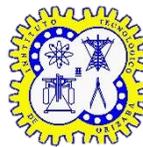




**SEP**  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®



INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE ORIZABA

# TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

CAMPUS ORIZABA

PROGRAMA:  
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

DOCUMENTO DOCTORAL

TEMA:  
“ANÁLISIS FÍSICO Y DINÁMICO DE UNA CELDA DE  
COMBUSTIBLE TIPO PEMFC CON SISTEMA DE  
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA SER USADO EN  
APLICACIONES DE BAJA POTENCIA”

PRESENTA:  
**MC. OSCAR RENE MORGADO LIEVANA**

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. RUBÉN POSADA GÓMEZ

---

# Contenido

Lista de tablas.....	III
Lista de Figuras.....	III
ACRÓNIMOS.....	VI
NOMENCLATURA.....	VII
INTRODUCCIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	8
OBJETIVOS.....	11
JUSTIFICACIÓN .....	12
HIPÓTESIS.....	14
Hipótesis general	14
CAPITULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	15
1.1 Antecedentes	15
1.2 Celda de combustible	16
1.2.1 Funcionamiento de la Celda de Combustible	16
1.2.2 Pila de combustible	17
1.2.3 Características Eléctricas	17
1.2.4 Tipos de Celdas	19
1.2.5 Aplicaciones	23
1.3 Sistema de Almacenamiento	26
1.3.1 Supercapacitor	26
1.3.2 Baterías	27
Capítulo 2: CONVERTIDORES DC/DC PARA SISTEMAS DE GENERACIÓN CON FCs.....	32
2.1 Topologías de Convertidores DC/DC no aislados	32
2.1.1 Convertidor reductor ( <i>Buck</i> )	32
2.1.2 Convertidor elevador (Boost)	33
2.1.3 Convertidor reductor-elevador (Buck-Boost)	34
2.2 Topologías de Convertidores DC/DC aislados	36
2.2.1 Convertidor <i>Cuk</i> aislado	36
2.2.2 Convertidor <i>Forward</i>	37
2.2.3 Convertidor <i>Push-pull</i>	38
2.2.4 Convertidor <i>Half bridge</i>	39
2.2.5 Convertidor Weinberg	40

2.2.6 Convertidor <i>Full bridge</i>	41
2.3 Requerimientos de potencia en convertidores DC/DC para FCs.	42
Capítulo 3: CONVERTIDOR DC/DC PROPUESTO .....	45
3.1 Convertidor DC/DC topología <i>Flyback</i> con FC.	46
3.1.1 Diseño y especificaciones del convertidor <i>Flyback</i>	47
3.1.2 Operación del convertidor <i>Flyback</i> en lazo abierto	55
3.2 Modulo Celda de combustible.	61
3.2.1 Sistema de detección de fugas de hidrogeno	63
3.2.2 Sistema de Almacenamiento hibrido.	65
Capítulo 4: PRUEBAS Y SIMULACIONES DEL SISTEMA.....	70
4.1 Modelo eléctrico simplificado de una Celda de combustible.	70
4.2 Modelo detallado de una Celda de combustible en Simulink.	70
4.3 Caracterización de la FC en Simulink.	71
4.4 Convertidor <i>Flyback</i> en Simulink.	72
4.5 Modelo eléctrico de un SC.	73
4.6 Modelo detallado de un SC en Simulink.	74
4.7 Caracterización de un SC en Simulink.	74
4.8 Convertidor <i>Flyback</i> con FC	76
4.9 Convertidor <i>Flyback</i> con FC/SC (Parte 1)	77
4.10 Convertidor <i>Flyback</i> con FC/SC/BATT (Parte 2)	78
4.11 Convertidor <i>Flyback</i> con FC/SC/BATT (parte 3)	79
4.12 Control convertidor <i>Flyback</i> Matlab/simulink	80
Capítulo 5: VALIDACIÓN EXPERIMENTAL .....	82
5.1 Diagrama eléctrico del convertidor <i>flyback</i> para operar la FC	82
.....	82
5.2 Descripción de las pruebas	83
.....	89
5.3 Discusión	105
Capítulo 6: CONCLUSIONES.....	105
6.1 Conclusiones generales	105
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	107
PRODUCTOS ACADÉMICOS .....	112

---

---

## Lista de tablas

Tabla 1.1 Clasificación de las FC por electrolito.	20
Tabla 1.2. Eficiencia de las celdas de combustible.	21
Tabla 2.1 Rangos de potencia en FCs.	42
Tabla 2.2 Rangos de potencia de convertidores DC/DC.	43
Tabla 3.1 Especificaciones de diseño del convertidor Flyback	47
Tabla 3.2 Especificaciones del Flyback I	47
Tabla 3.3 Especificaciones del Flyback II	52
Tabla 3.4 Valores calculados	57
Tabla 5.1 Comparación de mediciones de los sensores de voltaje	98
Tabla 5.2 Comparación de mediciones de los sensores de corriente	99

## Lista de Figuras

Figura 1.1. Efecto invernadero	1
Figura 1.2. Cambio climático	2
Figura 1.3. Consumismo	2
Figura 1.4. Tecnologías con gran aceptación mundial.	4
Figura 1.5. Diagrama a bloques del sistema de potencia con FC	6
Figura 1.6. Curva de Hubbert.	9
Figura 1.7 Operación de una celda de combustible	16
Figura 1.8 Pila de combustible.	17
Figura 1.9 Interconexión modular de varias celdas (stack)	17
Figura 1.10 Curva de densidad de corriente de una FC ideal.	18
Figura 1.11 Demanda de corriente de una carga externa.	19
Figura 1.12 Aplicaciones de las FC.	24
Figura 1.13 Dispositivos de muy baja potencia.	24
Figura 2.1. Convertidor reductor (Buck).	33
Figura 2.2. Convertidor elevador (Boost).	34
Figura 2.3. Convertidor reductor elevador (Buck-Boost).	35

Figura 2.4. Circuito eléctrico Cuk aislado con FCs.	36
Figura 2.5. Circuito eléctrico convertidor Forward con FCs.	37
Figura 2.6. Circuito eléctrico variante convertidor Forward en FCs.	37
Figura 2.7. Circuito eléctrico del convertidor Push-pull con FCs.	38
Figura 2.8. Circuito eléctrico del convertidor Half Bridge con FCs.	39
Figura 2.9. Circuito eléctrico del convertidor Weinberg con FC.	40
Figura 2.10. Circuito eléctrico del convertidor Full bridge para FC.	41
Figura 2.11. Clasificación de potencia y voltaje en los convertidores.	42
Figura 2.12. Diagrama de flujo de selección del convertidor DC/DC para FC.	44
Figura 3.1. Acondicionador de potencia propuesto para FC.	46
Figura 3.2. Circuito eléctrico del acondicionador de potencia en lazo abierto	57
Figura 3.3. Circuito eléctrico del convertidor en estado “ON” operando en modo estable.	58
Figura 3.4. Circuito eléctrico del convertidor en estado “OFF” operando en modo estable	59
Figura 3.5. Diagrama de tiempos del convertidor.	60
Figura 3.6. Transferencia de energía a la carga.	60
Figura 3.7. Modo en operación crítico.	61
Figura 3.8. Transferencia de energía a la carga en modo crítico	61
Figura 3.9. Modo en operación óptima	62
Figura 3.10. Transferencia de energía a la carga en modo óptimo	63
Figura 3.11. Diagrama de tiempos del convertidor en operación óptima	63
Figura 3.12. Módulo FC de Horizon technologies®.	64
Figura 3.13. Sistema de detección de hidrógeno con Arduino	65
Figura 3.14. Calibración del sistema de detección	66
Figura 3.15. Calibración terminada (asignación resistiva).	66
Figura 3.16. Sistema de detección en funcionamiento.	67
Figura 3.17. Electrolizador utilizado para la generación de hidrógeno	67
Figura 3.18. Banco de SC de la marca Maxwell® Technologies	68
Figura 3.19. Batería amortiguando los picos de corriente de la carga	68
Figura 3.20. Amortiguamiento de la descarga de una batería con SC.	69
Figura 4.1. Modelo simplificado de una FC.	70
Figura 4.2. Modelo detallado de FC en Simulink®.	71
Figura 4.3. Circuito de caracterización de la FC en Simulink.	71
Figura 4.4. Comportamiento de la FC ante demandas de energía	72
Figura 4.5. Circuito de topología Flyback en Simulink.	72
Figura 4.6. Gráfica del voltaje de salida en el Flyback	73
Figura 4.7. Circuito equivalente eléctrico de un SC.	73
Figura 4.8. Modelo detallado de un SC en Simulink.	74
Figura 4.9. Circuito de caracterización de un SC en Simulink	75
Figura 4.10. Curva de carga de un SC @2.7 V, 350 F.	75
Figura 4.11. Conexión de FC con Flyback.	76
Figura 4.12. Comportamiento de la FC con el convertidor Flyback.	76
Figura 4.13. Circuito del convertidor Flyback (parte 1).	77
Figura 4.14. Comportamiento del convertidor Flyback (parte 1).	77
Figura 4.15. Circuito del convertidor Flyback (parte 2).	78

Figura 4.16. Comparación entrada vs salida del convertidor Flyback (parte 2).	78
Figura 4.17. Circuito de convertidor Flyback (parte 3).	79
Figura 4.18. Comportamiento del convertidor Flyback (parte 3).	79
Figura 4.19 Modelo de convertidor de Flyback en Matlab/Simulink	80
Figura 4.20 Comparativa entre voltaje de entrada y corriente de salida para el PID	80
Figura 4.21 Potencia de salida del controlador PID	81
Figura 4.22 Voltaje de salida del PID	81
Figura 5.1 Convertidor digital propuesto Raspberry Pi 3B para la FC	82
Figura 5.2 Conexión y suministro de gas con cilindro de H <sub>2</sub>	83
Figura 5.3 Sensor de hidrogeno para ppm	84
Figura 5.4 Detector de hidrógeno de la marca BITWO®	84
Figura 5.5 Sistema portátil generador de gas GENERH2	85
Figura 5.6 Construcción y armado del electrolizador	85
Figura 5.7 Electrolizador 12 V@ 5 A	86
Figura 5.8 Sistema GENERH2 con energía solar	86
Figura 5.9 Supercapacitor Maxwell Technologies para el sistema de respaldo	87
Figura 5.10 Banco SC Maxwell Technologies para el sistema de respaldo	87
Figura 5.11 Carga del supercapacitor	88
Figura 5.12 Pruebas de carga y descarga del Supercapacitor Maxwell	88
Figura 5.13 Pruebas de carga y descarga del banco de SC	89
Figura 5.14 Data logger del banco del SC	89
Figura 5.15 Pruebas de carga y descarga del banco de SC @ 200 W	90
Figura 5.16 Pruebas con cargas resistivas	90
Figura 5.17 Gráfica de tiempo de descarga del banco de SC @ 20 W	91
Figura 5.18 Gráfica de tiempo de descarga del banco de SC @ 50 W	91
Figura 5.19 Gráfica de tiempo de descarga del banco de SC @ 70 W	92
Figura 5.20 Gráfica de tiempo de descarga del banco de SC @ 100 W	92
Figura 5.21 Gráfica de caída de tensión en el SC @ 20 W	93
Figura 5.22 Gráfica de caída de tensión en el SC @ 50 y 20 W	93
Figura 5.23 Gráfica de caída de tensión en el SC @ 50 W	94
Figura 5.24 Gráfica de caída de tensión en el SC @ 70 y 50 W	94
Figura 5.25 Señales de monitoreo y adquisición de datos	95
Figura 5.26 Pruebas de las señales del medidor de corriente y voltaje	95
Figura 5.27 Lecturas de las señales del medidor de corriente y voltaje	96
Figura 5.28 Cálculo de potencia consumida	96
Figura 5.29 Sensor de voltaje B25	97
Figura 5.30 Mediciones en tiempo real con monitor serial	97
Figura 5.31 Sensor de corriente ACS712	98
Figura 5.32 Interfaz gráfica en Labview para monitoreo de señales	99
Figura 5.33 Sistema de adquisición de datos por puerto ADC	100
Figura 5.34 Pruebas del sistema de adquisición de datos por puerto ADC	100
Figura 5.35 Tarjeta Raspberry pi 3B	101
Figura 5.36 Configuración de los pines del puerto GPO	101
Figura 5.37 Pantalla touchscreen 3.5 pulgadas	102

---

Figura 5.38 Pantalla touchscreen con Raspberry pi 3B	102
Figura 5.39 Interfaz de monitoreo del sistema	103
Figura 5.40 Conexión de sensores con ADC	103
Figura 5.41 Interfaz de control de activación de luminarios led	104
Figura 5.42 Activación de luminarios con optoacopladores	104

## ACRÓNIMOS

AFC	Celda de combustible alcalina
CA	Corriente alterna
CA / CD	Corriente alterna o Corriente directa
CD	Corriente directa
CD/CD	Corriente directa o corriente directa
DMFC	Celda de combustible de metanol directo
DSP	Procesamiento digital de señales
MCC	Modo de conducción continuo
MCD	Modo de conducción discontinuo
MCFC	Celda de combustible de carbonato fundido Metálico
MOSFET	Transistor de efecto de campo con semiconductor de oxido
PEMFC	Celda de combustible de membrana de intercambio protónico
PWM	Modulador ancho de pulso
VRM	Modo regulador de voltaje
ADC	Convertidor analógico digital

---

---

## NOMENCLATURA

$C_o$	Condensador de salida
$D$	Ciclo de Trabajo
$f_s$	Frecuencia de conmutación
$I_o$	Corriente de salida
$I_Q$	Corriente de transistor
$L_p$	Inductor primario
$L_s$	Inductor secundario
$\Delta V$	Rizado de trabajo
$N$	Relación de transformación
$P_o$	Potencia de salida
$R_o$	Resistencia de salida
$V_o$	Voltaje de salida
$V_{in}$	Voltaje de entrada
$V_{AKDFW}$	Tensión máxima en el diodo
$V_{FC}$	Voltaje celda de combustible
$V_{SC}$	Voltaje supercapacitores
$I_{FC}$	Corriente celda de combustible
$I_{SC}$	Corriente supercapacitores

---

# INTRODUCCIÓN

Una de las mayores preocupaciones en la actualidad, es causada por la inminente crisis energética, debido al uso excesivo de combustibles fósiles. En los últimos 100 años la generación de energía ha estado basada en su mayoría de fuentes energéticas no renovables lo cual ha creado un factor agravante con el uso desmesurado de estos recursos para producir energía, causando contaminación excesiva, y en consecuencia el efecto invernadero [1] [2] [3] [4].

Este uso excesivo de hidrocarburos ha provocado a lo largo de estos últimos años el incremento gradual de temperatura de la superficie terrestre, dando como resultado el constante cambio climático por el efecto invernadero. En el cual gases como metano, CO<sub>2</sub>, entre otros, no dejan salir a los rayos del sol de forma natural haciendo que estos se queden atrapados y sobrecalienten la corteza terrestre. En la figura 1.1 se muestra una imagen del efecto invernadero.

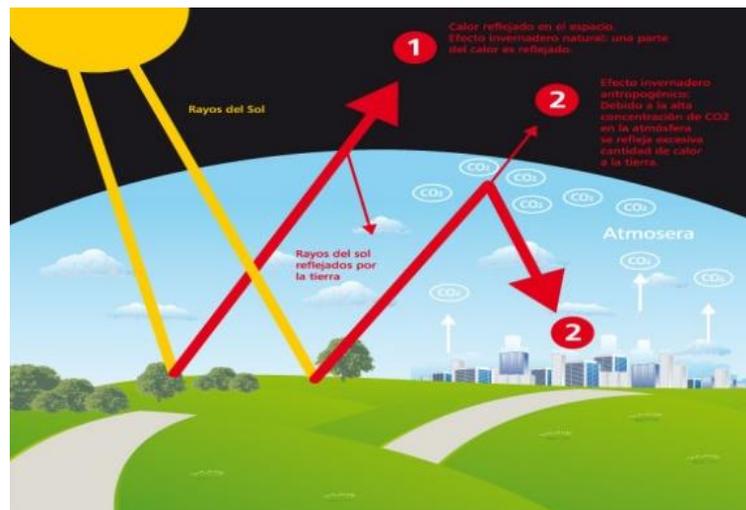


Figura 1.1. Efecto invernadero.

Otras de las consecuencias de utilizar combustibles fósiles se enlistan a continuación:

- El calentamiento Global
- Fenómenos meteorológicos que estamos viviendo año con año.
- Desastres naturales causados por todo este desequilibrio del ecosistema.
- Deshielo de los polos.
- Aumento de precio en casi todas las cosas que consumimos.

---

En la figura 1.2 se aprecia claramente que el cambio climático se está agudizando cada día más de lo que se esperaba, los cambios son tan repentinos y constantes que el hombre no tiene las suficientes herramientas para prevenir algún desastre. En últimos días existen zonas donde simultáneamente se tienen las 4 estaciones del año en una sola.



Figura 1.2. Cambio climático.

Lo anterior ya es un problema grave, y si le sumamos que existe un crecimiento exponencial demográfico desmesurado, por lo que cada vez se hace más difícil abastecer a una población en constante crecimiento. Lo que resulta preocupante, porque cada vez somos más, y menos son los recursos que se tienen. El consumismo es un claro ejemplo de esto y forma parte de la problemática que afecta a la población a nivel mundial. En la figura 1.3 se evidencia el consumismo, que son todas las cosas que no necesitamos, pero seguimos consumiendo.



Figura 1.3. Consumismo [12].

---

---

Por otra parte, año con año se talan miles de árboles para papel higiénico y productos derivados, se utilizan millones de litros de agua para la producción de la ropa que utilizamos, y los miles de millones de productos derivados del petróleo que son necesarios para los dispositivos y otros artículos que consumimos. De modo que para producir todos estos productos también se necesitan cantidades impresionantes de energía, la cual cada vez es más difícil y costosa de producir. Esto ha ido convirtiendo a la energía eléctrica en un recurso invaluable donde cada vez es más indispensable para la vida diaria del hombre. En algunos países se considera a la producción de energía como un asunto primordial, por una parte, por el exceso de población, y por otra para el desarrollo social y económico de los mismos, en donde cada vez existe mayor demanda y dependencia a esta.

Como resumen, los niveles actuales de producción de energía aún están basados casi en su totalidad en energías no renovables por lo que esta situación encuentra un factor agravante en el uso desmesurado de hidrocarburos para producirla y en otros casos la contaminación, por lo que se hace imperativo adoptar nuevas tecnologías de generación de energía eléctrica principalmente basadas en energías renovables [3] [4] [5].

Actualmente, las tecnologías para la generación de energía eléctrica que mayor aceptación tienen en el mundo son mediante fuentes renovables como: el sol, el viento y el agua. Para amortiguar el uso excesivo de los hidrocarburos los gobiernos han tenido que invertir en los últimos años millones de pesos en las siguientes tecnologías:

- generadores eólicos
- generadores solares
- generadores hidroeléctricos.

Como se muestra en la figura 1.4, estas tecnologías están basadas en fuentes renovables, siendo esta última, poco eficiente y descartada debido al cambio climático que afecta considerablemente su funcionamiento, debido a que lugares donde antes eran abundantes y ricos en afluentes como ríos y lagunas ahora están secos, y donde el clima era desértico, ahora llueve en exceso y provoca inundaciones.



Figura 1.4. Tecnologías con gran aceptación mundial [12].

Por otra parte, la energía solar y eólica, aun no son capaces de ser autosuficientes, a causa que solo la mitad del día tenemos sol y no siempre existen grandes ráfagas de viento, no se descarta el hecho que siempre hay radiación y viento, pero no de manera constante como se necesita, de manera que estas tecnologías por sí solas solo se consideran complementarias para combatir la crisis energética y una opción viable para alargar la vida de los hidrocarburos [11] [12].

Está claro que, la generación de energía eléctrica a través de energías renovables no se compara como sustituto del combustible fósil que actualmente es usado como fuente principal de energía, debido a las propiedades energéticas que este posee. Pero si las nuevas tecnologías se fusionan y forman sistemas híbridos robustos capaces de generar energía eléctrica, aprovechando al máximo las fuentes inagotables como el sol y el viento, los sistemas se complementan uno con otro adquiriendo la propiedad de generar energía constante durante el día y durante la noche.

La tecnología que actualmente está generando un gran impacto por que tiende a ser una fuente principal de energía para el futuro, son las “celdas de combustible” (FC’s por sus siglas en ingles). Principalmente por que convierte el hidrogeno en energía eléctrica constante mientras el suministro no se interrumpa. Por otra parte, el hidrogeno es el elemento más abundante en el planeta y se obtiene mediante distintos procesos. Y lo más interesante, que en combinación con otros sistemas es suficiente para cubrir la demanda nocturna de electricidad.

En general, el desarrollo de fuentes de generación de energía renovables basados en celdas de combustible, toma un rol importante en la protección del medio ambiente y se convierte en un

---

---

gran aliado para combatir la crisis energética y mitigar emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [12].

Por lo tanto, las FC's son una opción viable para la solución a la inminente crisis energética. Sin embargo, las FC's aún son una tecnología en desarrollo, por lo que constantemente busca hacer mejoras a sus limitaciones como: dinámica lenta, la cual está en función del suministro de hidrogeno y oxigeno del sistema, debido a esto, su respuesta a cambios bruscos de demanda de energía es lenta. Por lo anterior, es necesario que las FC's tengan un sistema de respaldo de energía para compensar los retardos presentados al funcionamiento.

Las baterías y los supercapacitores (Batt's y SC's por sus siglas en inglés) efectúan un papel importante en diversos estudios como sistemas de respaldo de energía para fuentes renovables de energía. Siendo atractivo, el hecho que ambos individualmente tienen la capacidad de almacenar y suministrar más energía que un capacitor convencional [25] [26]. Aunque el comportamiento entre las Batt's y los SC's es distinto, se vuelve un hecho interesante el fusionar estos dos sistemas de almacenamiento (SA's), y de esta manera formar un nuevo sistema híbrido mejorado como respaldo de energía para las FC's con características particulares de ambos sistemas. Usualmente, estos sistemas requieren un acondicionamiento de energía para ser capaces de almacenar y entregar correctamente la misma. Este acondicionamiento es realizado por convertidores de voltaje, que son utilizados como reguladores de energía primaria proveniente de las FC's y secundaria de los SA's, esto con la finalidad que la FC opere eficientemente por periodos más largos utilizando ambas tecnologías. Existen distintas aplicaciones las cuales se integran las FC's por mencionar las más importantes: Sistemas Estacionarios de Energía, Transporte, Sistemas de Respaldo, entre otras.

De acuerdo a la literatura, existen dos grupos de sistemas de potencia basados en FC's, los convertidores DC-DC aislados y los convertidores DC-DC no aislados. Entre los aislados se encuentran el convertidor “*boost*” y “*cuk*” con sus respectivas variantes, y por último el convertidor: “*forward*”, “*pushpull*”, “*half bridge*” y “*full bridge*” con sus respectivas variantes como no aislados.

---

Estas topologías usadas en aplicaciones con fuentes renovables de energía como lo son las FCs, tienen como objetivo principal mejorar el desempeño del sistema. Los requerimientos mínimos necesarios de un convertidor DC-DC son: alta eficiencia, alta fiabilidad, y una buena regulación.

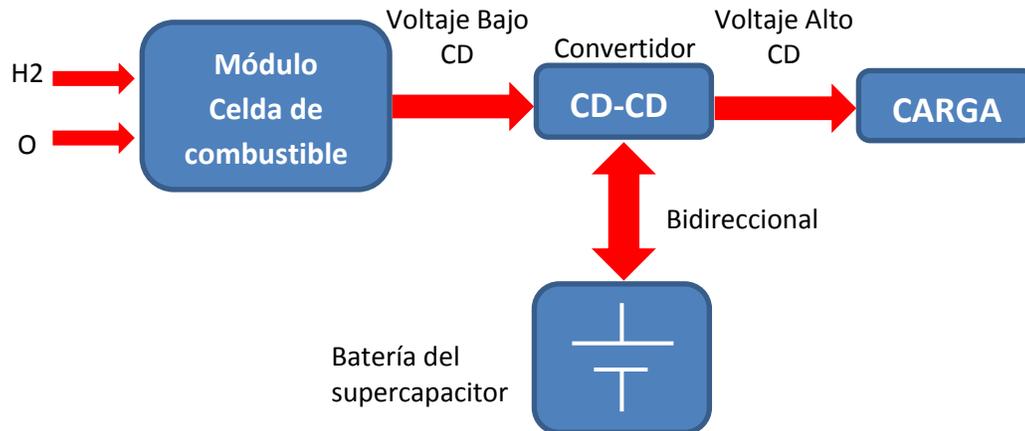


Figura 1.5. Diagrama a bloques del sistema de potencia con FC.

En la figura 1.5 se muestra el diagrama a bloques de un típico sistema de potencia basado en celda de combustible. En la literatura se muestra que existe una tendencia por mejorar propiedades particulares de las FCs como eficiencia, volumen, fiabilidad del equipo y sobre todo costos.

Como se observa en el diagrama a bloques es importante mencionar que al utilizar acondicionadores de potencia para aplicaciones con FCs es necesario un sistema de almacenamiento de energía individual o híbrido con Batt's y SC's, el cual no solo proporciona respaldo o provee una potencia adicional al sistema, también soporta los picos de corriente demandados por la carga. En acondicionadores de potencia, la energía usada en SC's y Batt's es nuevamente almacenada para la siguiente demanda de corriente. Esto implica que el sistema tenga características adicionales como la función de carga y descarga, la cual dependerá directamente de la topología de diseño del convertidor que se utilice.

---

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tema de la inminente crisis energética es un problema que abate a casi todos los líderes políticos a nivel mundial, cuyos países dependen en totalidad de los combustibles fósiles. Se han invertido miles de millones de dólares en posibles soluciones para que este recurso no se termine, lamentablemente la realidad es otra, no es casualidad que exista preocupación en el mundo si esto fuera tan solo un rumor [6].

### **Pico o Cenit del Petróleo**

En una de las cartas citadas por el geólogo estadounidense Dr. Walter Youngquist hacia su colaborador de trabajo Richard C. Duncan, en el 2006 hace mención:

*“El pico del petróleo será un punto de inflexión histórico, cuyo impacto mundial sobrepasará todo cuanto se ha visto hasta ahora, y esto pasará en la vida de la mayoría de las personas que viven hoy en el planeta”.*

Unos meses después, en noviembre del 2016 la Agencia Internacional de Energía (AIE) hizo pública la noticia que “la producción de petróleo crudo había llegado a su pico máximo”. Lo que se quiso decir fue que el pico (o cenit) del petróleo, es el momento en el cual se alcanza la tasa máxima de extracción hasta su agotamiento final. Este concepto fue creado y usado por primera vez por el geofísico Marion King Hubbert en 1956, para predecir el pico petrolero de Estados Unidos entre 1965 y 1970 creando la teoría de la curva de Hubbert como se muestra en la figura 1.6.

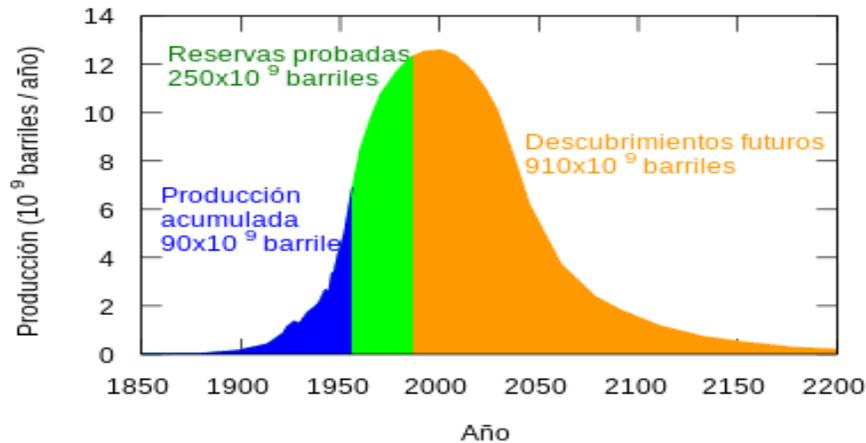


Figura 1.6. Curva de Hubbert [6].

Posteriormente esta teoría sería mejorada y aplicada para todo el mundo por Collin Campbell y Jean Laherrère; donde se describe con razonable precisión el pico y el declive de la producción de los pozos petrolíferos y yacimientos en diferentes regiones y países.

Por lo anterior la AIE [1] que es controlada por los países más ricos y poderosos OCDE (Organización de Cooperación y Desarrollo Económico) predice un escenario para el 2030 con una población de 8000 millones de personas donde:

- Habrá un incremento del 60 % del consumo energético global actual y un 85 % en combustibles.
- El petróleo seguirá siendo la primera fuente de energía mundial por su alta densidad energética, fácil manejo y multiplicidad de usos.
- Será todo un reto la demanda de combustible para el transporte motorizado y la agricultura (ganadería) industrializada.
- Por su escasez habrá un aumento en el precio del petróleo lo cual repercute directa o indirectamente en el precio de prácticamente todas las mercancías mundiales.

En resumen, de acuerdo al tramo de bajada de la curva de Hubbert, se caracteriza que la extracción de hidrocarburos será: cada vez más lenta, más peligrosa en cuanto a seguridad, más compleja tecnológicamente y en definitiva más costosa económicamente hablando. De hecho,

---

---

desde los años 80 se consume más petróleo que el que se descubre, y ya no se producen descubrimientos de grandes yacimientos. Estamos viviendo a costa de los macroyacimientos encontrados en el pasado.

Por lo que hay que reflexionar en estos tres principales puntos:

- Es peligroso
- Es costoso
- Existen otras alternativas como las energías renovables.

### **Seguridad Energética**

Hoy en día la seguridad energética se ha vuelto todo un reto, debido a que el combustible fósil está siendo confinado a solo pocas áreas del mundo y continuamente representa un gran problema de distribución y almacenamiento porque depende de factores políticos, económicos y ecológicos.

Estos factores tienden a ser volátiles, con incrementos en el precio y al mismo tiempo las políticas ambientales que demandan una reducción en los gases de invernadero y emisiones tóxicas.

Por otro lado, las tecnologías que utilizamos en la mayoría de nuestras actividades cotidianas utilizan energía eléctrica como recarga. En el trabajo o por el simple placer de viajar dependemos de cables y cargadores para los distintos dispositivos portátiles (cámara, laptop, celular, reproductor de música, video juegos, cámara de video, entre otros), ya que, en cualquier hogar, oficina de servicios o en la industria se tiene presente la necesidad de utilizar energía eléctrica.

De manera que, la mayoría de los países industrializados no están dispuestos a pagar el precio por esperar una solución a este problema, por lo que se hace imperativo tomar medidas preventivas que desarrollen e implementen nuevas tecnologías de generación de energía eléctrica con la finalidad de crear una energía ideal: limpia, libre de emisiones y que sea sustentable.

---

# OBJETIVOS

## Objetivo general

El objetivo principal de esta investigación es diseñar una metodología óptima con el fin de aprovecharla en un acondicionador de potencia utilizado en celdas de combustible integrando un sistema híbrido de almacenamiento de energía (SC/Batt) dirigido a aplicaciones de baja potencia, con una estructura de control que gestione todo el sistema.

## Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo de investigación se enlistan a continuación:

- Estudiar y analizar las tecnologías de generación de energía basadas en Celdas de combustible para conocer: operación, tipos, aplicaciones, ventajas y problemáticas.
- Estudiar y analizar las tecnologías de almacenamiento de energía a través de sistemas híbridos con supercapacitores/baterías para su operación, tipos, aplicaciones, ventajas, y problemáticas.
- Estudiar, analizar y diseñar los sistemas de acondicionamiento de potencia y el control que estos requieren para aplicaciones de baja potencia.
- Implementar un sistema de generación de energía basado en FCs para iluminación residencial con tecnología *LED*.

---

## JUSTIFICACIÓN

Una de las principales razones por las que surgió la necesidad de realizar este proyecto de tesis es porque a largo plazo esta tecnología tiene todo lo necesario para lograr su incursión como sucesor de los combustibles fósiles. Pero, a corto plazo son una herramienta complementaria a la estrategia energética para alargar la vida de los hidrocarburos. Entre las razones más importantes que se resaltan, está el hecho de que estas tecnologías tienen un gran impacto socio-económico que busca:

- Proteger el medio ambiente.
- Crear una cultura energética en nuevas fuentes de energía.
- Hacer consciencia sobre el ahorro energético.
- Reducir el uso de combustibles fósiles.
- Tener un abanico de opciones en cuanto al sector energético.
- Reducir costos de producción por fuentes convencionales.

Otra razón de gran peso es que, el hidrogeno es el elemento más abundante en todo el planeta tierra, siendo así un recurso renovable que nunca será escaso. Aunque en la atmosfera no se presenta en forma libre, sino combinado con otros elementos tales como: agua, compuestos orgánicos, amoniaco, entre otros. El hidrogeno tiene un punto de ebullición de 20 °K (253 °C) a presión atmosférica.

Otro punto a favor es que el hidrogeno reacciona con el oxígeno para dar agua como único producto de la combustión. Este calor de combustión es mayor que el de cualquier otro hidrocarburo; además de que no produce gases de efecto invernadero le dan características únicas para ser una fuente de energía limpia [11].

El uso del hidrogeno como posible fuente de energía implica la producción del mismo por electrolisis, para obtener así la energía eléctrica necesaria de fuentes renovables [11]. Por medio de la electrolisis se consigue generar gas de altísima pureza, lo que es muy importante para las celdas de combustible, ya que operan a bajas temperaturas, y estas son muy sensibles si se presentan impurezas como azufre, CO y otros [12].

---

---

De modo que la celda de combustible es una de las tecnologías que por su gran impacto ecológico está siendo recibida con gran entusiasmo. Por lo que existe una gran necesidad de impulsar el uso del hidrogeno como fuente de generación de energía eléctrica para beneficio del ser humano y el medio ambiente.

Al igual que la industria automotriz, otras industrias y sectores ya están migrando a esta nueva tecnología por los siguientes beneficios:

- El hidrogeno es la solución ante una escasez de combustible.
- No daña el medio ambiente por la 0 emisión de gases de efecto invernadero.
- Es una de las tecnologías más limpias y sustentables en la actualidad [12] [13].
- Proporciona un sistema de generación de energía constante con una gran respuesta y características eléctricas necesarias para aprovecharlas como una fuente de energía confiable y eficaz
- Existe un alto desarrollo en la materia que pronto reducirá su costo.
- Entre otras.

---

# HIPÓTESIS

## Hipótesis general

Es posible diseñar un convertidor DC-DC con aislamiento galvánico entre la fuente de generación de energía y la carga eléctrica, a través de un sistema autónomo de generación y almacenamiento híbrido de energía basado en celdas de combustible tipo PEMFC, el cual será capaz de producir su propia energía a través de hidrogeno, almacenarla y entregarla cuando la demanda de energía lo requiera.

Las contribuciones que se tienen con este trabajo doctoral son las siguientes:

- Diseño de un convertidor DC-DC con topología *Flyback* anidada con aislamiento galvánico y respaldo de energía.
- Diseño y desarrollo de una Interfaz gráfica de control embebido en QT para Raspberry.
- Diseño y desarrollo de un control PID digital para el sistema de generación y suministro de energía.
- Diseño y aplicación de un sistema de generación de electricidad y gas hidrógeno portátil para aplicaciones estacionarias.

---

# CAPITULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## 1.1 Antecedentes

Larminie et al [30], analizaron uno de los convertidores más utilizados “*boost*”, debido a la ventaja que utiliza un número pequeño de componentes lo que reduce su costo y tamaño, lo que incrementa el estrés de conmutación en los componentes. Por otro lado, no contiene aislamiento eléctrico por lo que lo hace vulnerable para ciertas aplicaciones.

WeiQiao et al [20], muestran que al utilizar convertidores con aislamiento eléctrico se reduce considerablemente el número de componentes. Sin embargo, el tamaño aumenta con el transformador, pero utilizando técnicas adecuadas como el *InterLeaving* provoca una alta eficiencia en el sistema y aislamiento entre la entrada y la salida muy útil para proteger la fuente primaria de voltaje.

Xiaogao Xie et al [48] hicieron estudios en celdas de combustible con convertidores topología *flyback*, y demostraron que además de proteger la fuente primaria de la salida se eliminan zonas muertas de corriente de entrada, muy útil para aplicaciones con FCs.

Benavides et al [52] realizaron estudios sobre una metodología de diseño para optimizar masa en los convertidores DC-DC en baja potencia para aplicaciones con FCs. El diseño se enfoca principalmente en el convertidor *boost*, esta metodología se aplica a cualquier convertidor deseado. El principal objetivo de aplicar una metodología es mejorar el diseño en masa y eficiencia tanto en el convertidor como en la FC.

Gonnet A et al [46] muestran un estudio de las ventajas y desventajas de utilizar convertidores aislados y no aislados eléctricamente, características de stress de conmutación, rizados de corriente, número de componentes, complejidad de control y eficiencia. Todo lo anterior con el objetivo de seleccionar la topología que más se adecue a nuestra necesidad y así aumentar la eficiencia de los sistemas de control.

---

Latha K. et al [45] realizaron investigaciones sobre diferentes modos de operación en los cuales los convertidores son utilizados bajo la configuración de intercalado o aislado, lo cual proporciona un control que hace más efectivos a los convertidores.

Navidi, M. et al [51], proponen un nuevo convertidor especialmente para aplicación con FCs. Un factor importante del convertidor es que está diseñado con la técnica de entrelazado (*InterLeaving*), reduciendo los rizados de corriente de entrada.

## 1.2 Celda de combustible

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico, que internamente transforma la energía de una reacción química en energía eléctrica. La energía generada por una celda de combustible es no se agota mientras el suministro de hidrogeno sea constante.

### 1.2.1 Funcionamiento de la Celda de Combustible

En la figura 1.7 se tiene una celda electroquímica que consiste en dos electrodos separados por un electrolito, en ella se hace circular oxígeno sobre un electrodo (cátodo) y el hidrógeno sobre el otro (ánodo), para que se produzca una reacción electroquímica [41].

Cuando el hidrogeno es ionizado pierde un electrón; al ocurrir esto, el hidrogeno y el electrón que se desprendieron, toman diferentes caminos hacia el segundo electrodo. El hidrogeno pasa al otro electrodo a través del electrolito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor. Este proceso producirá vapor de agua, energía eléctrica y calor útil [30].

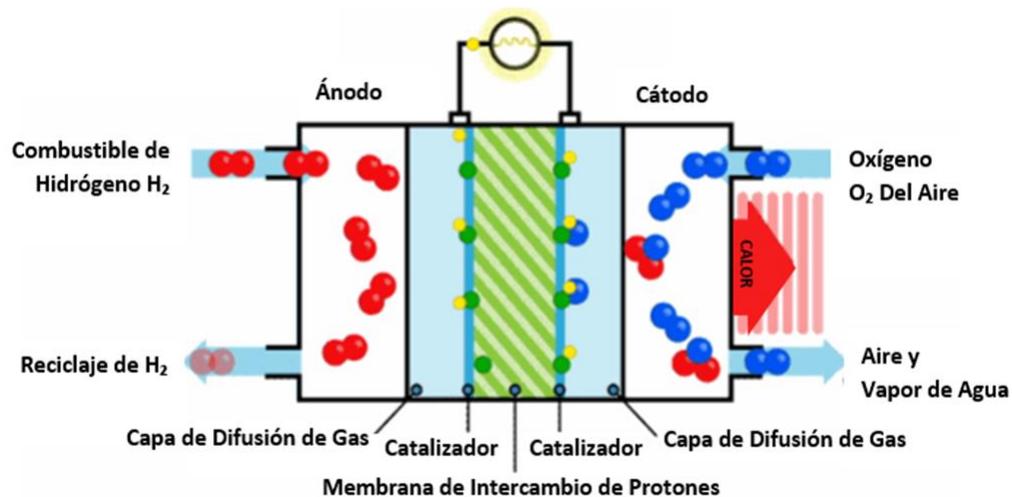


Figura 1.7. Operación de una celda de combustible [32].

---

Las celdas de combustible son muy similares a las baterías en cuanto a operación y generación de energía. La única diferencia es que las baterías producen su energía de una fuente interna que es el ácido, y las celdas de combustible de una externa que es el hidrogeno. Además, si se necesita mayor energía solamente se agregan más celdas en ambos casos [41].

### 1.2.2 Pila de combustible

La Pila de Combustible es un arreglo de 10 o más celdas de combustible individualmente conectadas en serie. El número de celdas varía desde una simple celda a varias decenas de celdas seccionadas (dependiendo del fabricante). En la figura 1.8 se muestra una pila de combustible.



Figura 1.8. Pila de combustible [32].

### 1.2.3 Características Eléctricas

El voltaje que se obtiene de una celda de combustible es muy pequeño (aproximadamente 0.7 volts), por lo cual es necesario interconectar varias celdas en forma modular (*stack*). En la figura 1.9 se muestra una interconexión modular de varias celdas.

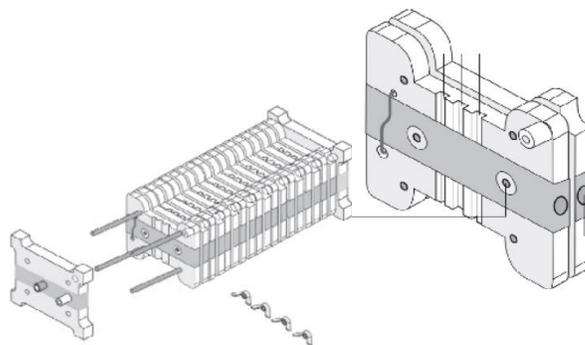


Figura 1.9. Interconexión modular de varias celdas [32].

Para obtener altos niveles de tensión, es necesario tener un número considerable de celdas. Por lo tanto, para reducir la complejidad y costos de armado, es preferible utilizar cargas de bajo voltaje. En algunos casos es necesario ajustar el voltaje a niveles altos para conectar con otras etapas del sistema de suministro. En la figura 1.10 se muestran las pérdidas en las regiones de operación en la celda en estado estacionario.

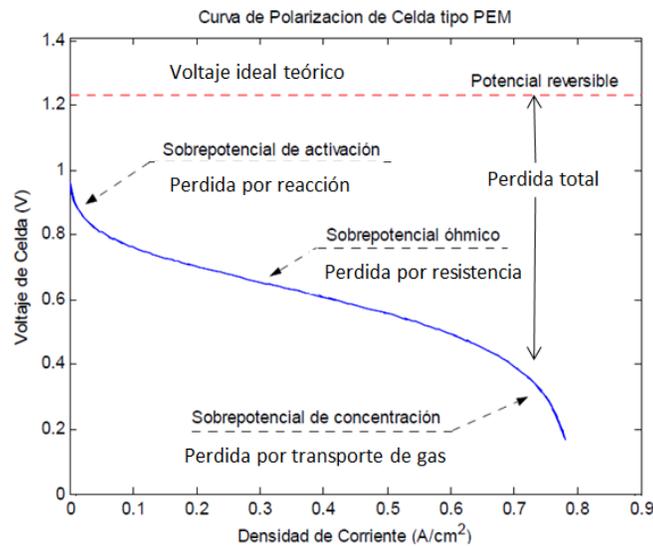


Figura 1.10. Curva de densidad de corriente de una FC ideal.

Existen 3 tipos de pérdidas en la operación de las FCs:

- **Por región de activación:** Estas pérdidas ocurren cuando la operación de transferencia de carga en la interface del electrodo-electrolito es lenta.
- **Polarización Óhmica:** Estas pérdidas resultan de las resistencias eléctricas de la celda de combustible.
- **Polarización de concentración:** ocurren cuando la disponibilidad de reactantes está limitada por difusión, resultando en una concentración de gradientes que reducen la actividad del electrodo llevando las pérdidas al voltaje de salida.

---

Muy pocos trabajos muestran un interés real en el comportamiento dinámico de la celda; en el cual la demanda de corriente de una carga externa, presenta una perturbación o una caída de tensión y al mismo tiempo se genera una transición entre dos niveles de corriente por algún instante de tiempo [39]. En la figura 1.11 se muestra un ejemplo.

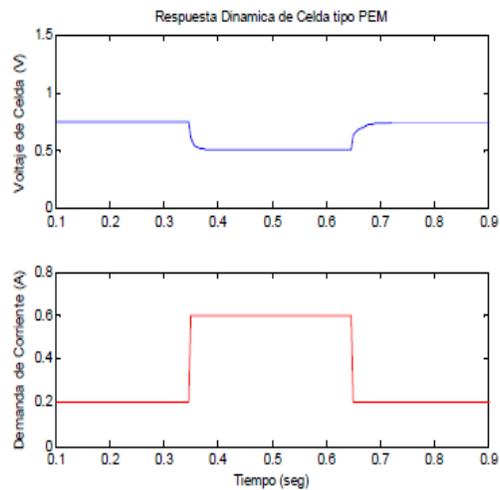


Figura 1.11. Demanda de corriente de una carga externa.

#### 1.2.4 Tipos de Celdas

Una gran variedad de celdas está en etapa de desarrollo, y son clasificadas de acuerdo a diversas características como las siguientes:

- Tipo de aplicación
- Tipo de combinación combustible oxidante
- Tipo de procesamiento del combustible
- Tipo de electrolito usado
- Temperatura de operación
- Potencia

Todas las clasificaciones anteriores son mostradas por algunos autores, sin embargo, la clasificación más generalizada es la relacionada con el tipo de electrolito usado. En la tabla 1.1 se muestra la clasificación.

Tabla 1.1 Clasificación de las FC por electrolito.

Tipo de Celda de combustible	Abreviatura	Electrolito empleado
Celda de combustible electrolito polimérico	PEMFC	Membrana de intercambio protónico
Celda de combustible tipo alcalina	AFC	Hidróxido de potasio
Celda de combustible ácido fosfórico	PAFC	Ácido fosfórico
Celda de combustible de carbonato fundido	MCFC	Carbonato fundido
Celda de combustible de óxido solido	SOFC	Cerámico

Existen 2 características de alto impacto para las celdas de combustible: *temperatura de operación y tiempo de vida*, las cuales repercuten en la eficiencia y comportamiento de la celda (tabla 2), como también en sus propiedades fisicoquímicas y termomecánicas de todos los materiales que se utilizan para su fabricación como lo son: electrolitos, electrodos, interconexiones, colectores de corriente, entre otros.

Por lo tanto, la temperatura de operación de una celda de combustible se considera como uno de los parámetros de vital importancia, ya que el tipo de combustible empleado repercute directamente en su comportamiento. De manera que las celdas de baja temperatura con electrolitos acuosos, el combustible que predomina es el hidrogeno, sin embargo, en las celdas de alta temperatura existe una gran variedad en el uso de combustibles, esto es debido a su inherente rapidez en la cinética de reacción y a una menor necesidad de actividad catalizadora en reacciones a altas temperaturas [32].

Tabla 1.2. Eficiencia de las celdas de combustible.

Celda de combustible	Temperatura de operación	Eficiencia eléctrica
AFC	23-90 °C	60-70%
PEMFC	23-80 °C	40-60%
PEMFC ALTA T°	130-200 °C	40-60%
DMFC	23-200 °C	20-30%
PAFC	160-220 °C	55%%
MCFC	620-660 °C	65%
SOFC	800-1000 °C	60-65%

A continuación, se da una breve explicación de los diferentes tipos de celdas de combustible que existen y sus características principales.

**Celda de Combustible Alcalina (AFC *por sus siglas en inglés*).** El electrolito en una Celda de Combustible Alcalina es una solución de hidróxido de potasio (KOH). El rango de temperatura de operación oscila entre temperatura ambiente hasta 90° C (se eleva dependiendo de la concentración del electrolito). Las AFC son altamente eficientes y hacen uso de catalizadores de bajo costo. El mayor desafío con las AFC es su incompatibilidad con el dióxido de carbono. El CO<sub>2</sub> reacciona con el electrolito y forma un carbonato insoluble. Esto significa que las AFC sólo funcionan con combustibles que son extremadamente puros (hidrógeno y oxígeno altamente puro), pero no con aire (que contiene CO<sub>2</sub>).

**Celda de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC *por sus siglas en inglés*).** El electrolito de una PAFC es ácido fosfórico. Rango de temperaturas de funcionamiento entre 160-220°C. Comparado con otros tipos de celdas de combustible (excepto DMFCs), PAFCs tienen baja eficiencia.

**Celda de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC *por sus siglas en inglés*).** El electrolito de una MCFC es carbonato alcalino fundido que es retenido en una matriz de óxido de aluminio y litio. Las MCFCs tienen altas temperaturas de funcionamiento (600-700 °C) y alta eficiencia.

---

---

Son utilizadas no solo con hidrógeno sino también con otros gases incluyendo gas natural y biogás.

**Celda de Combustible de Oxido Sólido (SOFC *por sus siglas en inglés*).** El electrolito en esta celda de combustible es un óxido metálico sólido, usualmente oxido de circonio estabilizado con itrio ( $ZrO_2$ ). Las SOFCs son celdas de combustible de alta temperatura. Funcionan con hidrógeno, pero también con otros gases incluyendo gas natural y biogás.

**Celda de combustible de membrana de electrolito polimérico (PEMFC *por sus siglas en inglés*).** Dependiendo de los electrolitos usados, la celda de combustible PEM opera en el rango de temperatura entre 60 y 80° C (PEMFC de baja temperatura) o entre 130 y 200°C (PEMFC de alta temperatura). Una membrana conductora de protones es usada como electrolito.

Las ventajas incluyen un excelente comportamiento de arranque en frío y alta eficiencia. Adicionalmente, las celdas individuales fácilmente se conectan a una pila más grande (la llamada pila de combustible) para obtener mayores resultados. El cátodo es suministrado con oxígeno (por ejemplo, del aire), y el ánodo es suministrado con hidrógeno. Si el hidrógeno es suministrado reformando combustible derivado de carbón, como condición de seguridad es importante asegurar que el monóxido de carbono (CO) no entre a la celda, debido a que esto presentaría un fuerte catalizador venenoso para PEMFC's de baja temperatura.

Las PEMFC's de alta temperatura no son sensibles al monóxido de carbono. Por otra parte, esto evita que la membrana se humedezca. En contraste a las PEMFC de baja temperatura, un sistema de control de agua no es necesario.

Sin importar el rango de temperatura, el costoso material catalizador (platino) es una desventaja de las celdas de combustible PEM.

**Celda de Combustible Directa de Metanol (DMFC *por sus siglas en inglés*).** La Celda de Combustible Directa de Metanol es una PEMFC especial. Ambas celdas de combustible tienen estructura similar, sin embargo, la DMFC usa el metanol ( $CH_3OH$ ) como combustible, en lugar de hidrógeno. El metanol tiene la ventaja de ser usado como un líquido. Por otra parte, el metanol es venenoso y corrosivo y las DMFCs tienen baja eficiencia.

---

---

Debido a su naturaleza de construcción las celdas de combustible tipo PEMFC presentan ciertas limitaciones que se enlistan a continuación:

- Ánodos de platino están sujetos a envenenamiento.
- Impurezas hacen que la superficie de la membrana se deteriore.
- Siendo el mejor catalizador para reducir  $O_2$  un sobrepotencial elevado de 300-500 mV.
- Se necesita alta pureza en el hidrogeno para purificar el ánodo de platino.
- Baja resistencia en la aleación cuando se utiliza para combustibles con metanol
- La eficiencia crece si se disminuye el requerimiento de potencia.
- La mejora y el desarrollo de nuevos materiales está limitado por el desconocimiento del mecanismo de reacción.

### 1.2.5 Aplicaciones

Como se muestra en la figura 1.12 las celdas de combustible operan en un amplio rango de potencias, de acuerdo a su uso, se clasifican cuatro áreas de aplicación: Estacionaria, transporte, portable y espacial [29].

**Uso estacionario:** Son utilizadas principalmente para energizar casas, hoteles, universidades, clínicas, edificios, zonas rurales donde el suministro eléctrico no llega [29] [45].

**Transporte:** La industria automotriz está desarrollando nuevos modelos de autos con estas tecnologías preparándose por si existe una revolución energética ellos tengan la capacidad de ofrecer opciones ecológicas. Otras aplicaciones son en barcos, trenes y aviones [31] [33] [34].

**Portable:** En aplicaciones portables existe un sin número de dispositivos que operan a muy baja potencia. Entre las aplicaciones principales están: celulares, laptops, tablets, video cámaras, cargadores de batería. La figura 1.13 muestra alguno de los dispositivos de muy baja potencia [29].

**Uso espacial:** manipuladas en viajes espaciales desde que se sabe que como residuo producen agua de la generación de energía y vuelven más atractivas para operaciones en ambiente cerrado y misiones a corto plazo [29].

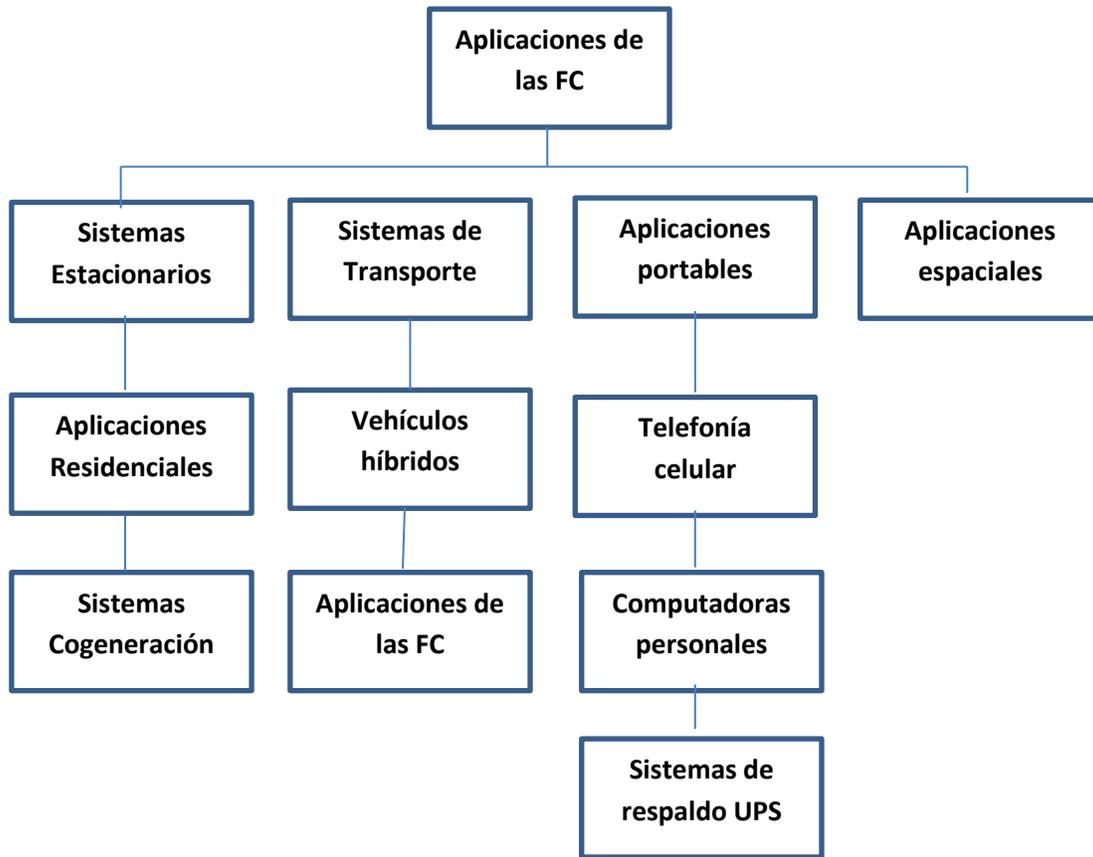


Figura 1.12. Aplicaciones de las FCs.

Glucosa Bioceldas	Microceldas PEM y	Miniceldas PEM y	PEM, OS PEM móvil	OS, CF y AF
<b>P O T E N C I A</b>				
Micro Watts x10 <sup>-6</sup>	Mili Watts x10 <sup>-3</sup>	Watts x10 <sup>0</sup>	Kilo Watts x10 <sup>3</sup>	Mega Watts x10 <sup>6</sup>

Figura 1.13. Dispositivos de muy baja potencia.

Un importante aspecto a considerar es el hecho de que las celdas de combustible son un recurso de energía limpia por lo que trae muchos beneficios al ambiente. A medida que la tecnología vaya avanzando, el costo de la celda de combustible se hará más barato y pronto será común ver estas tecnologías en nuestros hogares [32].

---

---

## Ventajas y Desventajas

En general las celdas de combustible ofrecen muchas ventajas en comparación de otras fuentes de generación de energía convencional basadas en combustibles fósiles. Aunque algunos de los atributos de las FCs solo son válidos para algunas aplicaciones, existen más ventajas que desventajas que aun así son objeto de estudio para solucionar sus limitaciones.

### Ventajas

- Ofrecen la alternativa de independizarse del uso de combustibles fósiles a corto, mediano y largo plazo en nuestro país.
- Son una alternativa de generar energía limpia y eficiente.
- Generación de más empleo de llegar a desarrollarse toda una red de servicios de H<sub>2</sub>.
- Ofrecen ser un método para alargar el uso y la existencia de los hidrocarburos.
- Reducen la contaminación al utilizar hidrogeno puro (agua y calor).
- Alto grado de eficiencia comparado con otras tecnologías.
- Utilización del calor resultante en cogeneración y calefacción.
- Rápida y buena respuesta ante variaciones de carga.
- No requiere recarga como las baterías.
- Fácil de acoplarse para formar un sistema híbrido.

### Desventajas

- Tecnología de muy alto costo por el momento.
- Necesita de una fuente de hidrogeno o suministro constante.
- Necesita forzosamente una etapa de potencia para corregir los cambios o variaciones de voltaje (CD no pura).
- Presenta una respuesta lenta al encendido
- Caídas de tensión ante demandas grandes de energía.
- Tecnología en desarrollo.

---

---

## 1.3 Sistema de Almacenamiento

Los dispositivos de almacenamiento de energía (DAE) son una parte muy importante de cualquier sistema, debido a que tienen relación directa con el desempeño. En los últimos años el avance tecnológico ha permitido incrementar su eficiencia, densidad de energía y potencia que hoy día existen múltiples dispositivos que utilizan estas tecnologías de almacenamiento. Las más conocidas son: las baterías, celdas de combustible, *flywheels* o volantes de inercia, Smes y sistemas de almacenamiento de energía magnética por superconducción. El rápido desarrollo tecnológico ha permitido incluir otras tecnologías, pero los que más interés generan en la actualidad como sucesores de las baterías son los Supercapacitores (SCs)) [25] [26].

### 1.3.1 Supercapacitor

Un supercapacitor está definido como un dispositivo electroquímico capaz de almacenar y liberar energía eléctrica cuando se le demande. Entre las principales características que los definen es su alta densidad de energía [25].

#### 1.3.1.1 Principio de operación.

La construcción de un SC es similar al de un capacitor convencional, el cual consiste en dos electrodos separados por un electrolito. Un método para incrementar la capacitancia reside en el hecho de reducir la distancia entre los dos electrodos y se incrementa la superficie.

Cuando se aplica un voltaje o una diferencia de potencial al capacitor, un electrodo tiene cargas positivas y el otro electrodo cargas negativas. Estas cargas opuestas atraen la energía para almacenarla en el supercapacitor.

#### 2.2.1.2 Ventajas y desventajas.

La implementación de los SCs como dispositivos de respaldo de energía a los sistemas de generación tiene un gran interés en su desarrollo a corto y largo plazo. Por lo anterior, impulsar el avance tecnológico en estos dispositivos podría marcar el fin de la era de las baterías convencionales [40].

---

## Ventajas

- Velocidad de respuesta (alrededor de los microsegundos).
- Alta densidad de potencia.
- Menor Peso.
- Menor Tamaño.
- Flexibilidad con otras tecnologías de almacenamiento.
- No contamina.
- Estética.

## Desventajas

- Baja densidad de energía.
- Alto costo.
- Tecnología en constante desarrollo.
- Así como se carga se descarga rápidamente.

## **1.3.2Baterías**

Las baterías son dispositivos almacenadores de energía cuyo principio está basado en el proceso electroquímico de óxido-reducción de dos compuestos. En este proceso existe un movimiento de iones entre dos electrodos denominados cátodo y ánodo, los cuales están separados por una membrana sumergida dentro de un electrolito. Durante este proceso, al existir un aporte de energía eléctrica externa, los iones se desplazan desde el cátodo almacenándose en ánodo [45]. Existen diferentes clases de baterías: plomo-acido, níquel-cadmio, ion-litio, entre otras. Cada clase de baterías cuenta con diferentes ventajas y desventajas, las cuales fueron sometidas a una evaluación con el fin de seleccionar la opción más adecuada para el vehículo de alto desempeño.

### **1.3.2.1 Baterías de Plomo**

Las baterías de Plomo producen desde mediados del siglo XIX y están entre las baterías más empleadas para el arranque de vehículos de combustión interna. Están formadas por dos placas, una de plomo (electrodo negativo) y una de dióxido de plomo sumergido en un electrolito de ácido sulfúrico diluido (electrodo positivo) [46].

---

---

Aunque económicamente hablando son baratas y fácil de conseguir en el mercado, tienen la desventaja que son bastante pesadas en comparación a la energía que almacenan. Por lo tanto, ofrecen una energía específica bastante baja, alrededor de 30 kWh/kg. Como resultado, presentan una vida útil reducida. Actualmente, su aplicación principal es como suministro de energía en vehículos eléctricos pequeños, como bicicletas y motos. Sin embargo, su uso se ha visto limitado debido a las propiedades contaminantes

### **1.3.2.2 Baterías de Níquel**

A partir de lo anterior surgieron las baterías de níquel, las cuales están formadas por un electrodo de hidróxido de níquel y un electrodo de hidróxido de cadmio o zinc. Al igual que las baterías de plomo, las baterías de níquel fueron utilizadas en aplicaciones de transporte para el arranque de los motores. Sin embargo, desde el 2008 se prohibió su comercialización debido que las primeras baterías contenían níquel-cadmio, y el cadmio es muy tóxico para el medio ambiente. A causa de esto, surgieron las baterías de Níquel-Zinc, con características no contaminantes. Sin embargo, son más costosas que las convencionales de plomo, pero presentan una densidad energética superior, alrededor de 80Wh/kg. Es necesario recalcar que estas baterías son superiores a las de plomo en tiempo de vida, pero presentan la desventaja que tienen efecto memoria (efecto que sufren las baterías cuando no son cargadas plenamente, formándose placas de cristales en su interior), lo cual limita la capacidad de la batería. Por ende, no resultan adecuadas para aplicaciones estacionarias.

### **1.3.2.3 Baterías de Litio**

Existen dos clases de baterías de litio: Litio-Metal e Ion-Litio. Las baterías de Litio-Metal fueron utilizadas en algunas aplicaciones de tracción eléctrica debido a que son baterías sin electrolitos líquidos, haciéndolas libres de mantenimiento. Estas baterías son llamadas de primera generación, ya que fueron las primeras en comercializarse. Por otra parte, las baterías de Ion-Litio, o de segunda generación, comprenden una familia de diferentes combinaciones de materiales que optimizan la operación de almacenamiento de energía, dentro de estas se encuentran las LFP – fosfato de litio, LYP – ytrio fosfato de litio, LIP – litio-polímero entre otras. Estas baterías presentan la ventaja de altas densidades de energía cercana a los 300 Wh/Kg; sin embargo, alcanzan picos de corriente máximos del orden de los cientos de amperios, su vida útil se encuentra en el orden de los 30000 ciclos.

---

---

#### **1.3.2.4. Baterías de nueva generación.**

Las baterías AGM son la nueva generación de baterías que actualmente dominan el mercado, las primeras de su tipo estaban selladas y eran de plomo-ácido, fueron desarrolladas en la década de los 80's para uso exclusivo en la aviación militar, donde la confiabilidad y el rendimiento eran fundamentales.

AGM es la abreviación de *Absortion Glass Mat*, donde el ácido se absorbe mejor y más rápido por placas de plomo de la batería, ya que una delgada manta de fibra de vidrio inmoviliza el ácido entre ellos. Este tipo de baterías tienen una resistencia eléctrica interna muy baja. Esto, combinado con la migración más rápida de ácido permite que las baterías AGM entreguen y absorban tasas más altas de corriente eléctrica (ciclo profundo) que otras baterías selladas durante su carga y descarga. Además, las baterías con tecnología AGM se cargan a una tensión normal, como cualquier otra batería plomo-ácido, no es necesario volver a calibrar los sistemas ya instalados o comprar cargadores especiales para ese tipo de tecnología.

Por otro lado, existen las baterías de GEL, que son baterías plomo-ácido selladas, donde el electrolito no es líquido, pero sí gelificado. Con eso, hay menos evaporación y un aumento de la vida útil, garantizando un número mucho mayor de ciclos de cargas y descargas. Estas baterías soportan descargas profundas y ambientes con vibraciones, golpes y altas temperaturas. Tienen también un voltaje más estable durante la descarga, que es ideal para uso con inversores.

Este tipo de baterías se cargan con tensiones más bajas, por eso el cargador tiene que estar correctamente ajustado para ese tipo de baterías. Son más caras, pero duran mucho más, y en un largo plazo logran ser una óptima elección.

En consecuencia, y con el impulso de los vehículos eléctricos en la última década, y con sistemas autónomos para aplicaciones estacionarias, bastantes recursos se han destinado a nivel mundial para el desarrollo de baterías con alta densidad energética y larga vida útil, siendo las baterías de ion-litio las que mejores resultados han brindado. Tal es el caso de la batería Tesla, que está por salir al mercado, pero promete ser un sistema de almacenamiento con características eléctricas, durabilidad y flexibilidad superior a la de cualquier otra batería existente, que apunta a ser la batería del futuro para los sistemas estacionarios.

---

---

El avance tecnológico apunta al desarrollo de sistemas de una alta gama de capacidad de almacenamiento basados en “súper baterías”, que presentaran tecnologías de aire-litio o litio-sulfuro, obteniendo capacidades de almacenamiento de 5 a 10 veces superiores a las baterías de litio actuales.

#### **1.3.2.5. Super baterías.**

Surgió el término por la necesidad de almacenar más energía en el mismo espacio disponible, solo que utilizando los componentes actuales en el mercado. Una super batería no es más que la combinación de un supercapacitor y una batería de alta capacidad de almacenamiento. Aunque el término aun no es específico al tipo de material que las constituye, si es utilizado para referirse a la combinación de tecnologías de almacenamiento que tiene como finalidad crear un nuevo dispositivo que posea una alta densidad de energía y una alta densidad de potencia para altas demandas de corriente. Tal es el caso de combinar un supercapacitor y una batería con características particulares y crear un dispositivo mejorado que se complemente con ambas tecnologías [42] [43] [46].

#### **1.3.2.6. Aplicaciones.**

Son distintos los tipos de baterías que existen en el mercado, sin embargo, las clasificaciones más importantes por su uso son las siguientes:

**Arranque.** Principalmente para alimentar motores de arranque y la electrónica de vehículos. Donde se desee aportar mucha energía de golpe durante una corta duración.

**Tracción.** En maquinaria de trabajo (Montacargas, carretillas elevadoras, y demás) Donde es necesario soportar ciclos de descargas importantes y constantes.

**Portables.** Aplicación a respaldo de energía de casi todos los dispositivos eléctricos y electrónicos (celulares, tablets, laptops, taladros, iluminación de emergencia, por mencionar algunos).

---

---

**Estacionarios.** Aplicaciones de respaldo de energía o sistemas aislados donde la red eléctrica no está disponible. No requieren aportar grandes energías instantáneas, pero lo que si se requiere es de un aporte de energía durante periodos largos de tiempo. Estas últimas están teniendo un gran impacto en zonas rurales.

### **Ventajas y Desventajas.**

#### Ventajas.

- Permiten almacenar grandes cantidades de energía.
- Precio accesible.
- Cada vez son más eficientes.
- Algunas no contaminan.
- Alta densidad de energía.

#### Desventajas.

- Son pesadas.
- Ocupan gran espacio.
- Periodo de vida limitado al # de ciclos.
- Liberación de gases contaminantes.
- Costosas.

---

## Capítulo 2: CONVERTIDORES DC/DC PARA SISTEMAS DE GENERACIÓN CON FCs.

### 2.1 Topologías de Convertidores DC/DC no aislados

Cada convertidor de CD/CD a utilizar es diseñado previamente de acuerdo a los requerimientos de cada sistema. Estos son:

- Elevada eficiencia de conversión.
- Alta estabilidad en el voltaje de salida.
- Alto desempeño.
- Bajo costo.

Al utilizar convertidores DC/DC tenemos dos formas de modificar la tensión proveniente de cualquier fuente de energía constante, reducirla o elevarla. En base a lo anterior, estas dos acciones se logran por medio de las topologías: *buck*, *boost* y *buck-boost*, esta última permite realizar las dos acciones con el mismo circuito. A continuación, se muestra la operación de las topologías mencionadas anteriormente.

#### 2.1.1 Convertidor reductor (*Buck*)

Tiene por característica principal que la tensión de salida es menor que la de entrada, además: simplicidad en su diseño, fácil de estabilizar, fácil de implementar, limitación de corriente y protección contra corto circuito. Como recomendación requiere de un capacitor de valor pequeño para minimizar el rizo de tensión a su salida. En la figura 2.1 se muestra el circuito y su operación.

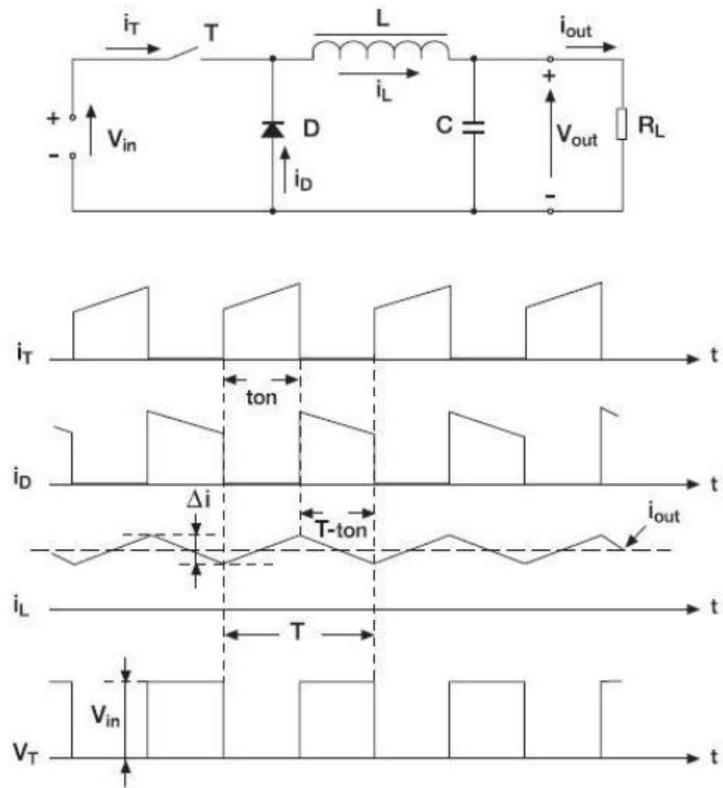


Figura 2.1. Convertidor reductor (Buck).

### 2.1.2 Convertidor elevador (Boost)

Tiene por característica principal que la tensión de salida es mayor que la de entrada. Uno de los inconvenientes de esta topología es que no está protegida contra cortocircuitos en la salida, dado que el diodo realiza una conexión directa entre la entrada y salida. Entre otras características cabe mencionar: Alto rendimiento, simplicidad, corriente no pulsante en la entrada, corriente RMS elevada en el conmutador, respuesta transitoria mala, difícil de estabilizar y requiere un componente activo en serie con la entrada para protección contra cortocircuito. En la figura 2.2 se muestra el circuito y su operación.

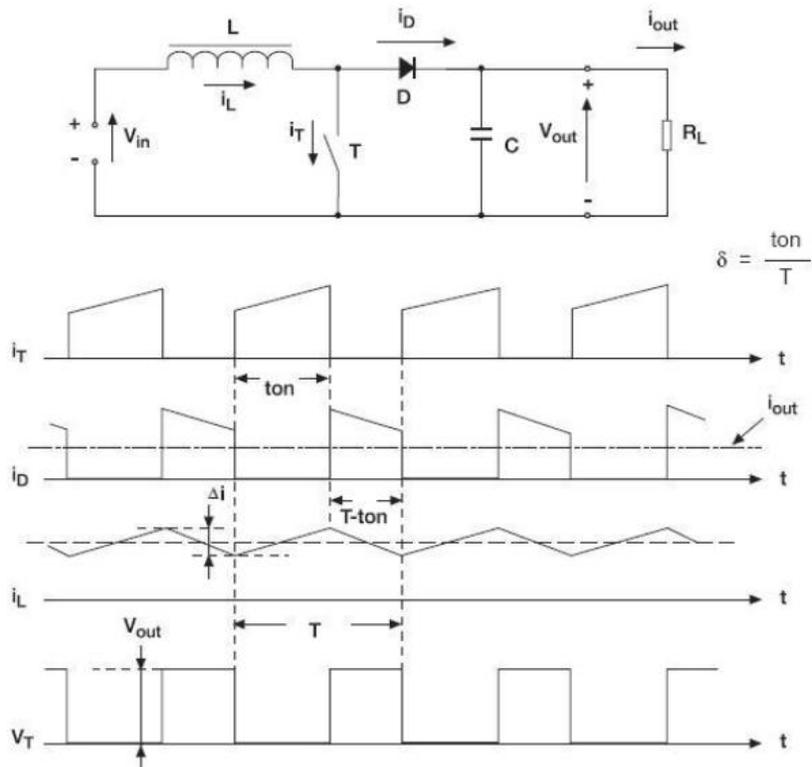


Figura 2.2. Convertidor elevador (Boost).

### 2.1.3 Convertidor reductor-elevador (Buck-Boost)

Tiene por característica principal que se usa para la inversión de la polaridad de tensión de salida respecto a la entrada. Su tensión de salida consigue ser tanto reductora como elevadora, dependiendo del ciclo de trabajo. Este convertidor es una derivación de la conexión en cascada de un convertidor “*Buck*” seguido de un convertidor “*Boost*”. Dependiendo de la continuidad de corriente en el inductor durante un periodo de funcionamiento, es posible trabajar en modo continuo o discontinuo. Entre otras características se encuentran: alto rendimiento, proporciona una inversión de la tensión de salida sin la necesidad de un transformador, simplicidad, elevador/reductor en tensión y corriente pulsante en entrada y salida. En la figura 2.3 se muestra el circuito y su operación.

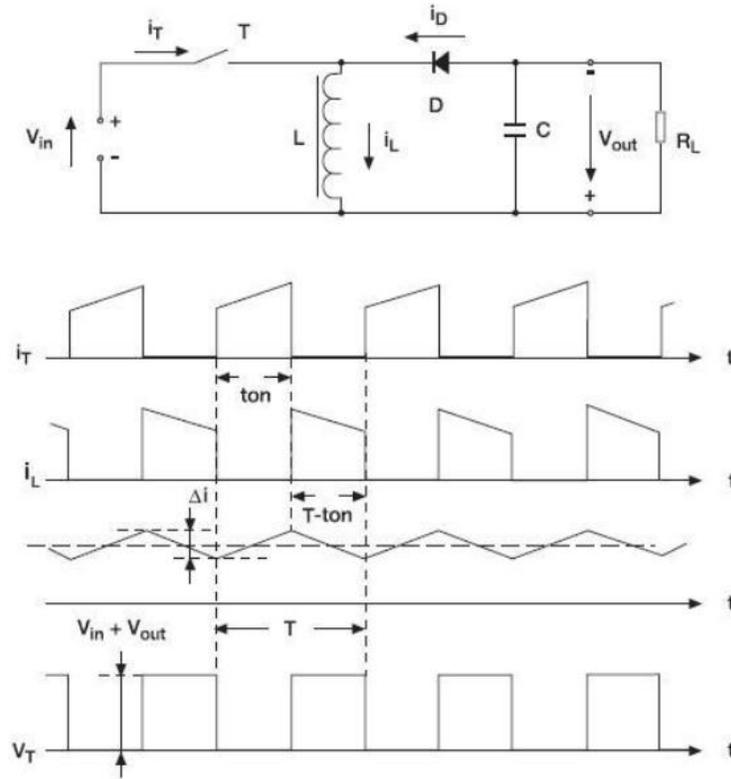


Figura 2.3. Convertidor reductor-elevador (Buck-Boost).

De los convertidores descritos anteriormente surgen variantes de los mismos con la misma finalidad, reducir o elevar el voltaje de entrada. Aunque todos tienen como principal desventaja, la conexión directa del suministro de energía con la carga. Es decir, no existe un aislamiento entre la entrada y la salida del circuito lo que es una limitante para aplicaciones con FCs [19] [22].

Al utilizar FCs como suministro de energía eléctrica, teniendo presente que la celda no está diseñada para soportar corrientes inversas. Por lo tanto, es necesario mantener un aislamiento eléctrico entre la fuente de entrada y la salida. Este aislamiento es obtenido galvánicamente a través de transformadores.

Para aplicaciones de generación de energía con FCs no todas las topologías de conversión son capaces de conjuntarse con la celda debido a las características intrínsecas de esta [16] [17].

---

En base a la literatura y partiendo del análisis de la tesis de doctorado titulada “*Power conditioner based fuel cell and backup power system with supercapacitor*”, se determina el análisis de cada una de las topologías existentes en el mundo y que operan con FCs. No obstante, la mayoría son para altas potencias. De manera que solo se mencionaran sus características principales, enfocándose solamente en los convertidores DC/DC aislados para baja potencia.

## 2.2 Topologías de Convertidores DC/DC aislados

Los convertidores DC/DC aislados utilizan transformadores para proveer aislamiento entre las terminales de entrada y salida, según los requerimientos de seguridad de los sistemas.

### 2.2.1 Convertidor *Cuk* aislado

En la figura 2.4 se muestra el circuito del convertidor *Cuk* aislado, de igual manera se presentan sus principales características.

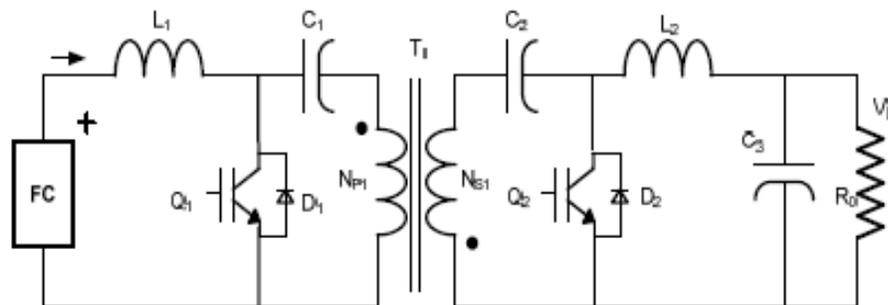


Figura 2.4. Circuito eléctrico *Cuk* aislado con FC.

#### Ventajas

- Aislamiento galvánico.
- Alta elevación de voltaje de salida.
- Pocos componentes.
- Baja corriente en entrada y salida.
- Baja interferencia electromagnética (EMI).
- Bajo volumen y peso por integración magnética.

---

Desventajas

- Inductancia de fuga tiene que ser baja, de lo contrario el dispositivo se daña.

### 2.2.2 Convertidor *Forward*

En la figura 2.5 y 2.6 se muestran los circuitos del convertidor *Forward* y una variante de este circuito, de igual manera se presentan sus principales características.

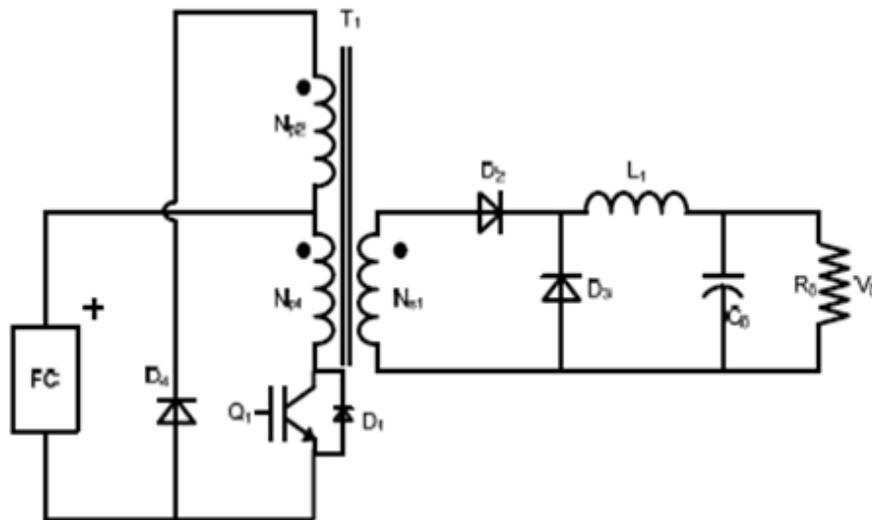


Figura 2.5. Circuito eléctrico convertidor *Forward* con FC.

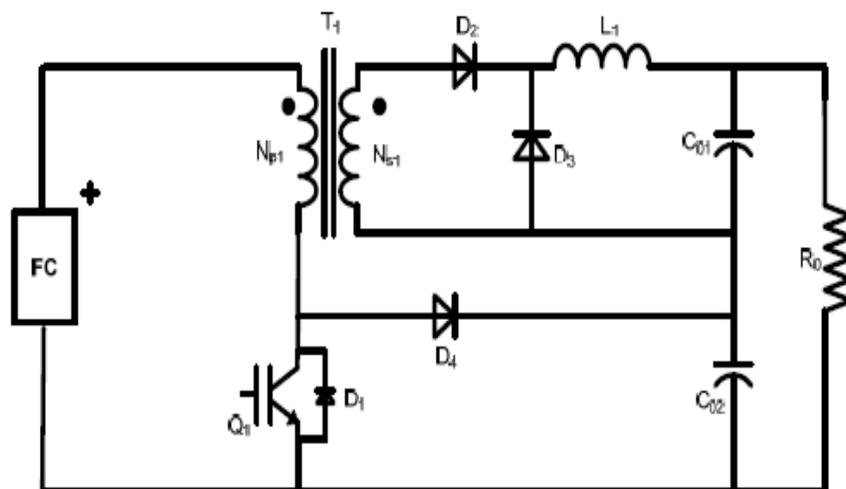


Figura 2.6. Circuito eléctrico variante convertidor *Forward* en FC.

---

## Ventajas

- Alta eficiencia.
- Aislamiento galvánico
- Protección de la FC.
- Pocos componentes.
- Corriente de salida no pulsante.

## Desventajas

- No funciona para aplicaciones de alta potencia.
- Ciclo de trabajo limitado.
- Entrada pulsante, no limitada por el inductor.
- Alto estrés de conmutación en componentes.

### 2.2.3 Convertidor *Push-pull*

En la figura 2.7 se muestra el circuito del convertidor *Push-pull*, de igual manera se presentan sus principales características.

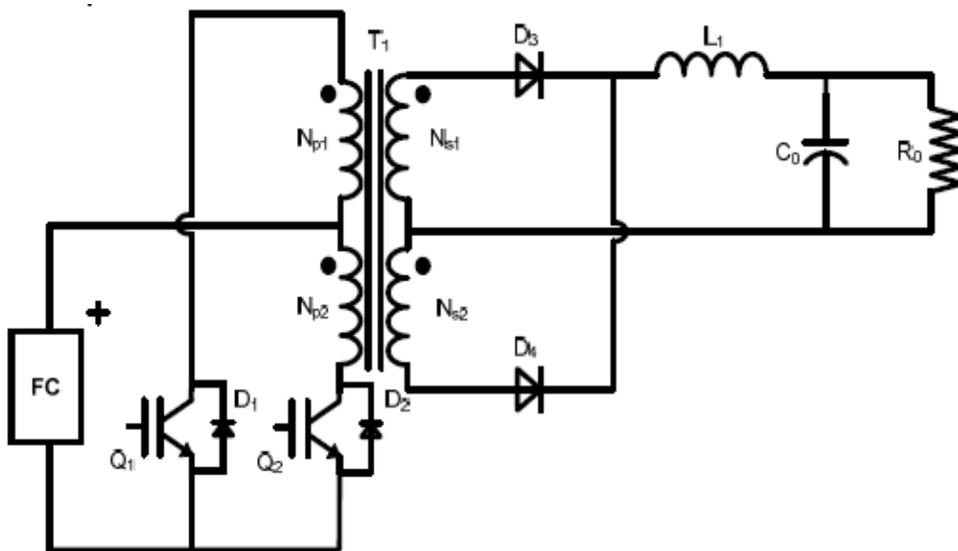


Figura 2.7. Circuito eléctrico del convertidor *Push-pull* con FC.

---

### Ventaja

- Provee aislamiento entre el suministro de energía y la carga.

### Desventajas

- Corriente de entrada pulsante (inconveniente al operar con FCs).
- Bajo desempeño en alta potencia.
- Eficiencia limitada por la inductancia de fuga del transformador.

## 2.2.4 Convertidor *Half bridge*

En la figura 2.8 se muestra el circuito del convertidor *Half Bridge*, de igual manera se presentan sus principales características.

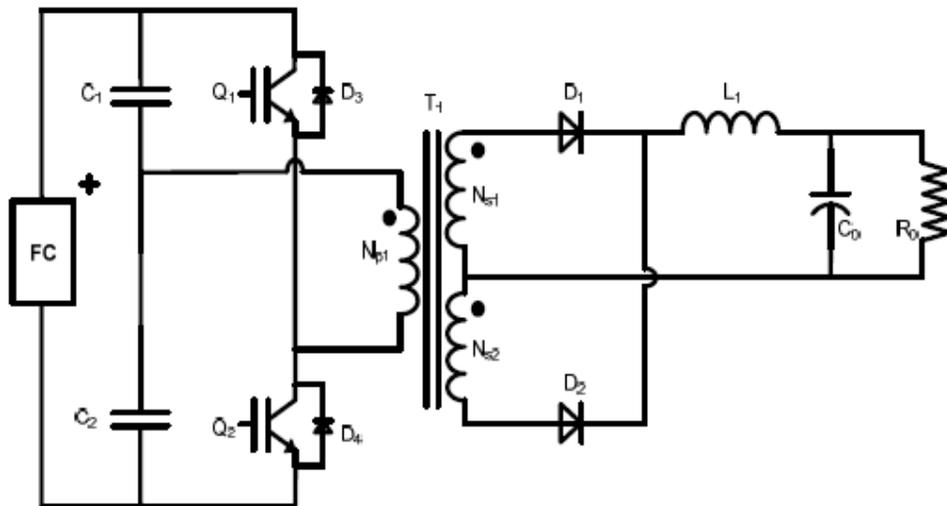


Figura 2.8. Circuito eléctrico del convertidor *Half Bridge* con FC.

### Ventajas

- Aislamiento galvánico.
- Conmutación suave.
- Pocos componentes.

---

## Desventajas

- Voltaje de salida es reducido por el factor 0.5 (que se compensa duplicando la relación de transformación, lo que causa que también la corriente de los transistores se duplique).
- Solo es aplicado a media potencia.

## 2.2.5 Convertidor Weinberg

En la figura 2.9 se muestra el circuito del convertidor Weinberg, de igual manera se presentan sus principales características.

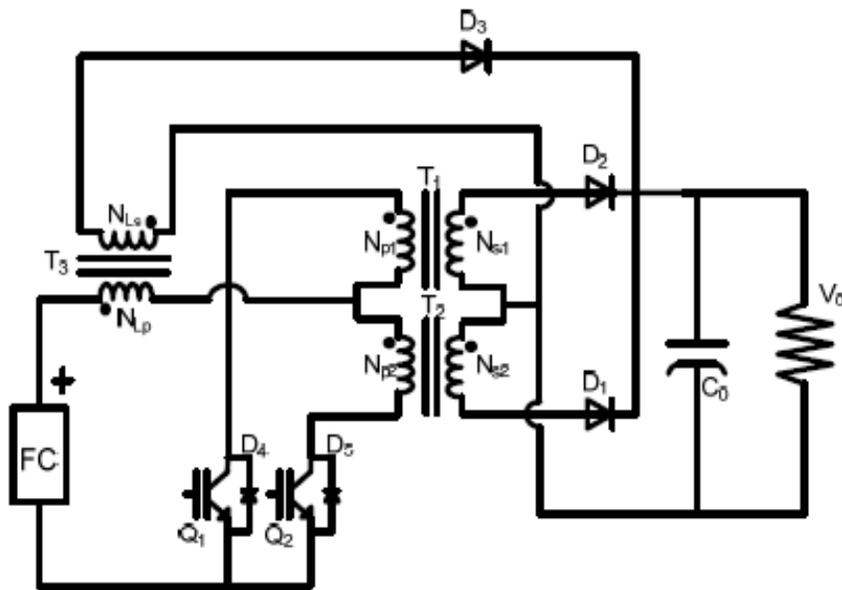


Figura 2.9. Circuito eléctrico del convertidor Weinberg para FC.

## Ventajas

- No hay inductancia de fuga a la salida.
- Aislamiento galvánico.

## Desventaja

- Picos de voltaje alternan de un *switch* a otro debido a la inductancia de fuga en la entrada del transformador.

---

## 2.2.6 Convertidor *Full bridge*

En la figura 2.10 se muestra el circuito del convertidor *Full bridge*, de igual manera se presentan sus principales características.

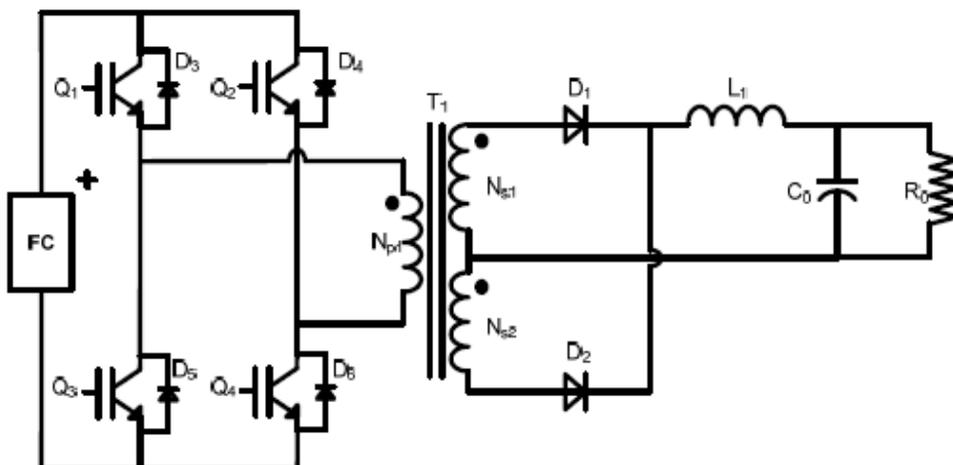


Figura 2.10. Circuito eléctrico del convertidor *Full bridge* para FC.

### Ventajas

- Estrés de voltaje y corriente es el mismo que el de entrada.
- Ideal para media y alta potencia.
- Aislamiento galvánico.
- Protección en caso que el circuito se dañe.
- No existe problema de operación con el mínimo ciclo de trabajo.

### Desventajas

- Baja eficiencia por pérdidas en el transformador.
- Estrés de conmutación por el número de componentes.
- Es Costoso.

### 2.3 Requerimientos de potencia en convertidores DC/DC para FCs.

Actualmente se desarrollan sistemas de generación de energía que operan con FCs para aplicaciones de respaldo de energía y sistemas de alimentación residencial. Las especificaciones de voltaje de salida en estos sistemas son desde los 19 volts con potencias de salida que van desde los 100 Watts hasta los 5kW [44].

Para tener un punto de referencia de los sistemas de conversión DC/DC que utilizan FC como fuente principal de energía se realiza una clasificación en potencia y voltaje de cada uno de los sistemas: tanto en los convertidores DC/DC como en las FCs a utilizar. En la figura 2.11 se muestra la clasificación de los diversos convertidores en base a su potencia y voltaje de salida.

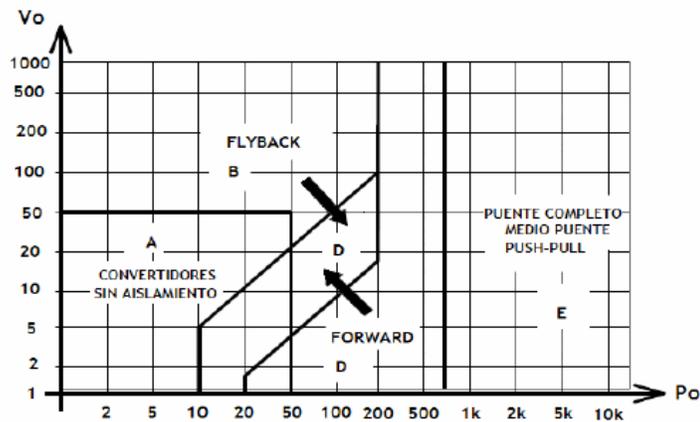


Figura 2.11. Clasificación de potencia y voltaje en los convertidores.

Antes de realizar el diseño de cualquier convertidor es necesario tener la suficiente información respecto a los valores de potencia de los sistemas que vamos a interconectar en este caso potencias de FCs comerciales y potencias de convertidores DC/DC con aislamiento galvánico. En la tabla 3 y 4 se muestran los valores de potencia en sistemas de generación con FCs y en convertidores DC/DC.

Tabla 2.1. Rangos de potencia en FCs.

Celdas de combustible	Rango de potencia (Watts)
PEMFC	5-550 kW
AFC	50-250 kW
MCFC	250 kW-3 MW
SOFC	3 kW-3 MW

---

---

Tabla 2.2 Rangos de potencia en convertidores DC/DC.

Convertidores aislados	Rango de potencia (Watts)
Flyback	1-150
Forward	150-500
Push-Pull	150-500
Half-bridge	150-500
Full-bridge	500-1500

De acuerdo a la información mostrada en la figura 2.11 en resumen cada topología tiene ventajas y desventajas en cuanto a su uso [44], pero los problemas que se presentan en todos los convertidores aplicados a FCs son los siguientes:

- Bajo rendimiento por el número de etapas complementarias.
- Alto costo.
- Problemas de arranque.
- Tamaño del transformador.
- Sistemas de respaldo de energía a altos voltajes.
- Control nulo de corriente de entrada al usar baterías en paralelo con la fuente.

Tomando en cuenta estos factores al diseñar e implementar un convertidor DC/DC para aplicaciones con FCs resulta un problema la conversión de la energía debido a todas las pérdidas presentes en todo el sistema.

Una forma fácil de identificar que convertidor es el más adecuado es en base a los requerimientos del sistema. La figura 2.12 muestra un diagrama de flujo el cual facilita la selección del convertidor a utilizar en base a las características y demandas de potencia que necesite el sistema de acondicionamiento.

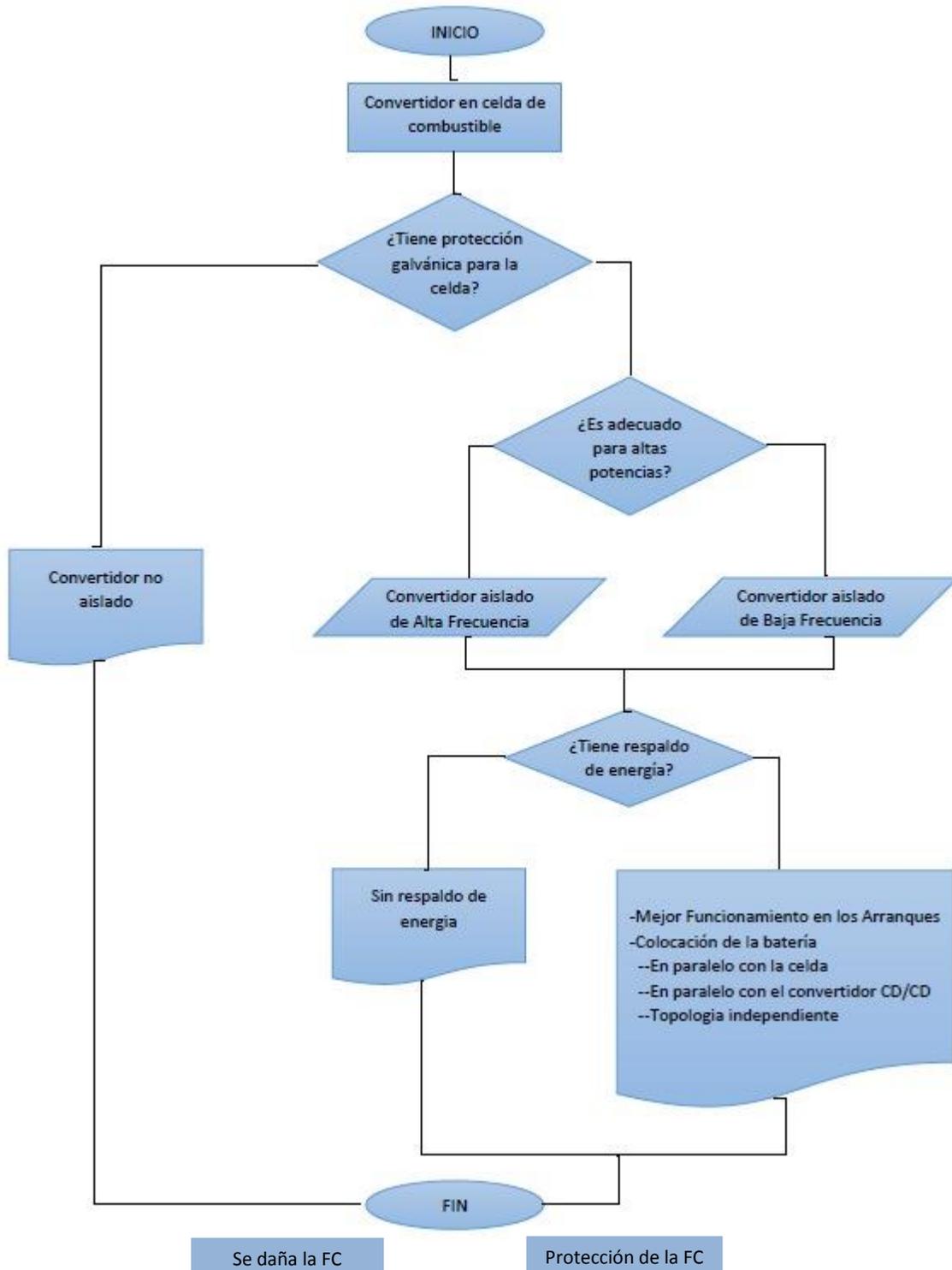


Figura 2.12. Diagrama de flujo de selección del convertidor DC/DC para FC.

---

---

## Capítulo 3: CONVERTIDOR DC/DC PROPUESTO

La selección del convertidor *flyback* como acondicionador de potencia fue sencilla. Se hizo un estudio del estado del arte de topologías de acondicionamiento de energía usando celdas de combustible en aplicaciones residenciales y aplicaciones para baja potencia. Con lo anterior, surgieron múltiples topologías que ofrecían ventajas y desventajas para estos sistemas. En su mayoría topologías no aisladas, aunque son más sencillas de implementar [44], fueron descartadas de primera mano debido a que al no contar con un aislamiento eléctrico existe el riesgo de dejar desprotegida a la celda ante corrientes inversas.

En base a lo ya mencionado, se determinó que un convertidor con transformador era el indicado para proveer el aislamiento que la FC requiere. Tomando en cuenta ventajas y desventajas de topologías aisladas, se les dio un giro positivo a las desventajas principales de la topología aisladas, donde la *Flyback* presentaba más limitantes, una de ellas es que al trabajar a altas frecuencias está limitado a operar solo en baja potencia, esto lo hace ideal para aplicaciones residenciales. Otra desventaja a considerar es que no son muy eficientes debido a las pérdidas parasitas del transformador, pero si se realiza un diseño de transformación mediante técnicas como el *interleaving*, es posible compensar esas pérdidas y obtener una alta eficiencia.

Además, de que utiliza un menor número de elementos, es capaz de operar a altas frecuencias reduciendo considerablemente su masa, volumen y costo. Pérdidas por estrés de conmutación, son despreciables debido a que se concentran a solo un dispositivo interruptor. Esto es compensable con el uso de *Mosfets* por las ventajas que ofrecen como dispositivos de conmutación a frecuencias elevadas.

Para la conexión del sistema de respaldo de energía, también es necesario un aislamiento con el sistema, de lo contrario existiría incompatibilidad de impedancias entre la resistencia interna de la pila y la impedancia interna de la FC, la corriente proveniente de la celda lo que ocasiona un descontrol y en el peor de los casos en condiciones de operación, la excesiva corriente tomada de la celda causaría un daño irreparable en ella.

Por último y la principal, en el estado del arte la mayoría de los convertidores basados en esta topología utilizan más de un bus de DC para la carga y descarga del sistema, lo que los hace más complejos. Al usar aislamiento entre la entrada y la salida, se evita esto y son ideales para acoplarse con sistemas de respaldo en energías renovables bajo la norma de CFE (aislamiento con la fuente generadora) [37] [38].

### 3.1 Convertidor DC/DC topología *Flyback* con FC.

En la figura 3.1 se muestra el convertidor de potencia propuesto. El sistema acondicionador de potencia está formado por dos módulos: Celda de combustible (FC) y el sistema de almacenamiento, que este a su vez está formado por un banco de Supercapacitores (SC) conectado a una batería en paralelo (Batt). Por lo anterior, se requieren dos *Flybacks* anidados. El primer convertidor opera directamente con la FC en una sola dirección, teniendo como función principal aislar la fuente con el sistema de almacenamiento. Posteriormente, el segundo *Flyback* protege a la carga del sistema de almacenamiento híbrido.

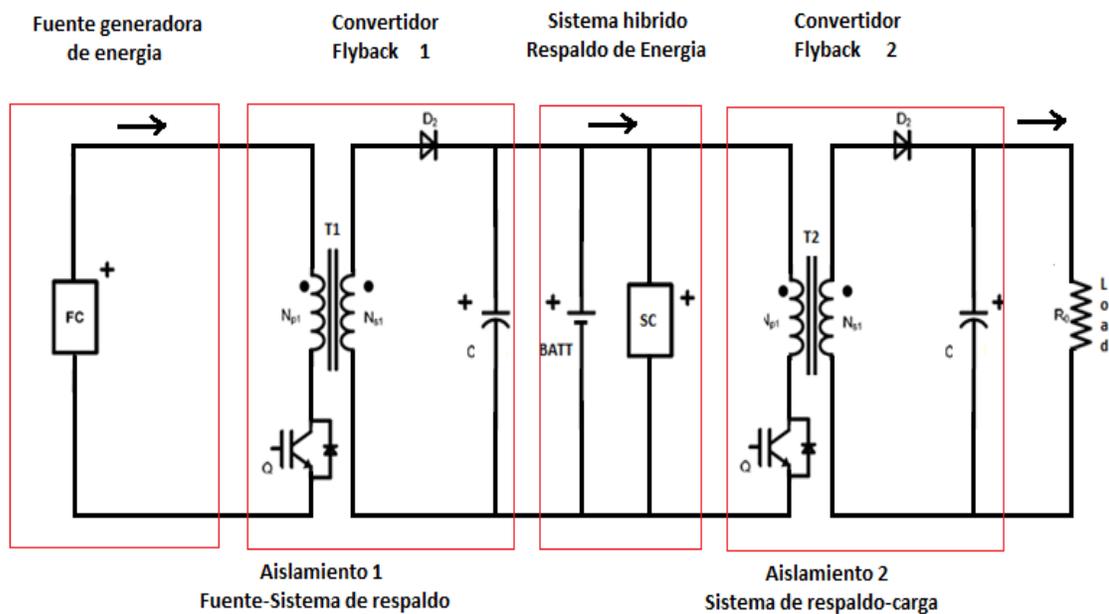


Figura 3.1. Acondicionador de potencia propuesto para FC.

### 3.1.1 Diseño y especificaciones del convertidor *Flyback*

Se realizó una investigación sobre los requerimientos básicos de los sistemas estacionarios, tales como sistema de iluminación residencial. En base a este se diseñó un prototipo que cumpla con las especificaciones requeridas por el sistema. A continuación, en la tabla 5 se muestran las especificaciones del convertidor *Flyback* calculadas para el sistema mencionado anteriormente.

Tabla 3.1. Especificaciones de diseño del convertidor *Flyback*.

<b>Especificaciones del diseño del Acondicionador de potencia</b>	<b>Valores (<i>Flyback</i> 1)</b>	<b>Valores (<i>Flyback</i>2)</b>
Tensión de entrada nominal	12V	12V
Tensión de entrada mínimo	12V	12V
Tensión de entrada máximo	12V	12V
Tensión de salida $V_o$	12V	12V
Potencia de salida	85W	85W
Frecuencia de operación	50KHz	50KHz

Una vez que ya se tienen las especificaciones generales del sistema. El paso siguiente es el diseño del acondicionador de potencia (*Flyback*). Para esto, es necesario realizar el cálculo de los componentes del convertidor en modo de conducción continuo MCC. A continuación, se muestra el cálculo realizado para obtener el diseño del acondicionador de potencia *Flyback* 1 en MCC.

Tabla 3.2. Especificaciones del *Flyback* I

<b>Especificaciones de diseño del acondicionador de potencia <i>Flyback</i> I</b>	
<b>Salida I</b>	
$V_{in} = 12$	$\Delta I = 100 \text{ m A}$
$V_o = 12V$	$f_s = 50 \text{ KHz}$
$P_{o1} = 85W$	$D = 0.5$
$\Delta V_o = 100 * 10$	

---

---

### Relación de transformación

$$N = \left[ \frac{V_o}{V_{in}} \right] * \left[ \frac{1-D}{D} \right] \quad (\text{A-1})$$

Sustituyendo términos:

$$N = \left[ \frac{12}{12} \right] * \left[ \frac{1-0.5}{0.5} \right] = 1$$

### Ciclo de trabajo del interruptor

$$D = \frac{V_o}{N * V_{in} + V_o} \quad (\text{A-2})$$

Sustituyendo términos:

$$D = \frac{12}{1 * 12 + 12} = 0.5$$

Para determinar la relación de vueltas del transformador existe libertad de seleccionar el ciclo de trabajo de 0.5.

$$L_p = \frac{V_{in} * D}{\Delta I * \left( \frac{P_o}{V_{in}} \right) * f_s} \quad (\text{A-3})$$

Sustituyendo términos:

$$L_p = \frac{12 * 0.5}{100mA * \left( \frac{85W}{12} \right) * 50KHz} = 169.411 \times 10^{-6}$$

---

---

### Inductor secundario

$$L_s = N^2 * L_p \quad (A-4)$$

Sustituyendo términos:

$$L_s = 1^2 * 169.411 \times 10^{-6} = 299.671 \times 10^{-6}$$

### Capacitor

$$C_o = \frac{\left[ \frac{P_o 1}{V_o} \right] * [D]}{[\Delta V_o] * [f_s]} \quad (A-5)$$

Sustituyendo términos:

$$C_o = \frac{\left[ \frac{85W}{12} \right] * [0.5]}{[100 \times 10^{-3}] * [50KHz]} = 708.33 \times 10^{-6} F$$

### Selección de interruptor (determinar V y I)

Corriente promedio de los interruptores

$$IQ = \left[ \frac{D}{1-D} \right] * N * \left[ \frac{P_o 1}{V_o} \right] \quad (A-6)$$

Sustituyendo términos:

$$IQ = \left[ \frac{0.5}{1-0.5} \right] * 1 * \left[ \frac{85W}{12} \right] = 7.08A$$

---

---

### Corriente pico de los interruptores

$$I_{PKQ} = \left[ \frac{\left[ \frac{P_o 1}{V_o} \right]}{1-D} \right] * [N] + \left[ \frac{V_{in} * D}{2 * L_p * f_s} \right] \quad (A-7)$$

Sustituyendo términos:

$$I_{PKQ} = \left[ \frac{\left[ \frac{85W}{12} \right]}{1-0.5} \right] * [1] + \left[ \frac{12 * 0.5}{2 * 169.411 * 10^{-6} * 50KHz} \right] = 14.52A$$

### Tensión máxima en el interruptor

$$V_{DSQ1} = V_o * \left[ \frac{1}{N} \right] + V_{in} \quad (A-8)$$

Sustituyendo términos:

$$V_{DSQ1} = 12 * \left[ \frac{1}{1} \right] + 12 = 24V$$

### Selección del diodo DFW (determinar V y I)

$$I_{diodo} = I_0 \quad (A-9)$$

$$I_0 = \frac{P_o 1}{V_o} \quad (A-10)$$

Sustituyendo términos:

$$I_0 = \frac{85W}{12} = 7.08A$$

La tensión máxima en el diodo

$$V_{AKDFW} = V_{in} * N + V_0 \quad (A-11)$$

Sustituyendo términos:

$$V_{AKDFW} = 12 * 1 + 12 = 24$$

A continuación, se muestra el cálculo realizado para obtener el diseño del acondicionador de potencia *Flyback* 1 en MCC.

Tabla 3.3. Especificaciones del *Flyback* II

<b>Especificaciones de diseño del acondicionador de potencia <i>Flyback</i> II</b>	
<b>Salida II</b>	
$V_{in} = 12$	$\Delta I = 100 \text{ m A}$
$V_o = 12V$	$f_s = 50 \text{ KHz}$
$P_2 = 85W$	$D = 0.5$
$\Delta V_o = 100 * 10$	

### **Relación de transformación**

$$N = \left[ \frac{V_o}{V_{in}} \right] * \left[ \frac{1-D}{D} \right] \quad (A-12)$$

Sustituyendo términos:

$$N = \left[ \frac{12}{12} \right] * \left[ \frac{1-0.5}{0.5} \right] = 1$$

---

---

## Ciclo de trabajo del interruptor

$$D = \frac{V_o}{N * V_{in} + V_o} \quad (A-13)$$

Sustituyendo términos:

$$D = \frac{12}{1 * 12 + 12} = 0.5$$

Para determinar la relación de vueltas del transformador existe libertad de seleccionar el ciclo de trabajo de 0.5.

$$L_p = \frac{V_{in} * D}{\Delta I * \left(\frac{P_o 2}{V_{in}}\right) * f_s} \quad (A-14)$$

Sustituyendo términos:

$$L_p = \frac{12 * 0.5}{100mA * \left(\frac{85W}{12}\right) * 50KHz} = 169.411x10^{-6}$$

## Inductor secundario

$$L_s = N^2 * L_p \quad (A-15)$$

Sustituyendo términos:

$$L_s = 1^2 * 169.411x10^{-6} = 299.671x10^{-6}$$

## Capacitor

$$C_o = \frac{\left[\frac{P_o 2}{V_o}\right] * [D]}{[\Delta V_o] * [f_s]} \quad (A-16)$$

---

---

Sustituyendo términos:

$$C_o = \frac{\left[ \frac{85W}{12} \right] * [0.5]}{\left[ 100 \times 10^{-3} \right] * [50KHz]} = 708.33 \times 10^{-6} F$$

### Selección de interruptor (determinar V y I)

Corriente promedio de los interruptores

$$IQ = \left[ \frac{D}{1-D} \right] * N * \left[ \frac{P_o 2}{V_o} \right] \quad (A-17)$$

Sustituyendo términos:

$$IQ = \left[ \frac{0.5}{1-0.5} \right] * 1 * \left[ \frac{85W}{12} \right] = 7.08A$$

Corriente pico de los interruptores

$$I_{PKQ} = \left[ \frac{\left[ \frac{P_o 2}{V_o} \right]}{1-D} \right] * [N] + \left[ \frac{V_{in} * D}{2 * L_p * f_s} \right] \quad (A-18)$$

Sustituyendo términos:

$$I_{PKQ} = \left[ \frac{\left[ \frac{85W}{12} \right]}{1-0.5} \right] * [1] + \left[ \frac{12 * 0.5}{2 * 169.411 \times 10^{-6} * 50KHz} \right] = 14.52A$$

Tensión máxima en el interruptor

$$V_{DSQ1} = V_o * \left[ \frac{1}{N} \right] + V_{in} \quad (A-19)$$

Sustituyendo términos:

$$V_{DSQ1} = 12 * \left[ \frac{1}{1} \right] + 12 = 24V$$

## Selección del diodo DFW (determinar V y I)

$$I_{\text{diodo}} = I_0 \quad (\text{A-20})$$

$$I_0 = \frac{P_0 2}{V_0} \quad (\text{A-21})$$

Sustituyendo términos:

$$I_0 = \frac{85W}{12} = 7.08A$$

La tensión máxima en el diodo

$$V_{AKDFW} = V_{in} * N + V_0 \quad (\text{A-22})$$

Sustituyendo términos:

$$V_{AKDFW} = 12 * 1 + 12 = 24$$

A continuación, se muestra la tabla de resultados obtenidos para el convertidor.

Tabla 3.4 Valores calculados

<b>Especificaciones <i>Flyback 1</i></b>	<b>Especificaciones <i>Flyback 2</i></b>
$V_{in} = 12$	$V_{in} = 12$
$V_o = 12$	$V_o = 12$
$N = 0.5$	$N = 0.5$
$D = 1$	$D = 1$
$L_p = 169.411 \times 10^{-6}$	$L_p = 169.411 \times 10^{-6}$
$L_s = 299.671 \times 10^{-6}$	$L_s = 299.671 \times 10^{-6}$
$C_o = 708.33 \times 10^{-6} F$	$C_o = 708.33 \times 10^{-6} F$
$I_Q = 7.08A$	$I_Q = 7.08A$
$I_{PKQ} = 14.52A$	$I_{PKQ} = 14.52A$
$V_{DSQ} = 24 V$	$V_{DSQ} = 24 V$
$I_o = 14.52A$	$I_o = 14.52A$
$V_{AKDFW} = 24$	$V_{AKDFW} = 24$

---

### 3.1.2 Operación del convertidor *Flyback* en lazo abierto

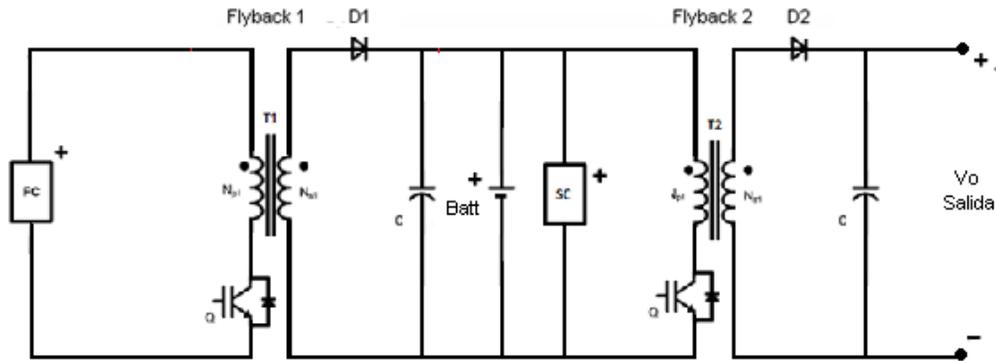


Figura 3.2. Circuito eléctrico del acondicionador de potencia en lazo abierto.

Con el circuito anterior en lazo abierto, a continuación, se presentan sus modos de comportamiento de operación:

- **Modo estable.** En este la celda es capaz de suministrar la suficiente energía a la carga y al sistema de almacenamiento de energía.
- **Modo crítico.** En este, la celda de combustible está inhabilitada, por lo que la energía es suministrada únicamente por el sistema de respaldo.
- **Modo óptimo.** En este tanto la celda de combustible y el sistema de respaldo entran en operación para mayores demandas de energía.

#### Modo de operación estable

En esta configuración el convertidor *flyback* es el responsable de suministrar toda la energía a la carga y al sistema de almacenamiento. En este caso al segundo *flyback*. Debido a que se considera que por su aplicación siempre tiene que estar cargado para realizar su función única.

---

---

## Estado “ON”

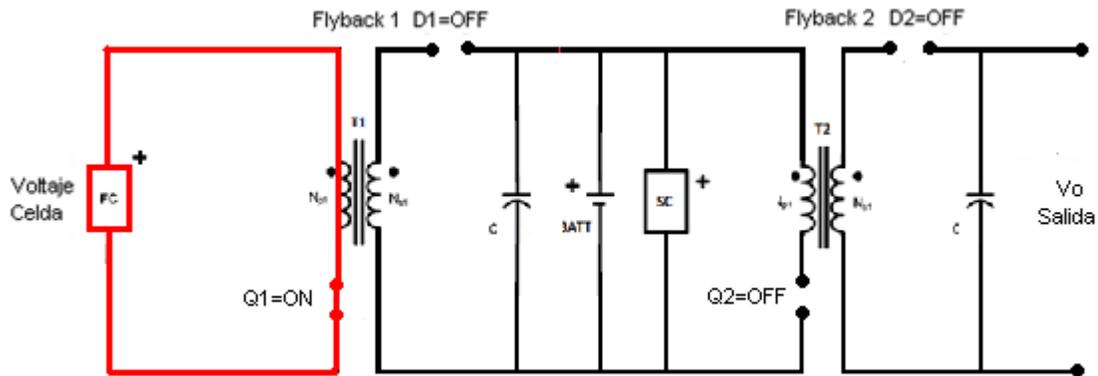


Figura 3.3. Circuito eléctrico del convertidor en estado “ON” operando en modo estable.

El circuito presentado en la figura 3.3 se observa que cuando  $Q1=ON$ , el inductor comienza a almacenar la energía proveniente de la celda. Por consiguiente, los demás elementos de conmutación como  $D1$  y  $D2$  no están en conducción de modo que se comportan internamente como circuitos abiertos, impidiendo que exista transferencia de energía hacia la carga o en este caso al *flyback 2*.

## Estado “OFF”

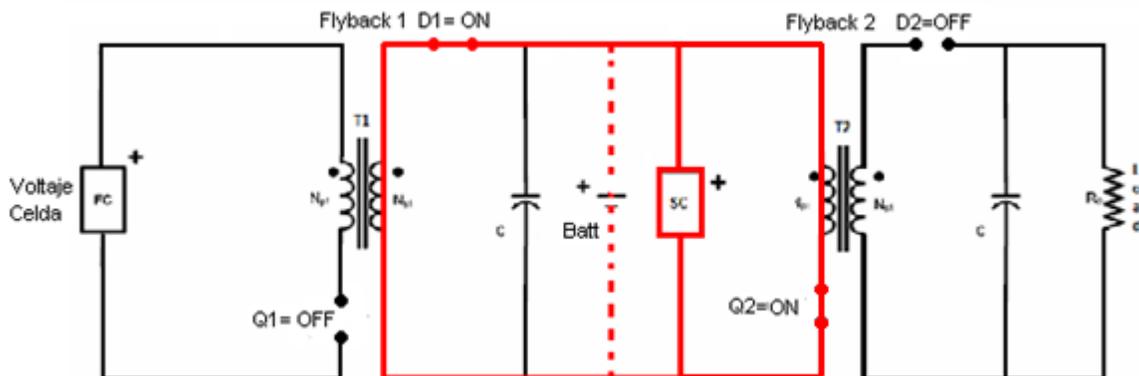


Figura 3.4. Circuito eléctrico del convertidor en estado “OFF” operando en modo estable.

En la figura 3.4 se analiza que  $Q1=OFF$  y  $Q2=ON$ , de manera que  $D1$  conduce y la energía almacenada en el inductor del *Flyback 1* es transferida a la siguiente etapa, para nuevamente almacenarse en el inductor del *Flyback 2*, esto tiene como finalidad brindar mayor protección a la FC.

Lo anterior se presenta con mayor claridad en un diagrama de tiempos para los estados de encendido y apagado de operación del modo estable. La figura 3.5 muestra el diagrama de tiempos.

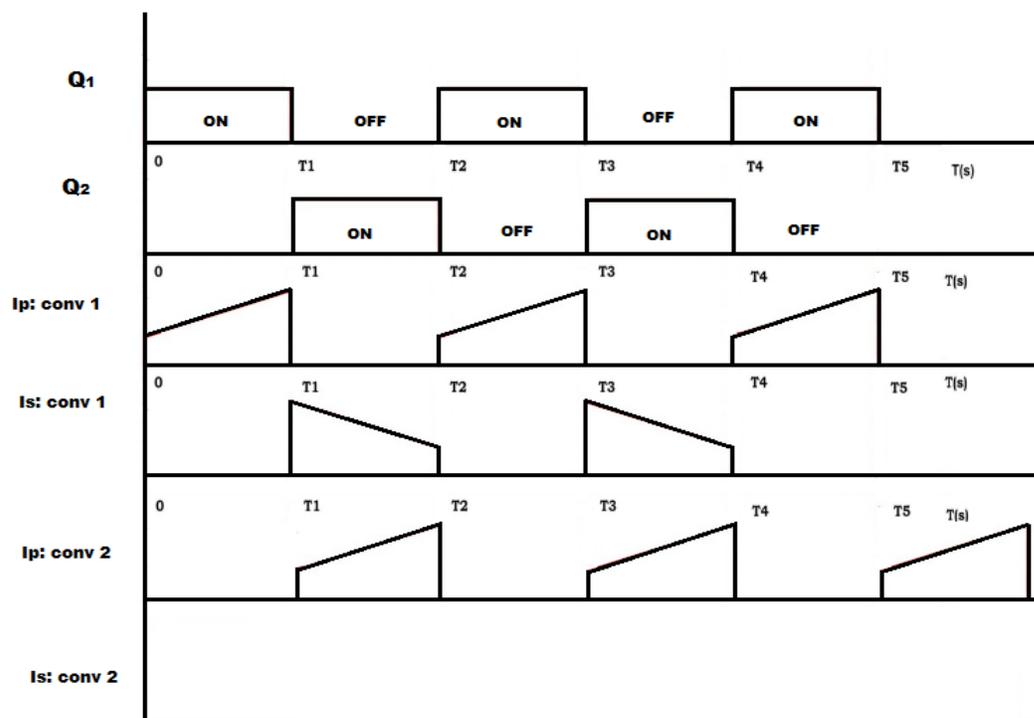


Figura 3.5 Diagrama tiempos del convertidor.

Cuando  $Q2=OFF$  y  $D2=ON$ , el paquete energético almacenado en el *flyback 2* es transferido a la carga, cumpliendo el requisito principal de aislar la entrada con la carga. La figura 3.6 muestra la transferencia de energía a la carga.

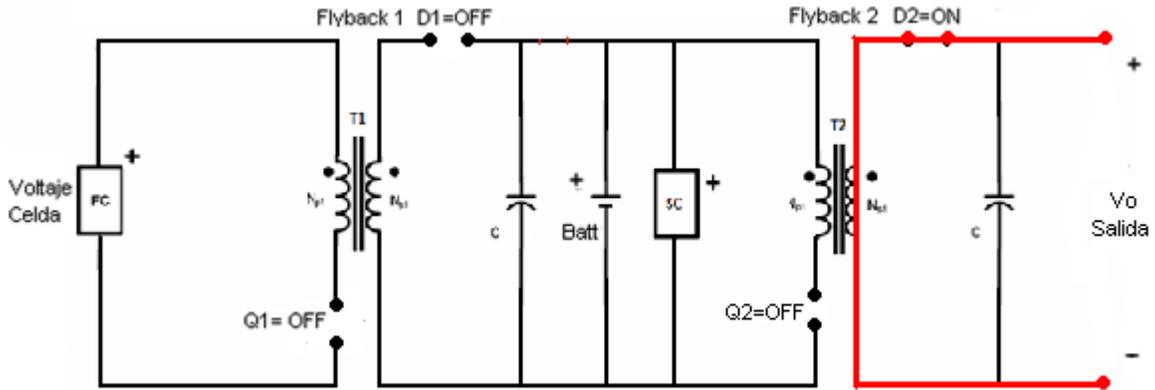


Figura 3.6. Transferencia de energía a la carga.

### Modo de operación crítico

Este modo es en caso que el suministro de hidrógeno a la celda falle o que el sistema tenga un problema con el suministro principal de energía. La celda no es capaz de transferir energía al sistema.

### Estado “ON”

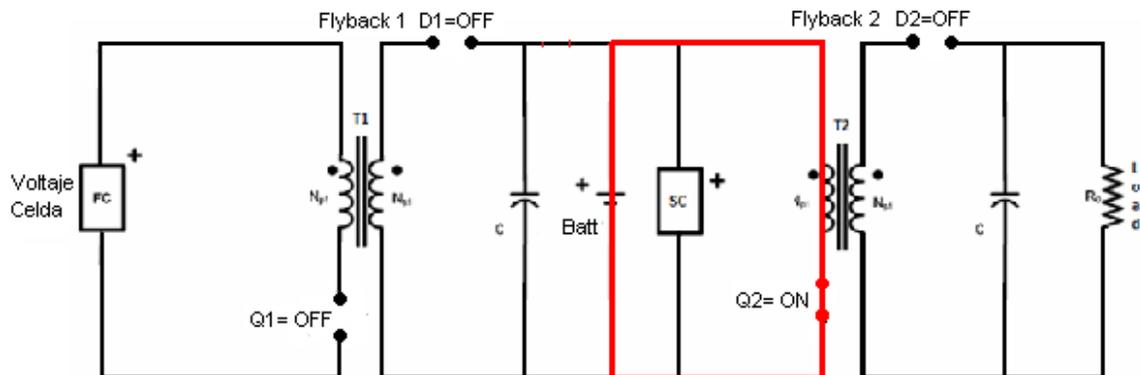


Figura 3.7. Modo en operación crítico.

En la figura 3.7 se considera que el *flyback 1* está fuera de operación, de manera que el sistema de respaldo es el encargado de suministrar energía al *flyback 2* para después transmitirlo a la carga.

---

## Estado “OFF”

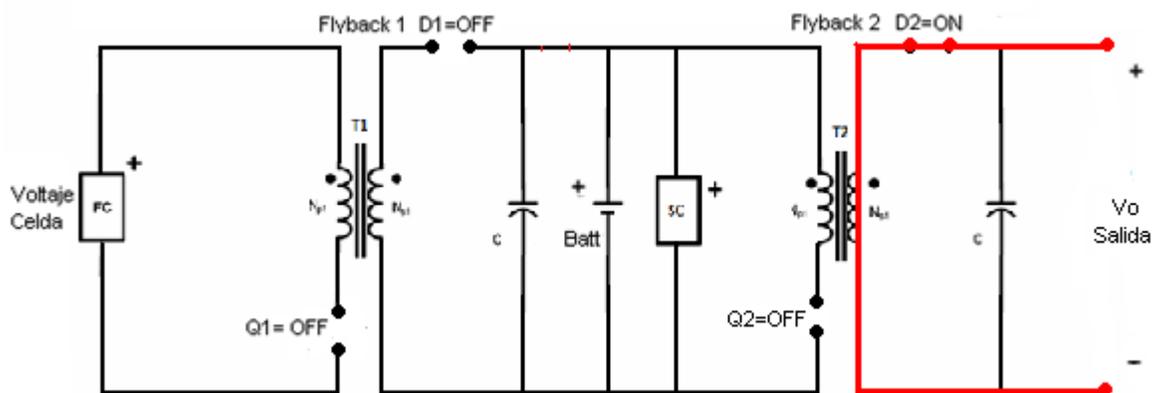


Figura 3.8. Transferencia de energía a la carga en modo crítico.

En la figura 4.8 es notable que  $Q2=OFF$ , y  $D2=ON$ , el paquete energético almacenado en el inductor del *flyback 2* es transferido hacia la carga. Con esto se logra tener un doble aislamiento, el primero con la fuente y el segundo con el sistema de respaldo.

## Modo de operación óptimo

En este modo de operación el suministro de energía es abastecido por la celda de combustible, pero el suministro no es el suficiente para alimentar a la carga. En este caso, la operación en modo óptimo involucra al sistema de respaldo y a la celda al mismo tiempo. En caso de que la demanda energética sea mayor, el sistema de respaldo será capaz de suministrar la energía necesaria para compensar esa falta de energía.

---

### Estado "ON"

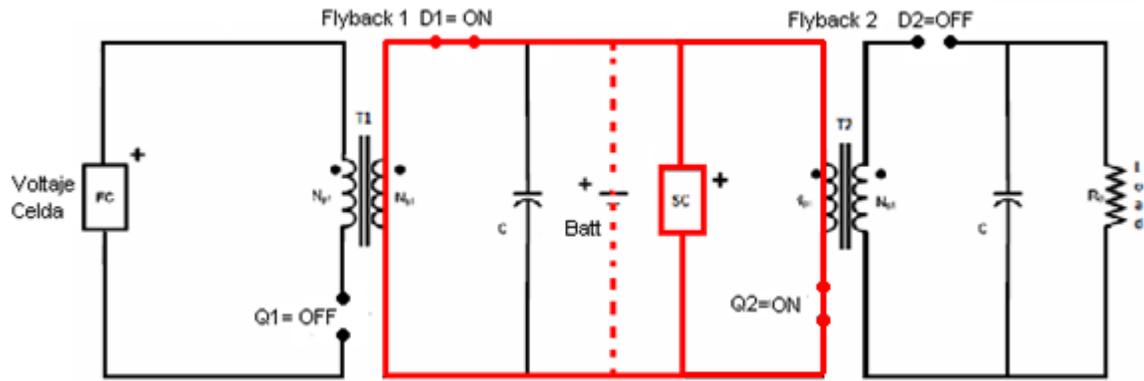


Figura 3.9. Modo en operación óptimo.

En la figura 3.9 al tener  $Q2=ON$  y  $D1=ON$ , nuevamente se almacena energía en el inductor del *flyback 2* el sistema de respaldo está disponible en caso que la celda no pueda proporcionar esa energía de carga al inductor. Por otra parte, en el secundario del *flyback 2*  $D2=OFF$ , por lo que no hay circulación de energía hacia la carga.

### Estado "OFF"

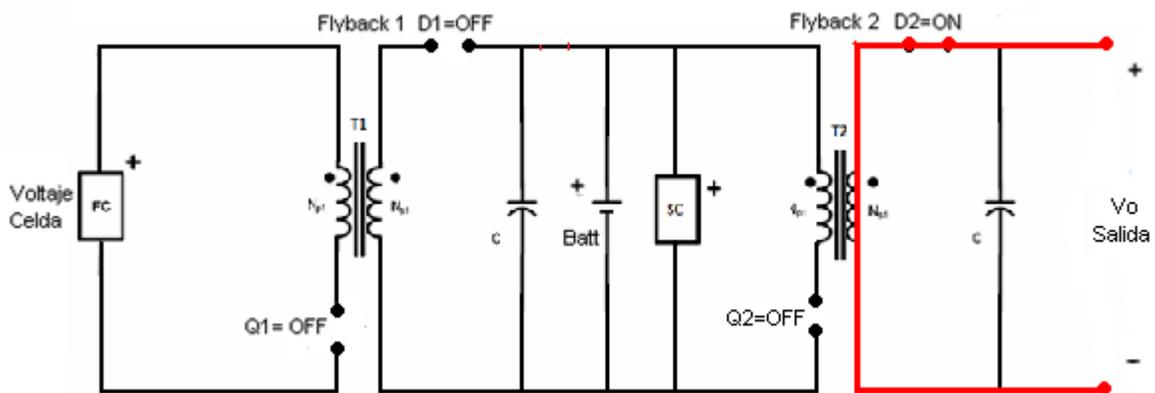


Figura 3.10. Transferencia de energía a la carga en modo óptimo.

En la figura 4.10  $Q2=OFF$  y  $D2=ON$  por lo que la energía almacenada en el inductor del *flyback* 2 es transferida a la carga, pero con el respaldo de energía del banco de SC, batería y la FC. Para comprender estos cambios de transferencia de energía la figura 3.11 muestra un diagrama de tiempos del convertidor en estado óptimo.

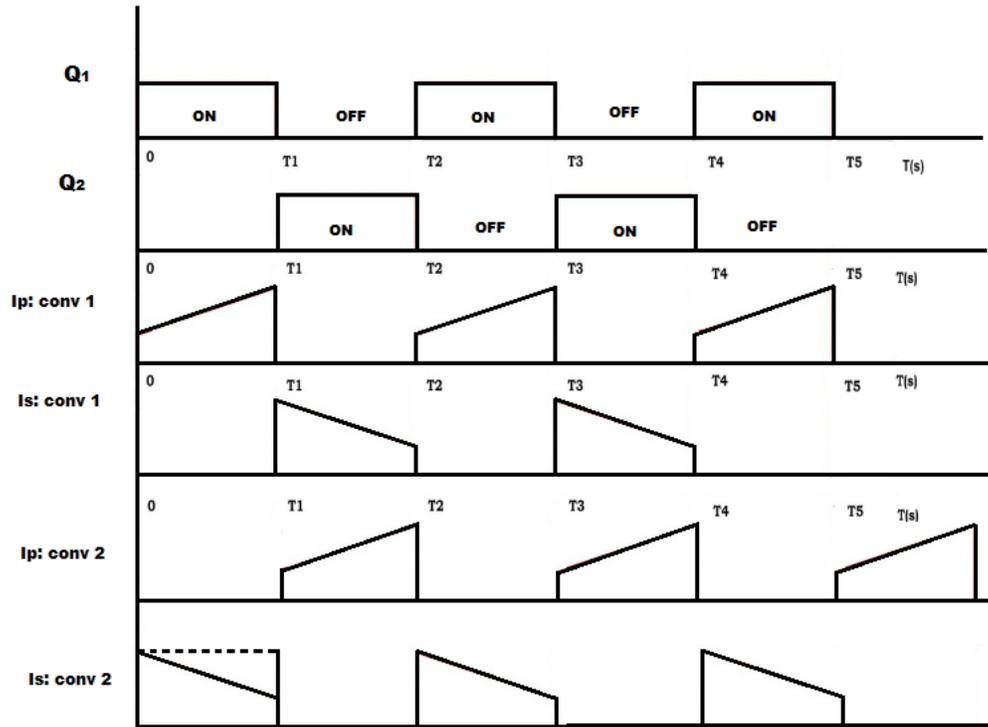


Figura 3.11 Diagrama de tiempos del convertidor en operación óptima.

### 3.2 Modulo Celda de combustible.

La celda de combustible utilizada en esta tesis corresponde a un módulo Horizon Fuel Cell Technologies <sup>TM</sup> modelo FCS-100 con una capacidad de potencia de 100W. Un punto importante que se tiene que mencionar es que la energía suministrada por estas tecnologías no está regulada, el voltaje nominal del módulo FC es de 19 Volts DC. Sin embargo, esto varía en función de la potencia demandada por la carga, sus valores están en el rango de 12 a 19 V de operación.

---

El módulo FC tiene un sistema de control y monitoreo que permite visualizar algunas variables del sistema, además en caso de una falla, el control es capaz de inhabilitar el sistema para protección del mismo.

EL módulo utilizado en esta tesis se muestra en la figura 3.12. Para operar este sistema es necesario monitorear las siguientes variables presentes:

- Temperatura de la FC.
- Voltaje en la FC.
- Corriente en la FC.
- Presión de hidrogeno en FC.
- Flujo de aire en la FC.
- Potencia en la FC.



Figura 3.12. Modulo FC de Horizon Technologies <sup>TM</sup>.

El sistema de control es el responsable de operar una válvula solenoide del sistema de purga de hidrogeno para seguridad del sistema. Del mismo modo, el sistema controla a un relevador, el cual el cual activa el sistema de protección del módulo en caso que exista una falla en la carga. Automáticamente se manda una señal al relevador y abre el circuito que en operación normal permanece cerrado.

---

Este sistema de protección es únicamente para el equipo y la carga. Pero para el usuario no existe un sistema de alerta o aviso en caso de una posible fuga en la zona de trabajo. Por lo que se hace necesario un sistema de detección de fugas de gas hidrogeno para implementar en el lugar de trabajo cuando se estén haciendo pruebas con la FC.

### 3.2.1 Sistema de detección de fugas de hidrogeno

A pesar que el hidrogeno no es un agente venenoso, es un gas altamente inflamable que tiene que ser supervisado y monitoreado constantemente para protección del usuario, debido a la existencia de estática o una chispa que fácilmente causan una explosión. Y las concentraciones a simple vista tienden a ser imperceptibles en espacios cerrados, por lo que es necesario tener una alta seguridad y prevención de riesgos al utilizar Hidrogeno presurizado.

El sistema de detección como se muestra en la figura 3.13 se desarrolló con una tarjeta Arduino UNO®, la cual en conjunto con sensor de gas hidrogeno (módulo MQ-8) detecta la concentración de hidrogeno en un área cerrada. El sensor MQ-8 identifica concentraciones de gas de hidrógeno en cualquier lugar con un rango desde 100-10000 ppm. El sensor tiene una alta sensibilidad y rápido tiempo de respuesta.

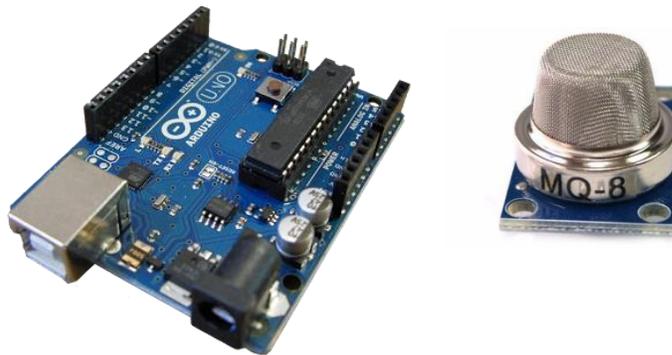


Figura 3.13. Sistema de detección de hidrogeno con Arduino.

#### 3.2.1.1 Funcionamiento del sensor

La salida del sensor es una resistencia analógica. El circuito de control es muy simple, todo lo que tiene que hacer es alimentar la bobina del calentador con 5V, añadir una resistencia de carga y conectar la salida de un ADC.

---

El programa de detección primero realiza una calibración del sensor para determinar el valor resistivo que le asignara y en función de esto, detectar las partículas contenidas en el aire. En la figura 3.14 y figura 3.15 se muestra la etapa de calibración y asignación de la resistencia de precalentamiento del sensor MQ-8.

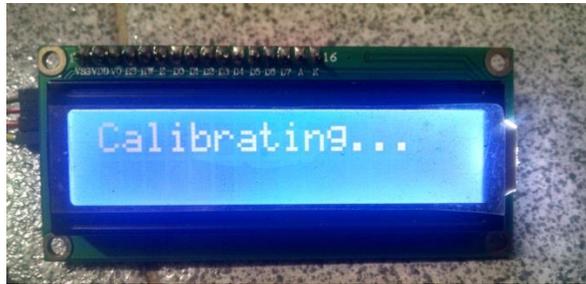


Figura 3.14. Calibración del sistema de detección.



Figura 3.15. Calibración terminada (asignación resistiva).

Una vez asignado el valor de resistencia de precalentamiento el sistema de detección está listo para detectar partículas por millón (PPM) de hidrogeno en el ambiente. En la figura 3.16 se muestra el sistema detectando concentraciones mínimas de gas hidrogeno para motivos de prueba del sistema.



Figura 3.16. Sistema de detección en funcionamiento.

El hidrogeno generado para las pruebas de detección se generó en pequeñas cantidades por un electrolizador bajo condiciones controladas y en un ambiente ventilado. La figura 3.17 muestra el electrolizador empleado para las pruebas de detección.



Figura 3.17. Electrolizador utilizado para la generación de hidrogeno.

### 3.2.2 Sistema de Almacenamiento hibrido.

Se tiene un sistema de almacenamiento hibrido basado en la conexión de un supercapacitor@2.7V, 350 F de la marca Maxwell ® technologies, con una batería AGM @12 V 7 AH. En la figura 3.18 se muestra el modelo del supercapacitor y el banco de SC que se utilizara con la batería para formar el sistema de almacenamiento.



Figura 3.18. Banco de SC de la marca Maxwell® Technologies.

Resulta interesante proponer un sistema híbrido de almacenamiento de energía, esto genera gran interés en el área de las energías renovables por que con estos sistemas se mejora el desempeño y durabilidad de las baterías si se acoplan en sistemas híbridos [45]. En la figura 3.19 se muestra como las baterías amortiguan los picos de corriente demandada por las cargas en los sistemas aislados [35] [36].

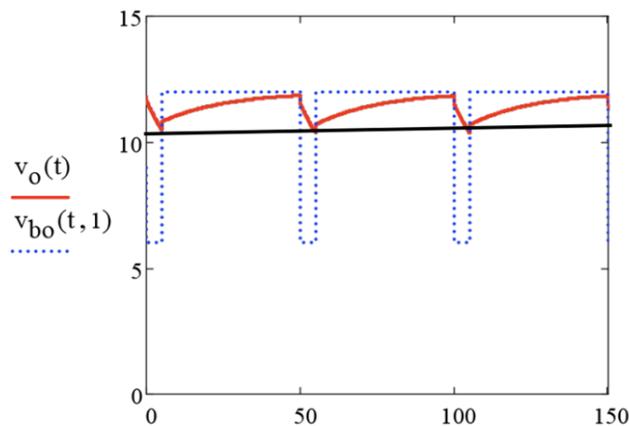


Figura 3.19. Batería amortiguando los picos de corriente de la carga.

La investigación de esta tesis se enfoca en el diseño de un sistema híbrido de almacenamiento que sea capaz de mejorar los cambios repentinos ante demandas bruscas de corriente. En la figura 3.20 se aprecia que la descarga de la batería sería amortiguada con un supercapacitor haciendo la descarga de la batería más suave.

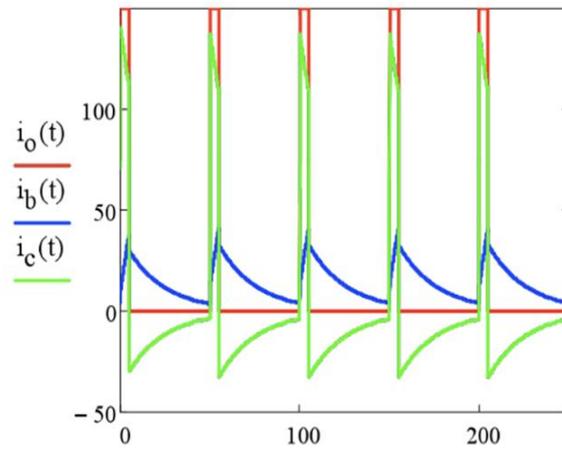


Figura 3.20. Amortiguamiento de la descarga de una batería con SC.

En resumen, es una buena solución al proponer un aumento en el periodo de vida de las baterías, especialmente para sistemas aislados que requieren totalmente de descargas profundas durante tiempos largos. Esto se vuelve un área de estudio que genera gran interés al acoplarlo a los acondicionadores de potencia DC/DC para aplicaciones de FC.

---

## Capítulo 4: PRUEBAS Y SIMULACIONES DEL SISTEMA

Para el sistema de acondicionamiento de potencia propuesto se tuvo que simular parte por parte cada elemento del sistema. Para determinar si el diseño será apropiado para el funcionamiento con la celda de combustible. Las simulaciones fueron realizadas en Simulink<sup>®</sup>, esta herramienta cuenta con librerías para simular los distintos componentes que se requieren y está contenida dentro del software MATLAB<sup>®</sup> R2013.

### 4.1 Modelo eléctrico simplificado de una Celda de combustible.

Un modelo simplificado de una FC se muestra en la figura 4.1, el cual se desarrolló para operar las características eléctricas y dinámicas de la celda real a utilizar. Existen otras formas de representar a una celda de combustible, la forma más simple es obteniendo su circuito equivalente tomando en cuenta las condiciones de operación nominal de la celda.

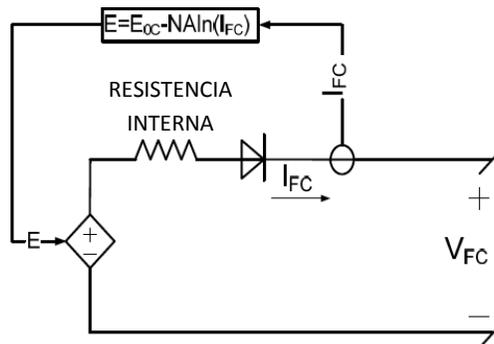
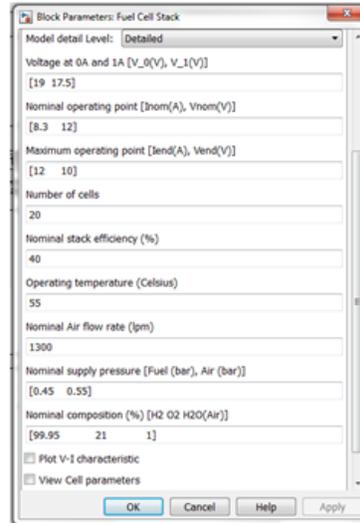
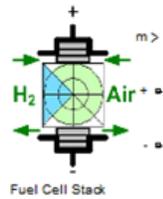


Figura 4.1. Modelo simplificado de una FC.

### 4.2 Modelo detallado de una Celda de combustible en Simulink.

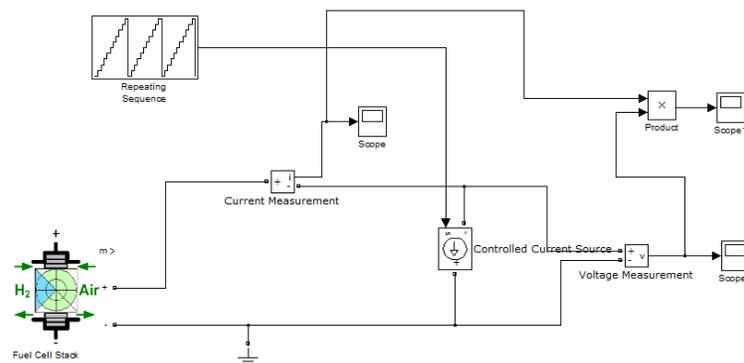
Por otro lado, la herramienta Simulink<sup>®</sup> incluye en sus librerías un emulador de Celdas de combustible comerciales y también permite simular el comportamiento de celdas con características particulares (modelo detallado). En la figura 4.2 se muestra la herramienta que permite esta emulación más detallada.



4.2. Modelo detallado de FC en Simulink®.

### 4.3 Caracterización de la FC en Simulink.

Para la caracterización de la celda de combustible, se realizó el siguiente circuito para someterlo a simulación como se muestra en la figura 4.3. El funcionamiento de este circuito se basa en una secuencia de escalón, en la cual conectado a una fuente de corriente se simulan diferentes demandas de corriente provenientes de la carga.



4.3. Circuito de caracterización de la FC en Simulink.

En la figura 4.4 se observa el comportamiento ante diferentes cargas resistivas. Con estas variaciones en la salida el voltaje, corriente y potencia se ven afectados en la FC.

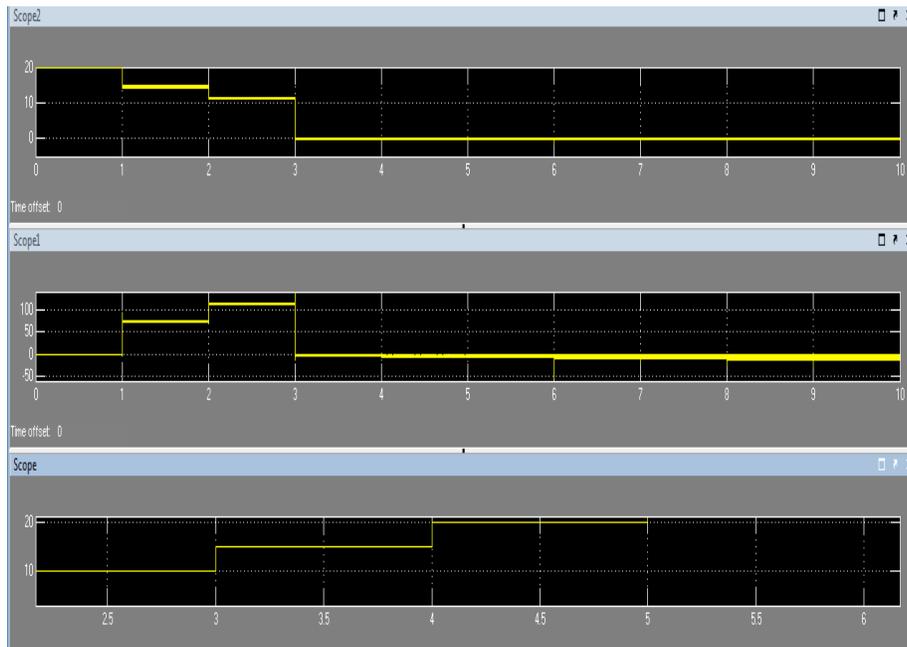


Figura 4.4. Comportamiento de la FC ante demandas de energía.

#### 4.4 Convertidor *Flyback* en Simulink.

La primera etapa para comprobar el correcto funcionamiento del convertidor *Flyback* fue conectándolo a una fuente fija de 12 V DC. Las características del transformador son para un elevador de voltaje con una relación de 1:2 como es apreciado en la figura 4.5.

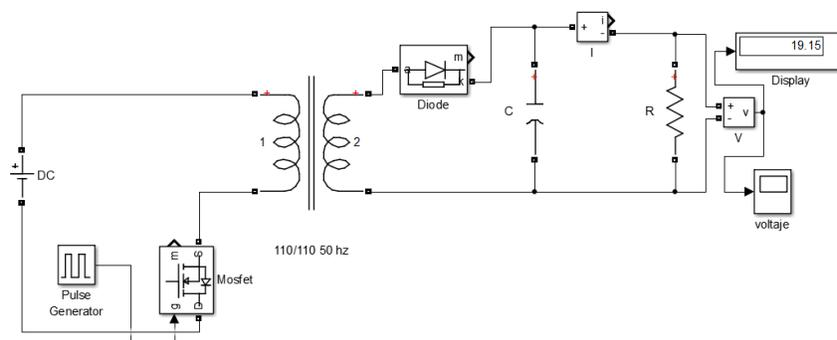


Figura 4.5. Circuito de topología *Flyback* en Simulink.

---

Las gráficas obtenidas por la simulación en la figura 4.6 muestran que para una relación de transformación 1:2 el *flyback* se comporta como duplicador de voltaje tomando en cuenta pérdidas por conmutación de los dispositivos de interconexión.

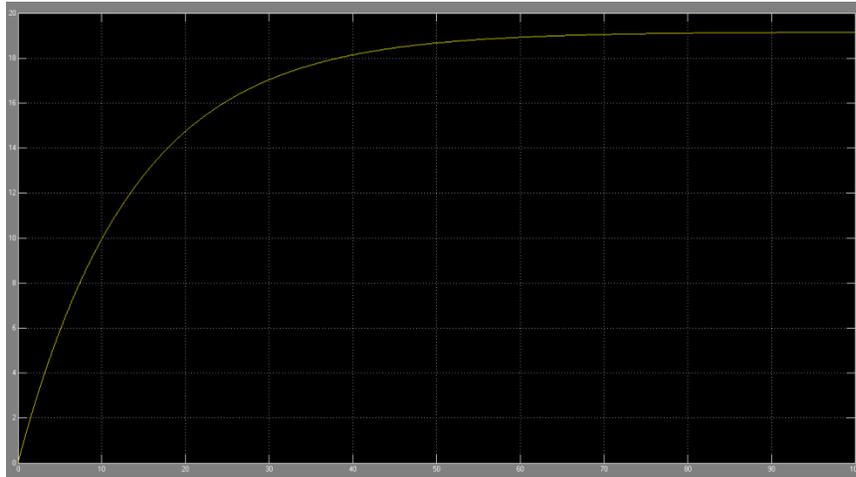


Figura 4.6. Gráfica del voltaje de salida en el *Flyback*.

#### 4.5 Modelo eléctrico de un SC.

Al igual que un capacitor convencional, el parámetro característico de un SC sigue siendo su capacitancia. Sin embargo, la capacitancia no es el único parámetro que posee, también se incorpora una resistencia en serie. En la figura 4.7 se muestra el circuito eléctrico equivalente de un SC.

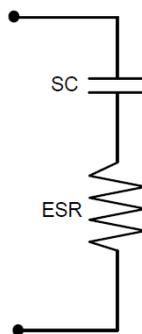


Figura 4.7. Circuito equivalente eléctrico de un SC.

---

La resistencia equivalente en serie (ERS por sus siglas en inglés) es muy pequeña con valores en el orden de los 10 mΩ como máximo. En este modelo no se consideran las corrientes de fuga que corresponden a las pérdidas parasitas cuando el capacitor está cargado. Sin embargo, estos valores de corriente son muy pequeños en el rango de 1-10 mA.

#### 4.6 Modelo detallado de un SC en Simulink.

En simulink también es viable emular Supercapacitores de valor comercial y también con características específicas de algún arreglo en particular. Existe el modelo simplificado y detallado, en este último se ingresan todos los parámetros que proporciona el fabricante como, por ejemplo, densidad de corriente, voltaje pico máximo, temperatura de operación, voltaje inicial, por mencionar algunos. En la figura 4.8 se observa la respuesta del emulador en modelo detallado.

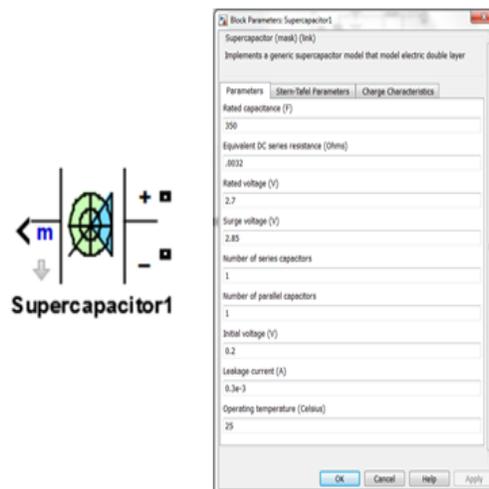


Figura 4.8. Modelo detallado de un SC en simulink.

#### 4.7 Caracterización de un SC en Simulink.

Para la caracterización del SC se tuvo de diseñar un circuito eléctrico en simulink para observar el comportamiento de carga en un sistema con una fuente fija de voltaje para posteriormente probarlo con la FC. En la figura 4.9 se muestra el circuito utilizado para simular el comportamiento de carga de un SC.

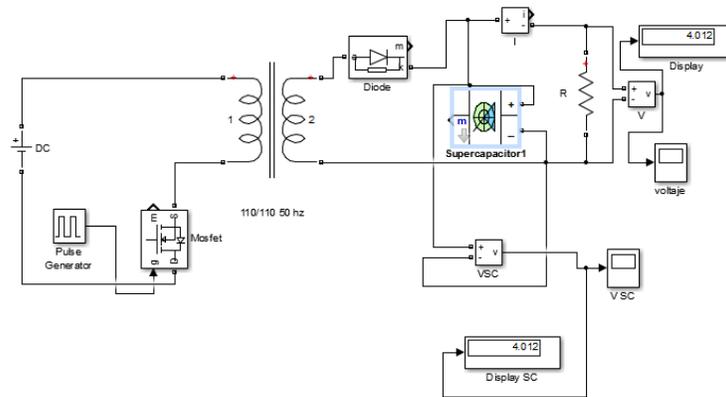


Figura 4.9. Circuito de caracterización de un SC en simulink.

El circuito muestra una curva de carga por arriba del valor nominal del SC, en los datos proporcionados por el fabricante se menciona que al llegar a su carga máxima se excede el voltaje nominal, pero una vez que se estabiliza alcanza el valor predefinido. En la figura 4.10 se muestra la curva de carga de un SC.

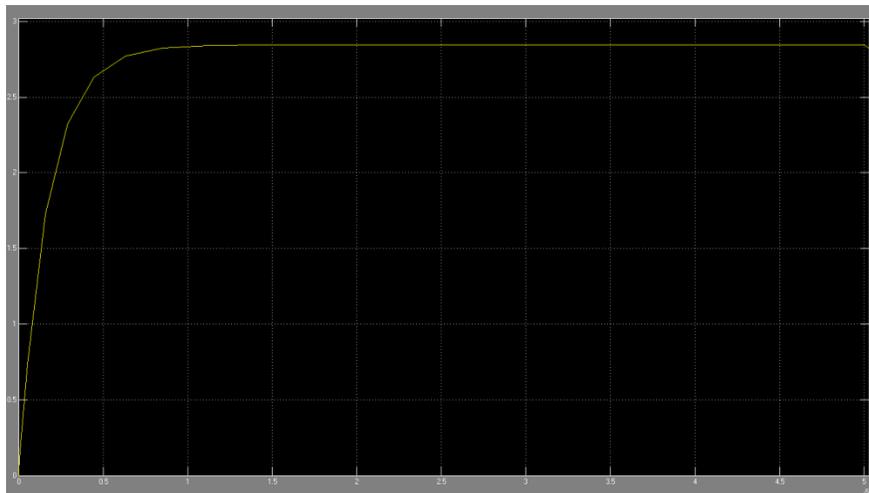


Figura 4.10. Curva de carga de un SC @2.7 350 F.

---

## 4.8 Convertidor *Flyback* con FC

Una vez realizadas las pruebas con una fuente fija de voltaje, se conecta la FC para observar su comportamiento en la salida. En la figura 4.11 se muestra la conexión de una FC como fuente de energía con el convertidor *Flyback* como acondicionador de potencia.

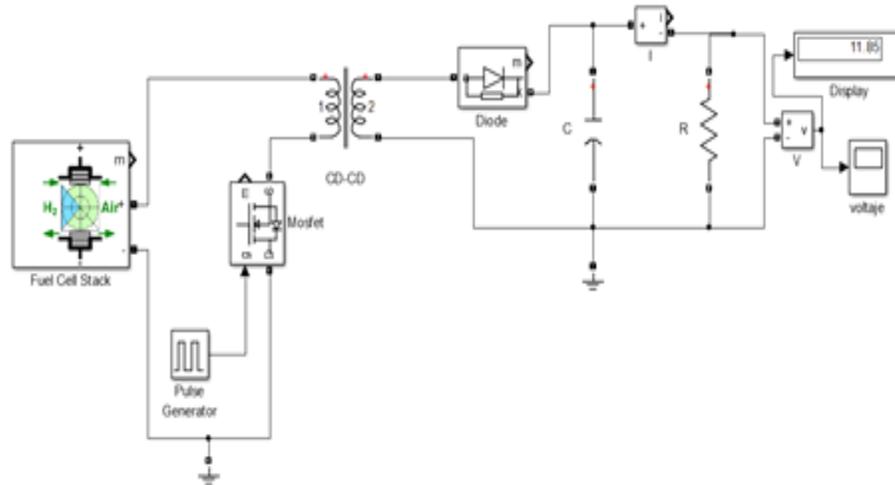


Figura 4.11. Conexión de FC con *flyback*.

En la figura 4.12 se muestra el comportamiento de la celda de combustible conectada con el convertidor *Flyback*, en esta grafica se observa que el convertidor presenta una ligera perturbación y después se estabiliza al voltaje deseado. Esto se corrige al cambiar el valor del capacitor que está ubicado en la salida de la carga.

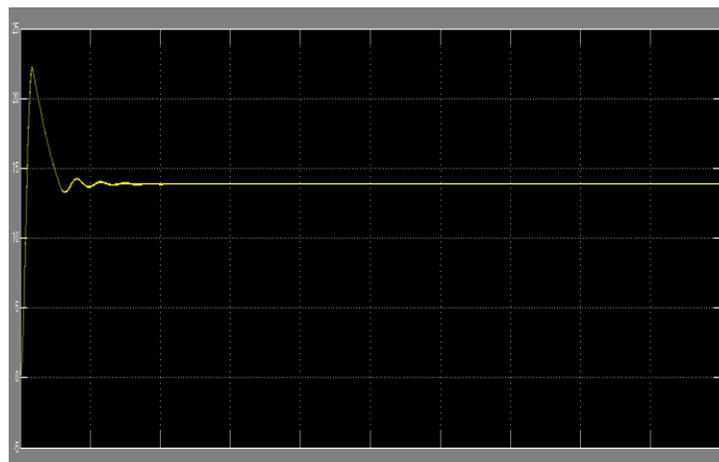


Figura 4.12. Comportamiento de la FC con el convertidor *Flyback*.

---

## 4.9 Convertidor *Flyback* con FC/SC (Parte 1)

La primera parte del acondicionador de potencia está formada por un aislamiento galvánico proporcionado por el convertidor *Flyback*, este a su vez se conecta con un sistema de respaldo de energía basado en una batería Agm. Para posteriormente conectar la carga. En la figura 4.13 se muestra el circuito del convertidor *flyback* parte 1.

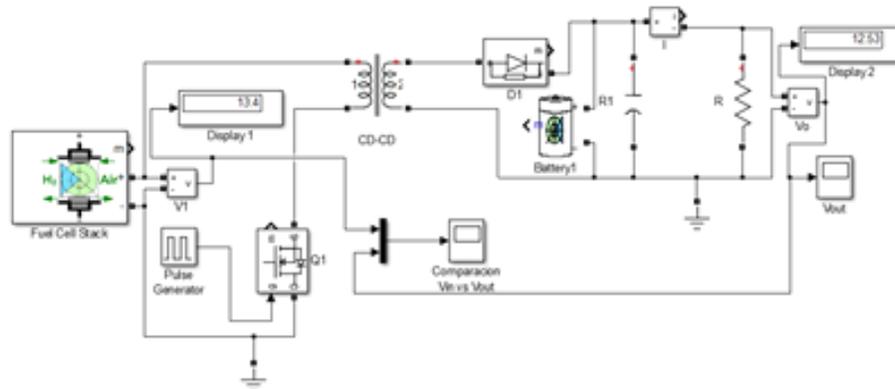


Figura 4.13. Circuito del convertidor *flyback* parte 1.

En la simulación del circuito figura 4.14 se observa que el comportamiento del sistema regula aproximadamente 12 V a la salida. Por lo anterior, el convertidor cumple el objetivo de regular la salida proveniente de la FC conectada a la batería de respaldo.

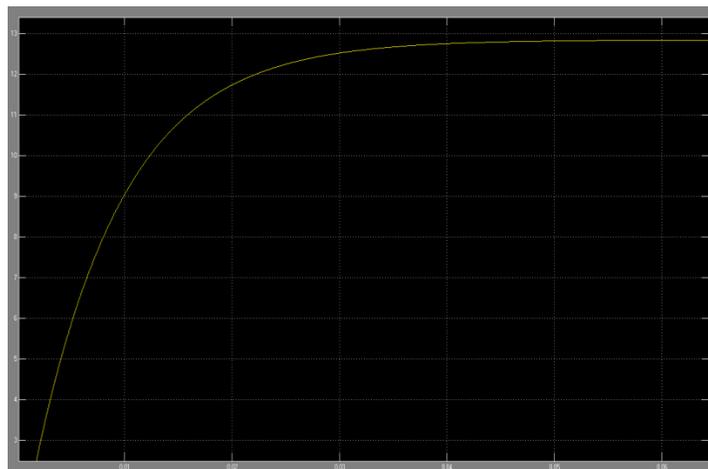


Figura 4.14. Comportamiento del convertidor *Flyback* parte 1.

---

## 4.10 Convertidor *Flyback* con FC/SC/BATT (Parte 2)

La segunda etapa del convertidor *Flyback* es añadirle un SC en paralelo a la Batería y la carga. De manera, que únicamente exista un *Bus* de corriente directa donde se demande toda la energía que necesite la carga. En la figura 4.15 se muestra que la batería y el SC están conectados en el mismo bus que la carga.

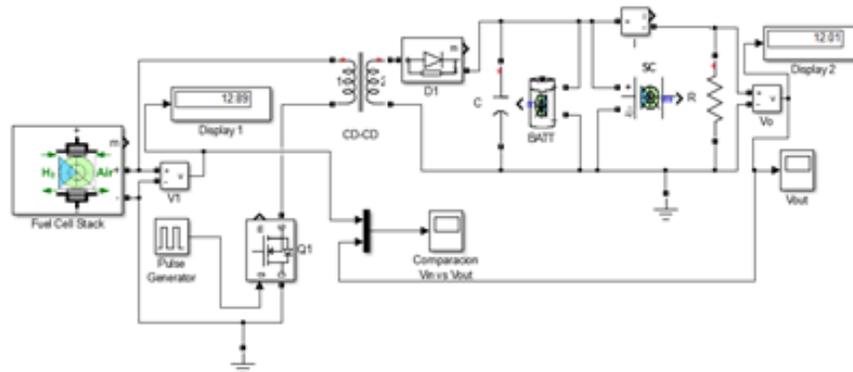


Figura 4.15 Circuito del convertidor *Flyback* (parte 2).

En la figura 4.16 se hace una comparación entre el voltaje de entrada con el de salida. Lo anterior, es con la finalidad de ver la eficiencia del sistema y las pérdidas por conmutación de los dispositivos que presentan una ligera caída de tensión a la salida.

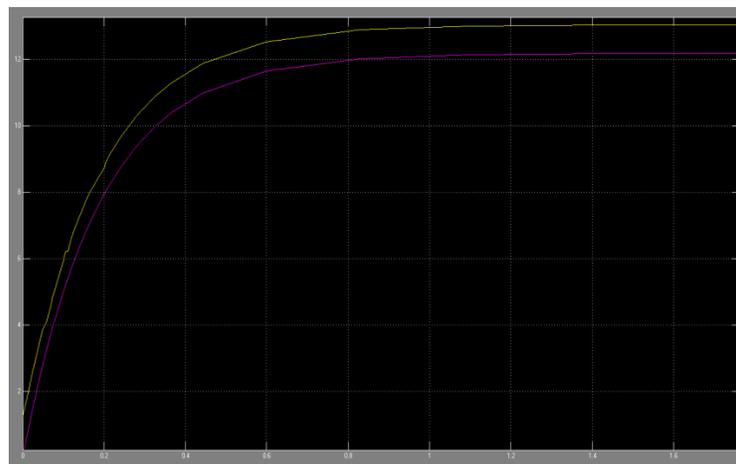


Figura 4.16. Comparación entrada vs salida del convertidor *Flyback* (parte 2).

### 4.11 Convertidor *Flyback* con FC/SC/BATT (parte 3)

Por último, se añade la tercera etapa que consiste en conectar un segundo *Flyback* anidado, esto es con el motivo de proteger al sistema de almacenamiento con la carga. La relación de transformación del transformador 1 y el transformador 2 es la misma. Este circuito se diseñó para tener una relación 1:1 lo cual sirve para regular y ofrecer aislamiento galvánico entre el suministro de energía y la carga. En la figura 4.17 se muestran los dos *flybacks* anidados para crear un aislamiento, pero en este caso entre la salida y el sistema de almacenamiento.

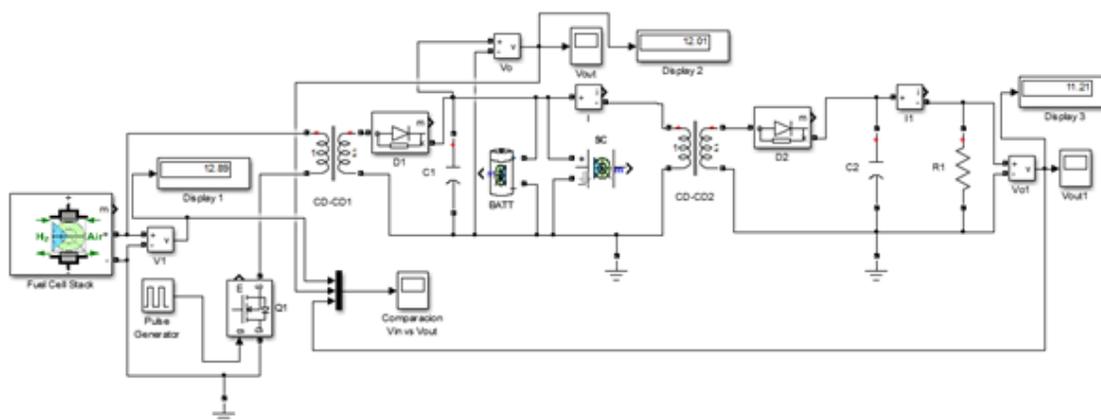


Figura 4.17. Circuito de convertidor *Flyback* (parte 3).

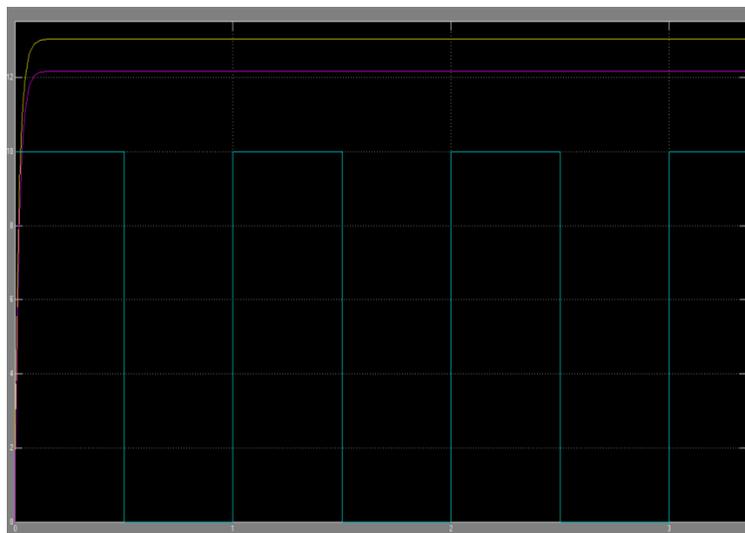


Figura 4.18 Comportamiento del convertidor *Flyback* parte 3.

---

## 4.12 Control convertidor Flyback Matlab/simulink

Al usar MATLAB / Simulink, el convertidor flyback se implementa utilizando LPCM basado en PID. La Figura 4.19 muestra el modelo de convertidor de *Flyback* en Matlab / Simulink con controlador LPCM basado en PID. Las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22 son las formas de onda de voltaje y corriente de entrada, potencia de salida y voltaje de salida.

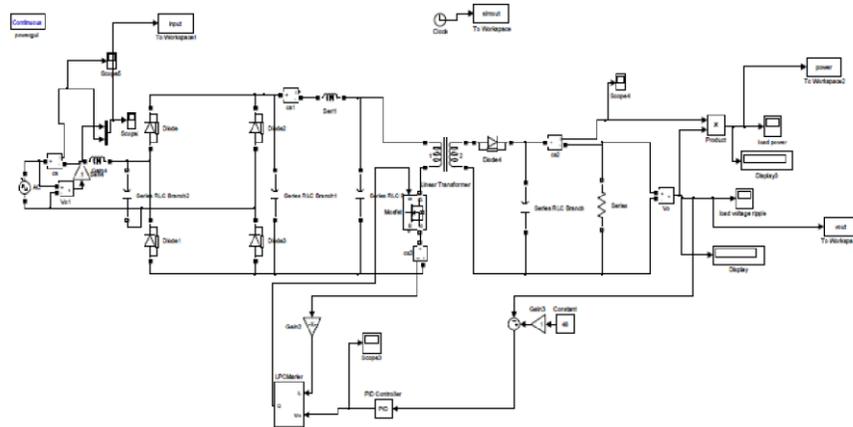


Figura 4.19 modelo de convertidor de *Flyback* en Matlab / Simulink

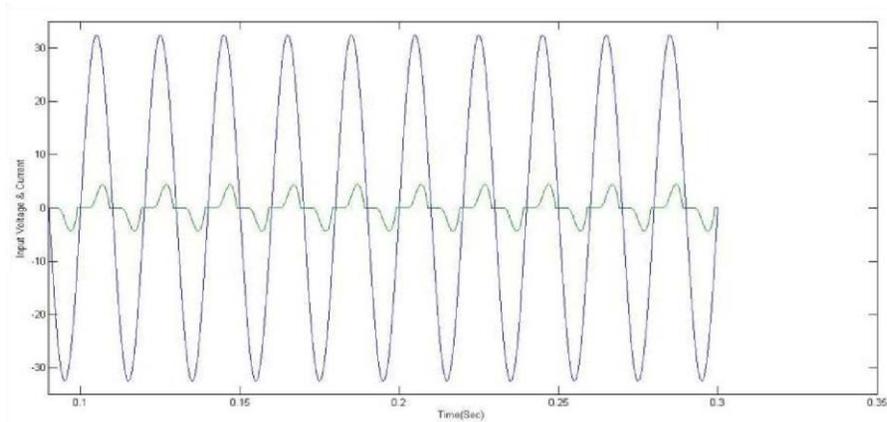


Figura 4.20 Comparativa entre voltaje de entrada y corriente de salida para el PID

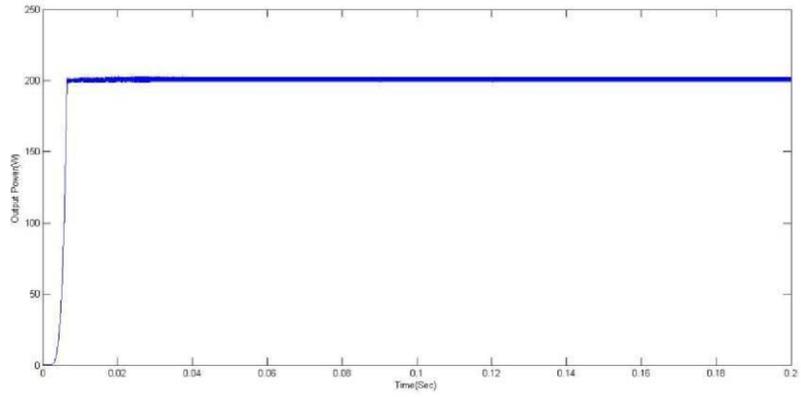


Figura 4.21 Potencia de salida del controlador PID

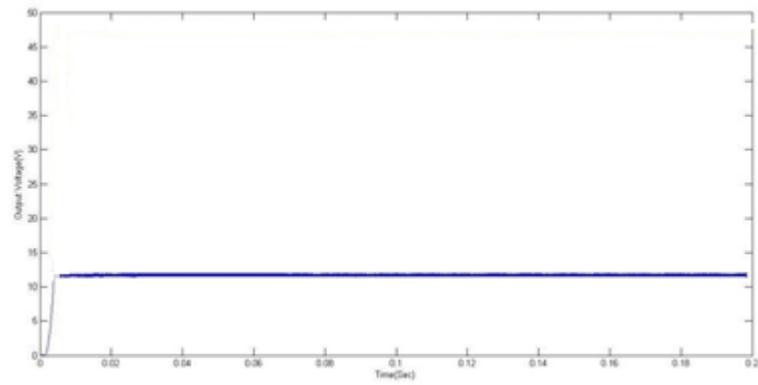


Figura 4.22 Voltaje de salida del PID

## Capítulo 5: VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

### 5.1 Diagrama eléctrico del convertidor *flyback* para operar la FC

Las pruebas y resultados obtenidos se realizaron en el laboratorio de ingeniería eléctrica, en el área de desarrollo de proyectos renovables. En el cual, se construyó un generador de hidrógeno portátil, cuyo funcionamiento consiste en separar el oxígeno e hidrógeno del agua, mediante el proceso de electrolisis generado por paneles solares, al que se le añadió una etapa de generación de gas y energía eléctrica a través de celdas de combustible. Cabe mencionar que las pruebas se realizaron a una temperatura de  $23^{\circ}\text{C}$ , humedad del aire 20 % y con una ventilación constante.

La figura 5.1 muestra el convertidor propuesto y la estructura propuesta para el control de la FC cuya función es controlar el voltaje del SC ( $V_{SC}$ ) y la corriente de la FC a través de controladores Proporcional Integral (PI) en las señales  $PI V_{SC}$  y  $PI I_{FC}$ . La estructura de control del convertidor *flyback* tiene la función de controlar el  $V_o$ , además la corriente  $SC I_{SC}$  a través de los controladores PI en las señales  $PI V_o$  y  $PI I_{SC}$ .

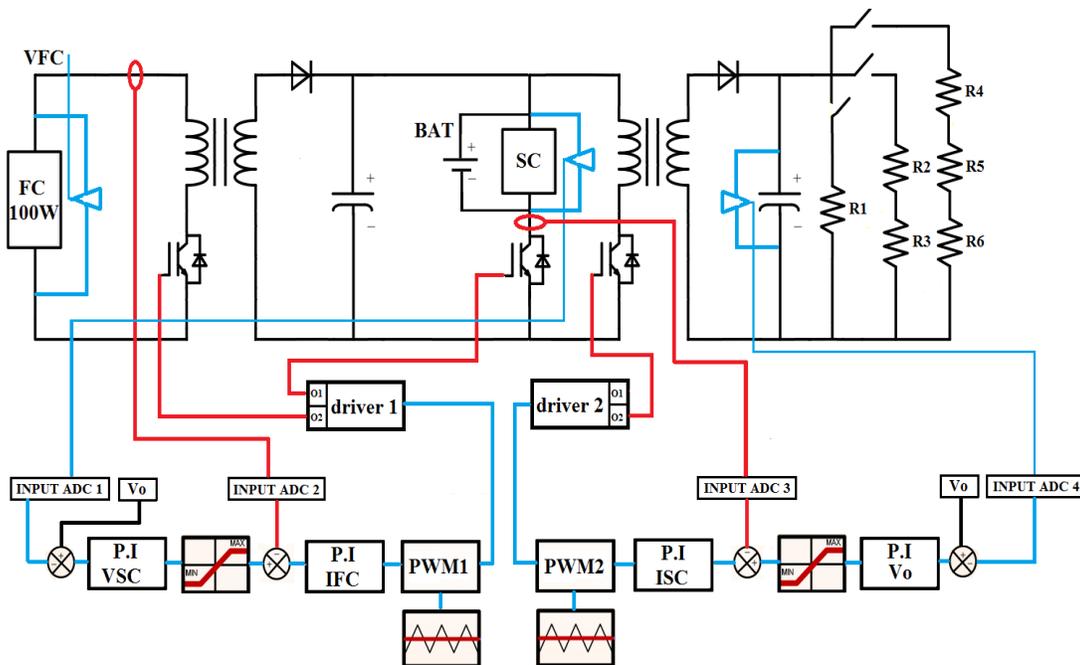


Figura 5.1 Convertidor digital propuesto con Raspberry pi B3 para la FC.

---

## 5.2 Descripción de las pruebas

La figura 5.2 muestra la conexión de la celda de combustible de 100 W, la cual se instaló en el laboratorio de ingeniería eléctrica, donde los requerimientos (temperatura, ventilación, humedad, seguridad) se cubrieron para su correcta operación. La PEMFC (100W, 8A, 16V) es desarrollada y comercializada por Horizon Fuel Cell Technologies. La FC tiene suministro de gas temporal a través de un cilindro de H<sub>2</sub> como se aprecia en la figura 5.2.



Figura 5.2 Conexión y suministro de gas con cilindro de H<sub>2</sub>.

Al utilizar hidrogeno presurizado es importante tener una alta seguridad y prevención de riesgos en las pruebas con la Celda de combustible. Como se muestra en la figura 5.3 en pruebas iniciales se realizó un sensor de hidrógeno con un microcontrolador Atmega 8 con la finalidad de medir las partes por millón (PPM) concentradas en un área o espacio, y posteriormente se implementó un detector de hidrógeno comercial de la marca BITWO ELECTRONICS el cual tiene mayor confiabilidad en caso de una fuga como se aprecia en la figura 5.4. A pesar que el hidrogeno no es un agente venenoso, es un gas altamente inflamable que tiene que es importante supervisar y monitorear constantemente, debido a que con una simple chispa o por estática se provoca una explosión.



Figura 5.3 Sensor de hidrógeno para ppm.



Figura 5.4 Detector de hidrógeno de la marca BITWO®.

El suministro de hidrogeno es un factor importante al utilizarlo en celdas de combustible, debido a que estas necesitan un suministro constante y fijo por lo que la limitante principal de utilizar hidrógeno presurizado en cilindros es que este tiende a acabarse y el proceso de rellenado del gas, es un proceso tedioso y burocrático. Por lo tanto, se desarrolló e implementó un sistema de generación de hidrógeno para tener un suministro continuo para las pruebas y funcionamiento correcto del sistema. En la figura 5.5 se muestra el sistema de generación de gas GENERH2.



Figura 5.5 Sistema portátil generador de gas GENERH2.

El sistema de generación de gas hidrógeno está basado en la separación de gases por medio de electrolisis, la cual consiste en aplicar un potencial eléctrico a una serie de placas de acero inoxidable sumergidas en agua, donde una cara de las placas hace la separación de oxígeno y la otra de hidrógeno. La figura 5.6 muestra la construcción y armado de las placas del electrolizador.



Figura 5.6 Construcción y armado del electrolizador.

---

En la figura 5.7 se muestra el electrolizador armado y su funcionamiento en el sistema de generación de hidrógeno GENERH2 el cual hace uso energía proveniente de baterías solares o de una fuente de alimentación externa principalmente.

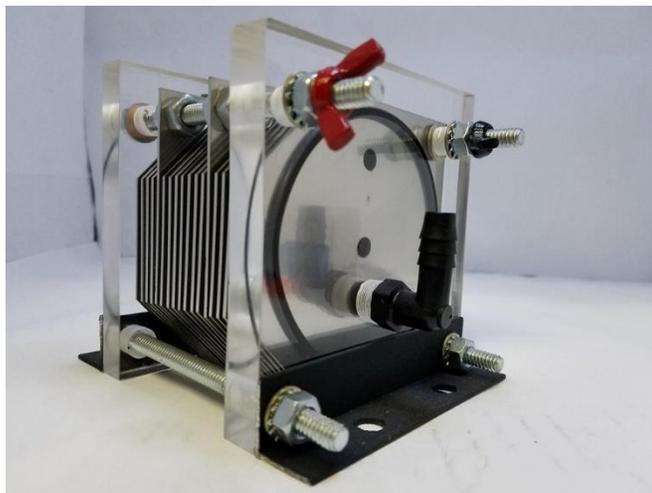


Figura 5.7 Electrolizador 12 V @ 5 A.

En la figura 5.8 se muestra el sistema completo GENERH2 el cual consiste en la interconexión de distintos elementos y dispositivos con la finalidad de producir gas y energía eléctrica a través del agua y la descomposición de esta con energías renovables.



Figura 5.8 Sistema GENERH2 con energía solar.

---

Debido a que la celda de combustible será la fuente principal de generación de energía, en caso de que el suministro de gas falle, existe un sistema de respaldo que contiene energía en espera de su utilización en caso que el sistema principal se vea imposibilitado al entregar la energía [47]. La figura 5.8 muestra un supercapacitor de 350F @ 2.7 V utilizado en el sistema de respaldo de energía el cual se muestra en la figura 5.9 de la marca Maxwell technologies.



Figura 5.9 Supercapacitor Maxwell technologies para el sistema de respaldo.



Figura 5.10 Banco SC Maxwell technologies para el sistema de respaldo.

En la figura 5.11 se muestra la curva de carga de un supercapacitor 350 F los cuales están integrados en el banco de supercapacitores para el sistema de respaldo de energía. Posteriormente, se hicieron pruebas de carga y descarga del supercapacitor para la caracterización de funcionamiento como se indica en la figura 5.12.

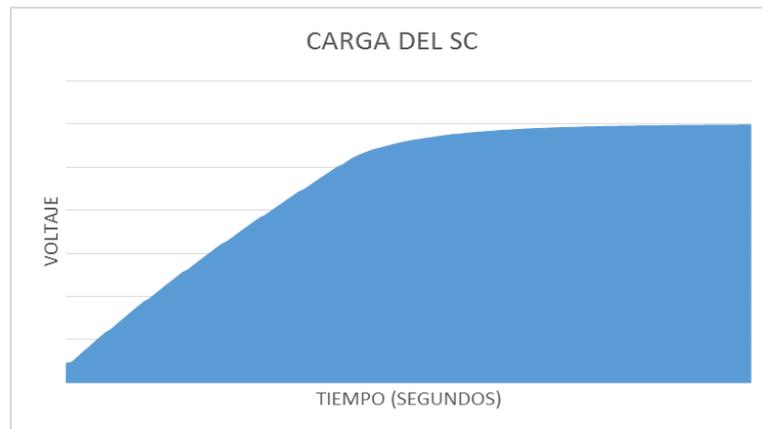


Figura 5.11 Carga del Supercapacitor.



Figura 5.12 Pruebas de carga y descarga del supercapacitor Maxwell.

En la figura 5.13 se muestra la caracterización del banco de supercapacitores considerando el tiempo de carga y el aumento de voltaje progresivamente hasta llegar al voltaje deseado de 12 V. La figura mencionada indica el tiempo de carga en segundos del supercapacitor. Bajo las siguientes condiciones: 12 volts @8 amperes.

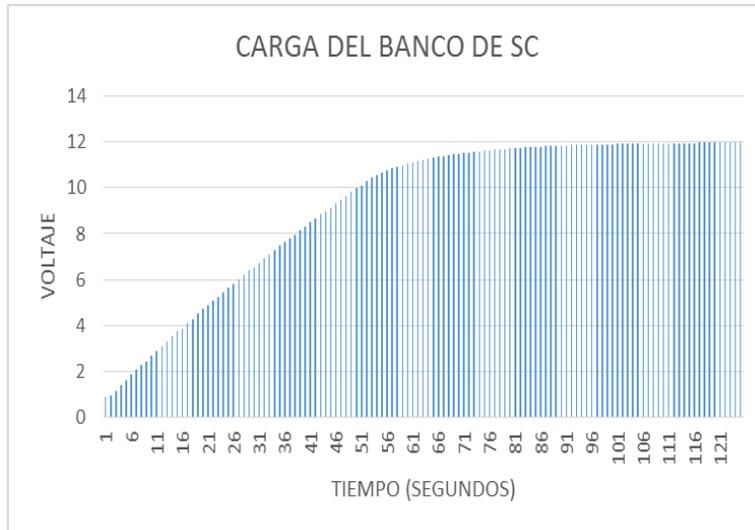


Figura 5.13 Pruebas de carga y descarga del banco de SC.

Cabe mencionar que las muestras se realizaron por medio de un *data logger* a través del puerto RS232 con una interfaz gráfica proporcionada por la marca G-Unit ®. En la figura 5.14 se observa la interfaz recibiendo las muestras de carga del banco SC en voltaje como corriente para posteriormente graficarlas.

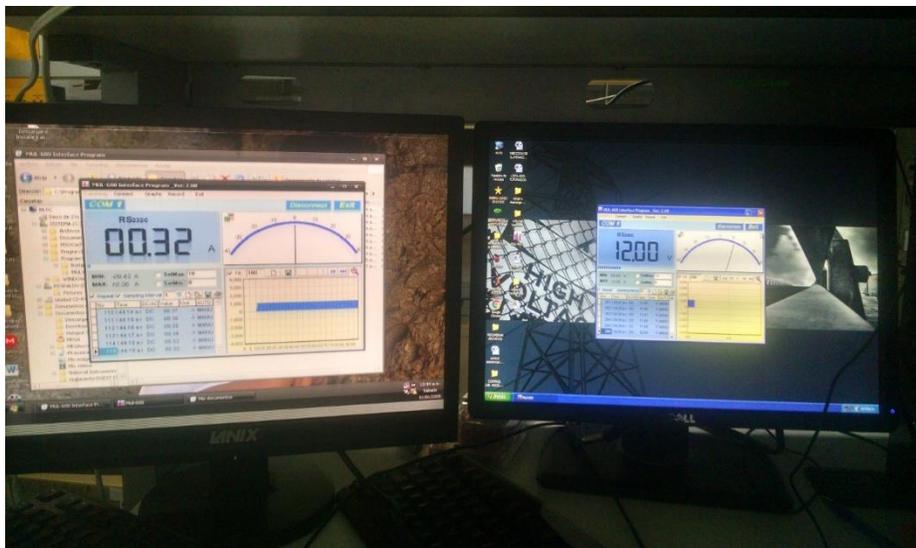


Figura 5.14 Data logger del banco de SC.

---

Con los datos obtenidos se graficó la curva de carga de voltaje y corriente con respecto del tiempo como resultado la curva de carga V-I del banco de SC como se aprecia en la figura 5.15 cabe mencionar que los datos obtenidos se realizaron con una carga máxima de 200 W.

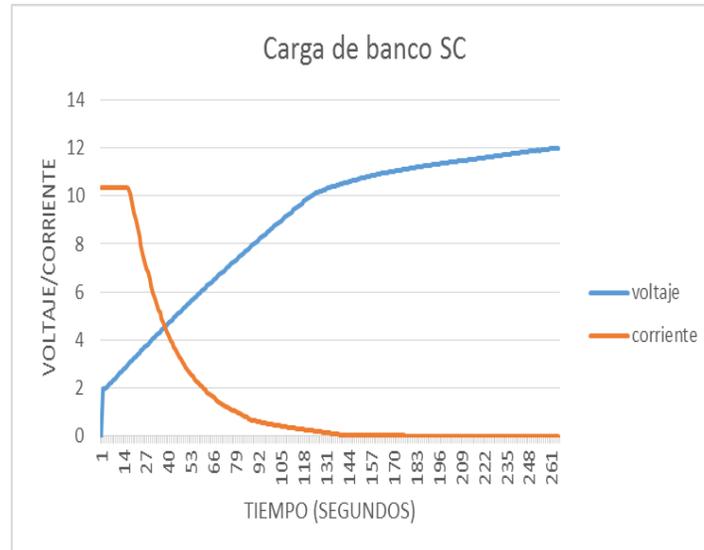


Figura 5.15 Pruebas de carga y descarga del banco de SC @ 200 W.

Se realizaron pruebas de descarga del banco SC, estas pruebas se hicieron para saber el comportamiento del banco ante cargas resistivas. En la figura 5.16 se muestran los módulos utilizados para las cargas resistivas con valores de 20 W, 50 W y 100 W respectivamente.



Figura 5.16 Pruebas con cargas resistivas.

---

Con estas 3 cargas resistivas se pudieron hacer las siguientes combinaciones para obtener valores de cargas (20 W, 50 W, 70 W, 100 W, 120 W, 150 W y 200 W) con un rango desde 20 a 200 W. En la figura 5.17 y 5.18 se muestra la gráfica de descarga del banco de SC @ 20 W y @50 W.

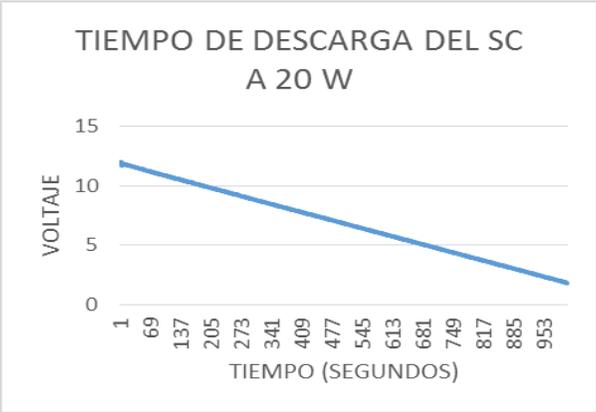


Figura 5.17 Gráfica de tiempo de descarga del banco de SC @ 20 W.

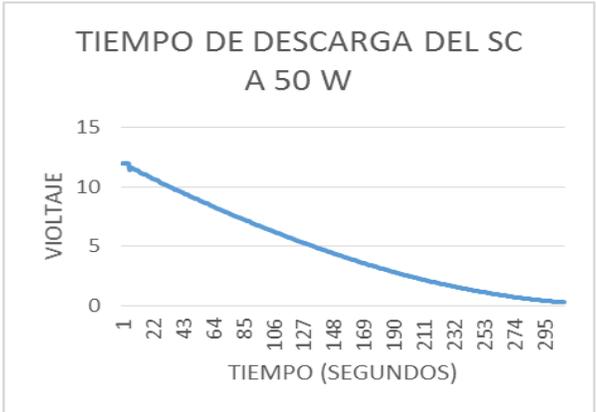


Figura 5.18 Gráfica de tiempo de descarga del banco de SC @ 50 W.

---

Como se mencionó anteriormente, los módulos de 20 W y 50 W, se sumaron para formar cargas resistivas de 70 W como se muestra en la figura 5.19 y los módulos de 50 W respectivamente formaron las cargas resistivas de 100 W como se aprecia en la figura 5.20.

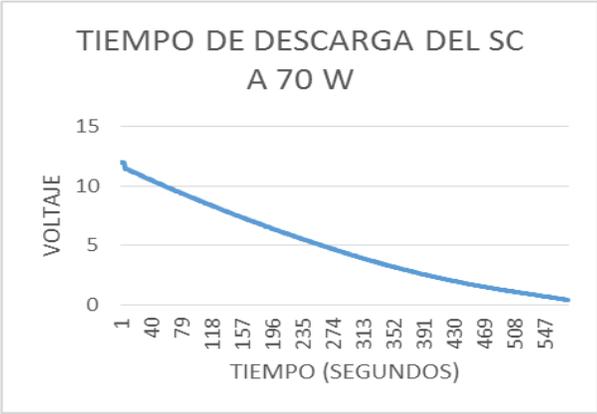


Figura 5.19 Gráfica de tiempo de descarga del banco de SC @ 70 W.

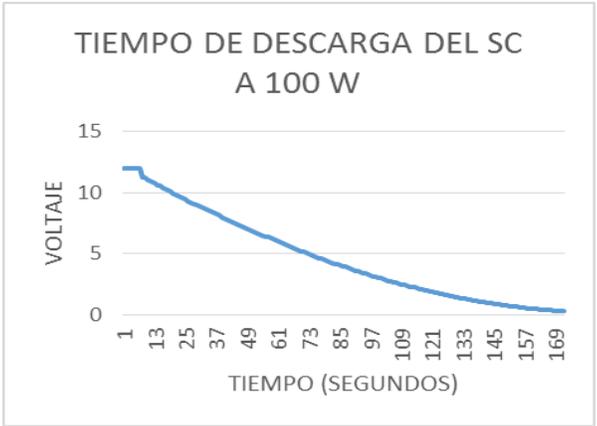


Figura 5.20 Gráfica de tiempo de descarga del banco de SC @ 100 W.

---

Por otro lado, también se realizaron pruebas de descarga con el SC en constante suministro de energía proveniente de la FC 12 V @ 8 A, como se muestra en la figura 5.21 y 5.22 se observa que con cargas pequeñas 20 W y 50 W respectivamente no existen considerables caídas de tensión, cabe destacar que ante cargas resistivas pequeñas el voltaje del SC no tiene problemas y se mantiene en 12 volts.

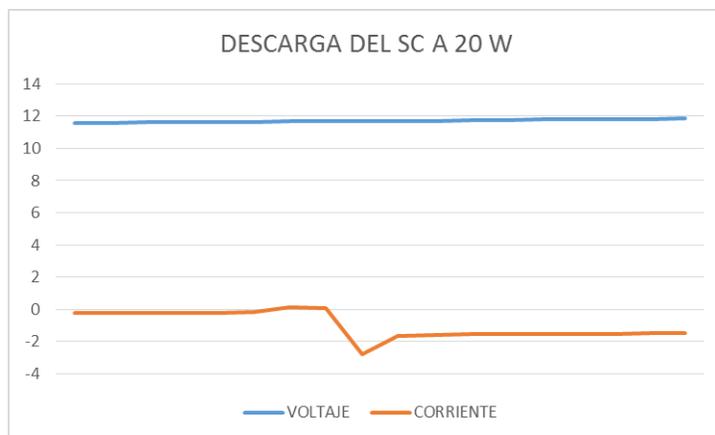


Figura 5.21 Gráfica de caída de tensión en el SC @ 20 W.

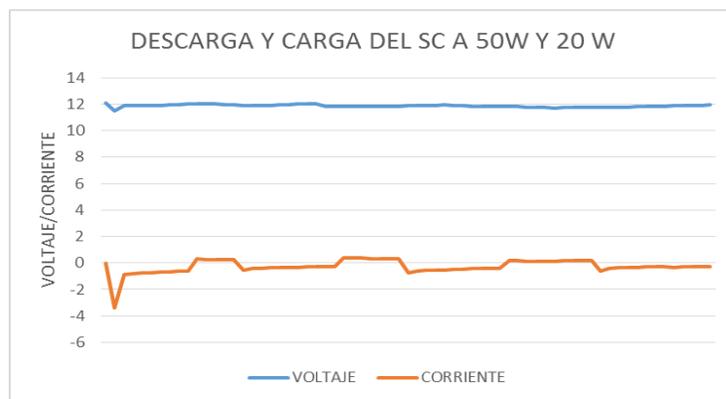


Figura 5.22 Gráfica de caída de tensión en el SC @ 50 y 20 W.

---

Basándonos en lo anterior, las figuras 5.23 y 5.24 muestran que, al aplicarle cargas resistivas mayores, empieza a haber una caída de tensión en el SC por lo que le toma un tiempo recuperarse y mantener su voltaje, lo que no sucede cuando se tienen cargas pequeñas.

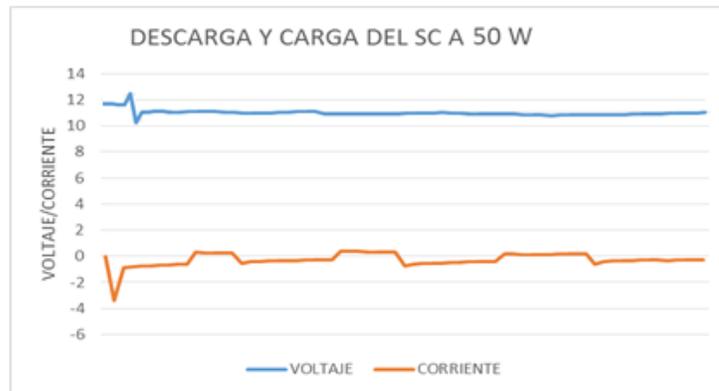


Figura 5.23 Gráfica de caída de tensión en el SC @ 50 W.

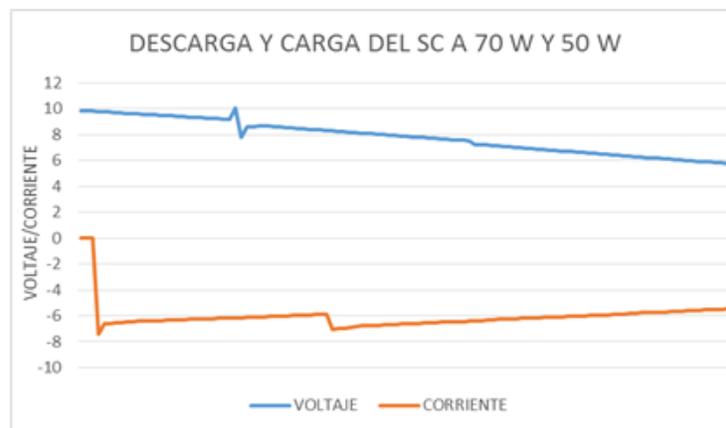


Figura 5.24 Gráfica de caída de tensión en el SC @ 70 y 50 W.

Para el monitoreo y adquisición de datos se diseñó e implemento un medidor de voltaje para cada una de las señales provenientes de  $V_{FC}$ ,  $V_{SC}$  y  $V_0$ . En la figura 5.25 se muestra el diagrama de medición de señales de voltaje.

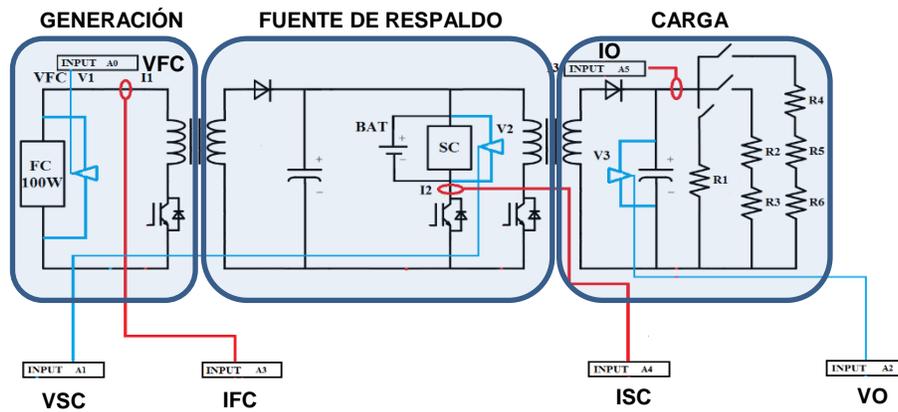


Figura 5.25 Señales de monitoreo y adquisición de datos.

También se diseñó e implemento un medidor de corriente para las señales provenientes de  $I_{FC}$ ,  $I_{SC}$  e  $I_0$  respectivamente. En la figura 5.26 se muestra el medidor de corriente y voltaje y en la figura 5.27 se muestra las lecturas en los módulos display LCD por sus siglas en inglés *Liquid Crystal Display* (display de cristal líquido).

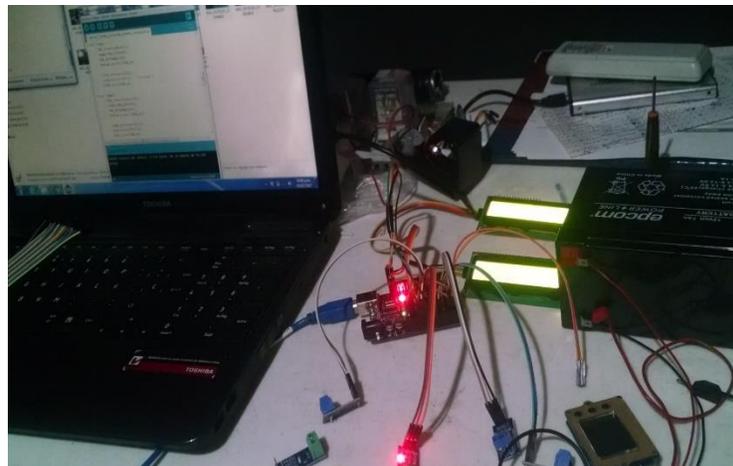


Figura 5.26 Pruebas de las señales del medidor de corriente y voltaje.



Figura 5.27 Lecturas de las señales del medidor de corriente y voltaje.

Para la obtención de señales, fue necesario realizar el sistema de monitoreo y adquisición de datos. El sistema en primera etapa se desarrolló con un microcontrolador Arduino UNO®, los datos obtenidos de corriente y voltaje provenientes de la celda de combustible, supercapacitor y carga de salida se midieron con el sensor de voltaje B25 y el sensor de corriente ACS712. Como se muestra en la figura 5.28 con esas lecturas se pudo calcular la potencia consumida en Watts.

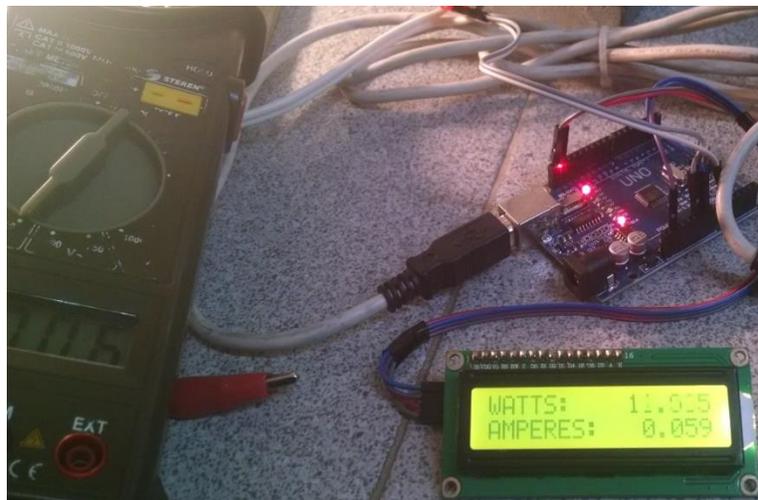


Figura 5.28 Calculo de potencia consumida.

---

Para los cálculos anteriores, se utilizó el sensor de voltaje B25 que se muestra en la figura 5.29 para la medición y la adquisición de datos para el sistema de control. Los sensores de voltaje fueron realizados con arduino obteniendo mediciones mostradas en tiempo real con monitor serial como se muestra en la figura 5.30.

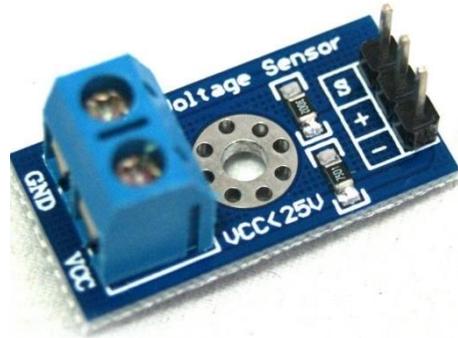


Figura 5.29 Sensor de voltaje B25.

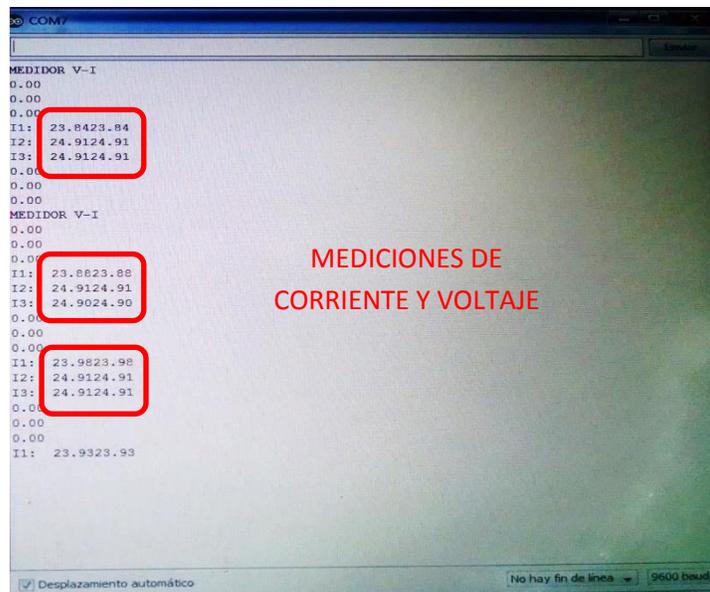


Figura 5.30 Mediciones en tiempo real con monitor serial.

---

---

Las mediciones fueron comparadas con un voltímetro de la marca G-UNIT para verificar los datos mostrados como se muestra en la tabla 5.1

Tabla 5.1 Comparación de mediciones de los sensores de voltaje

Sensor Voltaje	Multímetro
1.010 V	1 V
2.012 V	2 V
4.011 V	4 V
10.015 V	10 V
15.012 V	15 V
20.013 V	20 V
1.010 V	1 V

Para la parte de corriente, se utilizó el sensor corriente ACS712 de efecto hall para el monitoreo y adquisición de datos provenientes del sistema como se aprecia en la figura 5.31. Estos datos al igual que los de voltaje, se compararon con un amperímetro de gancho de la marca FLUKE para verificar los datos mostrados.

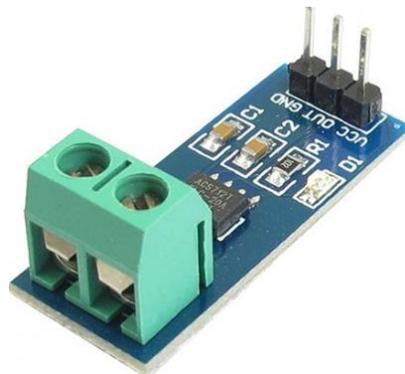


Figura 5.31 Sensor de corriente ACS712.

En la tabla 5.2 se muestran los datos comparados con la medición de los sensores en monitor serial con las mediciones de un amperímetro de gancho, mostrando que las lecturas obtenidas se encuentran dentro del rango esperado.

Tabla 5.2 Comparación de mediciones de los sensores de corriente.

Sensor Corriente	Amperímetro
0.05 A	0.0 A
0.58 A	0.5 A
0.87 A	0.8 A
1.05 A	1.0 A
1.55 A	1.5 A
1.87 A	1.8 A
1.93 A	1.9 A

Se implementó una interfaz gráfica en LABVIEW para monitorear todas las señales provenientes de los sensores (corriente y voltaje) de la FC, del SC y de la CARGA. En la figura 5.32 se muestra la interfaz gráfica diseñada en LABVIEW para visualizar las señales provenientes del sistema.



Figura 5.32 Interfaz gráfica en Labview para monitoreo de señales.

Por lo anterior, fue necesario realizar un sistema de monitoreo y adquisición de datos. En la figura 5.33 se muestra el sistema basado en un microcontrolador Arduino UNO®, el cual a través de los puertos ADC (analógico/digital) procesa las señales y las envía por el puerto serial a la computadora donde son visualizadas y manipuladas con un control de *offset* digital.

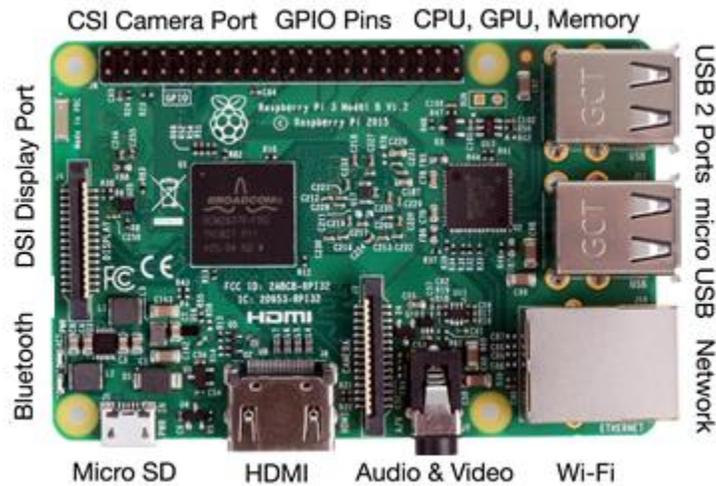


Figura 5.33 Sistema de adquisición de datos por puerto ADC.

Las pruebas de monitoreo y adquisición se cotejaron con una fuente de voltaje para verificar que las mediciones de entrada correspondieran con las visualizadas en la interfaz. En la figura 5.34 se muestra la interfaz en funcionamiento visualizando entrada y salida del sistema.

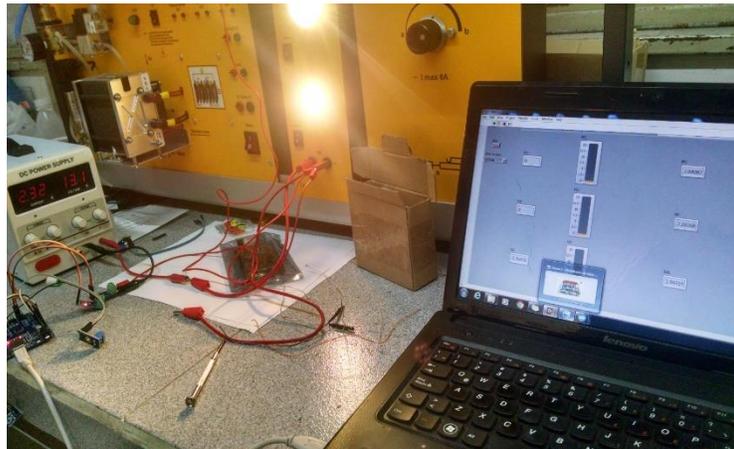


Figura 5.34 Pruebas del sistema de adquisición de datos por puerto ADC.

Para el monitoreo de señales eléctricas insitu se necesita una computadora para tener las lecturas en tiempo real, o *displays* LCD para desplegar la información y señales adquiridas provenientes de los sensores. Con la segunda opción, se limita únicamente a 20 caracteres y 4 renglones, por lo que se pensó en utilizar una tarjeta Raspberry pi 3B como se muestra en la figura 5.35, la cual por sus prestaciones cumple con los requisitos de una computadora, pero en menor espacio, una de las formas de conectarla con los sensores es a través de convertidores A/D.

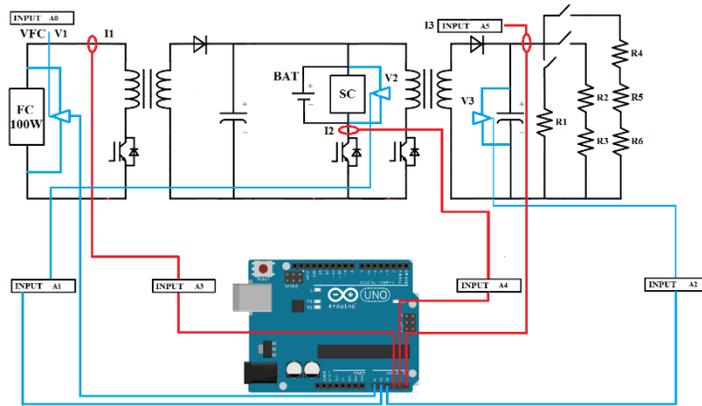


Figura 5.35 Tarjeta Raspberry pi 3B.

Una de las prestaciones más sobresalientes de la tarjeta es conectar pantallas externas por HDMI y por los puertos GPO. En la figura 5.36 se muestra la configuración de los pines del puerto GPO los cuales están configurados para conectar pantallas *touchscreen* o táctiles de 3.5 a 7 pulgadas como se aprecia en la figura 5.37.

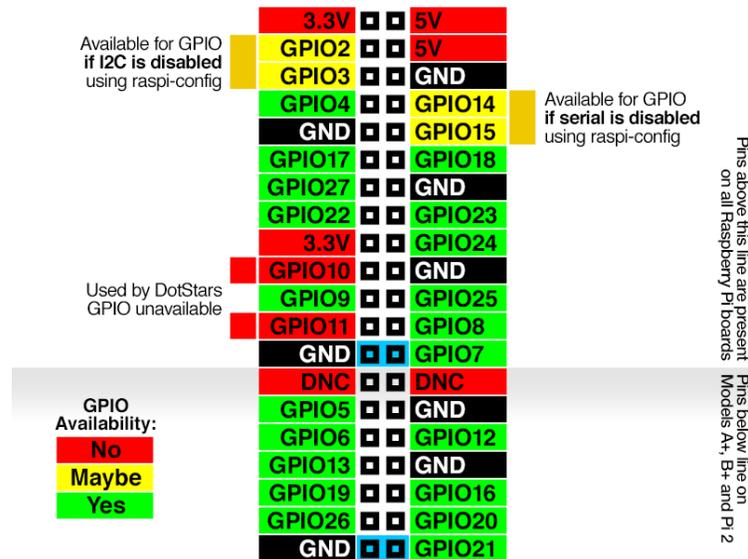


Figura 5.36 Configuración de los pines del puerto GPO.

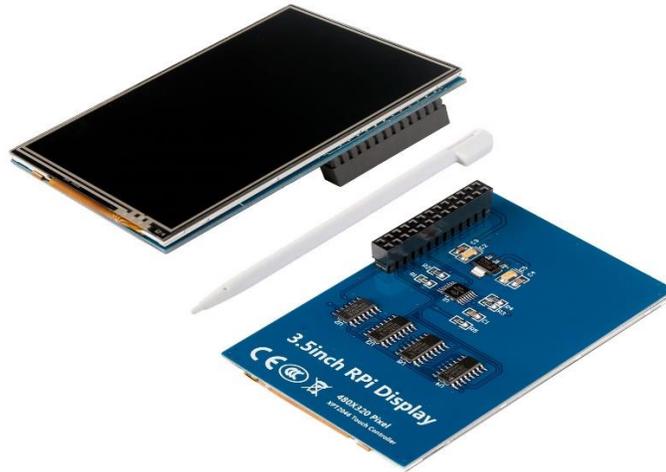


Figura 5.37 Pantalla *touchscreen* 3.5 pulgadas.

El sistema de adquisición de datos con Raspberry pi 3B el cual se monta dentro de un *case* o funda especial para brindarle mayor portabilidad y resistencia. Por lo tanto, ya no es necesario utilizar un CPU de escritorio o laptop como sistema operativo, con esto se reducen recursos, espacio y se vuelve un sistema embebido. En la figura 5.38 se muestra el sistema embebido con Raspberry pi 3B y pantalla *touchscreen* de 3.5 pulgadas.



Figura 5.38 Pantalla *touchscreen* con Raspberry pi 3B.

---

Una vez cargado el sistema operativo en este caso UBUNTU Mate por sus prestaciones de ser un sistema operativo intuitivo para el usuario, además, se desarrolló e implemento una interfaz gráfica en QT Creator, la cual tiene la ventaja de interactuar con la mayoría de los sensores de voltaje y corriente existentes en el mercado. En la figura 5.39 se muestra la caratula principal de la interfaz gráfica para el monitoreo de las señales del sistema.



Figura 5.39 Interfaz de monitoreo del sistema.

Para la obtención de señales provenientes de la FC y salida del sistema se implementó un ADC para el monitoreo y adquisición de datos mostrados en la interfaz gráfica. En la figura 5.40 se muestra la conexión entre los sensores y la tarjeta a través del ADC.

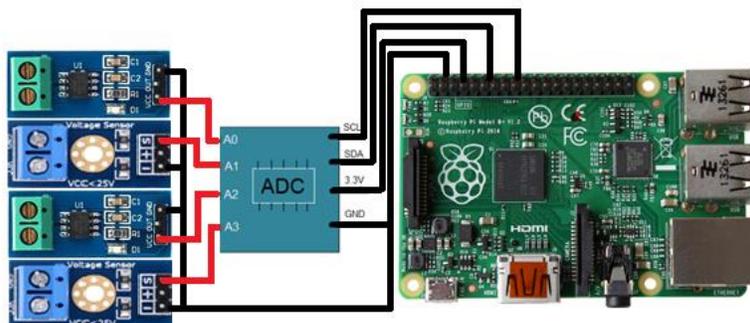


Figura 5.40 Conexión de sensores con ADC.

---

También se desarrolló un control de activación de luminarias led, de forma remota y manual. Cada botón tiene la función de encender una rama de 3 luminarios led y apagarlos respectivamente. En la figura 5.41 se muestra la pestaña de la ventana de activación de luminarios led de forma remota.



Figura 5.41 Interfaz de control de activación de luminarios led.

Para la activación remota de las luminarias led se implementó un circuito con optoacopladores MOC3010 los cuales están encargados de activar una serie de luminarias led al recibir un pulso digital proveniente de la interfaz gráfica. En la figura 5.42 se muestra la conexión para la activación de luminarias led con optoacopladores.

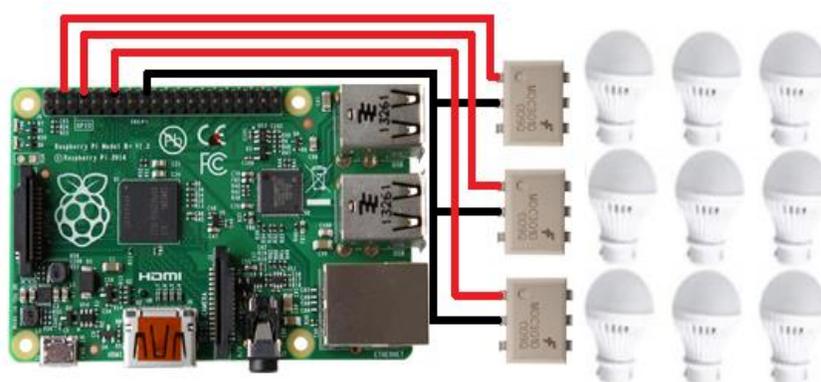


Figura 5.42 Activación de luminarios con optoacopladores.

---

---

### 5.3 Discusión

Se realizaron pruebas al sistema de generación de energía GENERH2 y se puso a prueba el sistema de control de energía propuesto, en el cual, se estudió el comportamiento ante cargas resistivas con valores de 20 W, 50 W, 70 W, 100W, 120 W, 150 W, 170 W y 200 W.

De lo anterior, surge la discusión de qué pasa si el sistema de generación de energía falla, por lo que la existe un sistema de respaldo de energía en caso de falta de energía. Este sistema de respaldo esta propuesto por un banco de supercapacitores, los cuales tienen la ventaja de tener un tiempo de carga muy rápido, y si es necesario una descarga y entrega total de la energía lo que resulta muy ventajoso para aplicaciones donde se requiere de un consumo más grande de energía, pero de acuerdo a las pruebas de laboratorio la descarga y energía entregada van en función del tiempo, por lo que un sistema de respaldo únicamente basado en supercapacitores no es muy conveniente para aplicaciones de mayor potencia.

La ventaja de estos sistemas de respaldo es la energía entregada instantáneamente para disminuir el estrés y vida que las baterías convencionales tienen como limitante. Por lo tanto, es interesante el desarrollo de un sistema de almacenamiento híbrido que posea el tiempo de descarga que una batería convencional ofrece y la rapidez de carga de un supercapacitor, existen nuevas baterías con características especiales y supercapacitores con mayor retención de energía, pero se abre la línea de nuevos y mejores sistemas de almacenamiento que puedan poseer ventajas de ambos sistemas.

El control es una pieza fundamental para desarrollar este tipo de sistemas ideales para el ahorro y uso eficiente de la energía, se abre toda una gama de elementos, equipos y sistemas que están lográndolo, donde el control digital es el principal actor y está teniendo muchos frutos en esta área de estudio.

---

## Capítulo 6: CONCLUSIONES

### 6.1 Conclusiones generales

Por el momento, es importante mencionar que el convertidor Flyback propuesto cumple con la finalidad de acondicionar la energía proveniente de la FC, además de proporcionar protección a la misma. Al mismo tiempo, este sistema de almacenamiento también funciona como una fuente fija en caso que la celda de combustible no sea capaz de suministrar la energía necesaria a la carga. Todo esto es posible en un mismo bus de DC, gracias a que se tiene un segundo Flyback anidado en el sistema, el cual proporciona un segundo aislamiento entre el sistema de respaldo y la carga.

Al momento de arranque, la celda de combustible carga al supercapacitor conectado a la batería a través del *Mosfet*. Bajo condiciones normales el sistema utiliza el mínimo de energía hacia la carga. Sin embargo, cuando la carga cambia repentinamente, el sistema de respaldo de energía no es capaz de responder rápidamente a la demanda el SC entra en operación suministrando ese pico hasta que el sistema se estabilice.

De lo anterior, se sustrae que la propuesta del convertidor y las simulaciones anteriormente abordadas, muestran el interés por diseñar y desarrollar una topología de conversión CD/CD que aporte conocimiento para resolver la problemática actual de estas tecnologías. Donde diversos investigadores han intervenido por muchos años para su desarrollo. Aspectos como dinámica lenta de la celda, voltaje no regulado y aislamiento galvánico siguen siendo área de estudio para mejorar estos sistemas.

El objetivo principal de desarrollar nuevas topologías de conversión de la energía, es la de crear nuevos sistemas de acondicionamiento de energía eficientes, de alta densidad de potencia, bajo costo y con la menor cantidad de componentes posibles para reducir el costo y tamaño.

En cuanto al desempeño de sistemas basados en FC's se han identificado áreas de investigación que tienen como objetivo principal generar recomendaciones y restricciones a la hora de diseñar dichos sistemas.

---

---

Por último, las topologías que utilizan sistemas de respaldo de energía, también tienen sus restricciones que son tomadas en cuenta para mejorar el desempeño de las baterías y ofrecer sistemas de respaldo altamente eficientes. Ideales para sistemas estacionarios residenciales y aislados [27] [28].

El control digital con interfaces graficas con Raspberry ® y QT Creator ® tienen la ventaja de ofrecer un sistema embebido que es flexible y simple con todas las prestaciones de una computadora en la palma de la mano. La programación y la compatibilidad con sensores en el mercado simplifican el proceso de adquisición de datos. Además, el sistema de control es capaz de compensar cambios de carga utilizando la energía almacenada en el sistema de respaldo SC. Por lo tanto, el monitoreo y control con sistemas embebidos facilitan los procesos disminuyendo espacios y costos.

## **TRABAJO FUTURO**

Como futuras aportaciones de este trabajo de tesis se tiene como principal tema optimizar el diseño de la interfaz gráfica para el control y realización de gráficas de señales provenientes de la FC y el SC. Con esto se tendrá una mejor lectura en tiempo real de los parámetros del sistema de control.

Como segundo punto la optimización del diseño y construcción de inductores de menor tamaño para la FC y SC con la finalidad de reducir espacios y costos en el diseño del PCB para la integración de convertidores DC-DC con aislamiento galvánico más pequeños y de mayor capacidad.

Por último, realizar pruebas experimentales con cargas inductivas. Además, de optimizar el sistema de generación de hidrógeno portátil basado en fuentes de energía renovable.

---

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] AIE. Energy Technology Perspectives 2012 – Pathways to a Clean Energy System. Paris (France): siglas en ingles IEA (International Energy Agency), 2012.
- [2] Fernández, Ramón (2006): EL INICIO DEL FIN DE LA ERA DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES. *Peakoil*: mercado versus geopolítica y guerra. Ecologistas en Acción, Madrid.
- [3] BERMEJO, Roberto: “El inminente techo del petróleo y sus consecuencias”.  
[www.euskonews.com](http://www.euskonews.com)
- [4] Roca, J., Fernández, S. (2009). Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de co2: algunos posibles escenarios futuros de emisiones. Departamento de Teoría Económica, Universidad de Barcelona.
- [5] Bermejo, R. (2008): Un futuro sin petróleo. Colapsos y transformaciones socioeconómicas, CIP-Ecosocial y La Catarata
- [6] Brandt, A. R. (2007) “Testing Hubbert”, *Energy Policy*, 35, pp. 3074-3088..
- [7] Brecha, R.J. (2008) “Emission scenarios in the face of fossil-fuel peaking”, *Energy Policy*, 36, pp. 3492-3504.
- [8] British Petroleum (BP) (2007): *Statistical Review of World Energy 2007*
- [9] G-8 (Statement on energy): “Global energy security”. San Petersburg, 2006
- [10] Artículo publicado en el sitio de internet de energía  
[www.energia2012.es](http://www.energia2012.es)
- [11] Estrategia Nacional de Energía 201-2026. Secretaria de Energía (SENER)  
[www.sener.gob.mx](http://www.sener.gob.mx)
- [12] Renewables Global Status Report 2012 (GSR)  
[www.ren21.net](http://www.ren21.net)

- 
- 
- [13] IEA. International Energy Agency. (2012) “World Energy outlook 2012” Demanda de energía, producción, comercio internacional, inversión, emisiones de dióxido de carbón en el mundo desglosado por regiones, países, combustibles y sectores.
- [www.iea.org/books](http://www.iea.org/books)
- [14] Análisis y estadísticas proporcionado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), 2012.
- [www.iie.org.mx](http://www.iie.org.mx)
- [15] Investigación y análisis de la Secretaria de Economía “Diagnostico Sectorial – Mapa de inversión en México 2012”.
- [www.economia.gob.mx](http://www.economia.gob.mx)
- [16] Zhang, Y., Zhang, C., Liu, J., Cheng, Y. (2012).”Comparison of Conventional DC-DC Converter and a Family of Diode-Assisted DC-DC Converter”, 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia June 2-5, Harbin, China.
- [17] Navauga,A, Navamani,D., (2013). “Comparison of high gain topologies of nonisolated dc-dc converters for fuel cell application”,International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE).
- [18] Graditi, G., Colonnese, D., Femia,N.(2010). Efficiency and Reliability Comparison of DCDC Converters for Single Phase Grid Connected Photovoltaic Inverters”, SPEEDAM 2010 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.
- [19] XiaogaoXie, Member, IEEE, Chen Zhao, Member, IEEE, Qiang Lu, Member, IEEE, and Shirong Liu” A Novel Integrated Buck–FlybackNonisolated PFC Converter With High Power Factor”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 60, NO. 12, DECEMBER 2013.
- [20] Qiao, W., Zeng, J., Qu, L. (2012). “A Single-Switch Isolated DC-DC Converter for Photovoltaic Systems”.
- [21] Wang, L., Bazzi, A. (2012). “A dual AC and DC Output Flyback converter”.
- [22] Hong, M, Liangbin Y., Caisheng, W., IssaBatarseh “Analysis of Inductor Current Sharing in Nonisolated and Isolated Multiphase dc–dc Converters”, iee transactions on industrial electronics, vol. 54, no. 6

- 
- 
- [23] Wei,Z. Hyuntae, C., Georgios, K., Mihai, C., Vassilios G. Agelidis. (2007) “Cascaded H-bridge Multilevel Converter for Large-scale PV Grid-Integration with Isolated DC-DC stage”, 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG).
- [24] Nadia, M. L., Takahiro, A., and Hirofumi A. (2011) “Topology and Application of Bidirectional Isolated DC-DC Converters”.8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia May 30-June 3.
- [25] Nakayama, R., Wakao, S. (2011) .operation design of hybrid PV and fuel cell systems with storage battery. IEEE power electronics. Tokyo, Japan.
- [26] Thounthong, P., Luksanasakui, A. Koseeyaporn, P. ,Davat, B. (2012) Intelllignit Model-based control of a standolone photovoltaic/fuel cell power plant with supercapacitor energy storage. IEEE trans. On sustainable energy, vol. 4 no. 1 january 2013.
- [27] Taniguchi, Y., Fujimoto, Y., Hayashi, Y. (2012). Determination of optimal operation plans of fuel cell system in residential house with PV system. IEEE International conference on power and energy.
- [28] Anant, N., Udaykumar,R.Y., Vinayak, K. (2012) Power management of a hybrid PEMFC-PV and ultracapacitor for stand-alone and grid connected applications. International conference on power electronics, drives and energy systems.
- [29] Bayrak, U., Zehra.,Gencoglu, M. T. (2013). Application Areas of fuel cells. International conference on renewable energy research and applications. Madrid, Spain.
- [30] Laarminie, A. D. (2003). *Fuel Cell Systems Explained*, second, Ed. John Wiley & Sons Ltd, Xiii, 9.
- [31] Mori, K. H. D. (2008)“Recent Challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles,” *International Journal of hydrogen energy*, pp. 1-6.
- [32] EG & G Technical Services, Inc. (2004). S. Edition, Ed., U.S. *Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory*. Fuel Cell Handbook.
- [33] Liu, V. T., Hong, J., W. and Tseng, K. C. (2010). “Power converter design for a fuell cell electric vehicle,” in Proc. 5th IEEE Conf. *Industrial Electronics and Applications* (ICIEA), pp. 510-515.
- [34] Hwanga, F., Chang, W.R. (2008). “Development of a small vehicular pem fuel cell system,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 3801-3807, 3.

- 
- 
- [35] Thounthong, P., Sethakul, P., Rael, S and Davat, B. (2009). "Control of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid source of vehicle applications," in Proc. IEEE *Int. Conf. Industrial Technology ICIT 2009*, pp. 1-6.3.
- [36] Samson, G. T., Undeland, T. M, Ulleberg, O. and Vie, P. J. S. (2009). "Optional load sharing strategy in a hybrid power system base donpv/fuel cell/ battery/ supercapacitor," in Proc. *Int Clean Electrical Power Conference*, pp. 141-146.4
- [37] Krykunov, O. (2007). "Comparison of the de/de-converters for fuel cell applications," *International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering*, vol. 1, pp. 71-79, 4.
- [38] Yu, X., Starke, M. R., Tolbert, L. M. and Ozpineci, B. (2007). "Fuel cell power conditioning for electric power applications: a summary," *IET Electric Power Applications*, vol. 1, no. 5, pp. 643-656. 4
- [39] P. Thounthong and P. Sethakul, "Analysis of a fuel starvation phenomenon of a pem fuel cell," in Proc. *Power Conversion conference Nagoya PCC '07*, Apr. 2-5, 2007, pp. 731-738. 4.
- [40] Thounthong, P., Sikkabut, S., Sethakul, P. and Davat, B. (2010). "Control algorithm of renewables energy power plant supplied by fuel cell/ solar cell/ supercapacitor power source," in Proc. *Int. Power Electronics Conf. (IPEC)*, 2010, pp. 1155-1162. 5
- [41] Cano, U. (1999) "Las Celdas de combustible verdades sobre la generación de electricidad limpia y en cierta vía electroquímica". Grupo de electroquímica y corrosión del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).
- [42] Divya, K. C. and Ostergard, J. (2009). "Battery energy storage technology for fuel cell systems". Electric power system Research.
- [43] Joseph, A. and Shahidehpour, M. (2006). Battery energy storage systems. IEEE Power Engineering Society General Meeting.
- [44] William C. M. (2016). Status of fuel cell development in the United States. Materials technology, pp-104-112.
- [45] Fathabadi, H. (2018). Fuel cell hybrid electric vehicle (FCHEV): Novel fuel cell/SC hybrid power generation system. *Energy Conversion and Management*, 156, pp.192-201.
- [46] Gonnet A., Gómez, S., Busada, C., Solsana, I., (2019). Power converter topology for conditioning a fuel cells battery voltaje, pp. 9-14.

- 
- 
- [47] Khani, N., Mirsalim, M., Mastanabadi, A. (2019). Dynamic response improvement of fuel cell using ultra capacitor. 5<sup>th</sup> conference on knowledge based engineering and innovation (KBEI), pp.443-448.
- [48] Eydi, M., Hosseini, H., S., Ghazi, R. (2019). A New High Gain DC-DC Boost Converter with Continuous Input and Output Currents. 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), pp. 1641-1646.
- [49] Rajashekara, K. and Rathore, A. K. (2015). Power conversion and control for fuel cells systems in transportation and stationary. Power Generation Electric Power Components and Systems. 43(12):1376-1387.
- [50] Nie, M., Zhang, L.Y., Jiang, C. Y. (2016). New energy and new power- the prospect of increasing use of polymers in fuel cells. Plastics, Rubber and Composites.
- [51] Navidi, M., Naghshbandi, A. (2014). Parallel input series output DC/DC converter for fuel cell applications. 2014 5th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)
- [52] Benavides, N., Chapman, P. (2008). Mass-Optimal Design Methodology for DC-DC Converters in Low-Power Portable Fuel Cell Applications. IEEE Transactions on Power Electronics, pp. 1545-1555.

# PRODUCTOS ACADÉMICOS

## 1) Artículo en revisión

### Energy Efficiency Structure of DC/DC Converter to be Applied in a Fuel Cell Module with Energy Efficiency --Manuscript Draft--

<b>Manuscript Number:</b>	ENEF-D-17-00323
<b>Full Title:</b>	Structure of DC/DC Converter to be Applied in a Fuel Cell Module with Energy Efficiency
<b>Article Type:</b>	Original Research
<b>Keywords:</b>	Energy efficiency; Fuel Cell; Renewable Energy; Power conditioner
<b>Corresponding Author:</b>	oscar morgado Instituto Tecnológico de Orizaba MEXICO
<b>Corresponding Author Secondary Information:</b>	
<b>Corresponding Author's Institution:</b>	Instituto Tecnológico de Orizaba
<b>Corresponding Author's Secondary Institution:</b>	
<b>First Author:</b>	Oscar Rene Morgado Lievana
<b>First Author Secondary Information:</b>	
<b>Order of Authors:</b>	Oscar Rene Morgado Lievana Juan Carlos Trujillo Caballero Rubén Posada Gómez Albino Martínez Sibaja Miguel Angel López Marfío
<b>Order of Authors Secondary Information:</b>	
<b>Funding Information:</b>	
<b>Abstract:</b>	This research deals with development of a power conditioner with energy efficiency based on fuel cells as a power supply in portable applications, such as stationary illumination systems. The main features of the power conditioner are: wide input voltage, light regulation, fast output voltage regulation and isolation; also, due to slow starting characteristics of the fuel cell, it is necessary to include an extra energy source. The proposed power conditioner accepts two input energy sources: the fuel cells and, in this case, a battery. The document presents the experimental results of a laboratory prototype are presented. The obtained results show excellent performance: light regulation (1.08%), wide input voltage and galvanic isolation. The voltage regulation, even under low input voltage, is getting by the use of the battery as an extra power source. Besides, an acceptable efficiency (80%) was obtained. The efficiency can be improved by using semiconductor devices with better characteristics and optimizing the power transformer design.
<b>Suggested Reviewers:</b>	Edward Vine E O Lawrence Berkeley National Laboratory elvine@lbl.gov  Peter Warren University College London Energy Institute peter.warren.10@ucl.ac.uk  Ray Galvin department of architecture of cambridge rg445@cam.ac.uk

2) Artículo aceptado

**Electrical Engineering**  
**Control Used on Operate a Power Conditioner System for Fuel Cell Supercapacitor**  
 –Manuscript Draft–

<b>Manuscript Number:</b>	
<b>Full Title:</b>	Control Used on Operate a Power Conditioner System for Fuel Cell Supercapacitor
<b>Article Type:</b>	Original Research
<b>Keywords:</b>	DC/DC Converters; Bidirectional converter; hybrid system; Supercapacitor, Fuel Cells and PI controllers.
<b>Corresponding Author:</b>	Edris Poursmaeil ESTIA FRANCE
<b>Corresponding Author Secondary Information:</b>	
<b>Corresponding Author's Institution:</b>	ESTIA
<b>Corresponding Author's Secondary Institution:</b>	
<b>First Author:</b>	Juan Carlos Trujillo Caballero
<b>First Author Secondary Information:</b>	
<b>Order of Authors:</b>	Juan Carlos Trujillo Caballero Jaime Arau Roffiel Miguel A. López Marño Oscar R. Morgado Lievana Edris Poursmaeil lonel Vechiu
<b>Order of Authors Secondary information:</b>	
<b>Funding Information:</b>	
<b>Abstract:</b>	This paper proposes a digital control scheme to operate a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) module of 1.2kW and a Supercapacitor (SC) through DC/DC hybrid converter. A FC has been proposed as a primary source of energy and a SC has been proposed as an auxiliary source of energy. A control scheme for this system is proposed. An experimental validation of the system implemented in the laboratory is provided. Several tests have been performed to verify that the system achieves an excellent output voltage (Vo) regulation and SC Voltage (VSC) control, under disturbances from FC voltage, load voltage and other perturbations described in results analysis.
<b>Suggested Reviewers:</b>	Mousa Marzband, PhD Postdoctoral researcher, University of Manchester mousa.marzband@manchester.ac.uk His expertise in this field  Shamsodin Taheri, PhD Professor, Université du Québec en Outaouais shamsodin.taheri@uqo.ca he is expert in this area  Jafer Adabi, PhD Professor, Babol Noshirvani University of Technology j.adabi@nit.ac.ir he is expert in this field

---

3) Redacción de patente (GENERH2)

**SISTEMA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA Y GAS A PARTIR DE  
RADIACION SOLAR**

5

**CAMPO TECNICO**

La presente invención se refiere a un sistema y método portátil generador de hidrógeno disociando los elementos del agua para uso doméstico en una estufa.

10 Particularmente, esta invención pertenece al campo técnico de las **energías renovables**, específicamente al campo técnico de la **Electroquímica** del agua, (mediante/a través) de la disociación de **hidrógeno y oxígeno**.

15 La invención describe un sistema dual de generación de energía eléctrica e hidrógeno para aplicaciones en pilas de combustible y estufas de hidrógeno, el método está basado en la descomposición del agua mediante electrólisis. La invención también se refiere a un generador de hidrógeno doméstico que usa dicha reacción para quemarla en una estufa.

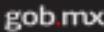
20

**ANTECEDENTES**

25 Se tiene el conocimiento desde hace décadas sobre el proceso llamado electrólisis, el cual, se utiliza para la disociación u obtención de gas hidrogeno a través de la aplicación de electricidad al agua.

30 Ultimamente, el tema de generación de energía a través de fuentes renovables se ha vuelto de vital importancia, principalmente, en zonas donde los recursos son muy limitados o no se cuentan con estos servicios. Sin embargo, las energías renovables aún no pueden ser autosuficientes o están limitadas hasta cierto punto, por lo tanto, estas tecnologías por sí solas solo se consideran complementarias. Pero, si existe

#### 4) Solicitud de patente

																	
<b>Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial</b>																	
<b>Solicitud de Patente de Invención o de Registro de Modelo de Utilidad o de Registro de Diseño Industrial</b>																	
<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">Homoclave del formato</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">BMPi-00-009</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Fecha de publicación del formato en el DOF</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">24 / 05 / 2018</td> </tr> </table>	Homoclave del formato	BMPi-00-009	Fecha de publicación del formato en el DOF	24 / 05 / 2018	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">Folio y Fecha de Recepción</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Para uso exclusivo del IMPI</td> </tr> </table>	Folio y Fecha de Recepción	Para uso exclusivo del IMPI										
Homoclave del formato																	
BMPi-00-009																	
Fecha de publicación del formato en el DOF																	
24 / 05 / 2018																	
Folio y Fecha de Recepción																	
Para uso exclusivo del IMPI																	
<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">Datos generales de la solicitud</td> </tr> <tr> <td> <small>Mencione una o más de las opciones</small>  <input checked="" type="checkbox"/> Solicitud de Patente de Invención  <input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad  <input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique:  <input type="radio"/> Modelo Industrial    <input type="radio"/> Dibujo Industrial         </td> </tr> </table>		Datos generales de la solicitud	<small>Mencione una o más de las opciones</small> <input checked="" type="checkbox"/> Solicitud de Patente de Invención <input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad <input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique: <input type="radio"/> Modelo Industrial <input type="radio"/> Dibujo Industrial														
Datos generales de la solicitud																	
<small>Mencione una o más de las opciones</small> <input checked="" type="checkbox"/> Solicitud de Patente de Invención <input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad <input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique: <input type="radio"/> Modelo Industrial <input type="radio"/> Dibujo Industrial																	
<b>Datos generales del o de los solicitante(s)</b>																	
<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">Personas físicas</td> </tr> <tr> <td>CURP <small>(obligatorio)</small></td> </tr> <tr> <td>Nombre(s)</td> </tr> <tr> <td>Primer apellido</td> </tr> <tr> <td>Segundo apellido</td> </tr> <tr> <td>Nacionalidad</td> </tr> <tr> <td>Teléfono (lada, número, extensión)</td> </tr> <tr> <td>Correo electrónico <small>(obligatorio)</small></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><input type="radio"/> Continúa en anexo</td> </tr> </table>	Personas físicas	CURP <small>(obligatorio)</small>	Nombre(s)	Primer apellido	Segundo apellido	Nacionalidad	Teléfono (lada, número, extensión)	Correo electrónico <small>(obligatorio)</small>	<input type="radio"/> Continúa en anexo	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">Personas morales</td> </tr> <tr> <td>RFC <small>(obligatorio)</small> TNM140723GFA</td> </tr> <tr> <td>Denominación o razón social Secretaría de Educación Pública-Tecnológico Nacional de México</td> </tr> <tr> <td>Nacionalidad Mexicana</td> </tr> <tr> <td>Teléfono (lada, número, extensión) 553601000 Ext. 65064</td> </tr> <tr> <td>Correo electrónico <small>(obligatorio)</small></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><input type="radio"/> Continúa en anexo</td> </tr> </table>	Personas morales	RFC <small>(obligatorio)</small> TNM140723GFA	Denominación o razón social Secretaría de Educación Pública-Tecnológico Nacional de México	Nacionalidad Mexicana	Teléfono (lada, número, extensión) 553601000 Ext. 65064	Correo electrónico <small>(obligatorio)</small>	<input type="radio"/> Continúa en anexo
Personas físicas																	
CURP <small>(obligatorio)</small>																	
Nombre(s)																	
Primer apellido																	
Segundo apellido																	
Nacionalidad																	
Teléfono (lada, número, extensión)																	
Correo electrónico <small>(obligatorio)</small>																	
<input type="radio"/> Continúa en anexo																	
Personas morales																	
RFC <small>(obligatorio)</small> TNM140723GFA																	
Denominación o razón social Secretaría de Educación Pública-Tecnológico Nacional de México																	
Nacionalidad Mexicana																	
Teléfono (lada, número, extensión) 553601000 Ext. 65064																	
Correo electrónico <small>(obligatorio)</small>																	
<input type="radio"/> Continúa en anexo																	
<b>Domicilio del o de los solicitante(s)</b>																	
Código postal 03330																	
Calle Av. Universidad																	
<small>(Opcional, Avenida Insurgentes Sur, Avda. Insurgentes Sur, Avda. Insurgentes Sur, Avda. Insurgentes Sur, Avda. Insurgentes Sur)</small>																	
Número exterior 1200	Número interior 5° Piso																
Colonia Xoco																	
<small>(Opcional, Avda. Insurgentes Sur, Avda. Insurgentes Sur, Avda. Insurgentes Sur, Avda. Insurgentes Sur)</small>																	
Municipio o demarcación territorial Benito Juárez	Localidad Benito Juárez																
Entidad Federativa Ciudad de México	Entre calles <small>(obligatorio)</small>																
País México	Calle posterior <small>(obligatorio)</small>																
<b>Datos generales del o de los inventor(es) o diseñador(es)</b>																	
CURP <small>(obligatorio)</small> MCL0830728H2RVS07																	
Nombre(s) Oscar Bené																	
Primer apellido Morgado																	
Segundo apellido Llaviana																	
Nacionalidad Mexicana																	
Teléfono (lada, número, extensión) 2721006572																	
Correo electrónico <small>(obligatorio)</small> oarencar@hotmail.com																	
<input type="radio"/> Continúa en anexo																	

5) Primer lugar "GENERH2" en el concurso nacional "Bécalos fundación televisa"

**Bécalos**

ASOCIACIÓN DE BANCOS DE MÉXICO

Fundación Televisa

Ciudad de México, 27 de mayo de 2019  
Papalote Museo del Niño

Bécalos otorga el siguiente

**RECONOCIMIENTO**

por haber obtenido el

**1er LUGAR**

en la convocatoria

**"Bécalos en Acción 2019"**

*Emilio Azcárraga Jean*  
Emilio Azcárraga Jean  
Presidente Ejecutivo del Consejo de  
Administración Grupo Televisa

*Luis Niño de Rivera Lájous*  
Luis Niño de Rivera Lájous  
Presidente de la Asociación de  
Bancos de México

**citibanamex** **Santander** **BANORTE** **BBVA Bancomer** **HSBC**

**Banco Azteca** **Scotiabank** **Compartamos Banco** **monex**

**BanCoppel** **MULTIVA** **Actinver** **BARCLAYS** **INTERCAM** **CREDIT SUISSE** **VISA**

**banregio** **MUFG** **Banco Shinhan de México** **Banco KEB Hana México** **Banco S3 México**

**Banparis** **BNB** **Banca Mifel** **INIBANK** **BANKAOL**

6) Premio al proyecto GENERH2 en el concurso nacional “Ideas Hechas en México”

**IDEAS HECHAS EN MÉXICO**

PUNTO MÉXICO CONECTADO | Centro de inclusión digital

Otorga el presente  
**RECONOCIMIENTO AL PROYECTO**  
**GENERH2**

Por haber obtenido el 3er lugar en la categoría Adultos del reto ideas hechas en México 2018.  
Octubre, Ciudad de México.

Ing. Javier Lizárraga Galindo  
Coordinador de la Sociedad de la Información y el Conocimiento

SCT SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

ilab

ROBOTIX. impacta tu mundo

Mx MÉXICO DIGITAL

7) Evento Nacional Estudiantil de Innovación Tecnológica 2018 (ENEIT 2018)



8) Instructor en el V Congreso Nacional de Ingenierías

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**  
COMPROMISO • EVOLUCIÓN • EXCELENCIA • RESPONSABILIDAD • IGUALDAD • AMBIENTE • FAMILIA • DISCIPLINA • ÉTICA • EQUIDAD • RESPETO • CONCIENCIA

 **CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍAS**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA**  
*OTORGA EL PRESENTE*  
**RECONOCIMIENTO**

**A: M.C OSCAR RENE MORGADO LIEVANA**

Por su participación como instructor en el curso

**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE**

con duración de 30 horas, en el marco del

**V CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍAS**

*OCTUBRE 2014 • ORIZABA, VER.*

  
ING. ROSELIO GARCÍA CAMACHO  
DIRECTOR





**“INVOLUCRANDO CONCIENCIA EN EL DESARROLLO TECNOLÓGICO”**  
COMPROMISO • EVOLUCIÓN • EXCELENCIA • RESPONSABILIDAD • IGUALDAD • AMBIENTE • FAMILIA • DISCIPLINA • ÉTICA • EQUIDAD • RESPETO • CONCIENCIA

---

## APÉNDICE A

### A.1 Conexión del sistema GENERH2

La figura A.1 muestra la conexión de los elementos que conforman el sistema GENERH2 en el laboratorio de eléctrica.

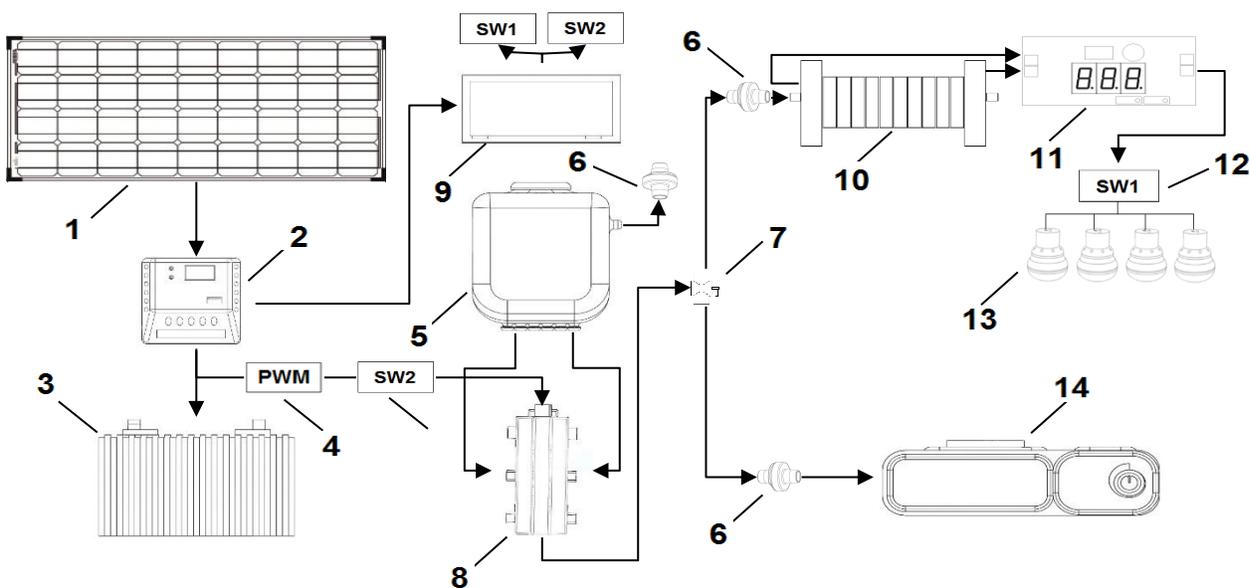


Figura A.1 Conexión de los elementos del sistema GENERH2.

De lo anterior, se despliega una lista en la cual se enumeran los elementos principales del sistema:

1. Módulo Fotovoltaico
2. Regulador solar
3. Batería solar
4. Control PWM
5. Depósito de agua
6. Válvulas antiretorno
7. Válvula de paso
8. Electrolizador
9. Interfaz gráfica raspberry pi 3B
10. Celda de combustible
11. Convertidor dc-dc
12. Opto acopladores (switch)
13. Luminarias led
14. Sistema de quema de gas

---

## APENDICE B

### B.1 Instalación del sistema GENERH2

La figura A.1 muestra la instalación y funcionamiento del sistema GENERH2 en el laboratorio de eléctrica.



Figura B.1 instalación del sistema GENERH2.

A continuación, se muestran las instrucciones de instalación del sistema GENERH2 en el laboratorio de eléctrica.

- Instalar la interfaz gráfica de monitoreo y control en una Raspberry pi 3B.
- Conectar la interfaz con los ADC para la adquisición de señales analógicas.
- Correr la aplicación de monitoreo y control para recibir los datos del sistema.

- 
- Conectar el sistema de monitoreo y control a la FC y el sistema de respaldo.
  - Conectar el depósito de agua al electrolizador.
  - Abrir válvula de llenado del depósito de agua.
  - Mezclar un litro de agua con 100 gramos de sales para potenciar la producción de H<sub>2</sub>
  - Llenar a  $\frac{3}{4}$  de litro el depósito de agua.
  - Verificar el sistema de seguridad anti retorno.
  - Conectar el electrolizador al sistema de seguridad anti retorno.
  - Abrir válvula de paso en dirección a la FC.
  - Conectar válvula anti retorno a la celda de combustible.
  - Regular el circuito PWM a la marca especificada para la producción de hidrógeno.
  - Verificar la producción de energía en el voltímetro.
  - Activar manualmente los luminarios led.
  - Verificar el consumo de energía del sistema en la interfaz gráfica.

---

## APENDICE C

### C.1 Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema GENERH2.

En la figura C.1 se muestra el diagrama de flujo de funcionamiento del sistema GENERH2

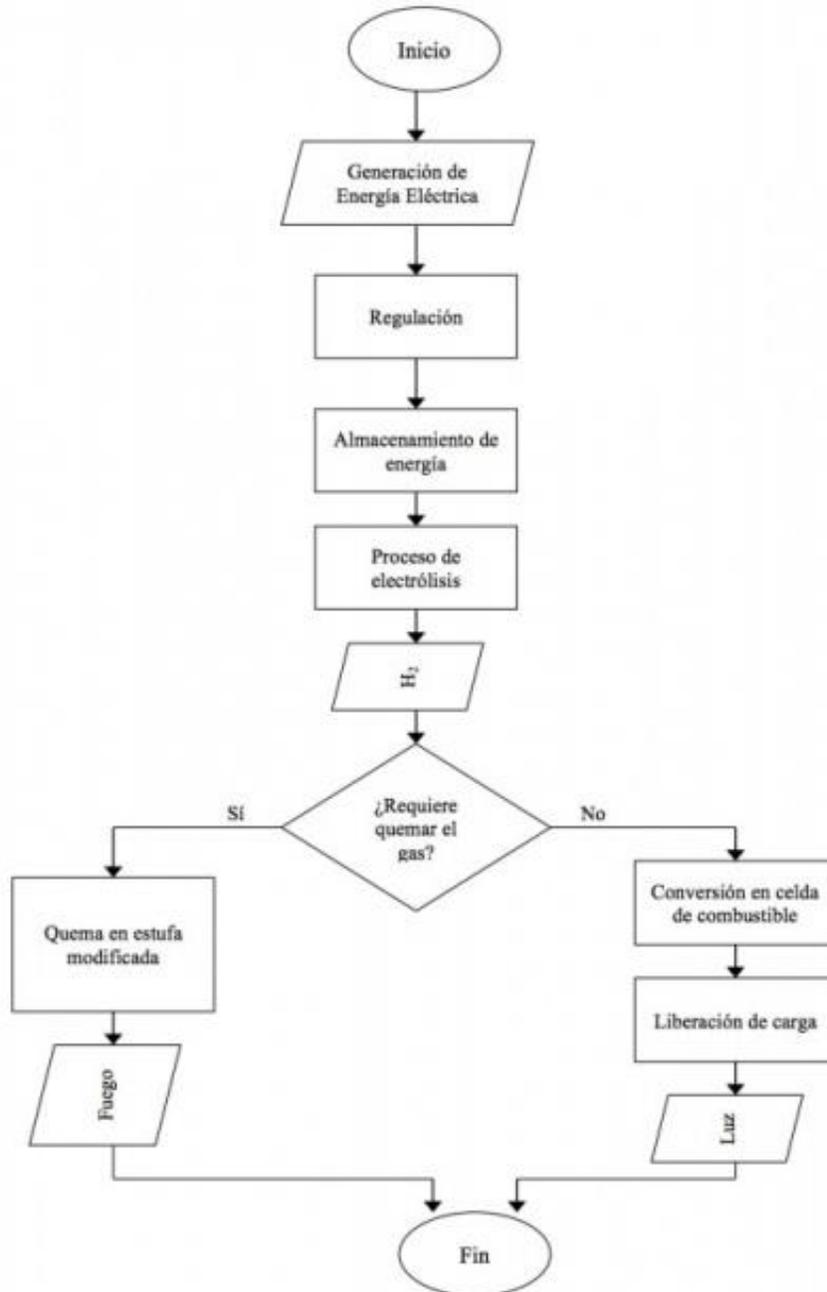


Figura C.1 Diagrama de flujo del sistema GENERH2

---

## APENDICE D

### D.1 Diagrama a bloques del funcionamiento del sistema GENERH2.

En la figura D.1 se muestra el diagrama a bloques del proceso de funcionamiento del sistema GENERH2.

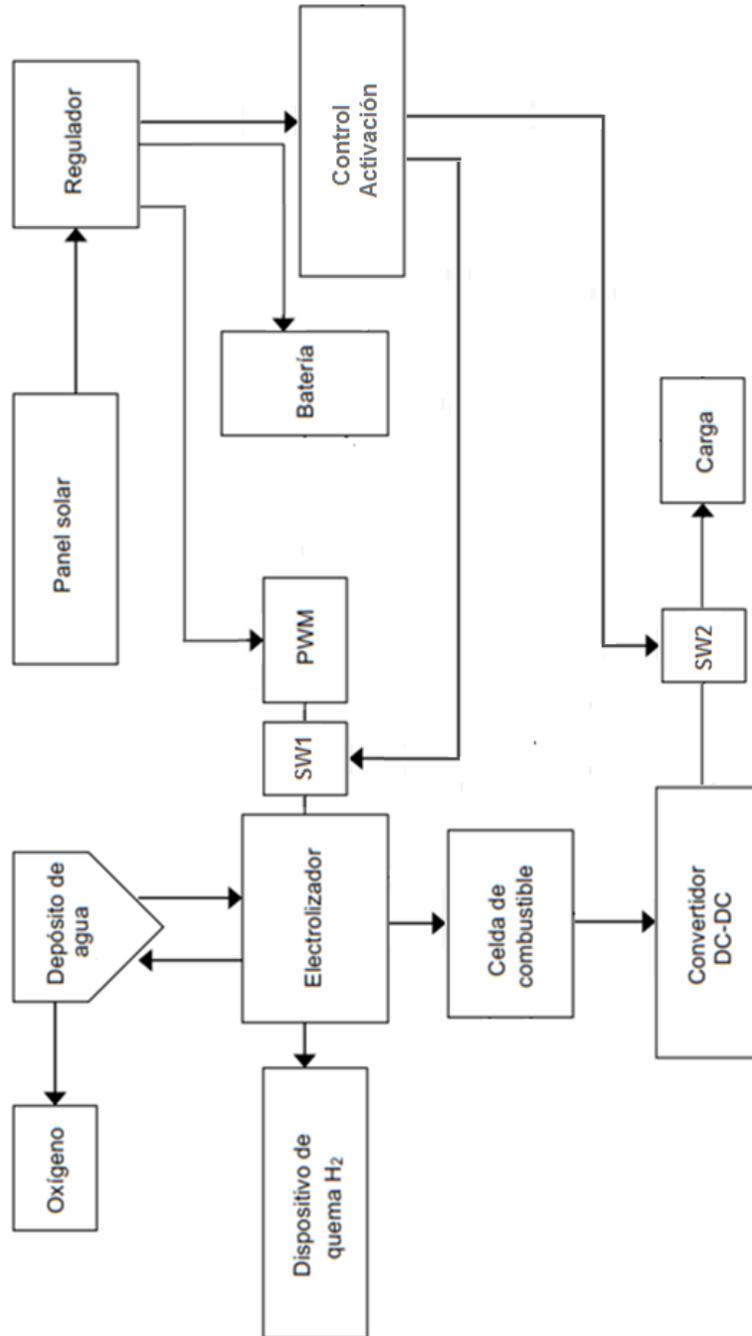


Figura C.1 Diagrama a bloques del sistema GENERH2.

---

---

## APENDICE E

### P.1. programa para el sensor de ppm de hidrógeno.

```
MQ-8 Gas Sensor Module V1.0
#define MQ_PIN (0)
#define RL_VALUE (10)
#define RO_CLEAN_AIR_FACTOR (9.21)
#define CALIBRATION_SAMPLE_TIMES(50)
#define CALIBRATION_SAMPLE_INTERVAL (500)
#define READ_SAMPLE_INTERVAL (50)
#define READ_SAMPLE_TIMES (5)
#define GAS_H2 (0)
#include<Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
/*****Globals*****/
*****/
float H2Curve[3] = {2.3, 0.93,-1.44};
float Ro = 10; //Ro is initialized to 10 kilo ohms
void setup()
{
  // Activamos la retroiluminacion
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Calibrating...\n");
  Ro = MQCalibration(MQ_PIN);

/*****Mostrar en Display*****/
  lcd.begin(16,2);
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Calibrating...");
  delay(6000);
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Calibration done");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Ro=");
  lcd.print(Ro);
  lcd.print("kohm");
  delay(6000);

/*****Mostrar en Display*****/
  Serial.print("Calibration is done...");
  Serial.print("Ro=");
  Serial.print(Ro);
  Serial.print("kohm");
  Serial.print("\n");
```

---

```

    delay(200);
}
void loop()
{
// Reset the display
  lcd.begin(16,2);
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print( "Sensor Hidrogeno");

  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("H2 PPM:");
  lcd.print(MQGetGasPercentage(MQRead(MQ_PIN)/Ro,GAS_H2) );
  delay(5000);

  Serial.print("H2:");
  Serial.print(MQGetGasPercentage(MQRead(MQ_PIN)/Ro,GAS_H2) );
  Serial.print( "ppm" );
  Serial.print("\n");
  delay(200);
}

```

**MQResistanceCalculation**

Input: raw\_adc - raw value read from adc, which represents the voltage  
 Output: the calculated sensor resistance  
 Remarks: The sensor and the load resistor forms a voltage divider. Given the voltage across the load resistor and its resistance, the resistance of the sensor could be derive

```

float MQResistanceCalculation(int raw_adc)
{
  return ( ((float)RL_VALUE*(1023-raw_adc)/raw_adc));
}

```

**MQCalibration**

Input: mq\_pin - analog channel  
 Output: Ro of the sensor  
 Remarks: This function assumes that the sensor is in clean air. It use MQResistanceCalculation to calculates the sensor resistance in clean air and then divides it with RO\_CLEAN\_AIR\_FACTOR. RO\_CLEAN\_AIR\_FACTOR is about 10, which differs slightly between different sensors.

```

float MQCalibration(int mq_pin)
{
  int i;
  float val=0;
  for (i=0;i<CALIBARAION_SAMPLE_TIMES;i++) {
    val += MQResistanceCalculation(analogRead(mq_pin));
    delay(CALIBRATION_SAMPLE_INTERVAL);
  }
  val = val/CALIBARAION_SAMPLE_TIMES;
  val = val/RO_CLEAN_AIR_FACTOR;
}

```

---

---

```

return val;
}
/***** MQRead *****/
Input: mq_pin - analog channel
Output: Rs of the sensor
Remarks: This function use MQResistanceCalculation to caculate the sensor resistenc (Rs).
The Rs changes as the sensor is in the different consentration of the target gas. The sample times
and the time interval between samples could be configured by changing the definition of the
macros. *****/
float MQRead(int mq_pin)
{
int i;
float rs=0;
for (i=0;i<READ_SAMPLE_TIMES;i++) {
rs += MQResistanceCalculation(analogRead(mq_pin));
delay(READ_SAMPLE_INTERVAL);
}

rs = rs/READ_SAMPLE_TIMES;

return rs;
}

/***** MQGetGasPercentage *****/
Input: rs_ro_ratio - Rs divided by Ro gas_id - target gas type
Output: ppm of the target gas
Remarks: This function passes different curves to the MQGetPercentage function which
calculates the ppm (parts per million) of the target gas. *****/
int MQGetGasPercentage(float rs_ro_ratio, int gas_id)
{
if ( gas_id == GAS_H2) {
return MQGetPercentage(rs_ro_ratio,H2Curve);
}
return 0;
}

/***** MQGetPercentage *****/
Input: rs_ro_ratio - Rs divided by Ro pcurve - pointer to the curve of the target gas
Output: ppm of the target gas
Remarks: By using the slope and a point of the line. The x(logarithmic value of ppm) of the line
could be derived if y(rs_ro_ratio) is provided. As it is a logarithmic coordinate, power of 10 is
used to convert the result to non-logarithmic value. * *****/
int MQGetPercentage(float rs_ro_ratio, float *pcurve)
{
return (pow(10,((log(rs_ro_ratio)-pcurve[1])/pcurve[2]) + pcurve[0]]));
}

```

---

---

## P.2. programa para el sensor de ppm de hidrógeno.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd1(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);

LiquidCrystal_I2C lcd2(0x23, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
// Specify the 2nd I2C chip address used for 2nd LCD & its connection pins

int VAL_1;
float VAL_2;
int VAL_3;
float VAL_4;
int VAL_5;
float VAL_6;
void setup()
{

  Serial.begin(9600);
  lcd1.begin(16,2); // initialize the 1st lcd for 16 chars 2 lines, turn on backlight
  lcd2.begin(16,2); // initialize the 2nd lcd for 16 chars 2 lines, turn on backlight

  Serial.println("MEDIDOR V-I");
  delay (3000);
}
void loop()
{
  //=====
  unsigned int x=0;
  float AcsValue1=0.0,Samples1=0.0,AvgAcs1=0.0,AcsValueF1=0.0;
  float AcsValue2=0.0,Samples2=0.0,AvgAcs2=0.0,AcsValueF2=0.0;
  float AcsValue3=0.0,Samples3=0.0,AvgAcs3=0.0,AcsValueF3=0.0;
  //=====
  float temp0;
  VAL_1=analogRead(0);
  temp0=VAL_1/4.092;
  VAL_2=(temp0/10);
  Serial.println(VAL_2);

  lcd1.setCursor(0,0);
  lcd1.print("FC:"); //voltaje 1
  lcd1.print(VAL_2);

  float temp1;
  VAL_3=analogRead(1);
```

---

```

temp1=VAL_3/4.092;
VAL_4=(temp1/10);
Serial.println(VAL_4);

lcd1.setCursor(9,0);
lcd1.print("SC:"); //voltaje 2
lcd1.print(VAL_4);

float temp2;
VAL_5=analogRead(2);
temp2=VAL_5/4.092;
VAL_6=(temp2/10);
Serial.println(VAL_6);

lcd1.setCursor(0,1);
lcd1.print("Vo:");
lcd1.print(VAL_6);

lcd1.setCursor(9,1);
lcd1.print("VSENSOR");

for (int x = 0; x < 150; x++){
  AcsValue1 = analogRead(A3);
  Samples1 = Samples1 + AcsValue1;
  delay (3);
  AcsValue2 = analogRead(A4);
  Samples2 = Samples2 + AcsValue2;
  delay (3);
  AcsValue3 = analogRead(A5);
  Samples3 = Samples3 + AcsValue3;
  delay (3);
}
AvgAcs1=Samples1/150.0;//Taking Average of Samples
AvgAcs2=Samples2/150.0;//Taking Average of Samples
AvgAcs3=Samples3/150.0;//Taking Average of Samples

//((AvgAcs * (5.0 / 1024.0)) is converitng the read voltage in 0-5 volts
//2.5 is offset(I assumed that arduino is working on 5v so the viout at no current comes
//out to be 2.5 which is out offset. If your arduino is working on different voltage than
//you must change the offset according to the input voltage)
//0.100v(100mV) is rise in output voltage when 1A current flows at input
AcsValueF1 = ((AvgAcs1 * (5.0 / 1024.0)) - 2.49)/0.100;
AcsValueF2 = ((AvgAcs2 * (5.0 / 1024.0)) - 2.49)/0.100;
AcsValueF3 = ((AvgAcs3 * (5.0 / 1024.0)) - 2.49)/0.100;

Serial.print("I1: ");
Serial.print(AcsValueF1-0.033);

```

---

---

```
Serial.println(AcsValueF1-0.033);//Print the read current on Serial monitor
lcd2.setCursor(0,0);
lcd2.print("I1:"); //corriente 1
lcd2.print(AcsValueF1-0.033);//0.56 con un sensor
delay(500);
```

```
Serial.print("I2: ");
Serial.print(AcsValueF2-0.033);//Print the read current on Serial monitor
Serial.println(AcsValueF2-0.033);//Print the read current on Serial monitor
lcd2.setCursor(9,0);
lcd2.print("I2:"); //corriente 1
lcd2.print(AcsValueF2-0.033);//0.33 con 2 sensores
delay(50);
```

```
Serial.print("I3: ");
Serial.print(AcsValueF3-0.033);//Print the read current on Serial monitor
Serial.println(AcsValueF3-0.033);//Print the read current on Serial monitor
lcd2.setCursor(0,1);
lcd2.print("I3:"); //corriente 1
lcd2.print(AcsValueF3-0.033);
delay(50);
lcd2.setCursor(9,1);
lcd2.print("ISENSOR"); //corriente 1
delay(50);
}
```