



**Tesis profesional**

**Como Requisito para Obtener el Título de:  
Ingeniero en Electrónica.**

**Que presenta: Jacob Gómez José**

**Con el Tema:**

**“Desarrollo de un sistema de Caracterización Electrica de Celdas  
de Combustible de Alcohol Directo de Baja Potencia”.**

**Mediante Opción I (Tesis Profesional)**

**Asesor externo: DR. Sergio Alverto Gamboa Sánchez.**

**Asesor Interno: MC. Raul Moreno Rincon.**

**Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Septiembre de 2012.**



SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
 DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA  
 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

SECRETARÍA DE  
 EDUCACIÓN PÚBLICA



DIRECCIÓN  
 SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA  
 DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. **21 DE AGOSTO 2012**

OFICIO NUM. DEP-CT-137/2012

**C. JACOB GÓMEZ JOSÉ**

PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
 EGRESADO DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ.  
 P R E S E N T E.

Habiendo recibido la comunicación de su trabajo profesional por parte de los CC. ING. RAÚL MORENO RINCÓN M. en C. ANGEL SEIN PÉREZ RODRÍGUEZ e ING. ÁLVARO HERNÁNDEZ SOL, en el sentido que se encuentra satisfactorio el contenido del mismo como prueba escrita, **AUTORIZO** a Usted a que se proceda a la impresión del mencionado Trabajo denominado:

**"DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ALCOHOL DIRECTO DE BAJA POTENCIA"**

Registrado mediante la opción:  
**I (TESIS PROFESIONAL)**

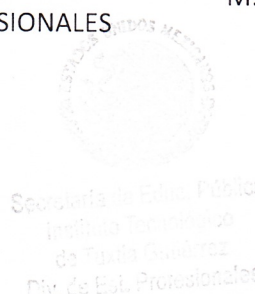
**ATENTAMENTE**  
**"CIENCIA Y TECNOLOGÍA CON SENTIDO HUMANO"**

ING. ROBERTO CIFUENTES VILLAFUERTE  
 JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

Vo. Bo.

M. en C. JOSÉ LUIS MÉNDEZ NAVARRO  
 DIRECTOR

C.c.p.- Departamento de Servicios Escolares  
 C.c.p.- Expediente  
 I'JLMN/I'RCV/L'ORC



Carretera Panamericana Km.1080, . C.P. 29050, Apartado Postal 599  
 Teléfonos: (961) 61 5-03-80 (961) 61 5-04-61 Fax: (961) 61 5-16-87  
<http://www.ittg.edu.mx>



Alcance del Sistema: Proceso Educativo

---

# Contenido

---

<b>Contenido</b>	<b>i</b>
<b>Resumen</b>	<b>iv</b>
<b>Introducción</b>	<b>v</b>
<b>1. Celdas de Combustible</b>	<b>1</b>
1.1. Historia de las Celdas de Combustible . . . . .	1
1.2. Introducción de las Celdas de Combustible . . . . .	3
1.3. Funcionamiento de las Celdas de Combustible de Hidrógeno . . . . .	4
1.3.1. Electrocatalisis . . . . .	4
1.3.2. Reacciones Químicas y Electroquímicas . . . . .	4
1.4. Tipos de Celdas de Combustible . . . . .	9
1.4.1. Alcalinas (Alkaline Fuel Cell o AFC) . . . . .	9
1.4.2. Ácido fosfórico ((Phosphoric Acid Fuel Cell o PAFC) . . . . .	10
1.4.3. Carbonato Fundido (Molten Carbonate Fuel Cell o MCFC) . . . . .	11
1.4.4. Óxido Sólido (Solid Oxide Fuel Cell o SOFC) . . . . .	12
1.4.5. Polímero Sólido ó Membrana de Intercambio Protónico (PEM) . . . . .	13
1.4.6. Otras Celdas de Combustible . . . . .	15
1.5. Aplicaciones de las Celdas de Combustible . . . . .	16
1.5.1. Fuentes Estacionarias con Celdas de Combustible . . . . .	16
1.5.2. Fuentes Móviles con Celdas de Combustible . . . . .	18
1.5.3. Importancia de la Electrónica en las Tecnologías de Celdas de Combustible . . . . .	22
<b>2. Variables de Medición de las Celdas de Combustibles</b>	<b>26</b>
2.1. Comportamiento eléctrico de las celdas . . . . .	26

2.2. Corriente de una celda . . . . .	27
2.3. Potencia disipada de la celda . . . . .	28
2.4. Polarización de activación ( $\eta_{act}$ ) . . . . .	29
2.5. Polarización Óhmica ( $\eta_{ohm}$ ) . . . . .	30
2.6. Polarización de concentración ( $\eta_{conc}$ ) . . . . .	30
2.7. Suma de la polarización en el electrodo . . . . .	31
2.8. Voltaje en la celda . . . . .	32
2.9. Variables de rendimiento en las celdas de combustible . . . . .	32
2.10. Determinación del rendimiento . . . . .	33
<b>3. Marco Teórico del Proyecto</b>	<b>35</b>
3.1. Comunicación Universal Serial Bus . . . . .	35
3.1.1. Generalidades . . . . .	35
3.1.2. Transferencia . . . . .	38
3.1.3. Enumeración . . . . .	39
3.1.4. Descriptores . . . . .	39
3.1.5. Funcionamiento . . . . .	40
3.1.6. Interfaz física . . . . .	41
3.2. Microcontrolador Microchip Pic18f4550 . . . . .	43
3.2.1. Características . . . . .	43
3.2.2. Organización de la memoria . . . . .	45
3.2.3. Convertidor Analógico-Digital . . . . .	48
3.3. Amplificador de Instrumentación INA131B . . . . .	51
3.3.1. Descripción . . . . .	51
3.3.2. Ajuste de ganancia . . . . .	51
3.4. Amplificadores monolíticos del termopar con compensación de unión fría AD594 . . . . .	53
3.4.1. Descripción . . . . .	53
3.4.2. Interpretación del AD594 en el Voltaje de Salida . . . . .	56
3.5. Transistor de potencia MJ15022 . . . . .	57
3.5.1. Características . . . . .	57
<b>4. Metodología del Diseño</b>	<b>58</b>
4.1. Desarrollo de comunicación . . . . .	58
4.1.1. Desarrollo de la arquitectura de la TAC (Tarjeta de Ad- quisición de Datos) . . . . .	59
4.2. Diseño de Control de Carga . . . . .	62
4.2.1. Sistemas Tradicionales . . . . .	62
4.3. Esquema del Sistema de Carga . . . . .	63
4.4. Análisis del Sistema de Control de Carga . . . . .	64
4.5. Control en Lazo Cerrado . . . . .	66

---

4.5.1. Función de Transferencia: Transformada de Laplace . . . . .	71
4.5.2. Cálculo del Sistema de Control de Carga . . . . .	74
4.5.3. Análisis de circuito . . . . .	79
4.6. Sistema de Medición de Voltaje . . . . .	80
4.7. Sistema de Medición de Temperatura . . . . .	82
4.8. Panel de Control en National Instrument Labview . . . . .	82
4.8.1. Desarrollo de Control para la Transferencia de Datos . . . . .	83
4.8.2. Desarrollo de Control de Corriente . . . . .	84
4.8.3. Desarrollo de Control de Voltaje . . . . .	84
4.8.4. Desarrollo de Control de Temperatura . . . . .	84
4.8.5. Desarrollo de Control de Carga . . . . .	85
4.8.6. Desarrollo de Gráfica V-I y T-V,I . . . . .	85
4.8.7. Desarrollo de la Base de Datos . . . . .	85
4.8.8. Portada del Panel de Control . . . . .	86
<b>5. Resultados</b>	<b>99</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>107</b>
<b>A. Programación del Microcontrolador</b>	<b>109</b>
<b>B. Puerto USB en LabView</b>	<b>119</b>
B.1. Aplicación de las bibliotecas de Microchip . . . . .	119
B.1.1. Notas Importantes . . . . .	120
B.1.2. Notas sobre Vendor ID (VID) y el ID de producto (PID) . . . . .	120
B.1.3. Driver USB . . . . .	120
B.1.4. MPUSBAPI: Biblioteca y Librería DLL . . . . .	121
B.2. Programación del VI_USB en LabView . . . . .	122
<b>Bibliografía</b>	<b>134</b>

# Resumen

---

En la presente tesis se construyó un sistema eléctrico-electrónico de caracterización funcional de celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM por sus siglas en inglés) de baja potencia (15 Watts) y Microceldas (Miliamperes) , con visualización y creación de una base de datos virtual en National Instrument LabView. Las principales variables a medir del funcionamiento de las celdas son: Voltaje, Corriente, Temperatura y suministro de Flujo. A partir de los parámetros medidos se puede determinar la eficiencia eléctrica de las celdas de combustibles, además, una comparación sistematizada con respecto al funcionamiento electroquímico de las mismas. La tesis constituye distributivamente de seis capítulos: Celdas de Combustible, Variables de Medición, Marco teórico, Diseño, Resultados y Conclusiones. El primer Capítulo resume los estudios que ha desarrollado la ciencia para el mejoramiento de las Celdas de Combustible: La Historia, El Funcionamiento Electroquímico y sus Reacciones, Tipos de Celdas de Combustible, Aplicaciones y, Relación con las nuevas Tecnologías y la Electrónica. El Capítulo dos expone las Variables a Medir- del proyecto- de las Celdas de Combustible: Comportamiento Eléctrico de la Celda, Corriente, Voltaje, Potencia y Rendimiento. En el Capítulo siguiente se menciona todo lo relacionado a los dispositivos utilizados para el proyecto: Puerto *USB*, Microcontrolador, Amplificadores de Instrumentación y Transistores. En el Capítulo cuarto se desarrolló la Metodología del Diseño: Desarrollo de Comunicación, Diseño de Control de Carga y su Análisis Matemático, Diseño de Medición de Voltaje, Medición de Temperatura y Panel de Control Virtual en *LABVIEW*. Los Resultados Experimentales son expuestos en el penúltimo Capítulo y las Conclusiones en el capítulo sexto. En el Apéndice A se explica la programación del Microcontrolador mientras que en el Apéndice B el desarrollo del puerto *USB* en *LABVIEW*.

# Introducción

---

Desde los años 60's y, sobre todo, desde los *shocks* petroleros y sus impactos en aspectos centrales del funcionamiento de las economías, se han acumulado conceptos, métodos, análisis y resultados que han configurado progresivamente el cuerpo de la Economía de la Energía [1].

En el sistema eléctrico nacional Mexicano se produce energía básicamente con combustibles fósiles; petróleo, gas, carbón (fuentes de energías no renovables). Otra de ellas son las central hidroeléctrica aprovechando la energía potencial que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel, también conocido como salto geodésico. El agua en su caída entre dos niveles del cauce se hace pasar por una turbina hidráulica la cual transmite la energía a un generador donde se transforma en energía eléctrica. También están las centrales Eoloeléctricas que están constituidos por aeromotores que aprovechan la energía Eólica para generar energía eléctrica [2].

El petróleo, es una mezcla de una gran variedad de hidrocarburos (compuestos de carbono e hidrógeno) en fase líquida, mezclados con variedad de impurezas. Por destilación y otros procesos, se obtienen los diversos compuestos que se utilizan en algunas centrales para generar energía eléctrica. En el ámbito mundial ya no es un recurso abundante. El ahorro de energía tiene un impacto económico primordial no solo en industrias, también federal y social, produciendo al mismo tiempo beneficios adicionales; disminución o eliminación del daño al medio ambiente [3].

---

Los precios del petróleo se incrementan al ritmo de la complejidad que implica descubrir nuevos yacimientos petroleros. Las exploraciones cada vez son más costosas y requieren de tecnologías de punta. Aunado a ello, el consumo global se eleva y la dependencia de la energía fósil es cada vez mayor. Se requiere un nuevo orden energético para diversificar las fuentes energéticas, aunque para ello es inevitable impulsar a la ciencia con mayor inversión, si se considera que en las últimas décadas ha promediado apenas unos 10 mil millones de dólares. El Consejo Europeo de Energías Renovables destaca en el informe *“Revolución Energética, Perspectiva Mundial de la Energía Renovable”*, que para el 2050 las energías renovables, junto con el uso inteligente de la energía, podrían llegar a contribuir con la mitad de la demanda energética del mundo. Por ello, la política energética actual requiere potencializar la eficiencia energética, que tiene por objeto optimizar el consumo de energía a través de la implementación de diversas medidas e inversiones a nivel tecnológico, de gestión y de hábitos culturales en la comunidad. Además, un nuevo orden energético debe contener grandes dosis de sustentabilidad para mitigar los impactos negativos de la contaminación, mediante las acciones de gobierno encaminadas a la procreación de la infraestructura inteligente, con visión ambiental, sin menoscabo del crecimiento económico [4].

Las energías alternativas son aquellas que sustituyen la obtención de las energías convencionales, las cuales se estipulan como las energías renovables, se pueden dividir en dos grandes subgrupos las no contaminantes y las contaminantes. La primera de ellas provenientes directamente del medio natural: Energía Eólica, Energía Geotérmica, Energía Mareomotriz, Energía Solar, Energía Undimotriz, Potencia Osmótica; la segunda se obtienen a partir de la materia orgánica o biomasa, en esta se están desarrollando tecnologías que constituyen primordialmente al hidrógeno como generador de energía. El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo. Puede producirse a partir de la electrólisis del agua con energía eléctrica, o de la biomasa por descomposición térmica o biológica, o bien de los propios combustibles fósiles como el gas, el petróleo o el carbón. En la actualidad el mayor porcentaje de la obtención del hidrógeno se realiza a partir de gas natural, no obstante puede producirse a partir de una amplia variedad de fuentes de energías primarias (energías limpias o no contaminantes). El sistema del cual se transforma la energía química directamente en energía eléctrica son las nuevas tecnologías de Celdas de Combustible a partir de Hidrógeno. Estas Celdas a diferencia de las baterías convencionales no requieren recargas y son inagotables, mientras se le provea Combustible (hidrógeno y oxígeno). En la práctica la vida útil depende del medio dado que es directamente proporcional a la corrosión y degradación del material. La principal ventaja de las utilidades de dichas Celdas es que constituyen un proceso cíclico limpio [5].



---

Existen varias formas de clasificar los tipos de Celdas de Combustible: las más conocidas son por el tipo de electrolito que utilizan, de ahí sus denominaciones: [6]

1. Alcalinas (*Alkaline Fuel Cell* o AFC).
2. Ácido Fosfórico (*Phosphoric Acid Fuel Cell* o PAFC).
3. Carbonatos Fundidos (*Molten Carbonate Fuel Cell* o MCFC).
4. Óxidos Sólidos (*Solid Oxide Fuel Cell* o SOFC).
5. Membrana Electrolítica Polimérica; Membrana de Intercambio Protónico (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* o PEMFC).

Una de los aspectos fundamentales de las tecnologías en vía de desarrollo es sin duda la caracterización de funcionalidad, es por ello que se planteó el diseño del sistema de caracterización de las Celdas de Combustible. En la actualidad no se cuenta comercialmente con un sistema que caracterice de una forma practica y visual el funcionamiento de Celdas de Combustible de baja potencia, en el mercado los sistemas de caracterización son de costos elevados, además que son completamente manuales y su visualización son datos puntuales, su eficiencia no cumple con la sensibilidad para las microtecnologías de Celdas de combustible con generación de un potencial por debajo de los 5 Watts, no cuentan con una base de datos gráficos y esquemáticos. Nuestro sistema es completamente sustentable respecto a costos comparado con cualquier otro sistema de caracterización de Celdas de Combustible, el factor de sensibilidad cumple con los parámetros requeridos para las tecnologías de Microceldas de baja potencia que generan un potencial por debajo de los 5 Watts, las Microceldas se encuentran en el orden de los microvolts y miliamperes, el sistema desarrollado tiene la sensibilidad adecuada para los rangos requeridos de la caracterización de las Microceldas de combustible de intercambio protónico.

En la presente tesis se desarrolló la unidad de control computarizado para la caracterización, durante la operación, de Celdas de Combustible de Intercambio Protónico.

El sistema se compone de cuatro subsistemas:

1. Sensado y Amplificación de Señal Eléctrico-Electrónico.
2. Adquisición de Datos.
3. Regulación y Suministro de Combustible.
4. Control y Caracterización Virtual.

El subsistema de sensado y amplificación de señal eléctrico-electrónico, del cual, por medio de dispositivos físicos constituye el funcionamiento que hace versátil y eficiente al sistema encargado de las cuestiones físicas, lógicas y análogas de las variables a medir: Voltaje, Corriente y Temperatura. Estas variables son directamente proporcional a la eficiencia y son factores fundamentales para la caracterización de las Celdas de Combustible(PEMFC).

El subsistema de Adquisición de datos es el dispositivo que interactúa directamente en la parte física y virtual del sistema, es el encargado de la comunicación física con la virtual, el que constituye la unificación de la parte análoga con la virtual, el interprete de un sistema físico a uno virtual y viceversa, el que adquiere la información análoga y la suministra digitalmente a la parte virtual. El sistema de adquisición se realizó con un microcontrolador de *Microchip* de modelo *PIC18f4550*, utilizado por la versatilidad del manejo de comunicación *USB Bulk Transfer* con una resolución de 10 Bites.

El subsistema de regulación y suministro de combustible es el encargado de administrar el combustible adecuado para la operación de la celda de combustible: por medio de un sistema eléctrico-electrónico de suministro de flujo, del cual con una diferencia de potencial regulable permiten el paso de la cantidad adecuada a los humidificadores que se encargan de darle la humedad y temperatura adecuada para ser usado de forma eficiente por el sistema de generación.

El subsistema de control y caracterización virtual constituye el control de flujo de oxígeno y alcohol, la visualización gráfica de las variables medidas bajo la plataforma de *Labview de National Instruments*.

El requerimiento para la caracterización de las Celdas de Combustible son los siguientes parámetros:

1. Gráfica de Voltaje (mV) vs Carga.
2. Gráfica de Corriente(mA) vs Carga.
3. Gráfica de Temperatura(°C) vs Carga.
4. Gráfica de Voltaje(mV) vs Corriente(mA).

Para la documentación de la caracterización se cuenta con una base de datos contenida de los parámetros con tablas y gráficas de la celda de combustible a caracterizar.

El desarrollo de índole cualitativo de la tesis es propicio de la modalidad constituida al transito de las nuevas tecnologías aplicadas de impacto sustentables como lo son las generaciones de energías renovables, una importante rama a partir de la biomasa se encuentran aplicadas en las Celdas de Combustible tipo PEM.

El sistema de caracterización desarrollado esta dirigido a la comunidad científica que desarrollan tecnologías de Celdas de Combustible de baja potencia y que requieren necesariamente la caracterización funcional de estos, también requieren de documentación adquiridas de la celda en funcionamiento. Por estas cuestiones el sistema es sustentable en el ámbito científico y tecnológico. La factibilidad del diseño del sistema constituye la flexibilidad del manejo e instalación del mismo, se puede instalar fácilmente en una computadora portátil mediante el puerto USB.

El sistema de caracterización de Celdas de Combustible se diseño para suplir las necesidades con las que cuenta el laboratorio de Hidrógeno del Centro de Investigación en Energía (CIE) de la Universidad Autónoma de México (UNAM) campus Morelos ubicado en Privada de Xochicalco S/N Centro, Temixco, Morelos, México. En el cual se están desarrollando las nuevas tecnologías de Microceldas de combustible tipo PEM.

---

# Capítulo 1

## Celdas de Combustible

---

### 1.1. Historia de las Celdas de Combustible

El principio de funcionamiento de la celda de combustible fue descubierto por el científico Christian Friedrich Schönbein en Suiza, en 1838 y publicado en la edición de enero de 1839 del *Philosophical Magazine*. De acuerdo con este trabajo, la primera fue desarrollada en 1843 por Sir William Grove, un científico galés, utilizando materiales similares a los usados hoy en día para la celda de ácido fosfórico. No fue hasta 1959 cuando el ingeniero británico Francis Thomas Bacon desarrolló con éxito una celda estacionaria de combustible de 5 kilovatios [7].

En 1959 un equipo encabezado por Harry Ihrig construyó un tractor basado en una celda de combustible de 15 kilovatios para *Allis-Chalmers* que fue expuesto en Estados Unidos en las ferias del estado. Este sistema utilizó hidróxido de potasio como electrolito e hidrógeno y oxígeno comprimidos como reactivos.

Más adelante, en 1959, Bacon y sus colegas fabricaron una unidad de 5 kW capaz de accionar una máquina de soldadura, condujo en los años 60's que las patentes de Bacon licenciadas por *Pratt & Whitney* en los Estados Unidos (al menos la idea original) fuesen utilizadas en el programa espacial para proveer a los astronautas de electricidad y agua potable a partir del hidrógeno y oxígeno disponibles en los tanques de la nave espacial. Paralelamente a *Pratt & Whitney Aircraft*, *General Electric* desarrolló la primera celda de membrana de intercambio de protones (PEMFC) para las misiones espaciales Gemini de la NASA. La primera misión que utilizó PEMFC fue la Gemini V. Sin embargo, las misiones

del Programa Apolo y las misiones subsecuentes Apolo-Soyuz, del Skylab, y del transbordador utilizaban Celdas de Combustible basadas en el diseño de Bacon, desarrollado por *Pratt & Whitney Aircraft*.

*UTC Power* fue la primera compañía en fabricar y comercializar un sistema de Celdas de Combustible estacionario a gran escala, para su uso como central eléctrica de cogeneración en hospitales, universidades, y grandes edificios de oficinas. *UTC Power* continúa comercializándola bajo el nombre de *PureCell 200*, un sistema de 200 kilovatios, y sigue siendo el único proveedor para la NASA para su uso en vehículos espaciales, proveyendo actualmente al transbordador espacial. Además está desarrollando Celdas de Combustible para automóviles, autobuses, y antenas de telefonía móvil. En el mercado de automoción, *UTC Power* fabricó la primera capaz de arrancar a bajas temperaturas: la celda de Membrana Intercambio Protones (PEM). Los materiales utilizados eran extremadamente caros y las Celdas de Combustible requerían hidrógeno y oxígeno muy puros. Las primeras Celdas de Combustible solían requerir temperaturas muy elevadas que eran un problema en muchos usos. Sin embargo, se siguió investigando en Celdas de Combustible debido a las grandes cantidades de combustible disponibles (hidrógeno y oxígeno).

A pesar de su éxito en programas espaciales, estos sistemas se limitaron a aplicaciones especiales, donde el coste no es un problema. No fue hasta el final de los años 80's y principios de los 90's que las Celdas de Combustible se convirtieron en una opción real para uso más amplio. En los años 80's la compañía canadiense *Ballard* se interesaron en las Celdas de Combustible dando consigo un gran interés al resto del mundo para dichas investigaciones.

La industria automotriz en los últimos años han sido las mas interesadas debido a la viabilidad de los motores de los cuales no tienen un proceso de combustión interna, es por eso que las empresas como *Toyota, Ford, Daimler Benz, Nissan*, entre muchas otras han optado en la inversión de esta nueva tecnología.

En la actualidad existen muchos organismos gubernamentales que están comprometidos con el desarrollo de esta nueva tecnología que cumplen con la estipulación al medio ambiente, como lo son el Centro Nacional de investigación en Celdas de Combustible .

## 1.2. Introducción de las Celdas de Combustible

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica. Las Celdas de Combustible se basan en los mismos principios electroquímicos que las baterías convencionales, la ventaja es que estas no se agotan, ni precisan recarga, ya que producirán energía en forma de electricidad y calor en tanto se les provea de combustible. Su característica distintiva radica en las sustancias que reaccionan, se alimentan en forma continua al sistema, de manera que a diferencia de las convencionales, no se descargan cuando los productos químicos del interior se agotan. En la práctica, la corrosión y la degradación de materiales y componentes de la celda pueden limitar su vida útil [8].

Una celda de combustible consiste en dos electrodos separados por un electrolito. Sobre un electrodo pasa oxígeno e hidrógeno sobre el otro. En el electrodo el hidrógeno es ionizado y pierde un electrón y al ocurrir esto ambos (hidrógeno  $H^+$  y electrón  $e^-$ ) toman diferentes caminos hacia el segundo electrodo. El hidrógeno migra hacia el otro electrodo a través del electrolito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor. La membrana-electrodos es la parte fundamental de una celda de combustible, por que ahí ocurren las reacciones electroquímicas fundamentales que dan lugar a la transformación de la energía química del combustible directamente en energía eléctrica como se muestra en la Figura 1.1. Este proceso producirá agua, corriente eléctrica y calor útil. Para generar cantidades utilizables de potencia las Celdas de Combustibles son agrupadas en varias capas [9].

El tipo más sencillo de celda de combustible es el que genera electricidad combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente sin ninguna combustión, se han empleado diversas soluciones de electrólitos como ácido sulfúrico, ácido fosfórico y soluciones de hidróxido de potasio.

Las Celdas de Combustible son una familia de tecnologías que usan diferentes electrólitos y que operan a diferentes temperaturas. Cada miembro de esa familia tiende a ser más apropiada para ciertas aplicaciones. Por ejemplo, las Celdas de Combustible de membrana electrolítica polimérica o bien membrana de intercambio protónico (PEM) han demostrado ser apropiadas para su aplicación en autos, mientras que las Celdas de Combustible de carbonatos fundidos parecen ser más apropiadas para uso con turbinas a gas.

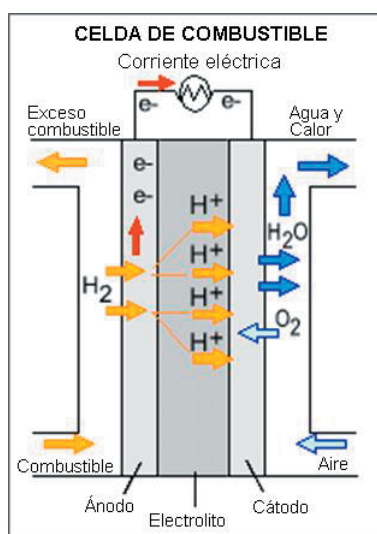


Figura 1.1: Funcionamiento de la celda de combustible de Hidrógeno

## 1.3. Funcionamiento de las Celdas de Combustible de Hidrógeno

### 1.3.1. Electrocatalisis

Las reacciones catalíticas heterogéneas que involucran reactantes y productos transfiriendo electrones a través de una interfase electrolito-electrodo se les conoce como Electrocatalisis en el que el catalizador químico es una sustancia que acelera la velocidad de la reacción química, también actúa como sustrato de una reacción electroquímica y permanece inalterado durante el proceso de reacción. Suele encontrarse recubrimiento total o parcialmente con átomos, moléculas o radicales absorbidos o electroabsorbidos en el electrodo de la reacción electrocatalítica.

### 1.3.2. Reacciones Químicas y Electroquímicas

Las reacciones Homogéneas se dan cuando los reactivos y productos están en la misma fase, y Heterogéneas en una interfase. En este caso, los reactivos pueden provenir de una o distintas fases. Como sucede, en una reacción electroquímica simple que se puede escribir [10]:



donde la sustancia  $O$  y los electrones del material que constituye el electrodo son los reactivos ( $ne$ ) y la sustancia  $R$  es el producto.  $O$  y  $R$  pueden ser gases o iones en disolución o estar en estado sólido.

La velocidad de una reacción química (de primer orden) en un sentido se puede expresar como el producto de una constante de velocidad ( $k'_0$ ) por la concentración de reactivo ( $C_0$ ):

$$\overrightarrow{v} = -\frac{dn_0}{dt} = k'_0 C_0 \quad (1.2)$$

Donde  $\frac{dn_0}{dt}$  es la velocidad de desaparición de  $O$  y  $t$  el tiempo. El símbolo  $\rightarrow$  indica que se considera la velocidad en sentido directo. La velocidad en sentido inverso será:

$$\overleftarrow{v} = \frac{dn_R}{dt} = k'_R C_R \quad (1.3)$$

en donde  $C_R$  es la concentración del producto. Tanto  $C_0$  como  $C_R$  son funciones del tiempo. Las constantes  $k'_0$  y  $k'_R$  se expresan en  $\frac{cm^3}{s}$ , cuando  $n_0$  se expresa en moles.

La velocidad neta  $v$ , de la ecuación 1.2 será la diferencia:

$$v = \overrightarrow{v} - \overleftarrow{v} = k'_0 C_0 - k'_R C_R \quad (1.4)$$

### **La Velocidad de una Reacción Electroquímica**

En las reacciones electroquímicas se lleva a cabo reacciones de oxidación y reducción (*REDOX*) resultando una corriente anódica ( $I_a$ ) y catódica ( $I_c$ ) respectivamente. Estas se caracterizan por un flujo de electrones a través de la interfase electrodo-solución en cantidad equivalente a la velocidad de transformación de  $O$  en  $R$  (Ley de Faraday). La velocidad puede expresarse conforme a la ecuación 1.2 en función de la corriente ( $I$ ). Para ello es múltiplo el número de electrones intercambiados por mol de sustancia que reacciona ( $nF$ ). Tenemos, para la reacción de electrorreducción( $I_c$ ):



$$I_c = nFk'_0C_0 = -\frac{d(nFn_0)}{dt} \quad (1.5)$$

y para la reacción de electrooxidación ( $I_a$ ):

$$I_a = nFk'_R C_R = \frac{d(nFn_R)}{dt} \quad (1.6)$$

Por lo tanto, la corriente neta es:

$$I = I_c - I_a = nF(k'_0C_0 - k'_R C_R) \quad (1.7)$$

donde las constantes cinéticas  $k'_0$  y  $k'_R$  son funciones del potencial aplicado al electrodo. Como la velocidad electroquímica depende de la extensión de la interfase, puede expresarse por unidad del área ( $A$ ) del electrodo, es decir, en densidad de corriente ( $i$ ). De la ecuación 1.7 se obtiene:

$$i = \frac{I}{A} = i_c - i_a = nF(k_0C_0 - k_R C_R) \quad (1.8)$$

donde  $i$  se expresa en  $\frac{A}{cm^2}$ ;  $i_c$  es la densidad de corriente del proceso de electroreducción (catódico) e  $i_a$  es la densidad de corriente del proceso de electrooxidación (anódico) y  $k = \frac{k'}{A}$  se expresa ahora en  $\frac{cm}{s}$

### Procesos de una Reacción Electroquímica

Una reacción electroquímica es la suma de varios procesos que ocurren en forma consecutiva. Para una reacción catódica se considera lo siguiente:

1. *Proceso de Transporte* de las sustancias que reaccionan desde el seno de la disolución hasta la doble capa eléctrica.
2. *Transferencia de Carga* se da en una zona donde un electrón del metal pasa a la sustancia reaccionante y cambia su estado de oxidación.
3. *Reacción Química* puede ocurrir previa a la transferencia de carga cuando la especie que se transporta no es apta para reacciones electroquímicas.

### 1.3 Funcionamiento de las Celdas de Combustible de Hidrógeno 7

---

Si la velocidad del proceso de transferencia de carga es mayor que la de transporte, al cabo de cierto tiempo de electrolisis, la concentración de la especie reaccionante en las inmediaciones del electrodo será menor que en el seno de la disolución. Esto origina un gradiente de disolución, cuya diferencia de potencial actúa en sentido contrario a la aplicada y se denomina *sobre potencial de concentración*. A la fracción de potencial aplicado, invertida en el proceso de transferencia de carga, se le denomina *sobre potencial de activación*.

Las reacciones químicas que ocurren previas o posteriores a la transferencia de electrones requieren también una cierta energía de activación. Al sobre potencial involucrado se le llama *sobre potencial de reacción*. Estas reacciones pueden ser Homogéneas o Heterogéneas, según se produzca en la disolución o en la superficie del electrodo.

Cada uno de los potenciales mencionados puede considerarse una energía extra que debe aplicarse para vencer la resistencia que ofrece cada proceso, cuando un proceso determina la velocidad total tiene una elevada resistencia respecto a la que poseen las otras, que serán pequeñas. Cuando dos o mas procesos tienen resistencias de igual magnitud y mayores que las de las demás, ambos determinarán la velocidad del proceso global.

#### Transporte de Materia

En general, en sistemas electroquímicos, al llevarse a cabo las reacciones electroquímicas involucradas, se produce un transporte de masa iónico, que es el movimiento del material de un lugar a otro en la disolución. Este transporte de materia puede ocurrir por difusión, convección o migración. Los tres mecanismos pueden ocurrir simultáneamente, en paralelo, por lo que sus contribuciones son aditivas.

El transporte de materia es provocado ya sea por una diferencia de potencial eléctrico o químico en una solución, o por agitación de la misma. Cerca del electrodo, el transporte es por migración y difusión, en una capa muy cercana al electrodo el transporte se lleva a cabo sólo por difusión, por lo que es llamada capa de difusión. En el seno de la solución, los gradientes son muy pequeños, por lo que el transporte se efectúa por convección y migración.

La difusión es el movimiento de las especies debido a la diferencia de concentración de la solución y ocurre siempre que existe un cambio químico en la interfase electrodo-solución. A la zona en la cual ocurre este fenómeno se conoce como capa o película de difusión y en ella las concentraciones de las especies reactivas y de los productos formados están en función de la distancia a la superficie del electrodo. En general se considera que en las cercanías de un electrodo, a través del cual fluye una corriente eléctrica, existe una capa de difusión en la cual las concentraciones de las especies reactivas es diferente a la que se tiene en el seno de la solución.

La convección es el movimiento de las especies iónicas debido a fuerzas mecánicas, la convección puede ser natural, si es provocada por diferencia de densidad en la solución, o forzada si hay agitación. Al haber agitación se llega a un estado estacionario, por lo que la capa o película de difusión deja de crecer y permanece con un espesor que depende de las condiciones hidrodinámicas.

La migración es el movimiento de las especies cargadas debido a un gradiente de potencial en la celda, es el mecanismo por el cual ocurre la conducción de cargas en el electrolito. Este movimiento de iones es dirigido hacia los electrodos, donde hay un transporte de cationes al cátodo y de aniones al ánodo, lo cual se presenta tanto dentro como fuera de la capa de difusión.

## 1.4. Tipos de Celdas de Combustible

### 1.4.1. Alcalinas (Alkaline Fuel Cell o AFC)

Utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, utilizan hidróxido de potasio como electrolito. Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales pero varias compañías están examinando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación [8].

La principal prestación que ofrecen las AFC (figura 1.2) es su funcionamiento a baja temperatura, la cual permite alcanzar eficiencias del 55 al 60 %, mucho mayor que cualquier proceso térmico sometido al principio de Carnot. Esta baja temperatura también permite que la duración de los componentes sea mayor.

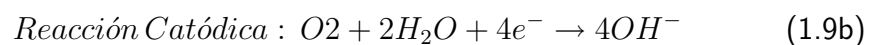
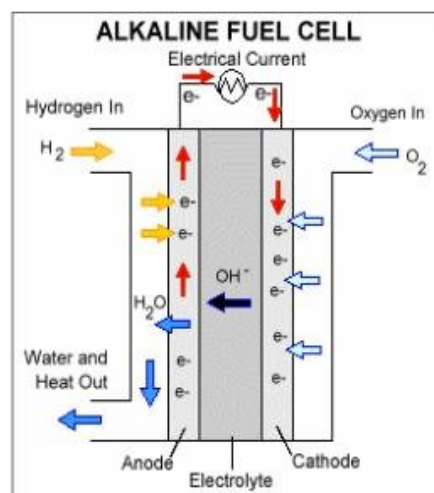


Figura 1.2: Diagrama y Reacción de la celda de combustible AFC

En estos últimos años, algunos fabricantes de Celdas de Combustible Alcalinas han utilizado catalizadores no metálicos. La empresa *ZeTek Power PLC* ha desarrollado un barco de pasajeros para viajes turísticos en Bonn con una potencia de 7.5 kW. La empresa *Electric Auto Corporation* ha desarrollado también un coche, el "*Silver Volt Electric Car*", que utiliza amoníaco como combustible [6].

### 1.4.2. Ácido fosfórico ((Phosphoric Acid Fuel Cell o PAFC)

Es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial y se encuentra en aplicaciones tan diversas: clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y terminales aeroportuarias. Las Celdas de Combustible de ácido fosfórico generan electricidad a más del 40 % de eficiencia y cerca del 85 % si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración comparado con el 30 % de la más eficiente máquina de combustión interna. Las temperaturas de operación se encuentran en el rango de los 205°C. Este tipo de Celdas pueden ser usadas en vehículos grandes tales como autobuses y locomotoras [8].

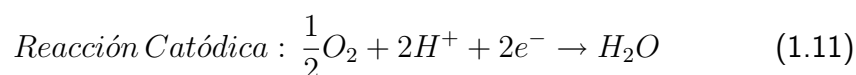
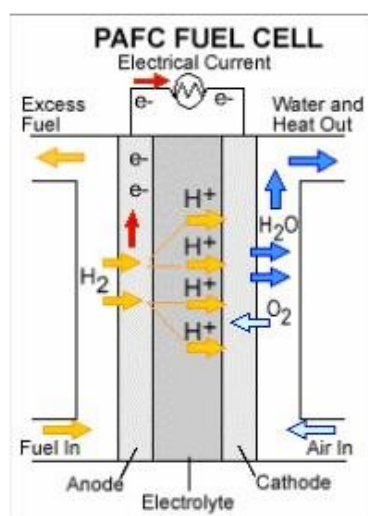


Figura 1.3: Diagrama y Reacción de la celda de combustible PAFC

La celda de combustible PAFC (figura 1.3) es la tecnología más madura en cuanto a desarrollo y comercialización se refiere. Lleva más de 20 años en desarrollo y ha recibido una inversión mundial total cercana a los 500 millones de dólares. Tuvo un crecimiento considerable hace unos años ya que se creía que de todas las tecnologías de baja temperatura, era la única tecnología que podía proporcionar una tolerancia relativa a combustibles provenientes de hidrocarburos reformados, por lo que su implantación sería más fácil a corto plazo [6].

Las plantas de generación basadas en esta tecnología ofrecen eficiencias entre el 36 % y el 42 %. Eficiencias mayores se pueden alcanzar con flujos de combustible y oxidante presurizados, lo que por otra parte conlleva un mayor gasto en los elementos del sistema. La energía térmica que se puede obtener de este tipo de Celdas de Combustible es muy similar a la energía eléctrica, su eficiencia también ronda entre el 37 y el 41 %. La densidad de potencia de este tipo de Celdas de Combustible está en torno a los 0,18 W/cm<sup>2</sup> [8].

### 1.4.3. Carbonato Fundido (Molten Carbonate Fuel Cell o MCFC)

Las Celdas de Combustible de Carbonato Fundido prometen (figura 1.4) altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir combustibles base carbón. Opera a temperaturas del orden de los 650°C. Esta temperatura sirve también para poder operar directamente con gases carbonatados como el gas natural, ya que posibilitan el reformado interno.

La necesidad de  $CO_2$  en el flujo oxidante, requiere que el  $CO_2$  se recolecte en el ánodo y se mezcle con la entrada de aire. Antes de esto, cualquier hidrógeno residual no consumido del combustible de entrada debe ser quemado. En sistemas futuros se podrá intentar incorporar membranas selectivas para eliminar el hidrógeno del flujo de aire recirculado [6].

A la temperatura que opera una Celda de Combustible de carbonatos fundidos, no se precisas catalizadores de metales nobles. El ánodo está compuesto por polvo de níquel sinterizado, dándole un carácter altamente poroso, normalmente se suele añadir algo de cromo para prevenir aglomeraciones. El cátodo está compuesto por óxido de níquel con algo de litio. Se ha trabajado mucho en desarrollar estructuras de los electrodos con una posición adecuada respecto al electrolito a altas temperaturas.

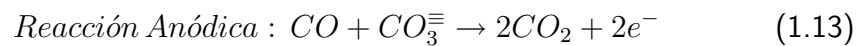
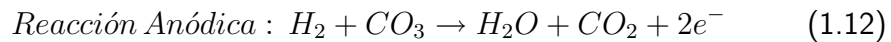
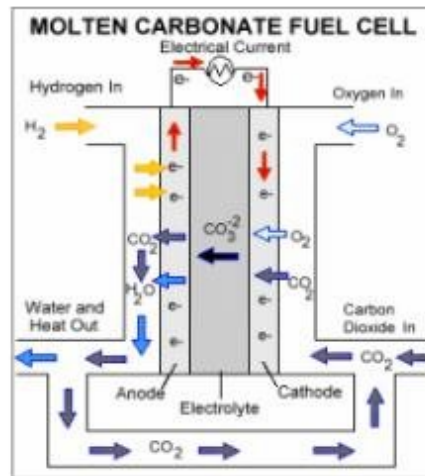


Figura 1.4: Diagrama y Reacción de la celda de combustible MCFC

La primera celda de carbonato fundido a gran escala ha sido ya probada y algunas unidades para demostración están siendo terminadas para su prueba en California.

#### 1.4.4. Óxido Sólido (Solid Oxide Fuel Cell o SOFC)

La Celda de Combustible de Óxido Sólido (figura 1.5), podría ser usada en aplicaciones grandes de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de Celdas de Combustible también prevén el uso de estas en vehículos. Un sistema de Óxido Sólido normalmente utiliza un material duro cerámico en lugar de un electrolito líquido permitiendo que la temperatura de operación alcance los 980°C. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar

un 60%. Un tipo de Celda de Combustible de Óxido Sólido utiliza un arreglo de tubos de un metro de longitud mientras que otras variaciones incluyen un disco comprimido [8].

Debido a la alta temperatura de operación de este tipo de Celdas de Combustible, el tiempo de arranque es bastante grande, y las prestaciones de las Celdas son muy sensibles a variaciones de esta temperatura. Una caída del 10% en la temperatura puede suponer una caída del 12% de la eficiencia del sistema debido al aumento de la resistencia interna en la conductividad de los iones oxígeno. Las altas temperaturas que se alcanzan también obligan a la utilización de aislantes térmicos sofisticados para proteger al personal y mantener el calor [6].

Por todas estas características, este tipo de Celdas de Combustible es ideal para aplicaciones estacionarias pero no para el sector del transporte o dispositivos portátiles.

#### **1.4.5. Polímero Sólido ó Membrana de Intercambio Protónico (PEM)**

Estas Celdas operan a relativamente bajas temperaturas (unos 90°C), tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial rápida, tal como en el caso de automóviles. De acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos, son los principales candidatos para vehículos ligeros, edificios, y potencialmente para otras aplicaciones mucho más pequeñas como reemplazar baterías recargables en video cámaras [8].

La Celda de Combustible PEM (figura 1.6) ofrece densidades de corriente mucho mayores que las de cualquier otro tipo de Celdas de Combustible, con la excepción a algunas Celdas alcalinas desarrolladas para aplicaciones espaciales. Las Celdas PEM pueden ser alimentadas por combustibles reformados y con aire. La utilización de un polímero sólido como electrolito elimina la corrosión y los problemas de seguridad asociados a los electrolitos líquidos. Su temperatura de funcionamiento es baja, lo que permite arranques instantáneos y no requiere aislamientos térmicos. Los últimos avances apuntan hacia la posibilidad de una gran reducción de costes de esta tecnología [6].

Las Celdas tipo PEM utilizan un polímero sólido como electrolito. Esta membrana es un aislante electrónico, pero un excelente conductor de iones



hidrógeno. Los materiales utilizados para este tipo de membranas son polímeros fluorocarbonados parecidos al teflón, al cual se le añaden "sulfonic acid groups". Las moléculas ácidas se fijan en el polímero y no pueden separarse, pero los protones de estos grupos ácidos pueden migrar a través de la membrana. Al ser la membrana sólida, no hay problemas de pérdida de electrolito que pueda afectar a la vida de la Celda de Combustible.

La membrana que se utiliza parece una hoja de gelatina y puede ser manejada fácilmente y sin peligro alguno. El ánodo y el cátodo se preparan aplicando una muy pequeña cantidad de platino en una de las caras de una superficie porosa de grafito, que ha sido antes impermeabilizada con teflón. El electrolito se sitúa entre los dos electrodos, y los tres componentes se sellan a presión para producir una MEA (Membrane Electrode Assembly). Este conjunto, es el corazón de la Celda de Combustible y mide menos de un milímetro de ancho.

El ánodo y el cátodo se ponen en contacto por la parte de atrás por placas de grafito con canales. Los electrones circulan por el espacio entre canales lo que permiten la circulación de la corriente eléctrica por un circuito externo. Las reacciones que tienen lugar en los electrodos en una Celda tipo PEM son análogas a las de la PAFC. EL hidrógeno de entrada se consume en el ánodo, separándose en electrones que circulan por el circuito externo y protones hidrógeno que atraviesan entran en la membrana. En el cátodo, el oxígeno se combina con los electrones y los iones hidrógeno para producir agua. El agua no se disuelve en el electrolito sino que se expulsa con el gas de alimentación del cátodo. Como las Celdas tipo PEM operan a unos 60 °C, el agua se produce de forma líquida y se expulsa por el excedente de flujo de alimentación del cátodo.

Las prestaciones de las PEM han mejorado mucho en los últimos años. Se consiguen densidades de corriente cercanas a los  $900 \frac{mA}{cm^2}$  a una tensión de 0.7V por celda con hidrógeno y oxígeno a unas 4 atm. de presión. Si el hidrógeno y el oxígeno se introducen a presión ambiente, se pueden alcanzar densidades de  $530 \frac{mA}{cm^2}$ .

En 1987, la empresa *Ballard Power Systems* recibió una membrana polimérica de *Dow Chemical*. Cuando *Ballard* la puso con sus dispositivos para producir un *stack*, esta membrana entregó cerca de  $4.2 \frac{A}{cm^2}$  a una tensión de 0.5V por celda con hidrógeno y oxígeno a 4 atm. de presión. Esto representa una densidad de potencia de  $2.1 \frac{W}{cm^2}$ . Este *stack* tiene prestaciones bastante superiores a las del Nafión. Las densidades de corriente descritas anteriormente son diez veces mayores a las de otros sistemas de Celdas de Combustible. Esto hace pensar que el potencial de las PEM en cuanto a reducción de tamaño y coste es enorme. En

un *stack* de 5kW, *Ballard* ha alcanzado a 0.7V, densidades de corriente cercanas a  $680 \frac{mA}{cm^2}$ . Las dimensiones del *stack* son 250 x 250 x 425 mm, por lo que se obtienen rendimientos de  $190,7 \frac{kW}{cm^3}$ , aunque se puede alcanzar seguramente en los próximos años cifras que se aproximen a los  $500 \frac{kW}{cm^3}$ . La eficiencia eléctrica de un *stack* depende mucho de la tensión a la cual cada monocelda opera. Para una misma tensión, una PEM es capaz de entregar mucha más corriente y por consiguiente más potencia que Celdas como las PAFC, MCFC o SOFC, o lo que es lo mismo, para una misma potencia una Celda tipo PEM tiene tamaño más reducido y menor coste.

Sin embargo, si utilizamos como combustible hidrocarburos, la eficiencia de las Celdas como MCFC o SOFC es mayor, ya que el calor que producen se puede utilizar en el proceso de reformado de manera más eficiente, además de poder aprovechar este calor residual para producir más electricidad con cogeneración. En el caso de una PEM el calor que se evacua en el circuito de refrigeración, es de baja calidad y solo se puede aprovechar para agua caliente o aplicaciones similares.

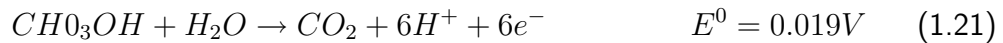
Cuando una PEM opera con hidrocarburos reformados, el *CO* producido en el proceso debe ser eliminado y convertido en *CO*<sub>2</sub> por un proceso de oxidación. Este proceso es simple desde el punto de vista de la catálisis y se puede integrar fácilmente en el sistema completo. Una PEM puede operar con aire. Como ocurre con el resto de las Celdas de Combustible, si se aumenta la presión de los flujos de entrada, las prestaciones mejoran. Para las distintas aplicaciones hay que analizar si merece la pena el gasto en presurizar los flujos de entrada con el aumento de la eficiencia. Sin embargo presiones superiores a los 5 atm. empiezan a ser dañinas para los sistemas. Otra posibilidad ya que la membrana es sólida y es capaz de soportar diferenciales de presión entre los dos flujos del ánodo y cátodo, se puede optimizar la Celda para presiones diferentes de combustible y aire.

#### 1.4.6. Otras Celdas de Combustible

Nuevos miembros de la familia de Celdas de Combustible, tales como las de Metanol Directo (DMFC por sus siglas en inglés), pueden surgir como resultado del trabajo llevado a cabo en laboratorios privados y gubernamentales.

Una Celda de Combustible PEM puede ser usada como una Celda de Combustible DMFC. Esta celda consiste en dos compartimentos: uno anódico, donde entre el metanol, y otro catódico para el oxígeno, ambos separados por una membrana de intercambio protónico como se muestra en la figura 1.6.

La oxidación electroquímica directa del metanol ocurre en el ánodo, de acuerdo a la siguiente reacción de media Celda [10]:



Los sistemas de Celdas de Combustible dado que no cumplen el ciclo de Carnot pueden producir electricidad con una alta eficiencia de energía, la cual disminuye si las reacciones involucran varios mecanismos intermediarios. Así, es muy importante el desarrollo de nuevos materiales como electrodos en una celda de combustible de metanol directo.

## **1.5. Aplicaciones de las Celdas de Combustible**

Las aplicaciones de Celdas de Combustible se encuentran en ámbitos tanto industrial y domésticos, como fuentes estacionarias y móviles. Tienen un amplio margen de aplicaciones desde plantas de energía hasta suministro de dispositivos portátiles. Algunas de las aplicaciones más interesantes son:

1. Sustitución de los Motores en vehículos.
2. Generación de electricidad en Centrales, sustituyendo a las Actuales Turbinas.
3. Cogeneración Doméstica de Calor y Electricidad.
4. Suministros de Energía en Transbordadores Espaciales y Submarinos.
5. Telefonía Móvil con Metanol

### **1.5.1. Fuentes Estacionarias con Celdas de Combustible**

#### **Fuentes Estacionarias en Industrias con Celdas de Combustibles**

Las tendencias del desarrollo industrial plantean la necesidad de impulsar una política económica que mejore las condiciones de competitividad y especialización de la planta productiva que genere nuevas oportunidades de empleo e ingreso remunerativo a la población. Es conveniente que la industria siga avanzando de manera simultánea, en la consolidación y aplicación efectiva del marco regulatorio en materia ambiental en general y de reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera en lo particular, de tal forma que se induzca a la modernización

tecnológica, al mejoramiento de las prácticas de producción y a la instalación de sistemas de control de emisiones contaminantes cuando se requiera. Un requisito para lograr lo anterior es el fortalecer una cultura ambiental empresarial y laboral, así como brindar la capacitación en buenas prácticas orientadas a un mejor desempeño ambiental.

Actualmente, el mercado más desarrollado de las Celdas de Combustible está presente en fuentes estacionarias de electricidad y calor. La eficacia y el volumen reducido de emisiones respecto a los dispositivos que emplean combustibles fósiles tradicionales, hacen de la tecnología de las Celdas de Combustible una atractiva opción para los usuarios. Operando a temperaturas por debajo de los 80 °C, las Celdas de Combustible pueden ser instaladas en cualquier vivienda privada además de poder satisfacer las necesidades energéticas de los procesos industriales.

Hasta ahora, los fabricantes de Celdas de Combustible se han centrado en aplicaciones no residenciales. *International Fuel Cells*, el único suministrador a nivel comercial de Celdas de Combustible, ha instalado más 200 Celdas de Combustible de ácido fosfórico (PAFC) en diversos lugares, incluyendo escuelas, bloques de oficinas e instalaciones bancarias. En el futuro, las Celdas de Combustible que operan a altas temperaturas, como de carbonato fundido (MCFC) y de óxido sólido (SOFC), podrían adaptarse a aplicaciones industriales y generar energía a gran escala (Megawatios). Operando a temperaturas entre 600-1100 °C estas Celdas de Combustible, pueden tolerar una fuente de hidrógeno contaminada. Además, el calor generado puede ser usado para producir electricidad adicional mediante turbinas de vapor [7].

### Fuentes Estacionarias en Viviendas con Celdas de Combustibles

Las dificultades técnicas a la hora de diseñar las Celdas de Combustibles se simplifican en las aplicaciones estáticas. La mayoría de las Celdas de Combustibles comercializadas, si no todas, son inmóviles y trabajan a gran escala (generando más de 50 kW de energía eléctrica). Hay, sin embargo, un potencial significativo para unidades menores para aplicaciones en viviendas (menores que 50 kW).

Todo el calor y los requerimientos energéticos de residencias privadas o pequeños negocios podrían servirse de Celdas de membrana polimérica (PEM) ó de ácido fosfórico (PAFC). Actualmente, estas unidades no se encuentran fácilmente disponibles. Sólo existen algunos casos en los Estados Unidos, Japón y Alemania y en la actualidad en el Centro de Investigación en Energía de la Universidad Autónoma de México Campus Morelos se encuentran desarrollando

Celdas de membrana polimérica (PEM) . Este tipo de Celdas ofrecen una mayor densidad energética respecto a las PAFC, pero éstas pueden ser más eficientes y su fabricación actualmente es más económica. Las unidades podrían abastecer a casas independientes o grupos de viviendas y podrían diseñarse para satisfacer todas las necesidades energéticas de los habitantes.

Para permitir un arranque inicial de esta tecnología, se pueden emplear redes de distribución de gas natural que será la fuente para obtener el combustible de hidrógeno. Sin embargo, los fabricantes pronostican fuentes alternativas de combustible para poder así reducir aún más las emisiones y encontrar nuevos huecos en el mercado. La última incorporación dentro del mercado estacionario de Celdas de Combustible es la *General Motors*, que desarrolló una unidad en agosto de 2001.

### 1.5.2. Fuentes Móviles con Celdas de Combustible

#### Fuentes Móviles con Celdas de Combustible en la Milicia

Se espera que las aplicaciones militares supongan un mercado muy significativo para la tecnología de Celdas de Combustible. La eficacia, versatilidad, prolongado tiempo de funcionamiento y su operatividad sin ruidos, hacen de las Celdas de Combustible un sistema a la medida para las necesidades de los servicios militares. Las Celdas de Combustible podrían aportar una solución de generación energética válida para el equipamiento militar portátil terrestre o marítimo.

Las Celdas de Combustible en miniatura podrían ofrecer grandes ventajas sobre las baterías sólidas convencionales voluminosas y además se eliminaría el problema de su recarga.

Siguiendo la misma tónica, la eficacia de las Celdas de Combustible para el transporte vería reducida drásticamente la necesidad de combustible necesario durante las maniobras. Los vehículos serían capaces de recorrer grandes distancias o trabajar en áreas remotas durante más tiempo y la cantidad de vehículos de apoyo, personal y equipamiento necesario en la zona de combate podrían reducirse. Desde 1980 la marina estadounidense ha empleado Celdas de Combustible en embarcaciones para el estudio de profundidades marinas y en submarinos no tripulados.

### Fuentes Móviles con Celdas de Combustible en Misiones Espaciales

La necesidad del gobierno estadounidense de identificar una energía de confianza y segura que sirviera como fuente de abastecimiento para misiones espaciales tripuladas a finales de los 50's y principios de los 60's, proporcionó el ímpetu y la ayuda para el avance considerable de la industria de Celdas de Combustible.

La combinación de su peso ligero, el aporte de electricidad y calor sin ruidos significativos y vibraciones y con la ventaja añadida de la producción de agua potable, otorgaron a las Celdas de Combustibles ventajas considerables con respecto a otras fuentes de energía alternativas.

La Celda de Combustible *Grubb-Niedrach* producida por *General Electric* fue la primera usada por la NASA para suministrar energía al proyecto espacial Gemini. Este fue el primer uso comercial de las Celdas de Combustible.

La compañía aeroespacial *Pratt & Whitney* ganó el contrato para el suministro de Celdas de Combustible al programa *Apolo* desde principios de los 60's. Las Celdas de Combustible de *Pratt & Whitney* se basaban en las modificaciones de las patentes de Bacon del modelo de Celdas alcalinas. Estas Celdas de Combustible que operan a baja temperatura son las más eficientes. Con tres unidades capaces de producir 1.5 kW, o 2.2 kW durante cortos periodos de tiempo, operando en paralelo. Pesando alrededor de 114 kg por unidad y alimentadas por hidrógeno criogenizado y oxígeno, lograron soportar 10.000 horas de funcionamiento durante 18 misiones espaciales sin que hubiera ningún incidente a bordo.

*International Fuel Cells* (IFC), una compañía hermana de *Pratt Whitney*, ha seguido con el suministro de Celdas de Combustible alcalinas a la NASA para su empleo en transbordadores espaciales desde el comienzo del programa en los 80's. El desarrollo técnico que ha continuado el IFC ha hecho que las Celdas de Combustible que usan los transbordadores espaciales puedan actualmente abastecer unas diez veces la energía que proporcionaban unidades similares usadas en la nave *Apolo*.

Utilizando como combustible hidrógeno criogenizado y oxígeno, las Celdas son 70 % más eficientes y pueden completar 80.000 horas de funcionamiento en más de 100 misiones.

### **Fuentes Móviles con Celdas de Combustible en la Industria del Transporte Vehicular**

La legislación ambiental, cada vez más, fuerza a los fabricantes de automóviles a sustituir aquellos vehículos que produzcan gran cantidad de emisiones contaminantes. La tecnología de Celdas de Combustible ofrece una oportunidad tangible para alcanzar este requerimiento. Investigaciones llevadas a cabo en el *Pembina Institute for Appropriate Design* de Alberta (Canadá), han mostrado que la cantidad de dióxido de carbono procedente de un coche pequeño puede reducirse hasta en un 72 % cuando se emplea una Celda de Combustible de hidrógeno obtenido a partir de gas natural en lugar de un motor de combustión interna de gasolina. Sin embargo, si las Celdas de Combustible reemplazan a los motores de combustión interna, la tecnología deberá no sólo satisfacer la estricta legislación sobre emisiones, también aportarán soluciones para el transporte. Las Celdas de Combustible que utilicen los vehículos serán capaces de alcanzar las temperaturas operativas con rapidez, proveer una economía competitiva de combustible y ofrecer unas prestaciones aceptables.

Las Celdas de membrana polimérica (PEM) son las más adecuadas para cumplir estos requerimientos. Con una baja temperatura de funcionamiento, alrededor de 80 °C, las PEM pueden alcanzar rápidamente la temperatura operativa. Estas Celdas pueden ofrecer una eficacia superior al 60 % comparada con el 25 % que se consigue con los motores de combustión interna. Investigaciones efectuadas en el *Pembina Institute* indican que los vehículos que emplean metanol como combustible pueden alcanzar eficiencias de 1.76 veces las de vehículos impulsados por un motor de combustión de gasolina. Las Celdas de Combustible PEM tienen además la mayor densidad energética de entre todas las actuales Celdas de Combustible, un factor crucial a la hora de considerar el diseño de vehículos. Además, el electrolito polimérico sólido ayuda para minimizar la corrosión y evitar problemas de gestión. Un posible inconveniente es la calidad del combustible. Para evitar el envenenamiento catalítico a esta baja temperatura de funcionamiento, las Celdas PEM necesitan hidrógeno no contaminado como combustible.

La mayoría de los fabricantes de automóviles ven las Celdas PEM como sucesoras de los motores de combustión interna. *General Motors, Ford, DaimlerChrysler, Toyota, Honda* entre otros, disponen de prototipos con esta

tecnología. Los ensayos en carretera han sido positivos empleando distintos vehículos y lugares. Se han realizado con éxito ensayos en autobuses impulsados con Celdas PEM en Vancouver y Chicago. Se están llevando a cabo experiencias similares en distintas ciudades de Alemania junto con otras diez ciudades europeas incluida Madrid.

Actualmente, el problema principal para impulsar esta tecnología en el sector del transporte reside en el elevado coste de fabricación, la calidad del combustible y el tamaño de la unidad. La investigación realizada en este ámbito, parece que ha optado por emplear metanol como fuente de combustible y utilizar el oxígeno del aire. Este hecho podría eliminar el proceso de reformado del combustible.

Se estima que en unos 30 años, los parques automovilísticos de los países desarrollados (actualmente con más de 750 millones de unidades incluyendo turismos, autobuses y camiones) contarán con mas vehículos con motor eléctrico alimentado por Celda de Combustible que con motor de combustión interna.

### **Fuentes Móviles con Celdas de Combustible en Dispositivos Portátiles**

El desarrollo continuo de las Celdas de Combustibles ha contribuido al desarrollo de numerosos dispositivos electrónicos móviles. La miniaturización de la Celda de Combustible ofrece serias ventajas respecto a las baterías convencionales, tales como el incremento del tiempo de operación, la reducción del peso y la facilidad de recarga.

Para este tipo de aplicaciones como ordenadores portátiles, teléfonos móviles y videocámaras, será necesario considerar los siguientes parámetros que deben darse en las Celdas:

1. Baja la Temperatura de Operación.
2. Disponibilidad de Combustible.
3. Activación Rápida.

En este punto, la investigación se centra en dos tipos de Celdas: las Celdas de membrana polimérica (PEM) y las Celdas de Combustible de metanol directo (DMFC por sus siglas en inglés).

El uso de metanol en las DMFC ofrece una gran ventaja sobre las baterías sólidas en cuanto a la recarga con el combustible en lugar de la utilización de



una carga eléctrica externa durante largos periodos de tiempo. Las desventajas actuales son relativas al coste del catalizador de platino necesario para convertir el metanol en dióxido de carbono y energía eléctrica a bajas temperaturas y baja densidad energética. Si se logran superar dichos inconvenientes, entonces no habrá dificultad para que se promuevan este tipo de Celdas. Se han efectuado ensayos de DMFC en Estados Unidos para el suministro energético a teléfonos móviles, mientras que los ensayos en ordenadores portátiles se han desarrollado en Alemania.

### 1.5.3. Importancia de la Electrónica en las Tecnologías de Celdas de Combustible

Los desarrollos científicos tienen intrínsecamente desarrollos tecnológicos por ser ambas coexistentes. La ciencia es fortalecida a partir de la tecnología y la tecnología tiene un fundamento científico riguroso. La implementación conjunta de estas implica un desarrollo eficaz en cualquier ámbito necesario para el bienestar natural y humano: ambiental, salud, energía, social, cultural, demográfico, tecnológico, económico, etc.

Dentro de la tecnología se encuentra el desarrollo mas importante durante las ultimas décadas; la Electrónica. La Electrónica implica la aplicación del mayor desarrollo tecnológico en nuestra actualidad, del cual, es la herramienta mas poderosa de la ciencia: cálculos electrónicos en la astronomía, equipos electrónicos en medicina, microscopios y telescopios digitales, sistemas inteligentes y automatizados en las industrias, sistemas de comunicación, etc. Prácticamente, en cualquier proceso se puede implementar los sistemas digitales, ya sea, para desarrollo, verificación, proceso, adquisición de datos, mediciones, sensado, etc.

Dentro del desarrollo energético como lo son las fuentes renovables de energías, la Electrónica juega un papel muy importante para el control, sensado y suministro de las múltiples disciplinas de tecnologías de las energías renovables.

Para las aplicaciones de las Celdas de Combustible como se menciona en los apartados anteriores la Electrónica es el medio por el cual esos sistemas son eficientes y controlados. Para un sistema de suministro energético, ya sean estacionarias o móviles requieren de un control de carga, de suministro y un monitoreo del sistema de almacenamiento y del sistema en general por medio de dispositivos sensitivos electrónicos. En conjunto con la física de materiales y de semiconductores se ha desarrollado sistemas mas compactos y eficientes

para el desarrollo de las microtecnologías y recientemente las nanotecnologías que son directamente aplicados en sistemas con estructura y funcionamiento mas complejos en dispositivos portátiles y en conjunto con las aplicaciones de las nanoceldas de combustible para el suministro de estos. Es así, que la unificación de ambas tecnologías conforman un futuro determinista para el desarrollo tecnológico para suplir con las necesidades evolutivas de la humanidad que es directamente dependiente del sector energético.

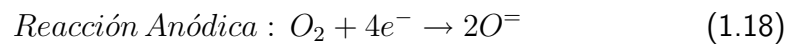
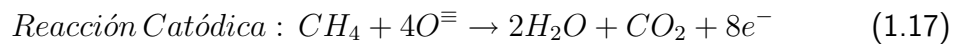
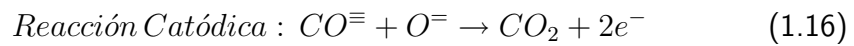
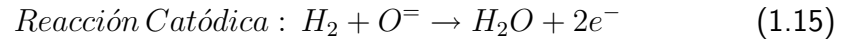
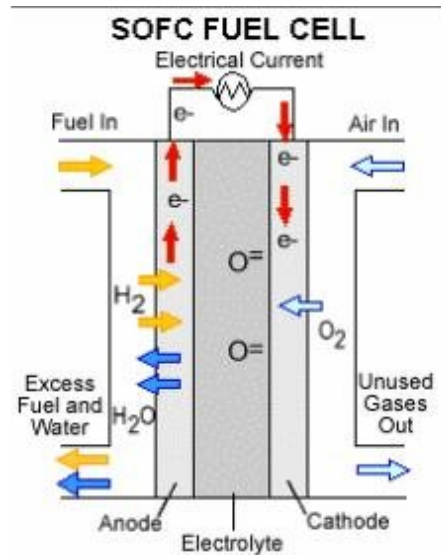


Figura 1.5: Diagrama y Reacción de la celda de combustible SOFC

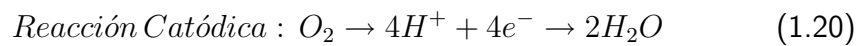
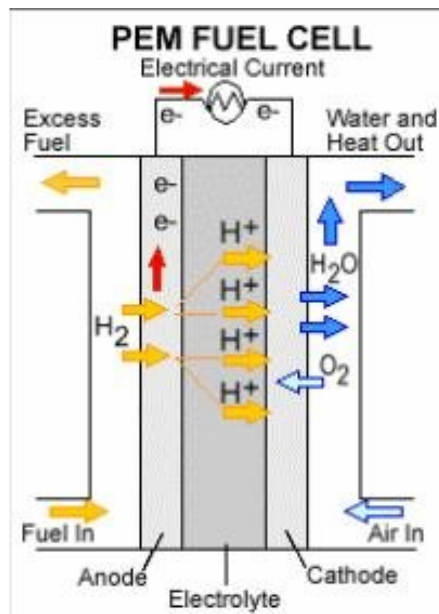


Figura 1.6: Diagrama y Reacción de la celda de combustible PEM

---

## Capítulo 2

# Variables de Medición de las Celdas de Combustibles

---

### 2.1. Comportamiento eléctrico de las celdas

Para verificar el comportamiento de la celda de combustible al cambiar la resistencia se supone el circuito de la celda y la carga como un circuito semejante al circuito de una batería y una carga, en el que la batería tiene una resistencia interna que interviene en el comportamiento del circuito.

Considerando el circuito que consta de una batería conectada a un resistor. Si los alambres de conexión no tienen resistencia. La terminal positiva de la batería está a un potencial más alto que la negativa. Si no se incorpora la resistencia interna de la batería, entonces la diferencia de potencial a través de ella (el voltaje de la terminal) es igual a su Fuerza Electromotriz (FEM). Sin embargo, debido a que una batería real siempre tiene alguna resistencia interna  $r$ , el voltaje de las terminales no es igual a la FEM. El circuito puede describirse por medio del diagrama de la Figura 2.1. La batería dentro del rectángulo punteado se representa por medio de una FEM ( $\epsilon$ ) en serie con la resistencia interna ( $r$ ) [11].

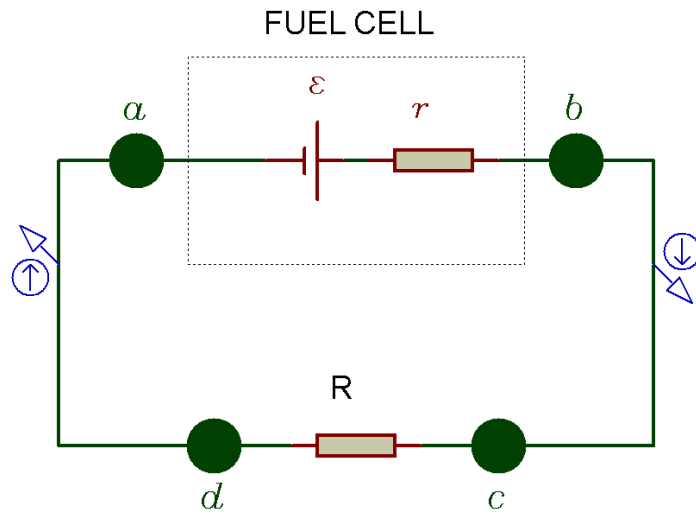


Figura 2.1: Esquema eléctrico de las celdas de combustible

## 2.2. Corriente de una celda

Si una carga positiva que se mueve de “a” hacia “b” según la Figura 2.1. A medida que la carga pasa de la terminal negativa a la positiva, su potencial aumenta en  $\varepsilon$ . Sin embargo, conforme se mueve a través de la resistencia su potencial disminuye en una cantidad  $I \times r$ , donde  $I$  es la corriente en el circuito y  $r$  la resistencia interna. De este modo, el voltaje de las terminales de la batería,  $V = V_a - V_b$ , es:

$$V = E_0 - Ir \quad (2.1)$$

donde:

$V$  = Voltaje (V)

$I$  = Corriente del circuito (A)

$E_0$  = Potencial de circuito abierto (V)

$r$  = Resistencia interna ( $\Omega$ )

Se espera entonces que el voltaje obtenido de una celda de combustible se vea afectada por la resistencia interna del sistema análogamente al comportamiento de una batería.

En esta expresión  $E_0$  es equivalente al voltaje en circuito abierto, es decir, el voltaje de las terminales cuando la corriente es cero. Según la Figura 2.1 el voltaje terminal  $V$  también debe ser igual a la diferencia de potencial a través de la resistencia externa ( $R$ ), llamada con frecuencia la resistencia de carga. Es decir,  $V = IR$ , al combinar esta expresión con la ecuación 2.1.

$$\varepsilon = IR + Ir \quad (2.2)$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (2.3)$$

donde:

$\varepsilon$ =Fuerza Electromotriz(V)

$R$ =Resistencia Externa( $\Omega$ )

La ecuación demuestra que la corriente en este circuito simple depende tanto de la resistencia  $R$  externa a la batería como de la resistencia interna  $r$ . Si  $R$  es mucha mayor que  $r$ , entonces no son notorios los efectos de esta última.

## 2.3. Potencia disipada de la celda

La potencia disipada ( $P$ ) en la resistencia de carga es igual a  $I^2R$ , donde  $P$  está dada por la ecuación:

$$P = I^2R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2} \quad (2.4)$$

Cuando se grafica la potencia contra la resistencia, como se ilustra en la Figura 2.2,  $P$  alcanza un valor máximo  $\frac{E^2}{4r}$  en  $R = r$ . Esto puede probarse también al diferenciar  $P$  respecto de  $R$ , igualando a cero el resultado y despejando  $R$ .

La potencia entregada a  $R$  es un máximo cuando la resistencia de carga del circuito es igual a la resistencia interna de la batería.

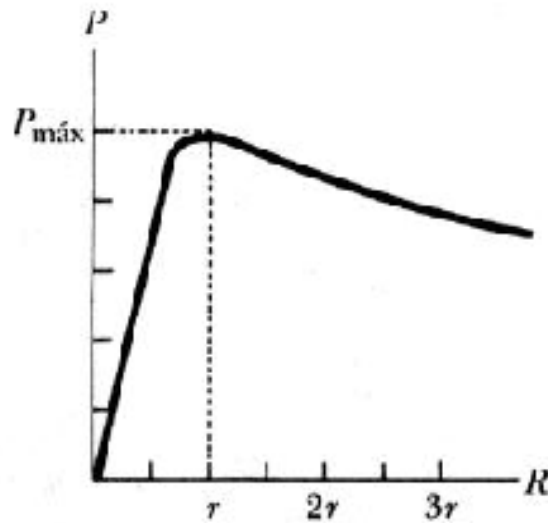


Figura 2.2: Potencia disipada vs Resistencia de carga

## 2.4. Polarización de activación ( $\eta_{act}$ )

La polarización de activación está directamente relacionada con la tasa a la que se realizan las reacciones electroquímicas. Hay una similitud entre las reacciones químicas y las reacciones electroquímicas en tanto las dos involucran una barrera de activación que debe sobrepasarse por las sustancias en reacción. En el caso de una reacción electroquímica con  $\eta_{act} > 50 - 100mV$ ,  $\eta$  es descrito por una ecuación semiempírica denominada en forma general la ecuación Tafel.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_0} \quad (2.5)$$

donde:

$\alpha$  = Coeficiente de Transferencia de electrones

$i_0$  = Densidad de Corriente de intercambio



## 2.5. Polarización Óhmica ( $\eta_{ohm}$ )

Las pérdidas por polarización óhmica ocurren debido a la resistencia de flujo de iones en el electrolito y la resistencia al flujo de electrones a través del material del electrodo. Las pérdidas óhmicas dominantes, a través del electrolito, se reducen al disminuir la separación del electrodo y aumentar la conductividad iónica del electrolito. Debido a que ambos tanto el electrolito como el electrodo de la celda de combustible obedecen a la ley de Ohm las pérdidas óhmicas puedan expresarse por la ecuación.

$$\eta_{ohm} = iR \quad (2.6)$$

donde:

$i$ =Corriente del Circuito

$R$ =Resistencia total del Circuito

## 2.6. Polarización de concentración ( $\eta_{conc}$ )

A medida que el reactivo se consume en el electrodo por la reacción electroquímica, hay una pérdida potencial debido a la inhabilidad del material circundante para mantener la concentración inicial del fluido. Se forma entonces un gradiente de concentración. Hay muchos factores que contribuyen en el proceso de polarización de concentración. En las densidades de corriente prácticas el transporte lento de reactivos hasta el sitio de la reacción química es lo que más inciden en la polarización de concentración.

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (2.7)$$

donde:

$i_L$ =Densidad de Corriente Limitante

## 2.7. Suma de la polarización en el electrodo

La polarización de activación y concentración puede existir en los dos electrodos tanto el positivo (cátodo) como el negativo (ánodo). La polarización total en los electrodos es la suma de estas polarizaciones.

$$\eta_{anodo} = \eta_{act,a} + \eta_{conc,a} \quad (2.8a)$$

$$\eta_{catodo} = \eta_{act,c} + \eta_{conc,c} \quad (2.8b)$$

El efecto de la polarización lleva el potencial del electrodo a un nuevo valor

$$V_{anodo} = E_{anodo} + |\eta_{anodo}| \quad (2.9a)$$

$$V_{catodo} = E_{catodo} + |\eta_{catodo}| \quad (2.9b)$$

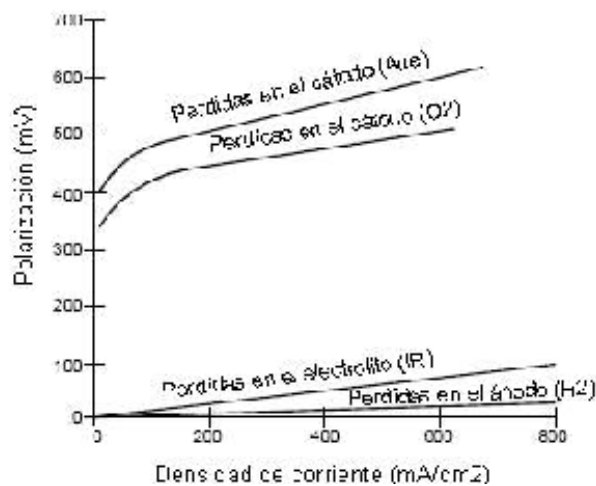


Figura 2.3: Contribución a la polarización de ánodo y cátodo

## 2.8. Voltaje en la celda

El voltaje de la celda es la diferencia del potencial del ánodo y el cátodo y la polarización óhmica.

$$V_{celda} = V_{catodo} - V_{anodo} - iR \quad (2.10)$$

Combinando las ecuaciones

$$\begin{aligned} V_{celda} &= V_{catodo} - V_{anodo} - iR \\ &= (E_{catodo} + |\eta_{catodo}|) - (E_{anodo} + |\eta_{anodo}|) - iR \\ &= (E_{catodo} - |\eta_{act,c} + \eta_{conc,c}|) - (E_{anodo} + |\eta_{act,a} + \eta_{conc,a}|) - iR \\ &= \left( E_{catodo} - \left| \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_0} + \frac{RT}{n F} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \right|_c \right) \\ &\quad - \left( E_{anodo} + \left| \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_0} + \frac{RT}{n F} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \right|_a \right) - iR \\ \\ V_{celda} &= (E_{catodo} - E_{anodo}) - \left( \left| \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_0} + \frac{RT}{n F} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \right|_c \right) \\ &\quad + \left( \left| \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_0} + \frac{RT}{n F} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \right|_a \right) - iR \end{aligned} \quad (2.11)$$

## 2.9. Variables de rendimiento en las celdas de combustible

El rendimiento de una celda de combustible se ve afectado por las variables de operación (temperatura, presión, composición del gas, relación estequiométrica de reactivos, densidad de corriente) y otros factores (impurezas, vida de la celda) que influyen en el potencial de la celda y las pérdidas de voltaje. Hay muchos puntos de operación que pueden seleccionarse para aplicaciones de celdas de combustible en sistemas prácticos.

La Figura 2.4 muestra los posibles puntos de operación y los parámetros que pueden modificarse para alcanzarlos.

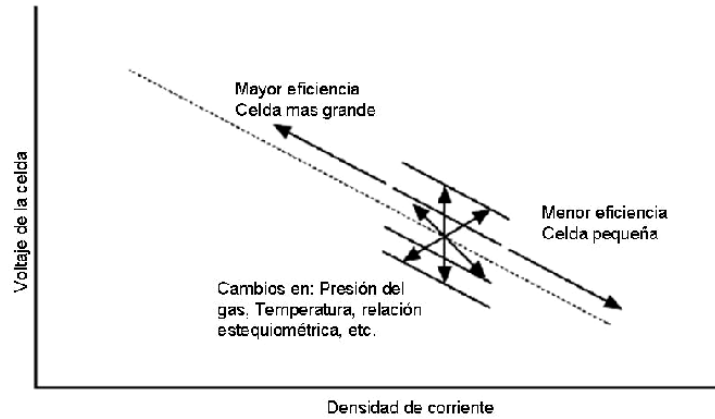


Figura 2.4: Flexibilidad en los puntos de operación según parámetros de la celda

## 2.10. Determinación del rendimiento

Extensos y complejos modelos computarizados han sido usados para caracterizar la operación actual de las celdas de combustibles, basados en minuciosos detalles de los componentes del diseño de la celda (dimensiones físicas, materiales, etc.) además de consideraciones físicas (fenómeno de transporte, electroquímicas, etc.) estos códigos, a menudo registrados, son necesarios en el diseño y desarrollo de celdas de combustible. Aproximaciones más simples se usan normalmente para estudiar un sistema. Una aproximación, por ejemplo, sería conducir una prueba para cada condición esperada del sistema, sin embargo esto sería bastante costoso. Es prudente entonces desarrollar correlaciones basadas en modelos termodinámicos para predecir el rendimiento cuando varían algunas condiciones de una celda como temperatura, presión, y la constitución del gas. Los modelos termodinámicos que son usados para representar estas ecuaciones no quedan completamente definidos así que un número pequeño de pruebas son necesarios para definir las constantes de diseño en las ecuaciones.

Se puedan realizar luego ajustes bajo condiciones de operación conocidas para alcanzar un rendimiento deseado.

El trabajo útil (energía eléctrica) se obtiene de la celda solo cuando se induce una corriente razonable, sin embargo el potencial actual de la celda decrece del potencial de equilibrio debido a las pérdidas irreversibles como se muestran la Figura 2.5. Son muchas las causas que contribuyen a las pérdidas irreversibles en una celda real. Las pérdidas, que comúnmente son llamadas polarización, sobre potencial o sobrevoltaje ( $\eta$ ), se originan principalmente de tres fuentes: 1<sup>o</sup> polarización de activación, 2<sup>o</sup> polarización óhmica y 3<sup>o</sup> polarización de concentración. Estas pérdidas resultan en un voltaje en la celda menor al voltaje ideal.

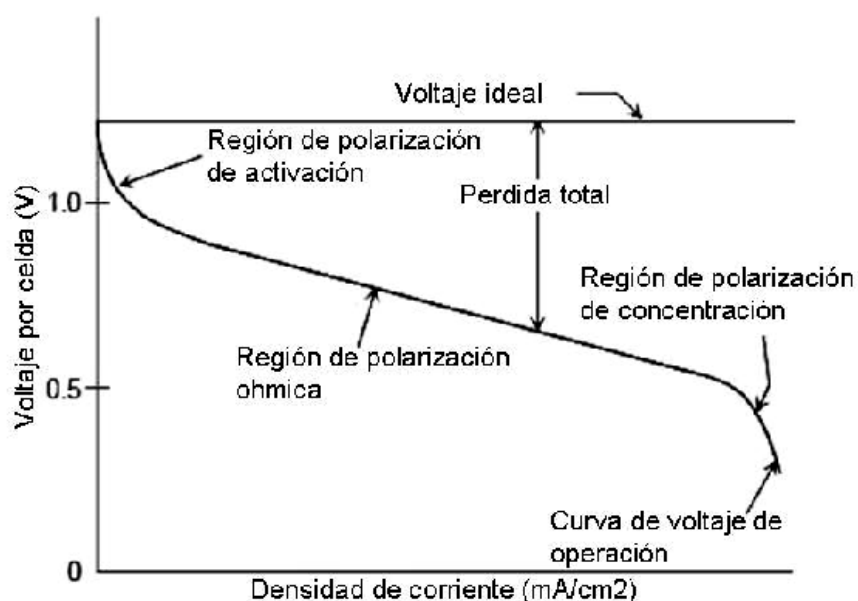


Figura 2.5: Potencial ideal de una celda  $\frac{H_2}{O_2}$  como función de la temperatura

Las pérdidas de polarización de activación están en el dominio de las bajas densidades de corriente, en este punto, las barreras electrónicas se superponen a la corriente y el flujo de iones. Las pérdidas de activación se incrementan en tanto se incrementa la corriente. Las pérdidas por polarización óhmica varían directamente con la corriente, al incrementar la corriente en todo éste rango la resistencia de la celda permanece esencialmente constante. Las pérdidas por el transporte de masa del gas ocurren en todo el rango de densidad de corriente, sin embargo estas pérdidas se hacen prominentes en el límite más alto de las corrientes cuando es difícil proveer suficiente flujo de reactivo a la reacción en la celda.

---

# Capítulo 3

## Marco Teórico del Proyecto

---

### 3.1. Comunicación Universal Serial Bus

#### 3.1.1. Generalidades

El Universal Serial Bus (*USB*) es un estándar [12] que define un *Bus* utilizado para conectar periféricos al *PC*. La principal característica que tiene es la conexión que utiliza un único serie de *Bus* para todos los dispositivos. Una topología especial tipo estrella para conectar hasta 127 dispositivos y protocolos que permiten la detección y configuración automática de los dispositivos conectados.

Las principales características del *Bus* son:

- Banda de paso, disponibilidad desde algunos *kilobits* a varios *megabits*.
- Transferencia isócrona y asíncrona en el mismo *Bus*.
- Varios tipos de periféricos en el mismo *Bus*.
- Posibilidad de conectar hasta 127 periféricos.
- Tiempo de respuesta garantizado.
- Flexibilidad a nivel de banda de paso.
- Fiabilidad, control de errores.

- Perfectamente integrado en el *PC*, *plug and play* (conectar y usar).
- Coste reducido en la versión de baja velocidad (1,5 Mbits/s).
- Posible expansión del *Bus*.

El *USB 1.0* soporta dos tasas de transferencia diferentes: de 1,5 Mbps para la conexión de dispositivos lentos de bajo coste (*joysticks*, *mouses*) y otra de hasta 12 Mbps para la conexión de dispositivos que requieren un mayor ancho de banda (discos o CD-ROMs).

A mediados del año 2000 aparece la versión 2.0, que multiplica la velocidad del *Bus* por un factor de 30 o 40, llegando a alcanzar una velocidad de 480 Mbps, con una diferencia de costo casi inapreciable. Compatible con la versión anterior, únicamente se necesitan nuevos concentradores (*Hubs*) que soporten la versión 2.0. Estos *Hubs* son más complejos que los anteriores, ya que tienen que manejar el tráfico de datos de tres velocidades distintas sin ser excluyentes entre ellas. Cabe también destacar que la versión *USB 2.0* nunca llegará a reemplazar completamente a *USB 1.0*, ya que existen algunos tipos de dispositivos, como los dispositivos de interfaz humana *HID* (por sus siglas en inglés) (teclados, *mouses* y *joysticks*) [13], que no requieren las altas velocidades que alcanza esta nueva versión y que únicamente encarecerían el dispositivo.

Anteriormente los periféricos se conectaban mapeados directamente en direcciones de entrada/salida (E/S), se les asignaba una dirección específica y en algunos casos un canal de acceso directo a memoria *DMA* (por sus siglas en inglés). Esta situación conducía a tener conflictos en la asignación de estos recursos, puesto que siempre han estado bastante limitados en el ordenador. Además, cada dispositivo tenía su propio puerto de conexión y utilizaba sus cables específicos, lo que daba lugar a un incremento de los costos. Debido a que a cada dispositivo se le tenían que asignar unos recursos específicos la detección del mismo debía hacerse a la hora de arrancar el sistema y nunca se podía incorporar un nuevo dispositivo cuando el sistema estaba en marcha. Los dos aspectos fundamentales que motivaron la realización de este estándar fueron la necesidad de configurar de forma sencilla los periféricos conectados al ordenador y la necesidad de aumentar el número de puertos disponibles.

Este estándar define una topología de conexión en estrella, tal como se muestra en la figura 3.1, por medio de la incorporación de varios *Hubs* conectados en serie. Cada concentrador se conecta por un lado al ordenador, que contiene una o dos interfaces de este tipo en la placa base, o a otro *Hub* y, por otro lado, se conecta a varios dispositivos o incluso a otro *Hub*.

De este modo pueden existir periféricos que vengan ya preparados con nuevos conectores *USB* para incorporar nuevos dispositivos, hasta un total de 127, todos ellos funcionando simultáneamente. Los *Hubs* tienen la misión de ampliar el número de dispositivos que se pueden conectar al *bus*. Son concentradores cableados que permiten la conexión simultánea de múltiples dispositivos y lo más importante es que se pueden concatenar entre sí ampliando la cantidad de puertos disponibles para los periféricos. El *hub* detecta cuándo un periférico es conectado o desconectado a uno de sus puertos, notificándolo de inmediato al controlador de *USB*. También realiza funciones de acoplamiento de las velocidades de los dispositivos más lentos. Existe una gran variedad de dispositivos *USB* que se conectan todos al mismo *bus*. La característica más importante es que todos ellos utilizan el mismo tipo de cable y de conector y se conectan de la misma forma tan sencilla. El *Host* decide qué dispositivo puede acceder al *bus*.

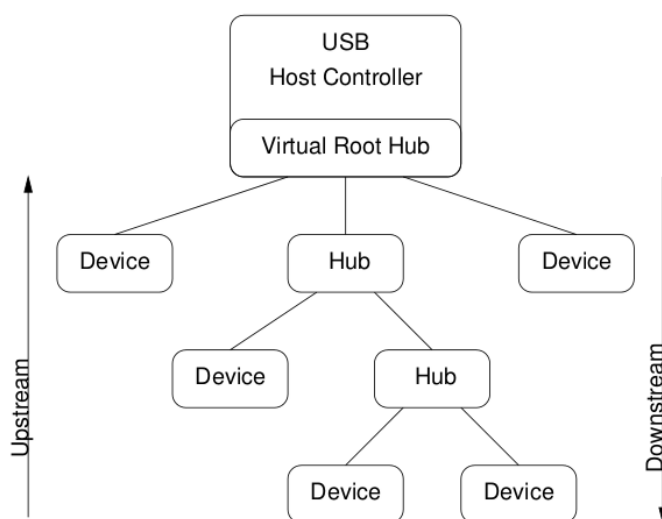


Figura 3.1: *Topología tipo estrella*

Desde el punto de vista lógico un dispositivo (comúnmente llamado función) posee un conjunto de *EndPoints*, los que le permiten enviar y recibir datos. Un conjunto de *EndPoints* forma parte de concepto de mayor abstracción llamado interfaz y es el que va a especificar cuales son las características de comunicación de un dispositivo.



### 3.1.2. Transferencia

El *USB* está diseñado para manejar distintos tipos de periféricos con una gran variedad de requerimientos como lo son la frecuencia de transferencia, tiempo de respuesta y corrección de errores. El estándar define cuatro tipos de transferencias las que manejan diferentes necesidades. De esta manera los dispositivos pueden utilizar los tipos de transferencias que mejor se adecuen para sus propósitos.

El enlace virtual (*pipe*) puede ser de cuatro tipos:

1. *Control*
2. *Bulk*
3. *Interrupt*
4. *Isochronous*

**Control:** Modo utilizado para realizar configuraciones.

Existe siempre sobre el Punto terminal 0 (*EndPoint 0*). Todos los dispositivos *USB* deben soportar este tipo de transferencia. Los datos de control sirven para configurar el periférico en el momento de conectarse al *USB*. Algunos *drivers* específicos pueden utilizar este enlace para transmitir su propia información de control. Este enlace no tiene pérdida de datos, puesto que los dispositivos de detección de recuperación de errores están activos a nivel *USB*.

**Bulk:** Este modo se utiliza para la transmisión de importantes cantidades de información, no tiene pérdida de datos. Es útil cuando la razón de transferencia no es crítica como por ejemplo, el envío de un archivo a imprimir o la recepción de datos desde un escáner. La transferencia es rápida, pero puede esperar si fuera necesario. Solo los dispositivos de media y alta velocidad utilizan este tipo de transferencia.

**Interrupt:** Modo utilizado para transmisiones de pequeños paquetes, rápidos, orientados a percepciones humanas (*mouse*, punteros). Son para dispositivos que deben recibir atención periódicamente y lo utilizan los dispositivos de baja velocidad. Garantiza la transferencia de pequeñas cantidades de datos. El tiempo de respuesta no puede ser inferior al valor especificado por la interfaz. El dispositivo apuntador es una aplicación típica de este modo de transmisión.

**Isochronous** o Flujo en tiempo real: Modo utilizado para la transmisión de audio o video comprimido. Funciona en tiempo real. Este es el modo de mayor prioridad. La transmisión de la voz es un ejemplo de esta aplicación. Si ésta no se transmite correctamente, pueden llegar a oírse parásitos (*glitch*) y la aplicación puede detectar ciertos errores de los llamados *underruns*.

### 3.1.3. Enumeración

Cuando se conecta un dispositivo *USB* a la *PC* se produce el **Proceso de Enumeración**, el cual consiste en que el *Host* le pregunta al dispositivo que se presente y le diga cuales son sus parámetros, tales como:

- Consumo de energía expresada en unidades de Carga.
- Numero y tipos de Puntos terminales.
- Clase del producto.
- Tipo de transferencia
- Razón de escrutinio, etc.

El proceso de enumeración es inicializado por el *Host* cuando detecta que un nuevo dispositivo que ha sido adjuntado al *Bus*. El *Host* le asigna una dirección al dispositivo adjuntado al *Bus* y habilita su configuración permitiendo la transferencia de datos sobre el *Bus*.

### 3.1.4. Descriptores

Los descriptores *USB* son estructuras de datos, o bloques de información con formato, que le permiten al *Host* aprender acerca de un dispositivo. Cada descriptor contiene información acerca del dispositivo como un todo o un elemento del dispositivo como puede verse en la figura 3.2. Todos los dispositivos *USB* deben responder a pedidos para los descriptores *USB* estándar. El dispositivo debe guardar información de los descriptores y responder a sus pedidos.

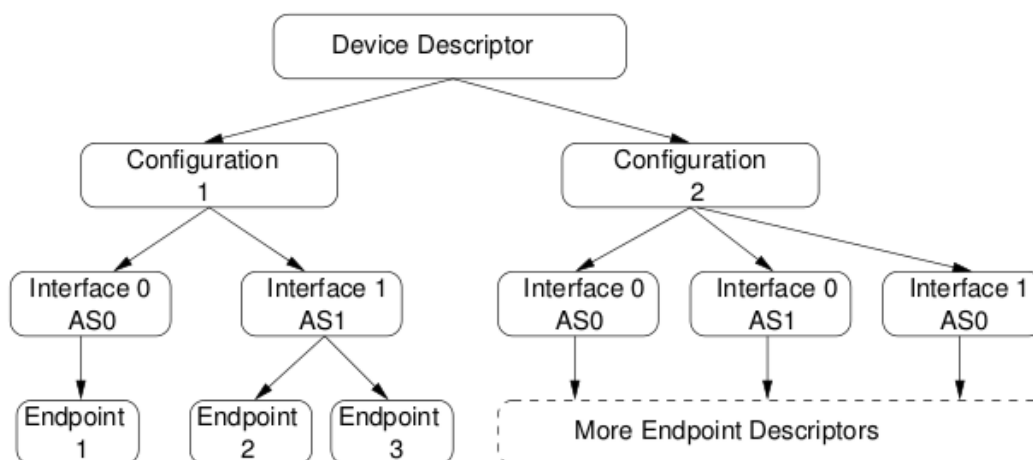


Figura 3.2: Jerarquía Descriptores

### 3.1.5. Funcionamiento

Los dispositivos tienen asociados canales lógicos unidireccionales, llamados *pipes*, que conectan al *Host* controlador con una entidad lógica en el dispositivo llamada *EndPoint*. Los datos son enviados en paquetes de largo variable. Típicamente estos paquetes son de 64, 128 o más bytes. Los *EndPoints* y sus respectivos *pipes*, son numerados del 0 al 15 en cada dirección, por lo cual un dispositivo puede tener hasta 32 *EndPoint* (16 de entrada y 16 de salida). La dirección se considera siempre desde el punto de vista del *Host* controlador. Así un *EndPoint* de salida será un canal que transmite datos desde el *Host* controlador al dispositivo. Un *EndPoint* solo puede tener una única dirección. El *EndPoint* 0 (en ambas direcciones) está reservado para el control del *Bus*.

Cuando un dispositivo es conectado al *Bus USB*, el *Host* controlador le asigna una dirección única de 7 bits (mediante el proceso de enumeración) que es utilizada luego en la comunicación para identificar el dispositivo. Luego, el *Host* controlador consulta continuamente a los dispositivos para ver si tienen algo para enviar, de manera que ningún dispositivo puede enviar datos sin la solicitud previa explícita del *Host* controlador. Para acceder a un *EndPoint* se utiliza una configuración jerárquica de la siguiente manera: un dispositivo (llamado función) conectado al *Bus* tiene un único descriptor de dispositivo, quien a su vez tiene uno (o varios) descriptores de configuración. Estos últimos guardan generalmente el estado del dispositivo (ej: activo, suspendida, ahorro de energía, etc). Cada descriptor de configuración tiene uno (o más) descriptores de interfaz.

Y éstos últimos finalmente son los que contienen los *EndPoint*, que a su vez pueden ser reutilizados entre varias interfaces (y distintas configuraciones) como muestra la figura 3.3.

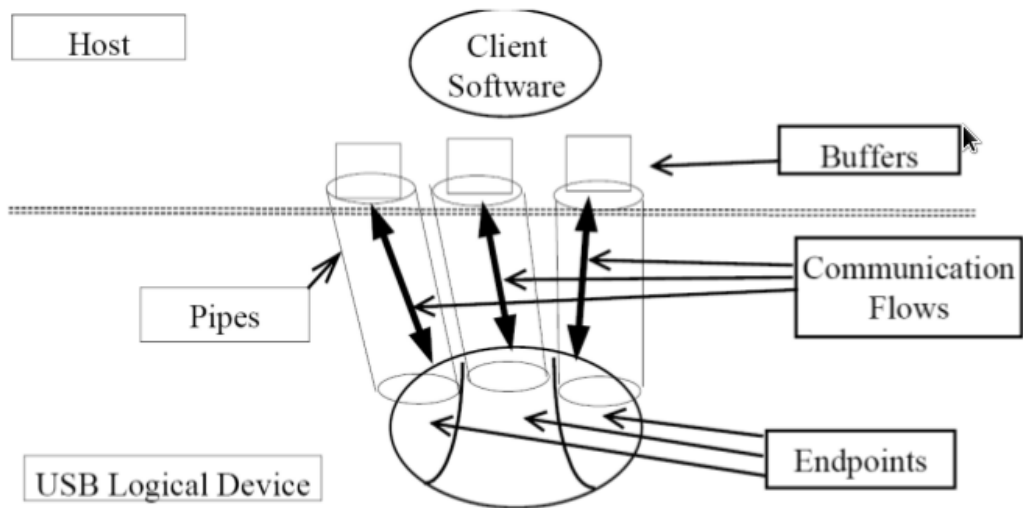


Figura 3.3: Comunicación Virtual Entre un Dispositivo y el Host

### 3.1.6. Interfaz física

A nivel eléctrico, el cable *USB* transfiere la señal y la alimentación sobre 4 hilos (figura 3.4).

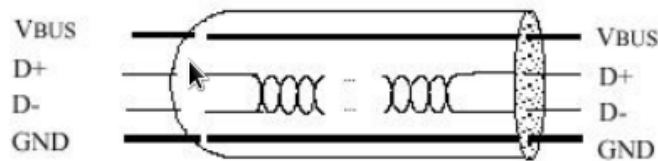


Figura 3.4: Interfaz Física

**A nivel de alimentación:** El cable proporciona la tensión nominal de 5 V. Es necesario definir correctamente el diámetro del hilo con el fin de que no se produzca una caída de tensión demasiado importante en el cable.

Una resistencia de terminación instalada en la línea de datos permite detectar el puerto y conocer su configuración (1,5 o 12 Mbits/s).

**A nivel de señal:** Se trata de un par trenzado con una impedancia característica de 90. La velocidad puede ser tanto de 12 Mbits/s como de 1,5 Mbits/s. La sensibilidad del receptor puede ser de, al menos, 200mV y debe poder admitir un buen factor de rechazo de tensión en modo común. El reloj se transmite en el *flow* de datos, la codificación es de tipo NRZI (por sus siglas en inglés), existiendo un dispositivo que genera un bit de relleno (*bit stuffing*) que garantiza que la frecuencia de reloj permanezca constante. Cada paquete va precedido por un campo de sincronismo.

**Consumo:** Cada sección puede proporcionar una determinada potencia máxima siendo el *PC* el encargado de suministrar la energía. Además, el periférico puede estar auto-alimentado (*self powered*).

**Control de consumo:** El ordenador gestiona el consumo, teniendo capacidad de poner en reposo (*suspend*) o en marcha a un periférico *USB*. En reposo, este reduce su consumo (si puede), quedándose la parte *USB* funcional. Esta gestión está orientada especialmente a los equipos portátiles.

## 3.2. Microcontrolador Microchip Pic18f4550

### 3.2.1. Características

<sup>1</sup>

El Microcontrolador ( $\mu C$ ) Pic18f4550 pertenece a la familia PIC18f de Microchip.

#### Características generales:

- Alimentación 5 volts.
- Consumo 228 mA.
- Velocidad de muestreo 20 Msps.
- Ancho de banda 5 Mhz.
- Impedancia de entrada 10 MW.
- Modulo PWM.
- Resolución 488  $\mu V$ .
- Memoria en placa 4096 palabras de 18bits.
- Velocidad de transferencia (USB) 12Mbps.

---

<sup>1</sup>La información de los dispositivos Electrónicos se obtuvieron de las hojas de datos (Datasheet)poporcionadas por los distribuidores

**Características Funcionales:**

Características	PIC18F4550
Frecuencia de Operación	Hasta 48MHz
Memoria de Programa (bytes)	32.768
Memoria RAM de Datos (bytes)	2.048
Memoria EEPROM Datos (bytes)	256
Interruptores	20
Líneas de E/S	35
Temporizadores	4
Módulos de Comparación/Captura/PWM (CCP)	1
Módulos de Comparación/Captura/PWM Mejorado (ECCP)	1
Canales de Comunicación Serie	MSSP. EUSART
Canal USB	1
Puerto Paralelo de Transmisión de Datos (SPP)	1
Canales de Conversión A/D de 10 bits	13 Canales
Comparadores Analógicos	2
Comparadores Analógicos	75 (83 ext.)
Encapsulado	PDIP 40 pines QFN 40 pines TQFP 40 pines

Tabla 3.1: Características de  $\mu C$  PIC18F4550

Se muestra en la figura 3.5 la configuración física del  $\mu C$  PIC18F4550.

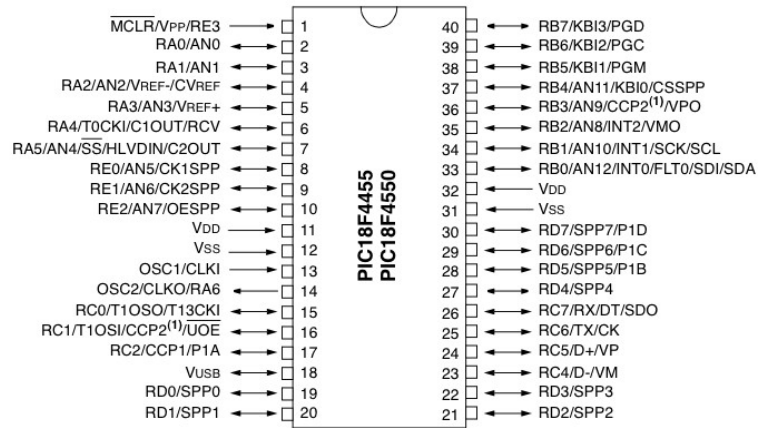


Figura 3.5:  $\mu C$  PIC18F4550

### 3.2.2. Organización de la memoria

El  $\mu C$  PIC18F4550 dispone de las siguientes memorias:

#### Memoria de programa:

- Memoria flash interna de 32.768 bytes.
- Almacena instrucciones y constantes/datos.
- Puede ser escrita/leída mediante un programador externo o durante la ejecución programa mediante unos punteros.



#### **Memoria RAM de datos:**

- Memoria SRAM interna de 2048 bytes en la que están incluidos los registros de función especial.
- Almacena datos de forma temporal durante la ejecución del programa.
- Puede ser escrita/leída en tiempo de ejecución mediante diversas instrucciones.

#### **Memoria EEPROM de datos:**

- Memoria no volátil de 256 bytes.
- Almacena datos que se deben conservar aun en ausencia de tensión de alimentación.
- Puede ser escrita/leída en tiempo de ejecución a través de registros.

#### **Pila:**

- Bloque de 31 palabras de 21 bits.
- Almacena la dirección de la instrucción que debe ser ejecutada después de una interrupción o subrutina.

#### **Memoria de configuración:**

- Memoria en la que se incluyen los bits de configuración (12 bytes de memoria flash) y los registros de identificación (2 bytes de memoria de solo lectura).

Como se observa la distribución de memoria en la figura 3.7.

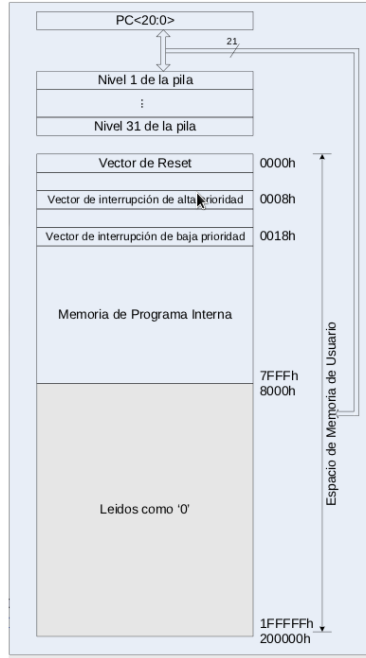


Figura 3.6: Distribución de memoria de  $\mu C$  PIC18F4550

### Memoria de Configuración

El bloque de memoria situado a partir de la posición 30000H de memoria de programa (más allá de la zona de memoria de programa de usuario). En esta memoria de configuración se incluyen:

- **Bits de configuración:** Contenidos en 12 bytes de memoria flash permiten la configuración de algunas opciones del  $\mu C$ :
  - \* Opciones del oscilador.
  - \* Opciones de reset.
  - \* Opciones del watchdog.
  - \* Opciones de la circuitería de depuración y programación.
  - \* Opciones de protección contra escritura de memoria de programa y memoria EEPROM de datos.

Estos bits se configuran generalmente durante la programación del  $\mu C$ , aunque también pueden ser leídos y modificados durante la ejecución del programa.

- **Registros de identificación:** se trata de dos registros situados en las direcciones 3FFFFEH y 3FFFFFFH que contienen información del modelo y revisión del dispositivo. Son registros de solo lectura y no pueden ser modificados por el usuario.

### 3.2.3. Convertidor Analógico-Digital

#### Características fundamentales:

- 10 bits de resolución.
- 13 canales multiplexados.
- Señal de reloj de conversión configurable.
- Tiempo de adquisición programable (0 a  $20T_{AD}$ ).
- Posibilidad de establecer el rango de tensiones de conversión mediante tensiones de referencia externas.

#### Selección del Canal de Conversión

Una vez configurado como línea de entrada analógica, un canal puede ser seleccionado mediante los bits CHS3..CHS0 del registro ADCON0.

CHS3	CHS2	CHS1	CHS0	Canal Seleccionado.
0	0	0	0	Canal AN0(RA0)
0	0	0	1	Canal AN1(RA1)
0	0	1	0	Canal AN2(RA2)
0	0	1	1	Canal AN3(RA3)
0	1	0	0	Canal AN4(RA5)
0	1	0	1	Canal AN5(RE0)
0	1	1	0	Canal AN6(RE1)
0	1	1	1	Canal AN7(RE2)
1	0	0	0	Canal AN8(RB2)
1	0	0	1	Canal AN9(RB3)
1	0	1	0	Canal AN10(RB1)
1	0	1	1	Canal AN11(RB4)

1	1	0	0	Canal AN12(RB0)
1	1	0	1	No Implementado
1	1	1	0	No Implementado
1	1	1	1	No Implementado

Tabla 3.2: Canales Análogos  $\mu C$  PIC18F4550

### Rango de Tensiones de Conversión

Por defecto el rango de tensiones de conversión del convertidor A/D del PIC18F4550 es de 0V a 5V. Sin embargo, en ocasiones puede resultar interesante modificar este rango para aumentar la resolución de la conversión acercando las tensiones de referencia máxima y mínima  $V_{REF+}$  y  $V_{REF-}$  a los límites de variación de la señal que se desea digitalizar.

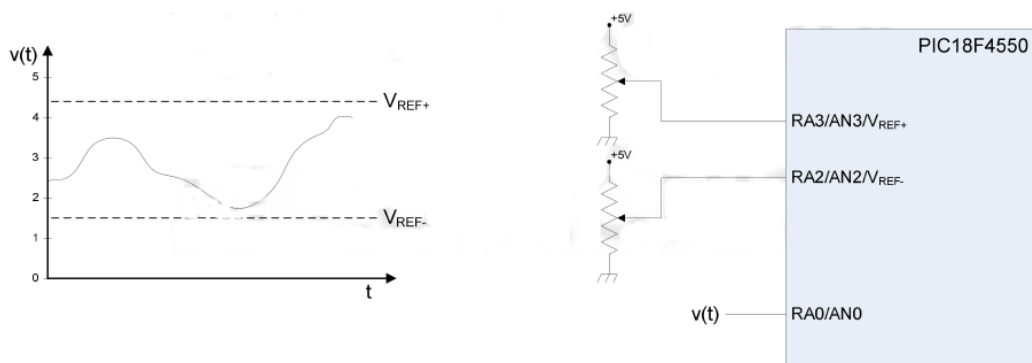


Figura 3.7: Rango de ADC del  $\mu C$  PIC18F4550

Esto se puede conseguir configurando las líneas RA2/AN2/  $V_{REF-}$  y RA3 / AN3/ $V_{REF+}$  como tensiones de referencia del convertidor A/D (poniendo a '1' los bits VCFG1 y VCFG0 del registro ADCON1). De esta forma el rango de tensiones de conversión vendrá determinado por las tensiones que se conecten en dichas líneas.

### Señal de Reloj de Conversión

Se define  $T_{AD}$  como el tiempo de conversión de 1 bit. Una operación completa de conversión requiere un total de 11  $T_{AD}$  para 10 bits. La señal de reloj que genera los temporizadores  $T_{AD}$  puede ser establecida mediante los bits ADCS2..ADCS0 del registro ADCON2. Existen dos fuentes para dicha señal de reloj:

- El oscilador principal.
- Una red RC interna que incorpora el propio convertidor A/D. Esta red puede utilizarse cuando se deseen realizar conversiones en modos de bajo consumo. Esta red RC permite que se puedan llevar a cabo conversiones con el oscilador principal desactivado.

ADCS2	ADCS1	ADCS0	Señal de Reloj de Conversión
0	0	0	$F_{OSC}/2$
0	0	1	$F_{OSC}/8$
0	1	0	$F_{OSC}/32$
0	1	1	$F_{RC}$ (Oscilador RC interno)
1	0	0	$F_{OSC}/4$
1	0	1	$F_{OSC}/16$
1	1	0	$F_{OSC}/64$
1	1	1	$F_{RC}$ (Oscilador RC interno)

Tabla 3.3: Señal de Reloj de Conversión

El valor de  $T_{AD}$  debe ser lo menor posible pero siempre superior al  $T_{AD}$  mínimo indicado en las hojas de datos de PIC18F4550:  $0,7\mu s$ .

### Establecimiento del Tiempo de Adquisición

La circuitería interna del convertidor A/D incorpora un condensador de muestreo. Antes de realizar una conversión debemos asegurarnos de que dicho condensador ha sido totalmente cargado a la tensión del canal seleccionado. Cuando realizamos un cambio en la selección de canal debemos esperar un tiempo que dependerá de la impedancia de entrada del convertidor A/D y de la impedancia de salida del circuito sobre el que se está haciendo la conversión.

Existen dos opciones para generar este retardo antes de comenzar la conversión:

- **Por programa:** se implementa un retardo software entre la selección del nuevo canal y el inicio de la conversión.
- **Estableciendo un tiempo de adquisición automático:** se programa un tiempo de adquisición que se establecerá de forma automática entre

la orden de inicio de conversión y el muestreo de la señal para iniciar la conversión. Dicho tiempo puede ser programado mediante los bits ACQT2..ACQT0 del registro ADCON2. Este tiempo puede tener unos valores que oscilan entre  $2 \times T_{AD}$  y  $20 \times T_{AD}$ .

ACQT2	ACQT1	ACQT0	Tiempo de Adquisición
0	0	0	$0 \times T_{AD}$
0	0	1	$2 \times T_{AD}$
0	1	0	$4 \times T_{AD}$
0	1	1	$6 \times T_{AD}$
1	0	0	$8 \times T_{AD}$
1	0	1	$12 \times T_{AD}$
1	1	0	$16 \times T_{AD}$
1	1	1	$20 \times T_{AD}$

Tabla 3.4: Establecimiento del Tiempo de Adquisición

### 3.3. Amplificador de Instrumentación INA131B

#### 3.3.1. Descripción

El *INA131B* es de bajo costo, amplificador de instrumentación de uso general con ganancia  $G = 100$  que ofrece una excelente precisión. En el chip el recorte de laser en las resistencias de precisión conjuntan una ganancia fija de 100, para lograr la compensación de tensión muy baja ( $50mV$  max), la deriva ( $0.25mV/C$  max), y de alta *CMR* ( $110dB$  min) como muestra la figura 3.8. Protección de la entrada interna puede soportar hasta entradas  $\pm 40V$  sin sufrir daños.

#### Información

Las aplicaciones con fuentes de alimentación de alta impedancia o ruidoso puede requerir desacoplamiento capacitivos cerca del dispositivo. La salida de referencia (*Ref*) de la terminal es normalmente conectado a tierra. Debe ser una conexión de baja impedancia para asegurar un buen rechazo en modo común.

#### 3.3.2. Ajuste de ganancia

Para una ganancia de 100 no requiere resistencia, para ajustar la ganancia requiere de una ganancia resistiva, las ventajas del *INA131* es la excelente

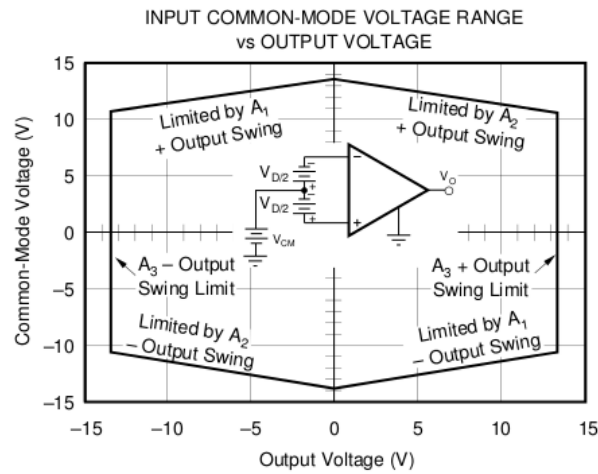


Figura 3.8: Rango de Voltajes del INA131B

precisión de las ganancias y estabilidad de temperatura. La ganancia se distribuye entre las etapas de entrada y salida del *INA131*. El ancho de banda se incrementa en 5 veces en comparación con otros dispositivos de la misma familia.

Aunque el *INA131* está destinado principalmente a ganancias fijas  $G = 100$ , las aplicaciones de ganancia se puede aumentar mediante la conexión de una resistencia externa a los pines de  $R_G$ . Las resistencias internas se recortan de proporciones precisas, no los valores absolutos, por lo que la influencia de una resistencia externa puede variar de un dispositivo a otro. La precisión absoluta de los valores internos es de  $\pm 40\%$ .

La ganancia nominal con una resistencia  $R_G$  externo puede ser calculada por:

$$G = 100 + \frac{250K}{R_G} \quad (3.1)$$

Donde:

$R_G$  es la resistencia externa de ganancia.

La precisión de  $250K\Omega$  es de  $\pm 40\%$ .

La estabilidad y el cambio de temperatura del entorno externo de la ganancia resistiva,  $R_G$ , también afecta a la ganancia.

### 3.4 Amplificadores monolíticos del termopar con compensación de unión fría AD594

53

La contribución de  $R_G$  para ganar precisión y la deriva se desprende directamente de la ecuación 3.1 de ganancia, del cual, muestra el diagrama esquemático de la figura 3.9.

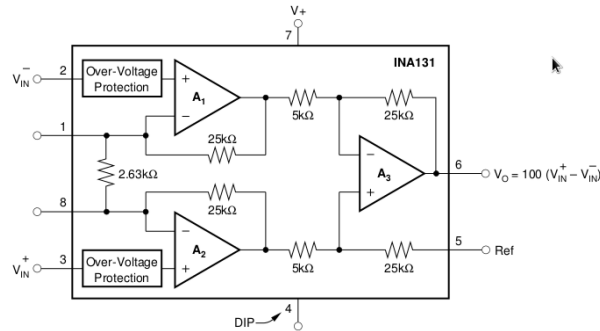


Figura 3.9: Esquemático de INA131B

#### Ruido de Rendimiento

El *INA131B* proporciona ruido muy bajo en la mayoría de las aplicaciones. El Ruido de baja frecuencia de la *INA131B* es de aproximadamente  $0.4mV_{p-p}$  mide de 0.1 a  $10Hz$ . Esto es aproximadamente una décima parte del ruido del helicóptero estabilizado el estado de la técnica de los amplificadores.

#### Entrada de las Corriente de Retorno

La impedancia de entrada de la *INA131B* es extremadamente alta de aproximadamente  $10^{10}\Omega$ . Sin embargo, las trayectorias de corriente debe de ser las mismas para ambas entradas. Estas entradas son típicamente menores a  $\pm 1nA$ .

## 3.4. Amplificadores monolíticos del termopar con compensación de unión fría AD594

### 3.4.1. Descripción

El *AD594/AD595* (figura 3.10) es un amplificador de instrumentación completa y el compensador de unión fría del termopar en un chip monolítico. Combina un punto de referencia de hielo con un amplificador de pre-calibrado para producir un nivel alto ( $10mV/^{\circ}C$ ) la producción directa de una señal de



### **3.4 Amplificadores monolíticos del termopar con compensación de unión fría AD594**

---

**54**

termopar. La robustez le permiten ser utilizado como un amplificador lineal-compensador o como un controlador de salida de conmutación de punto de ajuste utilizando el control remoto o punto de ajuste fija.

### 3.4 Amplificadores monolíticos del termopar con compensación de unión fría AD594

Puede ser utilizado para amplificar la tensión de compensación directa, convirtiéndolo en un *stand-alone* Celsius transductor con una impedancia de salida de baja tensión.

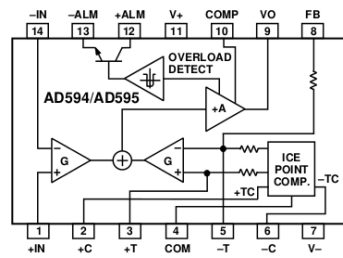


Figura 3.10: Esquemático de AD549

El AD594 incluye una alarma de falla, como muestra la figura 3.11 de termopar que indica si uno o ambos cables del termopar se abren. La salida de alarma tiene un formato flexible, que incluye la capacidad de manejar *TTL*.

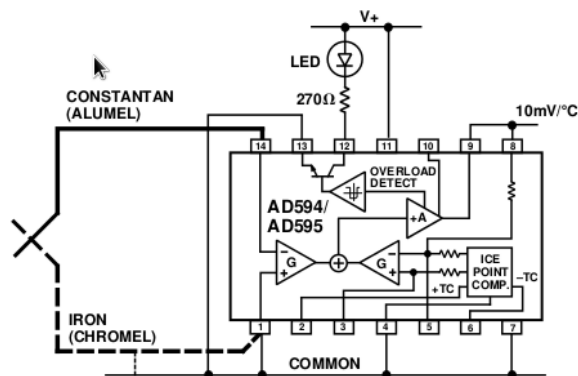


Figura 3.11: Configuración de AD594

El AD594 puede ser alimentado desde una fuente de una sola terminación (incluyendo +5V) y la inclusión de una fuente negativa, da una lectura de temperaturas inferiores a 0°C. Para minimizar el calentamiento espontáneo, un AD594 normalmente operan con un suministro total de 160mA de corriente y es capaz de entregar más de ±5mA a una carga.

Los voltajes de transducción de temperatura y la ganancia de control resistivo están disponibles en el encapsulado del paquete y pueden ser re-calibrados con la adición de resistencias.

### 3.4.2. Interpretación del AD594 en el Voltaje de Salida

Para lograr una salida de temperatura proporcional de  $10mV/^\circ C$  y precisión (figura 3.13) para compensar la unión de referencia en el rango de operación nominal del circuito, el AD594 es el aumento de recortar para que coincida con la característica de transferencia de  $J$  y termopares tipo  $K$  a  $25^\circ C$ . Para una salida de tipo  $J$  en este rango de temperatura de la  $TC$  es  $51.70mV/^\circ C$ , mientras que para un tipo  $K$  es  $40.44mV/^\circ C$ . La ganancia resultante para el AD594 es 193.4 ( $10mV/^\circ C$  dividido por  $51,7mV/^\circ C$ ). Además, un ajuste de la precisión absoluta induce un desplazamiento de entrada a la característica de salida del amplificador de  $16mV$  para el AD594. Esta desviación se debe a que el AD594 se recorta por una salida de  $250mV$  mientras que la aplicación a  $25^\circ C$  de entrada del termopar.

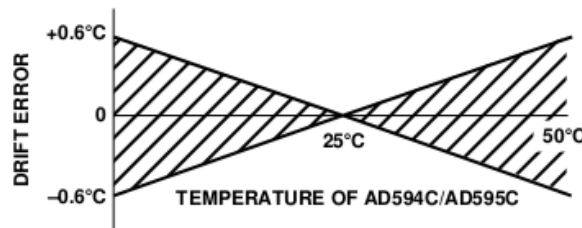


Figura 3.12: Deriva de error vs Temperatura de AD549

Debido a una tensión de salida del termopar no es lineal con respecto a la temperatura, y el AD594 linealmente amplifica la señal de compensación, las siguientes funciones de transferencia se debe utilizar para determinar las tensiones de salida real:

$$AD594 \text{ salida} = (\text{tipo de termopar} + 16\mu V) \times 193.4 \quad (3.2)$$

## 3.5. Transistor de potencia MJ15022

El MJ15022 es un transistor de potencia de base, diseñado para audio de alta potencia, con un potencial máximo de 250W, una corriente de 16A , posicionadores de cabeza de disco y otras aplicaciones lineales.

### 3.5.1. Características

Tipo de Característica	Valor de la Característica
Tipo	NPN
Corriente de colector DC máxima	16A
Tensión máxima de Colector-Emisor $V_{CE}$	200V
Encapsulado fabricante	TO-204
Configuración	Doble
Frecuencia de funcionamiento máxima	4MHz
Tensión base del Colector máxima	350V
Tensión máxima base-emisor	5V
Número de pines	3
Temperatura de funcionamiento máxima	200°C
Temperatura de funcionamiento mínima	-65°C
Montaje	Bornes

Tabla 3.5: Características del MJ15022

El comportamiento del funcionamiento seguro en el área de operación del transistor MJ15022 se ilustra en la figura 3.13.

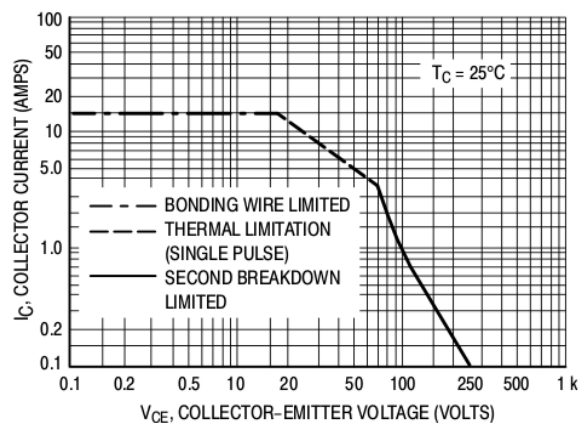


Figura 3.13: Rango de Activación

---

# Capítulo 4

## Metodología del Diseño

---

### 4.1. Desarrollo de comunicación

El dispositivo que se utilizó fue el microcontrolador *PIC18f4550* de Microchip, por ser un dispositivo de comunicación serial, que cumple las características necesarias para el proyecto desarrollado. El sistema que se caracterizó requirió de gran eficiencia, sensibilidad y de fácil manejo.

La parte fundamental para la comunicación del sistema está constituido en los dos subsistemas: La Tarjeta de Adquisición y El Panel Virtual. La primera la constituye el microcontrolador, es el periférico de comunicación entre lo físico y lo virtual. La otra es la comunicación del ordenador con la *TAC*.

### 4.1.1. Desarrollo de la arquitectura de la TAC (Tarjeta de Adquisición de Datos)

El siguiente dibujo muestra el diagrama de la TAC con las conexiones necesarias para el manejo de los puertos: entradas analógicas, salidas digitales, PWM, componentes para el funcionamiento correcto del dispositivo, el modulo del Masterclear y Reset; los dos tipos de modalidad Run y Bootloader, y sus respectivos indicadores.

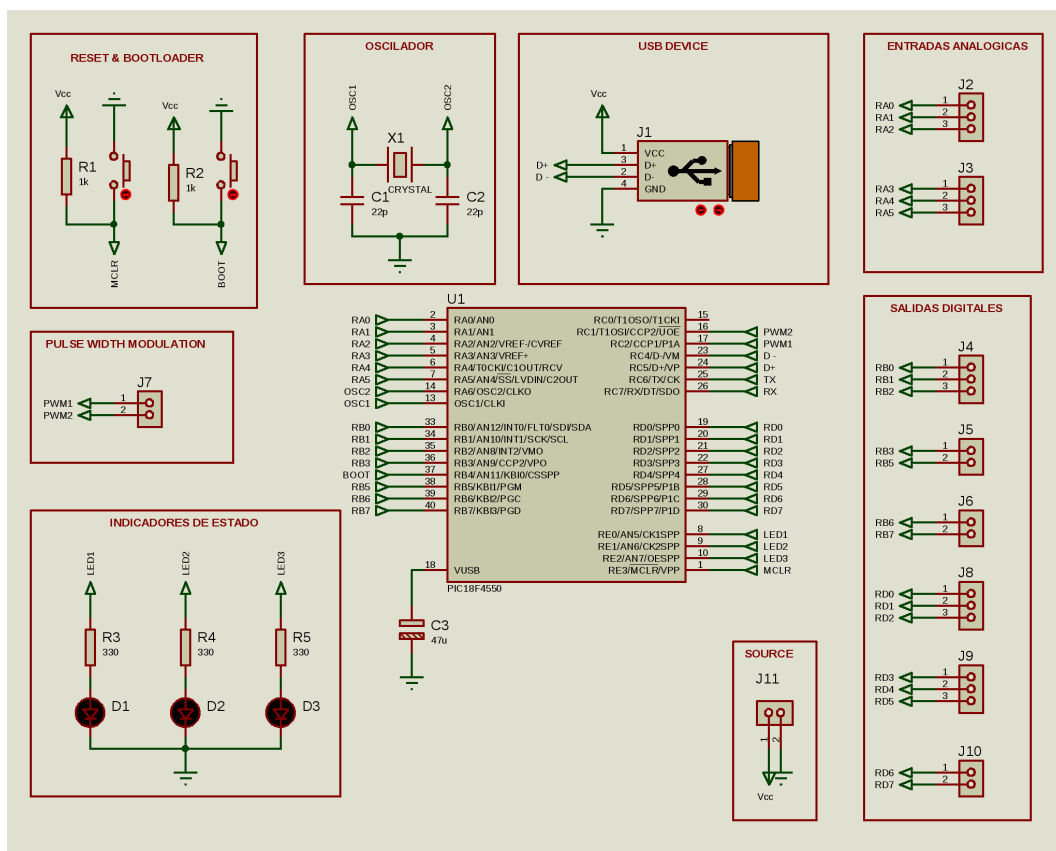


Figura 4.1: Diagrama esquemático de TAC

En la siguiente tabla 4.1 se describe cada pin del microcontrolador 18F4550 de Microchip.

<i>Nombre PIN</i>	<i>NUM PIN</i>	<i>Tipo PIN</i>	<i>Descripción</i>
$RA_{0...5}$	2,3,4,5,6,7	I/O TTL	PORTA bidireccional puerto I/O. Digital I/O. Entrada Analógica.
$OSC_{1,2}$	13,14	I	Cristal oscilador externo.
$RB_{0...3,5...7}$	33...36,38...40	I/O TTL	PORTB bidireccional puerto I/O. Digital I/O. Entrada Analógica.
$RD_{0...7}$	19...22,27...30	I/O TTL	PORTD bidireccional puerto I/O. Digital I/O.
$D-, D+$	23,24	I/O TTL	Linea diferencial de transmisión de datos puerto USB (menos,mas)
$Rx, Tx$	25,26	I/O ST	Linea diferencial de transmisión de datos SPI.
$PWM_{1,2}$	16,17	ST	Salida Modulación de ancho de pulsos (Pulse Width Modulation).
$RB_4$	37	I/O	Arranque en modo Run y loader
$MCLR$	1	I	Master Clear (Reset).

Tabla 4.1: *Especificación del PIC18F4550*

TTL = TTL compatible input

I = Input

ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels

O = Output

El diseño del *PCB* se desarrollo en *ARES PROFESIONAL 7 PROTEUS*. En las siguientes imágenes 4.2 se muestra el *PCB* y la vista en 3D.

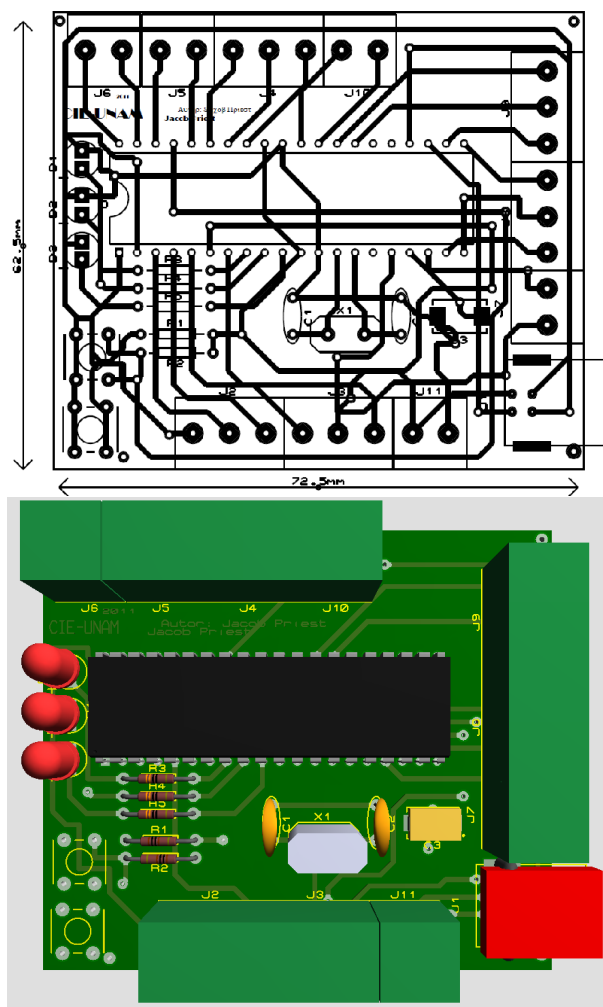


Figura 4.2: *PCB* y *Vista 3D* de TAC



## 4.2. Diseño de Control de Carga

El análisis del cual se realizó el control de carga de las Celdas de Combustible PEM, fue a partir de su comportamiento eléctrico, que es una analogía del comportamiento electroquímico, partiendo de la ecuación 2.3 nos indica que la corriente es inversamente proporcional a la resistividad interna en conjunto con el de carga, los sistemas de caracterización de Celdas de Combustible se basan en un sistema de carga resistivo (resistencia variable), por este motivo no tienen una sensibilidad adecuada para las nuevas tecnologías de Microceldas que se encuentran en el orden de los microamperes y microvolts.

### 4.2.1. Sistemas Tradicionales

En la figura 4.3 representa el comportamiento de la corriente ( $i$ ) en función del voltaje y la resistividad de la carga de la Celda de Combustible. La corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente a la resistencia como indica la ley de Ohm (ecuación 4.1),

$$I = \frac{V}{R} \quad (4.1)$$

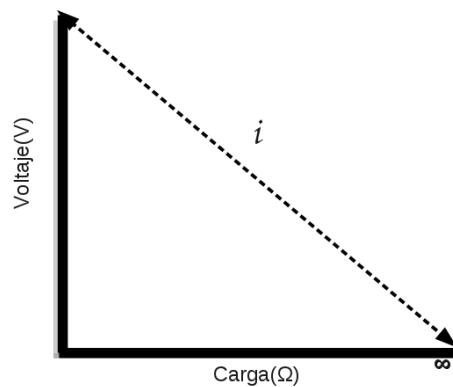


Figura 4.3: Comportamiento de la Corriente con Respecto a V-R

En los equipos tradicionales como muestra la figura 4.4 varían la carga (*Load*) resistiva y siempre sera  $R < \infty$ , por lo que, la sensibilidad no es la adecuada para Microceldas de Combustible.

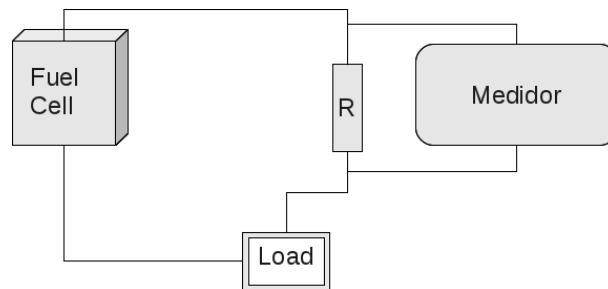


Figura 4.4: *Esquema de Caracterizadores Tradicionales*

En los equipos análogos que se encuentran en el laboratorio de Hidrógeno del CIE, no cuentan con la sensibilidad adecuada para las Microceldas que en la actualidad están desarrollando los investigadores de este centro de investigación.

### 4.3. Esquema del Sistema de Carga

Partiendo de este análisis se desarrolló el modelo esquemático (figura 4.5) del control de carga.

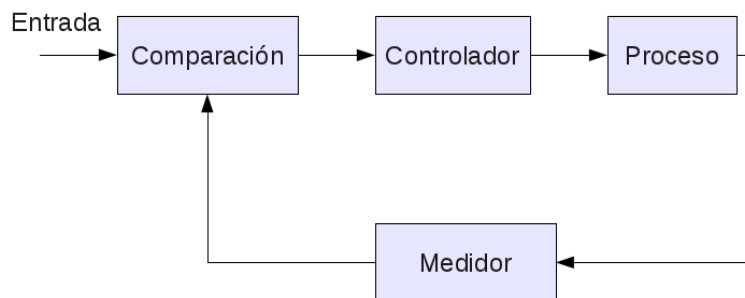


Figura 4.5: *Esquema de Control de Carga Diseñado*

El sistema proporciona un control en lazo cerrado, el subsistema de proceso es referente a la Celda de Combustible, por el cual el subsistema de control regula la variación de corriente, el subsistema de medición es el encargado de sensar y cerrar el ciclo en una comparación con una entrada referente para el control del siguiente subsistema.

## 4.4. Análisis del Sistema de Control de Carga

Partiendo del esquema del sistema de carga se analizó la forma mas adecuada para el control de corriente a partir de un control de voltaje del cual puede ser controlado digitalmente. Por lo tanto, nuestro sistema de control se puede generalizar con el siguiente diagrama a bloques (figura 4.6). Donde, la relación  $V_{in}$  e  $i_{out}$  es proporcional a  $H$ , este, es el sistema de control de carga de la corriente de la Celda de Combustible expresada en la ecuación 4.2

$$H = \frac{i_{out}}{V_{in}} \quad (4.2)$$

Donde la relación de la entrada con la salida serán iguales por lo tanto:

$$V_{in} = i_{out}, \quad H = 1 \quad (4.3)$$

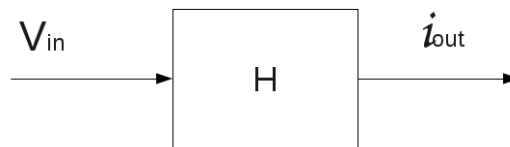


Figura 4.6: Diagrama General a Bloque del sistema de Control de Carga

De la ecuación 4.2 despejamos  $i_{out}$ :

$$i_{out} = V_{in} \bullet H \quad (4.4)$$

El sistema de control de carga se basa en el control de corriente a partir de una diferencial de voltaje, para referirnos a esta analogía representada con la ley de Ohm 4.1 en la figura 4.7:

Donde la ley de Ohm se cumple en el diseño tomando la relación  $T = \frac{1}{R}$

$$i_{in} = V_{out} \bullet T \quad (4.5)$$

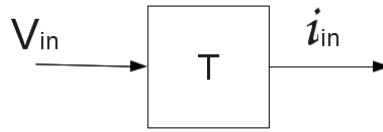


Figura 4.7: Diagrama Equivalente

De la ecuación de Ohm 4.1 el voltaje tiene una ganancia de potencial  $R$  veces la corriente, y la corriente tiene una ganancia inversamente proporcional ( $\frac{1}{R}$ ). Para que nuestro sistema cumpla con la relación de la ecuación 4.3 el sistema debe tener una ganancia inversamente a  $T$  por lo tanto:

$$i_{out} = i_{in} \cdot K \quad (4.6)$$

A nuestro sistema podemos representarlo con el diagrama de la figura 4.9.

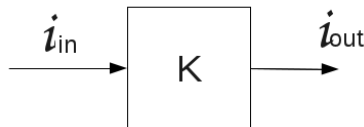


Figura 4.8: Diagrama Equivalente

Por lo tanto:

$$i_{out} = V_{out} \cdot K \quad (4.7)$$

En consecuencia, tenemos la relación entre  $V_{in}$  e  $i_{out}$ :

$$i_{out} = V_{in} \cdot T \cdot K \quad (4.8)$$

Como muestra la figura 4.9:

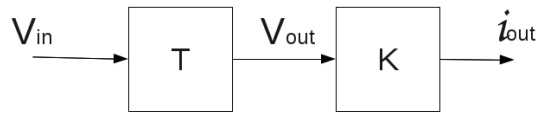


Figura 4.9: *Diagrama Equivalente*

A partir de la ecuación 4.8 se concluye la unificación en relación de  $V_{in}$  con  $i_{out}$  representando lo siguiente (figura 4.10):

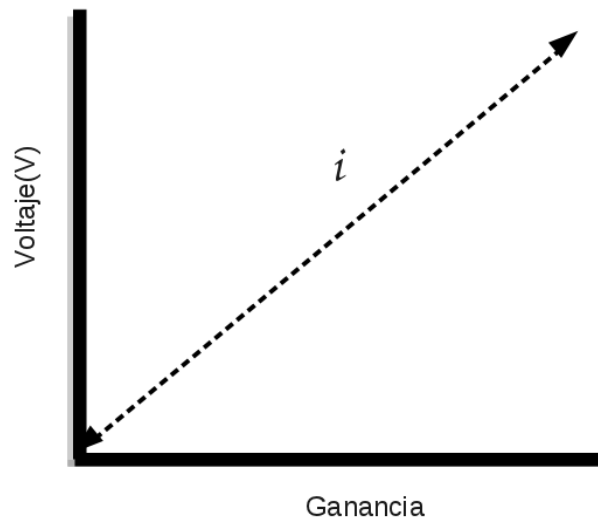


Figura 4.10: *Comportamiento de la Corriente en el Sistema Desarrollado*

Donde la ganancia representa una ganancia de corriente suministrada al sistema. Con este modelo verificamos que no depende de un sistema resistivo para el control de carga y concluimos que nuestro sistema está diseñado para Microceldas.

## 4.5. Control en Lazo Cerrado

Los sistemas de control en lazo cerrado se definen como aquellos en los que existe una retroalimentación de la señal de salida, o dicho de otra forma, aquellos en los que la señal de salida tiene efecto sobre la acción de control.

En algunas ocasiones, la señal controlada y la señal de referencia no son de la misma naturaleza.

De la teoría de Control se diseñó el sistema en lazo cerrado o retroalimentado a bloques como muestra la figura 4.11.

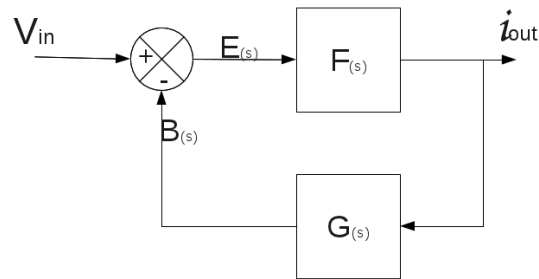


Figura 4.11: Diagrama a Bloques Lazo Cerrado

Donde:

$$B(s) = I_{out(s)} \cdot G(s) \quad (4.9a)$$

$$E(s) = V_{in(s)} - B(s) \quad (4.9b)$$

$$E(s) = V_{in(s)} - I_{out(s)} \cdot G(s) \quad (4.9c)$$

Por lo tanto, la salida es:

$$I_{out(s)} = F(s) \cdot E(s) \quad (4.10a)$$

$$I_{out(s)} = F(s) \cdot \left[ V_{in(s)} - I_{out(s)} \cdot G(s) \right] \quad (4.10b)$$

Despejando  $I_{out(s)}$  de la ecuación 4.10b obtenemos *la función de transferencia en lazo cerrado*.

$$I_{out(s)} = \frac{V_{in(s)} \bullet F(s)}{1 + F(s) \bullet G(s)} \quad (4.11)$$

Igualando las ecuaciones 4.11 con la 4.10a nos queda:

$$F(s) \bullet E(s) = \frac{V_{in(s)} \bullet F(s)}{1 + F(s) \bullet G(s)} \quad (4.12)$$

Despejando  $F(s)$ :

$$F(s) = \frac{V_{in(s)} - E(s)}{E(s) \bullet G(s)} \quad (4.13)$$

Sustituyendo de la ecuación 4.9c el valor de  $E(s)$  en la ecuación 4.13 cuando  $V_{in(s)} = i_{out(s)}$ :

$$F(s) = \frac{1}{1 - G(s)} \quad (4.14)$$

El diagrama a bloques sera:

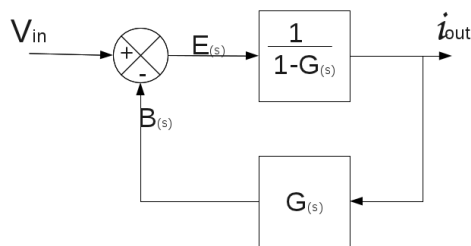


Figura 4.12: Diagrama a Bloque

Y  $B(s)$  es:

$$B(s) = i_{out(s)} G(s) \quad (4.15)$$

Sustituyendo  $E_{(s)}$  de la ecuación 4.9b en la ecuación 4.15 y despejando  $G_{(s)}$  para  $V_{in(s)} = i_{out(s)}$ :

$$G_{(s)} = 1 - \frac{E_{(s)}}{V_{in(s)}} \quad (4.16)$$

Sustituyendo valores en el diagrama de la figura 4.13

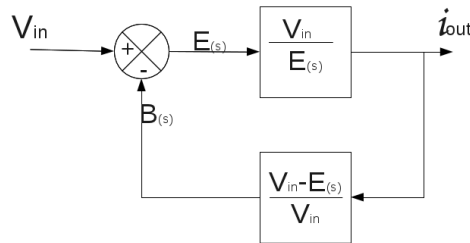


Figura 4.13: Diagrama a Bloque

Donde la relación de  $\frac{V_{in(s)}}{E_{(s)}}$  esta en función del voltaje, puesto que el sistema es un amplificador de corriente por lo tanto:

$$E_{(s)} = R \bullet i_{out(s)} \quad (4.17)$$

Despejando:

$$i_{in(s)} = \frac{E_{(s)}}{R} \quad (4.18)$$

De la ecuación 4.18 podemos deducir:

$$i_{out(s)} = K_i \bullet i_{in(s)} \quad (4.19)$$

Donde  $K_i$  es el factor de ganancia de corriente.



De lo anterior el diagrama a bloques queda:

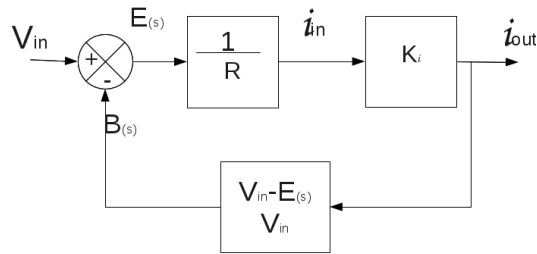


Figura 4.14: Diagrama a Bloque

La ganancia de retroalimentación  $\frac{V_{in(s)} - E(s)}{V_{in(s)}}$ , en realidad esta en función de la corriente  $i_{out_s}$ , que indica que la entrada es una corriente y la salida un voltaje para tener una relación con respecto a un voltaje tenemos:

$$V_{out(s)} = i_{out(s)} R_2 \tag{4.20}$$

Para que  $V_{out_s}$  sea directamente proporcional a  $V_{in_s}$  hay una ganancia  $K_v$ , equivalente al siguiente diagrama de la figura 4.15:

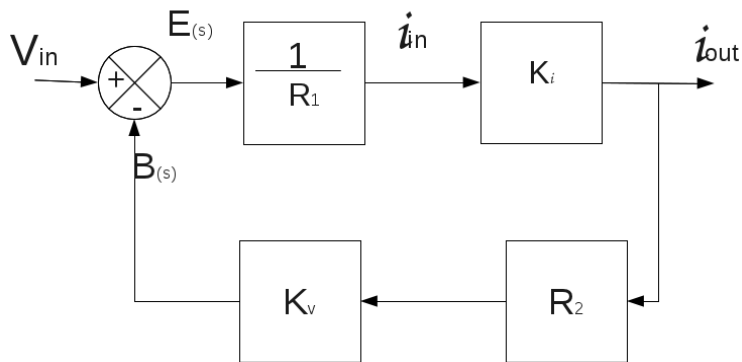


Figura 4.15: Diagrama a Bloque

Mediante este análisis de control se realizaron los cálculos para el control de carga.

### 4.5.1. Función de Transferencia: Transformada de Laplace

Un sistema se define como lineal en términos de su excitación y respuesta. En los circuitos eléctricos la excitación es la corriente de entrada  $i(t)$  y la respuesta es el voltaje  $v(t)$ . En general, para un sistema lineal puede determinarse una condición necesaria en función de una excitación  $x(t)$  y una respuesta  $y(t)$ . Cuando el sistema en reposo está expuesto a una excitación  $x_1(t)$ , proporciona una respuesta  $y_1(t)$ . Y cuando se someta a una excitación  $x_2(t)$  proporciona una respuesta  $y_2(t)$ . Para que un sistema sea lineal, es necesario que la excitación  $x_1(t) + x_2(t)$  de como resultado una respuesta  $y_1(t) + y_2(t)$ . Esto generalmente se conoce como el principio de **superposición**. Además, es necesario que en un sistema lineal conserve la magnitud del factor de escala a esto se denomina **propiedad de homogeneidad**.

La función de transferencia de un sistema se define como la relación entre la transformada de Laplace de la variable de salida y la transformada de Laplace de la variable de entrada, suponiendo que todas las condiciones iniciales se hacen iguales a cero. La función de transferencia de un sistema (o elemento) representa la relación que describe la dinámica del sistema considerado.

En nuestro sistema de control se optó por la ganancia de corriente  $K_i$  como muestra la figura 4.16, con un arreglo en cascada de transistores debido a que la corriente del dispositivo es proporcional a una ganancia del mismo arreglo para poder despreciar las pérdidas de polarización ohmica de una carga externa de la celda.

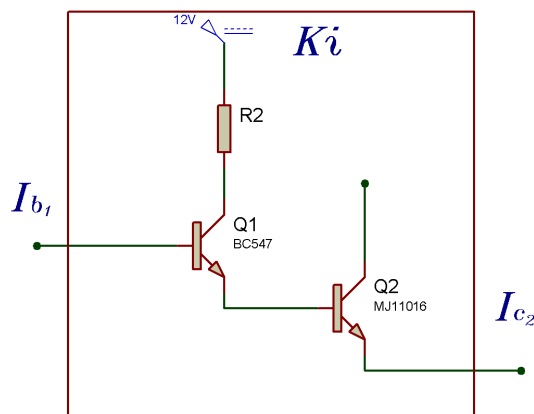


Figura 4.16: Transistor Darlington NPN

Para nuestra función de transferencia en  $Q_1$  tenemos que:

$$K_i = \frac{i_{c2}}{i_{b1}} \quad (4.21)$$

Donde tenemos:

$$\frac{\delta i_{c1}}{\delta t} = \frac{\delta \beta_1}{\delta t} \frac{\delta i_{b1}}{\delta t} \quad (4.22)$$

De la figura 4.16 tenemos:

$$\frac{\delta i_{c1}}{\delta t} = \frac{1}{R_2} \frac{\delta v_2}{\delta t} \quad (4.23)$$

Por lo tanto sustituyendo la ecuación 4.23 en 4.22 y despejando  $i_{b1}$  :

$$\frac{\delta i_{b1}}{\delta t} = \frac{1}{R_2} \frac{\frac{\delta v_2}{\delta t}}{\frac{\delta \beta_1}{\delta t}} \quad (4.24)$$

Para nuestra función de transferencia en  $Q_2$  tenemos que:

$$\frac{\delta i_{c2}}{\delta t} = \frac{\delta \beta_2}{\delta t} \frac{\delta i_{b2}}{\delta t} \quad (4.25)$$

Por el arreglo de transistores tenemos que:

$$\frac{\delta i_{b2}}{\delta t} = \frac{\delta i_{c1}}{\delta t} \quad (4.26)$$

Por lo tanto sustituyendo la ecuación 4.26 en 4.25 y despejando  $i_{c2}$  :

$$\frac{\delta i_{c2}}{\delta t} = \frac{\delta \beta_2}{\delta t} \left( \frac{1}{R_2} \frac{\delta v_2}{\delta t} \right) \quad (4.27)$$

Para la función de transferencia de la ecuación 4.24:

$$sI_{b_1}(s) - i_{b_1}(0^-) = \frac{1}{R_2}(sV_2(s) - v_2(0^-))\left(\frac{1}{s\beta_1(s) - \beta_1(0^-)}\right) \quad (4.28)$$

Cuando:

$$\left.\frac{\delta}{\delta t}\right|_{t=0^-} = 0 \quad (4.29)$$

Tenemos nuestro sistema en el sistema frecuencial  $t = 0$ , despejando  $I_{b_1}(s)$  en la ecuación 4.28:

$$I_{b_1}(s) = \frac{1}{R_2} \frac{V_2(s)}{s\beta_1(s)} \quad (4.30)$$

Para la función de transferencia de la ecuación 4.25:

$$I_{c_2}(s) = \frac{1}{R_2} s\beta_2 V_2(s) \quad (4.31)$$

De la ecuación 4.21 sustituimos las ecuaciones 4.30 y 4.31; resolvemos:

$$K_i = s^2\beta_1\beta_2 \quad (4.32)$$

La función de transferencia, debido a que tanto a  $\beta_1$  y  $\beta_2$  se tomó como variantes en el tiempo a nuestro arreglo de transistores, es un sistema homogéneo de segundo orden, por lo que su correspondencia matemática se tomó de cierta forma debido a la naturaleza de los semiconductores.

Nuestra función de transferencia para el sistema representada en el diagrama a bloques de la figura 4.15 es:

$$H = \frac{\frac{K_i}{R_1}}{1 + K_v R_2 \frac{K_i}{R_1}} \quad (4.33)$$

Dado que, los valores de  $R_1, R_2$  y  $K_v$  son constantes para cualquier factor de tiempo y sustituyendo  $K_i$  de la ecuación 4.31 tenemos:

$$H = \frac{s^2 \beta_1 \beta_2}{R_2 + s^2 K_v R_2 \beta_1 \beta_2} \quad (4.34)$$

#### 4.5.2. Cálculo del Sistema de Control de Carga

Los cálculos de control de carga se realizaron para una Celda de Combustible con una corriente máxima a 5A. El transistor NPN de potencia MJ15022 mostrada en la figura 4.17 se adecuó a las necesidades, por tener un rango de potencia de 250W.



Figura 4.17: Transistor MJ15022

Como podemos observar en la figura 4.18 para el factor de ganancia ( $h_{FE}$ ) necesario para una corriente de colector de 5A es de  $h_{FE} \cong 40$  con estos datos podemos determinar a partir de la ecuación 4.35 la corriente de base:

$$I_c = \beta I_b \quad (4.35)$$

donde:

$I_c$  = Corriente del Colector (A)

$I_b$  = Corriente de Base (A)

$\beta = h_{FE}$

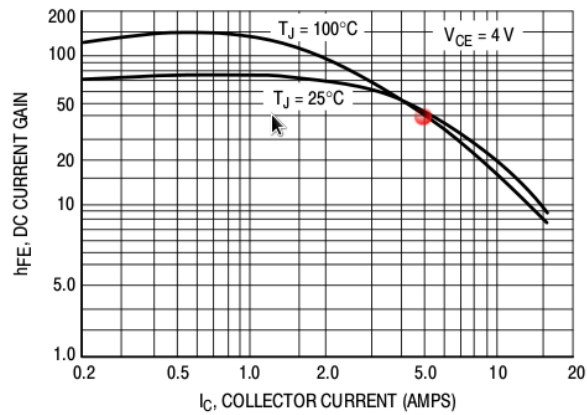


Figura 4.18: Ganancia de Corriente en DC

Despejando tenemos:

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} \quad (4.36)$$

Sustituyendo en la ecuación 4.36 los valores de  $\beta$  y corriente máxima de la Celda que sera la misma que el colector, da como resultado:

$$I_{b2} = \frac{I_{c2}}{\beta_2} = \frac{5A}{40} = 0.125A \quad (4.37)$$

donde:

$I_{b2}$  = Corriente de base del transistor MJ15022

$I_{c2}$  = Corriente de colector del transistor MJ15022

$\beta_2$  = Ganancia de transistor MJ15022

Esta es la corriente máxima de base que necesitamos de este transistor para obtener la máxima corriente de la Celda de Combustible a caracterizar.

Para la caracterización del transistor que controla la corriente de base del MJ15022, tiene que ser un tipo NPN y que no requiere de mucha potencia, se utilizó el transistor BC547, figura 4.19 por su distribución comercial.

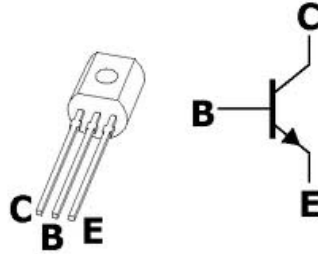


Figura 4.19: Transistor BC547

La ganancia de corriente de colector requerida para 0.125A, que es la misma de corriente de base para el transistor MJ15022, es aproximadamente a 0.5 ( $h_{FE}=0.5$ ) como muestra la figura 4.20:

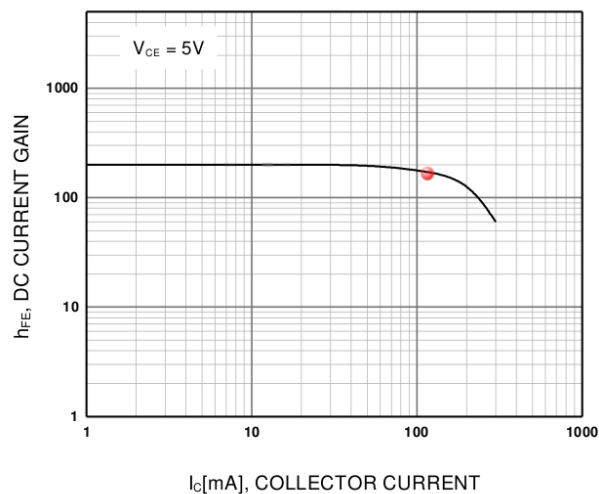


Figura 4.20: Ganancia de Corriente en DC

Para la corriente de colector del transistor BC547 variaremos un poco el diseño básico del transistor Darlington. Ahora, tomamos la corriente de colector como corriente máxima para la base del siguiente transistor (MJ15022) y por la ecuación 4.1 de Ohm, despejando  $R$ :

$$R = \frac{V}{I} \quad (4.38)$$

Sustituimos los valores para un potencial fijo de 12V y una corriente de 0.125A:

$$R = \frac{12V}{0.125I} = 96\Omega \approx 100\Omega \quad (4.39)$$

Para obtener nuestra corriente de base del transistor BC547 ( $I_{b_1}$ ) a partir de la ecuación 4.36 con el valor obtenido de la ecuación 4.37 y con  $h_{FE}=175$ :

$$I_{b_1} = \frac{I_{c_1}}{\beta_1} = \frac{0.125A}{175} = 0.714mA \quad (4.40)$$

donde:

$I_{c_1}$  = Corriente de colector del transistor BC547

$\beta_1$  = Ganancia de transistor BC547

En la figura 4.21 se muestra el arreglo de los transistores:

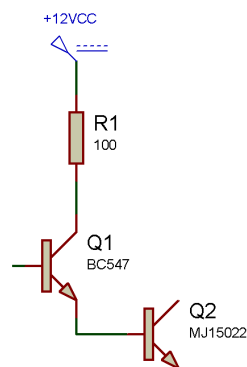


Figura 4.21: Arreglo con Transistores



El control de de corriente del transistor  $Q1$ , que es el transistor BC547 se requiere de una corriente máxima de  $0.714\text{mA}$ .

La generación de la corriente en la base de  $Q1$ , fue a partir de la diferencia potencial de control sobre una carga de la corriente de la Celda tipo PEM. Con esto, se observa que el diseño es un sistema de control retroalimentado. Para la operación de comparación se utilizo un Amplificador Operacional ( $OPAM$ ) de bajo ruido  $TL084CN$ . Calculamos la resistancia de la corriente de base de  $Q1$ :

$$R_1 = \frac{5V}{0.714\text{mA}} = 6999.9\Omega \approx 7K\Omega \quad (4.41)$$

La corriente generada en la carga( $R_1$ ) se controlo por una diferencia de potencia del  $OPAM$  de como se muestra en la figura 4.22:

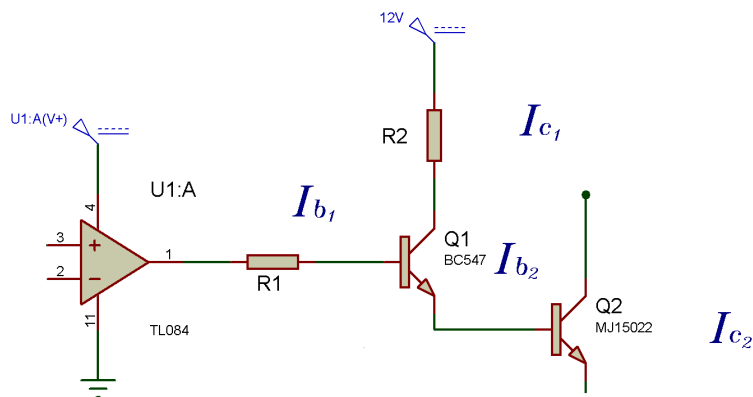


Figura 4.22: Arreglo con Transistores

Dado que, los transistores se encuentran en cascada  $I_{b2} = I_{c1}$ :

$$K_i = \beta_1 \beta_2 \quad (4.42)$$

El diseño de retroalimentación del sistema se basó en una carga ohmica constante( $R_3$ ), dando consigo una diferencia de potencia con respecto a la corriente de la Celda tipo  $PEM$  (figura 4.23)

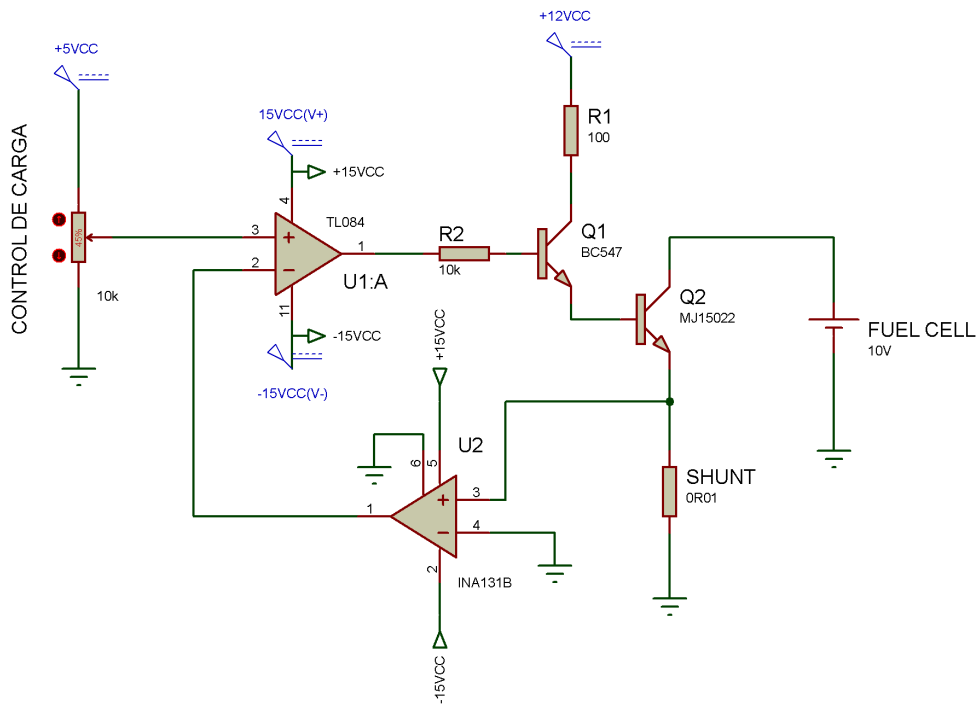


Figura 4.23: Arreglo con Transistores

### 4.5.3. Análisis de circuito

El análisis de circuito se realizó a partir del circuito de la figura 4.23:

$$(V_1 - V_2) - i_{b1}R_1 - 0.7V - 0.7V - i_{c2}R_3 = 0 \quad (4.43)$$

Donde:

$$i_{c2} = \beta_2 i_{b2} \quad (4.44)$$

$$i_{c1} = \frac{V_{cc}}{R_2} \quad (4.45)$$

Dado que,  $i_{c1} = i_{b2}$ :

$$i_{c2} = \beta_2 \frac{V_{cc}}{R_2} \quad (4.46)$$

Tambien:

$$i_{c1} = i_{b1}\beta_1 \quad (4.47)$$

$$i_{b1} = \frac{i_{c1}}{\beta_1} \therefore \quad (4.48)$$

$$i_{b1} = \frac{V_{cc}}{\beta_1 R_2} \quad (4.49)$$

Sustituyendo 4.46 y 4.49:

$$(V_1 - V_2) - R_1 \frac{V_{cc}}{\beta_1} - 1.4V - R_3 \beta_2 \frac{V_{cc}}{R_2} = 0 \quad (4.50)$$

Sabemos que  $V_1 - V_2 = \Delta V$ , sustituycmos y simplificamos:

$$\Delta V = \frac{V_{cc}}{R_2} \left( \frac{R_1 + R_3 \beta_1 \beta_2}{\beta_1} \right) + 1.4V \quad (4.51)$$

## 4.6. Sistema de Medición de Voltaje

La medición de Voltaje no tienen tanta complejidad como el control de carga debido a que los sistemas digitales procesan señales en función de un voltaje derivado del sistema físico, en este caso la Celda de Combustible. Los únicos procesos que se requieren para el diseño del sistema de medición es la amplificación de la señal correspondiente a los *microvolts* y la derivación cuando corresponda a un voltaje superior al rango de nuestro sistema de adquisición mostrada en la figura 4.24. El *PIC18F4550* cuenta con una resolución analógica de  $4.8mV$  hasta  $5V$  para voltajes inferiores a la resolución simplemente se amplifico la señal con un amplificador operacional *INA131B* que tiene una ganancia de 100 con respecto de la entrada y por ser un amplificador cuenta con grandes impedancias de entrada y amplificación eficiente para nuestro diseño. Para voltajes superiores la resolución del sistema de adquisición se optó por un arreglo de relevadores que activan una secuencia de resistencias para generar una diferencial de potencial.

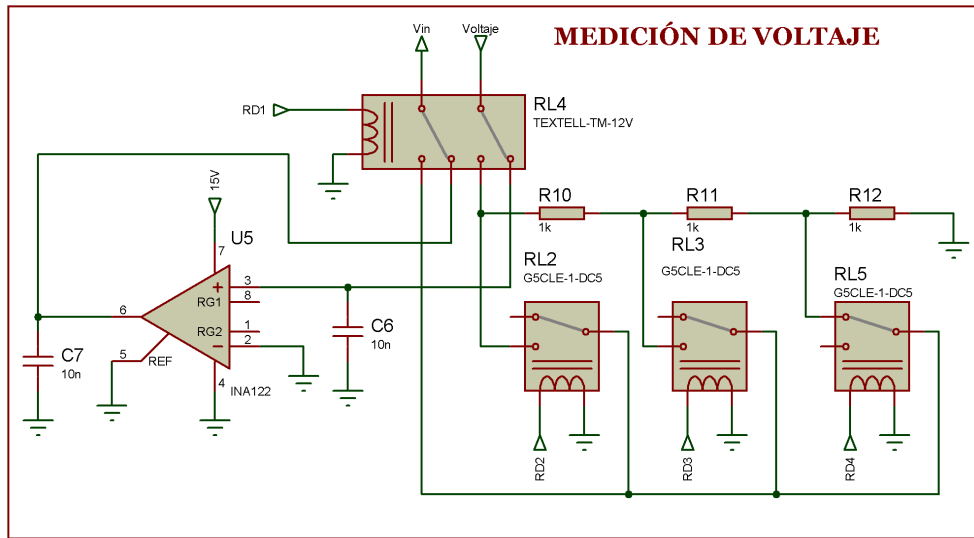


Figura 4.24: Diseño de Medición de Voltaje

Donde la entrada del voltaje de la Celda de Combustible como indica el diagrama es el indicativo  $\nabla$  en este caso intitulado simplemente como *Voltaje* y la salida para adquisición de datos es  $\triangle$  intitulada como  $V_{in}$ . Que se controla por medio de un relay de doble *swicheo* en estado *off* la resolución esta en el orden de los *microvolts* y la señal circula por el amplificador de instrumentación. En el estado *on* la señal circula por el arreglo de resistencias o derivador de voltaje que es controlada por señales del adquisidor de datos sujetas a relevadores, la lógica para este arreglo se muestra en la tabla 4.2

$RL2$	$RL3$	$RL5$	$V_{in}^*$
1	0	0	5V
0	1	1	10V
0	0	1	15V

Tabla 4.2: Lógica para Derivador de Voltaje  
\* Voltaje para diversos rangos de entrada

## 4.7. Sistema de Medición de Temperatura

El sistema de medición de temperatura se diseñó a partir de un amplificador de instrumentación especial que aisló la medición con todo el circuito, a esto se le conoce como compensador de unión fría del termopar en un chip monolítico como menciona el apartado 3.4 del marco teórico del AD594 .

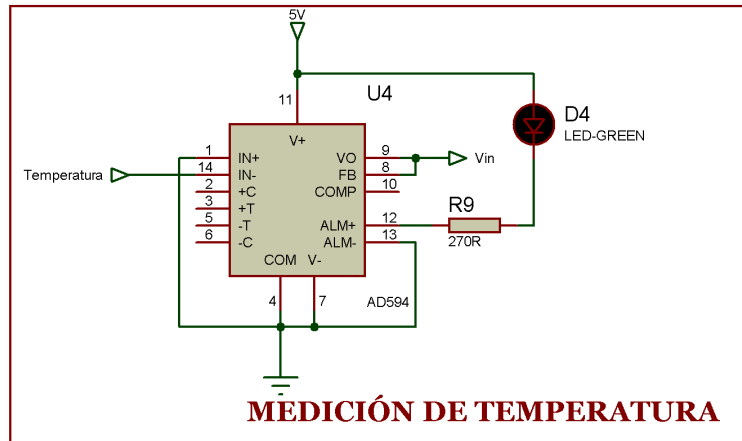


Figura 4.25: Diseño de Medición de Voltaje

La figura 4.25 muestra la configuración utilizada como se menciona en el marco teórico el AD594 esta diseñado para transistores tipo J y K. Debido a que se desarrollo el panel de control en National Instrument Labview la configuración de nuestro sistema de medición de temperatura de las señales del adquisidor de datos, se manipulo en el panel para su conveniencia. En el desarrollo del mismo puede abarcar mayores termopares.

## 4.8. Panel de Control en National Instrument Labview

El panel de control se desarrolló en la plataforma de National Instrument Labview. No se dará una explicación profunda en este desarrollo debido a que es un proyecto específico para la aplicación de nuestro sistema. Dado que, lo elemental para propósitos de investigación es únicamente el desarrollo del puerto de comunicación USB en Labview y que se puede observar específicamente el desarrollo en el Apéndice B.

### 4.8.1. Desarrollo de Control para la Transferencia de Datos

Nuestro sistema de control para la transferencia de datos se desarrolló a partir del sistema de hardware: sistema de control de carga, sistema de medición de corriente, voltaje y temperatura.

Podemos englobarlo en dos transferencias de datos RX y Tx (lectura y envío de datos respectivamente). El panel de control virtual controlara la carga y los relevadores del sistema electrónico (hardware), como muestra la siguiente figura 4.26.

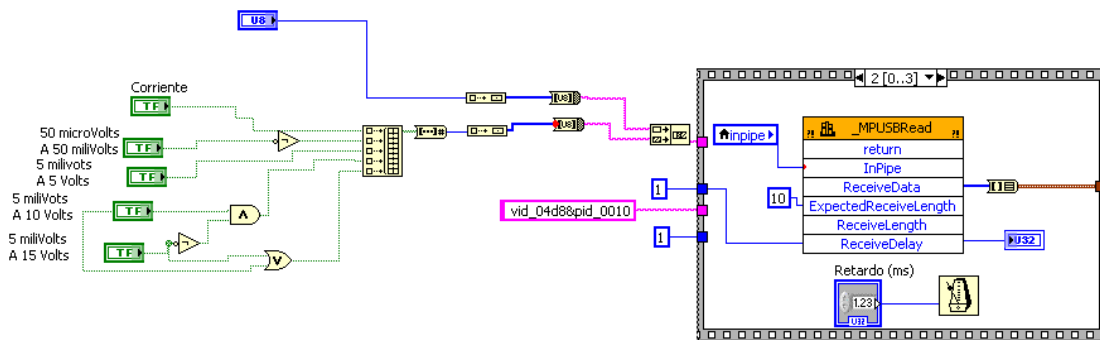


Figura 4.26: Control para la Transferencia de Envio de Datos

Como se observa en la figura 4.26 la parte de control Tx que consta del control de carga y el control de selección de las resoluciones tanto del voltaje como de la corriente.

En la figura 4.27 son los datos que se reciben del adquisidor de datos RX de la temperatura, corriente y voltaje.

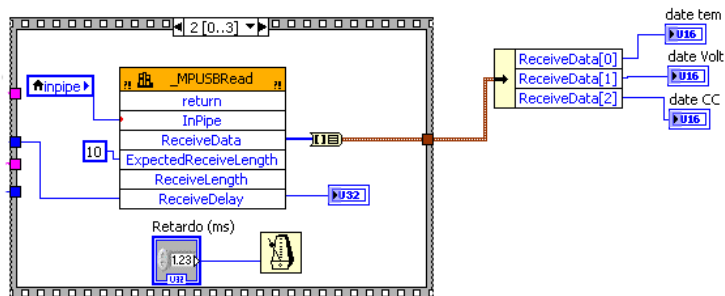


Figura 4.27: Control para la Transferencia de Envio de Datos

### 4.8.2. Desarrollo de Control de Corriente

El control de carga tiene dos rangos de elección de  $5\mu A$  hasta  $5mA$  y de  $5mA$  hasta  $5A$  como se observa en la figura 4.28 y el gráficator.

Como se observa el panel de control de la figura 4.29 se constituye con un seleccionador (*switch*) de sensibilidad de  $5\mu A$  hasta  $5mA$  y de  $5mA$  hasta  $5A$  y la gráfica funcional de Carga.

### 4.8.3. Desarrollo de Control de Voltaje

El arreglo de los relevadores para las resoluciones del voltaje para la adquisición de los datos crean casos específicos programables para obtener la señal leída, en este caso se manejaron con operadores para la sistematización adecuada de las diferentes sensibilidades en el hardware: figura 4.30.

Para cada sensibilidad como se muestra en las figuras 4.30.

El la figura 4.31 muestra el panel de control para el el voltaje con resoluciones de  $50\mu V$  a  $50mV$  y de  $5mV$  a  $5V, 10V, 15V$  respectivamente, y la gráfica en función del Carga.

### 4.8.4. Desarrollo de Control de Temperatura

El control de temperatura esta en función de la ecuación 3.2. Se concluyó que el amplificador de instrumentación puede ser ajustado a todo tipo de termopares ajustandolo al voltaje diferencial de los materiales que lo componen, despejando la ecuación tenemos:

$$V_T = \frac{V_{AD}}{193.4} - 16\mu V \quad (4.52)$$

Dado que el voltaje referenciado para el termopar tipo J es de  $51.7\mu V/C$  y pr el tipo K de  $40.44\mu V/C$  obtenemos la función para la obtención de la lectura en grados centigrados:

$$C = \frac{\frac{V_{AD}}{193.4} - 16\mu V}{51.7\mu V/C} \quad (4.53)$$

$$C = \frac{\frac{V_{AD}}{193.4} - 16\mu V}{40.44\mu V/C} \quad (4.54)$$

Donde de la ecuación 4.53 tiene referencia al Termopar tipo J y la ecuación 4.54 al termopar K, este proceso es llevado a cabo por el software como muestra la figura 4.32.

La figura 4.33 muestra la gráfica de la temperatura en función de la Carga y el tipo de termopar.

#### 4.8.5. Desarrollo de Control de Carga

El sistema virtual de control de carga simula una resistencia variable (figura 4.34), esta envía los datos a la tarjeta de adquisición donde controla una diferencial de potencial como indica la ecuación A.2 que está programada en el microcontrolador (ver Apéndice A).

#### 4.8.6. Desarrollo de Gráfica V-I y T-V,I

El desarrollo de las gráficas V-I (Voltaje vs Corriente) es el comportamiento directo de la celda y, las gráficas T-V (Temperatura vs Voltaje) y T-I (Temperatura vs Corriente) sirven para analizar el proceso de la celda.

La figura muestra 4.35 la construcción de las gráficas mencionadas anteriormente.

#### 4.8.7. Desarrollo de la Base de Datos

La creación de una base de datos es la parte más importante del proyecto, debido a que es el resultado experimental del desarrollo de la investigación. La base de datos puede ser guardada en archivo plano o de alguna extensión referente a una hoja de cálculo. La construcción de la base de datos se muestra en la figura 4.38 y la tabla donde se observan los datos almacenados.

En la figura 4.39 se observa las dos formas de guardar el archivo, una con la elección de guardar el archivo con distintos nombres y guardarla con el mismo nombre más un prefijo acendente.

La figura 4.40 muestra la tabla de valores de las variables a medir.



### 4.8.8. Portada del Panel de Control

La portada del panel de control virtual se observa en la figura 4.41, donde, se observa las pestañas predeterminadas para visualisas las diferentes graficas.

El diseño del proyecto se desarrollo apartir de las necesidades que tiene un investigador en el desarrollo de Celdas de Combustible para conocer su comportamiento y poder tener datos eficientes y precisos de lo desarrollado por el cientifico.

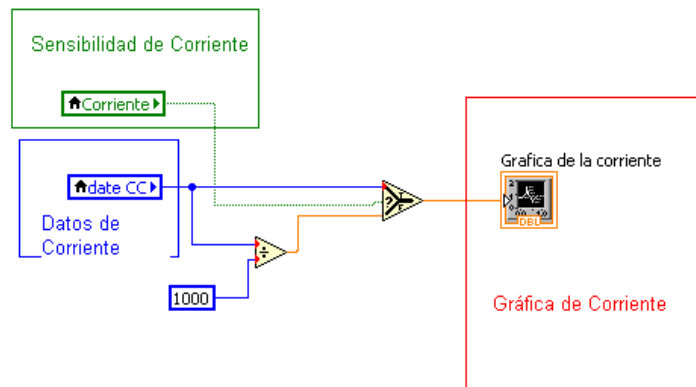


Figura 4.28: Control para la Transferencia de Envío de Datos

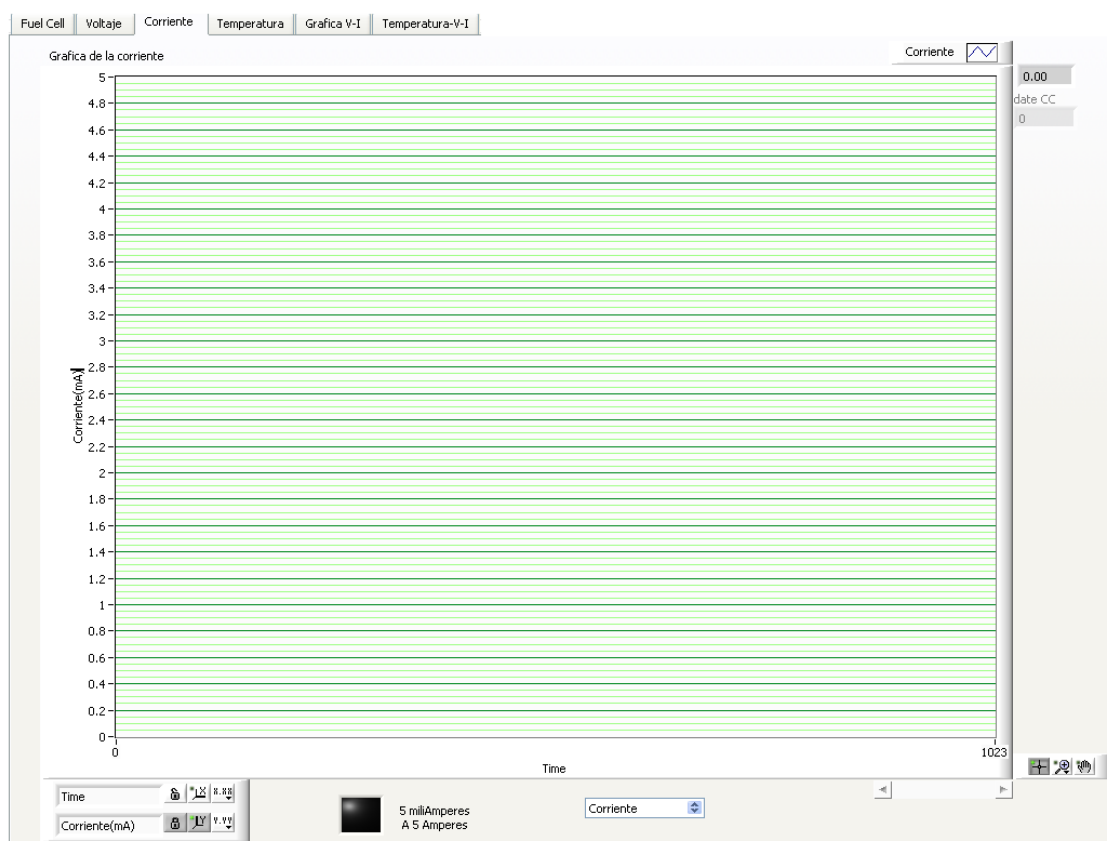


Figura 4.29: Gráfica Funcional de Carga para la Corriente

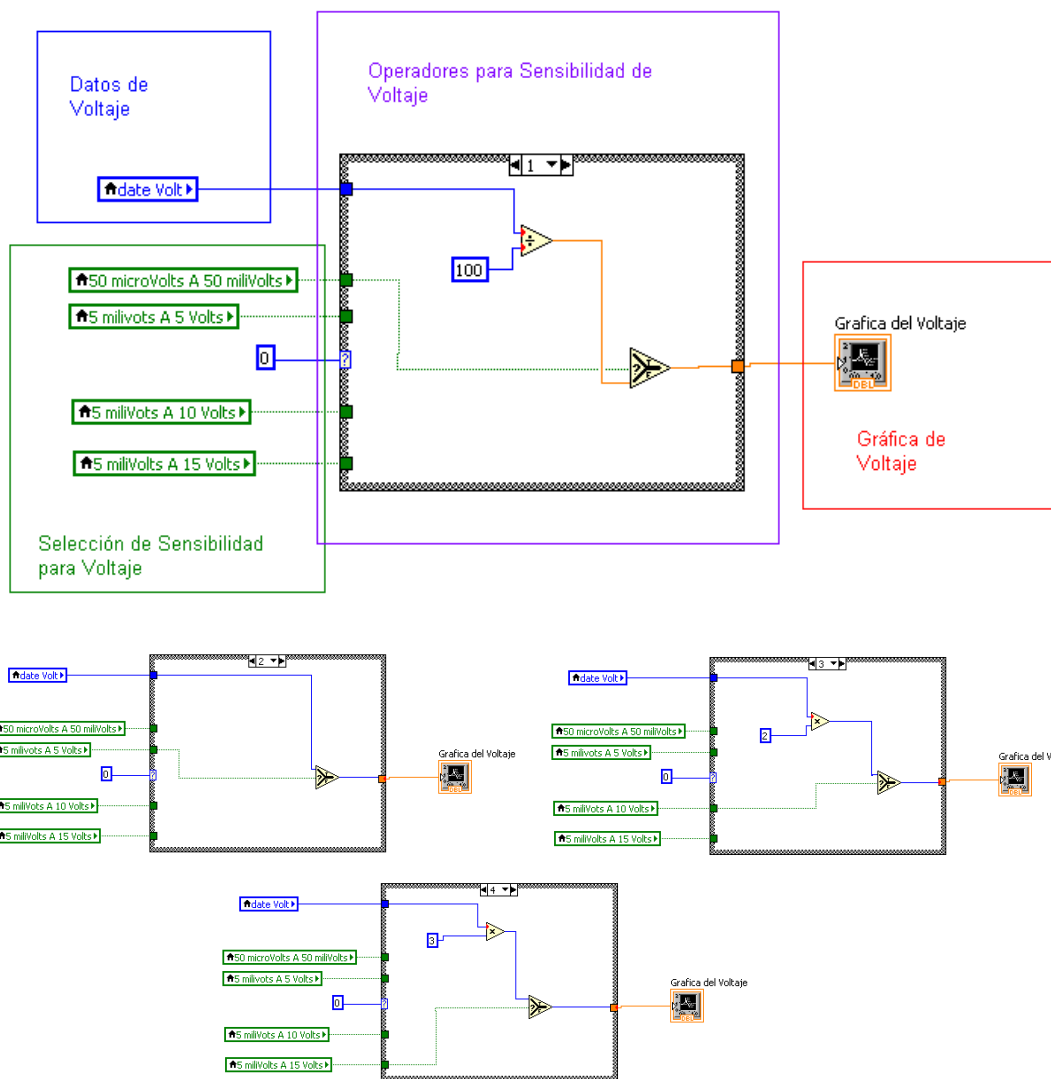


Figura 4.30: Desarrollo de Control de Voltaje



Figura 4.31: Gráfica Funcional de Carga para el Voltaje

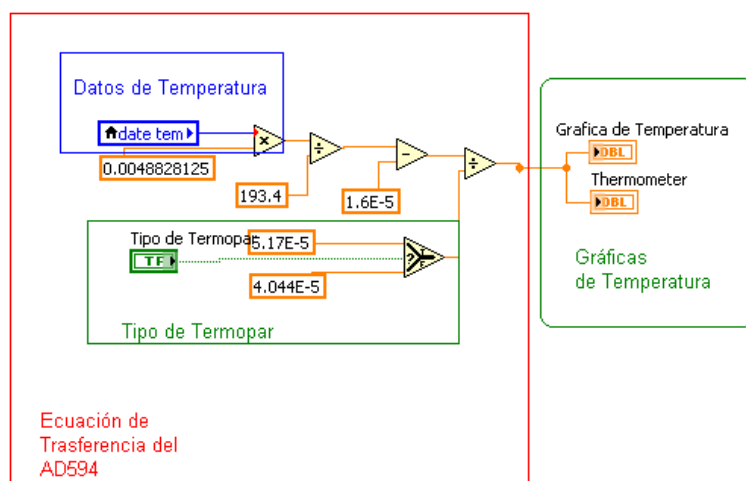


Figura 4.32: Desarrollo de Control de Temperatura

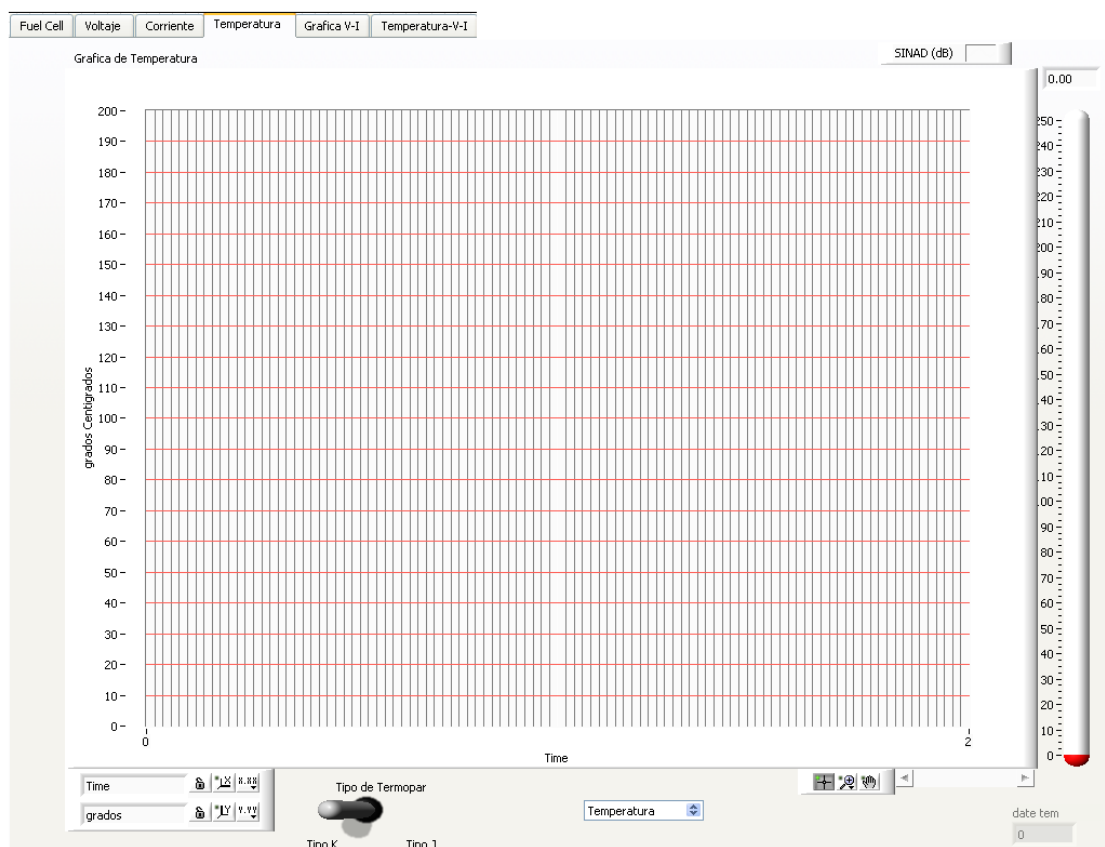


Figura 4.33: Gráfica Funcional de Carga para la Temperatura

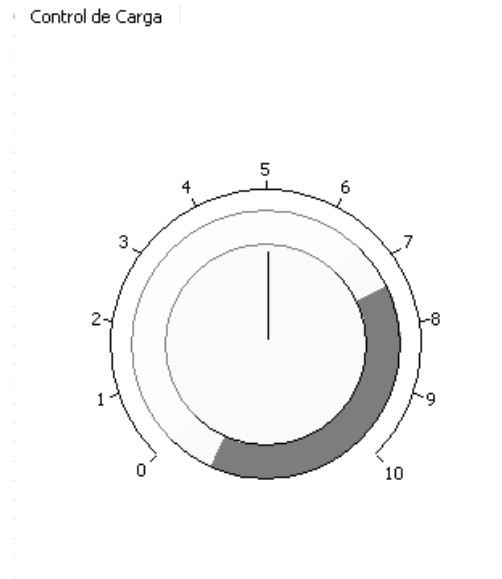


Figura 4.34: Control de Carga Virtual

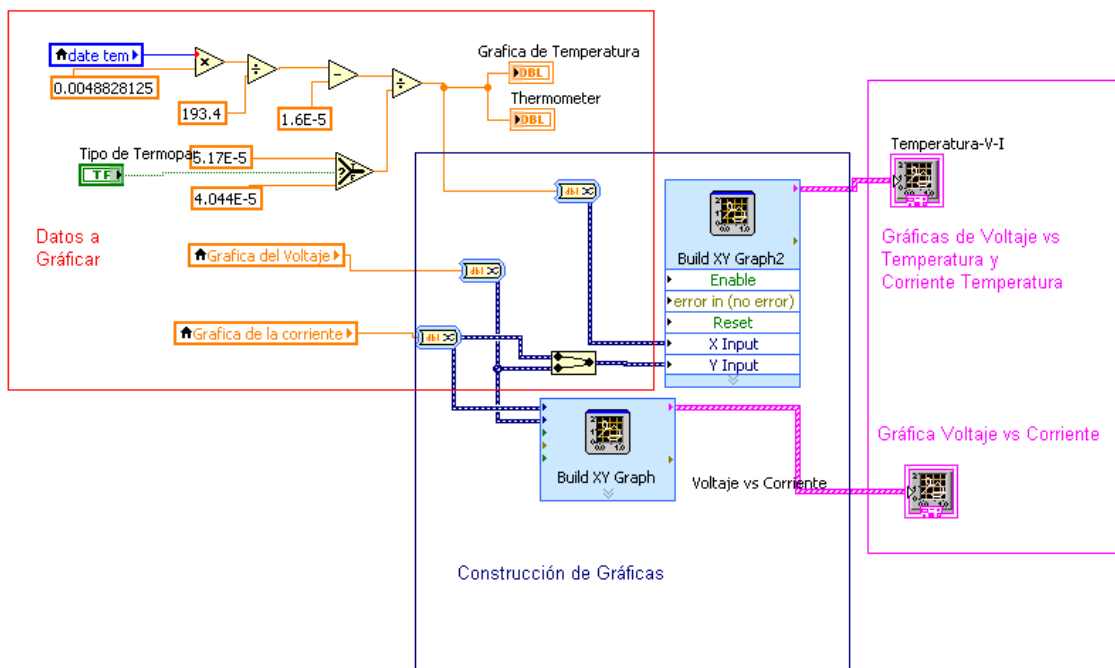


Figura 4.35: Construcción de Gráficas V-I, T-V y T-I

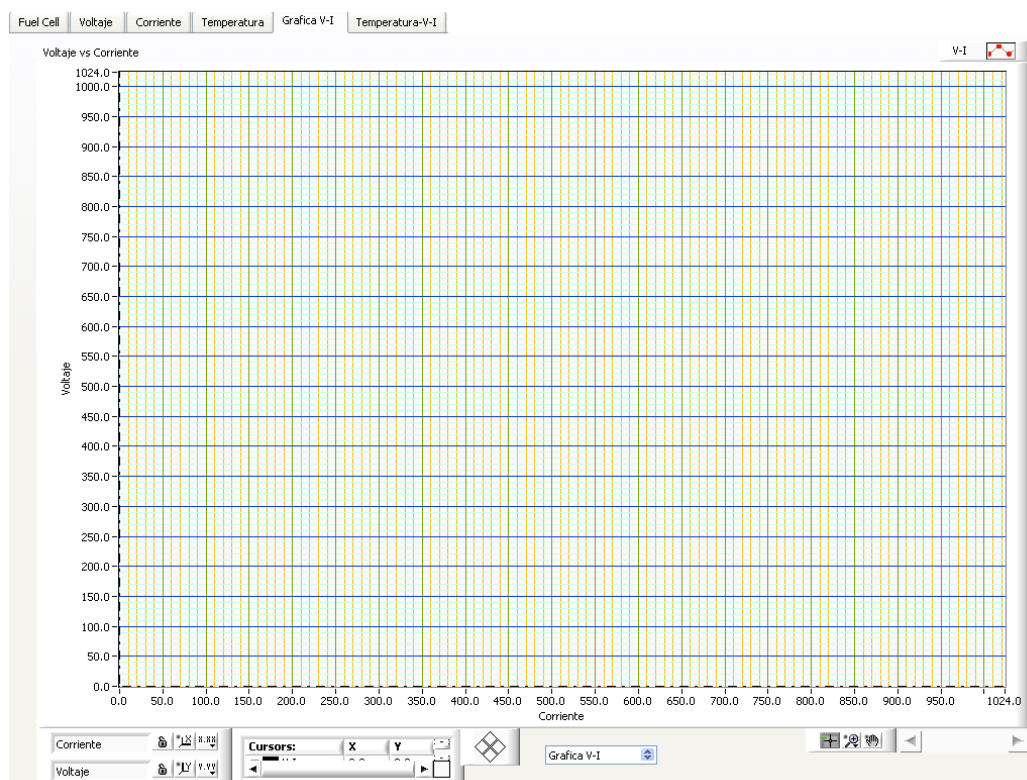


Figura 4.36: Gráficas V-I



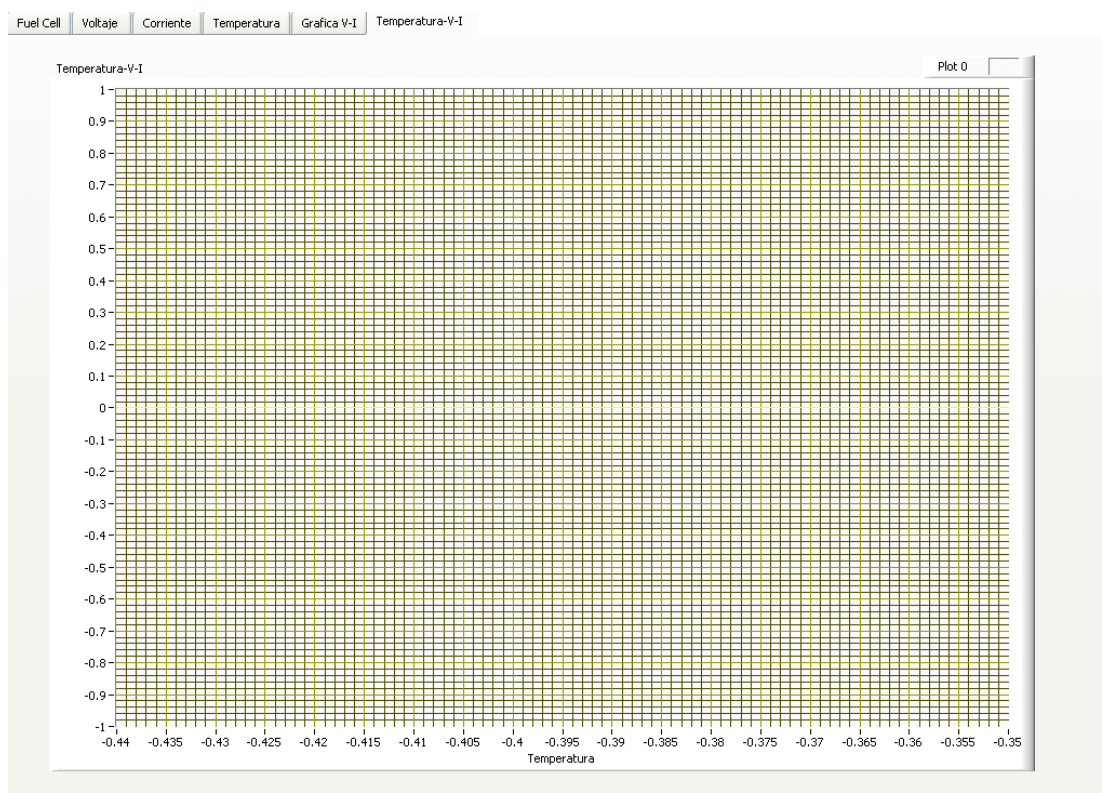


Figura 4.37: Gráficas T-V y T-I

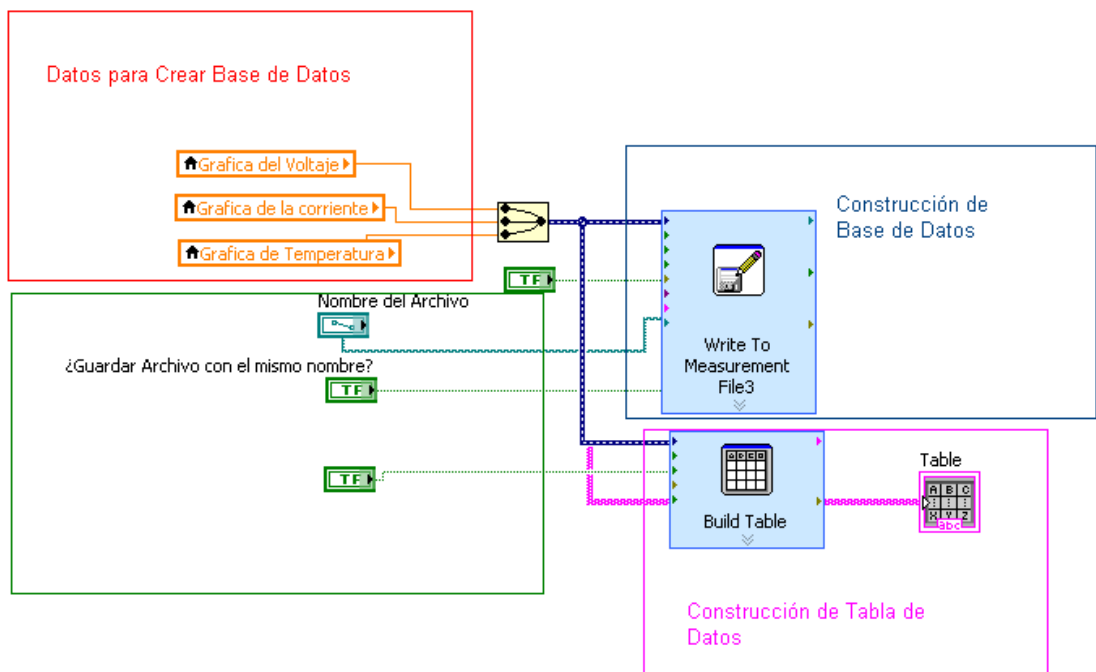


Figura 4.38: Construcción de Base de Datos y Tabla

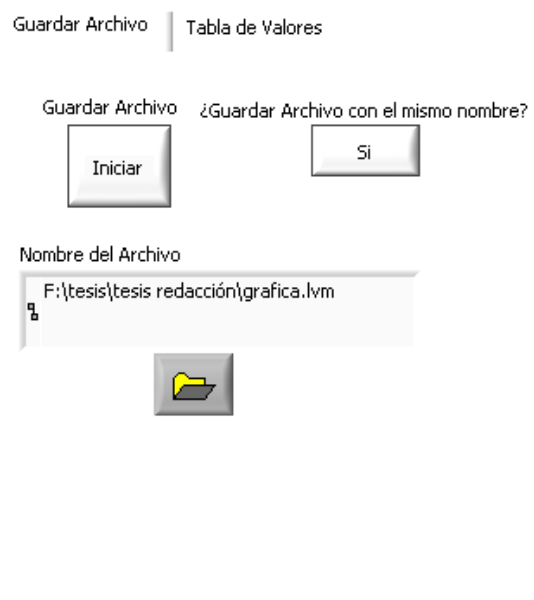


Figura 4.39: Selección de Nombre de archivo

Figura 4.40: *Tabla de Valores de las Variables*



Figura 4.41: Portada de Panel de Control

---

## Capítulo 5

# Resultados

---

Las pruebas se realizaron en los laboratorios de Hidrógeno del CIE-UNAM. Debido a normas internas establecidas en cada departamento no fueron posible desarrollarse pruebas con frecuencia.

Muchas de las pruebas se desarrollaron con Pilas de Alcalina debido a la similitud del comportamiento con respecto a una fuente de Corriente, la parte fundamental del desarrollo del diseño fue el control de carga debido a los acoplamientos de impedancia del sistema a la Fuente de Corriente como se desarrolló el análisis del comportamiento de la Celda de Combustible, las mediciones de las otras variables son independientes, es por ello que se hicieron pruebas para cada variable.

En la figura 5.1 muestra las pruebas del sistema de control de corriente, la Tac y el panel virtual, corroborando los datos con un Multiméetro que se encuentra en miliAmperes todo esto con una pila de Alcalina.

En las pruebas realizadas para el control de carga con las pilas de Alcalina no se observó algún tipo de perturbación en la señal, la forma que utilizamos para analizar el sistema fue a partir de un osciloscopio analógico, figura 5.2 con resolución en el orden de los micros, las mediciones del osciloscopio son en la entrada de la TAC y en la entrada del amplificador operacional.

Las pruebas con Celdas de tipo PEM que se realizaron en el laboratorio fueron con los llamados Stacks que son una serie de celdas en la cual se pueden manipular las conexiones en serie o paralelo, como muestra la siguiente figura 5.3, indicando que se encuentra en cortocircuito dando un voltaje máximo y una corriente proporcional a cero.

En las pruebas se observó una perturbación en la señal en diferentes puntos del proceso como se muestra en la figura 5.4.

Se concluyo que debido al comportamiento de saturación del semiconductor provoca pequeñas perturbaciones cuando está expuesto a cambios periódicos, como lo es el sistema de control de carga.

Nuestra analogía se basa en que los semiconductores varían su funcionalidad con respecto a la temperatura, en las gráficas de comportamiento de las hojas de datos de los dispositivos semiconductores se pueden apreciar un cambio exponencial del comportamiento funcional.

Por mínimas que sean las perturbaciones en la señal a amplificar, dan como resultado datos incorrectos, dado que nuestro Amplificador de Instrumentación es muy sensible a bajas señales. Para suprimir las perturbaciones en nuestra hoja de datos nos indica que se pueden suprimir bajas señales de entrada con capacitores de  $0.1 \mu\text{Farad}$ .

Se hicieron nuevas pruebas de las cuales se pudo rectificar la señal para tener una lectura correcta como muestra la siguiente figura 5.5.

Los resultados de las pruebas desarrolladas para las variables se muestran en las siguientes figuras para: Gráfica V-I 5.6, Gráfica {Y : Corriente ; X : Carga} 5.7, Gráfica {Y : Voltaje ; X : Carga} 5.8, Gráfica {Y : Temperatura ; X : Carga} 5.9, Gráfica de T-I 5.10 y Gráfica T-V 5.11. Las Gráficas correspondientes a las cargas varian conforme al sistema de control de Corriente que se comporta como una Carga de control dependiente de la Temperatura y del flujo de Corriente del arreglo de los Transistores, para obtener los limites de las Celdas de Combustible en corto circuito y en circuito abierto: muestra las pérdidas por activación que están presentes cuando una reacción electroquímica en la superficie de un electrodo esta controlado por la cinética del electrodo.

La base de datos de las variables de medición se muestra en la figura 5.12



Figura 5.1: Prueba de Control de Corriente



Figura 5.2: Señal del control de Carga con Osciloscopio

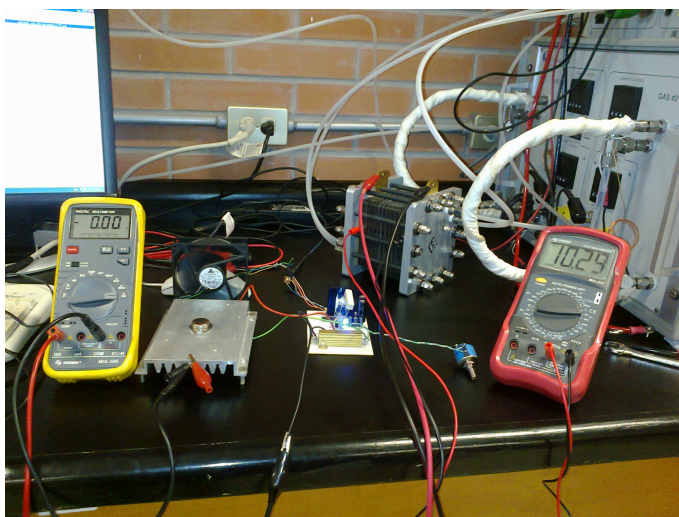


Figura 5.3: Prueba del Control de Carga con Celda tipo PEM



Figura 5.4: Perturbaciones de Medición de la Celda Tipo PEM



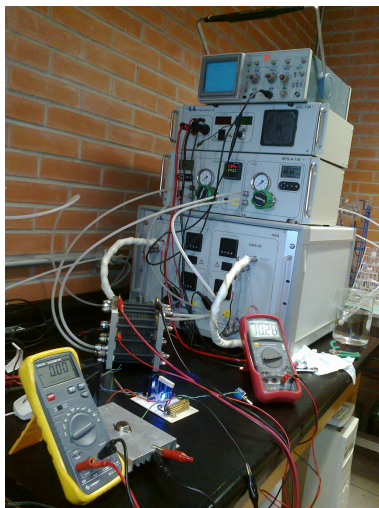


Figura 5.5: Puebas de Medición de la Celda Tipo PEM

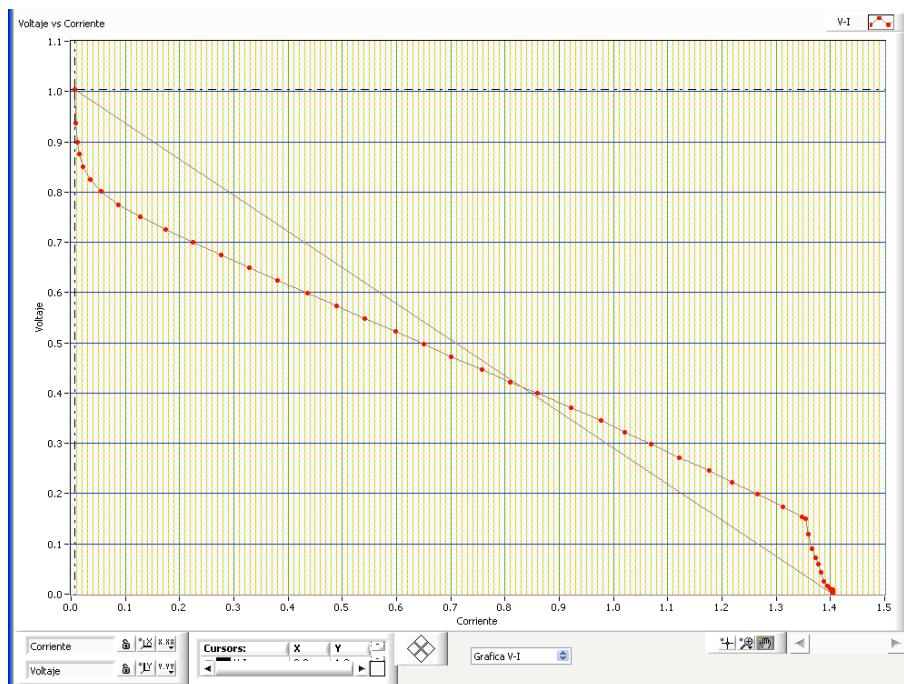


Figura 5.6: Gráfica V-I

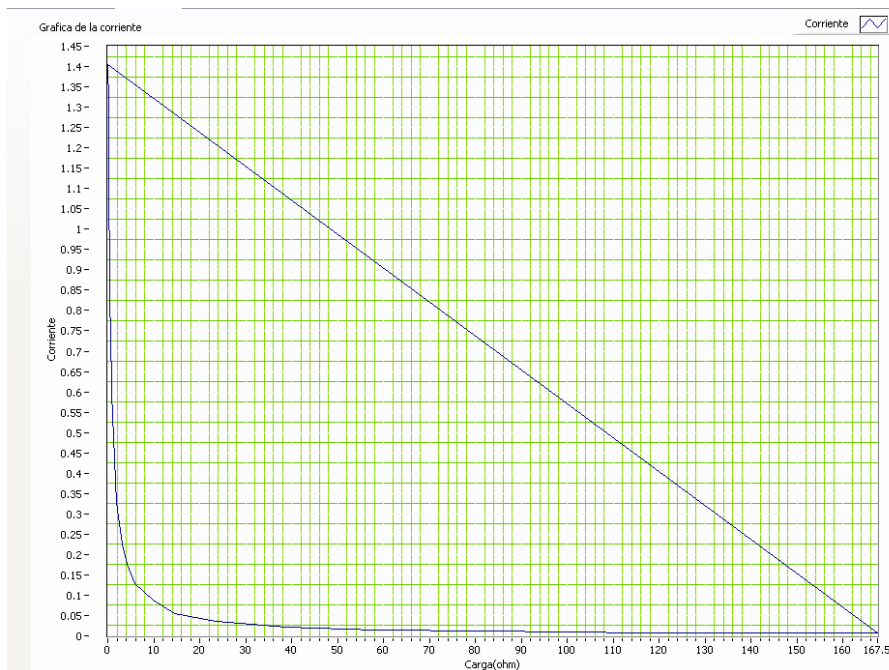


Figura 5.7: Gráfica {Y : Corriente ; X : Carga}

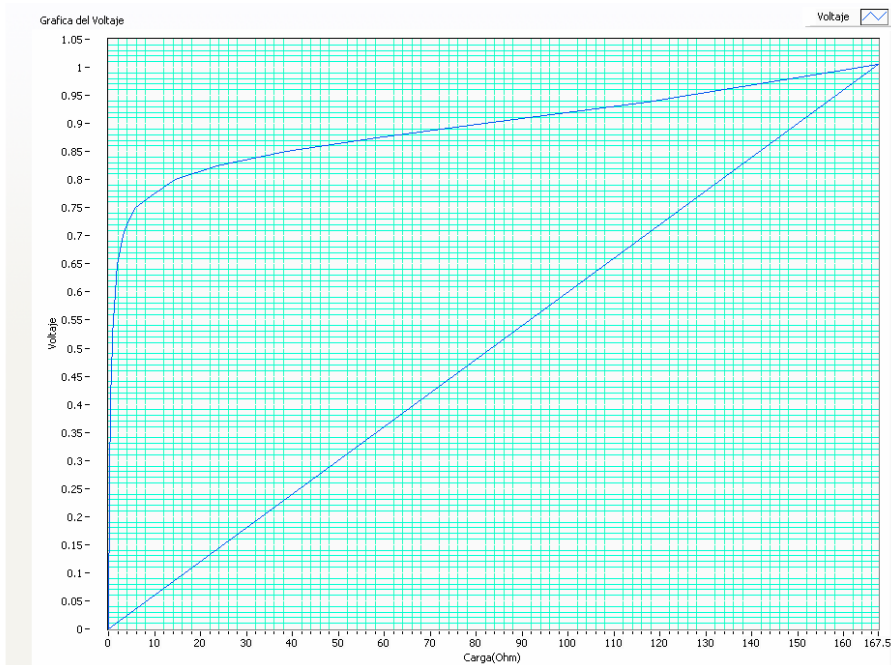


Figura 5.8: Gráfica {Y : Voltaje ; X : Carga}

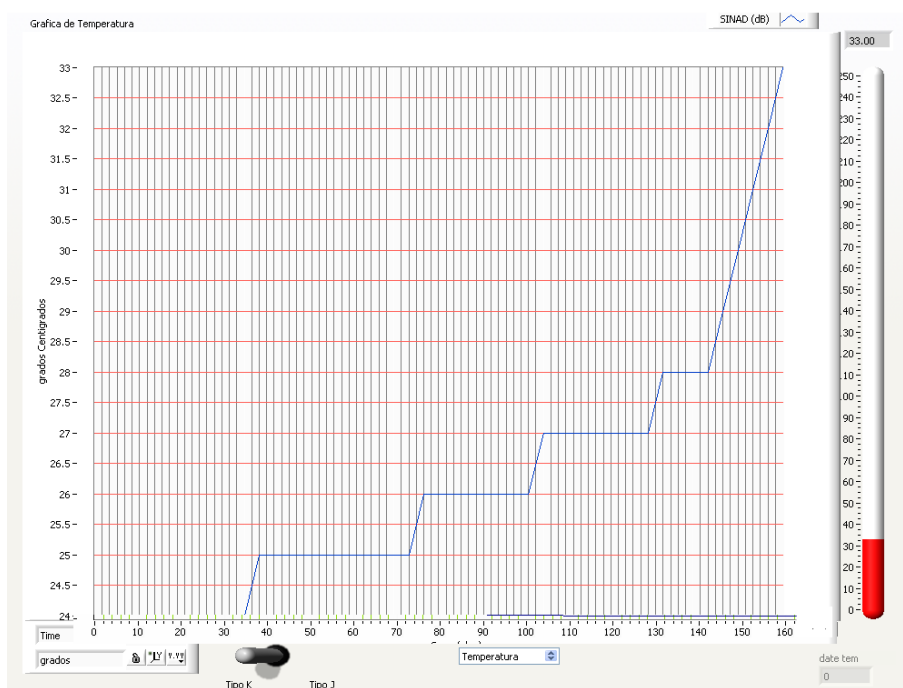


Figura 5.9: Gráfica {Y : Temperatura ; X : Carga}



Figura 5.10: Gráfica T-I

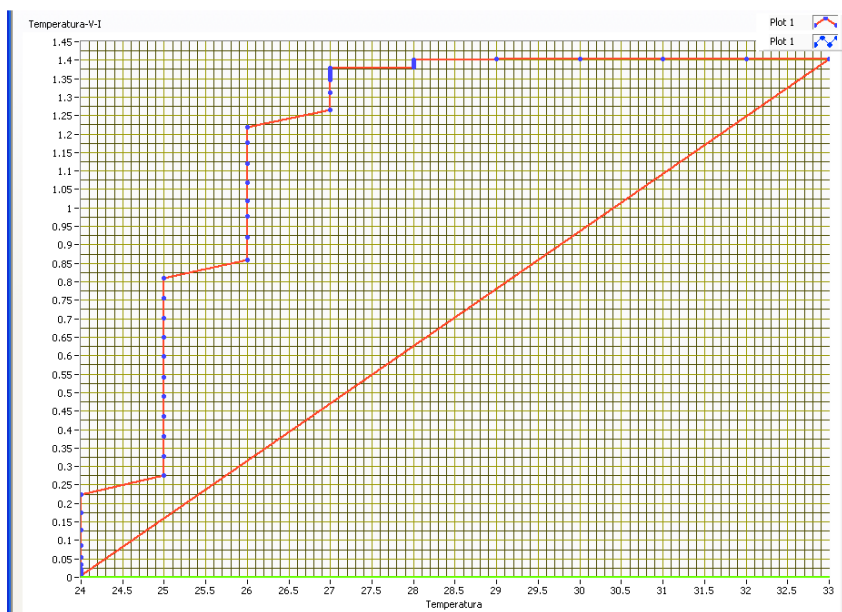


Figura 5.11: Gráfica T-V

Table

Voltaje	Corriente	Temperatura	
1.005000	0.006000	24.000000	
0.938000	0.008000	24.000000	
0.900000	0.011000	24.000000	
0.875000	0.015000	24.000000	
0.850000	0.022000	24.000000	
0.825000	0.035000	24.000000	
0.801000	0.055000	24.000000	
0.775000	0.087000	24.000000	
0.750000	0.128000	24.000000	
0.725000	0.175000	24.000000	
0.700000	0.225000	24.000000	
0.674000	0.276000	25.000000	
0.649000	0.328000	25.000000	
0.624000	0.381000	25.000000	
0.598000	0.436000	25.000000	
0.574000	0.489000	25.000000	
0.549000	0.542000	25.000000	
0.522000	0.599000	25.000000	
0.497000	0.651000	25.000000	
0.472000	0.701000	25.000000	
0.447000	0.757000	25.000000	
0.422000	0.810000	25.000000	
0.399000	0.860000	26.000000	
0.370000	0.921000	26.000000	
0.345000	0.977000	26.000000	
0.322000	1.020000	26.000000	
0.298000	1.069000	26.000000	
0.272000	1.121000	26.000000	
0.246000	1.176000	26.000000	
0.223000	1.219000	26.000000	
0.199000	1.265000	27.000000	
0.174000	1.312000	27.000000	
0.153000	1.347000	27.000000	
0.150000	1.354000	27.000000	
0.120000	1.359000	27.000000	
0.090000	1.366000	27.000000	
0.072000	1.372000	27.000000	
0.059000	1.378000	27.000000	
0.043000	1.382000	28.000000	
0.026000	1.388000	28.000000	
0.017000	1.394000	28.000000	
0.011000	1.400000	28.000000	
0.009000	1.404000	29.000000	
0.006000	1.403000	30.000000	
0.003000	1.403800	31.000000	
0.001000	1.404000	32.000000	
0.000000	1.404300	33.000000	

Figura 5.12: Base de Datos de las Variables de Medición

---

# Capítulo 6

## Conclusiones

---

El equipo de instrumentación desarrollado proporciona la auscultación general de las Celdas de Combustible de Intercambio Protónico: describe y alude su comportamiento general.

Para el diseño del Caracterizador de Celdas de Combustible la importancia de la fundamentación teórica, en cuestiones del comportamiento energético tanto químico como eléctrico, fue parte fundamental del diseño físico debido a los análisis de los acoplamientos de las propiedades de los materiales: conductancia, resistividad, capacitancias y estados de saturación de los semiconductores. Las analogías fueron aspectos personales para el diseño eléctrico-electrónico del equipo de instrumentación.

Para un sistema de instrumentación el modelo Matemático contextualiza su versatilidad física y proporciona su concepción teórica. A partir del modelo Matemático se establecieron los parámetros requeridos de la analogía funcional de las celdas para la estructuración del diseño electrónico.

Los dispositivos electrónicos tienen una funcionalidad real matemática de los cuales se desarrollan tecnologías eficientes. El diseño del equipo de medición de las variables de las celdas, se realizaron a partir de tecnologías análogas, digitales y virtuales, debido a que la conjunción de estas dan muchas mas ventajas tanto de practicidad, viabilidad, eficiencia y costes.

Las practicas fueron funcionales para la obtención de datos dentro de los parámetros deseados, determinando la funcionalidad y documentación de los desarrollos tecnológicos y científicos de las Celdas de Combustible de Intercambio Protónico que desarrollan investigadores en dichas áreas del Centro de Investigación en Energía de la Universidad Autónoma de México campus Morelos.

El diseño del dispositivo desarrollado tiende a consecuentes mejoras debido a la complejidad de los mismos desarrollos tecnológicos de las Celdas y propiciando ser una necesaria aplicación de la Ingeniería Electrónica.

---

# Apéndice A

## Programación del Microcontrolador

---

Comenzamos por incluir las librerías necesarias para el reconocimiento y funcionamiento del dispositivo.

Definimos IC con el que se realizara la compilación.

```
# include < 18F4550.h >
```

Especificamos la resolución de los Bites, en este caso utilizamos la máxima resolución dado que manejaremos variaciones muy pequeñas de señales.

```
#DEVICE ADC = 10
```

Las entradas analógicas del microcontrolador tienen un rango de 0-5V. La resolución de 10 bites nos permite tener un rango de 1024 divisiones por lo que tendríamos una resolución de los 5 volts divididos entre 1024:

$$S = \frac{5V}{1024_{Div}} \approx 4.88 \frac{mV}{Div} \quad (A.1)$$

Donde:

$S$  = Resolución en milivolts por división.



Especificamos la configuración del dispositivo.

```
#fuses HSPLL, MCLR, NOWDT, NOPROTECT, NOLVP, NODEBUG,
USBDIV, PLL5, CPUDIV1,VREGEN
```

Donde:

HSPLL	High Speed Crystal/Resonator with PLL enabled
MCLR	Master Clear pin enabled
WRTD	Data EEPROM write protected
NOPROTECT	Code not protected from reading
NOLVP	No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18) used for I/O
NODEBUG	No Debug mode for ICD
USBDIV	USB clock source comes from PLL divide by 2
PLL5	Divide By 5(20MHz oscillator input)
CPUDIV1	No System Clock Postscaler
VREGEN	USB voltage regulator enabled

Indicamos la frecuencia del oscilador a la que trabajara el microcontrolador.

```
#use delay(clock = 48000000)
```

La frecuencia de oscilación necesaria para el USB 2.0 es de 48 Mhz. Como utilizamos en nuestro hardware un cristal de cuarzo de 20 Mhz necesitamos hacer uso del módulo *PLL* interno del PIC. Para ello utilizamos el **#fuse** *HSPLL*. Como el módulo *PLL* requiere una oscilación de entrada de 4 Mhz se utilizo el divisor 1:5 indicado con el **#fuse** *HSPLL5* para obtener los  $20:5 = 4$  Mhz requeridos.

Para manejos prácticos y de mantenimiento para el proyecto montado utilizamos el Bootloader, para esto necesitamos indicar en el programa el espacio de memoria a utilizar por el Bootloader.

Interrupción para el modo de Bootloader o Run.

```
#build(reset = 0x1000, interrupt = 0x1008)
```

Espacio en memoria para el Bootloader.

```
#org 0x0000, 0x0FFF
```

Especificamos el tipo de comunicación *USB*, en nuestro caso utilizamos la comunicación mas rápida del dispositivo 2.0 (de formato Bulk Data Transfer) y deshabilitamos el uso de las directivas de la Interfaz humana (HID).

```
#define USB_HID_DEVICE FALSE
#define USB_EP1_TX_ENABLE USB_ENABLE_BULK
#define USB_EP1_RX_ENABLE USB_ENABLE_BULK
```

Definir el tamaño de los *EndPoint* del buffer del puerto *USB*.

Los datos a transmitir en el puerto *USB* son los datos de las entradas de señales analógicas: Temperatura, Voltaje y Corriente debido a que nuestra resolución es de 10 bites y un byte contiene 8 bites, por cada señal analógica utilizamos 2 bytes. Por lo tanto utilizamos 6 bytes.

```
#define USB_EP1_TX_SIZE 6
```

Los datos a recibir en el puerto *USB* son los datos que adquirimos del sistema virtual por medio del computador: Carga, Temperatura, control de flujos (oxigeno y combustible) y un control de inicio.

```
#define USB_EP1_RX_SIZE 4
```

Incluimos las librerías para el funcionamiento del *USB*

Librería de la capa del Hardware de Microchip de la familia 18F para el driver *PICUSB* de *CSS*.

```
#include <pic18_usb.h >
```

Configuración del *USB* y los descriptores para este dispositivo.

```
#include <PicUSB.h >
```

*USB* estándar solicitud y código de controlador de *token*. Las funciones están destinados a ser llamado por el usuario (paquete de inicio, colocar, obtener paquetes,etc) están documentados en *USB.h*.

```
#include <usb.c >
```

Estas librerías incluyen dentro del código al llamado de otras librerías. Son descargadas en la página de Microchip.

La directiva `#define` define una macro. Las macros proporcionan un mecanismo de reemplazo de los *tokens* (son el equivalente a las palabras y signos de puntuación en el lenguaje natural escrito) con o sin una serie de parámetros formales (parecidos a las funciones). Esta similitud con las funciones hace que en ocasiones sirvan para una especie de sustitución *inline* aunque esta práctica presenta sus riesgos.

Declaramos las Asignaciones de variables usadas.

```
#define LEDV      PIN_E1
#define LEDR      PIN_E0
#define LEDA      PIN_E2
#define LED_ON    output_high
#define LED_OFF   output_low
#define entrada  recibe[0]
#define ancho    recibe[1]
#define frec      recibe[2]
#define Temperatura  envia[0]
#define Voltaje    envia[1]
#define Corriente  envia[2]
#define Pwm1       envia[3]
#define Pwm2       envia[4]
```

Declaramos las variables globales

```
void temp (void);
void volt (void);
void corr (void);
void pw1 (void);
void pw2 (void);
int8 recibe[3];
int16 envia[5];
int16 date0, date1, date2, date3, date4;
long fr, anc;
```

Construimos el programa principal. La programación en CCS es una programación estructurada, una estructura de programa es secuencial si las instrucciones se ejecutan una tras otra, a modo de secuencia lineal, es decir que una instrucción no se ejecuta hasta que finaliza la anterior, ni se bifurca el flujo del programa.

```
void main(void) { // Todo el programa. }
```

Dentro del programa principal configuramos los puertos de entrada, salida y los de PWM.

Configuración del puerto a como analogico.

```
setup_port_a(ALL_ANALOG);
```

Configuración del puerto B como salida.

```
set_tris_b(0x00);
```

```
output_b(0x00);
```

Para los dispositivos de flujo su sistema de control es mediante una diferencial de tensión es por ello que necesitamos un control de tensión, lo haremos mediante el PWM; el promedio de tensión depende directamente del Duty.

$$V_m < 0 \frac{Duty}{255} x V_p \quad (A.2)$$

En nuestro caso tendríamos una variación de 0 a 5 volts, dado que el microcontrolador tiene un  $V_p = 5 \text{ Volts}$ .

Configurar el modo de salida del PWM.

Para el *PWM* se configura el *Timer2* que tiene la siguiente estructura:

El período de *PWM* se especifica por el registro *PR2*. El período de *PWM* se puede calcular utilizando la siguiente formula:

Syntax	Setup_timer_2 (mode, period, postscale)
Parameters	Mode may be one of: T2_DISABLED, T2_DIV_BY_1, T2_DIV_BY_4, T2_DIV_BY_16, period is a int 0-255 that determines when the clock value is reset, postscale is a number 1-16 that determines how many timer overflows before an interrupt: (1 means once, 2 means twice, and so on).
Returns	Undefined
Function	Initializes timer 2. The mode specifies the clock divisor (from the oscillator clock). The timer value may be read and written to using GET_TIMER2() and SET_TIMER2(). Timer 2 is a 8 bit counter/timer.
Availability	This function is only available on devices with timer 2 hardware.
Requires	Constants are defined in the devices .h file.

Tabla A.1: Estructura de configuración PWM

$$PWM_{periodo} = (PR2 + 1)(4T_{osc})(TMR2_{pv}) \quad (A.3)$$

$PWM_{periodo} = PeriodoPWM$

$PR2 =$ Periodo que determina interrupción de reloj

$T_{osc} =$  Periodo de Oscilación del dispositivo

$TMR2_{pv} =$  Modos de trabajo del timer 2.

La frecuencia  $PWM$  se define como  $(1)/(PWM_{periodo})$ . Cuando  $TMR2$  es igual a  $PR2$ , los siguientes tres eventos se producen en el siguiente incremento del ciclo:

1.  $TMR2$  se borra.
2. Laterminal  $CCPx$  se establece (excepción: si el ciclo de trabajo  $PWM=0\%$ , laterminal  $CCPx$  no se fijan).
3. El ciclo de trabajo  $PWM$  se cierra en  $CCPRxL$ , y  $CCPRxH$ .

Despejando  $PR2$ :

$$PR2 = \frac{f_{osc}}{(4f_{pwm})(TMR2_{pv})} \quad (A.4)$$

Donde:

$$f_{osc} = \frac{1}{T_{osc}}$$

Para valores de:

$$f_{pwm} = \frac{1}{PWM_{period}}$$

$$f_{osc} = 20 \text{ MHz}$$

$$f_{pwm} = 20 \text{ KHz}$$

$$TMR2_{pv} = 1$$

Sustituyendo encontramos el valor para  $PR2$ :

$$PR2 = \frac{20 \text{ MHz}}{(4)(20 \text{ KHz})(1)} - 1 = 249 \quad (A.5)$$

Por lo tanto nuestra instrucción en código es:

```
setup_timer_2 (T2_DIV_BY_1,249,1);
```

Habilitación y deshabilitación de *PWM*, *Interrupciones* y *Timers*.

```
setup_ccp1 (CCP_PWM);
setup_ccp2 (CCP_PWM);
setup_adc (ADC_CLOCK_INTERNAL);
setup_timer_0 (RTCC_INTERNAL);
setup_timer_1 (T1_DISABLED);
disable_interrupts (GLOBAL);
```

Inicializamos el *USB*.

```
usb_init ();
```

Habilita periférico *USB* e interrupciones.

```
usb_task ();
```

Esperamos hasta que el *PicUSB* sea configurado por el *Host*.

```
usb_wait_for_enumeration ();
```

Una vez configurado programaremos la parte de control, esta parte es la que permitirá al usuario hacer el control del sistema. Iniciaremos con un ciclo infinito:

```
while (TRUE) { //Programa de control. }
```

Para iniciar el sistema de control el dispositivo tiene que estar configurado por el *Host*. Con la siguiente instrucción condicionamos para que prosiga únicamente si el dispositivo esta configurado.

```
if (usb_enumerated()) { //Programa de control. }
```

El dispositivo debe de actuar si el *EndPoint* de salida contiene datos del *Host*, condicionamos para que prosiga únicamente si el *EndPoint* de salida contiene datos del *Host*.

```
if (usb_kbhit(1)) { //Programa de control. }
```

Para que nuestro sistema de control virtual pueda interactuar con el dispositivo tenemos que leer los datos *RX* del *USB*.

```
usb_get_packet (1, recibe,3);
```

Entre corchetes el primer elemento son referente a los Pipes, el uso de cuantos pipes a utilizar, el siguiente elemento la variable utilizada, en este caso lo declaramos como recibe que constituye 3 arreglos de bits o simplemente 3 Bytes, el siguiente es la longitud de los datos a recibir en este caso son 3 Bytes. Para tener un control del sistema virtual en cuestiones de arranque (Run) de los procesos de adquisición de datos colocamos una referencia para el inicio.

```
if (entrada==1){ //Programación de control. }
```

Los datos adquiridos se manipulan como direcciones, en modalidad de bits. Así la manipulación sería  $2^0 = 1 \rightarrow 2^1 = 2 \rightarrow 2^2 = 4 \rightarrow \dots$ . Fuera del programa principal, main, creamos las funciones para la lectura de las entradas analógicas, para la temperatura, voltaje y corriente. Los canales utilizados son: canal 0 al canal 2, de *RA0* a *RA2* respectivamente. Leemos los puertos y almacenamos en una variable global después igualamos la variable global con la definida para construir el arreglo y enviarla por *TX* del *USB*.

```

void temp      (void)
{
    set_adc_channel (0);
    delay_μs      (4);
    date0 =       read_adc();
    delay_μs      (10);
    Temperatura =  date0;
}
void volt      (void)
{
    set_adc_channel (1);
    delay_μs      (4);
    date0 =       read_adc();
    delay_μs      (10);
    Voltaje =     date1;
}
void corr      (void)
{
    set_adc_channel (2);
    delay_μs      (4);
    date0 =       read_adc();
    delay_μs      (10);
    Corriente =   date2;
}

```

Regresando al main leemos los datos de las entradas analógicas almacenadas en la función que creamos.

```

temp ();
volt ();
corr ();

```



Enviamos los datos almacenados en los arreglos de Bytes.

```
usb_put_packet (1,envia,6,USB_DTS_TOGGLE);
```

Al igual que en la lectura de los datos RX, esta instrucción es similar. El primer elemento es de Pipes, el siguiente es el arreglo de Bytes, y el siguiente es la longitud de los datos, son 6 bytes debido a que nuestra resolución de ADC es de 10 bits usamos 2bytes para cada canal.

Por ultimo como las instrucciones del PWM controlaremos la diferencial de tensión para el control de los dispositivos de flujo.

```
fr          =frec*3.921568;  
anc        =ancho*3.921568;  
set_pwm1_duty (anc);  
set_pwm2_duty (fr);
```

Anteriormente mencionamos que para la variación de tensión es controlado por medio del Duty dejando a la frecuencia constante. Dado que la resolución de los datos recibidos RX es de 8 bits,  $2^8 = 256$ , para que el duty tenga un rango de 0% al 100%, el duty tiene un valor de 0 a 1000, por lo que la proporción multiplicativa( $P_m$ ) para tener el sistema calibrado seria:

$$p_m = \frac{1000}{255} \approx 3.921568 \quad (\text{A.6})$$

---

# Apéndice B

## Puerto USB en LabView

---

### B.1. Aplicación de las bibliotecas de Microchip

Para la realización de nuestro proyecto descargaremos de la página de Microchip la biblioteca para la generación del controlador(*driver*) y su aplicación en LabView :

Microchip Application Libraries

Descargamos para nuestro sistema operativo, en nuestro caso para Windows XP 32 bites.

Microchip Application Libraries v2011-10-18 Windows

También podemos descargar la documentación relacionada para la realización del proyecto. Las bibliotecas de la aplicación de Microchip incluye el código fuente completo de las bibliotecas de software: USB, gráficos, unidades de disco de memoria, la pila TCP / IP, mTouch táctiles capacitivos, tarjetas inteligentes, y la Biblioteca MiWi-DE. Esto mejora la inter-operabilidad de las aplicaciones que necesita usar más de una biblioteca. Una vez que descargue las bibliotecas de aplicación de Microchip puede seleccionar los proyectos que usted necesita para su aplicación. Además del código fuente, este paquete de software incluye: esquemas, los controladores, demos, documentación y utilidades.

### **B.1.1. Notas Importantes**

Al principio de conectar un dispositivo USB, en algunos casos, Windows le pedirá al usuario un controlador. El sistema (archivos del controlador binario) en directorios importantes del sistema (como en “\ Windows \ system32 \”) y añadir manualmente las entradas del Registro, Windows automatiza el proceso de instalación del controlador a través del uso de archivos “.INF”. Los archivos “.INF” son de texto plano (se puede editar con el block de notas) de instalación de archivos de script de instrucciones.

Algunos tipos de dispositivos USB no requiere “.INF”, archivos o controladores de usuario proporcionada (por ejemplo, un ratón de clase HID). Para este tipo de dispositivos, el sistema operativo hace uso de los controladores que ya está integrado con el sistema operativo, por lo que el usuario no siempre necesita controlador o archivo “.INF”.

Para otros tipos de dispositivos, Windows le pedirá al usuario un driver. En estos casos, el punto de Windows para el archivo “.INF” es relevantes para el dispositivo USB. Todos los proyectos de ejemplo que se incluye en el marco MCHPFSUSB que necesita un archivo “.INF”. El archivo “.INF” tendrá una ligera modificación (que es más importante para cambiar el VID y PID) antes de la distribución comercial.

### **B.1.2. Notas sobre Vendor ID (VID) y el ID de producto (PID)**

Cada línea de productos USB debe tener una combinación única de VID y PID. Todos los ejemplos de firmware en el directorio ‘fw’ son Microchip VID (0x04d8) y un PID único. Para modificar el VID / PID en el archivo “.INF”, ejecutar el archivo “.INF” relevantes y la búsqueda de “DeviceList”. Hay dos secciones, una para 32-bit y otra para 64-bit, ambas secciones deben ser idénticos. En estas secciones, un poco de texto aparecerá con la forma “USB \ VID\_ xxxx y PID\_ yyyy”. La actualización de la cadena “xxxx” y las secciones de “yyyy” con el nuevo formato hexadecimal VID / PID de los valores.

### **B.1.3. Driver USB**

Microchip proporciona un controlador de Windows de propósito general que puede ser utilizado por las aplicaciones de Windows para conectarse con una clase

personalizada de dispositivos USB. Este controlador no será necesario en muchas aplicaciones USB, tales como dispositivos de clase USB HID, que normalmente se utiliza construido en controladores de clase HID que distribuyen con el sistema operativo.

Para aplicaciones USB que no encajan fácilmente dentro de las limitaciones de estas opciones de otra clase de dispositivos, el controlador de propósito general de Microchip se puede utilizar. Las aplicaciones de Windows pueden acceder a los dispositivos USB directamente, ya sea por la interfaz con el conductor (*mchpubs.sys*), o pueden utilizarse el controlador de forma indirecta a través de una biblioteca de pre-compilados.

Los ejemplos de clase *CustomFirmware* ("Demo" y "Boot") están destinados a ser utilizados con el propósito general del controlador USB.

Después de la instalación, las notas de lanzamiento para el uso general del controlador USB se encuentran en: "C: \ MCHPFSUSB \ Pc \ MCHPUSB Driver \ "

#### **B.1.4. MPUSBAPI: Biblioteca y Librería DLL**

Una clase de aplicaciones personalizadas de Windows con el propósito Microchip general del controlador USB puede conectarse directamente con el driver (*mchpubs.sys*). Si lo hace directamente requiere más esfuerzo y más tiempo para aprender a usar una biblioteca pre-compilados que expone una API sencilla de utilizar como funciones básicas como *OPEN()*, *READ()*, *WRITE()* y *CLOSE()*.

El archivo *MPUSBAPI.DLL* es una biblioteca que ofrece una serie de funciones, incluyendo lo necesarios para leer y escribir a un dispositivo USB. Una lista de las funciones disponibles, y las convenciones de llamada de estas funciones es en la actualidad en forma de línea comentarios en el código fuente del archivo DLL.

## B.2. Programación del VI\_USB en LabView

Empezaremos por crear el VI de USB.

Dirección para la creación del VI.

*LabView* → *VI Bank* → *Create Virtual Instrumen VI Bank*

LabView se compone por una sección de trabajo como lo muestra la figura B.1.

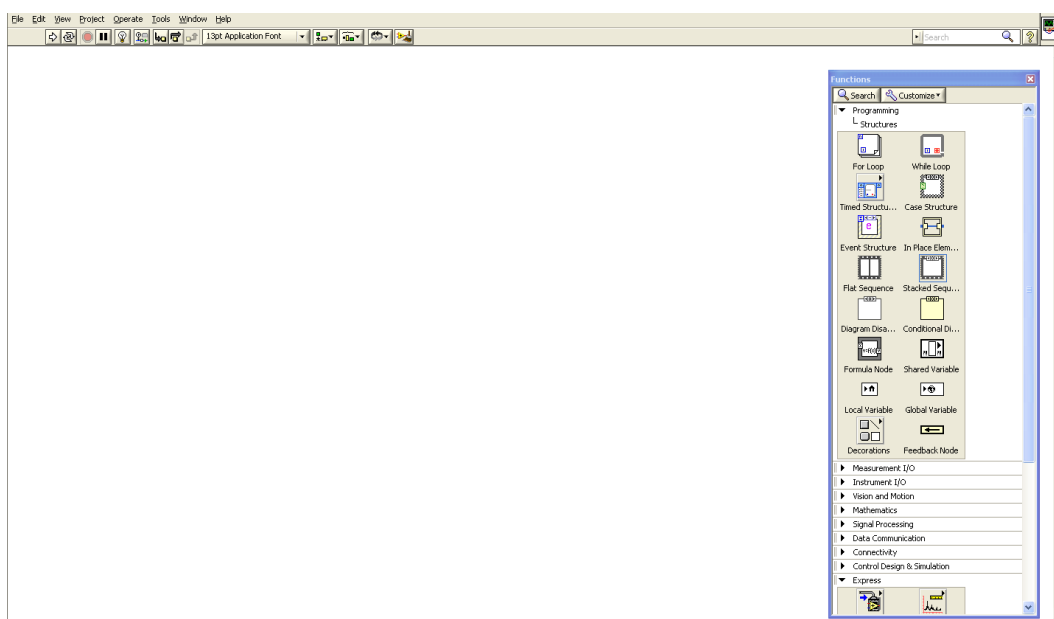


Figura B.1: Sección de panel de trabajo de LabView

En la barra *Funtions* → *programming*

1.- Seleccionamos

*Stracket* → *Secuence* → *Structure*

Para hacer los macros de la programación de secuencias.

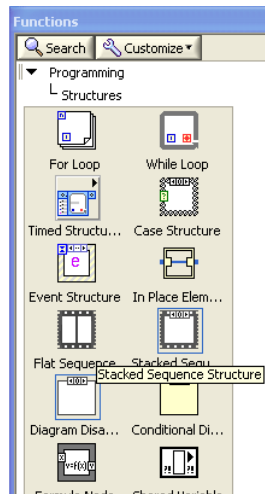


Figura B.2: Sección de panel de Funciones de LabView

2.- Vamos al área de trabajo, damos un click y arrastramos. Para añadir macros seleccionamos y con el boton derecho en *add frame before*.

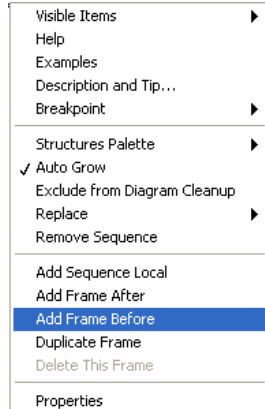


Figura B.3: Sección de Propiedades de Funciones de LabView

3.- Repetimos los pasos 1 y 2 para tener el siguiente resultado. Tanto para el macro 0 y como el macro 3.

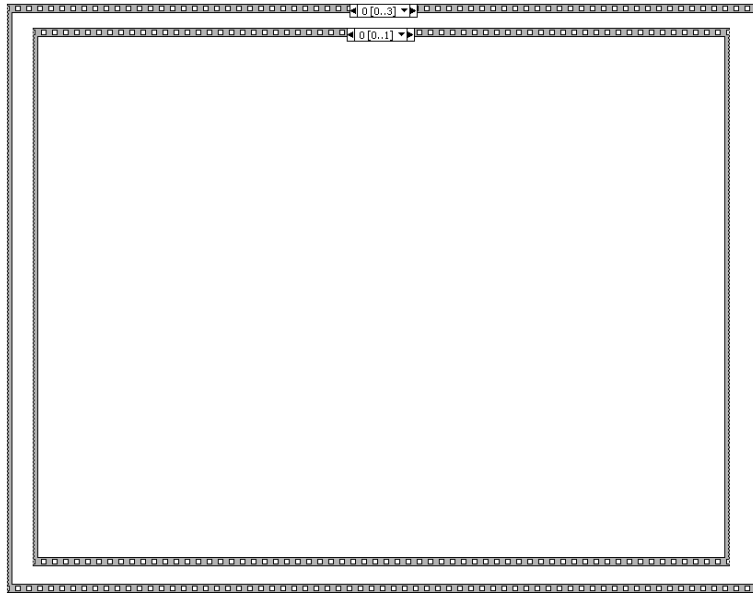


Figura B.4: Sección de Funciones de Macro en LabView

*Nota: La cuestión de poner submacros se debe a la apertura y cierre de los pipes.*

4.- Empezaremos la programación con la librería de DLL en LabView, existe una librería de nodo para las DLL's esta se encuentra en

*Function → Connectivity → Libraries & Executables.*



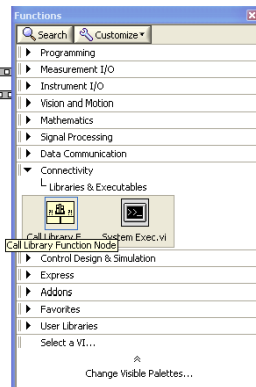


Figura B.5: Función para la Librería DLL

Insertamos el *Call Library Function Node* y cargamos la DLL OPEN.

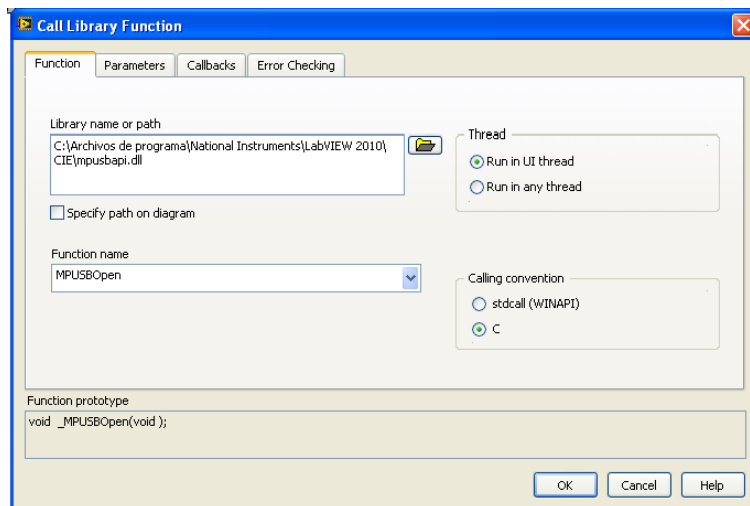


Figura B.6: Nodo de la Función para la Librería DLL

En parametros añadiremos cada uno de estos manualmente.

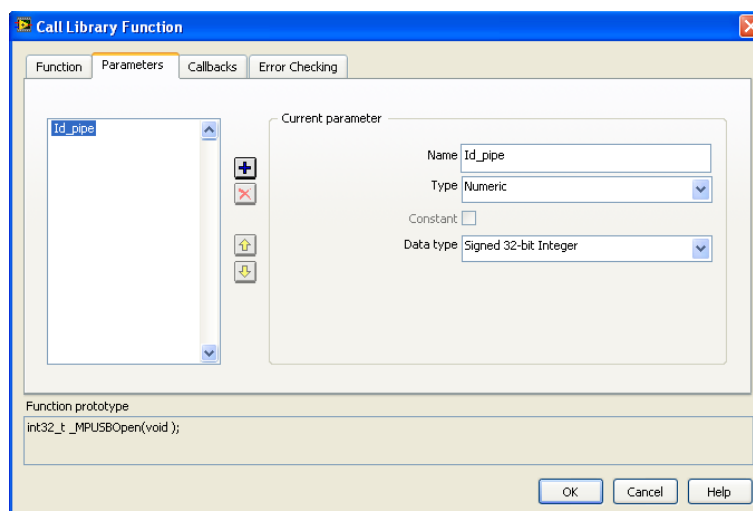


Figura B.7: *Parametros del Nodo de la Función para la Libreria DLL*

Haremos lo mismo con los demas parametros con los datos de la tabla B.1.

	Handle	Instance	pVID_ PID	pPED	wdDIR	wdRESERVED
Name	Id_pipe	Num_Id	VID_ PID	Num_End Point	Dir_End Point	wdReserved
Type	Numeric	Numeric	String	String	Numeric	Numeric
Constant	No	No	Si	Si	No	No
Data type	Signed 32 bit Integer	Signed 32 bit Integer			Signed 32 bit Integer	Signed 32 bit Integer
Pass		Value			Value	Value
String Format			C String pointer	C String pointer		
Minimun Size			None	None		

Tabla B.1: *Datos de los Parametros del Nodo de la Función para la Libreria DLL*

Como resultado tenemos.

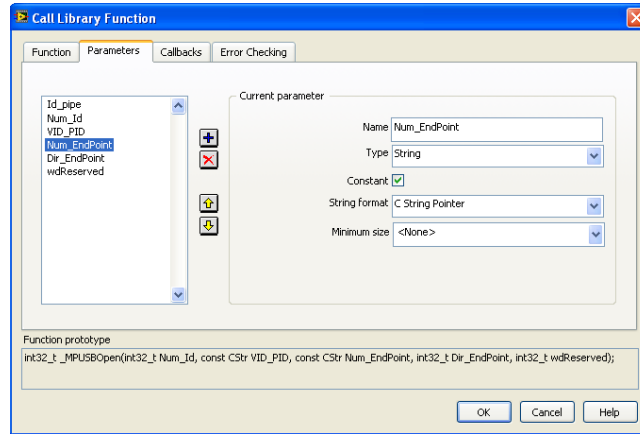


Figura B.8: *Parametros del Nodo de la Función para la Librería DLL*

Nuestra función se mostrara como la figura B.9:

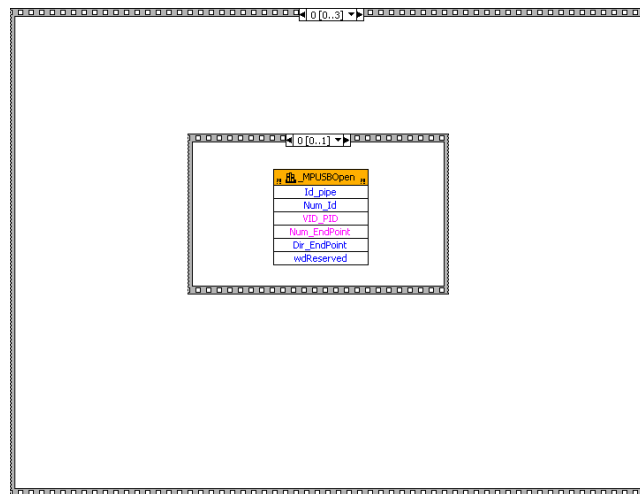


Figura B.9: *Macro con Librería DLL*

Haremos lo mismo con las funciones de READ, WRITE y CLOSE.

5.- Creando la función READ con los mismos paso que el anterior, dado los siguientes parametros de la tabla B.2.

	Handle	pDate	dw LendwLen	pLenght	wd Milliseconds	return
Name	Id_pipen	R_Pipr	R.Bytes	R.Pt_ Bytes	Delay	return
Type	Numeric	Array	Numeric	Numeric	Numeric	Numeric
Constant	No	Si	Si	Si	No	No
Data type	* Signed 32 bit Integer	Signed 16 bit Integer	Signed 32 bit Integer	Signed 32 bit Integer	Signed 32 bit Integer	Signed 32 bit Integer
Pass	Value		Value	** Pointer to Value	Value	
String Format			C String pointer	C String pointer		
Minimun Size						
Dimen-sions		1				
Array Format		Array Data Pointer				

Tabla B.2: Datos de los Parametros del Nodo de la Función para la Libreria DLL

*Nota: Los parámetros asignados son debido a la naturaleza de cada función.*

\* Nuestro ADC del Pic tiene una resolución de 10 Bits es por eso que en nuestra función manejamos 16 Bits.

\*\* Sera un valor puntual para otro parámetro

6.- Creando la función Write con los mismos paso que el anterior, dado los siguientes parámetros mostrados la tabla B.3.

	Handle	pDate	dwLen	pLenght	wd Milliseconds	Return
Name	Id_pipen	Wr_Pipe	Wr.Bytes	Pt.Bytes	Delay	Return
Type	Numeric	String	Numeric	Numeric	Numeric	Numeric
Constant	No	Si	No	No	No	No
Data type	Signed 32 bit Integer		Signed 32 bit Integer	Signed 32 bit Integer	Signed 32 bit Integer	Signed 32 bit Integer
Pass	Value		Value	Value	Value	
String Format		C String pointer				
Minimun Size		None				
Dimensions						

Tabla B.3: Datos de los Parametros del Nodo de la Función para la Libreria DLL

7.- Con el mismo procedimiento creamos la función CLOSE dado los siguientes parámetros mostrados la tabla B.4.

	Handle	Return
Name	Id_pipen	Return
Type	Numeric	Numeric
Constant	No	No
Data type	Signed 32 bit Integer	Signed 32 bit Integer
Pass	Value	

Tabla B.4: Datos de los Parametros de CLOSE

8.- Asignaremos los valores de entradas y salidas para cada función.

Open:

Valores asignados a esta función para el macro 0:

	Handle	Instance	pVID_PID	pPED	wdDIR	wd RESERVED
Name	Id_pipen	Num.Id	VID_PID	Num.End Point	Dir.End Point	wd Reserved
Entrada		0	*vid_04d8&pid.0010	** MCHP_EP1	0	0
Salida		*** outpipe				

Tabla B.5: Valores del macro 0

Los valores asignados del macro 1:

	Handle	Instance	pVID_PID	pPED	wdDIR	wd RESERVED
Name	Id_pipen	Num.Id	VID_PID	Num.End Point	Dir.End Point	wd Reserved
Entrada		0	*vid_04d8&pid.0010	** MCHP_EP1	1	0
Salida		*** inpipe				

Tabla B.6: Valores del macro 1

*Nota: Algunos valores dependen del hardware.*

*\*Asignamos el VID y PID de nuestro dispositivo.*

*\*\*Depende de los dispositivos a utilizar.*

*\*\*\*Creamos un indicador con referente al tipo de dato en este caso es de 32.*

Creamos una variable local write para outpipe inpipe de la misma forma que

creamos los demas valores



Para asignar los valores colocamos el cursor en el parámetro deseado y con botón derecho asignamos el valor correspondiente.

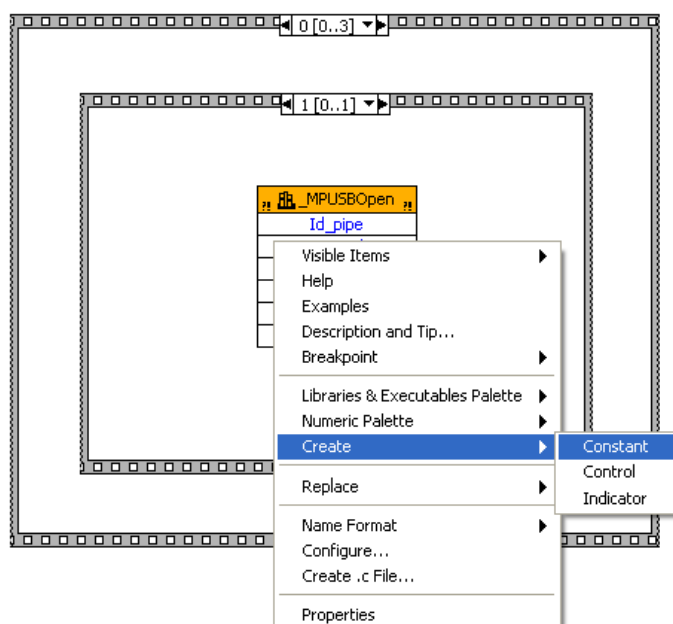


Figura B.10: Asigna Valores

Nuestros valores asignados quedan de la siguiente forma.

9.- repetimos el paso 8 para cada función restante asignando los valores de las tablas B.7 y B.7.

Para Write:

Para Read:

*Nota: Los valores dependerá de los requisitos del proyecto.*

*\*Bytes de entrada y salida en los Pipes.*

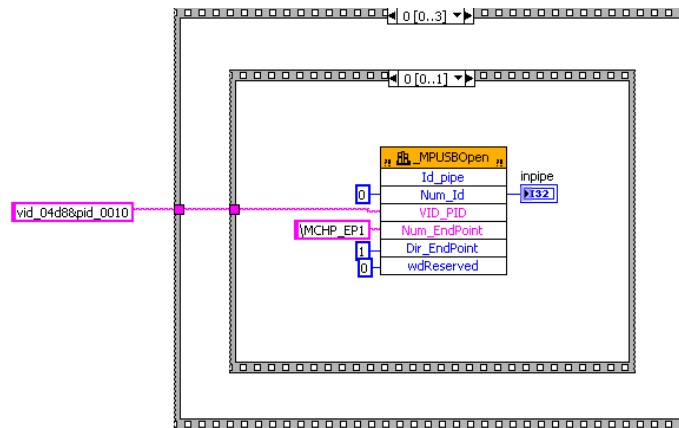


Figura B.11: Asigna Valores

	Handle	pDate	dwLen	pLenght	wd Milliseconds	Return
Name	Id_pipe	Wr_Pipe	Wr_Bytes	Pt_Bytes	Delay	Return
Entrada	outpipe		*5		1	
Salida				**pLenght		

Tabla B.7: Valores para Write

\*\* Si queremos ver el puntero del número de bytes que se escriben al llamar esta función.

Para Close:

Macro 0:

Macro 1:

*Nota: Las funciones interactúan abriendo y cerrando los pipes.*

*\*Al igual que el Write y Read, creamos variables locales para estos.*

	Handle	pDate	dwLen	pLenght	wd Milliseconds	Return
Name	Id_pipen	R.Pipe	R.Bytes	R.Pt.Bytes	Delay	Return
Entrada	inpipe		*10		1	
Salida						

Tabla B.8: *Valores para Read*

	Handle	Return
Name	Id_pipen	Return
Entrada	outpipe	

Tabla B.9: *Valores para CLOSE macro 0*

	Handle	Return
Name	Id_pipen	Return
Entrada	inpipe	

Tabla B.10: *Valores para CLOSE macro 0*



---

# Bibliografía

---

- [1] Angel De La Vega Navarro. *Economía de la Enería*. Noviembre/diciembre 2012.
- [2] Ruben Andres Dueñas Garcia y Carlos Garcia Sagredo Olgin. *Celdas de Combustible, Tecnología Alternativa para la Generación de Energía Eléctrica*. 2001.
- [3] Instituto Nacional de Estadística en México. *El sector Energético en México*. 2000.
- [4] Salvador Barragán Heredia. *Ciencia y tecnología, ejes del progreso*. Noviembre/diciembre 2012.
- [5] Edwar W. Justi. *Hidrógeno. Energía para el Futuro*. 1995.
- [6] Carlos Asteasu. *Las Celdas de Combustible*. 2010.
- [7] Edgar Villaseñor Franco. *Las Celdas de Combustible: Inicio de la era del Hidrógeno*. 2000.
- [8] Departamento de Ingeniería Mecánica. *Artículos de los proyectos de grado realizados por los estudiantes de Ingeniería Mecánica que se graduaron en el año 2005*. 2006.
- [9] Jose Moreira Acosta. *Optimización y Desarrollo de una Celda de Combustible del tipo PEM*. 2001.
- [10] Ana Lilia Ocampo Flores. *Desarrollo de Nuevos Materiales Electrocatalíticos y su Aplicación en una Celda de Combustible de Metanol Directo*. 2001.
- [11] Carlos A. Pistones. *Celdas de Combustible: Ventajas de una generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica*. 2009.

- [12] Don Anderson. *Universal Serial Bus System Architecture*. 1997.
- [13] Jan Axelson. *USB Complete: Everything You Need to Develop Custom USB Peripherals*. 2005.
- [14] Román Mozuelos García *Test Basado en Sensores de Corriente internos para Circuitos Integrados Mixtos (Analógicos-Digitales)* 2009.
- [15] Departamento de Diseño Mecanico Instrumentación Industrial. *Sensores de Temperatura* 2008.
- [16] Robert L. Boylestad *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos* 2005.
- [17] Custom Computer Services, Inc. *C Compiler Reference Manual* 2010.
- [18] Eduardo García Breijo *Compilador C CCS y Simulador Proteus para Microcontroladores PIC* 2008.
- [19] J.A. Pérez Cueto *Comunicación USB de Alta Velocidad entre LABVIEW y un Microcontrolador para la Adquisición de Datos en Tiempo Real* 2009.
- [20] Cory L. Clark *Labview: Digital Signal processing and Digital Communications* 2010.
- [21] Enrique Palacios *Microcontrolador PIC Desarrollo de Proyectos* 2004.
- [22] James W. Nilson *Electric Circuits* 2006.
- [23] Federico Miyara *Respuesta en Frecuencia de Amplificadores* 2001.
- [24] Igor Alvarado *Simulación y Control de Procesos con Programación Gráfica*
- [25] Richard C. Dorf *Sistemas de Control Moderno* 2005.
- [26] Erick López Pérez *El Protocolo USB* 2009.
- [27] Jorge Arturo Rodríguez Hernández *USB: Modo Bulk Transfer* 2010.
- [28] National Instrument *Introduction to National Instrument Labview* 2011.