314

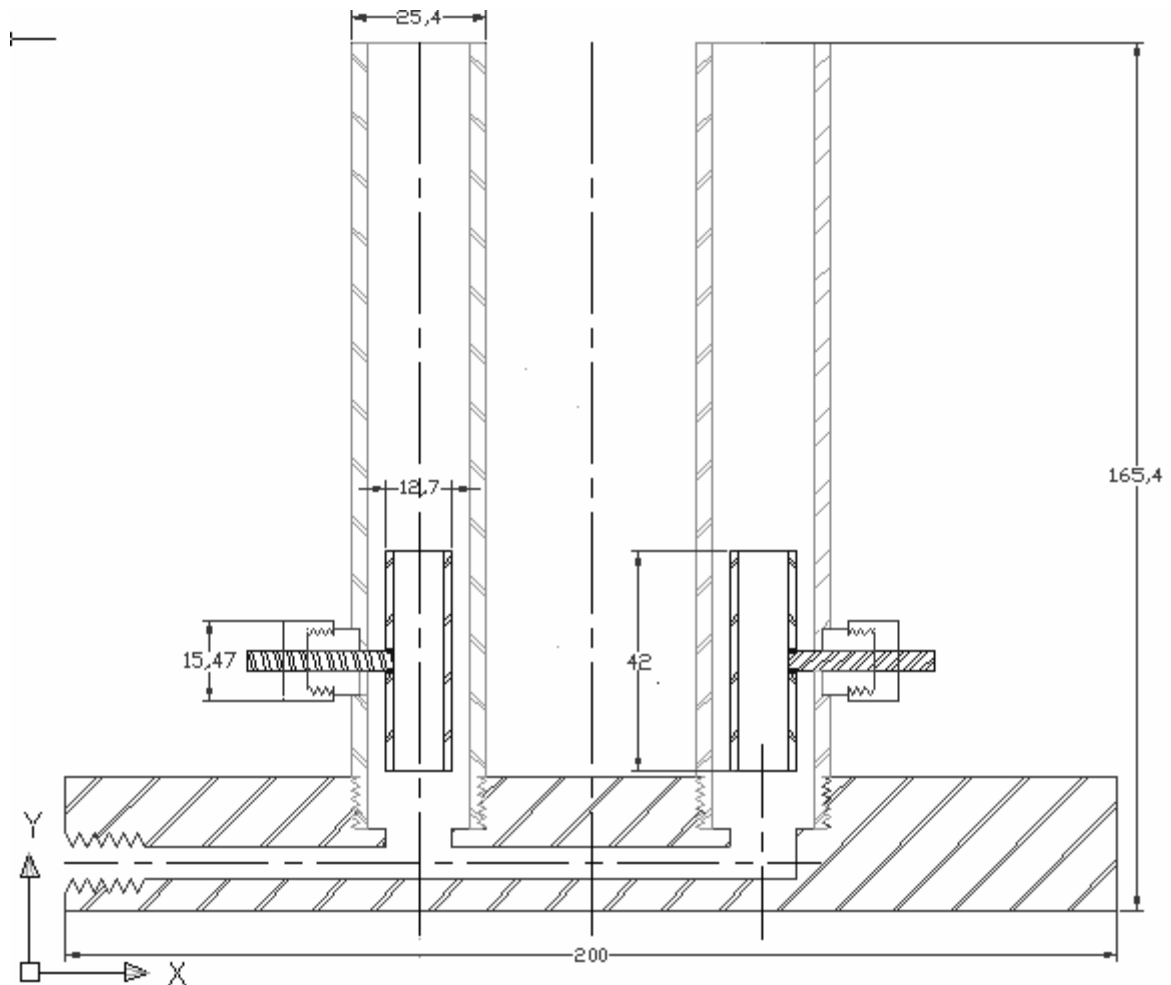


FIGURA 42: ELECTROLIZADOR

Notas: En la producción de hidrógeno utilizando sal se recomienda utilizar un 10% en peso de sal del total de agua, esto es: $(\text{sal}+\text{agua})/(\text{sal})\cdot 100=\%$ de sal. Del lado del cátodo

se producirá hidrógeno y sodio, del lado del ánodo se producirá una solución de cloro y OH por lo que no se distinguirá un gas en este electrodo. Para realizar la electrólisis del agua con hidróxido de sodio (sosa) se recomienda una concentración de 20 gr de hidróxido de sodio por cada litro de agua y para los electrodos se puede utilizar acero inoxidable. Si se utiliza ácido sulfúrico se recomienda utilizar electrodos de plomo.

La figura 43 muestra las gráficas de resultados de los experimentos realizados con este electrolizador. Se utilizaron sal, hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH).

La relación entre voltaje y corriente del NaOH y KOH resultó ser la misma en las diferentes concentraciones, y la concentración donde se generaba mayor corriente a menor voltaje fue al 30 %, usando como disolvente agua destilada.

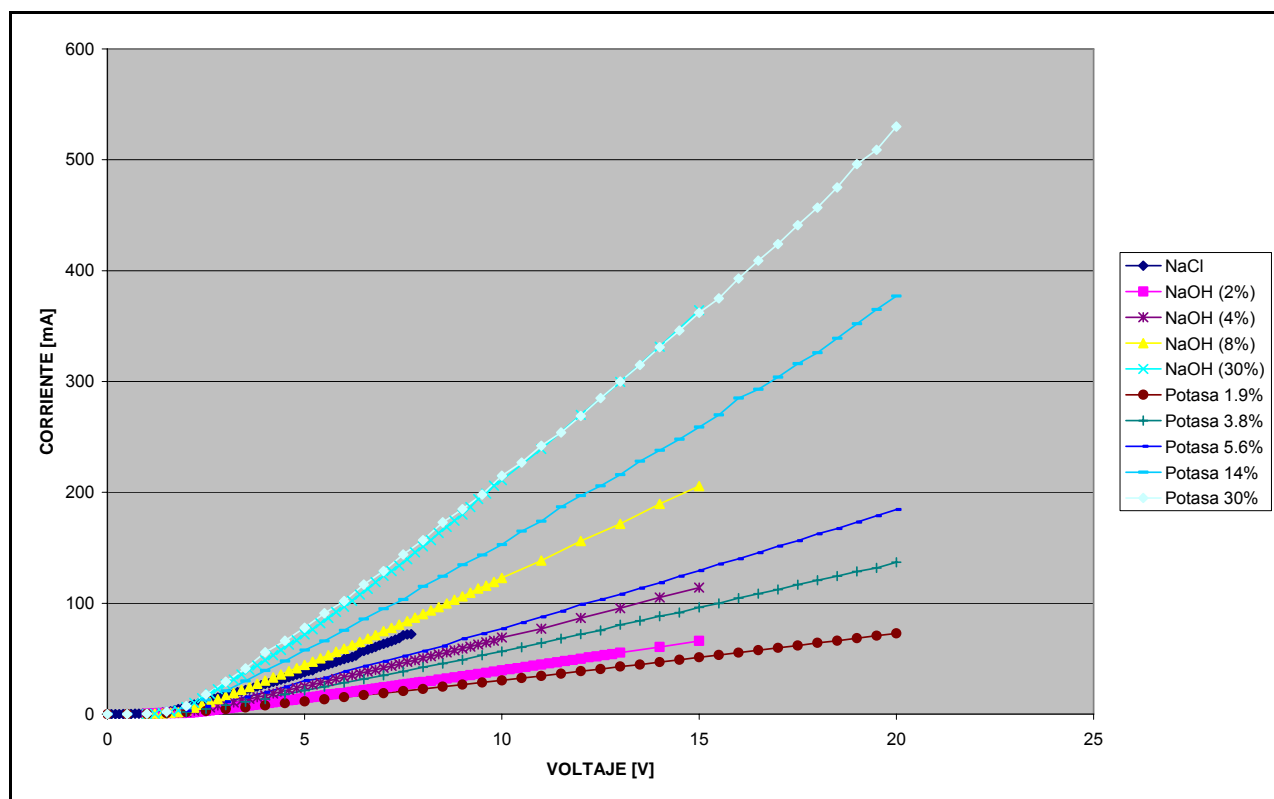


FIGURA 43: GRÁFICAS DE CORRIENTE CONTRA VOLTAJE PARA DISTINTOS ELECTROLITOS Y CONCENTRACIONES

-Procedimientos de generación de hidrógeno en vías de investigación:

Existen procedimientos que están en vías de desarrollo y no se tiene ni un procedimiento ni resultados objetivos y concretos para tener un proceso sistematizado a nivel industrial.

-Pirólisis:

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica de residuos orgánicos en ausencia de agentes oxidantes que se lleva a cabo mediante reacciones químicas complejas y transferencia de materia y calor. Puede realizarse a distintas velocidades de calentamiento, distinguiéndose así la pirólisis lenta, la rápida, la pirólisis flash y la reactiva. La primera, también conocida como la pirólisis convencional o carbonización, ocurre a temperaturas entre 400 y 600 °C. En el intervalo de 250 a 350 °C tiene lugar la fase cuantitativamente más importante de la pirólisis de la madera, completándose en este intervalo la descomposición térmica de la hemicelulosa y en su mayor parte la de la celulosa. El proceso de pirólisis de la madera conduce al rendimiento de diferentes cantidades de gas, líquido y carbón, dependiendo de los procesos, fundamentalmente de la velocidad de calentamiento y la temperatura final.

-Gasificación:

A diferencia de la pirólisis, la gasificación es la descomposición térmica de materia orgánica, por medio de agentes oxidantes como oxígeno vapor de agua o aire. Se lleva a cabo a temperaturas aproximadas de 600°C a 1000°C, para formar productos de fase gaseosa, que incluyen principalmente monóxido de carbono, hidrógeno, metano, dióxido de carbono y agua. La mayoría de los gasificadores utilizan oxígeno, como agente oxidante, para realizar una combustión parcial de la biomasa. Los porcentajes de los gases obtenidos dependen del agente oxidante: para la producción de hidrógeno se puede obtener 16% de H₂ con aire, 32% con oxígeno y hasta 50 % con vapor de agua. A diferencia de la pirólisis, la gasificación no utiliza medios externos para el calentamiento de la biomasa, como es el caso de los intercambiadores de calor.

-Fotoelectrólisis:

Con este proceso se utiliza directamente la energía luminosa para producir la hidrólisis del agua. Este método utiliza semiconductores para absorber la energía solar y producir una fotocorriente que en contacto con agua, puede romper la molécula en hidrógeno y oxígeno. Químicamente este método aprovecha las bandas de conducción de los elementos usados como semiconductores, para sobrepasar los potenciales de reducción del agua.

-Producción biológica:

En estos procesos intervienen microorganismos que separan la molécula de agua ya sea por medio de luz o por digestión.

-Fotodescomposición microbiana de la materia orgánica:

Este método de producción de hidrógeno está recibiendo atención en los institutos de investigación de todo el mundo. Utilizando bacterias o diferentes tipos de algas fotosintéticas las cuales utilizan la luz para realizar su metabolismo, toman monóxido de carbono y agua de su entorno para producir dióxido de carbono e hidrógeno en estado gaseoso. Este proceso se puede llevar a cabo en reactores pequeños, en comparación con otros métodos biológicos

-Digestión Anaerobia:

En este proceso se utilizan bacterias anaerobias para lograr la descomposición de desechos orgánicos, principalmente desechos de comida. El proceso para la producción de gas metano en este proceso es común y conocido, pero la necesidad de obtener hidrógeno cambia la configuración de los biorreactores que actualmente están en funcionamiento. Existen cuatro etapas en la digestión anaerobia: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, y se dan en ese orden, la etapa de acetogénesis es donde tiene lugar la producción de hidrógeno, acompañado de acetato y bióxido de carbono. En la digestión anaerobia se deben de cuidar factores como el pH (factor hidronio) y la temperatura de la mezcla orgánica, además de evitar que los desechos

contengan celulosa, hemicelulosa y lignina que son sustancias que son difíciles de digerir para las bacterias. Existen dos tipos de bacterias para realizar la digestión y dependen de la temperatura a la que se realiza el proceso, una bacteria es la mezofílica, y otra la termofílica. Actualmente la mayor tasa de producción de hidrógeno con este método es 65% y el otro 35% lo componen principalmente CO_2 y otros gases como el metano. Este proceso puede ser bastante económico, pero se debe de purificar el hidrógeno obtenido y el procedimiento puede resultar costoso. Existen muchos tipos de biorreactores, los principales son del tipo campana de una sola etapa. Existen otros que son de dos etapas, como el mostrado en la figura 44, hechos para tratar la parte líquida y la parte sólida del proceso, siendo la parte líquida re-circulada con cierta intermitencia usando una bomba peristáltica.

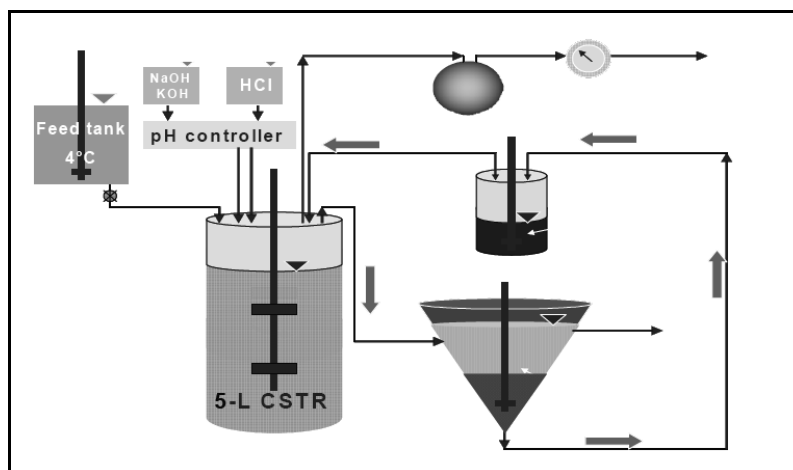
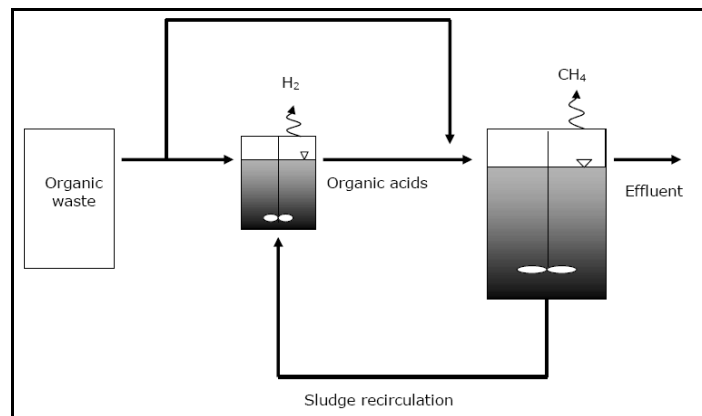


FIGURA 44: DIAGRAMAS DE BIORREACTORES DE DOS ETAPAS

-Pila de combustible inversa

La reacción de electrólisis es reversible, por lo que es posible utilizar pilas de combustible con el propósito de descomponer el agua con solo aplicar a los electrodos un potencial de sentido inverso y voltaje superior al de la reacción de formación del agua. Con este principio, todas las pilas de combustible podrían funcionar como electrolizadores. La ventaja de este método es que la eficiencia aumenta y el precio del hidrógeno baja considerablemente.

-Descomposición térmica del agua:

Este método se puede realizar con un reactor de energía nuclear, o con energía solar, concentrando los rayos del sol en un punto determinado. Las temperaturas para separar la molécula de agua tienen que estar arriba de 800°C, en estos procesos se agregan químicos al agua, como el sulfuro de yodo, para mejorar la reacción.

1.7 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

Existen diversos tipos de almacenamiento de hidrógeno que varían dependiendo de la propiedad física del hidrógeno. Una de las desventajas del hidrógeno es que su licuefacción se lleva a cabo a -253°C lo que conlleva un proceso costoso y con elementos de alta tecnología. Con los años se han introducido nuevas tecnologías para el almacenamiento, como son el desarrollo de los hidruros metálicos, los nanotubos de carbón, y el hidrógeno líquido.

-Hidrógeno presurizado:

El hidrógeno presurizado es la técnica de almacenaje más usada en la actualidad ya que se maneja a altas presiones y puede dar rangos de flujo de descarga muy altos. Este sistema es el más peligroso ya que la manipulación del hidrógeno presurizado aumenta la posibilidad de desgaste y fugas en las tuberías. Las presiones manejadas comúnmente son de alrededor de 250 Bar (4000 psi). El hidrógeno presurizado es el sistema que tiene menor densidad volumétrica y los tanques usados de acero inoxidable o aluminio son pesados (alrededor de 80 kg por cada kg de H_2). El estándar de almacenamiento es de 5000 psi (350 bar) y 10000 psi (700 bar)

-Hidrógeno líquido:

El hidrógeno en estado criogénico es un sistema prácticamente nuevo, ya que la tecnología para bajar a temperaturas de -253°C es cara y precisa procesos complejos. Existen pocas empresas que manejen el hidrógeno en estado líquido, por ejemplo grupo Linde, que tiene varias patentes de la tecnología usada en los tanques. Los tanques criogénicos no se manejan a altas presiones, pero la temperatura debe de mantenerse constante ya que si no el hidrógeno líquido se expandiría, para lo que se han desarrollado capas al vacío y capas con aire líquido, que rodean el tanque criogénico, para evitar la conducción de calor. La capacidad de almacenamiento es bastante más grande que el del hidrógeno presurizado y bastante más liviano.

-Hidruros metálicos:

Este sistema es también nuevo para la industria, una de las ventajas de los hidruros es su capacidad para almacenar, ya que puede absorber hasta 1000 veces su volumen. Es el sistema más seguro ya que no requiere presión para meter o sacar el hidrógeno. Tiene una alta densidad volumétrica. Una ventaja es que si el tanque llega a tener un orificio, se reducirá la fuga, debido a las características termodinámicas de los hidruros, ya que al salirse el gas se expande, se enfría, y la presión en los hidruros se reduce.

Las desventajas son que el hidruro metálico debe de calentarse para que el hidrógeno escape, pero los rangos de flujo de descarga son muy bajos y es necesario colocar varios recipientes en paralelo, lo cual eleva el costo del sistema. También son pesados para el peso de hidrógeno que almacenan tan solo 2% a 6% de su peso.

-Nanotubos de carbón:

Son láminas de grafito enrolladas en sí mismas, con estructuras internas porosas que permiten la adsorción del hidrógeno. Actualmente no se ha experimentado mucho con estos materiales, sólo se sabe que tienen alta capacidad para almacenar hidrógeno. En un futuro, con el desarrollo de la nanotecnología, estos materiales serán muy eficientes y seguros para almacenar hidrógeno.

SISTEMAS DE ALMACENAJE DE HIDRÓGENO

TIPO DE ALMACENAJE	VOLUMEN	MASA	PRESIÓN	TEMPERATURA	
	max. 33 kg H ₂ ·m ⁻³	13 MASA %	800 bar	298 K	CILINDRO COMPUESTO
	71 kg H ₂ ·m ⁻³	100 MASA %	1 bar	21 K	HIDRÓGENO LÍQUIDO
	max. 150 kg H ₂ ·m ⁻³	2 MASA %	1 bar	298 K	HIDRURROS METÁLICOS
	20 kg H ₂ ·m ⁻³	4 MASA %	70 bar	65 K	FISISORCIÓN
	150 kg H ₂ ·m ⁻³	18 MASA %	1 bar	298 K	HIDRIDOS COMPLEJOS
	>100 kg H ₂ ·m ⁻³	14 MASA %	1 bar	298 K	Alkali + H ₂ O

FIGURA 45: CARACTERÍSTICAS DE VOLUMEN, PRESIÓN Y MASA DE DISTINTOS MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

1.8 SELECCIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE Y PROPUESTA PARA EL ACOPLAMIENTO AL VEHÍCULO

Una vez obtenidos los parámetros de operación de la motocicleta eléctrica, es factible realizar la elección de la celda de combustible. Los parámetros requeridos para su elección son la potencia nominal, voltaje nominal, corriente nominal y costo. Se tomó como referencia el precio del kw instalado de una celda de combustible, el cual se encuentra actualmente a nivel comercial en \$6000 dólares. Se buscaron empresas por Internet para encontrar la que ofreciera un producto para nuestras necesidades y se encontró la empresa canadiense Ballard, la cual ofrece un módulo Nexa, el cual es el único sistema comercial que cuenta con sistemas auxiliares para su instalación, uso y mantenimiento. Este Módulo Nexa (figura 46) ofrece una potencia nominal de 1.2 kw, voltaje nominal de 26 V y corriente nominal de 46 A, lo cual cumple con nuestros parámetros requeridos. El módulo también cuenta con sensores de presión de entrada, hidrógeno, voltaje y corriente, para desplegar alarmas y evitar un mal funcionamiento o riesgos de explosión. Otra razón para la elección de la celda fue su bajo costo en comparación con otras empresas, (aprox. \$6000 usd).

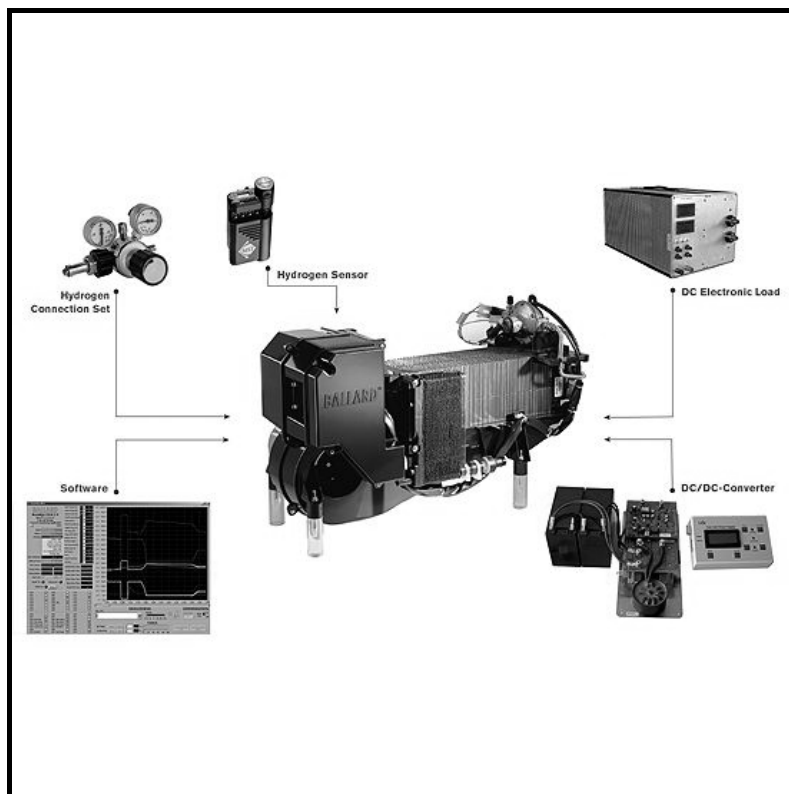


FIGURA 46: MODULO NEXA DE BALLARD

Nuestro sistema funciona con 36 volts por lo que se requiere un convertidor de directa a directa que eleve el voltaje o bien, bajar el sistema de la motocicleta a 24 volts. Para el diseño del sistema se realizó un análisis de las curvas de dos celdas de combustible: la de la celda de 20 W, que sirvió para experimentar y realizar pruebas a escala, y las curvas del módulo Nexa, que se digitalizaron para poder analizar el funcionamiento al realizar cambios en el voltaje de operación.

Parámetros de diseño de sistema de control para celda de 20 W (sistema a escala)

Se tomó la gráfica de una sola membrana de ensamble-electrodo (MEA) para saber la relación entre el voltaje y la corriente de los stacks de 20 W y de 1.2 kw. Como la que se muestra en la figura 47:

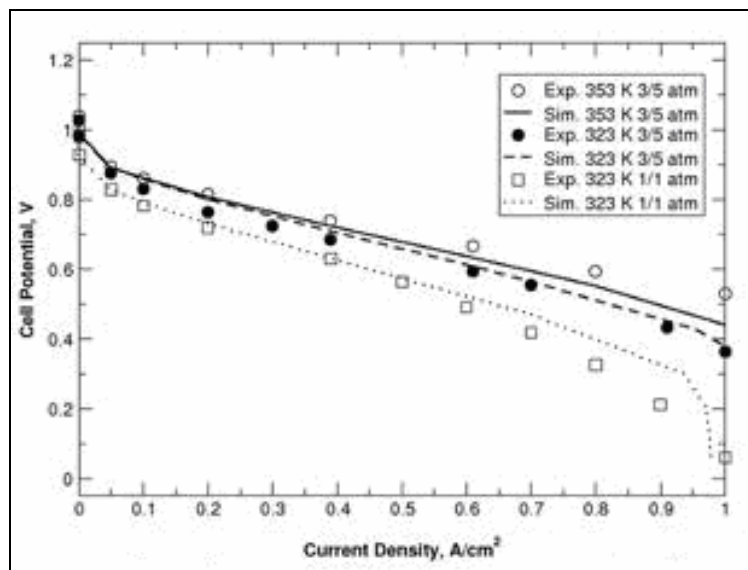


FIGURA 47: CURVA DE POTENCIAL CONTRA DENSIDAD DE CORRIENTE EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE Y COMPARACIÓN ENTRE GRÁFICAS SIMULADAS Y EXPERIMENTALES

El voltaje nominal en una MEA es de 0.7 volts con una densidad de corriente de 0.5 A/cm². Esta curva (figura 47) fue la que se digitalizó para encontrar curvas aproximadas de la celda de 20 W y del módulo Nexa de 1.2 kw, ya que el proveedor no nos dio ninguna.

Para el módulo NEXA de 1.2 kw con 43 membranas y un área de membrana de 100 cm², se digitalizó y se muestra en la figura 48:

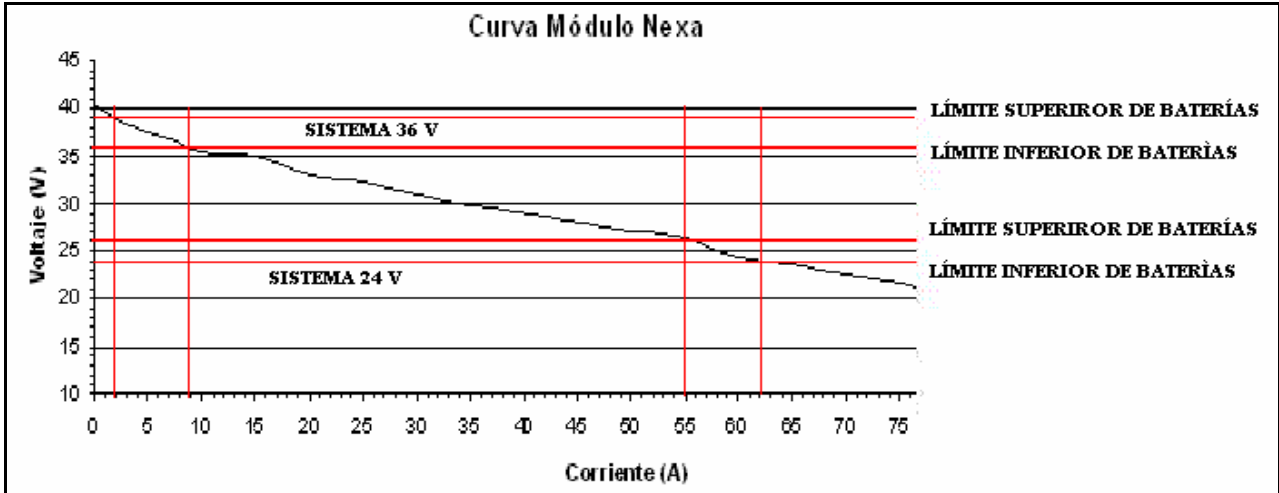


FIGURA 48: CURVA DIGITALIZADA PARA UN MODULO NEXA

Módulo NEXA:

-1.2 KW

-46 A nominales

-26 V nominales

-43 celdas

-100 cm²

Opciones para la configuración del sistema módulo NEXA a 36V y a 24V:

Módulo NEXA a 36V

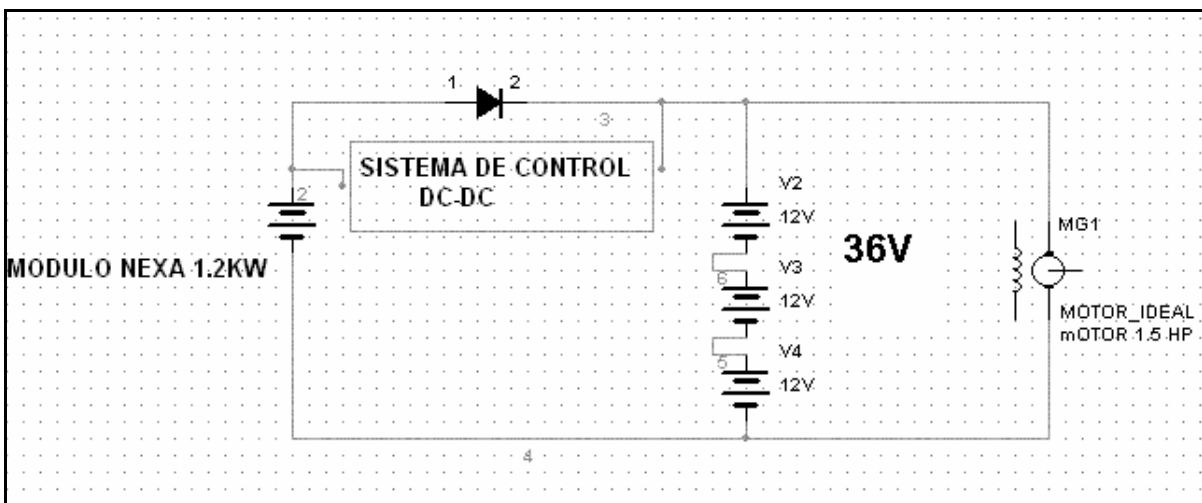


FIGURA 49: CONEXIÓN EN PARALELO MODULO NEXA-BATERÍAS A 36V

Módulo NEXA a 24V

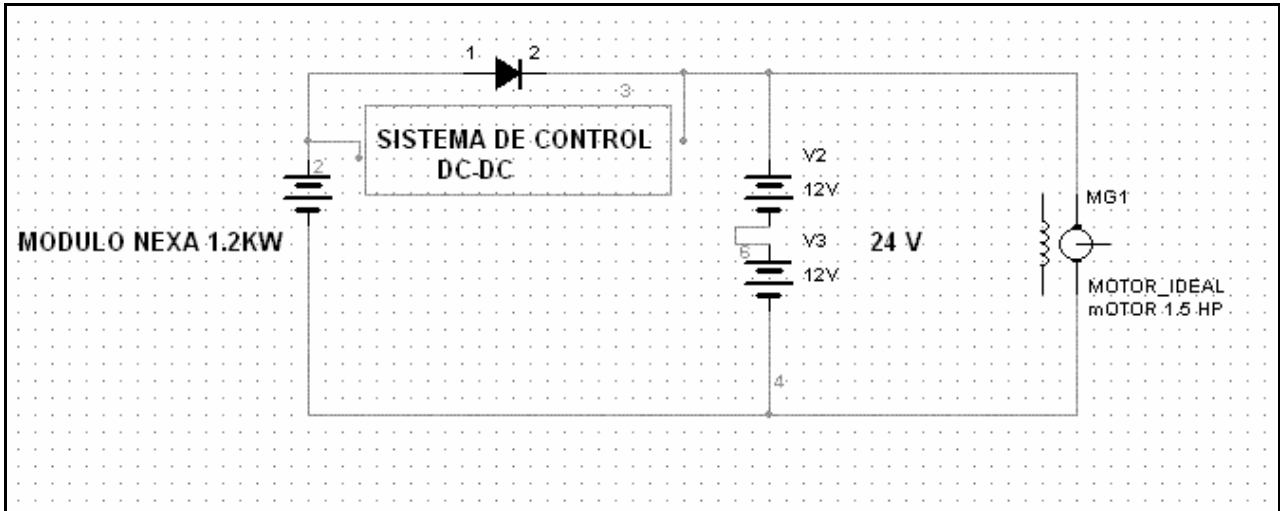


FIGURA 50: CONEXIÓN EN PARALELO MODULO NEXA-BATERÍAS A 24V

Para la celda 20 W la cual contiene 20 MEA's y un área de membrana de 10 cm² se digitalizó la gráfica de la figura 51:

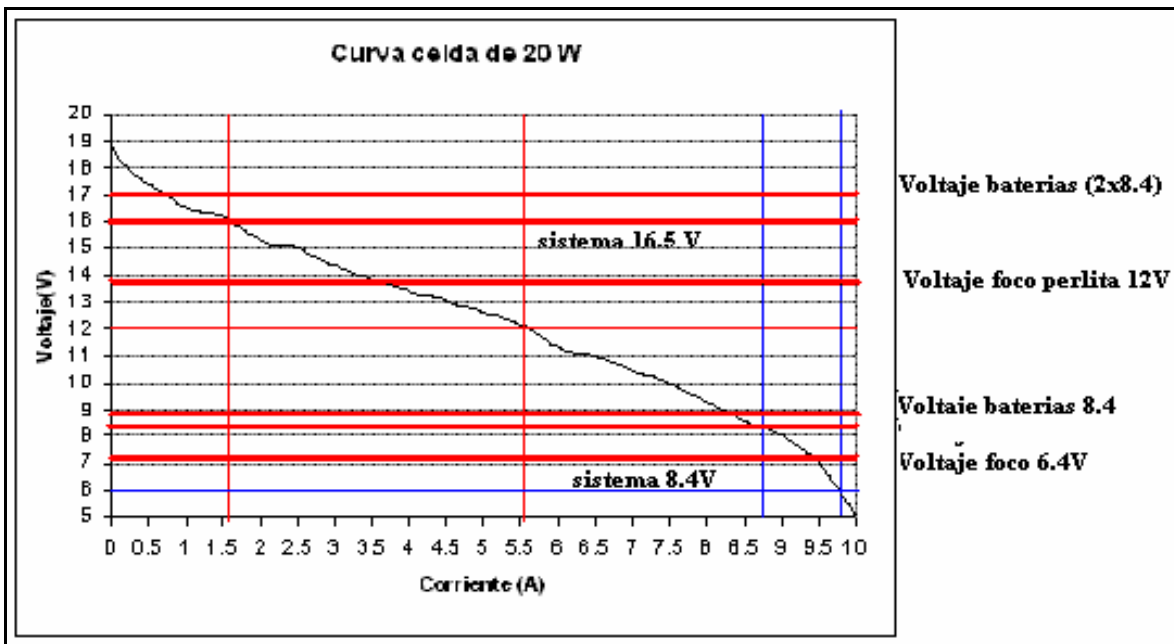


FIGURA 51: CURVA DIGITALIZADA PARA CELDA DE COMBUSTIBLE DE 20 W

Celda de 20 W a 16.8V

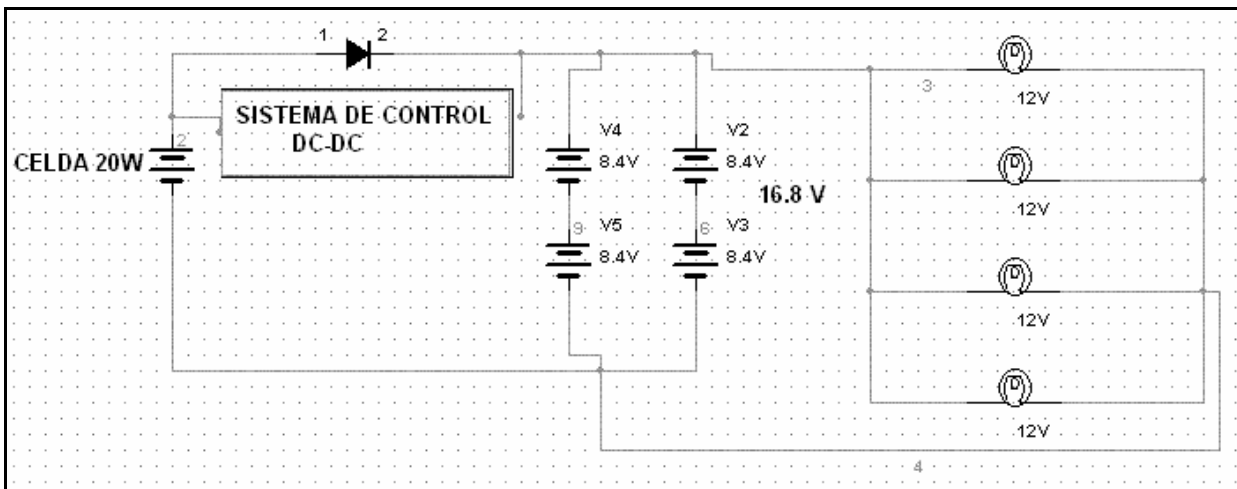


FIGURA 52: CONEXIÓN EN PARALELO CELDA DE COMBUSTIBLE-BATERÍAS A 16.8V

Celda de 20 W a 8.4V

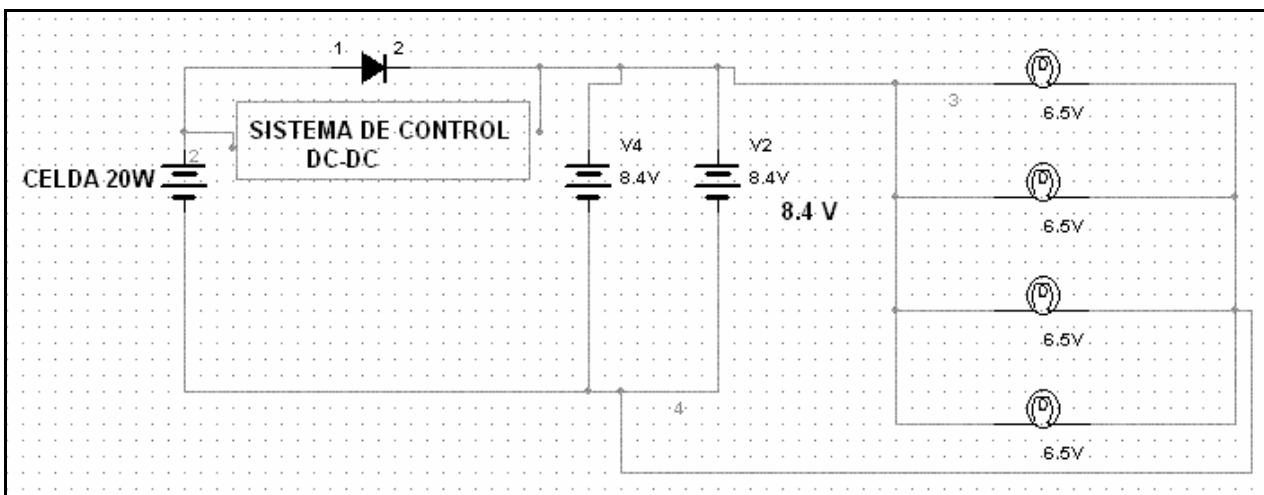


FIGURA 53: CONEXIÓN EN PARALELO CELDA DE COMBUSTIBLE-BATERÍAS A 8.4V

Para realizar el diseño de las pruebas con la celda de 20 W, se realizó una comparación con el módulo Nexa para encontrar los valores de voltaje representativos, considerando las dos opciones:

Módulo Nexa a 24V y 36 V, contra celda de 20 W a 8.4V y 16.8V, respectivamente.

La carga en la celda de 20 W se hará con un arreglo de focos tipo perlita en paralelo de 16 V y 0.157 W.

1.9. ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Con la caracterización del vehículo eléctrico se corroboró la potencia nominal del motor (1.1 kw). Ya que la potencia promedio en las pruebas de recorrido normal de 3.1 km fue de 957 W, el cálculo teórico de autonomía y la energía consumida, también concuerda con el resultado en la prueba física, que fue de aproximadamente 23 km y 75 Wh, contra 26km y 67.69 Wh de los resultados teóricos.

Para la medición de las variables, en el sistema de instrumentación y acondicionamiento de señales, los filtros desarrollados con amplificadores operacionales en modo paso bajas limpiaron de manera efectiva el ruido que genera el controlador PWM y que se induce en los circuitos del sistema de medición. Este mismo tipo de filtros tendrán que aplicarse en el momento de realizar la caracterización de la celda de combustible una vez montada en el vehículo ya que el controlador afectará de igual manera las señales de corriente y voltaje de la celda.

Respecto al rendimiento, si comparamos la motocicleta eléctrica con otra similar de combustión interna, del mismo peso, y considerando que un litro de gasolina tiene 9666 Wh de energía y que un vehículo ligero de 200 kg tiene un rendimiento promedio de 55 km/l, en un recorrido de 26 km, consumiría 4089 Wh de energía de la gasolina, mientras que el vehículo eléctrico para el mismo recorrido, solamente consume 583.26 Wh, lo que significa que tiene un rendimiento de hasta 5 veces más que el vehículo a combustión interna.

En el momento que se instale la celda de combustible, se le agregarán a la motocicleta 14 kg, más otros 6 kg del tanque de hidruros metálicos, que da un total de 20 kg, lo cual le restaría 2 km de autonomía.

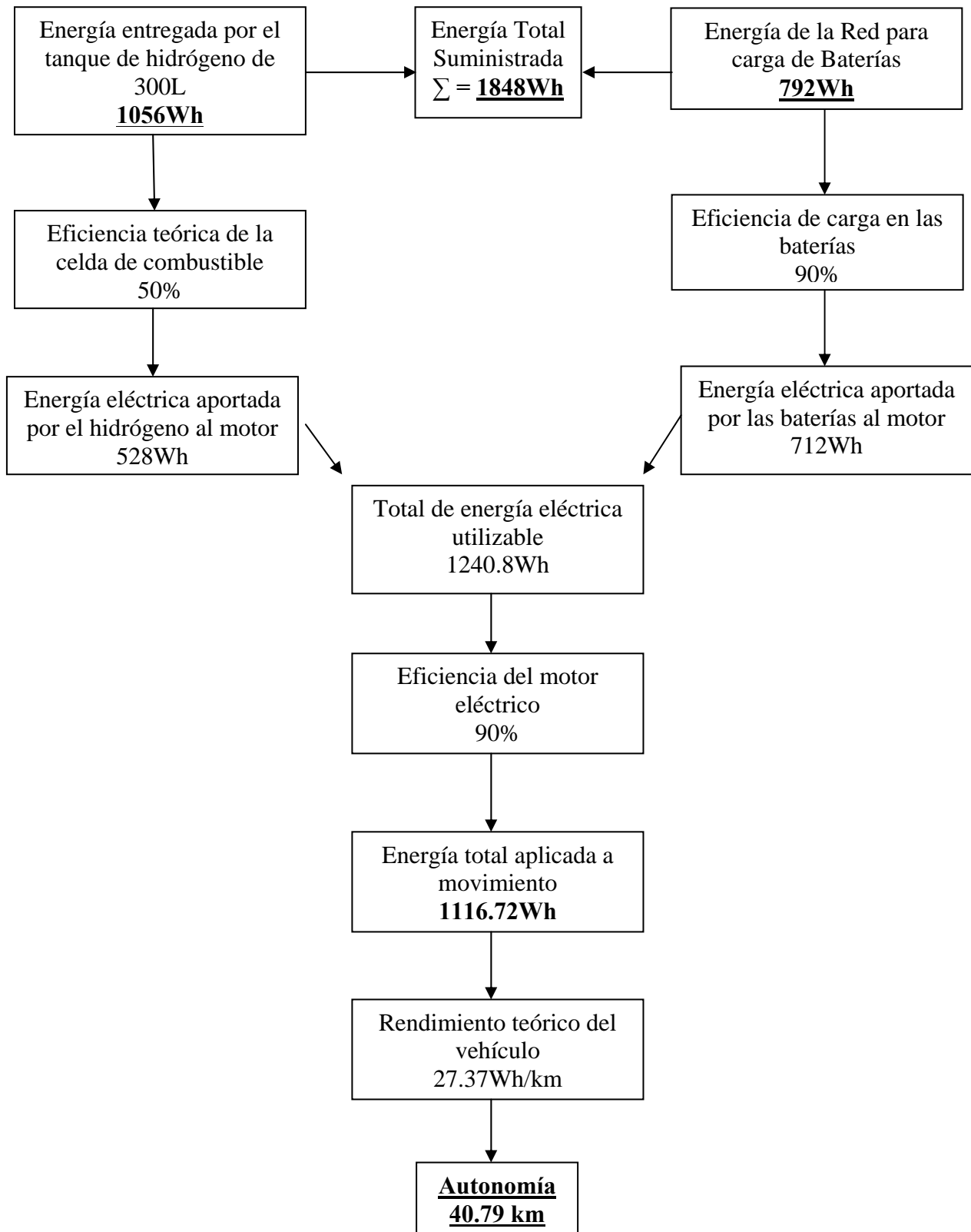
Haciendo un análisis teórico general de la energía que entra al sistema y la que se utiliza sin tomar en cuenta la distribución de energía entre cada sistema, se obtuvieron los siguientes datos y eficiencias. Con el tanque de hidruros y la celda de combustible, el sistema tendría un aumento en el consumo de energía a 84.85 Wh en un recorrido de 3.1 km, la potencia promedio aumentaría a 664.27 W y el rendimiento teórico será de 27.36 Wh/km.

De datos del fabricante, sabemos que la celda de combustible consume 18 l/min a potencia máxima (1200W), por lo que para una potencia promedio de 664.27 W, la celda consumirá 12.4 l/min. Considerando un tanque de hidruros que se mandó a cotizar y a diseñar en H-Tech. Inc, con capacidad de 300 litros y tasa de descarga de 15 l/min., sabiendo que la densidad energética del hidrógeno es de 3.52 Wh/l a presión atmosférica (1bar), la energía que puede dar el tanque lleno sería de 1056 Wh. Como la celda de combustible Nexa tiene una eficiencia teórica del 50%, la celda aportaría 528 Wh.

Por la parte del sistema de baterías, la energía eléctrica aprovechable en las baterías instaladas en la motocicleta, con una tasa de descarga de 19 A, es de 712.8Wh. Considerando que la batería tiene una eficiencia de carga-descarga del 90%, la energía entregada por la red será de 792Wh.

Así, considerando la aportación energética de ambos sistemas, celda de combustible de hidrógeno y baterías, en el siguiente diagrama se muestra el cálculo para la obtención de la autonomía y la eficiencia total del sistema eléctrico:

Energía y Autonomía del sistema eléctrico



Eficiencia: Energía Salida/Entrada= 1116.72/1848Wh = **60.4%**

Del diagrama anterior, obtenemos que la autonomía fue de 40.79 km, la eficiencia total eléctrica del 60.4 % y también podemos saber qué porcentaje de energía utilizable proporciona cada sistema: el sistema a hidrógeno aporta el 42.55% y las baterías aportan el 57.45% del total. Debe destacarse que en este análisis se considera que la celda de combustible nunca recarga a las baterías.

Para hacer el análisis de un sistema en paralelo, cuando la celda y las baterías entregan potencia al mismo tiempo al motor, se tiene que tomar en cuenta la carga de baterías que estará realizando la celda de combustible, cuando el sistema no le demande el máximo de potencia. Tomamos un máximo de potencia para la celda de 1000W para evitar su degradación y no reducir su vida útil. Por arriba de esta potencia la energía demandada por el sistema la darán las baterías y si el consumo es menor a 1000W la celda dará la energía y se distribuirá entre las baterías y el motor. Lo que se tomó en cuenta para en un futuro realizar el controlador adecuado para que el sistema funcione con la mejor eficiencia, es la corriente de carga de baterías máxima entregada por la celda. Se hicieron cuatro ejemplos con distintas corrientes de carga. Las baterías tienen una capacidad de 33Ah y la corriente máxima de carga es de 9.9A (que es 0.3 de su capacidad: 0.3C). Se sabe que la mejor eficiencia se alcanza cuando las baterías son cargadas con una corriente baja aproximadamente de 0.1C (3.3 A). Por lo que se realizó el análisis tendiendo a reducir la corriente lo menos posible, y aprovechando los puntos en los que el motor no demanda corriente o está inactivo, para cargar las baterías.

La gráfica de potencia del recorrido que se consideró como ejemplo para el análisis fue el de la figura 54:

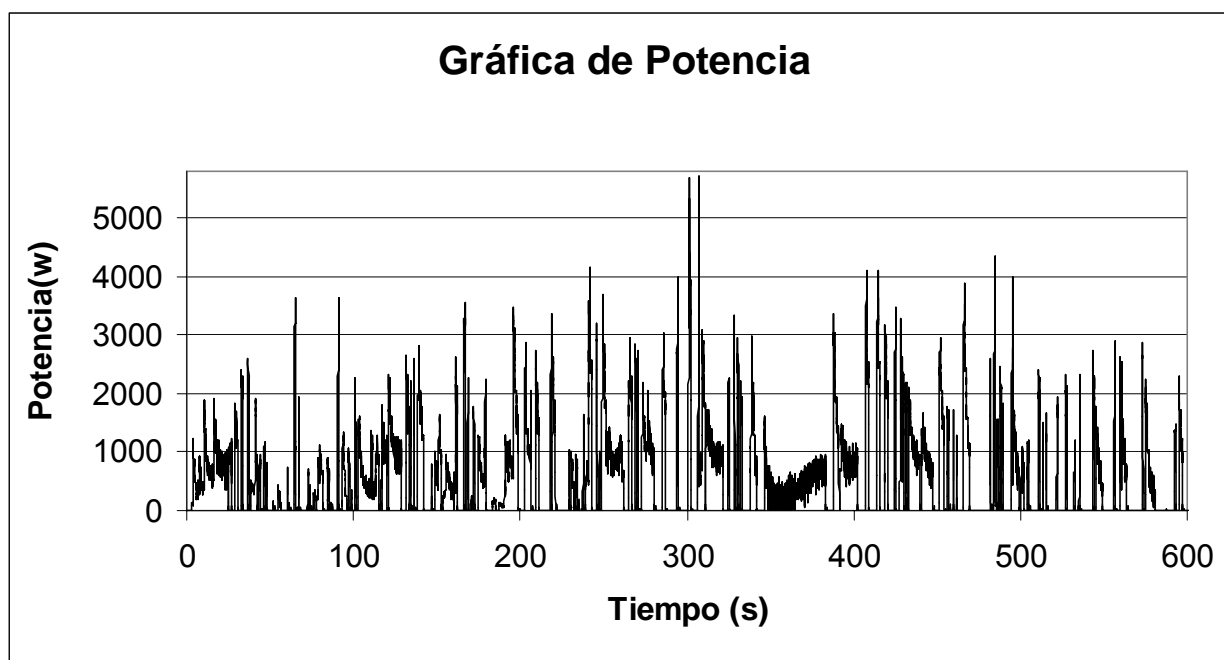


FIGURA 54: GRÁFICA DE POTENCIA RECORRIDO REPRESENTATIVO

El primer ejemplo del análisis se realizó tomando en cuenta una corriente de carga de 0.3C que equivale a 9.9 A y teniendo las 3 baterías en serie, se tiene un voltaje de 36V, que da una potencia de carga de 356.4W; la celda dará carga a las baterías cuando el consumo del motor sea menor a 1000W y la diferencia de esta potencia menos la potencia entregada al motor será la potencia entregada a las baterías, pero ésta no puede ser mayor a la corriente de carga de 0.3C. El tiempo en el que el sistema está inactivo es de 0.053 h o 3.18 min, en estos puntos la celda únicamente dará carga a las baterías.

Se tomó un fragmento de la prueba para hacer las gráficas de las figuras 55, 56 y 57:

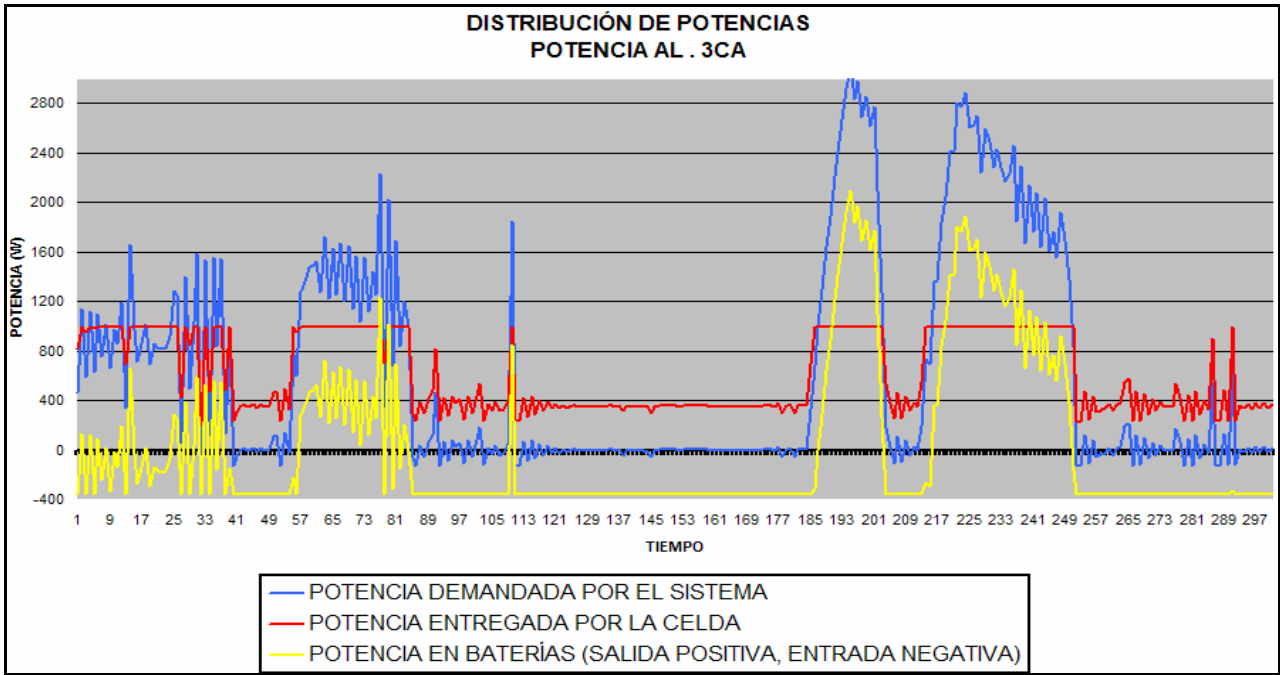


FIGURA 55: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA EN EL SISTEMA HÍBRIDO al .3 CA

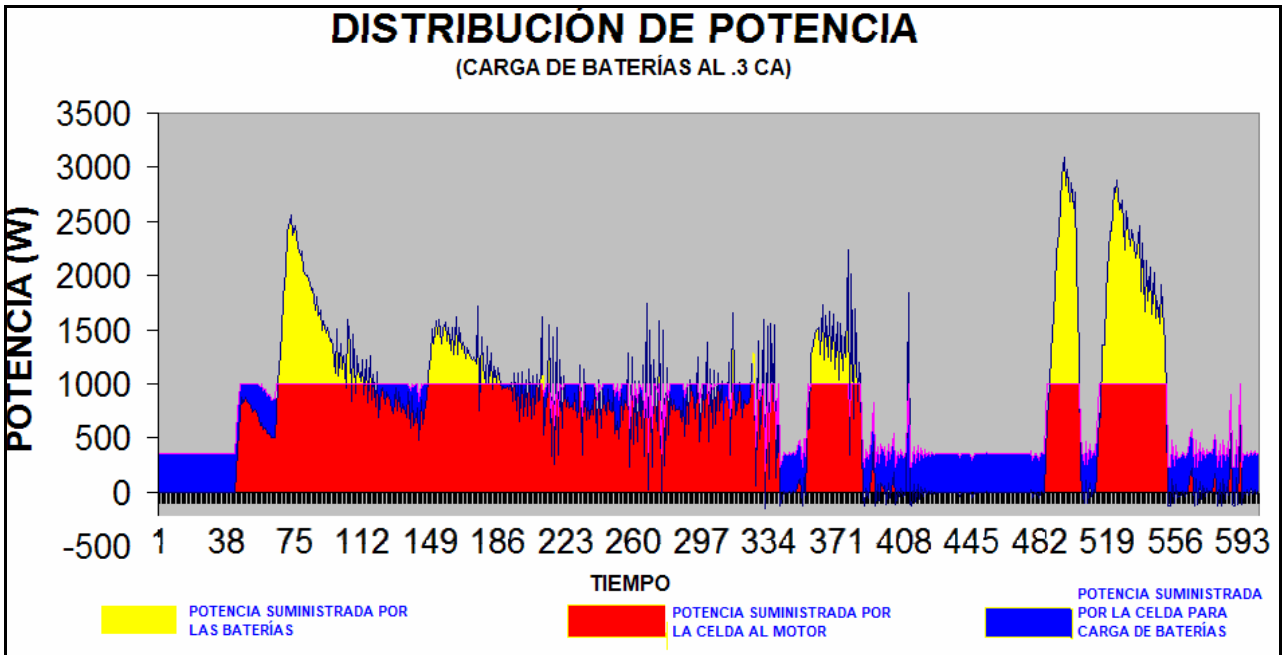


FIGURA 56: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA EN EL SISTEMA HÍBRIDO AL .3 CA

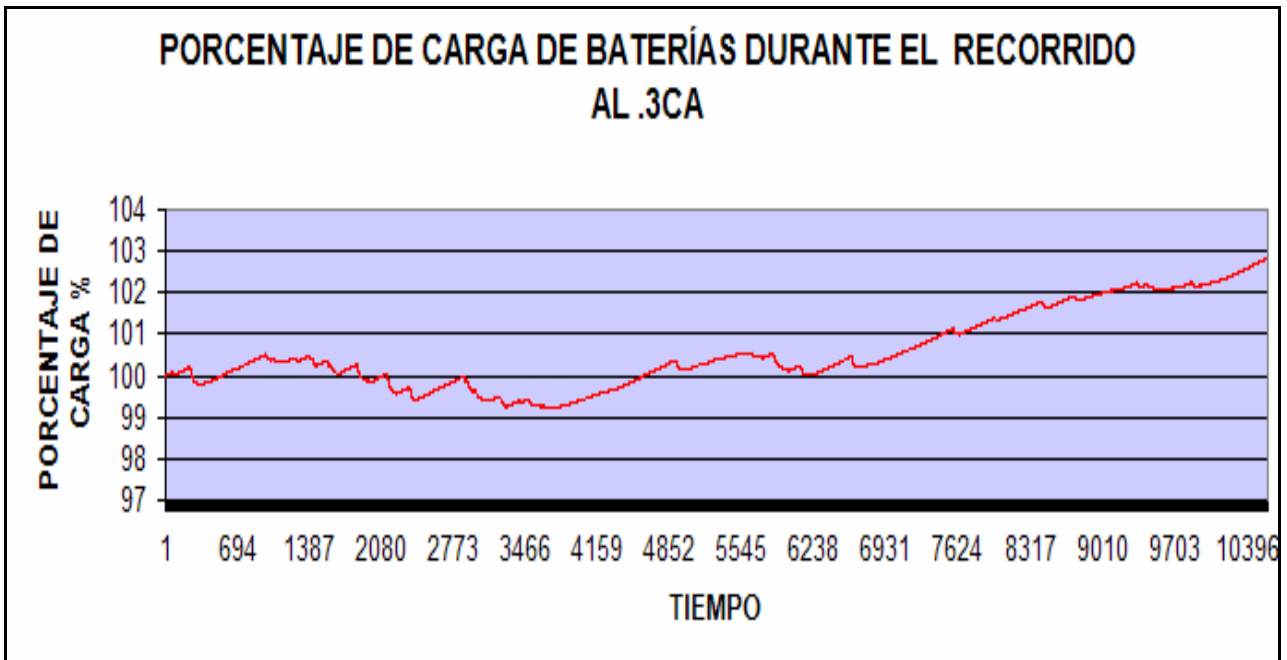


FIGURA 57: GRÁFICA DE NIVEL DE VOLTAJE EN BATERÍAS DURANTE EL RECORRIDO AL .3 CA

Otro criterio que se consideró es que al finalizar la prueba las baterías queden al 100% de carga. En este recorrido la energía entregada por las baterías fue de 22.75 Wh, esto será lo que la celda de combustible debe suministrar para la recarga total de las baterías adicionando un 15% por la eficiencia en la carga de baterías. Para el caso de la carga de baterías al 0.3C, 9.9 A, la energía entregada por la celda cuando la potencia es menor a 1000W es suficiente para hacer la carga de baterías y dejando los momentos inactivos sin utilizar.

El segundo ejemplo se hizo a un régimen de carga de baterías del 0.2C (6.6 A), 237.6 W. Para este ejemplo se realizaron las gráficas de las figuras 58, 59 y 60:

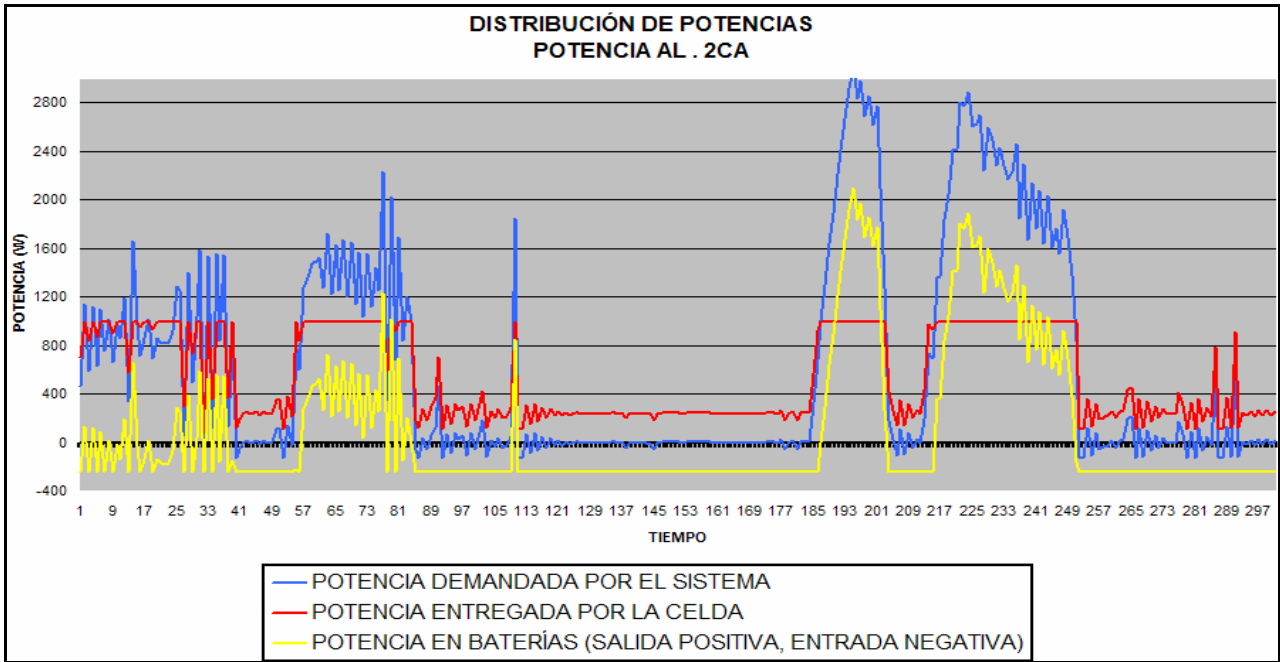


FIGURA 58: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA EN EL SISTEMA HÍBRIDO AL .2 CA

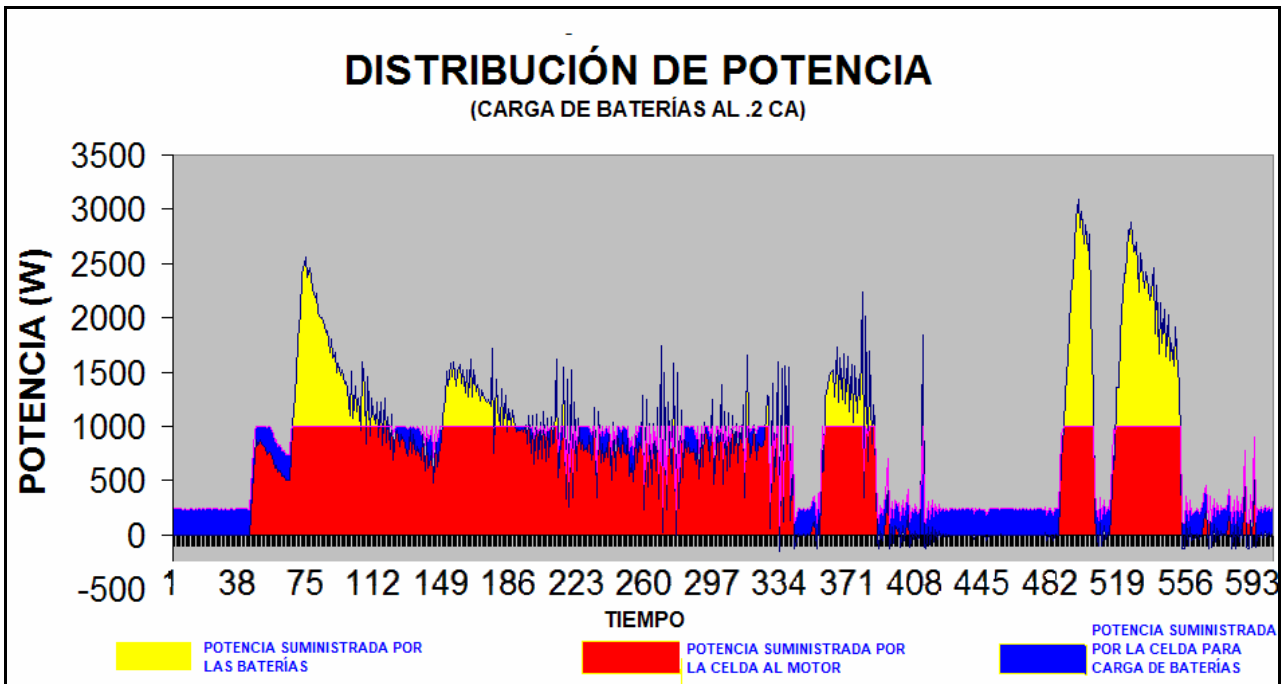


FIGURA 59: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA EN EL SISTEMA HÍBRIDO AL .2 CA

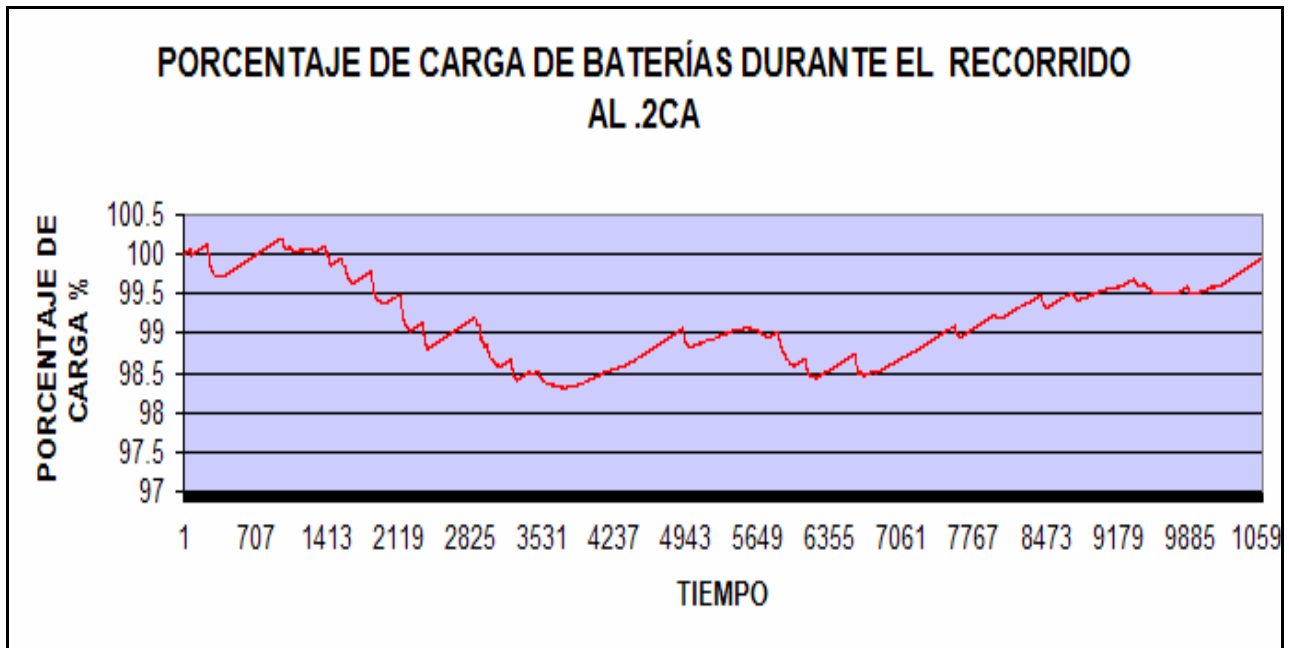


FIGURA 60: GRÁFICA DE NIVEL DE VOLTAJE EN BATERÍAS DURANTE EL RECORRIDO AL .2 CA

En este caso, es necesario utilizar los tiempos inactivos para que con la energía suministrada por la celda para carga de baterías cuando la potencia es menor a 1000W, las baterías terminen al 100% de carga después del recorrido. La energía de carga de baterías en los tiempos inactivos suma 13.42 Wh de los 26.76 Wh totales.

El tercer caso fue usando una corriente de carga de 0.1C (3.3 A), 118.8 W, con el que se obtuvieron las siguientes gráficas mostradas en las figuras 61,62 y 63:

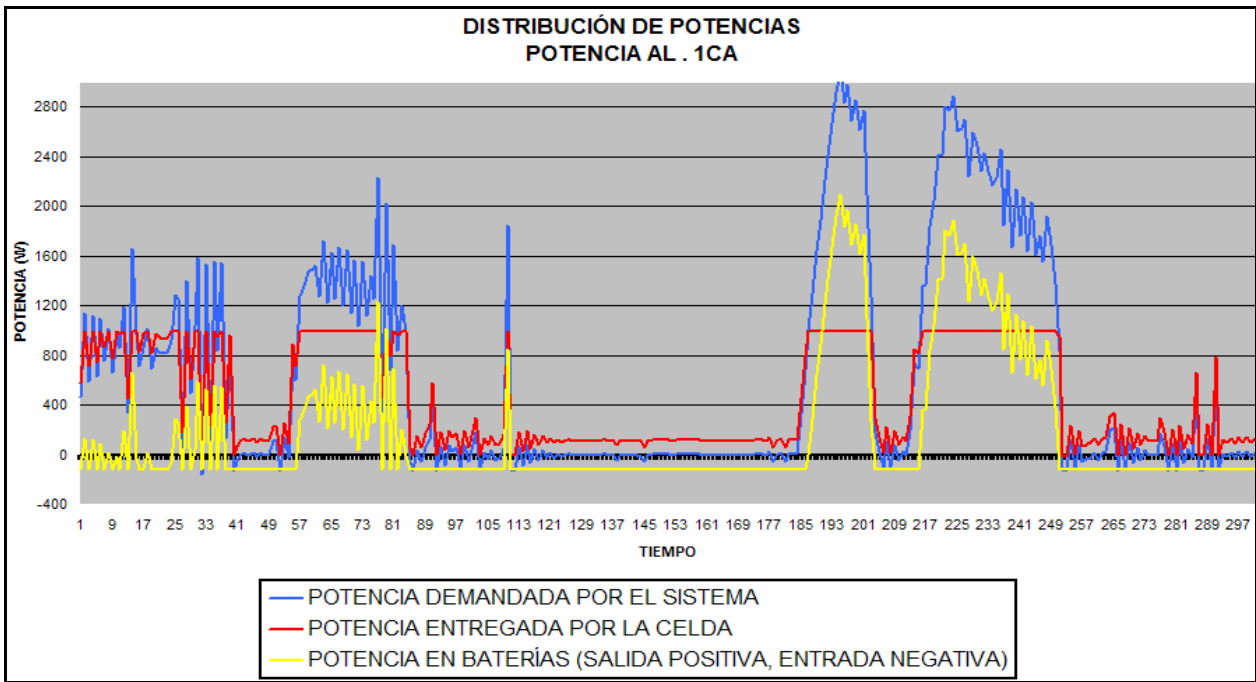


FIGURA 61: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA EN EL SISTEMA HÍBRIDO AL .1 CA

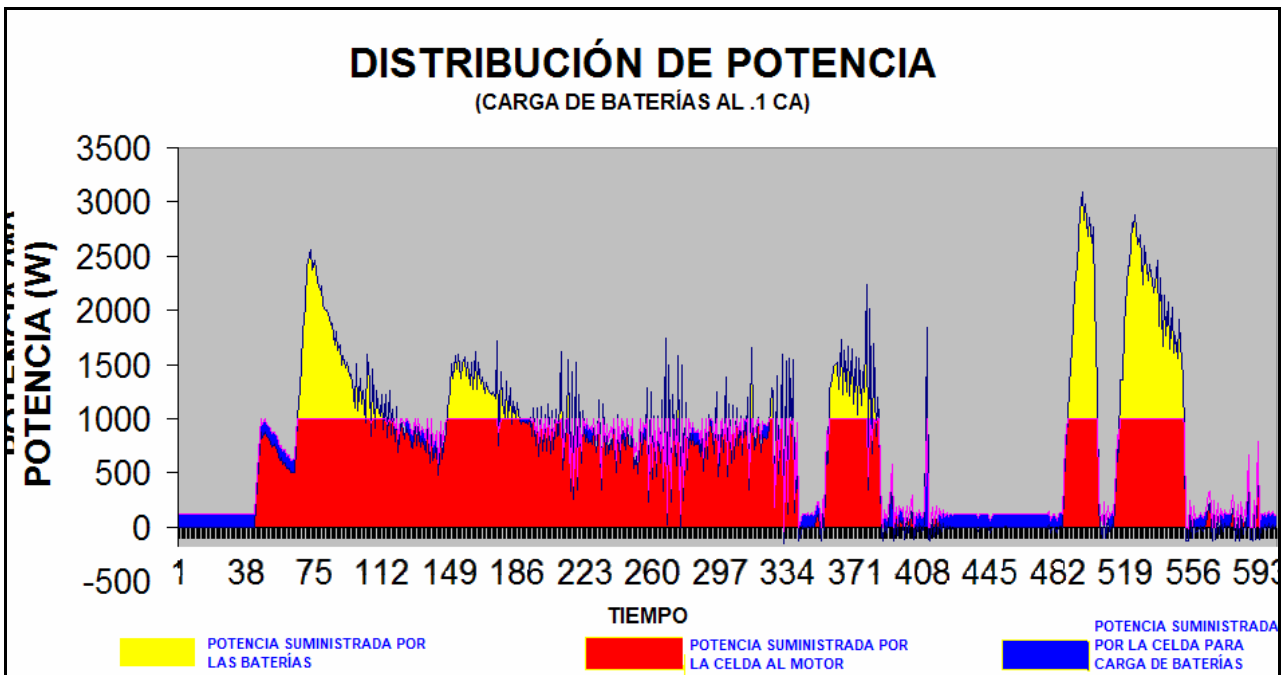


FIGURA 62: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA EN EL SISTEMA HÍBRIDO AL .1 CA

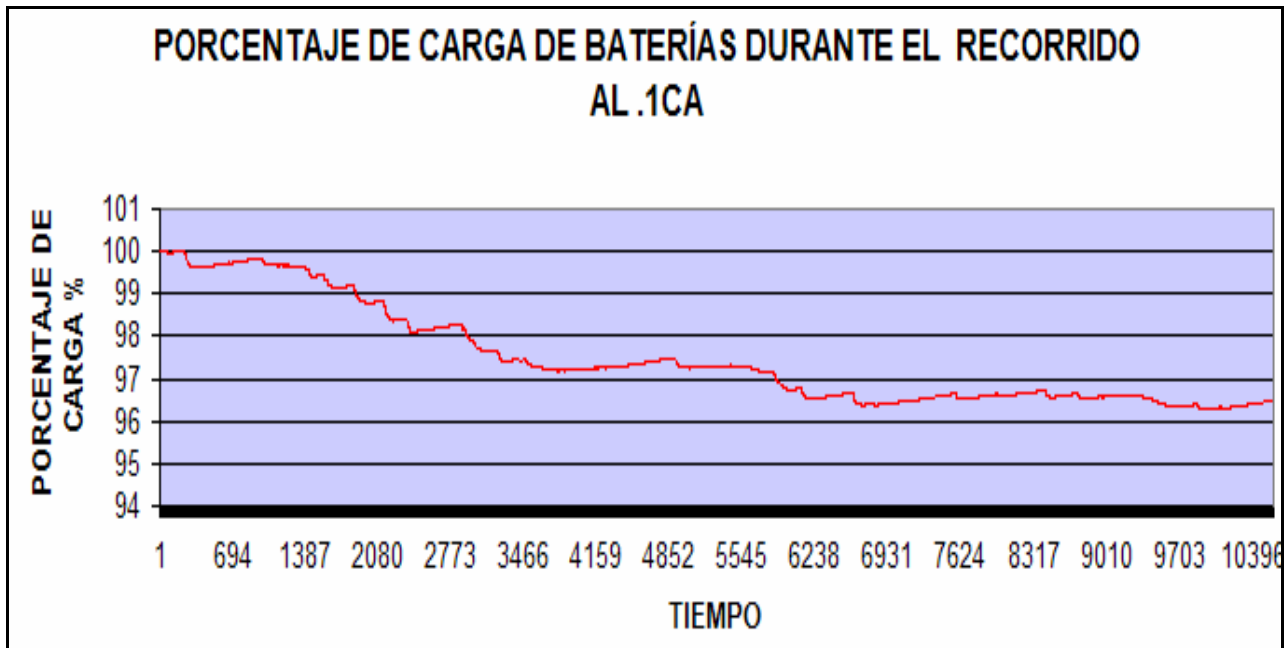


FIGURA 63: GRÁFICA DE NIVEL DE VOLTAJE EN BATERÍAS DURANTE EL RECORRIDO AL .1 CA

Aquí, además de la energía entregada por la celda cuando la potencia es menor a 1000W, se necesitaría más tiempo inactivo para recargar al 100% las baterías, faltarían 13.37Wh por lo que quedarían con un porcentaje de carga del 96.5%.

El segundo caso donde la potencia de carga es de 237.6 W o 0.2C es el caso que se eligió para continuar el análisis. Ya que se tiene la certeza del voltaje en baterías, pero existe un cierto grado de incertidumbre para conocer el nivel de hidrógeno del tanque, se propone hacer uso de un flujómetro, aunque estos aparatos pueden ser costosos. Usando este tipo de aparato, podremos estar seguros de la cantidad de hidrógeno que hay en el tanque y se podría entonces establecer el régimen adecuado de carga de las baterías para que una vez que se acabe el hidrógeno del tanque, las baterías estén completamente cargadas y podríamos tener mayor precisión para determinar la autonomía restante del trayecto, pero este parámetro queda libre para el posterior diseño del controlador, dependiendo del uso del vehículo.

Para hacer el cálculo de eficiencia y consumo de combustible se consideraron distintas eficiencias para tres intervalos de operación de la celda: la eficiencia es del 50% cuando la potencia entregada por la celda es menor a 600W, si la potencia está entre 600 y 800W

entonces la eficiencia es de 46% y si es mayor a 800W es de 43% (estas eficiencias fueron tomadas de las tablas del fabricante, figura 64):

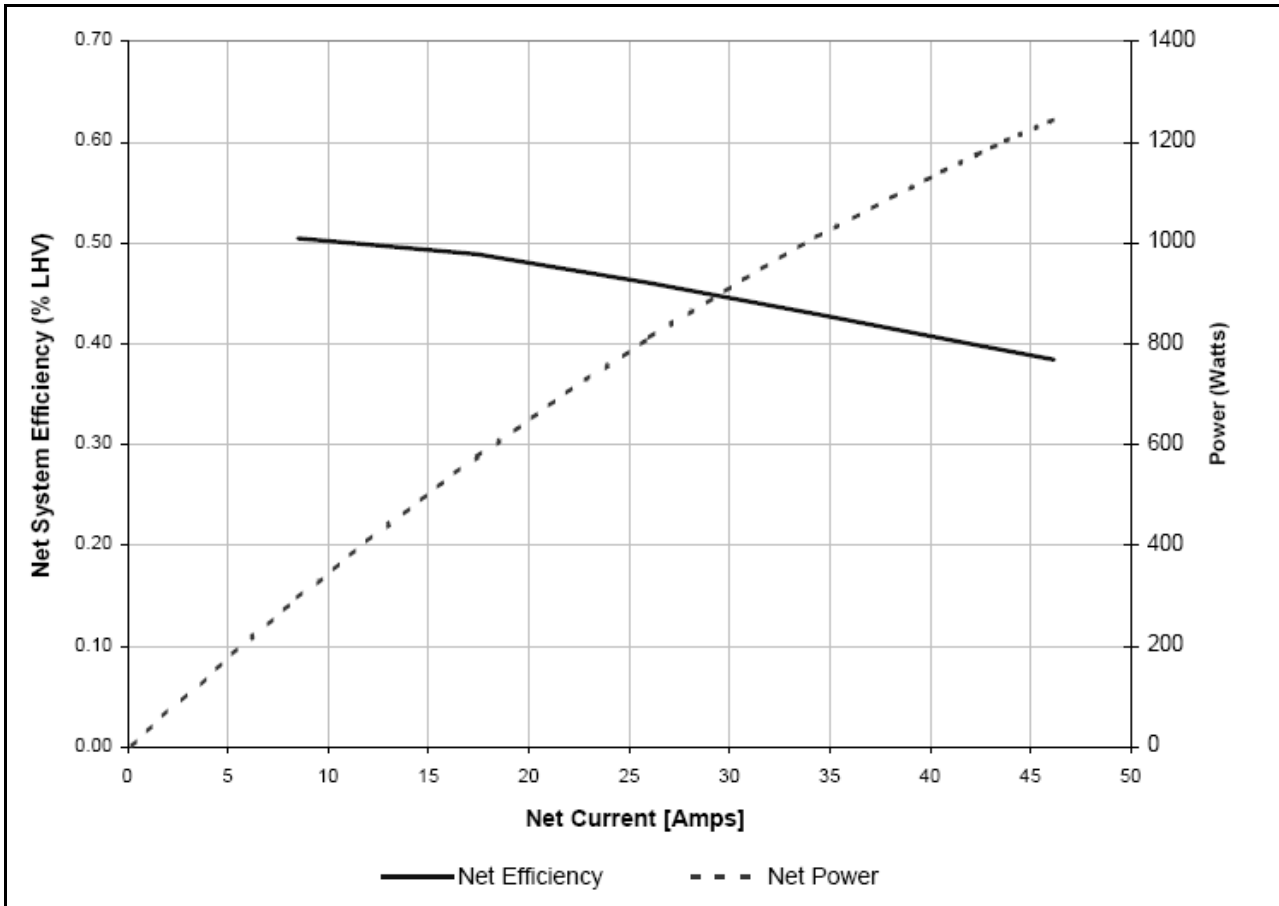


FIGURA 64: GRÁFICA EFICIENCIA CONTRA CORRIENTE DEMANDADA EN EL MÓDULO NEXA

Con estas consideraciones el cálculo del consumo de energía para un recorrido de 3 km fue de 175.57 Wh, lo que significa que tiene un consumo de 49.87 litros de hidrógeno y si el tanque de hidruros metálicos propuesto tiene 300 litros, la autonomía con hidrógeno será de 18.64 km. Una vez que el hidrógeno se haya agotado el vehículo funcionará únicamente con baterías y si la energía almacenada en las tres baterías, usando la energía con una tasa de descarga de una hora, es de 19.8Ah a 36 V, 712.8 Wh por 90% de eficiencia del motor y 90% de la eficiencia de las baterías, se tiene 577.36 Wh, que da una autonomía de 23 km, dando un total de 41.64 km.

2 CONCLUSIONES:

Una vez realizado el análisis de resultados podemos darnos cuenta de las propiedades del sistema híbrido celda de combustible-baterías, que en relación con un sistema de combustión interna tiene una mayor eficiencia energética 60.4% contra 25%, aproximadamente tres veces más. El sistema que se eligió cumple con las condiciones de espacio de la motocicleta eléctrica, ya que en la parte trasera se tiene un espacio de 50 x 70 cm donde irán colocados la celda de combustible, el sistema de control y tanque de almacenamiento; respecto al peso, se mantuvo dentro de los límites para que el vehículo funcionara adecuadamente, el sistema de celda de combustible le agregará 20 kg más de peso al vehículo. El tanque de hidrógeno que se mandó cotizar, también cumple con las condiciones de espacio y peso, además de que es muy seguro ya que el hidrógeno que se maneja no está a altas presiones y la probabilidad de que existan fugas es baja; también es importante mencionar que el tanque tiene una superficie grande, por lo que para obtener el hidrógeno no se requiere calentar mucho el tanque, es suficiente utilizar las variaciones de temperatura del ambiente para obtener hasta el 90% del hidrógeno almacenado.

La figura 65 muestra el sistema de almacenamiento de hidruros con capacidad de 300 litros y alto rango de descarga:

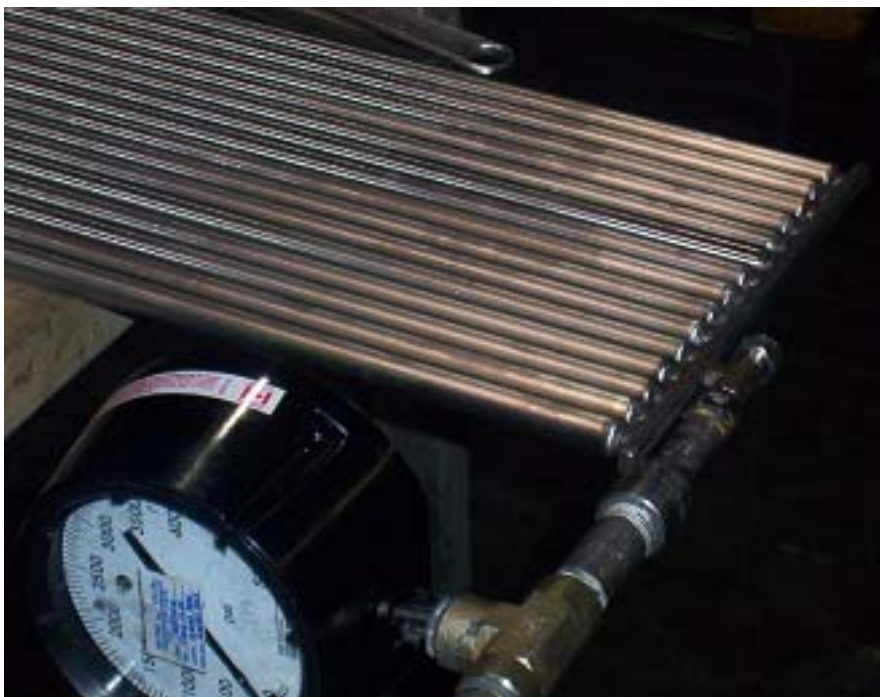


FIGURA 65: FOTOGRAFÍA DE TANQUE DE HIDRUROS METÁLICOS DE 300 l

Con respecto a la autonomía de la motocicleta, al agregar el sistema a hidrógeno prácticamente se duplicaría, pasando de los 23 km con baterías a 41.63 km.

Actualmente el hidrógeno es bastante caro, \$350 pesos por metro cúbico (1000 l), una recarga del tanque propuesto de 300 litros costaría \$105 pesos, para brindar una autonomía de 18.64 km. Este costo es muy elevado con respecto al sistema a gasolina, pero hay que tomar en cuenta que con el desarrollo de tecnologías, en especial los procesos biológicos, donde se pueden tener altos grados de eficiencia de manera limpia, aprovechando residuos orgánicos de comida y jardinería principalmente, el costo del hidrógeno se reducirá considerablemente. La evolución de los procesos de producción de hidrógeno es un proceso a largo plazo.

El desarrollo de nuevas tecnologías en celdas de combustible es necesario para la reducción de costos, utilizando materiales más abundantes como catalizadores, reemplazando el platino por aleaciones de otros metales más comunes, polímeros más económicos y más resistentes a la degradación por calor, para aumentar su vida útil.

3. GLOSARIO DE TÉRMINOS:

Voltaje RMS:

El valor RMS es el valor del voltaje o corriente en alterna que produce el mismo efecto de disipación de calor que su equivalente de voltaje o corriente directa. (Root Mean Square – Raíz Media Cuadrática). Para obtener el voltaje RMS se multiplica el valor pico de la señal alterna por la raíz cuadrada de dos entre dos o .707:

$$V_{RMS} = V_{PICO} \times 0.707$$

Resistencia aerodinámica:

Se denomina resistencia aerodinámica al componente de la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través del aire en la dirección de la velocidad relativa entre el aire y el cuerpo. La resistencia es siempre de sentido opuesto a dicha velocidad.

Resistencia al avance:

Es la fuerza que se ha de ejercer para poner en movimiento el sistema (coeficiente de rodadura estático), o bien para mantener su velocidad (coeficiente de rodadura dinámico). Este último también depende de la velocidad. Y se puede obtener con la formula: $R_r = rmg$ Donde: r es el coeficiente de rodadura dinámico, m es la masa del cuerpo en kg y g es la gravedad.

Coefficiente de rodadura:

Es un numero adimensional que se utiliza para el estudiar la interacción de dos cuerpos que friccionan entre si. El valor del coeficiente de rodadura es característico de cada sistema, ya que aplicado a un vehículo se tienen distintos parámetros como las durezas de la rueda y superficie, el radio de la rueda (a mayor radio menor resistencia), el peso al que se somete cada rueda, en el caso de ruedas neumáticas o hidráulicas su presión (a mayor presión menor resistencia), temperatura, el acabado de las superficies en contacto, y velocidad relativa. Normalmente este dato puede ser obtenido de tablas.

Coeficiente aerodinámico:

Los coeficientes aerodinámicos son números adimensionales que se utilizan para el estudio aeronáutico o aerodinámico de las fuerzas y momentos que sufre un cuerpo cualquiera en movimiento en contacto con el aire. Para obtener el coeficiente aerodinámico de un cuerpo se utiliza la fórmula: $C_a = \frac{1}{2} \rho V^2 A$

Donde: ρ es la densidad del aire, V es la velocidad del cuerpo y A es el área transversal del cuerpo en contacto con el aire.

Filtro paso bajas:

En electrónica un filtro paso bajo corresponde a un filtro caracterizado por permitir el paso de las frecuencias de una señal de entrada más bajas y atenuar las frecuencias más altas. El filtro requiere de dos terminales de entrada y dos de salida. Existe una frecuencia de corte o F_c donde la amplitud de la señal entrante cae hasta un 70.7 % de su valor máximo o -3dB.

Gráfica de bode:

Un Diagrama de Bode es una representación gráfica que sirve para caracterizar la respuesta en frecuencia de un sistema. Normalmente consta de dos gráficas separadas, una que corresponde a la magnitud de dicha función y otra que corresponde a la fase. Recibe su nombre del científico que lo desarrolló, Hendrik Wade Bode. Es una herramienta muy utilizada en el análisis de circuitos en electrónica, siendo fundamental para el diseño y análisis de filtros y amplificadores

RPM:

Revoluciones por minuto es una unidad de frecuencia, usada frecuentemente para medir la velocidad angular. Una revolución es una vuelta de rueda.

PEM:

De sus siglas en inglés (Proton Exchange Membrane), es una membrana de intercambio protónico, con la que se construyen celdas de combustible de hidrógeno. Esta membrana

es la encargada de separar el átomo del hidrógeno dejando pasar únicamente los protones para que los electrones queden libres y generen una corriente al conectar una carga.

MEA:

De sus siglas en ingles (Membrane Electrode Assembly) o Ensamble de Membrana-Electrodo. Es el arreglo que se utiliza en las celdas de combustible tipo PEM, donde se coloca la membrana de intercambio protónico entre dos electrodos que utilizan platino y una placa de carbón para catalizar y colectar los electrones respectivamente. Un electrodo hace de ánodo y otra de cátodo.

4. Anexos:



Valve Regulated Lead-Acid Rechargeable Battery



BP33-12(S)

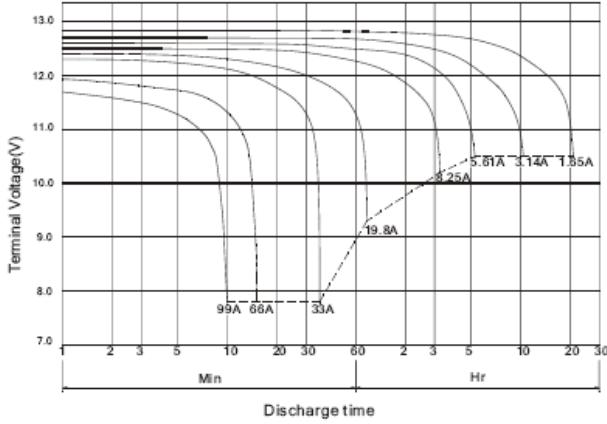
Standard Type

The battery is constructed by plates, separators, safety valves and container. Since the electrolyte is held by a glass-mat separator and plates, the battery can be used in any direction and position without leakage.

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

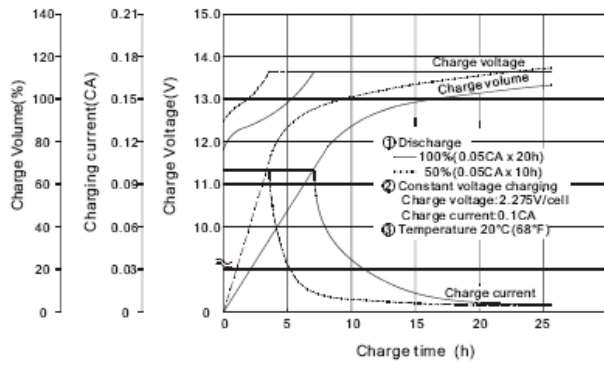
Nominal Voltage(V).....	12 volts(6cells in series)
Nominal Capacity(AH)	
20 hour rate F.V.(1.75V/cell) (1650mA to 10.5volts)	33.0 A.H.
10 hour rate F.V.(1.75V/cell) (3140mA to 10.5volts)	31.4 A.H.
5 hour rate F.V.(1.75V/cell) (5610mA to 10.5volts)	28.1 A.H.
1 hour rate F.V.(1.55V/cell) (19800mA to 9.30volts).....	19.8 A.H.
Approximate Weight.....	11250g(24.81lbs.)
Terminal	
Standard.....	Type B7
Internal Resistance (Fully Charged Battery).....	<9mΩ
Maximum Discharge Current For 5 sec.(A).....	495A
Maximum Charge Current(A).....	9.9A
Ambient Temperature	
Charge.....	0°C(32°F)~40°C(104°F)
Discharge.....	-20°C(-4°F)~50°C(122°F)
Storage.....	-20°C(-4°F)~40°C(104°F)
Vibration test:	
Frequency: 16.7HZ	
Amplitude: 4mm	
Vibrate the battery horizontally or vertically for 60 minutes. The battery have no abnormality.	
Case.....	ABS
Dimension(mm/inch)	
Length ±1.5mm.....	195/7.68
Width ±1.5mm.....	129/5.08
Container Height ±1.5mm.....	155/6.10
Total Height ±2mm.....	179/7.05
Application.....	Wheelchairs, Lawn Mowers, Electronic Medical Equipment, UPS, Golf-Carts.

BP33-12(S) Battery discharge characteristics (25°C/77°F)



Battery Charging Characteristics

(Typical example of charge characteristics for the standby use)

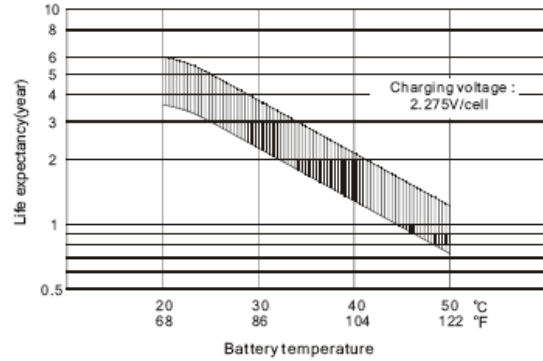


Charging Procedure

Application	Charging method	Charging Voltage at 20°C (V/cell)	Temperature compensation coefficient of charging voltage (mV/°C/cell)	Max. charging current (CA)	Charging time 0.1CA, 20°C (h)		Temp (°C)
					100% discharge	50% discharge	
For standby power Source	Constant voltage & Constant current charging (with current restriction)	2.25~2.30	-3	0.3	24	20	0~40 (32~104°F)
For cycle service					16	10	

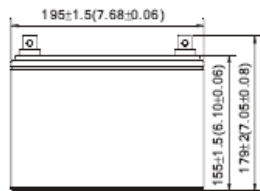
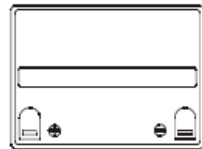
*Temperature compensation of charging voltage is not needed, when using the batteries within 5°C to 35°C range.

Effect of Temperature on Long Term Float Life



OUTER DIMENSIONS

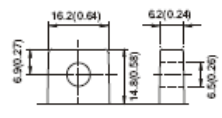
mm(inch)



TERMINAL TYPE

mm(inch)

● Terminal B7

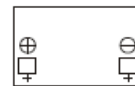


[M6 BOLT & NUT]

Constant power discharge characteristics at 25°C/77°F

Final Voltage	Discharge time								
	5Min	10Min	15Min	30Min	1Hr	3Hr	5Hr	10Hr	20Hr
Battery output power(W)									
10.80V	1193.1	878.3	703.9	418.8	240.18	96.19	66.32	37.06	19.38
10.50V	1381.0	951.6	736.2	434.7	247.38	98.11	67.32	37.62	19.80
10.20V	1467.3	985.8	759.0	444.7	251.83	99.00	67.69	37.81	19.89
9.90V	1533.2	1009.4	776.5	450.9	254.85	99.69	67.92	37.92	19.94
9.60V	1584.0	1029.6	792.0	455.4	257.40	100.29	68.13	37.92	19.94

TERMINAL POSITION



B.B. BATTERY CO., LTD.

Web Site: <http://www.bb-battery.com>

USA:
B&B BATTERY(USA) INC.
6415 RANDOLPH ST.COMMERCE,
CA,90040 U.S.A.
TEL:1-323-278-1900,1-800-278-8599
TEL:1-323-278-1268
E-Mail:sales@bb-battery.com

EUROPE:
B&B BATTERY(EUROPE) B.V.
3 WIJNGAARDVELD, 9300 AALST,BELGIUM
TEL:(00)32-53781567
FAX:(00)32-53781567
E-Mail:hansdevriese@bb-battery.com

CHINA FACTORY:
B.B. BATTERY CO., LTD.
CHENG DONG TRIAL AREA,HUANG GANG,
RAOPING, GUANG DONG,CHINA,515700
TEL:86-768-7601001-2
FAX:86-768-7601469
E-Mail:maggy@bb-battery.com

HONG KONG:
NATIONAL TRADING LTD.
TEL:852-2301-3800
FAX:852-2739-1182
E-Mail:bbhk@hkstar.com

JAPAN:
B&B BATTERY(JAPAN) CO., LTD.
1375-11 NARAHARA-MACHI,HACHIOJI,
TOKYO 193-0803,JAPAN.
TEL:81-426-25-6375
FAX:81-426-25-6375
E-Mail:miyata@bb-battery.com

TAIWAN:
B.B. BATTERY(TAIWAN)CO., LTD.
TEL:886-6-502-5150
FAX:886-6-569-8087
E-Mail:maggy@bb-battery.com



REV. Jul. 2005

LM2907/LM2917 Frequency to Voltage Converter

General Description

The LM2907, LM2917 series are monolithic frequency to voltage converters with a high gain op amp/comparator designed to operate a relay, lamp, or other load when the input frequency reaches or exceeds a selected rate. The tachometer uses a charge pump technique and offers frequency doubling for low ripple, full input protection in two versions (LM2907-8, LM2917-8) and its output swings to ground for a zero frequency input.

The op amp/comparator is fully compatible with the tachometer and has a floating transistor as its output. This feature allows either a ground or supply referred load of up to 50 mA. The collector may be taken above V_{CC} up to a maximum V_{CE} of 28V.

The two basic configurations offered include an 8-pin device with a *ground referenced tachometer* input and an internal connection between the tachometer output and the op amp non-inverting input. This version is well suited for single speed or frequency switching or fully buffered frequency to voltage conversion applications.

The more versatile configurations provide differential tachometer input and uncommitted op amp inputs. With this version the tachometer input may be floated and the op amp becomes suitable for active filter conditioning of the tachometer output.

Both of these configurations are available with an active shunt regulator connected across the power leads. The regulator clamps the supply such that stable frequency to voltage and frequency to current operations are possible with any supply voltage and a suitable resistor.

Advantages

- Output swings to ground for zero frequency input
- Easy to use; $V_{OUT} = f_{IN} \times V_{CC} \times R1 \times C1$

- Only one RC network provides frequency doubling
- Zener regulator on chip allows accurate and stable frequency to voltage or current conversion (LM2917)

Features

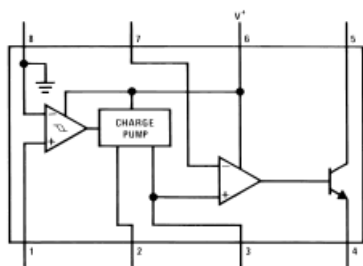
- Ground referenced tachometer input interfaces directly with variable reluctance magnetic pickups
- Op amp/comparator has floating transistor output
- 50 mA sink or source to operate relays, solenoids, meters, or LEDs
- Frequency doubling for low ripple
- Tachometer has built-in hysteresis with either differential input or ground referenced input
- Built-in zener on LM2917
- $\pm 0.3\%$ linearity typical
- Ground referenced tachometer is fully protected from damage due to swings above V_{CC} and below ground

Applications

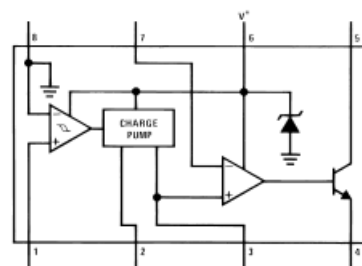
- Over/under speed sensing
- Frequency to voltage conversion (tachometer)
- Speedometers
- Breaker point dwell meters
- Hand-held tachometer
- Speed governors
- Cruise control
- Automotive door lock control
- Clutch control
- Horn control
- Touch or sound switches

Block and Connection Diagrams

Dual-In-Line and Small Outline Packages, Top Views



00794201
Order Number LM2907M-8 or LM2907N-8
See NS Package Number M08A or N08E



00794202
Order Number LM2917M-8 or LM2917N-8
See NS Package Number M08A or N08E

LM124/LM224/LM324/LM2902 Low Power Quad Operational Amplifiers

General Description

The LM124 series consists of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, DC gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM124 series can be directly operated off of the standard +5V power supply voltage which is used in digital systems and will easily provide the required interface electronics without requiring the additional $\pm 15V$ power supplies.

Unique Characteristics

- In the linear mode the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage
- The unity gain cross frequency is temperature compensated
- The input bias current is also temperature compensated

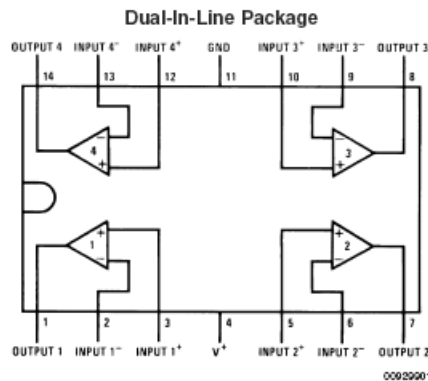
Advantages

- Eliminates need for dual supplies
- Four internally compensated op amps in a single package
- Allows directly sensing near GND and V_{OUT} also goes to GND
- Compatible with all forms of logic
- Power drain suitable for battery operation

Features

- Internally frequency compensated for unity gain
- Large DC voltage gain 100 dB
- Wide bandwidth (unity gain) 1 MHz (temperature compensated)
- Wide power supply range:
 - Single supply 3V to 32V
 - or dual supplies $\pm 1.5V$ to $\pm 16V$
- Very low supply current drain (700 μA)—essentially independent of supply voltage
- Low input biasing current 45 nA (temperature compensated)
- Low input offset voltage 2 mV and offset current: 5 nA
- Input common-mode voltage range includes ground
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage swing 0V to $V^+ - 1.5V$

Connection Diagrams

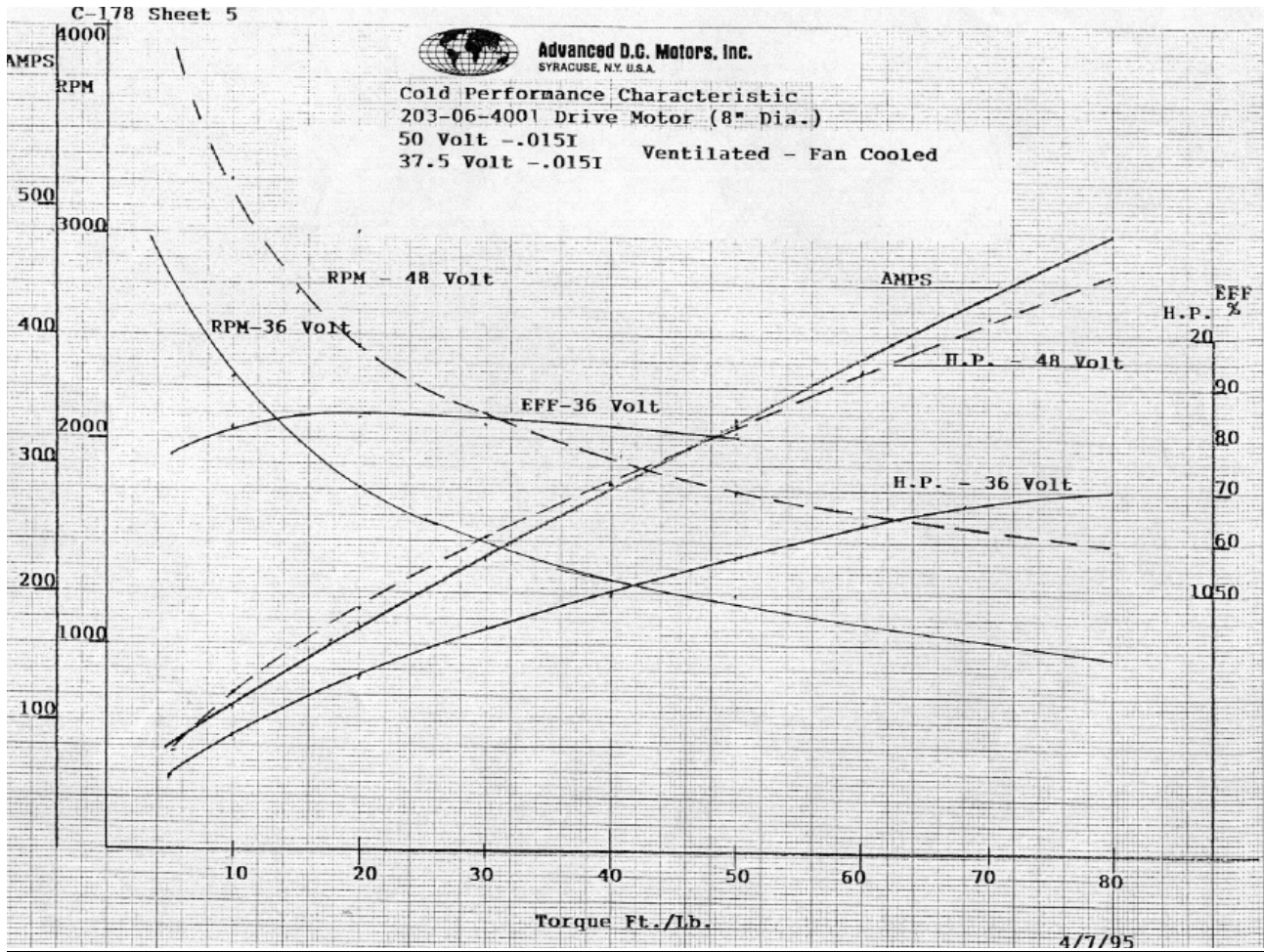


Order Number LM124J, LM124AJ, LM124J/883 (Note 2), LM124AJ/883 (Note 1), LM224J, LM224AJ, LM324J, LM324M, LM324MX, LM324AM, LM324AMX, LM2902M, LM2902MX, LM324N, LM324AN, LM324MT, LM324MTX or LM2902N LM124AJRQML and LM124AJRQMLV (Note 3)
See NS Package Number J14A, M14A or N14A



Advanced D.C. Motors, Inc.
SYRACUSE, N.Y. U.S.A.

Cold Performance Characteristic
203-06-4001 Drive Motor (8" Dia.)
50 Volt -.015I
37.5 Volt -.015I Ventilated - Fan Cooled



4/7/95

5 BIBLIOGRAFÍA

-Conversión de energía electromagnética

Vembu Gourishankar

Ed Alfaomega 1995

-Circuitos en ingeniería eléctrica

Hugh Hildreth Skilling

Ed. Continental S.A 1963

-Dispositivos electrónicos y amplificadores de señales

Adel S.Sedra

McGraw- Hill 1989

-Power semiconductor circuits

S.B. Dewan

Jhon Willey & Sons 1975

-Análisis y diseño de circuitos integrados analógicos

Paul R. Cray

Robert. G. Mayer

Prentice Hall Hispanoamérica S.A 1995

-Motores y generadores eléctricos

Emery ETG

Aguilar 1961

-Mecánica para estudiantes de ingeniería

Lane K Branson

Fondo Educativo Interamericano 1970

-Ingeniería electroquímica

Mantell Tp 255M34

-Interfacial electrochemistry

Andrzej

QD5556158157

-Principles of electrochemical reactor

Fahidy, Thomas

-Electrochemical systems

John Newman

-Analytical and physical electrochemistry

Girault Hubert

-Análisis de Vehículos Eléctricos:

<http://www.ije.org.mx/publica/bolmj97/tenmj97.htm>

<http://www.cloudelectric.com/category.html?UCIDs=1215201>

http://gea.ing.unrc.edu.ar/gea/Publicaciones/2002/LPerez_CBA02_741.pdf#search='din%C3%A1mica%20de%20un%20vehiculo%20electrico'

<http://iteso.mx/~juanmanuel/vinculci/vee/merlin.pdf#search='din%C3%A1mica%20de%20un%20vehiculo%20electrico'>

<http://www.engineering.uakron.edu/husain/personal/pdf/SAE99.pdf>

http://ieee-cis.org/files/EAC_Research_2005_Report_Wang.pdf

-Teoría de motores:

<http://www.reliance.com/mtr/mtrthrmn.htm>

-Baterías:

<http://www.buchmann.ca/chap2-page2.asp>

[http://www.bb-battery.com/productpages/BP/BP33-12\(S\).pdf](http://www.bb-battery.com/productpages/BP/BP33-12(S).pdf)

<http://www.carbi.net/tecnica/newpage1.html>

http://www.fondear.org/infonautic/Equipo_y_Usos/Electricidad_Energia/Baterias_y_tecnologias/Baterias_tecnologias.htm

-Hidrógeno:

http://www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17756.html

http://www.nrcan.gc.ca/es/etb/ctfca/PDFs/english/Hydrogen_report_final1.html

<http://www.mpr.com/pubs/hydroprod.pdf#search='hydrogen%20production%20cost'>

http://www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/articles-54964_cost_storing.pdf

<http://www.las-ans.org.br/Papers%202007/pdfs/Paper052.pdf>

-Hidruros Metálicos:

<http://www.safehydrogen.com/PDFs/28890o.pdf>

<http://www.hydrogencomponents.com/thermo.html>

-Controladores de velocidad:

<http://www.4gdtec.com/pwm-01.html>

<http://webpages.ull.es/users/srbuenaf/potencia/material/Introduccion.pdf#search='TROCE ADORES%20PARA%20CONTROL%20DE%20VELOCIDAD'>

<http://www.ddmotorsystems.com/Club%20Car%20Series%20Controller.pdf>

<http://www.gasgolfcart.com/Controllers /ProControllers.htm>

-Electrólisis:

http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review06/pd_8_bourgeois.pdf

http://www.scied.science.doe.gov/scied/JUR_v2/pdfs/Warren.pdf

Producción de hidrógeno a partir de biomasa:

<http://www.ichet.org/ihec2005/files/manuscripts/Melis%20T.-USA.pdf#search='biological%20hydrogen'>

<http://fuelreformer.sirti.org/docs/3479B37B-C04F-791A-3CCED7A429A7EDB8.pdf>

<http://batman.mech.ubc.ca/~mech410I/Projects/Presentations/10.%20Biological%20Hydrogen%20Production%20051123.pdf>

<http://www.engr.psu.edu/ce/enve/publications/2005-VanGinkel&Logan-WatRes.pdf>

<http://www.engr.psu.edu/ce/enve/h2e/H2E-bio.htm>

-Celdas de Combustible:

<http://www.uctc.net/papers/257.pdf>

http://www.fuelcell.com/p_fuelcellcustom.asp

<http://fuelcellworks.com/Justthebasics.html>

-Fórmulas dinámicas:

<http://www.filebox.vt.edu/users/hrakha/Publications/Variable%20Power%20Truck%20Acceleration%20-%20Ver%202.0.pdf>

Ultracapacitores:

http://www.isecorp.com/hybrid_information_center/pdf/technical_paper_ultracaps.pdf