



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
MATERIALES AVANZADOS, S.C.

**“TESIS QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN ENERGÍAS RENOVABLES”**

PRESENTA:

RAFAEL OCAMPO MARTÍNEZ

TÍTULO:

*“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN
DE CELDAS DE COMBUSTIBLE Y DE ADQUISICIÓN DE DATOS CON
LABVIEW”*

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ ALBERTO DUARTE MOLLER

DR. JUAN MANUEL OLIVAREZ RAMÍREZ

CHIHUAHUA, CHI.

NOVIEMBRE, 2014

RESUMEN

La obtención de equipo de experimental es sumamente costosa y depende casi siempre de la importación de tecnología de países desarrollados por lo que se pretende que con base al diseño, desarrollo y construcción de sistemas similares se elabore un equipo de experimentación para el análisis y caracterización de celdas de combustible que permita evaluar las diferentes líneas de investigación en la experimentación de celdas de combustible del tipo PEMFC (Protonic Exchange Membrane Fuel Cell), la construcción de este equipo involucra la integración de diferentes componentes comerciales, así como la elaboración de una interfaz gráfica de operación en la que se empleará el software Labview, y de acuerdo a la metodología poder evaluar el desempeño de las celdas de combustible y las variantes que surgen tanto en el proceso de prueba como en el tipo de elementos que las integran.

En el sistema de universidades tecnológicas se han abierto las carreras de energías renovables que involucran la creación de infraestructura propia para realizar actividades de investigación y experimentación relacionadas con la búsqueda de energías renovables que promuevan el cuidado del medio ambiente dentro de un marco sustentable esto y los recursos limitados para autoequiparse es la principal razón del desarrollo de este proyecto.

ABSTRACT

Obtaining experimental equipment is extremely expensive and almost always dependent on imported technology developed countries. Therefore it is intended that based on the design, development and construction of similar systems testing equipment for analysis and characterization is developed fuel cells to evaluate the different lines of research in testing of PEMFC fuel cells (Protonic Exchange Membrane fuel Cell) type, the construction of this equipment involves the integration of various commercial components as well as the development of a graphical interface operating in the Labview software will be used, according to the methodology to evaluate the performance of fuel cells and variants that arise both in the testing process and the type of elements that make them up.

In the system of technological universities have opened renewable energy careers that involve the creation of own infrastructure for research and experimentation related to the search for renewable energies to promote environmental care within a sustainable framework and this limited resources to purchase equipment are the main reason for developing this project.

DEDICATORIAS

A mi familia que es la base de todo propósito en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios primeramente por permitirme realizar este proyecto y también agradezco sinceramente a:

Dr. Juan Manuel Olivares Ramirez, que de manera muy profesional y desinteresada siempre me ha apoyado en la realización de este y otros proyectos, reconozco y admiro su entrega y pasión por el trabajo. De manera personal doy gracias por conocerlo y poder trabajar con él.

Dr. José Alberto Duarte Moller principal promotor e impulsor para que profesores del subsistema de Universidades Tecnológicas realizáramos estudios en el área de energías renovables, agradezco su tiempo y dedicación que ha tenido para todos nosotros los estudiantes y en particular con el trabajo realizado en este reporte.

Agradezco también a: Dr. Victor Manuel Sánchez Cabrera rector de la UTSJR por apoyar este posgrado, al Dr. Marco Antonio Zamora, al M.en A.P.I. Fidencio Díaz Méndez, Ma. Teresa Rivera Nava, a mis compañeros de estudio en esta sede de San Juan del Río y en general a la UTSJR que en su labor profesional aportaron tanto para poder realizar este programa de manera exitosa mis compañeros y yo, no cabe duda que los logros personales e institucionales son resultado del trabajo conjunto de todos los que conformamos esta nuestra comunidad universitaria.

Agradecemos al proyecto CONACYT: Apoyo al Fortalecimiento y Desarrollo de la Infraestructura Científica y Tecnológica 2014, UTSJR-Investigación Aplicada en Energías Renovables, Número de registro de solicitud: 224366.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de equipo para la caracterización de celdas de combustible es un rubro nuevo en la mayor parte de las instituciones de nuestro país ya que la falta de recursos aunado con el rezago tecnológico que enfrentamos frente a instituciones de países desarrollados es patente en nuestro entorno y demanda la respuesta y participación de las universidades. Poder contar con equipo de experimentación y abre la posibilidad de desarrollo y experimentación en esta área.

Las universidades tecnológicas representan un polo de desarrollo que el país necesita, las características del sistema plantean retos en la infraestructura que debemos enfrentar con recursos propios por lo que el desarrollo de equipo para realizar experimentación de celdas de combustible es una respuesta a estas demandas.

El diseño y construcción de equipo experimental en el área de celdas de combustible permitirá investigar, experimentar y aportar nuevas líneas de conocimiento a la literatura existente y también podrá enlazar el trabajo realizado con otras instituciones educativas promoviendo y contribuyendo a la construcción y desarrollo de energías alternativas que observen los principios de sustentabilidad para contribuir al cuidado de nuestro ambiente y lograr un mundo mejor.

En el capítulo uno se describen los antecedentes teóricos de las celdas de combustible que como en muchas áreas de la ciencia es prudente investigar sobre lo que se ha hecho y esta haciendo a fin de generar líneas de investigación para poder experimentar.

El capítulo dos describe la situación actual de búsqueda de equipo y el reto de buscar la forma de construir un equipo de prueba para celdas de combustible definiendo las características necesarias para su buen funcionamiento.

Una vez definidos los objetivos el capítulo tres aborda la metodología empleada en la experimentación y validación de las mediciones, para que por último en el capítulo cuatro se desarrollen las corridas correspondientes y evaluar el desempeño del prototipo y de las celdas de combustible.

Se plantea también las opciones futuras siguiendo algunas líneas de investigación para la evaluación de celdas de combustible y que se deberán adecuar para considerar su impacto en su desempeño.

La realización de este proyecto se pudo hacer realidad con el apoyo de varios actores: La Universidad Tecnológica de San Juan del Río, el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro a todos ellos muchas gracias.

INDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
DEDICATORIAS.....	4
AGRADECIMIENTOS	5
INTRODUCCIÓN	6
INDICE.....	8
INDICE DE FIGURAS	11
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	14
1.1. Introducción.....	14
1.2. Descripción del problema	15
1.3. Hipótesis.....	15
1.4. Justificación	15
1.5. Objetivo.....	16
1.5.1. Objetivos particulares	16
1.6. Estado del arte.....	17
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	19
2.1. Generalidades de las celdas de combustible PEMFC's	19
2.2. Breve historia de las celdas de combustible	20
2.3. Definición de celda de combustible	21
2.4. Estructura de una celda de combustible	22
2.5. Funcionamiento de una celda de combustible	24
2.6. Aspectos electroquímicos y catalíticos de las celdas de combustible	26
2.7. Proceso de catálisis del Pt.....	27

2.8. Aspectos termodinámicos	29
2.9. Generador eléctrico y tipos de pilas de combustible (18).....	31
2.10. Pilas de combustible con membranas de intercambio protónico como electrolito	33
2.10.1. Nafion.....	33
2.10.2. Cortocircuito químico o “crossover”	33
2.10.3. Membranas poliméricas alternativas al nafion.....	34
2.10.4. Conductores protónicos basados en vidrio.....	35
2.10.5. Materiales híbridos orgánico-inorgánicos	35
2.10.6. Membranas cerámicas nanoporosas.....	35
2.10.7. Catalizadores	36
2.11. Fabricación de ensamblajes electrodo-membrana y pilas de combustible.....	37
2.12. Beneficios de las celdas de combustibles	38
2.13. Sistema de control.....	39
2.13.1. Sistemas de control en lazo abierto	40
2.13.2. Sistemas de control en lazo cerrado.....	42
2.14. Componentes de un sistema de control	42
2.15. Variables Primarias.....	43
2.15.1. Temperatura	43
2.15.2. Presión.....	45
2.15.3. Nivel	47
2.15.4. Flujo.....	49
2.16. Acondicionamiento de señales	51
2.17. Componentes electrónicos	52
2.17.1. Resistencias	53
2.17.2. OPAM	54
2.17.3. Optoacoplador	56
2.17.4. Led.....	58
2.18. Software de simulación de circuitos.....	58
2.19. Adquisición de datos	60
2.19.1. Software de adquisición de datos	60
2.20. Equipo de medición de laboratorio	63

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y MATERIALES	65
3.1. Metodología del proyecto	65
3.2. Descripción de bloques.	66
3.3. Materiales y equipo	67
CAPÍTULO 4. RESULTADOS DEL SISTEMA CARACTERIZADOR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	69
4.1. Sistema de control de flujo.....	69
4.1.1. Cilindros	70
4.1.2. Válvulas reguladoras de presión, manómetros y conexiones	71
4.1.3. Controlador de flujo másico	72
4.1.4. Controlador indicador de flujo de cuatro canales.....	73
4.2. Celda de combustible	74
4.3. Sistema de caracterización	74
4.3.1. Circuito variador de resistencia	75
4.3.2. Sistema de control e Interfaz de usuario.....	76
4.4. Resultados de la adquisición de datos.	79
4.4.1. Adquisición de datos.....	80
4.5. Equipo de medición para validación	82
4.6. Descripción de variables adquiridas y calculadas	82
4.7. Análisis de los resultados y graficas de comportamiento.....	82
4.8. Curvas características de la monocelda.....	83
4.9. Integración de resultados	98
CONCLUSIONES.....	103
ANEXOS	

INDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Estructura de una celda de combustible (6)	23
Figura 4.2. Canales en las placas de una celda de combustible (8)	23
Figura 4.3. Imagen de una celda de combustible aire/hidrógeno (10).....	25
Figura 4.4. a. Curva de polarización, b. Curva de potencia vs densidad de corriente	28
Figura 4.5. Generador eléctrico de pila de combustible.....	31
Figura 4.6. Esquema de funcionamiento de los distintos tipos de pilas de combustible	32
Figura 4.7. Aplicaciones de las pilas de combustible y potencia suministrada	32
Figura 4.8. Conductividad de membranas cerámicas nanoporosas	36
Figura 4.9. Estructura idealizada del Pt soportado sobre partículas de Carbono	36
Figura 4.10. Esquema simplificado e ideal de un electrodo de PEMFC.....	37
Figura 4.11. Esquema de una Pila de Combustible Polimérica	37
Figura 4.12. Sistema en lazo abierto	40
Figura 4.13. Sistema de control en lazo cerrado.....	42
Figura 4.14. Termopar	45
Figura 4.15. El tubo de bourdon.....	47
Figura 4.16. Placa orificio	51
Figura 4.17. Tubo de Venturi.....	51
Figura 4.18. Componentes electrónicos	53
Figura 4.19. Resistores	54
Figura 4.20. OPAM	54
Figura 4.21. OPAM Comparador	55
Figura 4.22. OPAM Seguidor	56
Figura 4.23. OPAM No inversor.....	56
Figura 4.24. Esquema OPTO.....	57
Figura 4.25. Corte de un Optoacoplador.	57
Figura 4.26. Diferentes tipos de Optoacopladores	58
Figura 4.27. LED.....	58
Figura 4.28. ISIS	59
Figura 4.29. Asistente DAQ	60

Figura 4.30. Entrada Análoga.....	61
Figura 4.31. Selección de entrada	61
Figura 4.32. Configuración.....	62
Figura 4.33. Esquema de conexión	62
Figura 4.34. Multímetro.....	63
Figura 4.35. Amperímetro	64
Figura 3.1. Banco de caracterización de celdas.....	65
Figura 4.1. Cilindros de oxígeno e hidrógeno	71
Figura 4.2. Flujómetros de gases	72
Figura 4.3. Controlador de flujo.....	74
Figura 4.4. Circuito electrónico para la variación de la carga en la celda de combustible	76
Figura 4.5. Pantalla de lanzamiento del software Labview	77
Figura 4.6. Panel frontal de la aplicación de Labview	78
Figura 4.7. Diagrama de bloque de una aplicación de Labview	79
Figura 4.8. Sistema de adquisición de datos	81
Figura 4.9. DAQ y tarjeta NI-6229.....	81
Figura 4.10. Corriente contra número de muestras corrida uno	83
Figura 4.11. Densidad de potencia contra densidad de corriente corrida uno	84
Figura 4.12. Eficiencia contra densidad de potencia corrida uno	85
Figura 4.13. Voltaje contra número de muestras corrida uno	83
Figura 4.14. Voltaje contra densidad de corriente corrida uno	85
Figura 4.15. Corriente contra número de muestras corrida dos.....	86
Figura 4.16. Densidad de potencia contra densidad de corriente corrida dos	87
Figura 4.17. Eficiencia contra densidad de potencia corrida dos.....	87
Figura 4.18. Voltaje contra número de muestras corrida dos.....	86
Figura 4.19. Voltaje contra densidad de corriente corrida dos.....	88
Figura 4.20. Corriente contra número de muestras corrida tres	89
Figura 4.21. Densidad de potencia contra densidad de corriente corrida tres.....	89
Figura 4.22. Eficiencia contra densidad de potencia corrida tres	90
Figura 4.23. Voltaje contra número de muestras corrida tres	88
Figura 4.24. Voltaje contra densidad de corriente corrida tres	90

Figura 4.25. Corriente contra número de muestras corrida cuatro	91
Figura 4.26. Densidad de potencia contra densidad de corriente corrida cuatro	92
Figura 4.27. Eficiencia contra densidad de potencia corrida cuatro	92
Figura 4.28. Voltaje contra número de muestras corrida cuatro	91
Figura 4.29. Voltaje contra densidad de corriente corrida cuatro	93
Figura 4.30. Corriente contra número de muestras corrida cinco	94
Figura 4.31. Densidad de potencia contra densidad de corriente corrida cinco	94
Figura 4.32. Eficiencia contra densidad de potencia corrida cinco	95
Figura 4.33. Voltaje contra número de muestras corrida cinco	93
Figura 4.34. Voltaje densidad de corriente corrida cinco	95
Figura 4.35. Corriente contra número de muestras corrida seis	96
Figura 4.36. Densidad de potencia contra densidad de corriente corrida seis	97
Figura 4.37. Eficiencia contra densidad de potencia corrida seis	97
Figura 4.38. Voltaje contra número de muestras corrida seis	96
Figura 4.39. Voltaje contra densidad de corriente corrida seis	98
Figura 4.40. Curvas de voltaje en la celda	98
Figura 4.41. Curvas de corriente en la celda	99
Figura 4.42. Densidad de potencia contra densidad de corriente	99
Figura 4.43. Eficiencia contra densidad de potencia	100
Figura 4.44. Voltaje contra densidad de corriente	100

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. Introducción

El desarrollo de equipo para la caracterización de celdas de combustible es un rubro nuevo en la mayor parte de las instituciones de nuestro país ya que la falta de recurso aunado con el rezago tecnológico que enfrentamos frente a instituciones de países desarrollados es patente en nuestro entorno y demanda la respuesta y participación de las personas. La formación de recursos humanos es una decisión acertada para emprender el camino y desarrollar nuestras propias líneas de investigación, el convenio de instituciones como el CIMAV y la Coordinación de Universidades Tecnológicas para la formación de Maestros en Energías Renovables y otras áreas de relevancia tecnológica y actual contribuye a enfrentar el reto de incursionar en áreas de experimentación con mucho potencial como lo es el desarrollo de nuevas formas de generación de energía.

El trabajo desarrollado en relación a la optimización y utilización de celdas de combustible es parte principal de este trabajo, poder contar con equipo de experimentación y abrir la posibilidad de desarrollo y experimentación en esta área es una meta y principal motivación de los que estamos incursionando en este campo.

Las universidades tecnológicas representan un polo de desarrollo que el país necesita, las características del sistema plantean retos en la infraestructura que debemos enfrentar con recursos propios por lo que el desarrollo de equipo para realizar experimentación de celdas de combustible es una respuesta a estas demandas.

El diseño y construcción de equipo experimental en el área de celdas de combustible permitirá investigar, experimentar y aportar nuevas líneas de conocimiento a la literatura existente y también podrá enlazar el trabajo realizado con otras instituciones educativas promoviendo y contribuyendo a la construcción y desarrollo de energías alternativas que observen los principios de sustentabilidad para contribuir al cuidado de nuestro ambiente y lograr un mundo mejor.

1.2. Descripción del problema

En el sistema de universidades tecnológicas se han abierto las carreras de energías renovables que involucran la creación de infraestructura propia de las labores de investigación y experimentación relacionadas con la búsqueda de energías alternativas que promuevan el cuidado del medioambiente bajo el principio de sustentabilidad.

La obtención de equipo de experimental es sumamente costosa y depende casi siempre de la importación de tecnología de países desarrollados por lo que se pretende que con base al diseño, desarrollo e implementación de sistemas similares se elabore un equipo de experimentación para el análisis y caracterización de celdas de combustible que permita evaluar las diferentes líneas de investigación que se presentan con el trabajo de experimentación de celdas de combustible del tipo PEMFC (Protonic Exchange Membrane Fuel Cell), la construcción de este equipo involucra la integración de diferentes componentes comerciales, así como la síntesis y construcción componentes nuevos para que derivado de la metodología poder evaluar el desempeño de las celdas de combustible y las variantes que surgen tanto en el proceso de prueba como en el tipo de elementos que las integran.

El lograr este equipamiento permitirá también ofrecer tanto al sistema de universidades tecnológicas como al mercado exterior la opción de contar con equipo accesible y propiciar el desarrollo en las diferentes instituciones que estén trabajando con celdas de combustible en el área de energías renovables.

1.3. Hipótesis

¿Es posible construir un banco de pruebas de celdas de combustible que permita a través de la adquisición de datos con LabVIEW caracterizar y evaluar su desempeño?

1.4. Justificación

Con la construcción de equipo se permitirá caracterizar celdas de combustible y determinar el impacto del diseño de nuevas topologías, desempeños de nuevos

materiales y/o componentes propios de la celda tal como electrodos, y membranas. Además permitirá el equipamiento necesario para la realización de prácticas de laboratorio a los alumnos de las carreras de química y energías renovables ya que actualmente no se cuenta.

1.5. Objetivo

Desarrollar un dispositivo que permita determinar caracterizar celda de combustible a través de un sistema de adquisición de datos para la medición de potencia.

1.5.1. Objetivos particulares

- ✓ Diseño de una interfaz de usuario con Labview para la visualización de resultados.
- ✓ Elección de un sistema de adquisición de datos para la medición de Potencia, en base a tarjetas DAQ de National Instruments.
- ✓ Elección de un sistema de medición y control de flujo de combustible para determinar su impacto en la eficiencia.
- ✓ Diseño de un sistema electrónico de adecuación para la evaluación de las celdas de combustible.
- ✓ Comprobación y validación de resultados obtenidos del sistema contra equipo de medición de laboratorio.
- ✓ Evaluación de resultados en base a los desempeños y análisis de graficas de: Corriente, voltaje, eficiencia contra densidad de potencia, densidad de potencia contra densidad de corriente, y voltaje contra densidad de corriente.

1.6. Estado del arte

Derivado de la crisis energética mundial en la actualidad existen numerosos esfuerzos en el desarrollo e investigación de nuevas formas de generar energía, aunado a la necesidad de encontrar energías alternativas se suma la obligación de conservar nuestro medioambiente. La generación de energía por medio de celdas de combustible toma especial importancia por sus características de gran eficiencia y poca o casi nula contaminación. Un gran número de instituciones y centros de investigación están interesadas en mejorar la eficiencia y desempeño de las celdas de combustible así como nuevas formas de construcción que permitan hacer realidad una nueva forma de proveer energía al mundo moderno.

Para lograr mejores resultados en cualquier empresa es necesario medir los objetivos planteados para la investigación y desarrollo de celdas de combustible se hace necesario contar con elementos de medición que permitan evaluar el desempeño de las mismas considerando las variables que le afectan y realizando ajustes y mejoras para volver a realizar un ciclo de evaluación. Dentro de este ámbito de evaluación del desempeño de las celdas de combustible es necesario contar con equipo para poder realizar las mediciones de una manera acertada y oportuna, es así que existen diferentes empresas que ofrecen alternativas para lograr este propósito, tal es el caso de la empresa Electrochem que dentro de su oferta de productos y servicios ofrece estaciones de prueba de Celdas de Combustible, tal como el modelo "ELECTROCHEM PS-COMPUCELL" que es un equipo muy completo pero que también es muy caro ya que su precio esta por arriba de un millón de pesos y para poder comprarlo una universidad necesita de financiamiento. La empresa ElectroChem es una empresa líder en el área de investigación y desarrollo de celdas de combustible. Desde su fundación en 1986 ha traído al mercado en esta área alrededor de 15 productos que van desde componentes para las celdas hasta equipo de análisis prueba. La empresa aprovecha los atributos de las energías alternativas y promueve un slogan que dice: "No solo vendemos grandes productos, vendemos un mejor futuro".

A continuación se describen las características de la estación de prueba de celdas de combustible PS-COMPUCELL:

- ✓ Tienen un rango de potencia de hasta 800 W
- ✓ Voltaj: 0 – 10 V, 0 – 20 V y 0 – 50 V.
- ✓ Corriente: 0 – 2 A, 0 – 20 A, y 0 – 150 A.
- ✓ Controladores de flujo másico para la sección de suministro de gas.
- ✓ Reguladores del back pressure.
- ✓ Control de humidificación.
- ✓ Control de temperatura.
- ✓ Control de la carga eléctrica.
- ✓ Carga electrónica programable.
- ✓ Software para el monitoreo y control.

Como se puede apreciar por las características antes citadas, la estación de pruebas de la marca ElectroChem es muy completa y versátil pero el tener un equipo de esta magnitud representa una gran inversión que no todos pueden tener acceso, y es por eso que el desarrollar un prototipo con recursos limitados como es el caso del presente reporte incorpora algunas ventajas entre las que destacan un costo mucho más accesible y el desarrollo particular hecho de acuerdo a las necesidades específicas del usuario que se podrá mejorar, adecuar y potenciar dependiendo de las aplicaciones que cursen los experimentos.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

2.1. Generalidades de las celdas de combustible PEMFC's

Dentro de las principales oportunidades de mejora para reducir los índices de contaminación y emisión de CO₂ principalmente se encuentran las pilas de combustible, que pueden ser utilizadas en los automóviles. Una ventaja reside en que no disponen partes móviles, por tanto, el ruido y el mantenimiento serán mínimos. El principal combustible empleado en dichas pilas, para la generación de electricidad es el hidrógeno, el cual puede ser almacenado en el vehículo en depósitos a presión, o en forma de hidrógeno líquido a temperaturas criogénicas. Se suele elegir la opción de producir hidrógeno a bordo a partir de metanol mediante un proceso combinado de reformado y oxidación parcial.

La teoría de celdas de combustible (CC) se puede remontar hacia 1800 por William Grove, quien realizando la electrólisis mediante electricidad, podía separar el agua en hidrógeno y oxígeno; entonces, el caso reversible sería verdad. Combinando hidrógeno y oxígeno con el método correcto se podría producir electricidad. Las celdas de combustible son reactores electroquímicos abiertos que convierten la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica. Por ejemplo, pueden generar electricidad combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente sin ninguna combustión; estas celdas no se agotarían como lo haría una batería convencional, ni precisan recarga, ya que producirán energía en forma de electricidad y calor en tanto se les provea de combustible. Las celdas de combustible consisten en dos electrodos un ánodo y un cátodo separados por un electrolito iónico conductor (PEM). Cuando el hidrógeno es ionizado en el ánodo se oxida y pierde un electrón. Al ocurrir esto, el hidrógeno oxidado (ahora en forma de protón) y el electrón toman caminos diferentes, migrando hacia el segundo electrodo llamado cátodo. El hidrógeno lo hará a través del electrolito, mientras que el electrón lo hará por un material conductor externo en donde se ubicara la carga. Al final de su camino se vuelven a reunir en el cátodo, donde ocurre la reacción de reducción o ganancia de electrones del oxígeno para formar agua junto

con el hidrógeno oxidado. Así este proceso genera agua 100% pura, corriente eléctrica y calor útil (1).

Esta nueva tecnología comenzó a desarrollarse en los años 60 en diversas misiones del programa Gemini; el objetivo en nuestros días es disminuir el coste de las pilas de combustible y es el principal enemigo a combatir, así como aumentar su confiabilidad.

2.2. Breve historia de las celdas de combustible

Aunque las celdas de combustible son consideradas modernas, o tecnología de punta, el señor William Robert Grove fue el primero en construirlas en el año de 1839, unidad a la que llamo batería de gas (2). Un dispositivo que combinado con hidrogeno y oxígeno producía electricidad.

El sumergió los extremos de los electrodos de platino en ácido sulfúrico y cada uno de los extremos en recipientes herméticos y separados de oxígeno e hidrogeno y combinados varias de estas celdas en circuitos para producir electricidad. Esta invención generaba un interesante paso para este tiempo, pero este descubrimiento fue eclipsado por la pronta invención de la máquina de vapor y la llegada de la era de los combustibles fósiles baratos.

Para las celdas de combustible su desarrollo continuo de forma intermitente durante el siguiente siglo, con nuevos enfoques en los electrolitos descubiertos por las numerosas y diferentes investigaciones, incluyendo al precursor del carbonato fundido y oxido solido de celdas de combustible de hoy en día.

Durante la segunda guerra mundial el ingeniero británico Bacon investigo el uso de un electrolito alcalino, basándose en el uso del hidróxido de potasio. Aunque no hay ningún registro de que las celdas de combustible fueron usadas durante la guerra, estos avances condujeron a un interés renovado. En 1959, Bacon desarrollo una estación de celdas de combustible usando hidróxido se potasio como electrolito de 5 kW.

El primer vehículo con celdas de combustible motorizado en el mundo fue de Allis Chalmers 15 kW con su tractor de celdas de combustible motorizado, construido en 1959 por un equipo liderado por Harry Ihrig. Este fue accionado por un sistema de celdas de combustible alcalinas, y en octubre de 1959 fue un éxito arando un campo de alfalfa en West Allis, Wisconsin. Después de la demostración este vehículo fue donado al museo Smithsonian.

La tecnología de las celdas de combustible así como la investigación y desarrollo fue significativo y acelerado para la inclusión de la tecnología en la NASA para la primera tripulación espacial prolongada en el espacio. El orbitador necesitaba una fuente de electricidad que pudiera pasar de los 8 días en el espacio. Y las baterías y la energía fotovoltaica eran demasiado grandes y pesadas en esa época. Y además había otra ventaja, que los astronautas podían consumir el agua de las celdas de combustible que producían. La misión Géminis usó celdas de combustible basada en membranas de intercambio protónico (PEM). Sin embargo posteriormente la misión Apolo

En 1950 General Electric Company (GE) introduce el uso de una membrana de intercambio de iones sólido, como electrolito y desarrolla un método de deposición de platino como catalizador en la membrana.

En 1958 United Technologies Corporation (UTC) se estableció como una división de Pratt and Whitney y ha sido el suministro de las celdas de combustible en el espacio hasta la fecha. UTC también fue el primer comercializador a gran escala de 200kW de sistemas de generador de potencia estacionaria para usarla como co-generador en las plantas de poder en hospitales, universidades y grandes edificios de oficinas (3).

2.3. Definición de celda de combustible

Existen muchas definiciones en la literatura especializada en C.C., pero se tomará la más común y la más sencilla de entender a manera de ejemplo. De acuerdo a Báez, una celda de combustible se puede definir como sigue:

“Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma la energía química almacenada por un combustible, directamente en energía eléctrica y, lo que es más importante de forma continua” (4).

A una celda de combustible se le llama monocelda y al conjunto de monoceldas (celdas individuales) se le conoce como apilamiento de celdas de combustible (stack) (5).

PEM celdas de combustible han surgido como el tipo más común de celdas de combustible desarrolladas hoy en día. Como ya se ha mencionado anteriormente también se denominan membranas de intercambio protónico las celdas de combustible basadas en su característica clave de la membrana de electrolito sólido de transferencia de protones del ánodo al cátodo.

El electrolito sólido evita problemas causados por electrolitos líquidos usados en otros sistemas, el rango de temperaturas $<100^{\circ}\text{C}$ permite un rápido arranque a baja temperatura. Las bajas temperaturas también permiten una gama más amplia de materiales para ser usados y permite diseños relativamente fáciles en términos de problemas de sellados y selección de materiales. Este tipo de celdas de combustible es la más factible para ser usada bajo aplicaciones de transporte.

La membrana altamente ácida necesita el uso de un reactivo catalizador muy estable como el platino siendo el único hoy en día suficientemente activo para lograr el rendimiento requerido.

2.4. Estructura de una celda de combustible

Los componentes básicos de una celda de combustible son: Dos electrodos impregnados con catalizador, en una membrana conductora de protones (MEA), capas difusoras de gas y finalmente las placas colectoras de corriente con campos de flujo en la figura 1.1, se observa de manera más detallada la estructura y un esquema más general de la estructura.

Las placas con campos de flujo, son maquinadas para contener canales, que proporcionan un paso para la distribución de los gases reactantes a los electrodos y el retiro del agua del producto (figura 1.2), además reúnen la corriente generada a ambos lados de la membrana, la cual es transferida mediante los difusores de gas hacia las placas con campos de flujo que también sirven como colectoras de corriente (6).

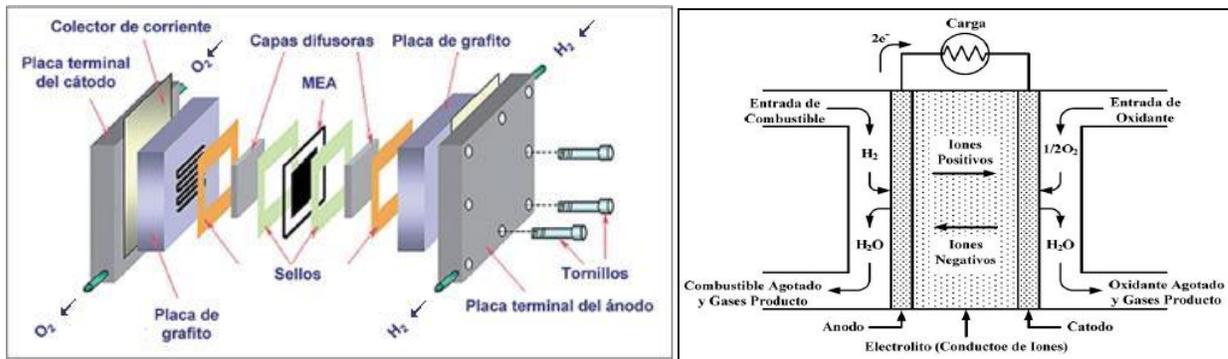


Figura 4.1. Estructura de una celda de combustible (7)

De manera visual la placa bipolar (placas con campos de flujo), consta de una geometría determinada la cual influye directamente en como el hidrógeno y oxígeno van a distribuirse por el área en contacto con el ánodo y cátodo respectivamente.

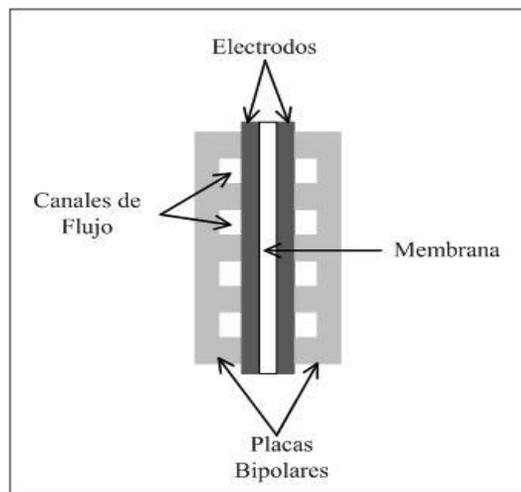


Figura 4.2. Canales en las placas de una celda de combustible (8)

2.5. Funcionamiento de una celda de combustible

La constitución de una celda consta de un catalizador (ánodo) que permite separar los iones positivos del hidrógeno de los electrones y una membrana que permite solo el paso de los protones o iones positivos del hidrógeno. A los electrones se les proporciona un camino externo para que al conectar una carga eléctrica genere una corriente eléctrica que produce un trabajo útil. (9)

El combustible, en este caso hidrógeno, es introducido por los canales mecanizados en la placa bipolar por el lado del ánodo y guiado a través de una capa difusora de material carbonoso hasta la capa catalítica, donde tiene lugar la reacción de oxidación del hidrógeno. La capa difusora debe ser un material altamente poroso, de modo que facilite la difusión del hidrógeno para alcanzar más eficientemente las partículas de catalizador. (10)

Se plantean cuatro aspectos que promueven la reducción de costes de este tipo de pilas: por un lado los materiales alternativos a los electrodos basados en el platino, con propiedades electroquímicas similares; las membranas poliméricas; las placas bipolares; se propone el uso de polímeros conductores que presentan claras ventajas frente a las del grafito denso convencionales; por último, se trabaja en la que también se produce la oxidación parcial de metanol para producir hidrogeno, con la ventaja de que no es necesario el aporte de calor al sistema.

La pila de combustible es un sistema de producción de energía eléctrica, que transforma directamente la energía química contenida en un gas combustible en energía eléctrica, mediante un proceso electroquímico isoterma en el que el hidrogeno es el principal elemento reaccionante. Utiliza directamente la entalpia libre disponible en el combustible a la temperatura de operación. No está limitada por las condiciones termodinámicas que impone el segundo principio de la termodinámica y el ciclo Carnot.

En un proceso, la energía química se transforma en energía eléctrica, después de convertirse sucesivamente en energía térmica y mecánica, como se muestra enseguida:

$E_{química} \longrightarrow E_{térmica} \longrightarrow E_{mecánica} \longrightarrow E_{eléctrica}$

En una pila de combustible, se establece un proceso electroquímico directo:

$E_{química} \longrightarrow E_{eléctrica}$

Esta transformación directa implica además un rendimiento en el proceso de más del 60%, cota de eficiencia no alcanzada por los sistemas convencionales. Además el nivel de contaminación por emisión de CO₂, que se produce durante el procesado del gas combustible, es uno o dos órdenes de magnitud inferior al de las centrales térmicas y, como consecuencia, el impacto medio ambiental es casi nulo.

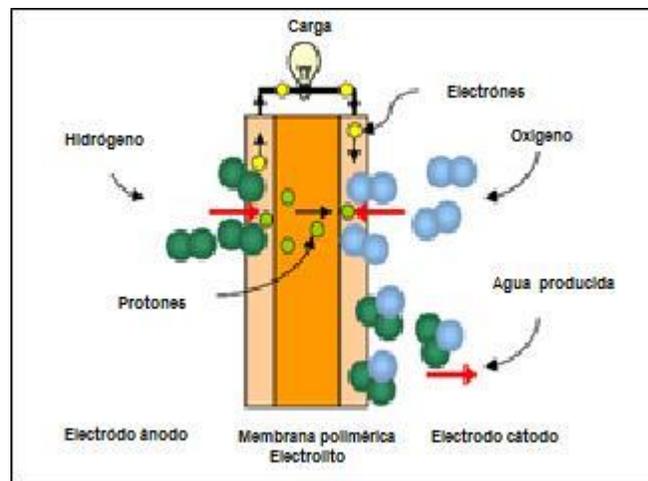


Figura 4.3. Imagen de una celda de combustible aire/hidrógeno (11)

El concepto de producción de energía eléctrica a partir de una célula electroquímica fue demostrado en el año 1839 por Sir William Grove (12). Nernst fue en 1900 el que dedujo la ley termodinámica que rige el principio de funcionamiento de las células de combustible, y además fue el primer constructor de la célula de combustible de óxidos sólidos o cerámica (13). Bacon, 120 años más tarde ensamblaría un apilamiento de monoceldas que suministra una densidad de corriente útil (14). Appeby, analizó detalladamente el proceso histórico de las pilas de combustible y señaló como la pila de Bacon, modificada, fue el sistema de producción de energía eléctrica de los vehículos espaciales como “Apoyo de la NASA”, que permitió a los astronautas alunizar en 1969 (15).

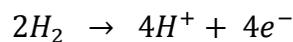
La famosa crisis de la energía de 1973 y también la Guerra del Golfo de 1990 supusieron un fuerte ímpetu en el financiamiento de numerosos proyectos de investigación y desarrollo de pilas de combustible para aplicaciones terrestres.

Ventajas de una celda de combustible sobre otros sistemas de producción de energía eléctrica:

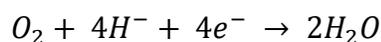
- ✓ Mayor rendimiento (cerca del 60%) y gran ahorro energético.
- ✓ Energía no contaminante
- ✓ No origina ruidos.
- ✓ Construcción modular y facilidad de cambio de escala
- ✓ Versatilidad de combustibles

2.6. Aspectos electroquímicos y catalíticos de las celdas de combustible

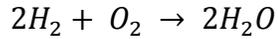
El funcionamiento de una pila de combustible viene descrito en la figura 1.3. El ánodo o electrodo de combustible es Pt/C depositado sobre papel de carbón, es alimentado por hidrógeno molecular humidificado, en él se produce la reacción de oxidación del H₂ para dar lugar a protones, de acuerdo con la siguiente reacción:



Estos protones liberados se transportan a través de la membrana que consiste en un polímero perfluorosulfónico, mediante el mecanismo de difusión de saltos de protones de molécula en molécula de agua por los canales de dicha membrana. El cátodo o electrodo de aire es Pt/C depositado sobre papel de carbón, que es alimentado por el oxígeno del aire y se produce, a la temperatura de operación de la pila (60°C), la siguiente reacción de reducción del oxígeno para la formación de agua tomando los electrones necesarios del circuito externo:



Siendo la reacción total del proceso (16):



2.7. Proceso de catálisis del Pt

El proceso viene dado por las reacciones (17):



Los electrones liberados en estas reacciones se transportan a través del material de interconexión, que son placas bipolares de grafito denso. El flujo de electrones de ánodo al cátodo, a través del circuito externo, produce la corriente eléctrica. La fuerza electromotriz que hace funcionar el dispositivo viene dada por la ecuación de Nernst y depende de las diferentes presiones parciales de oxígeno a uno y otro lado de la pila:

$$E_f = \left(\frac{RT}{nF}\right) \ln \frac{P(O_2')}{P(O_2'')}$$

Dónde:

- ✓ E_f Fuerza electromotriz teórica debida a la ley de Nernst.
- ✓ $P(O_2')$ Presión parcial de oxígeno en el cátodo.
- ✓ $P(O_2'')$ Es la presión parcial de oxígeno en el ánodo.
- ✓ R Constante de los gases.
- ✓ n Número de electrones implicados en la reacción.
- ✓ T Temperatura absoluta.
- ✓ F Número de Faraday.

La óptima utilización de las células de combustible se consigue por la unión en serie y en paralelo de pilas individuales lográndose un apilamiento (stack) para lograr más voltaje y más densidad de corriente. La unión se consigue por medio de placas bipolares como material de interconexión, que se diseña de tal forma que facilite el

transporte de electrones entre las células, así como también ayude a la mejor distribución de los gases. Las pérdidas de voltaje ocasionadas se determinaran al obtener la curva de polarización del apilamiento.

En cualquier curva de polarización se observan tres regiones características:

Región 1: Representa las pérdidas debido a la polarización por activación. Respuesta limitada de los electrodos (η_a, η_c).

Región 2: Representa las perdidas por caída óhmica (IR).

Región 3: Representa la polarización por concentración (transporte de masa y difusión) (η_m).

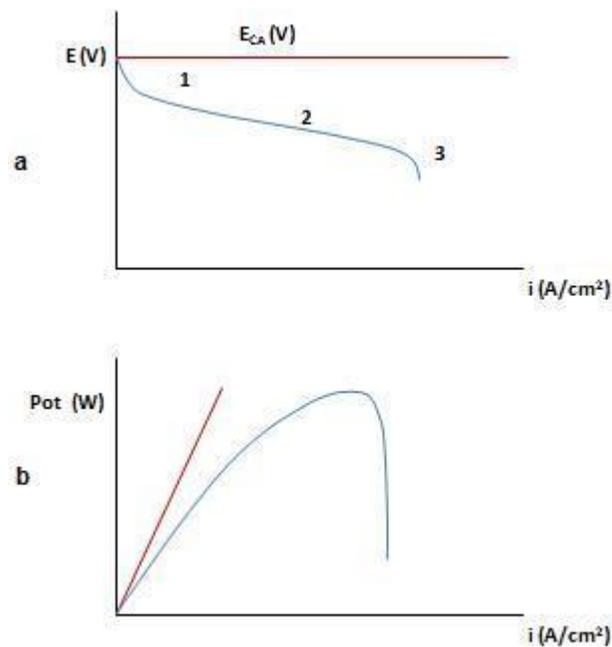


Figura 4.4. a. Curva de polarización, b. Curva de potencia vs densidad de corriente

A partir de la curva de polarización se puede obtener la curva de potencia frente a la densidad de corriente (Figura 1.4). La línea recta que parte del origen es la situación

ideal. El máximo observado en la curva de potencia real, corresponde al máximo de potencia que se puede obtener de pila en cuestión.

Aunque las células de combustible pueden, en un principio, transformar eficientemente energía química en eléctrica, en la práctica el rendimiento de la conversión raramente excede del 55% al 60% utilizando hidrógeno puro como combustible.

Las pérdidas irreversibles están asociadas a problemas de cinética electroquímica, resistencia interna y a los requerimientos de la reacción faradaica, que necesita no sólo la transferencia de carga, sino también la transferencia de masa para verificarse, teniendo lugar ambas en una región espacialmente restringida, donde el electrodo, el electrolito y uno de los gases reactantes estén en contacto. Dichas regiones se denominan puntos triples TBP (Triple Boundary Point). Actualmente, se trata de mantener las zonas de contacto. Las reacciones catalíticas se efectúan con mayor eficacia en superficies de contacto que en puntos triples.

Asimismo, en estas regiones es donde se producen las pérdidas de voltaje más significativas por polarización.

La morfología y porosidad de los electrodos, así como, la cinética de reacción son los temas de estudio más importantes en la ciencia y tecnología de las pilas de combustible.

2.8. Aspectos termodinámicos

En una central térmica, el carbón se transforma en calor, después en energía mecánica y por último en eléctrica. Según el segundo principio de la termodinámica, sólo una fracción de la energía resultante, caracterizada por el rendimiento del Ciclo de Carnot, η , puede transformarse en trabajo. Así, se tiene que:

$$\eta(\text{Carnot}) = T_2 - T_1 / T_2$$

Esto indica pérdidas de calor por las diferencias de temperatura entre dos de las etapas del proceso, lo que puede dar lugar a rendimientos teóricos, como máximo del 40%. El paso de energía mecánica a eléctrica se realiza casi sin pérdidas.

A temperatura y presión constantes y bajo condiciones reversibles, la oxidación del combustible, por ejemplo el hidrógeno, se desarrolla aprovechando al máximo la energía libre de la reacción ΔG , es decir el trabajo de reacción correspondiente al proceso generador de energía eléctrica; magnitud relacionada con la entalpía de reacción ΔH y la entropía de reacción ΔS de acuerdo con la ecuación:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Además,

$$\Delta G = -n F E$$

Dónde:

- ✓ n Número de electrones
- ✓ F Número de Faraday
- ✓ E Fuerza electromotriz
- ✓ T Temperatura absoluta
- ✓ $-T\Delta S$ Ganancia o pérdida de energía al calentar o enfriar la pila.

La tensión de salida teórica que corresponde a la oxidación del hidrógeno en un proceso reversible e isoterma puede calcularse de acuerdo con la expresión:

$$V = \frac{\Delta G}{nF}$$

El rendimiento será dado por:

$$\eta(\text{térmico}) = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{n F V}{\Delta H}$$

2.9. Generador eléctrico y tipos de pilas de combustible (18)

Un generador de pila de combustible, es el que viene descrito en la figura 1.5 y consta de tres elementos fundamentales:

- ✓ Un convertidor de energía
- ✓ Un inversor de corriente que transforma la corriente continua en alterna.
- ✓ CHP Cogenerador. Aprovechamiento del calor residual.

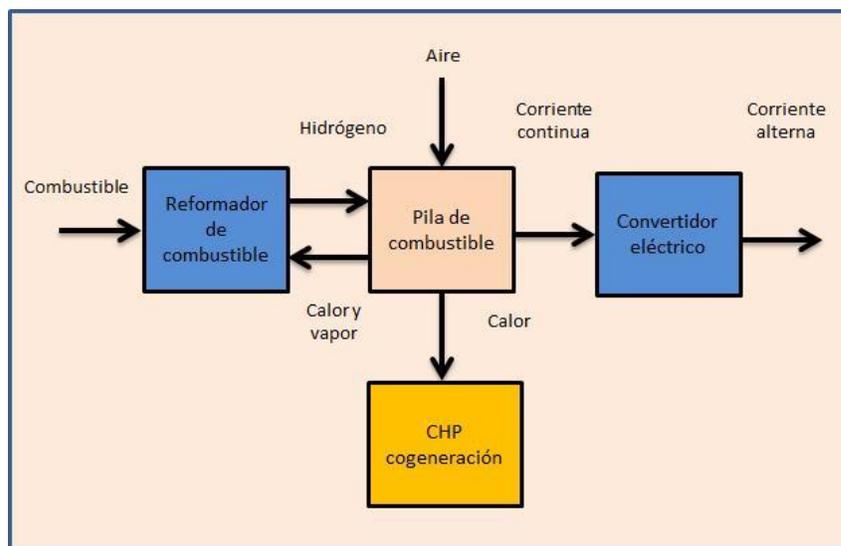


Figura 4.5. Generador eléctrico de pila de combustible

La figura 1.6 representa un esquema de funcionamiento de los distintos tipos de pila de combustible, así como también, la temperatura de operación. Cada tipo de pila de combustible tiene una respuesta de las necesidades que depende de su rendimiento óptimo.

Las pilas de combustible SOFC y de carbonatos fundidos (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell), son una buena alternativa para la generación de electricidad en centrales eléctricas, mientras que las del ácido fosfórico (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell) son idóneas en la producción de energía eléctrica doméstica. Las pilas de membranas de intercambio protónico y de metanol directo (PEMFC Protonic Exchange Membrane Fuel

Cell) y (DMFC Direct Methanol Fuel Cell), pueden aplicarse en transporte. En cualquier caso los dos sistemas más prometedores PEMFC-DMF y SOFC tienen prácticamente cubierto un amplio intervalo de aplicaciones, tal como se muestra en la figura 1.7.

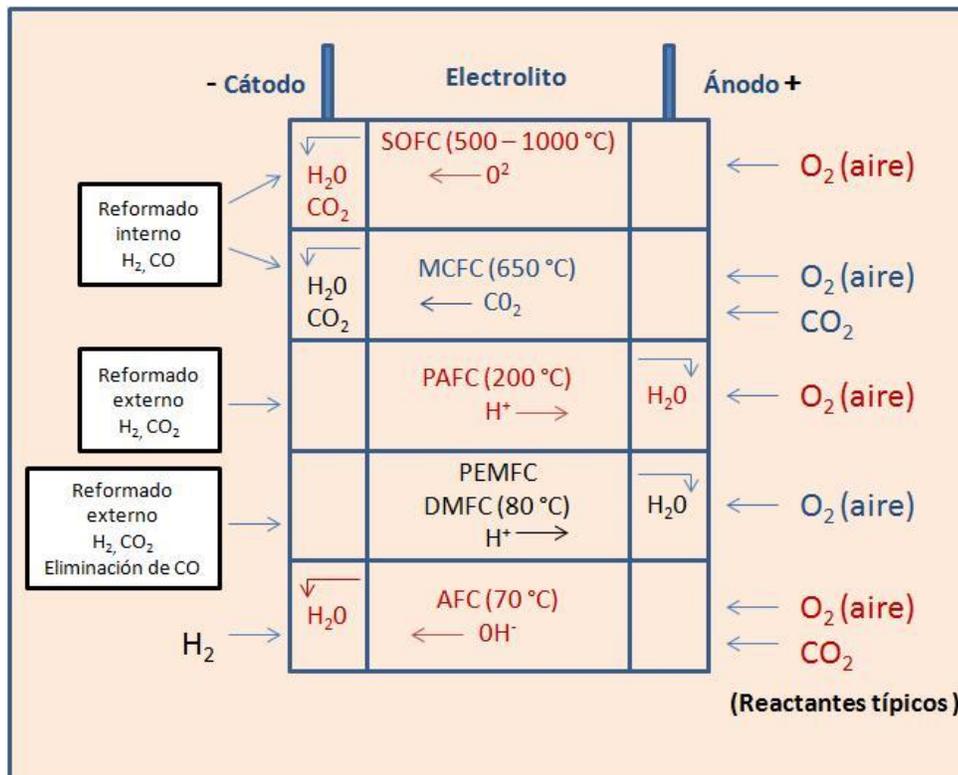


Figura 4.6. Esquema de funcionamiento de los distintos tipos de pilas de combustible

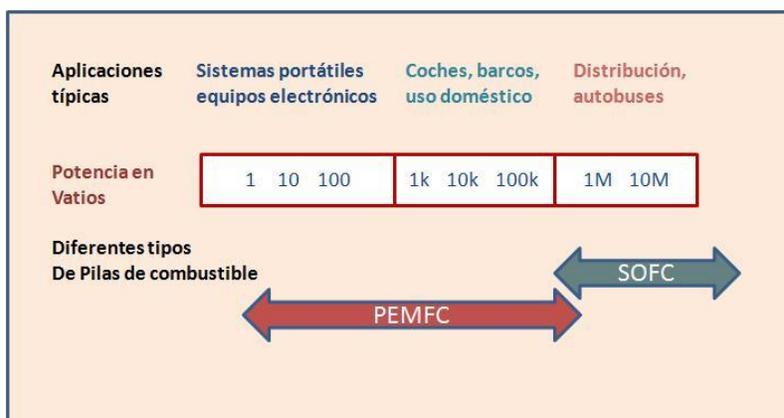


Figura 4.7. Aplicaciones de las pilas de combustible y potencia suministrada

2.10. Pilas de combustible con membranas de intercambio protónico como electrolito

General Electric Company comenzó a desarrollar pilas de combustible de electrolitos sólidos poliméricos en los años 50, se utilizaron cargas de Pt muy elevadas, empleándose como membrana de intercambio protónico poliestireno sulfonado. Pero fue hasta 1984 que Ballard (Canadá) superó muchos de los problemas de ingeniería asociados al sistema, con menos cantidad de Pt y mayor densidad de potencia.

2.10.1. Nafion

Basado en un polímero de polietileno, éste se modifica sustituyendo átomos de hidrógeno por átomos de flúor. Es un material con alta resistencia mecánica y química, puede absorber grandes cantidades de agua, y los protones pueden moverse casi libremente dentro del material. Posee las propiedades químicas mecánicas y eléctricas necesarias para lograr un buen electrolito y emplearlo en pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC's).

2.10.2. Cortocircuito químico o "crossover"

Parte del combustible que no reacciona se escapa a través del ánodo con el agua de humidificación, quedando otra cantidad de hidrógeno que difunde desde el ánodo al cátodo a través del electrolito. Debido a que en el cátodo se encuentra el catalizador de Pt, parte de este combustible reaccionará directamente con el oxígeno, lo que dará lugar a lo que se denomina corriente interna. Dicha corriente no participa en la corriente total de la célula, sino que son una cantidad de corriente que pierde la célula; esta corriente se conoce como circuito químico "fuel crossover". Aunque esta corriente interna y el circuito químico son esencialmente equivalentes, este último es probablemente más importante, ya que, su efecto es el que tiene una mayor influencia en la disminución del voltaje de célula.

Dependiendo el tipo de pila existen dos tipos de crossover, el que se produce en las pilas PEMFC's, es decir, el debido al paso de H₂ y el que se produce en las pilas DMFC debido al paso de metanol. El fenómeno tiene lugar por adsorción del combustible por la membrana.

2.10.3. Membranas poliméricas alternativas al nafion

Bermúdez y col. (19). Estudiaron un óxido de polietileno (PEO) modificado. Este material sin modificar es aislante, sin embargo su modificación da lugar a un polímero conductor protónico por vacantes protónicas. A temperatura y humedad relativa ambiente, estos materiales exhiben una conductividad de 10^{-5} Scm^{-1} . Dicha conductividad es demasiado baja para que este polímero pueda ser utilizado como electrolito en PEMFC's.

Otra alternativa la constituyen las polietercetonas sulfonadas (PEEK). (20). Estos polímeros no sólo tienen interés debido a su bajo coste, sino que, pueden reducir los problemas asociados a la eliminación del agua en el cátodo y reducir el efecto *crossover* de metanol en las DMFC's.

Buchi y col. (21). Han publicado la preparación de membranas mediante mezclas de estireno/divinilbenceno y películas de poli(fluoroetileno-co-hexafluoropropileno), posterior a un proceso de grafitado por irradiación y una subsiguiente sulfonación. Grosor inferior a 50 micras.

López y col. (22). Publicaron la nueva preparación de polímeros basados en materiales compuestos de poli (fluoruro de vinilideno) mezclados con poliestireno-co-divinilbenceno sulfonado y ácido antimónico. Estos polímeros exhiben buenas propiedades eléctricas y equilibradas con una solución de 1M de HCl muestran un valor de conductividad de 0.09 Scm^{-1} a temperatura y humedad relativa.

2.10.4. Conductores protónicos basados en vidrio

Nogami y col. (23). Han desarrollado vidrios binarios nanoporosos basados en P_2O_5 - SiO_2 preparados por sol-gel. Dichos autores han obtenido conductividades, a 50°C y 70°C HR, de $2.2 \times 10^{-2} \text{ Scm}^{-1}$ (ver sig. Figura), con una energía de activación de 5KJ/mol, muy inferior al del Nafion de 17 KJ/mol, indicando con ello que estos materiales pueden ser un firme candidato a la sustitución del nafion, sin embargo, presentan baja durabilidad química.

2.10.5. Materiales híbridos orgánico-inorgánicos

Constituidos por un material orgánico y otro inorgánico. Hay dos tipos de híbridos, tipo 1: materiales en los que las moléculas orgánicas o poliméricas de bajo peso molecular está embebida dentro de una matriz inorgánica; tipo 2: materiales híbridos en que los componentes orgánicos e inorgánicos se unen mediante enlaces covalentes o iónico-covalentes, donde ambas redes son formadas simultánea o secuencialmente.

Estudiaron el problema de la retención del agua, y prepararon una membrana de Nafion con sistema auto humidificador, que consiste en una membrana de Nafion de 50 cm que contiene 0.07 mgPt/cm^2 (partículas de Pt de 1-2 nm) y un determinado porcentaje de partículas de SiO_2 y TiO_2 (de 5-7 nm). Las partículas de Pt catalizan el hidrógeno que no ha reaccionado en el ánodo y que provoca *crossover*, y genera agua que es adsorbida por las partículas de sílice y titanio. Las membranas muestran mejor respuesta que el Nafion y es muy estable a 20°C en oxígeno seco.

2.10.6. Membranas cerámicas nanoporosas

Vichi y col. y Colomer y Anderson (24) prepararon xeroles de sílice de alta porosidad mediante el método de sol-gel coloidal. El tamaño promedio de poro fue de 3.5 nm. La conductividad eléctrica de estos xeroles sin tratar muestran conductividad protónica a 80°C con 81% HR de $7.1 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$. (ver figura 1.8). Tienen mayor durabilidad química y por tanto pueden ser buenos sustitutos del Nafion.

2.10.7. Catalizadores

Como ya es bien sabido el Pt es el mejor catalizador para el ánodo y cátodo de una PEMFC, sin embargo se intenta disminuir la carga utilizando otros catalizadores como el Ru.

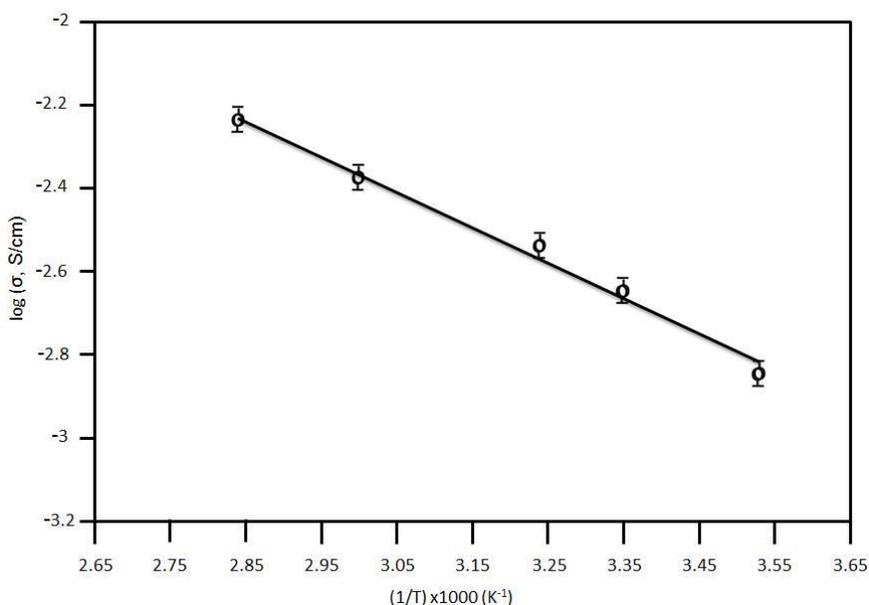


Figura 4.8. Conductividad de membranas cerámicas nanoporosas

Las PEMFC's más antiguas eran fabricadas con cargas de Pt de 28 mg/cm²; con el fin de reducir costos se ha reducido a 0.2 mgPt/cm², debido a la optimización de su dispersión y aumento considerable de la potencia desarrollada. El catalizador de Pt se distribuye sobre la superficie de partículas de polvo de carbono finamente dividido. (Figura 1.9).

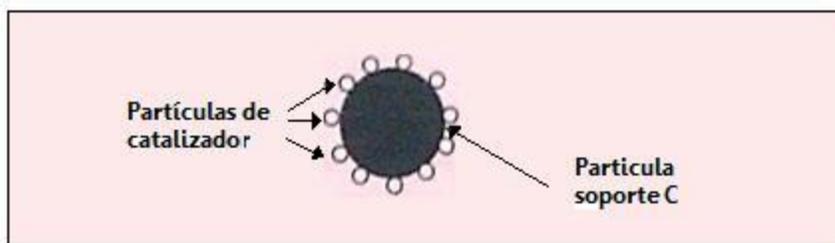


Figura 4.9. Estructura idealizada del Pt soportado sobre partículas de Carbono

El polvo de carbón más ampliamente usado suele ser Vulcan XC 72). El Pt es dispersado de tal forma que se obtiene una elevada superficie específica que puede ponerse en contacto con el gas reaccionante (Figura 1.10).

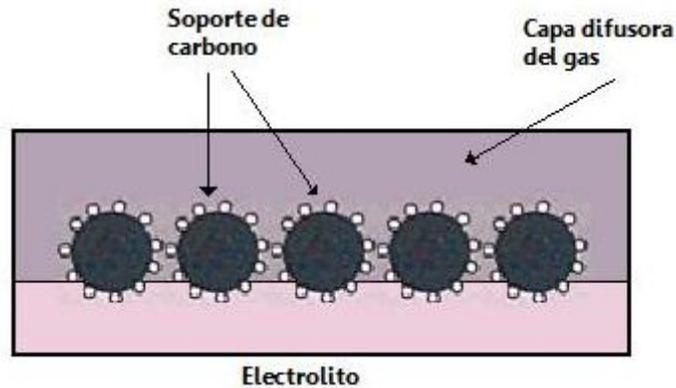


Figura 4.10. Esquema simplificado e ideal de un electrodo de PEMFC

2.11. Fabricación de ensamblajes electrodo-membrana y pilas de combustible

Una pila de combustible polimérica en general viene descrita en la figura 1.11.

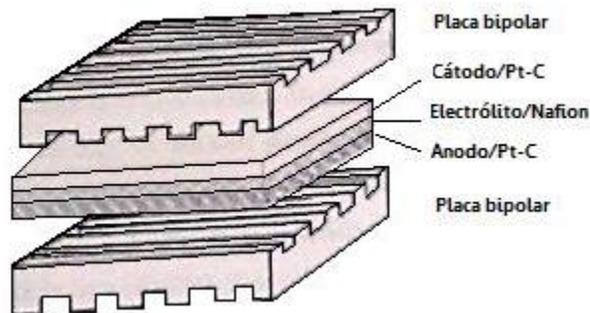


Figura 4.11. Esquema de una Pila de Combustible Polimérica

Las etapas de construcción se sintetizan en varias etapas: La construcción y la preparación de los ensamblajes electrodo-membrana (MEA's).

Esta última etapa tiene dos rutas para su preparación:

- ✓ Método de preparación de los electrodos por separado
- ✓ El otro método implica la construcción de los electrodos directamente sobre el electrolito.

2.12. Beneficios de las celdas de combustibles

Un beneficio clave de las celdas de combustible es que teóricamente tiene alta energía de eficiencia cuando comparamos el convencional sistema de combustión químico. Cuando se usa en combinación con el calor y los sistemas de generación de poder, particularmente por la alta temperatura de las celdas, puede ser muy alta la eficiencia alcanzada.

La energía libre cambia con la reacción química, como se designa la energía libre de Gibbs, ΔG , es el máximo trabajo útil obtenible o la máxima cantidad de electricidad que puede ser ganada en la reacción. La energía libre para una reacción electroquímica se obtiene así:

$$\Delta G = - n F E$$

O cuando todos los reactivos y productos están en su estado estándar.

$$\Delta G = - n F E^{\circ}$$

En términos de energía de reacción, un término llamado entalpia de reacción es ΔH , es usado para describir la energía de calor liberada por la reacción química. Por otra parte a la medida del cambio de desorden del sistema durante la reacción es llamada entropía de reacción, ΔS (25).

La energía libre de reacción también puede ser descrita con ΔH , ΔS , y la temperatura de reacción (T) por la ecuación.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

La ecuación anterior indica que, para una reacción electroquímica, parte de la energía de reacción (ΔH) es usado para generar energía eléctrica (ΔG), y la otra parte es usada para producir calor ($T\Delta S$). En un sistema de celdas de combustión la energía más útil es la energía eléctrica, mientras que a veces el calor producido no es deseado. Para ello la eficiencia eléctrica (reversible o eficiencia termodinámica), η_{rev} que puede definirse como la proporción máxima de energía eléctrica para la reacción de la celda en la entalpia de reacción. Esto representa teóricamente el límite superior de la eficiencia en las celdas de combustión.

$$\eta_{rev} = \frac{-\Delta G}{-\Delta H}$$

El método convencional para el cálculo de la eficiencia, utiliza el valor de la entalpia, basada en la máxima energía que podría obtener por la quema del combustible. La energía de Gibbs, para -237.3 KJ/mol, es más pequeño que el valor de la entalpia, de 286 KJ/mol, de tal forma que el hidrogeno de la celda de combustión opera a 25°C tiene teóricamente la máxima eficiencia de 83% , asumiendo que el agua como producto está en su estado líquido. Para la comparación, la eficiencia teórica máxima para la combustión en el motor es de 500°C es 55% basado en el calor rechazado a los 50°C . (26)

Alternativamente, el voltaje de la celda térmica es definida como.

$$E^o = \frac{-\Delta H}{nF}$$

2.13. Sistema de control

Los sistemas de control son un conjunto de componentes físicos conectados o relacionados entre sí, de manera que regulen o dirijan su actuación por sí mismos, es decir sin intervención de agentes exteriores (incluido el factor humano), corrigiendo además los posibles errores que se presenten en su funcionamiento.

Un proceso o sistema de control es un conjunto de elementos interrelacionados capaces de realizar una operación dada o de satisfacer una función deseada. Los

sistemas de control se pueden representar en forma de diagramas de bloques, en los que se ofrece una expresión visual y simplificada de las relaciones entre la entrada y la salida de un sistema físico. A cada componente del sistema de control se le denomina elemento, y se representa por medio de un rectángulo. El diagrama de bloques más sencillo es el bloque simple, que consta de una sola entrada y de una sola salida.

Los sistemas de regulación se pueden clasificar en: Sistemas de bucle o lazo abierto: son aquellos en los que la acción de control es independiente de la salida.

Sistemas de bucle o lazo cerrado: son aquellos en los que la acción de control depende en cierto modo, de la salida.

2.13.1. Sistemas de control en lazo abierto

Un sistema de control en lazo o bucle abierto es aquél en el que la señal de salida no influye sobre la señal de entrada. La exactitud de estos sistemas depende de su calibración, de manera que al calibrar se establece una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada.

El diagrama de bloque de un sistema en lazo abierto es:

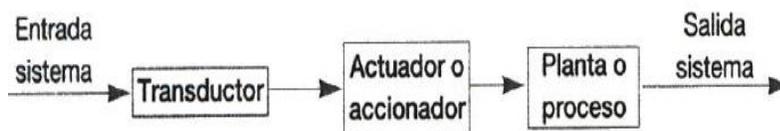


Figura 4.12. Sistema en lazo abierto

El principal inconveniente que presentan los sistemas de lazo abierto es que son extremadamente sensibles a las perturbaciones.

Para la aplicación de un sistema de control es necesario realizar el modelado del proceso, en esta área se puede crear un modelo eléctrico a partir de un circuito eléctrico equivalente que contiene elementos comunes como resistores, inductores y capacitores. Cada componente representa un fenómeno electroquímico presente en el funcionamiento de la PEMFC y en donde los valores de los elementos representan propiedades físicas o fenómenos presentes en la celda. Un ejemplo de este circuito (27) se muestra en la figura 4.13.

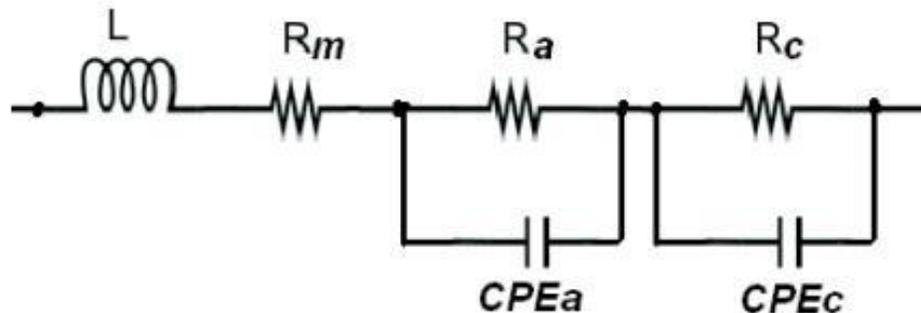


Figura 4.13. Circuito equivalente de un celda PEMFC

Donde L representa el efecto inductivo de los cables de conexión, R_m representa la resistencia protónica de la membrana, R_a y R_c representan la resistencia a la transferencia de carga de ánodo y cátodo respectivamente, CPE_a y CPE_c son aproximaciones de la capacitancia doble en el ánodo y cátodo respectivamente.

Existen también trabajos de modelos con resultados experimentales de PEMFC donde se analiza la dinámica de excitación (28) quienes evaluaron el comportamiento de la celda de combustible bajo varias condiciones y diferentes tipos de membranas, al igual que el desempeño mediante humidificación de la membrana y efectos del flujo de hidrógeno (29).

2.13.2. Sistemas de control en lazo cerrado

Un sistema de control de lazo cerrado es aquél en el que la acción de control es, en cierto modo, dependiente de la salida. La señal de salida influye en la entrada. Para esto es necesaria que la entrada sea modificada en cada instante en función de la salida. Esto se consigue por medio de lo que llamamos realimentación o retroalimentación (feedback). La realimentación es la propiedad de un sistema en lazo cerrado por la cual la salida (o cualquier otra variable del sistema que esté controlada) se compara con la entrada del sistema (o una de sus entradas), de manera que la acción de control se establezca como una función de ambas.

A veces también se le llama a la realimentación transductor de la señal de salida, ya que mide en cada instante el valor de la señal de salida y proporciona un valor proporcional a dicha señal.

Por lo tanto podemos definir también los sistemas de control en lazo cerrado como aquellos sistemas en los que existe una realimentación de la señal de salida, de manera que ésta ejerce un efecto sobre la acción de control.

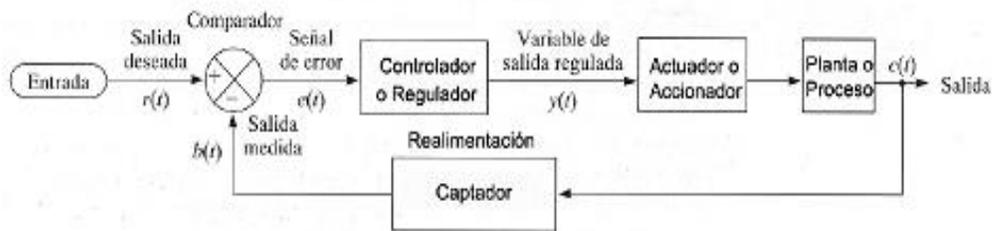


Figura 4.14. Sistema de control en lazo cerrado

2.14. Componentes de un sistema de control

Los componentes de un sistema de control son:

- ✓ Señal de entrada
- ✓ Comparador

- ✓ Comparador
- ✓ Señal de error
- ✓ Perturbación
- ✓ Señal regulada
- ✓ Actuador
- ✓ Transductor

2.15. Variables Primarias

En la industria se encuentran una gran cantidad de variables de proceso las cuales permiten controlar los diferentes procesos; unas de las más importantes variables son: temperatura, presión, nivel y flujo.

El controlar un proceso se refiere al cómo se controlan las variables inherentes al mismo para:

- ✓ Reducir la variabilidad del producto final
- ✓ Incrementar la eficiencia
- ✓ Reducir impacto ambiental
- ✓ Mantener el proceso dentro de los límites de seguridad que corresponda

2.15.1. Temperatura

Es una medida de la energía cinética (capacidad de realizar trabajo un cuerpo de masa m y con velocidad v : $T=0,5*m*v$) de las moléculas de una sustancia debida a su agitación térmica. Es una medida de lo caliente o frío que está un objeto.

Para su medición se usan los termómetros en escalas:

- ✓ Celsius (°C),
- ✓ Fahrenheit (°F) y

- ✓ Kelvin (K).

Esta última es la unidad de la temperatura en el Sistema Internacional (SI).

Los instrumentos de temperatura utilizan diversos fenómenos que son influidos por la temperatura y entre los cuales figuran:

- ✓ Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases);
- ✓ Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia);
- ✓ Variación de resistencia de un semiconductor (termistores); f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares);
- ✓ Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación);
- ✓ Otros fenómenos utilizados en laboratorio (velocidad del sonido en un gas, frecuencia de resonancia de un cristal, etc.).

Algunos transductores de temperatura son:

- ✓ Termopares.
- ✓ RTD.
- ✓ Termistores.
- ✓ Pirómetros.

El termopar se basa en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito formado por dos metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a distinta temperatura.

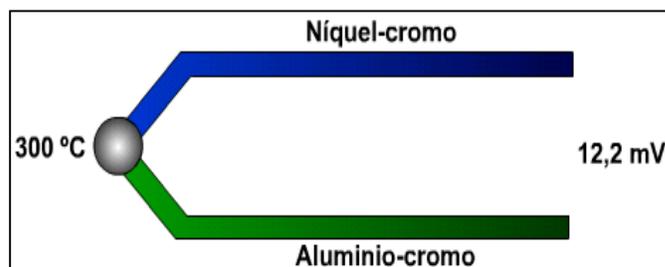


Figura 4.15. Termopar

- ✓ Termopar tipo E de cromel-constantán.-
- ✓ Termopar tipo T de cobre-constantán,
- ✓ Termopar tipo J de hierro-constantán,
- ✓ Termopar tipo K de cromel-alumel
- ✓ Termopares tipo R, S y E de Pt-Pt/Rh

RTD

RESISTANCE TEMPERATURE DETECTORS, RTD's.- Consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica. Expresa a una temperatura especificada, variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura.

2.15.2. Presión

Es la fuerza por unidad de área o superficie, en donde para la mayoría de los casos se mide directamente por su equilibrio directamente con otra fuerza. Es una fuerza aplicada a una superficie o distribuida sobre ella. La presión "P" ejercida por una fuerza "F" y distribuida sobre un área "A" se define mediante la relación. $P = F / A$

La presión podrá expresarse en muy diversas unidades, tales como: kg/cm², psi, cm de columna de agua, pulgadas o cm de Hg, Bar En términos internacionales, en Pascales (Pa) (Newton/m²), como la medida estándar según la 3ra Conferencia General de la Organización de Metrología Legal. La presión puede medirse de dos maneras, la primera en términos absolutos, y la segunda en términos relativos.

La presión absoluta se mide con relación al cero absoluto o vacío total.

La presión relativa se mide con respecto a la presión atmosférica, es decir, su valor cero corresponderá al valor de la presión absoluta atmosférica. Los elementos primarios de medición de presión son fundamentalmente de tres tipos:

- ✓ Elementos Mecánicos
- ✓ Elementos electromecánicos
- ✓ Elementos electrónicos

Elementos Mecánicos: estos se subclasifican en dos categorías:

De medición directa y elementos primarios. Los de medición directa realizan su función, comparando la presión con la fuerza ejercida por una columna de líquido de densidad conocida.

Entre estos se encontraran:

- ✓ El barómetro de cubeta,
- ✓ El manómetro de tubo U,
- ✓ El manómetro de tubo inclinado, etc.

Los elementos primarios elásticos, miden la presión por deformación que estos sufren por efecto de ella misma.

Los más empleados son:

- ✓ El tubo Bourdon
- ✓ El elemento espiral
- ✓ El diagrama
- ✓ El fuelle.

El tubo de Bourdon es un elemento tubular de sección elíptica en forma de anillo casi completo, cerrado por un lado.

Al aumentar la presión interna, el tubo tiende a enderezarse y este movimiento es transmitido por otros servomecanismos a una aguja indicadora o a un elemento transmisor.

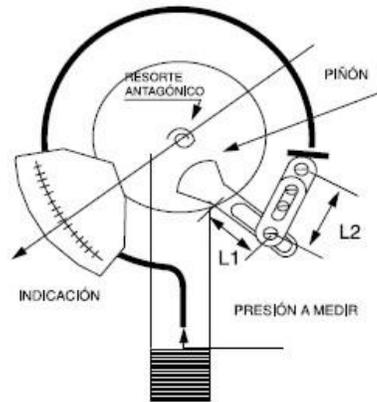


Figura 4.16. El tubo de bourdon

2.15.3. Nivel

El nivel es una variable importante para algunas industrias y en otras es indispensable, tales como la del papel y la del petróleo, por mencionar algunas. Los instrumentos para la medición de nivel varían en complejidad de acuerdo con la aplicación y su dificultad.

En la selección correcta de un instrumento para la medición de nivel intervienen en mayor o menor grado los siguientes factores:

- ✓ Rango de medición.
- ✓ Naturaleza del fluido que va a ser medido.
- ✓ Condiciones de operación.

Los instrumentos que se mencionan a continuación cubren prácticamente todas las aplicaciones de medición de nivel. Estos se aplican básicamente en 2 formas: medición de nivel en tanques abiertos y tanques cerrados. Cuando el caso lo requiere, controladores. Cuando las distancias entre el punto de medición y el lugar donde queremos la lectura son muy grandes nos podemos auxiliar con transmisores.

Niveles en Tanques Abiertos

Los instrumentos que se usan para la medición de nivel en tanques abiertos se clasifican dentro de varias categorías: visuales, de presión o cabeza hidrostática (columna de agua), de contacto directo o sea flotadores y otros tipos.

Nivel en Tanques Cerrados

Cuando es necesario medir nivel de líquido en tanques cerrados, como digestores, tanques para recibir condensados, evaporadores, etc., una medición simple de presión hidrostática no se puede usar. La influencia de la presión en un tanque cerrado incluye: el peso o presión del líquido y la presión o el vacío ejercidos encima de la superficie del líquido. Bajo estas condiciones, la medición de nivel de líquido debe hacerse con unidades de presión diferencial, desplazamiento por medio de flotadores, dispositivos radioactivos, sónicos, unidades de capacitancia y otras unidades eléctricas.

Medidor de Sonda.

El medidor de sonda es un instrumento bastante simple para medir niveles, que consiste en una varilla o regla graduada de una longitud conveniente para ser introducida dentro de un depósito. La determinación del nivel dentro del recipiente, se mide por lectura directa de la longitud de la varilla mojada por el líquido y es esencial que en el momento de la medición el tanque se encuentre abierto a presión atmosférica.

Este método es efectivo y ampliamente utilizado para medir el nivel en los tanques de una gasolinera, pero no es muy práctico sobre todo si el contenido a medir es tóxico o corrosivo, ya que el individuo que introduce la varilla debe estar de pie sobre la abertura del tanque para manejarla.

Instrumentos de Flotador.

La medición de nivel con instrumentos de flotador es menos común en la industria en general, pero se emplea muy frecuentemente en el campo del tratamiento de aguas potables y de desechos.

Hay que señalar que en estos instrumentos, el flotador puede tener formas muy variadas y estar formado por diversos materiales según sea el tipo de fluido.

Básicamente, consisten en un flotador situado en el seno del líquido y conectado al exterior de un tanque indicando directamente el nivel, donde dicha conexión puede ser directa, magnética o hidráulica.

2.15.4. Flujo

La medición de flujo está relacionada con la razón de flujo y con el flujo total de gases y líquidos. También puede ser descrito para el movimiento de sólidos; sin embargo, la razón de flujo de sólidos y el flujo total de sólidos no es común y la inmensa mayoría de las industrias manejan flujos de gases y líquidos. En dinámica de fluidos, caudal es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. Menos frecuentemente, se identifica con el flujo másico o masa que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

El caudal es la variable de proceso básica más difícil de medir. Existen numerosos tipos de medidores y transmisores:

- ✓ Elementos deprimógenos

- ✓ Transmisores de presión
- ✓ Másicos (Coriolis)
- ✓ Desprendimiento de vórtices (Vortex)
- ✓ Ultrasónicos
- ✓ Electromagnéticos

Elementos deprimógenos

Se denomina así al elemento primario cuya instalación produce una diferencia de presiones (pérdida de carga), que se vincula con el caudal que circula, en una relación determinable.

Los elementos deprimógenos más usados son:

- ✓ Placa orificio
- ✓ Tubo Venturi
- ✓ Boquilla / Codo
- ✓ Tubo Pitot / Annubar
- ✓ Cuña

Placa de orificio

Una placa orificio es una restricción con una abertura más pequeña que el diámetro de la cañería en la que está inserta. La placa orificio típica presenta un orificio concéntrico, de bordes agudos. Debido a la menor sección, la velocidad del fluido aumenta, causando la correspondiente disminución de la presión. El caudal puede calcularse a partir de la medición de la caída de presión en la placa orificio, P1-P3. La placa orificio es el sensor de caudal más comúnmente utilizado, pero presenta una presión no recuperable muy grande, debido a la turbulencia alrededor de la placa, ocasionando un alto consumo de energía.

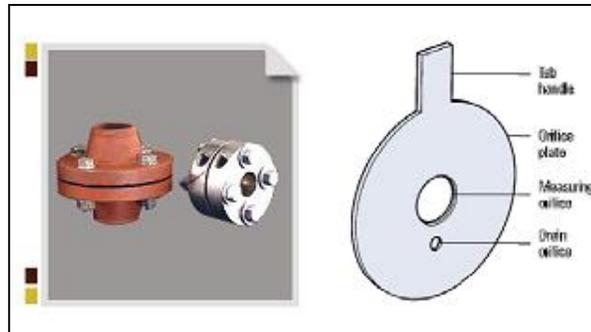


Figura 4.17. Placa de orificio

Tubo venturi

El tubo Venturi es similar a la placa orificio, pero está diseñado para eliminar la separación de capas próximas a los bordes y por lo tanto producir arrastre. El cambio en la sección transversal produce un cambio de presión entre la sección convergente y la garganta, permitiendo conocer el caudal a partir de esta caída de presión. Aunque es más caro que una placa orificio, el tubo Venturi tiene una caída de presión no recuperable mucho menor.

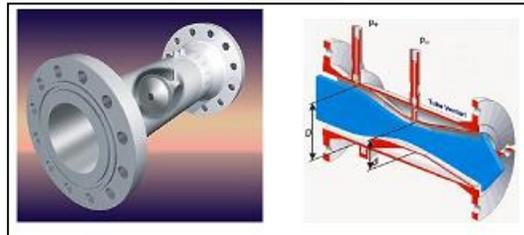


Figura 4.18. Tubo de Venturi

2.16. Acondicionamiento de señales

El proceso de acondicionamiento de señales se lleva a cabo para que los dispositivos eléctricos y electrónicos se puedan interconectar entre sí, esto para llevar a cabo su proceso.

Las señales de los sensores o del mundo exterior pueden ser ruidosas o demasiado peligrosas para medirse directamente. El circuito de acondicionamiento de señales manipula una señal de tal forma que es apropiado para entrada a un ADC. Este circuito puede incluir amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento. Algunos dispositivos DAQ incluyen acondicionamiento de señales integrado diseñado para medir tipos específicos de sensores.

Convertidor analógico digital (adc)

Las señales analógicas de los sensores deben ser convertidas en digitales antes de ser manipuladas por el equipo digital como una PC. Un ADC es un chip que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. En la práctica, las señales analógicas varían continuamente con el tiempo y un ADC realiza "muestras" periódicas de la señal a una razón predefinida. Estas muestras son transferidas a una PC a través de un bus, donde la señal original es reconstruida desde las muestras en software.

Bus de la PC

Los dispositivos DAQ se conectan a una PC a través de una ranura o puerto. El bus de la PC sirve como la interfaz de comunicación entre el dispositivo DAQ y la PC para pasar instrucciones y datos medidos. Los dispositivos DAQ se ofrecen en los buses de PC más comunes, incluyendo USB, PCI, PCI Express y Ethernet. Recientemente, los dispositivos DAQ han llegado a estar disponibles para 802.11 Wi Fi para comunicación inalámbrica. Hay varios tipos de buses y cada uno de ellos ofrece diferentes ventajas para diferentes tipos de aplicaciones.

2.17. Componentes electrónicos

Se denominan componentes electrónicos aquellos dispositivos que forman parte de un circuito electrónico. Se suelen encapsular, generalmente en un material cerámico, metálico o plástico, y terminar en dos o más terminales o patillas metálicas. Se diseñan para ser conectados entre ellos, normalmente mediante soldadura, a un circuito

impreso, para formar el mencionado circuito. Existe una clasificación que es en activos y pasivos.

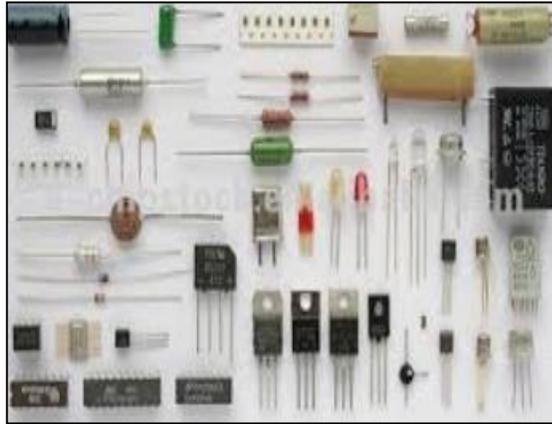


Figura 4.19. Componentes electrónicos

Activos: proporcionan excitación eléctrica, ganancia o control.

Pasivos: son los encargados de la conexión entre los diferentes componentes activos, asegurando la transmisión de las señales eléctricas o modificando su nivel.

2.17.1. Resistencias

Propiedad de un objeto o sustancia que hace que se resista u oponga al paso de una corriente eléctrica. La resistencia de un circuito eléctrico determina según la llamada ley de Ohm cuánta corriente fluye en el circuito cuando se le aplica un voltaje determinado. La unidad de resistencia es el ohmio, que es la resistencia de un conductor si es recorrido por una corriente de un amperio cuando se le aplica una tensión de 1 voltio. La abreviatura habitual para la resistencia eléctrica es R, y el símbolo del ohmio es la letra griega omega, Ω .

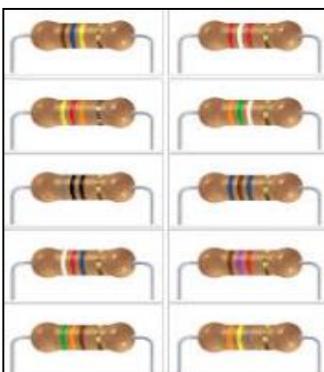


Figura 4.20. Resistores

2.17.2. OPAM

Un amplificador operacional es un amplificador diferencial. Desde el punto de vista de una señal, el OPAM. Tiene tres terminales: dos terminales de entrada y un terminal de salida. La figura muestra el símbolo que utilizaremos para representar el Amplificador Operacional. Los terminales 1 y 2 son los terminales de entrada, y el terminal 3 es el de salida.

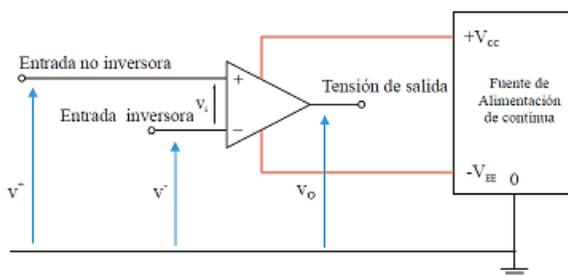


Figura 4.21. OPAM

Los amplificadores operacionales los puedes utilizar en una gran variedad de configuraciones que dependerán de lo que se quiera realizar.

Comparador

Esta es una aplicación sin la retroalimentación. Compara entre las dos entradas y saca una salida en función de qué entrada sea mayor. Se puede usar para adaptar niveles lógicos.

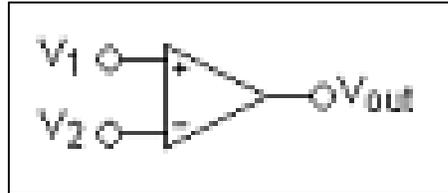


Figura 4.22. OPAM Comparador

Seguidor

Es aquel circuito que proporciona a la salida la misma tensión que a la entrada. Presenta la ventaja de que la impedancia de entrada es elevadísima, la de salida prácticamente nula, y puede ser útil, por ejemplo, para poder leer la tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña que no afecte apenas a la medición. De hecho, es un circuito muy recomendado para realizar medidas de tensión lo más exactas posibles, pues al medir la tensión del sensor, la corriente pasa tanto por el sensor como por el voltímetro y la tensión a la entrada del voltímetro dependerá de la relación entre la resistencia del voltímetro y la resistencia del resto del conjunto formado por sensor, cableado y conexiones.

- ✓ Se usa como un buffer, para eliminar efectos de carga o para adaptar impedancias (conectar un dispositivo con gran impedancia a otro con baja impedancia y viceversa)
- ✓ Como la tensión en las dos patillas de entradas es igual: $V_{out} = V_{in}$
- ✓ $Z_{in} = \infty$

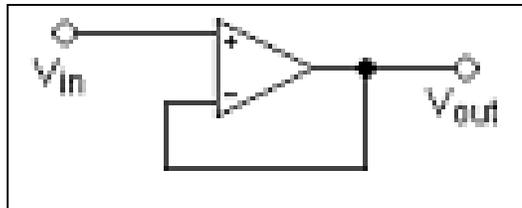


Figura 4.23. OPAM Seguidor

No inversor

Como observamos, la tensión de entrada, se aplica al pin positivo, pero como conocemos que la ganancia del amplificador operacional es muy grande, el voltaje en el pin positivo es igual al voltaje en el pin negativo y positivo, conociendo el voltaje en el pin negativo podemos calcular la relación que existe entre el voltaje de salida con el voltaje de entrada haciendo uso de un pequeño divisor de tensión.

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

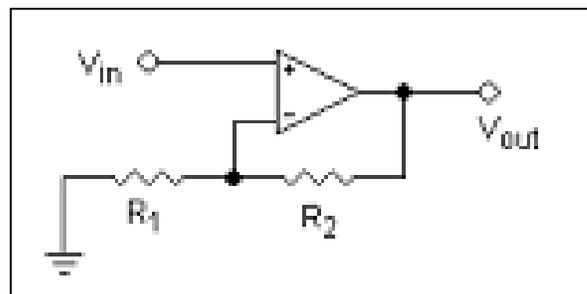


Figura 4.24. OPAM No inversor

2.17.3. Optoacoplador

Cuando se Combina una fuente óptica (generalmente un Led) con algún tipo de detector óptico (generalmente un semiconductor de si) en un solo encapsulado, el dispositivo resultante se llama Optoacoplador u optointerruptor.

Esta estructura produce un elemento que permite el acoplamiento de señales dos tipos de circuitos electrónicos independientes y totalmente aislados entre si, según el encapsulado de estos dispositivos pueden tener un aislamiento hasta de 3500 V.

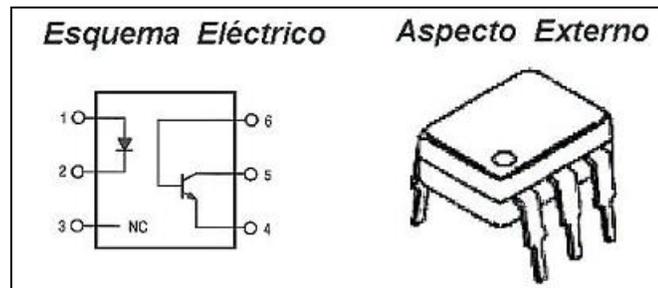


Figura 4.25. Esquema OPTO

El acoplador óptico es un dispositivo que ofrece a los diseñadores electrónicos una mayor libertad para diseñar circuitos y sistemas. La operación está basada en la detección de luz emitida. La entrada del acoplador está conectada a un emisor de luz y la salida es un fotodetector. Los dos elementos están separados por un aislante transparente y dentro de un empaque que lo aísla de la luz exterior.

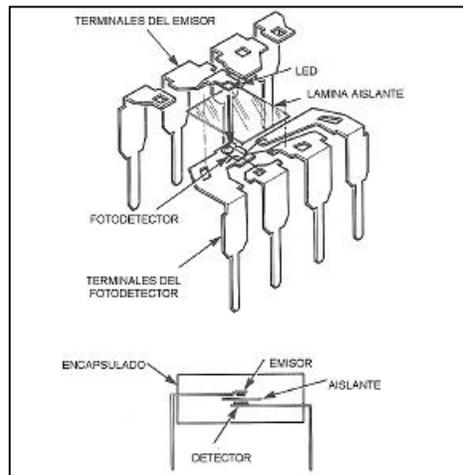


Figura 4.26. Corte de un Optoacoplador.

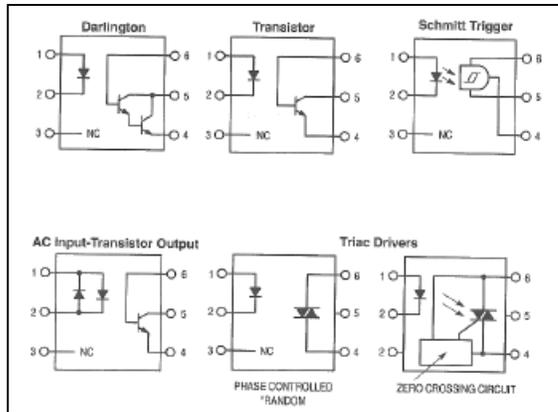


Figura 4.27. Diferentes tipos de Optoacopladores

2.17.4. Led

Un led es un tipo especial de diodo semiconductor. Como un diodo normal, éste consiste de un “chip” de material semiconductor, impregnado o dopado con impurezas, para crear una estructura llamada unión p-n. Como en todo tipo de diodo, la corriente fluye fácilmente del lado “p”, o ánodo hacia el lado “n” o cátodo, pero no en dirección inversa, estableciéndose un flujo de electrones en la unión. Cuando un electrón pasa de un lado al otro, cae en un nivel de energía inferior, liberando ésta en forma de un fotón.

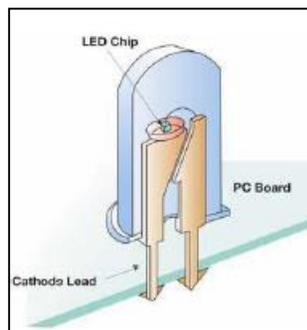


Figura 4.28. LED

2.18. Software de simulación de circuitos

Proteus VSM es un sistema de diseño electrónico basado en la simulación analógica, digital o mixta de circuitos, que brinda la posibilidad de interacción con muchos de los

elementos que integran el circuito. Incluye componentes animados para la visualización de su comportamiento en tiempo real, además de un completo sistema de generación y análisis de señales. También cuenta con un módulo para el diseño de circuitos impresos. Las siglas VSM significan Virtual System Modelling, que en español podemos traducir como sistema de modelado virtual, ya que Proteus VSM permite modelar de forma virtual en la computadora prácticamente cualquier circuito. La característica principal que hace de Proteus VSM uno de los simuladores preferidos por muchos aficionados y profesionales de la electrónica es la posibilidad de simular circuitos que incluyen microprocesadores o microcontroladores. Aunque el nombre completo del programa es Proteus VSM, a partir de ahora nos referiremos a él solo como **Proteus**, para mayor facilidad.

Componentes de PROTEUS

El programa cuenta con dos partes o componentes principales. Uno de ellos es el módulo ISIS, que es donde se dibujan los diagramas de los circuitos electrónicos y, también, desde donde se efectúan las simulaciones.

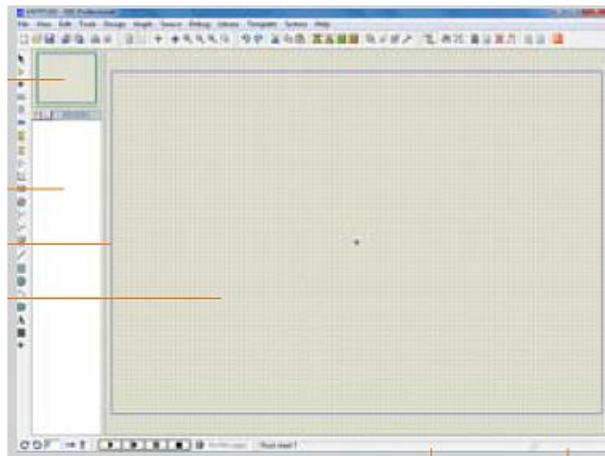


Figura 4.29. ISIS

Además del módulo ISIS, Proteus cuenta con otro módulo, denominado ARES, que es donde se diseñan las placas de circuito impreso (PCB) utilizadas para el posterior

armado de los circuitos. En relación a este tema, otra característica muy interesante de este programa es la posibilidad de importar un circuito dibujado en ISIS directamente al módulo ARES. De esta manera, se puede diseñar fácil y rápidamente un circuito impreso para él.

2.19. Adquisición de datos

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC o equipo de medición un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable. Es muy importante resaltar que se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (**DAQ**).

2.19.1. Software de adquisición de datos

El software de adquisición de datos fue labview, para poder llevar a cabo el control se requirieron los toolkits de NI-DAQmx este con el fin de que se pudiese llevar a cabo la interfaz con la PC. El software interactua con la tarjeta de adquisición DAQ USB 6229. Existe un asistente DAQ en el software LabVIEW para acceder a la configuración del dispositivo existe una paleta de funciones DAQmx dentro del menú MEASUREMENT I/O.

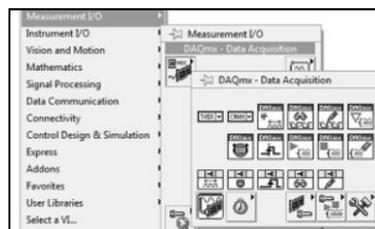


Figura 4.30. Asistente DAQ

La primera operación a realizar es la de medir una señal analógica, se selecciona el asistente DAQ y se inserta en el diagrama de bloques, después de unos instantes se desplegara la ventana siguiente, se selecciona VOLTAGE, luego se presiona NEXT.

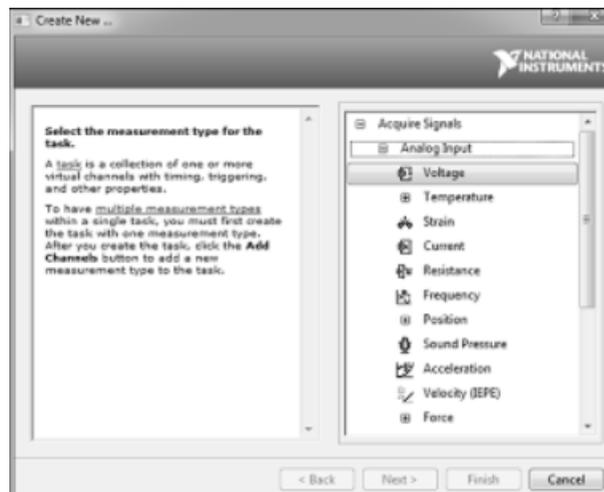


Figura 4.31. Entrada Análoga

Como paso siguiente se elige el puerto de captura para las señales analógicas.

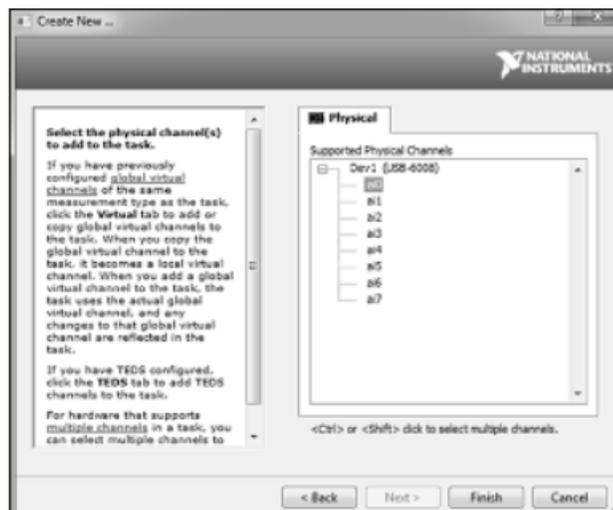


Figura 4.32. Selección de entrada

Después de seleccionar el puerto de entrada, se debe configurar el rango de voltaje de entrada, los terminales de configuración en modo RSE y el modo de adquisición, y se acepta OK.

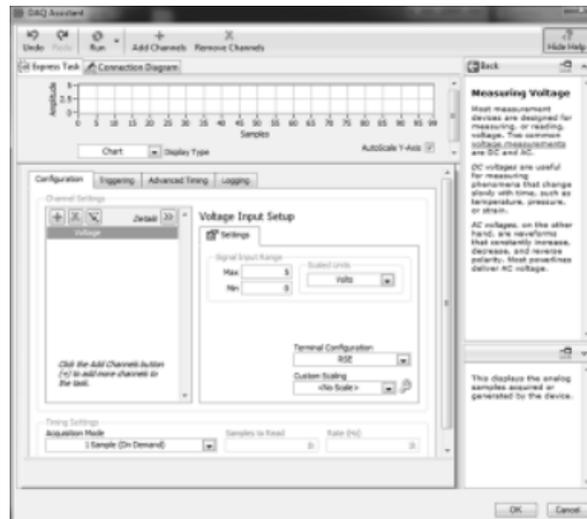


Figura 4.33. Configuración de la DAQ.

En la pestaña diagrama de conexiones se puede apreciar los pines de conexiones configurados, esto sirve para verificar los terminales antes de realizar las pruebas de medición.

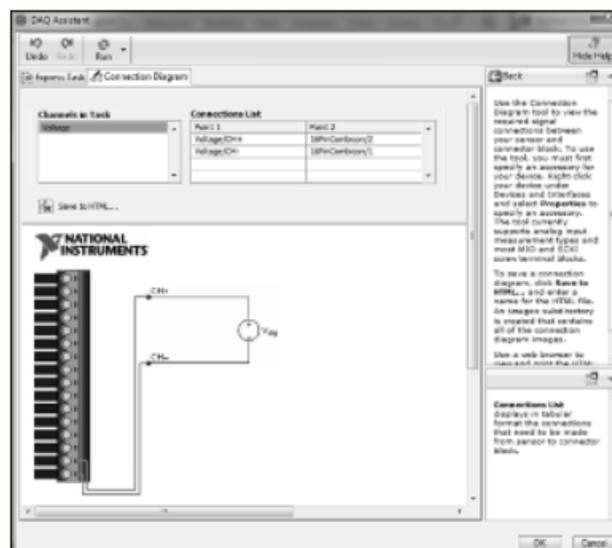


Figura 4.34. Esquema de conexión

2.20. Equipo de medición de laboratorio

Multímetro

Un multímetro, también denominado polímetro es un instrumento eléctrico portátil para medir directamente magnitudes eléctricas activas como corrientes y potenciales (tensiones) o pasivas como resistencias, capacidades y otras. Las medidas pueden realizarse para corriente continua o alterna y en varios márgenes de medida cada una. Los hay analógicos y posteriormente se han introducido los digitales cuya función es la misma.



Figura 4.35. Multímetro

Amperímetro

Un amperímetro es un instrumento que se utiliza para medir la intensidad de corriente que está circulando por un circuito eléctrico. Un microamperímetro está calibrado en millonésimas de amperio y un miliamperímetro en milésimas de amperio.

Un amperímetro es un instrumento que sirve para medir la intensidad de corriente que circula por un circuito eléctrico. Los amperímetros, en esencia, están constituidos por un galvanómetro cuya escala ha sido graduada en amperios. Para efectuar la medida de la intensidad de la corriente circulante, el amperímetro ha de colocarse en serie, para que sea atravesado por dicha corriente. Esto nos lleva a que el amperímetro debe poseer una resistencia interna lo más pequeña posible, a fin de que no produzca una caída de tensión apreciable. Para ello, en el caso de instrumentos basados en los

efectos electromagnéticos de la corriente eléctrica, estarán formados por bobina de hilo grueso y con pocas espiras.



Figura 4.36. Amperímetro

Es muy importante leer el manual de operación de cada multímetro en particular, pues en él, el fabricante fija los valores máximos de corriente y tensión que puede soportar y el modo más seguro de manejo, tanto para evitar el deterioro del instrumento como para evitar accidentes al operario.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

En este capítulo se muestra el diagrama general de la construcción del banco de pruebas para celdas de combustible, la metodología empleada en el desarrollo del proyecto, los materiales y el equipo empleados.

3.1. Metodología del proyecto

La figura 3.1 muestra los bloques funcionales del diseño y desarrollo del banco caracterizador de celdas de combustible y su interacción entre ellos, representa el planteamiento metodológico que desglosa y describe el planteamiento metodológico del desarrollo y el procedimiento de la operación del sistema que se desarrollará a detalle en el capítulo 4.

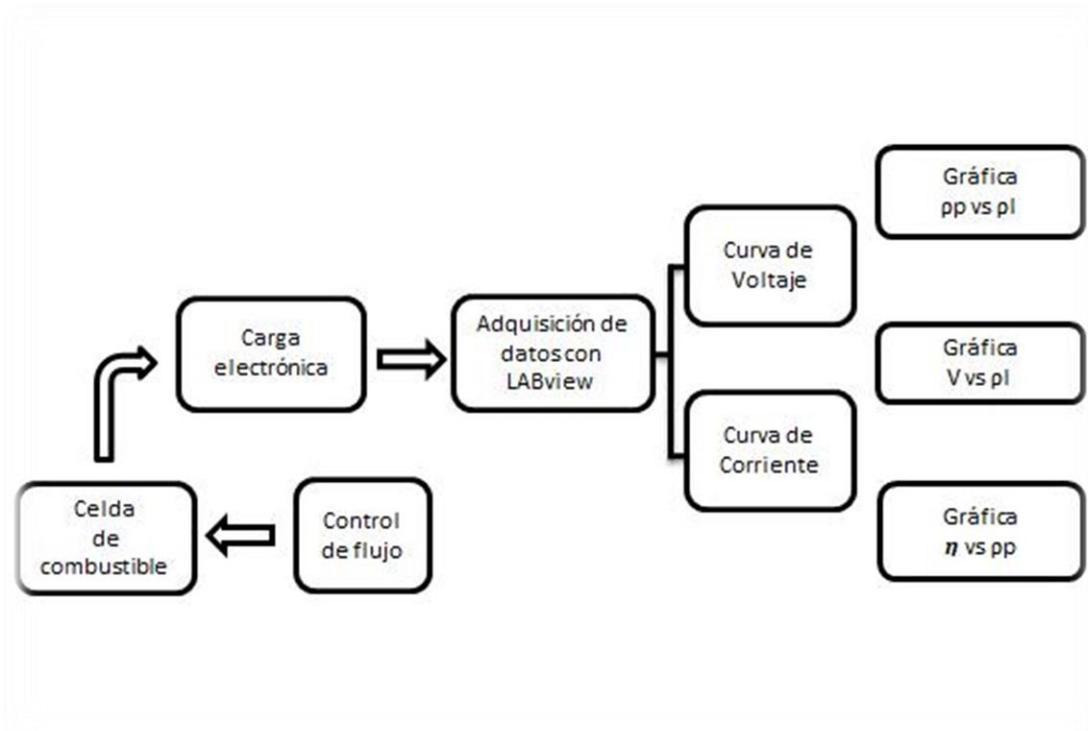


Figura 3.1. Banco de caracterización de celdas

3.2. Descripción de bloques.

Control de flujo.

Es necesario controlar el flujo de oxígeno e hidrógeno para poder suministrar rangos de forma controlada y evaluar el efecto de la generación y desempeño de la celda de combustible. Tanto el flujo de oxígeno como el de hidrógeno deben controlarse de forma individual y aunque mantienen una correspondencia en la proporción de 1:2 respectivamente se puede ajustar de forma independiente con su respectivo flujómetro.

Celda de combustible.

La celda de combustible (FC) a evaluar tiene un área de 6 cm² y es un prototipo comercial con que se cuenta teniendo en respaldo un celda más de las mismas características, en la conexión o tomas para la entrada y salida de los gases se puede utilizar manguera flexible de 4 mm de diámetro. La carcaza es de material plástico y esta ensamblada de fábrica.

Carga electrónica.

Es necesaria debido a que la potencia que se esta transformando en la celda de combustible debe ser consumida por una carga variable que va desde el valor minimo desde el orden de miliohms hasta el orden de Megaohms. Al tener esta carga variable a la salida de la celda de combustible va a generar datos de su desempeño en todo su espectro de potencia.

Adquisición de datos.

Las señales adquiridas inicialmente son de naturaleza analógica y proveídas a la DAQ en cuya adquisición se discretizan tomando una naturaleza digital posteriorme son procesadas con el software LabView, la DAQ se eligió con la suficiente velocidad de muestro para lograr la resolución de hasta una muestra por milisegundo.

Podemos resumir la operación de LabView en tres fases: Primero adquiere los datos de voltaje y corriente de la celda, posteriormente genera una rampa de valores de resistencia emulando la carga variable para probar su desempeño en todo su rango de trabajo y finalmente procesa la información para arrojar resultados en forma gráfica de la respuesta de la celda.

Grafica de voltaje.

Esta primer grafica genera el voltaje de la celda contra el número de muestras de la adquisición y que vía software se puede elegir la resolución en la pantalla de la aplicación del LabView. Esta primer gráfica cumple el objetivo de evaluar si con el número de muestras elegido se adquieren los datos de voltaje que deben de ir de 0 V a 1.23 V.

Grafica de corriente.

Esta grafica la corriente contra número de muestras y el objetivo es visualizar que la corriente permanezca estable una vez alcanzada la máxima capacidad de la celda de proveer corriente.

Grafica secundarias.

A partir de la corriente y voltaje obetindas se procesa la información para obtener gráficas secundarias, de: Gráfica de Densidad de Corriente (mA/cm²) Vs Diferencia de potencial (V), Diferencia de potencial (V) Vs Densidad de Potencia (mW/cm²), la gráfica de eficiencia (%) contra densidad de potencia (mW/cm²).

3.3. Materiales y equipo

Los materiales que se utilizaron para llevar a cabo la realización del proyecto fueron los que se mencionan en la tabla 3.1.

MATERIAL	COSTO
Válvulas de Bloqueo (2)	\$1399.30
Tubo de Plástico de 6mm	\$103.35
NI-DAQ 6229	\$26,000.00
Flujómetro	\$18000.00
Válvulas reguladoras de presión con manómetros	\$13200.00
Tanque de Oxígeno	\$7,617.53
Tanque de Hidrógeno	\$8,920.63
Fuente Unipolar	\$4,300.00
Resistencias (Varias)	\$20.00
LM324	\$5.00
Optoacoplador FET H11F1	\$40.00
Ventilador	\$50.00
Terminales	\$40.00
Base de 14 Pines	\$7.00
Placa de cobre	\$8.00
Cloruro férrico	\$35.00
Tubo de Estaño	\$20.00
Caja de plástico	\$45.00
Cable (Varios)	\$30.00
Cajas y Postes	\$30.00
Hoja de Transferencia	\$20.00
Total	\$79,859.65

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DEL SISTEMA CARACTERIZADOR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

La integración de los materiales y equipo utilizados se describirán brevemente de acuerdo al bloque del sistema de caracterización de celdas de combustible, describiendo de manera general con un diagrama de flujo su interconexión y funcionamiento por bloque al final del capítulo.

4.1. Sistema de control de flujo

El sistema de control de flujo se diseñó utilizando hidrógeno y oxígeno; se alimentará un flujo controlado a la celda de combustible permitiendo la operación a diferentes rangos de operación y determinando su impacto en su desempeño de generación de energía, se debe asegurar que la operación reúne las condiciones de seguridad necesarias para trabajar con el equipo por lo que se requiere que los tanques tengan válvulas de bloqueo y válvulas reguladoras para alimentar un flujo controlado y con una presión adecuada a la alimentación de la celda ya que los cilindros vienen envasados a muy alta presión además se requiere que los gases sean los más puros posibles para eliminar la posibilidad de que otras variables afecten los resultados.

En lo que respecta a los control de flujo se debe asegurar que se pueda variar los rangos de alimentación a la celda en el orden de unidades de centímetros cúbicos por minuto estándar (sccm) y además se debe contar con la unidad de control del punto de ajuste o punto deseado de flujo. Para el control y punto deseado de flujo y se utiliza Flujómetros de oxígeno e hidrógeno así como controlador indicador de flujo de la marca MKS.

El sistema de control de flujo está compuesto por dos cilindros uno de oxígeno y otro de hidrógeno, cada unidad cuenta con válvulas reguladoras de flujo y válvula de bloqueo, el conducto para cada uno de los gases consiste de tubo de plástico de 4 mm de diámetro y llega a los Flujómetros MKS que son comandados a su vez por un controlador indicador de cuatro canales que proporcionará la señal de flujo deseado

para cada gas, a la salida es conducida a través de una columna de agua destilada a manera de poder observar el flujo de gas y finalmente conectada a cada lado de la celda de combustible, a continuación se describe cada uno de los componentes del sistema de control de flujo.

4.1.1. Cilindros

El sistema consta de dos cilindros, Un cilindro de oxígeno es un recipiente de almacenaje de oxígeno, tanto bajo presión en cilindros de gas o como oxígeno líquido en tanques de almacenaje criogénicos.

Como el oxígeno líquido a presión atmosférica se evapora a los $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$, un cilindro de oxígeno líquido debe almacenar el oxígeno bajo esa temperatura y debe ser un buen aislante térmico. El oxígeno rara vez se mantiene a presiones superiores a los 200 bar o 3000 psi, ya que los riesgos de incendio por alta temperatura causados por algún proceso adiabático aumentan cuando cambia la presión del gas al moverse éste de un recipiente a otro. El oxígeno de todo equipamiento que entre en contacto con altas presiones debe ser "para oxígeno limpio" y "compatible con oxígeno" para reducir las posibilidades de incendio. "Para oxígeno limpio" significa la remoción de cualquier sustancia que pudiera actuar como combustible o fuente de ignición. "Compatible con oxígeno" significa que los componentes internos no pueden arder rápidamente o degradarse con facilidad en un ambiente de oxígeno altamente presurizado. El cilindro de oxígeno que se utilizó es el que se muestra en la figura 4.1.

El hidrógeno es un elemento químico de número atómico 1 y representado por el símbolo H Con una masa atómica del 1,00794 (7) u. Por lo general, se presenta en su forma molecular, formando el gas diatómico (H_2) en condiciones normales. Este gas es inflamable, incoloro, inodoro, no metálico e insoluble en agua; El hidrógeno es el elemento químico más abundante, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia visible del universo.



Figura 4.1. Cilindros de oxígeno e hidrógeno

El hidrógeno es más ligero de los gases (la densidad es de 84 g/m^3 a una temperatura de 15°C y 1 bar). Es por eso que el hidrógeno al escaparse inmediatamente se elevará hacia arriba y se acumulan en los techos o zonas similares.

El hidrógeno se almacena en forma de gas en cilindros o tanques a temperatura ambiente a alta presión (hasta 300 bar), o se almacena o se transporta casi sin presión en forma de hidrógeno criogénico líquido en recipientes aislados.

El hidrógeno cuando se combina con el aire o el oxígeno y se enciende puede quemará en el agua. El hidrógeno también puede reaccionar con otros agentes oxidantes, por ejemplo, cloro o gas de la risa. Cuando el hidrógeno se combina con un agente oxidante y luego se enciende, el proceso de combustión puede ser explosivo. Si este proceso se lleva a cabo en una sala cerrada, con un aumento rápido de presión, puede ser muy destructivo, y tiene lugar a causa del calor generado. El cilindro de hidrogeno utilizado se muestra en la figura 4.1.

4.1.2. Válvulas reguladoras de presión, manómetros y conexiones

Las válvulas reguladoras utilizadas son marca CONCOA especiales para manejo de gases con diafragma metálico para el hidrógeno.

Los manómetros utilizados son tipo Bourdon con rango de 0 a 4000 psi para la presión de entrada y 0 a 200 psi para la presión de salida, las válvulas de bloqueo son multi-vuelta conexión ¼” y la tubería de plástico flexible de 6 mm de diámetro.

4.1.3. Controlador de flujo másico

Este tipo de controladores están diseñados para una gran variedad de aplicaciones y con un amplio rango de control de flujo, utiliza tecnología de punta para el control de flujo con un diseño robusto y confiable. Tienen además la capacidad de comunicación con varios estándares tales como Devicenet, Fielbus, RS-485 y cuenta además con algoritmos de control que proporcionan una confiable y pronta respuesta a la señal de control.

Este equipo es utilizado para que partiendo de una señal deseada por el usuario ajuste su posición interna y permita solo el paso necesario de gas para mantener la lectura deseada. En la figura 4.2 se muestra una imagen de los flujómetros.



Figura 4.2. Flujómetros de gases

Su tecnología combina el elemento sensor con la amplificación y conversión A/D en un solo chip. La señal del sensor es procesada en una señal de PWM que es usada para controlar una válvula de precisión. En el controlador de flujo o flujómetro todos los datos de medida son digitalmente linealizados y compensados para la temperatura por medio de un microregulador interno. Todo lo anterior resulta en un funcionamiento muy confiable y un tiempo de respuesta rápido.

Características comunes:

- ✓ Elastómero y metal sellados MFC / MFM, 1.5 pulgadas (38.1 mm) de ancho.
- ✓ Caudales MFC (Caudal de flujo Másico) escala completa de 5 sccm a 200. sccm.
- ✓ MFC Multi-gas/multi-range; 1 % de exactitud de consigna.
- ✓ Digital y E / S analógicas.

4.1.4. Controlador indicador de flujo de cuatro canales

Los controladores indicadores pueden ser usados con modulos MKS y además pueden proporcionar energía y una señal de set point a los controladores de flujo másico o Flujómetros. Para la parte indicadora proporcionan una lectura del flujo de gas con posibilidad de ajuste con potenciómetro, también cuenta con la opción de indicación remota, registro y propósitos de control.

El controlador esta diseñado para visualizar y controlar cualquier transductor de flujo, el set point de flujo puede ser ajustado tanto de manera remota como de manera local en la parte trasera con la interface analógica. El display de salida es seleccionable.

Cuenta con las siguientes características:

- ✓ Display de 3 ½ dígitos seleccionable.
- ✓ Cuatro canales de medición/control.
- ✓ Cuatro entradas de 0 – 5 V del MFC
- ✓ Compatible con entradas TTL
- ✓ Temperatura de operación de 15°C a 40°C
- ✓ Alimentación de 110 VAC

En la figura 4.3 se muestra el controlador/indicador de flujo de cuatro canales empleado en el prototipo.



Figura 4.3. Controlador de flujo

4.2. Celda de combustible

La celda de combustible empleada es comercial, tiene un área de 6.25 cm^2 es de tipo PEMFC con características descritas en el capítulo uno, la topología para la distribución de los gases será fija en el alcance de este proyecto pero es una más de las variables que queda abierta para experimentar, al igual que el control de temperatura y la humedad en la celda ya que no están dentro del alcance del proyecto, solamente se determinará el desempeño de la celda de combustible con base sistema de control de flujo con diferentes rangos de alimentación de gases.

4.3. Sistema de caracterización

Para el sistema de caracterización, se necesita que la carga del dispositivo vaya variando su resistencia para así afectar de manera directa el voltaje y la corriente que suministra la celda de combustible.

Para esto se plantea un sistema que en determinado tiempo cambie su valor resistivo y que a su vez tome lecturas de las variables a cuantificar.

Se planteó el sistema en 2 partes:

- ✓ El circuito variador de resistencia.
- ✓ Interfaz de usuario para visualizar el valor de las variables.

4.3.1. Circuito variador de resistencia

Para la primera parte del sistema se buscó un dispositivo que de manera lineal cambiara su valor resistivo y se mantuviera estable simulando una resistencia física de carbón. Tomando en cuenta este requerimiento se plantea la operación de un transistor en su región de amplificación, puesto que en esta región de trabajo la resistencia entre las terminales de conducción (sean Colector-Emisor ó bien Drain-Source) va disminuyendo conforme se activa su terminal de base o gate.

Se propuso trabajar con un transistor de efecto de campo (FET) ya que a diferencia del transistor de unión bipolar (BJT) no requiere una corriente mínima de activación, sino que usa un cierto nivel de tensión para empezar a operar, por lo cual el sistema no tendrá que estar sujeto a mantener niveles de tensión y corriente constantes, sino que solamente se necesitara aplicar un nivel de voltaje y este empezara a conducir.

El dispositivo requerido también debe cumplir con las características de linealidad y estabilidad en el rango de operación deseado además la resistencia que oponga en el punto mínimo debe ser lo suficientemente baja para probar toda la variación que la celda pueda tener y no representar una carga grande donde solo se pruebe un rango de trabajo de la celda. La hoja de datos del FET explica las características técnicas de desempeño.

Se debe también asegurar que la señal debe ser acondicionada para que las mediciones sean lo más exactas e independientes de variables externas en la adquisición de datos. Por lo que interactuando con la tarjeta de adquisición de datos se diseñó el sistema de acondicionamiento de señal tanto para las entradas de corriente y voltaje de la celda como para la variación de la señal de salida en la variación de la carga que soportará la celda de combustible.

El diagrama electrónico para la variación de la carga se muestra en la figura 4.4 la simulación y operación se simulo con Proteus.

4.3.2. Sistema de control e Interfaz de usuario

Con base en lo anterior, se diseñó un sistema de interfaz por medio del software Labview de National Instruments que realizará la función de ir variando e incrementando un nivel de voltaje emulando la carga variable y al mismo tiempo pueda leer las variables de voltaje y corriente que se leerán para lo que se dispuso de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) de National Instruments que realice esta función.

El entorno de programación de LabVIEW es gráfico por lo cual es muy amigable y práctico además el panel frontal se diseñó para ver de manera directa en las gráficas el comportamiento de las variables a medir y el desempeño de la celda de combustible.

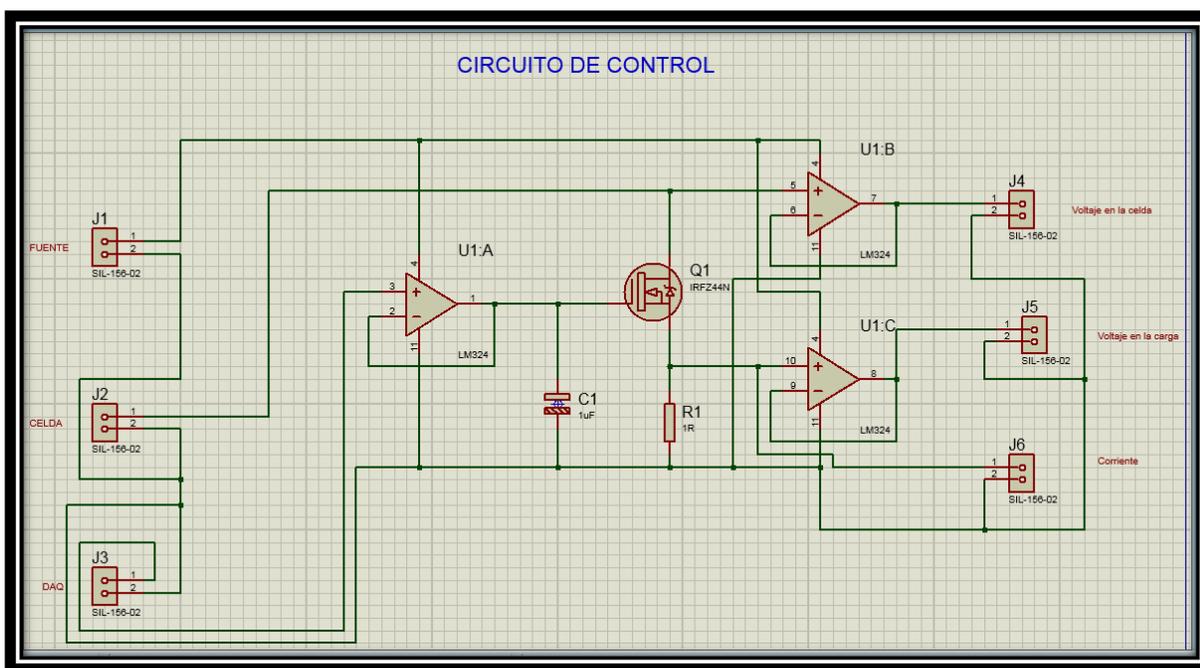


Figura 4.4. Circuito electrónico para la variación de la carga en la celda de combustible

Labview es una plataforma de programación gráfica que ayuda a ingenieros a escalar desde el diseño hasta pruebas y desde sistemas pequeños hasta grandes sistemas. Ofrece integración sin precedentes con software legado existente, IP y hardware al aprovechar las últimas tecnologías de cómputo. Labview ofrece herramientas para

resolver los problemas de hoy en día y la capacidad para la futura innovación, más rápido y de manera más eficiente.

Labview es un entorno de programación destinado al desarrollo de aplicaciones, similar a los sistemas de desarrollo comerciales que utilizan el lenguaje C o BASIC. Sin embargo, Labview se diferencia de dichos programas en un importante aspecto: los citados lenguajes de programación se basan en líneas de texto para crear el código fuente del programa, mientras que Labview emplea la programación gráfica o lenguaje G para crear programas basados en diagramas de bloques.



Figura 4.5. Pantalla de lanzamiento del software Labview

- ✓ Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- ✓ Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- ✓ Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- ✓ Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- ✓ El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- ✓ Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

Los programas desarrollados mediante Labview se denominan Instrumentos Virtuales (VIs), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros VIs. Todos los VIs tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. Las paletas contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los VIs.

PANEL FRONTAL

Se trata de la interfaz gráfica del VI con el usuario. Esta interfaz recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un panel frontal está formado por una serie de botones, pulsadores, potenciómetros, gráficos, etc.

Cada uno de ellos puede estar definido como un control (a) o un indicador (b). Los primeros sirven para introducir parámetros al VI, mientras que los indicadores se emplean para mostrar los resultados producidos, ya sean datos adquiridos o resultados de alguna operación. En la figura 4.6 se muestra un ejemplo del panel frontal.

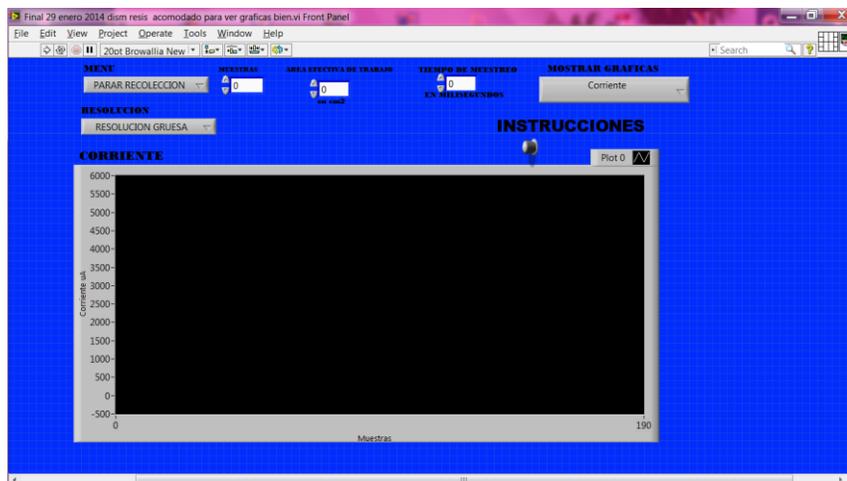


Figura 4.6. Panel frontal de la aplicación de Labview

DIAGRAMA A BLOQUES

El diagrama de bloques constituye el código fuente del VI. En el diagrama de bloques es donde se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar cualquier procesamiento de las entradas y salidas que se crearon en el panel frontal.

El diagrama de bloques incluye funciones y estructuras integradas en las librerías que incorpora Labview. En el lenguaje G las funciones y las estructuras son nodos elementales.

Los controles e indicadores que se colocaron previamente en el Panel Frontal, se materializan en el diagrama de bloques mediante los terminales. En la figura 5.6 se muestra un ejemplo de diagrama a bloques. El diagrama de bloques se construye conectando los distintos objetos entre sí, como si de un circuito se tratara. Los cables unen terminales de entrada y salida con los objetos correspondientes, y por ellos fluyen los datos.

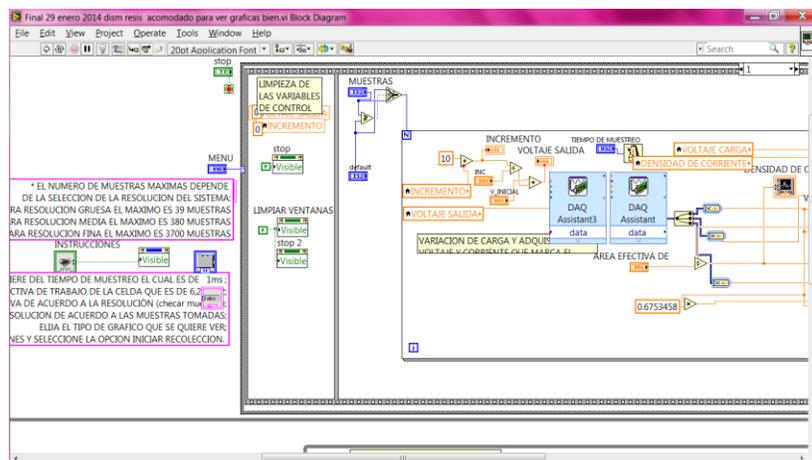


Figura 4.7. Diagrama de bloque de una aplicación de Labview

4.4. Resultados de la adquisición de datos.

Los datos adquiridos en las corridas de experimentación serán realizados en seis relaciones como se muestran en la tabla 3.1.

De acuerdo a las características del equipo se parte del flujo mínimo que puede controlar y aumentando de manera proporcional en base al valor inicial mínimo.

4.4.1. Adquisición de datos

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable. Es muy importante resaltar que se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (**DAQ**). En la figura 4.8 se muestran las partes de un sistema DAQ.

Oxígeno (sccm)	Hidrógeno (sccm)
8	16
16	32
24	48
32	64
40	80
48	96

Tabla 3.1. Proporciones de flujo de gases alimentados a la celda



Figura 4.8. Sistema de adquisición de datos

TARJETA DAQ NI USB-6229

El hardware DAQ actúa como la interfaz entre una PC y señales del mundo exterior. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas. Los tres componentes clave de un dispositivo DAQ usado para medir una señal son el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC. Varios dispositivos DAQ incluyen otras funciones para automatizar sistemas de medidas y procesos. Por ejemplo, los convertidores digitales-analógicos (DACs) envían señales analógicas, las líneas de E/S digital reciben y envían señales digitales y los contadores/temporizadores cuentan y generan pulsos. La tarjeta NI-USB 6229 tiene las siguientes características:

- ✓ 32 entradas analógicas (16 bits, 250 kS/s)
- ✓ 4 salidas analógicas (16 bits a 833 kS/s), 48 E/S digitales (32 a hasta 1 MHz) y contadores de 32 bits



Figura 4.9. DAQ y tarjeta NI-6229

4.5. Equipo de medición para validación

Para la validación se utilizó un multímetro de banco HP, fuente de voltaje unipolar HP y mediante la simulación de voltajes se emulo la celda de combustible a fin de comprobar los resultados obtenidos.

4.6. Descripción de variables adquiridas y calculadas

Corriente, voltaje, densidad de potencia, densidad de corriente, eficiencia, densidad de potencia contra densidad de corriente, eficiencia contra densidad de potencia y voltaje contra densidad de corriente.

4.7. Análisis de los resultados y graficas de comportamiento

Los datos obtenidos en las corridas de experimentación se deberán validar con equipo de medición externo y de acuerdo a la naturaleza de la señal se utilizará un multímetro de banco de precisión adecuada a fin de corroborar los valores.

Una vez realizada la experimentación con los diferentes valores de alimentación de flujo a la celda, se analizaran los resultados de las diferentes variables en la celda, en base a las gráficas de: Corriente de celda, voltaje de celda, voltaje contra densidad de corriente, densidad de potencia contra densidad de corriente y eficiencia contra densidad de potencia, lo anterior con cada uno de los rangos de flujo de oxígeno e hidrógeno planteados, posteriormente se exportaran los datos al Excel para el tratamiento y presentación de los resultados generales del desempeño de la fotocelda en sus diferentes gráficas y obtener la interpretación y conclusiones finales.

4.8. Curvas características de la monocelda.

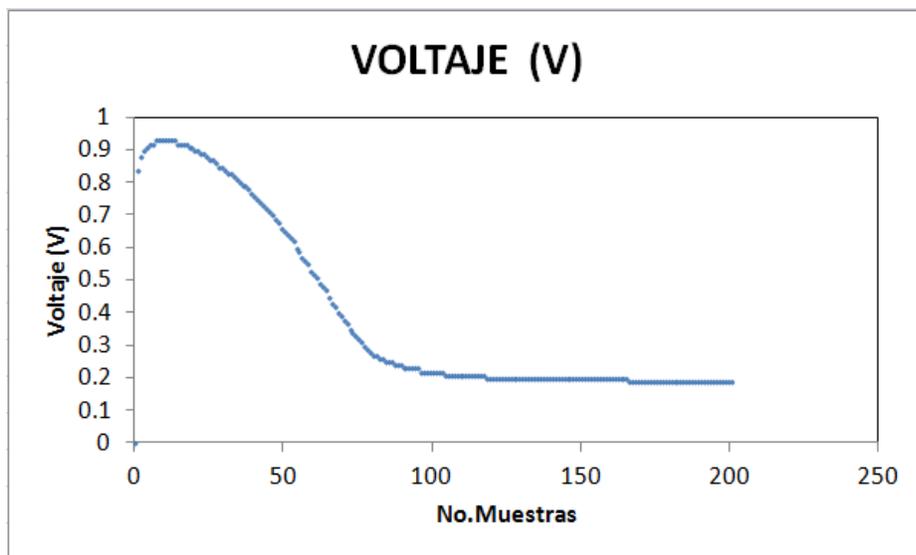


Figura 4.10. Voltaje contra número de muestras corrida uno

La figura 4.10 muestra la adquisición de voltaje contra el número de muestras, donde se observa que al inicio de la corrida presenta el valor máximo de voltaje el cuál decrece de manera progresiva hasta alcanzar un valor mínimo estable en la parte final de la corrida que corresponde a la máxima resistencia aplicada a la celda de combustible.

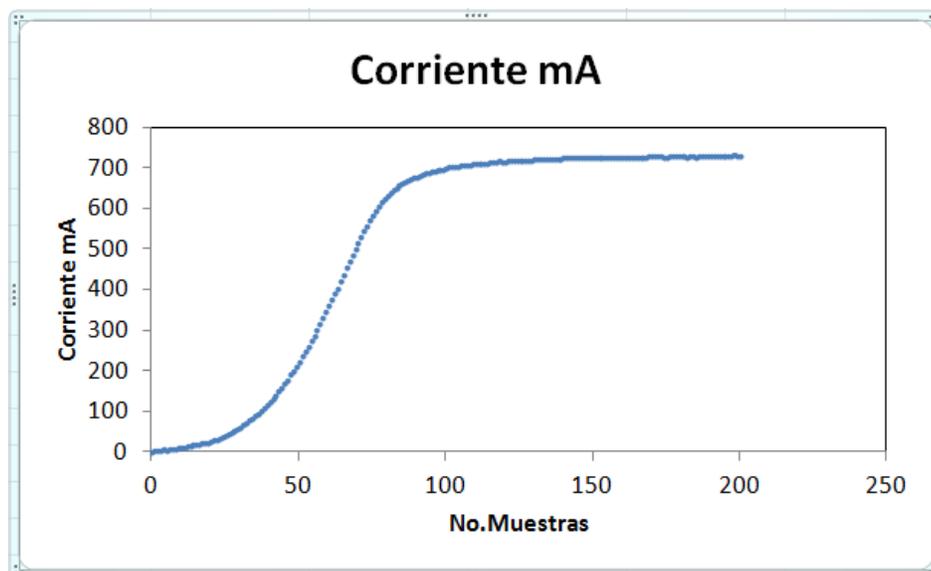


Figura 4.11. Corriente contra número de muestras corrida uno

En la figura 4.11 la corriente inicial es mínima por que es cuando se presenta la carga máxima, al irse decrementando la resistencia la corriente se estabiliza aproximadamente a 700 mA garantizando que la simulación se haya realizado en todo su rango de operación.

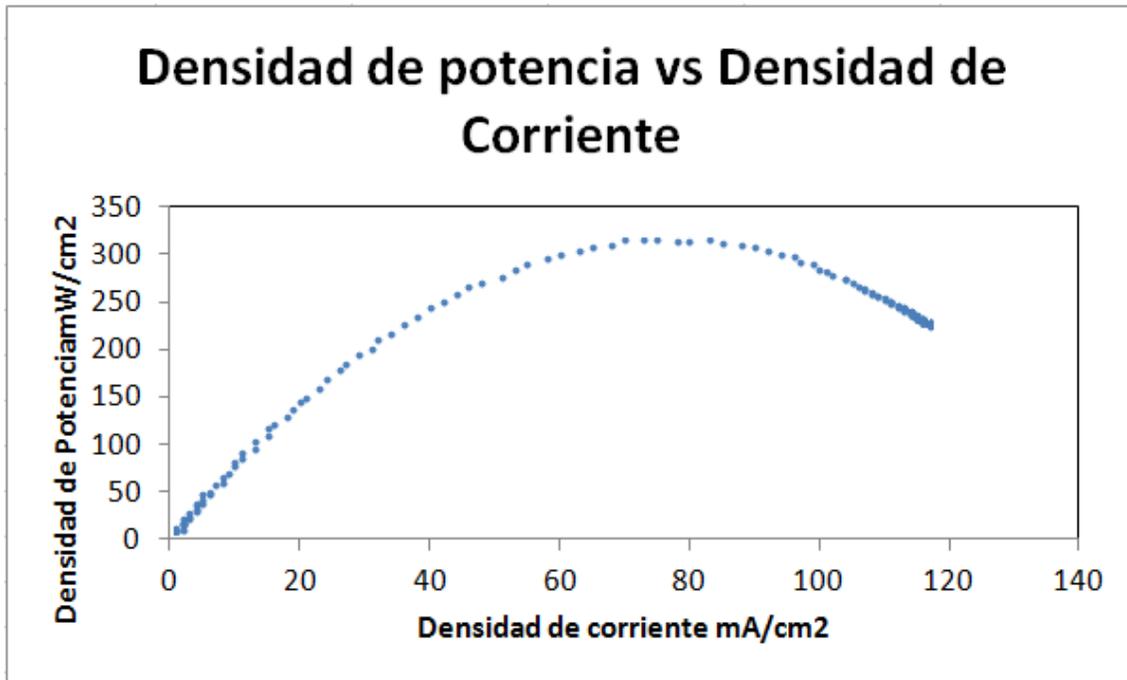


Figura 4.12. Densidad de potencia contra densidad de corriente corrida uno

En la figura 4.12 se observa el desempeño de la celda comparando la densidad de potencia contra la densidad de corriente cuyo valor de esta última es en relación a la generación de corriente por unidad de área (cm²).

Se observa también que la potencia máxima que proporciona la celda se encuentra en la parte central de la gráfica y a pesar que la densidad de corriente aumenta todavía en la corrida, el voltaje decrece a niveles mínimos por lo que el producto VI que corresponde a la densidad de potencia tendrá su valor máximo en los rangos medios de los valores adquiridos, lo que nos da la indicación de cuál es el punto óptimo de trabajo en la celda de combustible que es la cresta de la curva.

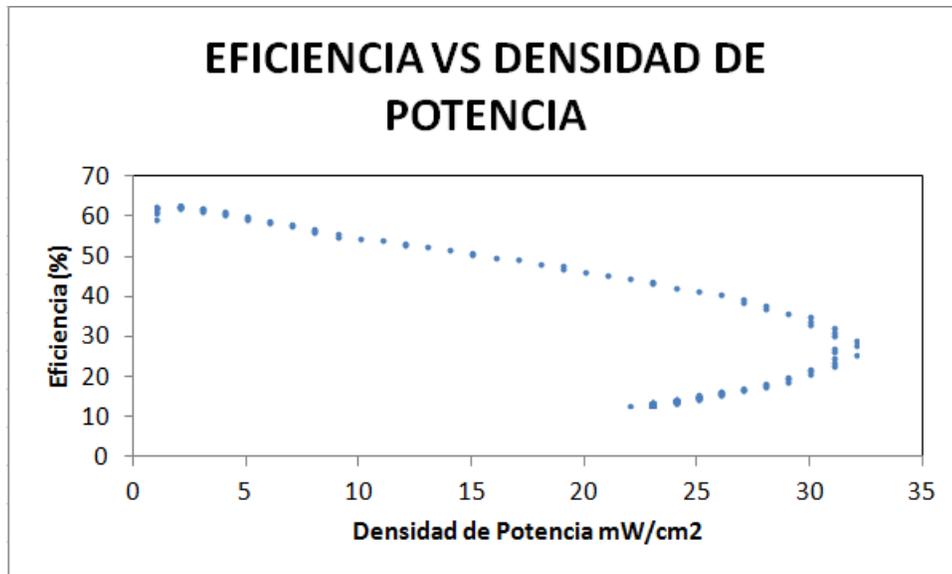


Figura 4.13. Eficiencia contra densidad de potencia corrida uno

Es importante determinar la eficiencia para determinar el impacto en las variables que inciden en el desempeño de la celda, en la figura 4.13 se observa que la eficiencia alcanzada con la celda en prueba es aproximadamente de un 33 % relacionando la lectura con la máxima potencia alcanzada que se observó en la gráfica 4.12.

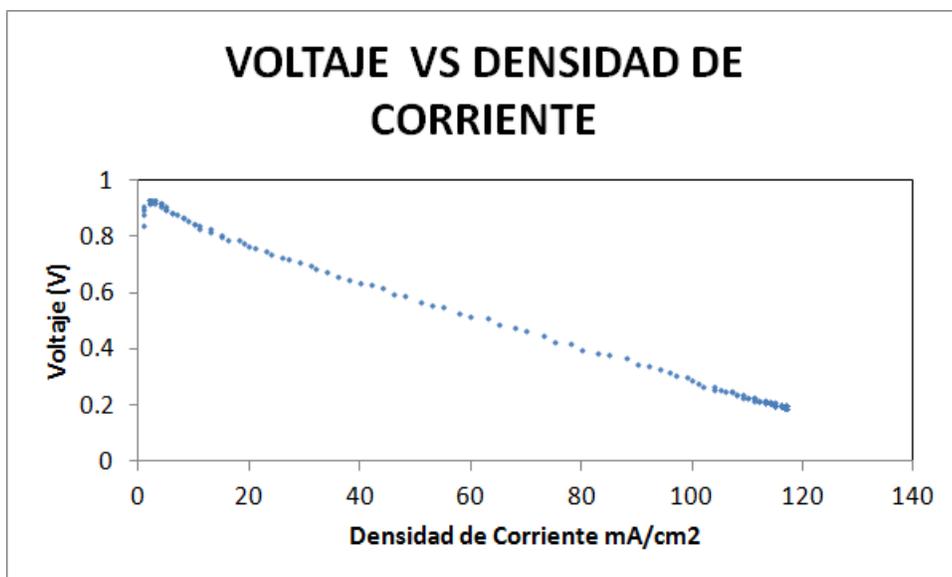


Figura 4.14. Voltaje contra densidad de corriente corrida uno.

La figura 4.14 nos muestra la curva característica que muestra el desempeño general de la celda y en la que se observa las regiones características de pérdidas por activación, pérdidas por carga óhmica y pérdidas por transporte de masa.

En la parte final se presentan las gráficas correspondientes a los valores obtenidos a las diferentes razones de flujo de oxígeno e hidrógeno.

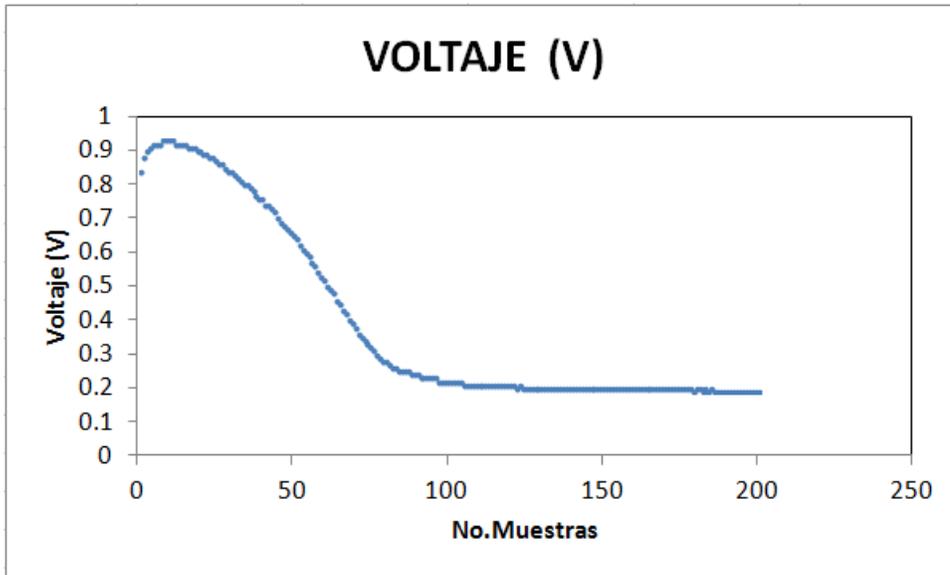


Figura 4.15. Voltaje contra número de muestras corrida dos

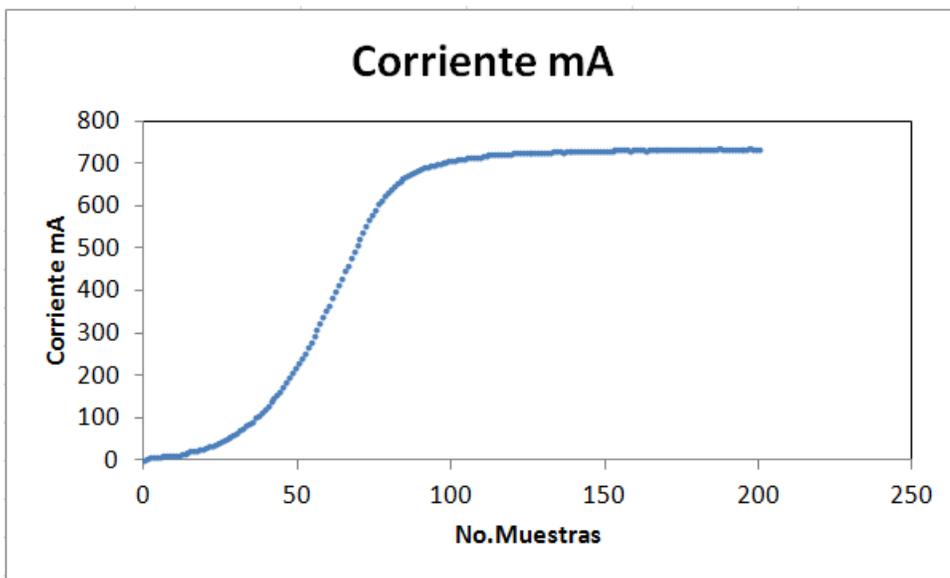


Figura 4.16. Corriente contra número de muestras corrida dos

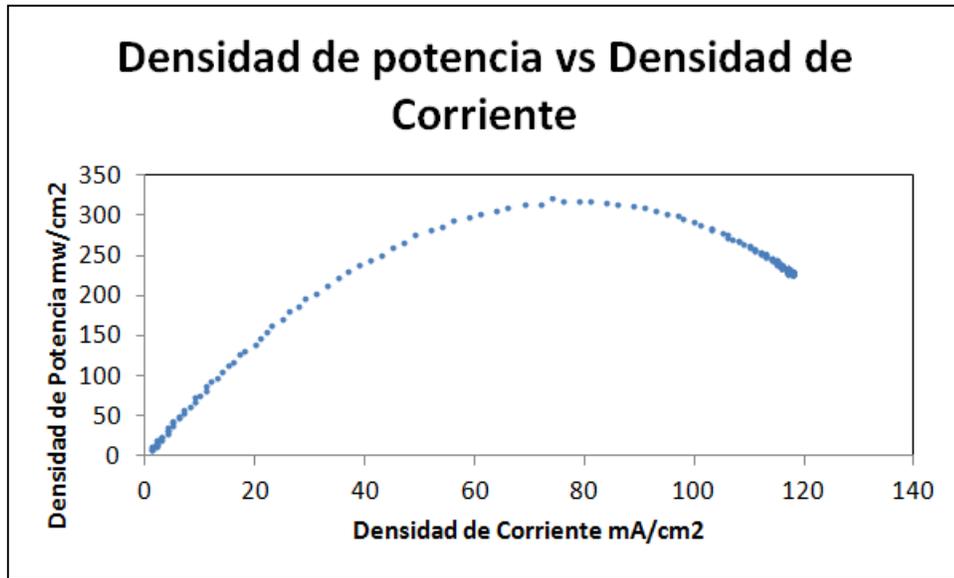


Figura 4.17. Densidad de potencia contra densidad de corriente corrida dos

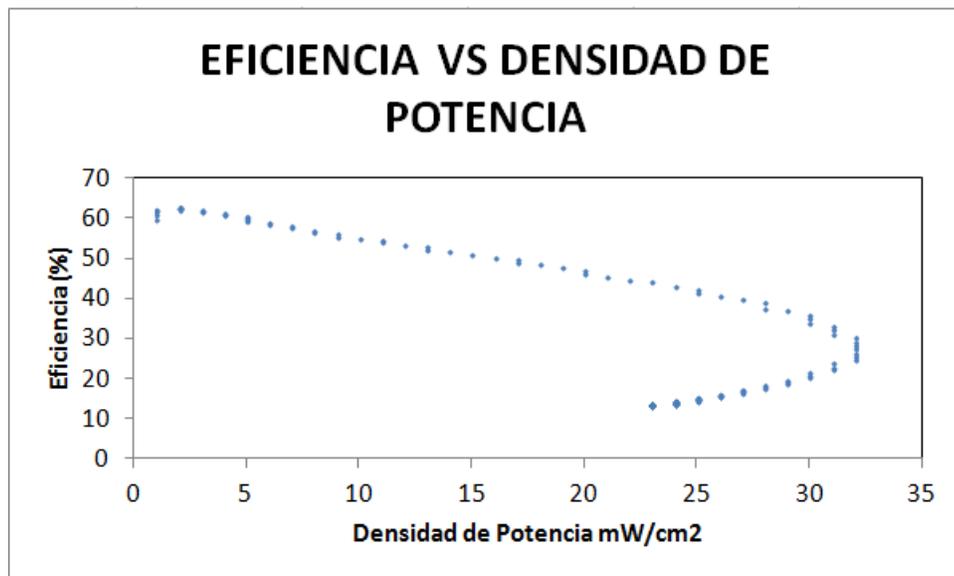


Figura 4.18. Eficiencia contra densidad de potencia corrida dos

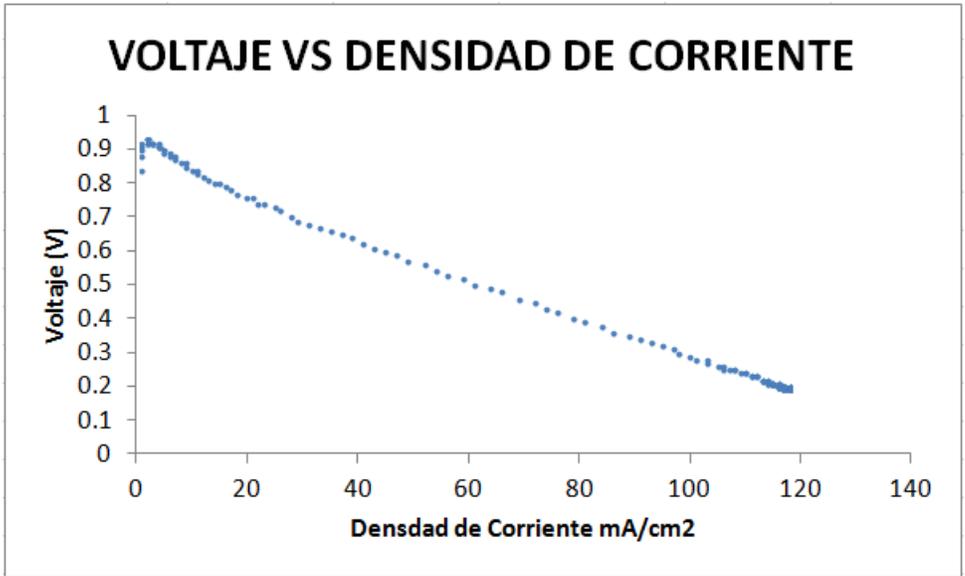


Figura 4.19. Voltaje contra densidad de corriente corrida dos

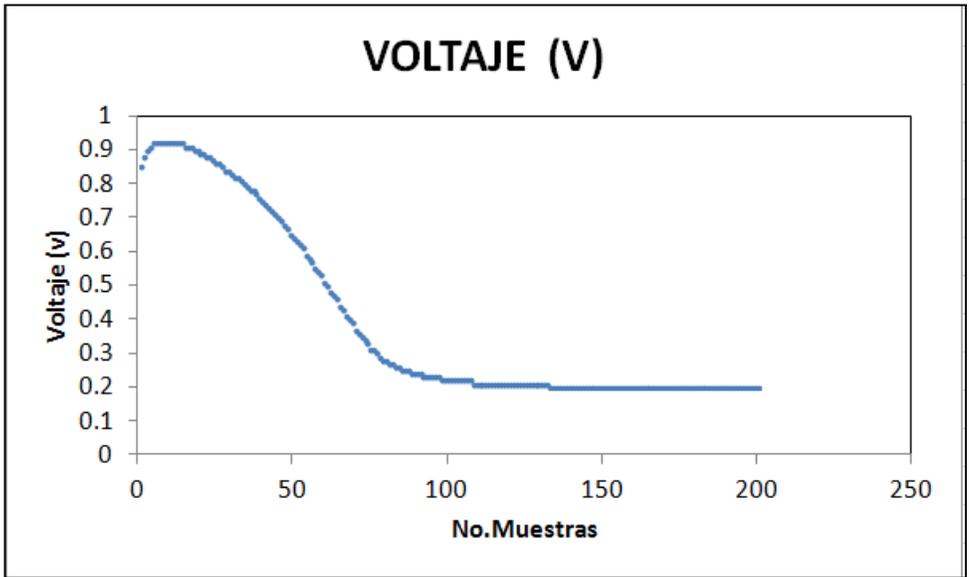


Figura 4.20. Voltaje contra número de muestras corrida tres

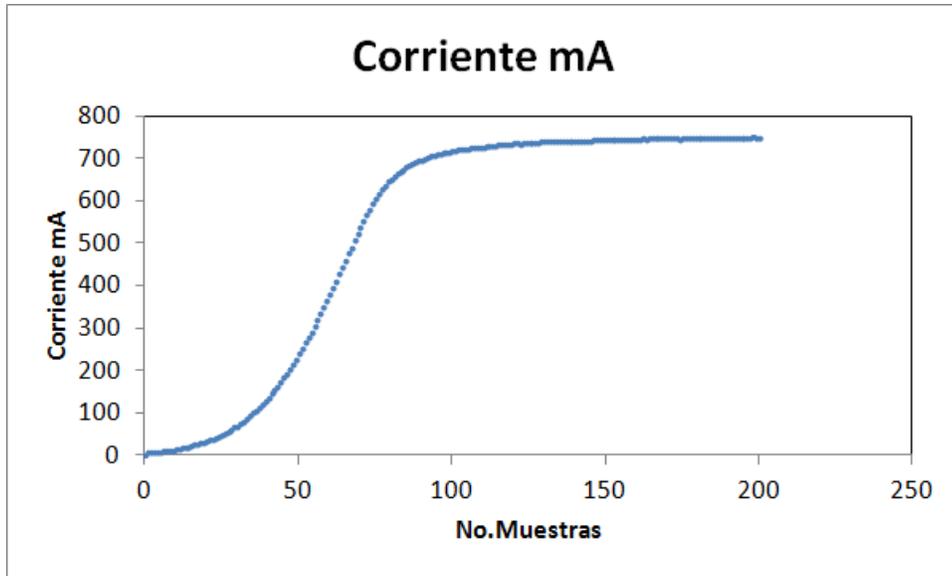


Figura 4.21. Corriente contra número de muestras corrida tres

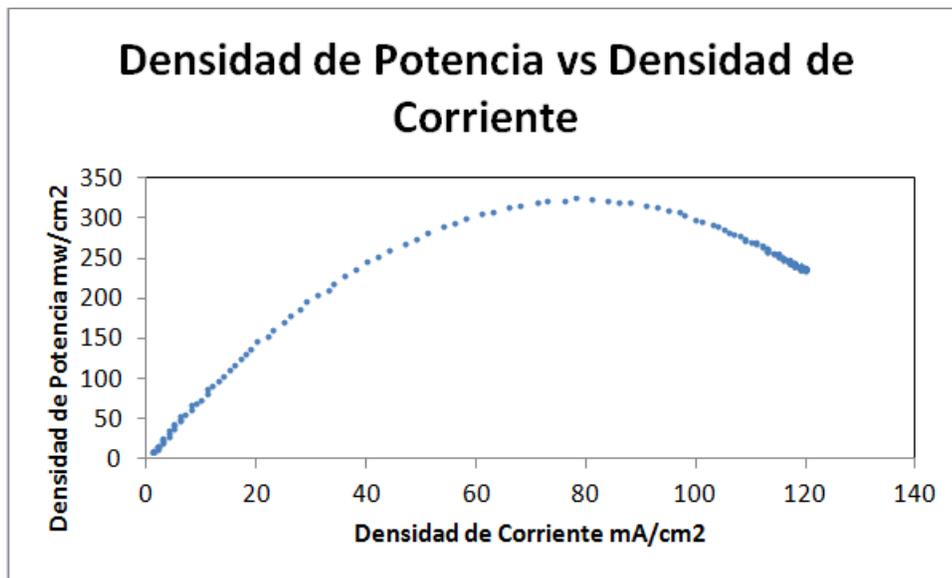


Figura 4.22. Densidad de potencia contra densidad de corriente corrida tres

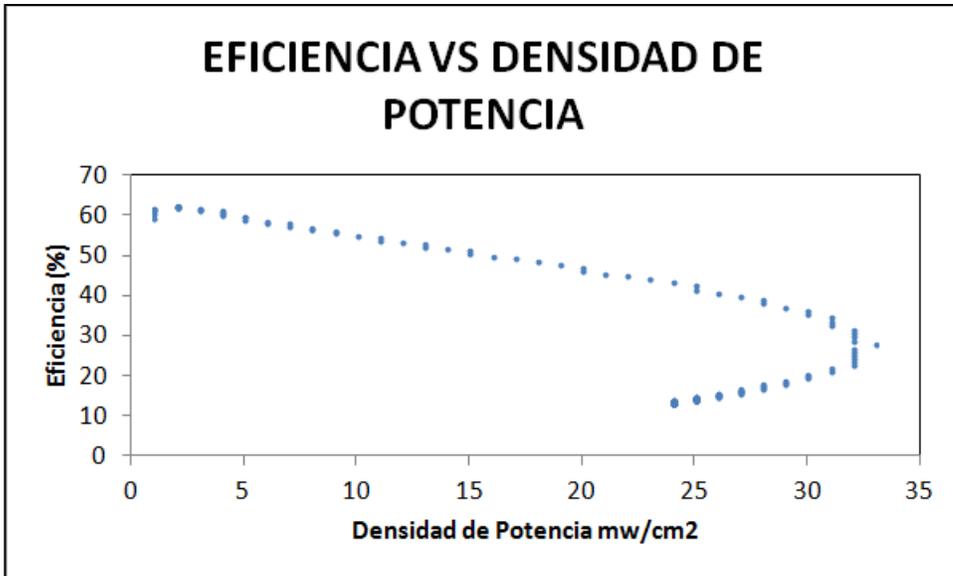


Figura 4.23. Eficiencia contra densidad de potencia corrida tres

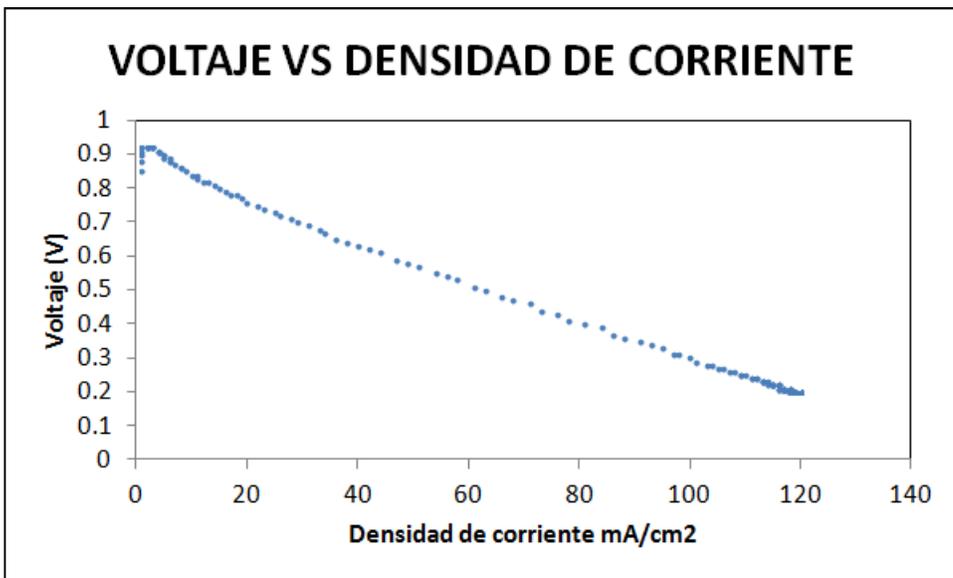


Figura 4.24. Voltaje contra densidad de corriente corrida tres

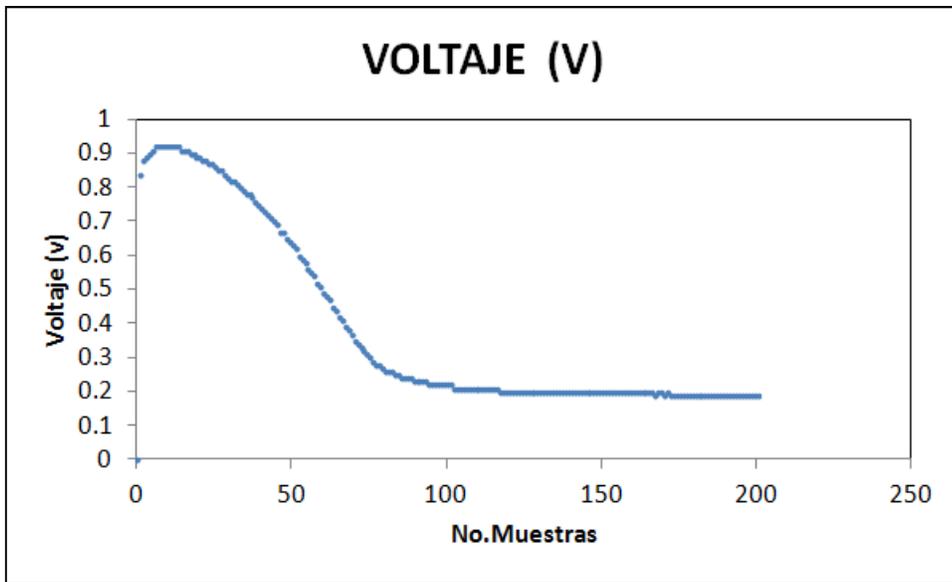


Figura 4.25. Voltaje contra número de muestras corrida cuatro

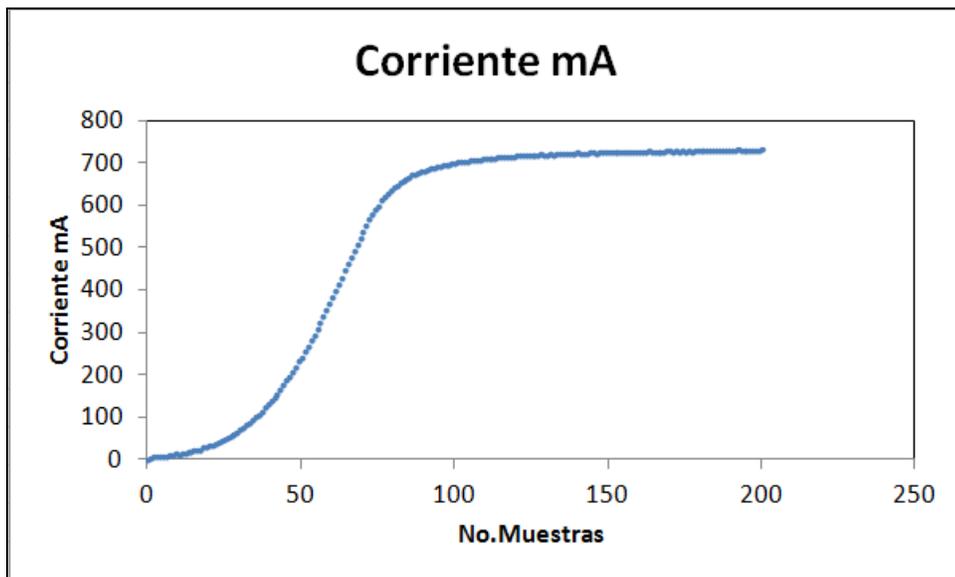


Figura 4.26. Corriente contra número de muestras corrida cuatro

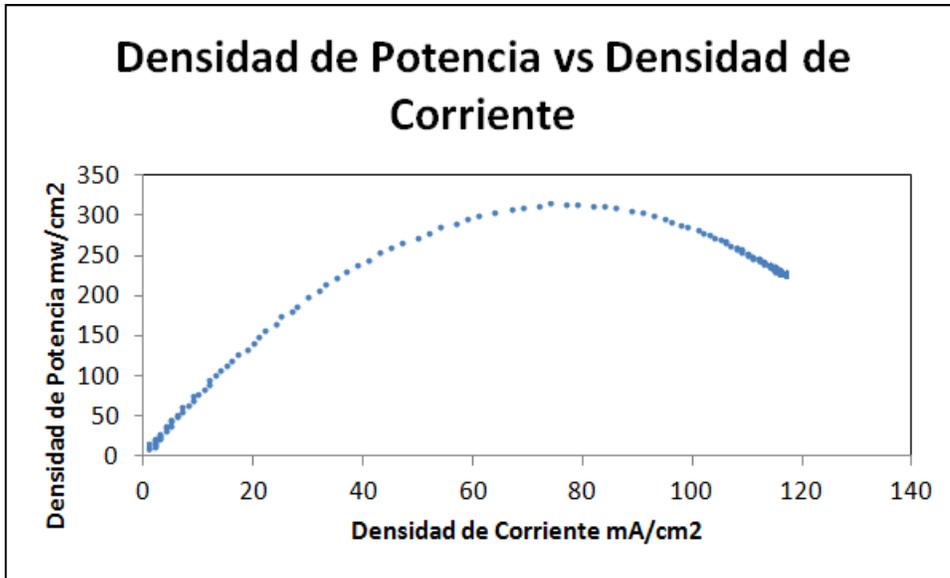


Figura 4.27. Densidad de potencia contra densidad de corriente corrida cuatro

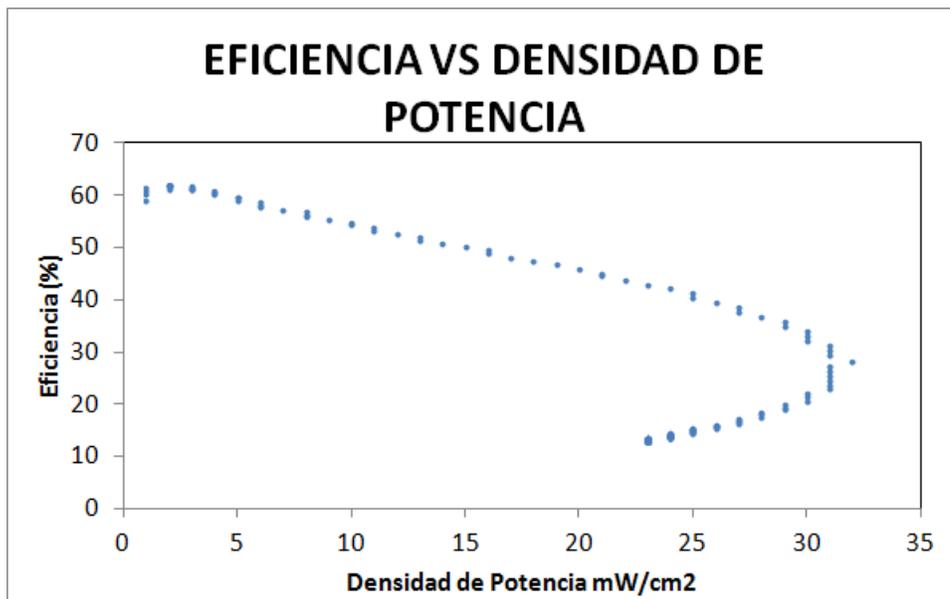


Figura 4.28. Eficiencia contra densidad de potencia corrida cuatro

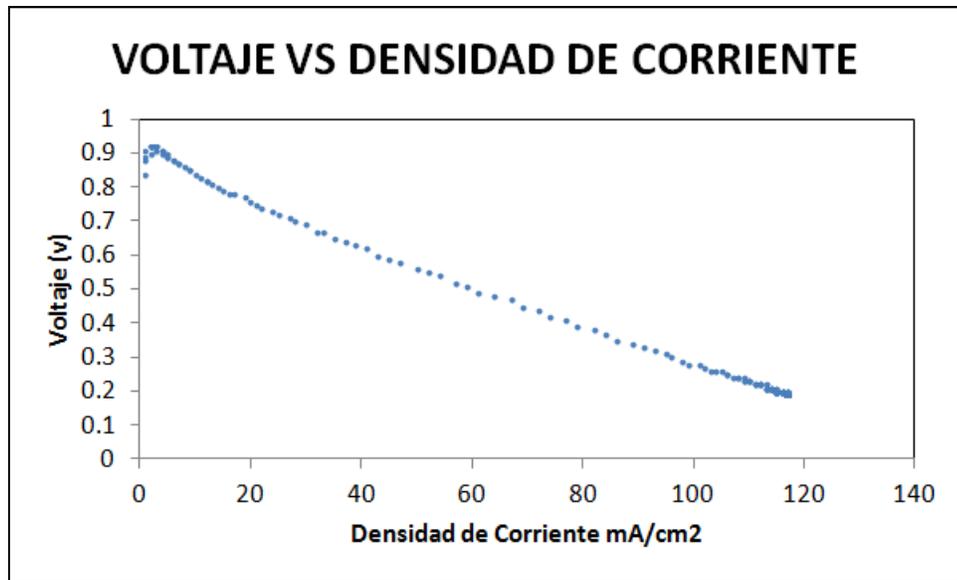


Figura 4.29. Voltaje contra densidad de corriente corrida cuatro

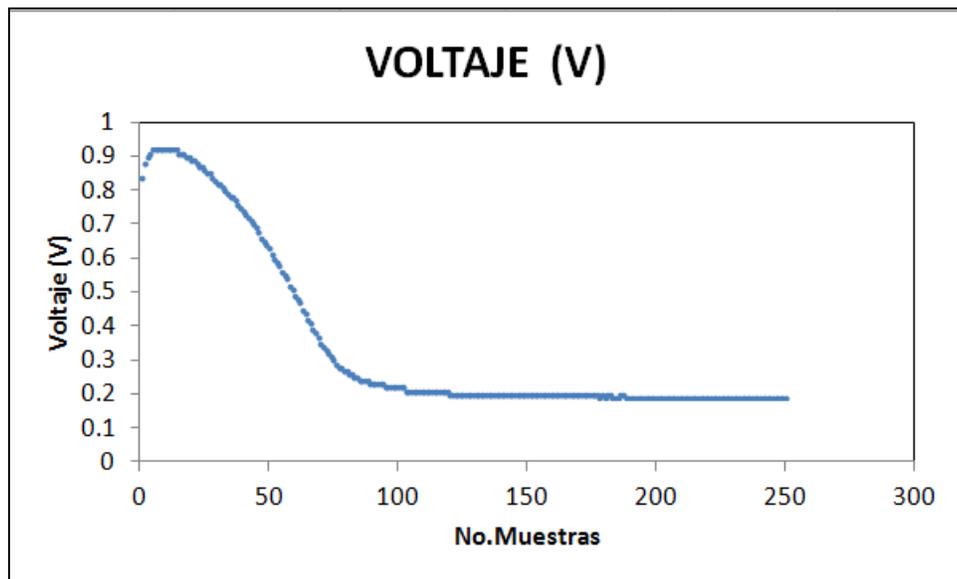


Figura 4.30. Voltaje contra número de muestras corrida cinco

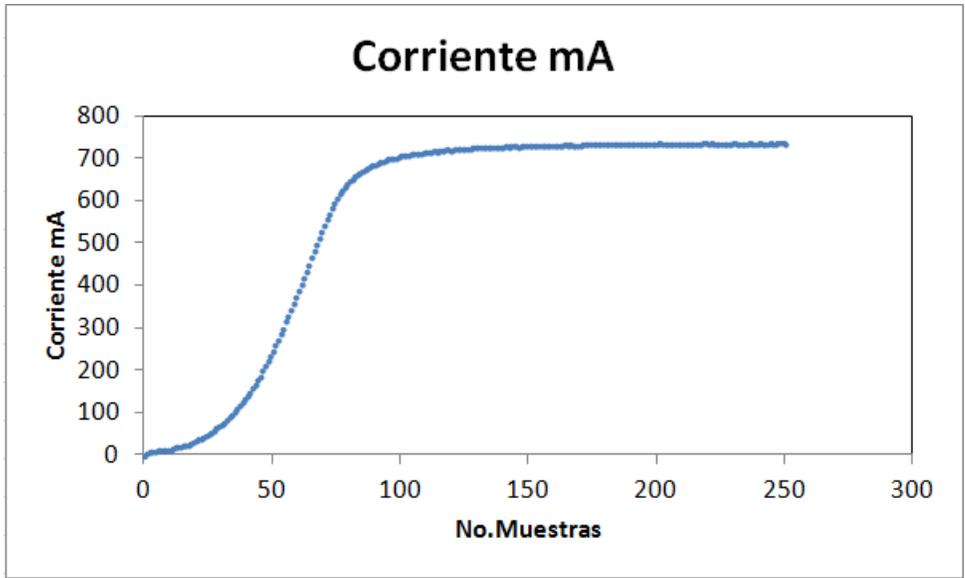


Figura 4.31. Corriente contra número de muestras corrida cinco

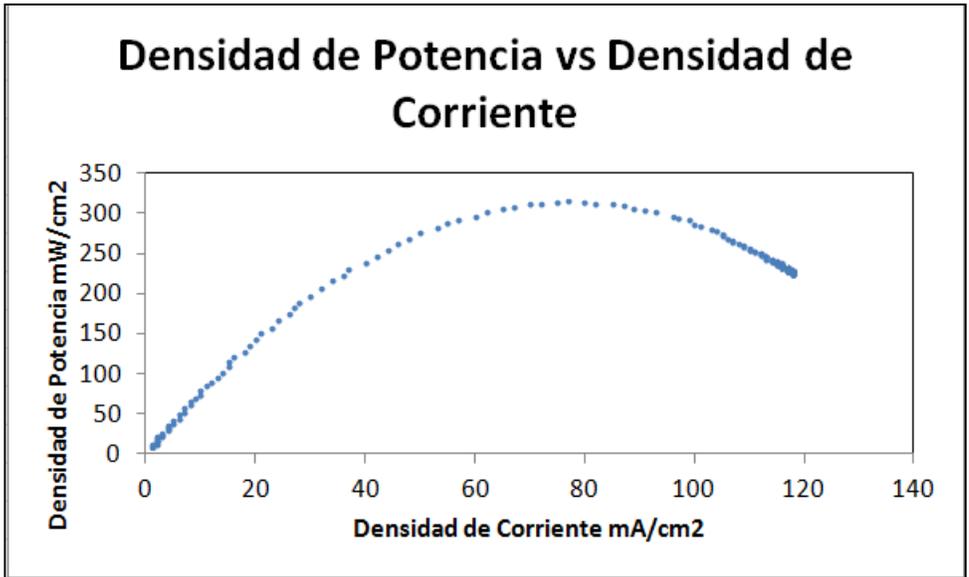


Figura 4.32. Densidad de potencia contra densidad de corriente corrida cinco

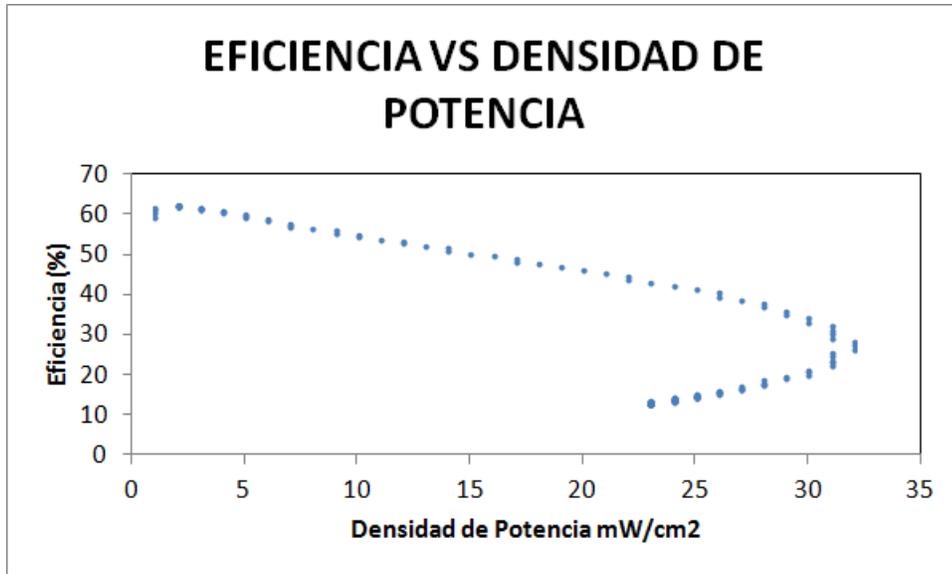


Figura 4.33. Eficiencia contra densidad de potencia corrida cinco

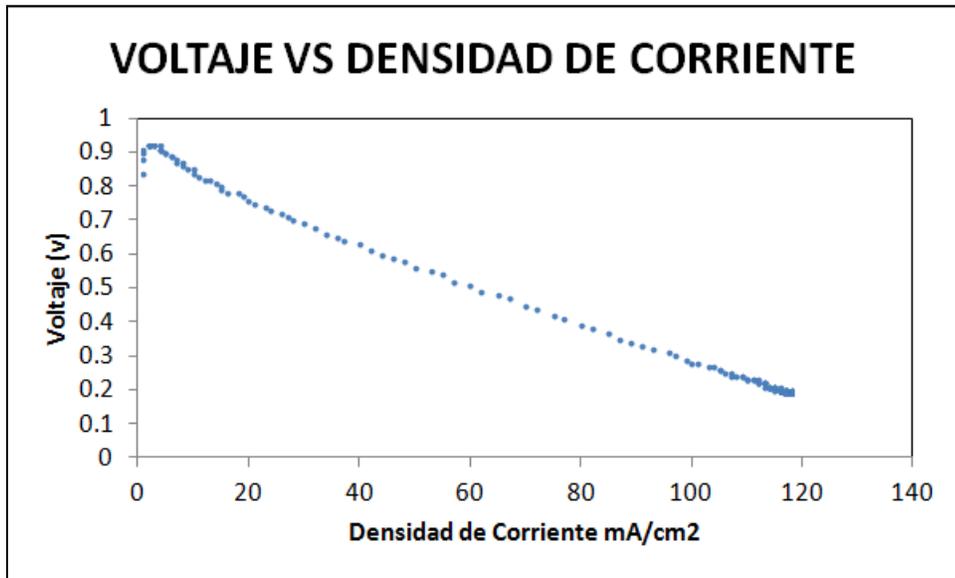


Figura 4.34. Voltaje densidad de corriente corrida cinco

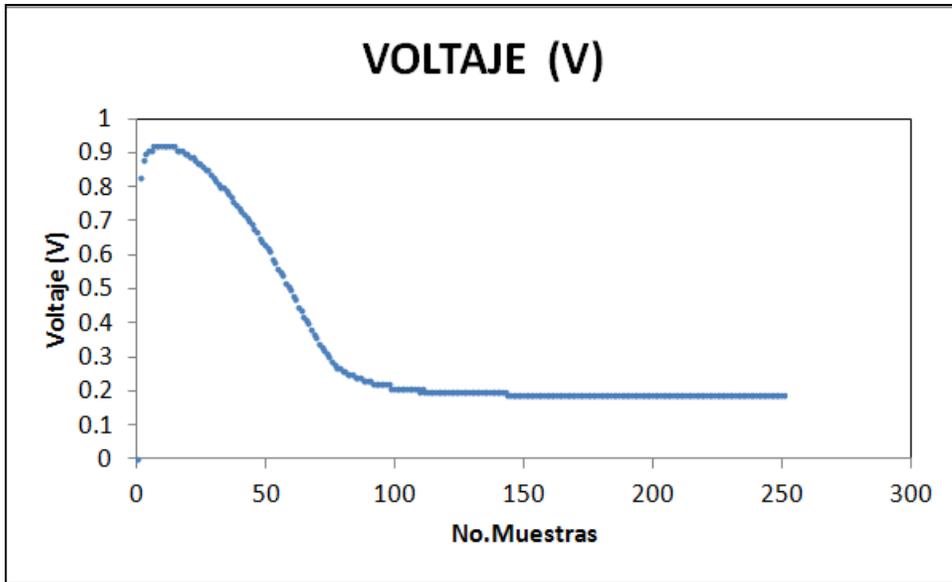


Figura 4.35. Voltaje contra número de muestras corrida seis

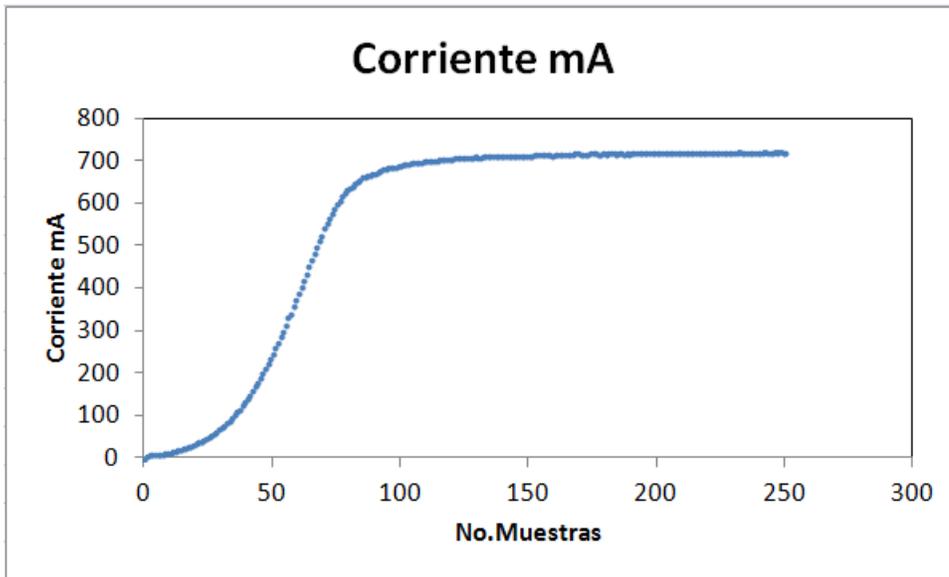


Figura 4.36. Corriente contra número de muestras corrida seis

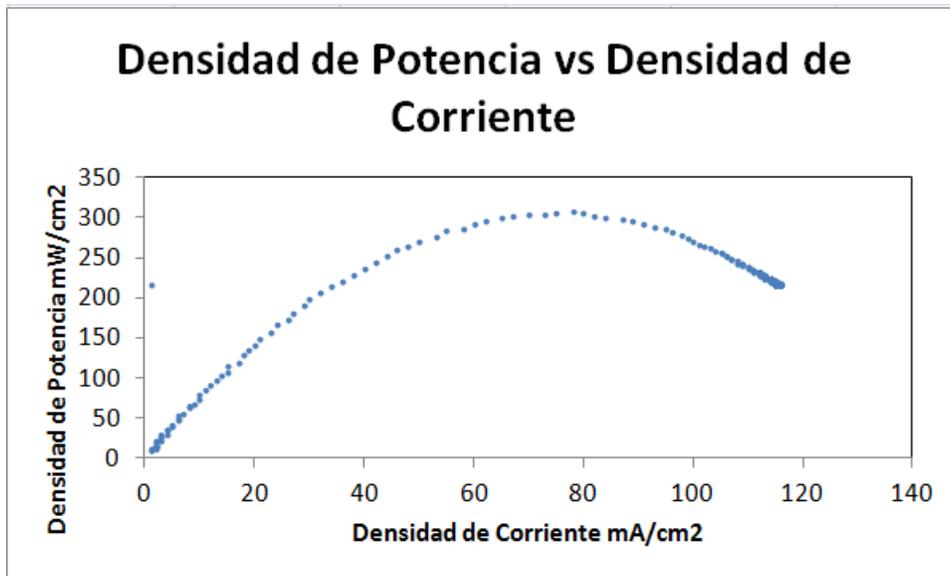


Figura 4.37. Densidad de potencia contra densidad de corriente corrida seis

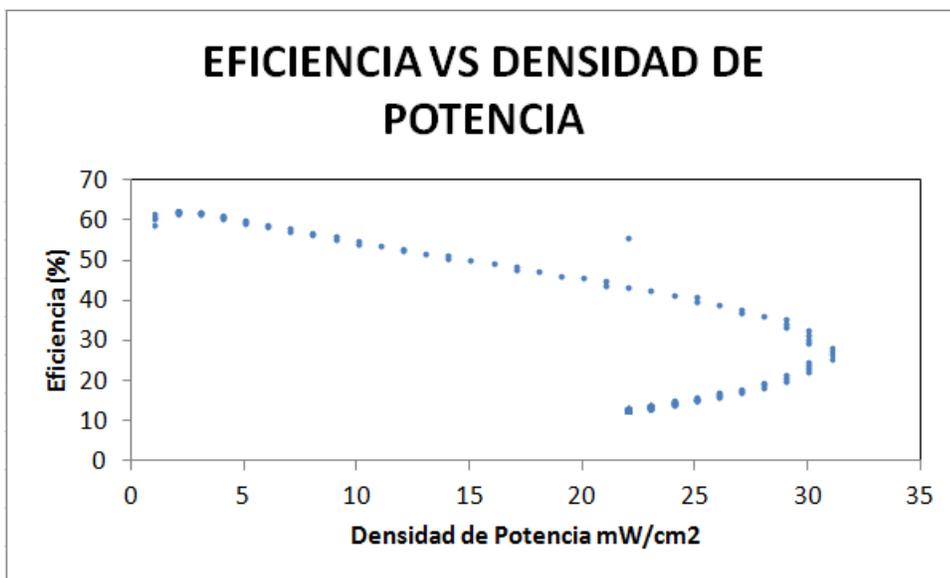


Figura 4.38. Eficiencia contra densidad de potencia corrida seis

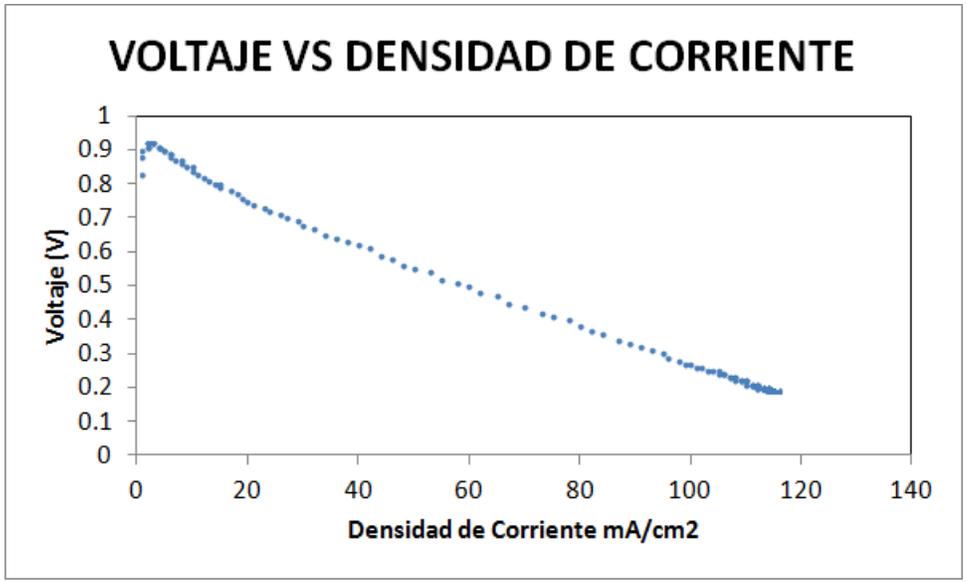


Figura 4.39. Voltaje contra densidad de corriente corrida seis

4.9. Integración de resultados

A continuación se muestran las graficas de las seis corridas con la integración de los resultados para cada rango de flujo de oxígeno e hidrógeno, se observa que prácticamente las curvas de respuesta en los diferentes rangos permanecen constantes.

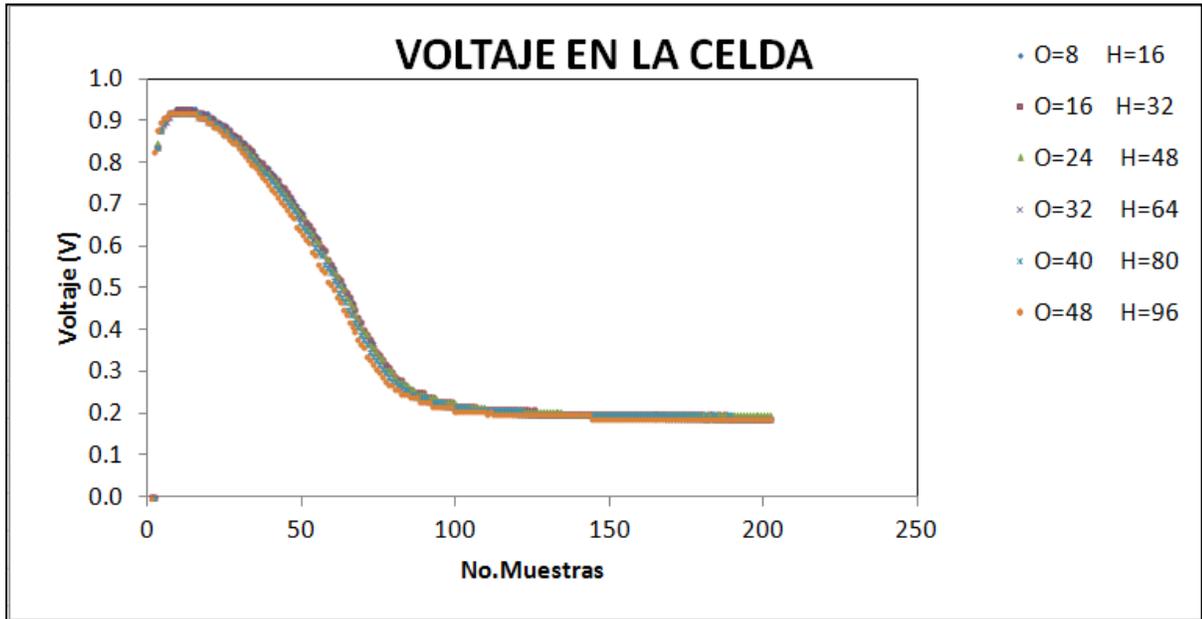


Figura 4.40. Curvas de voltaje en la celda

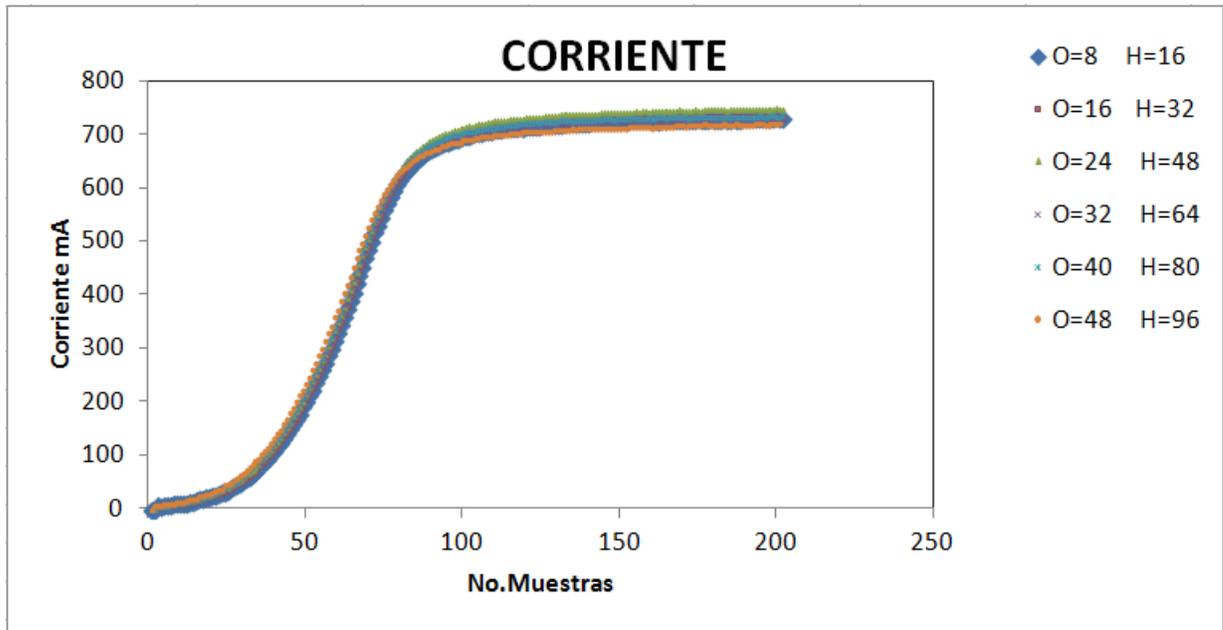


Figura 4.41. Curvas de corriente en la celda

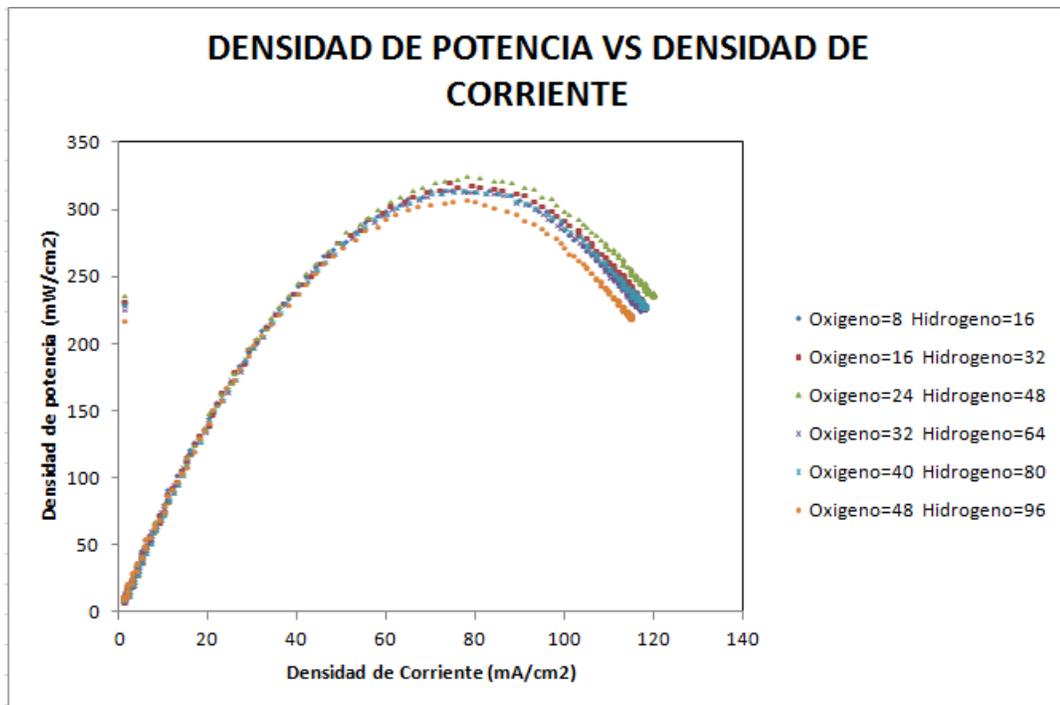


Figura 4.42. Densidad de potencia contra densidad de corriente

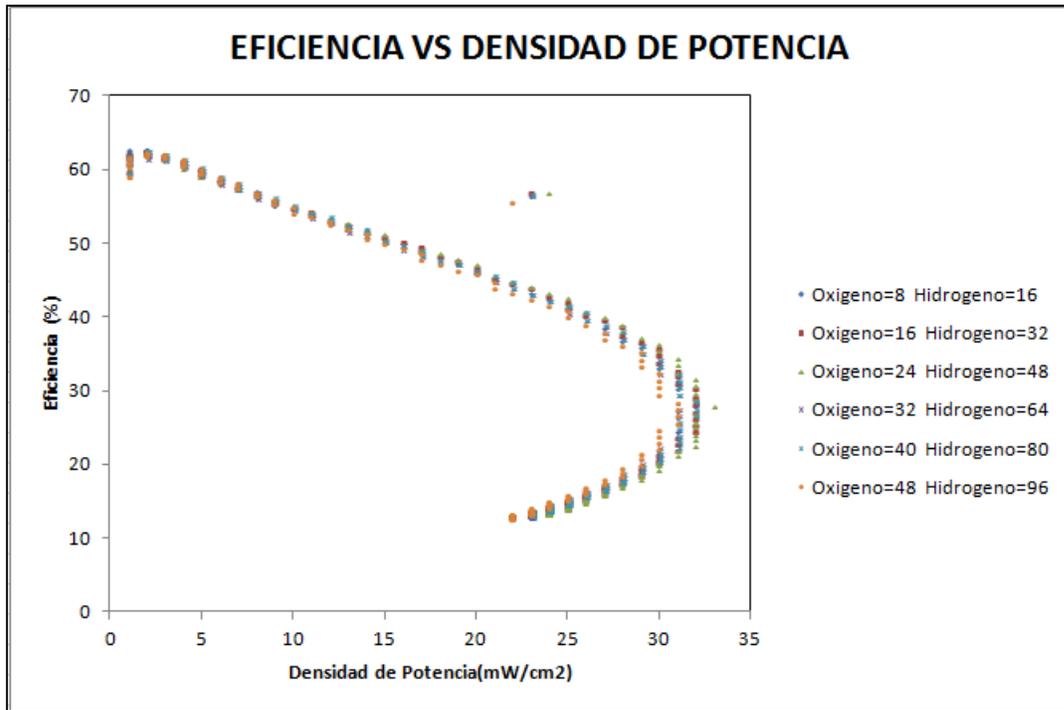


Figura 4.43. Eficiencia contra densidad de potencia

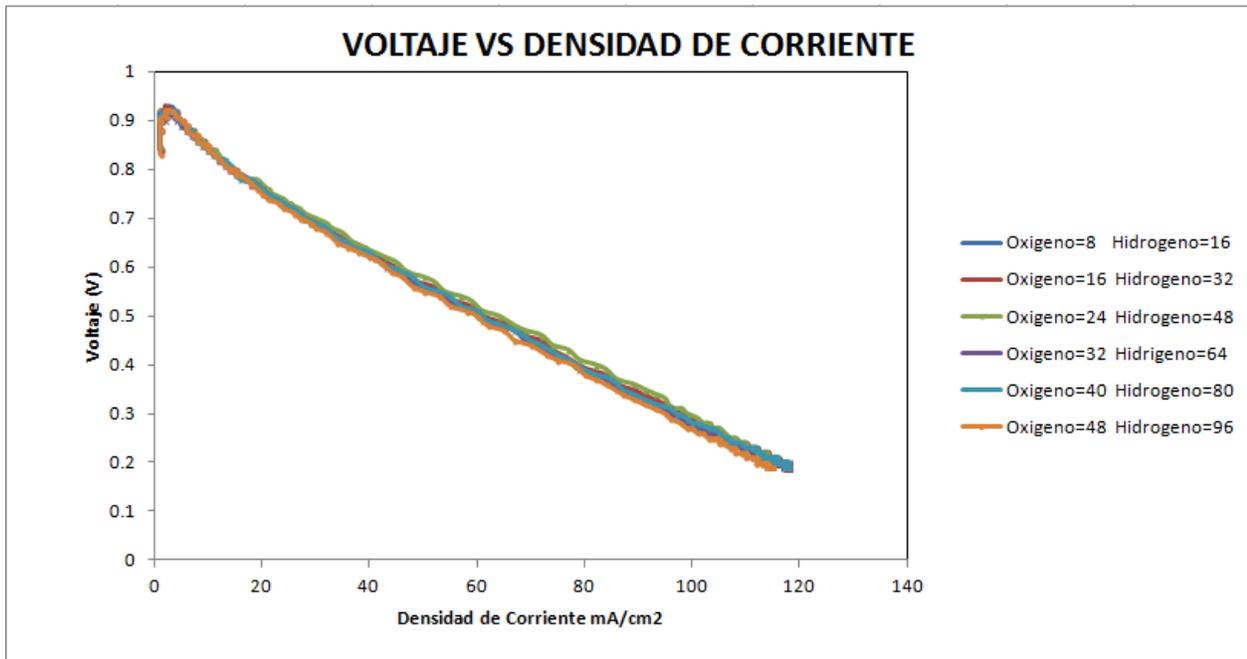


Figura 4.44. Voltaje contra densidad de corriente

4.10. Prueba del desempeño en equipo Electrochem

Se realizó también una prueba del desempeño de la monocelda en el equipo Electrochem del CIDETEQ para evaluar el funcionamiento del banco, dando como resultado las siguientes gráficas:

VOLTAJE VS DENSIDAD DE CORRIENTE

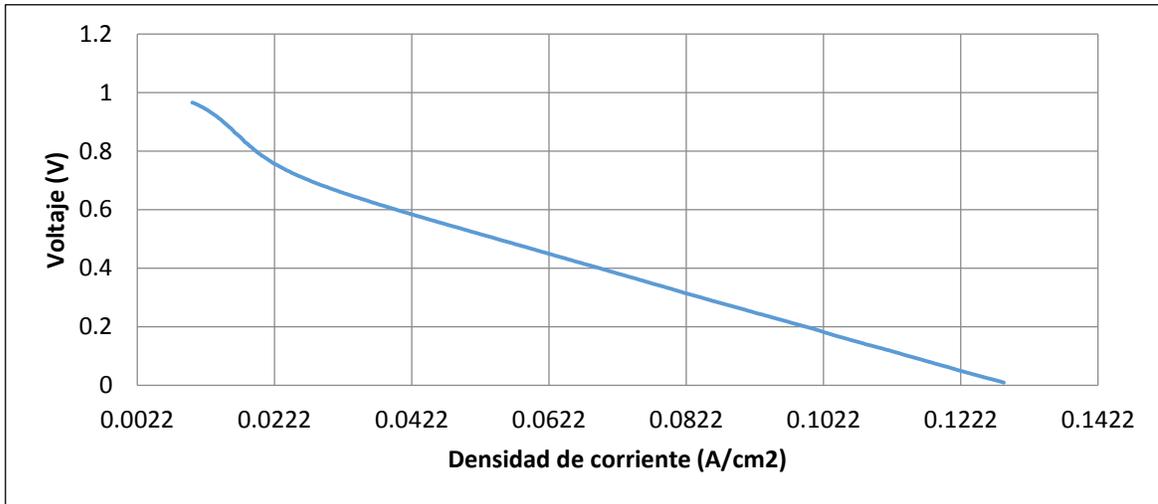


Figura 4.45. Desempeño de monocelda en corrida uno con banco Electrochem.

VOLTAJE VS DENSIDAD DE CORRIENTE

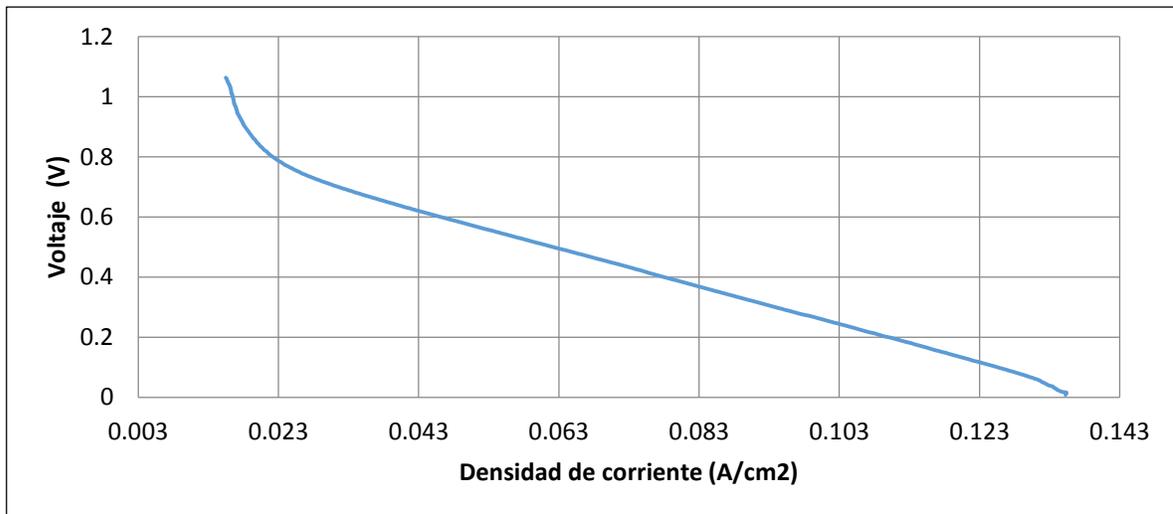


Figura 4.46. Desempeño de monocelda en corrida tres con banco Electrochem

VOLTAJE VS DENSIDAD DE CORRIENTE

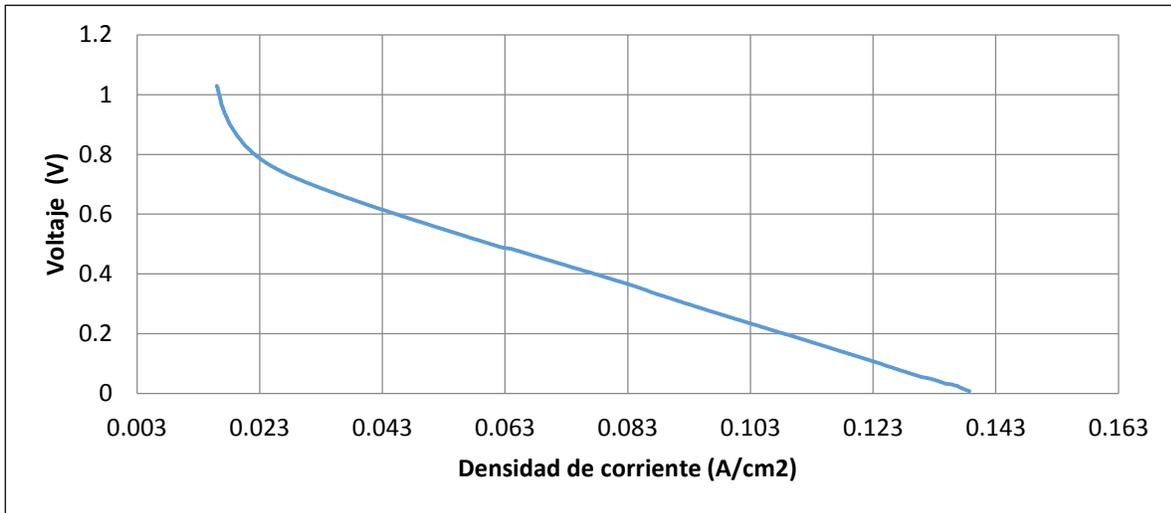


Figura 4.47. Desempeño de monocelda en corrida cuatro con banco Electrochem.

VOLTAJE VS DENSIDAD DE CORRIENTE

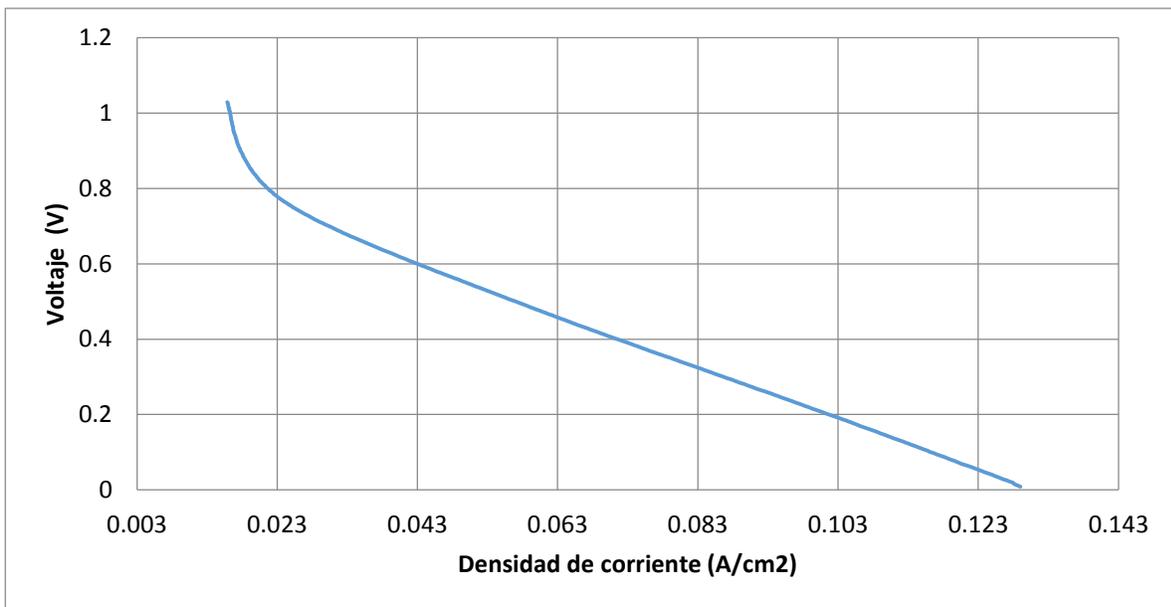


Figura 4.48. Desempeño de monocelda en corrida cinco con banco Electrochem.

VOLTAJE VS DENSIDAD DE CORRIENTE

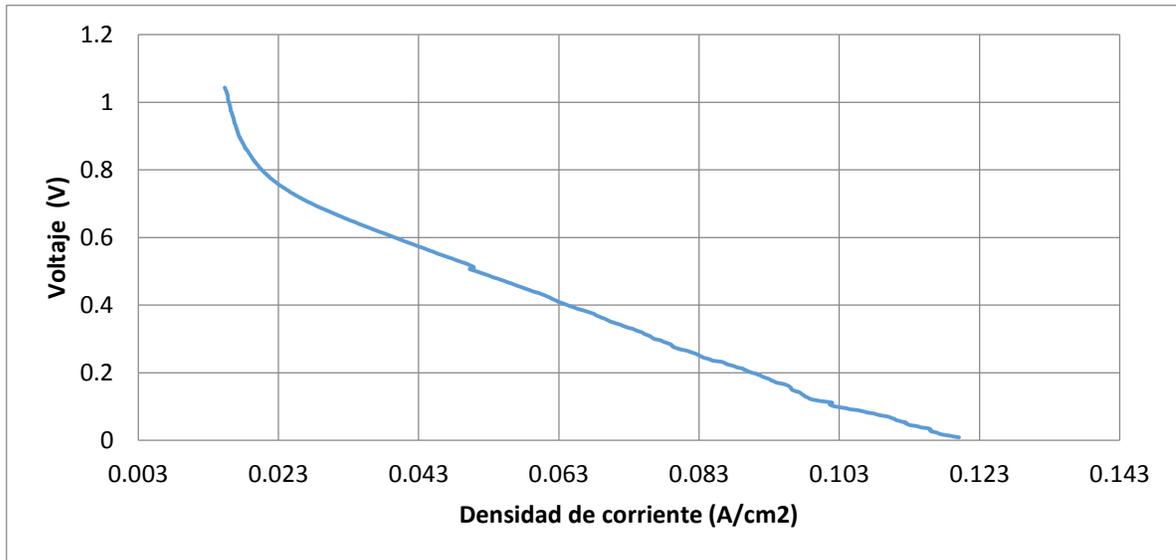


Figura 4.49. Desempeño de la monocelda en corrida seis con banco Electrochem.

CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo realizado permitirá desarrollar prácticas en celdas de combustible en la carrera de Ingeniería de Energías Renovables. La propuesta de construcción permitió también el poder obtener recursos de \$78,000.00 para la realización del proyecto mediante nuevos talentos CONCYTEQ.

Con la realización de esta primera etapa deja abierta las líneas para poder seguir trabajando en el desarrollo que equipos para el control de humedad y temperatura y tener un prototipo que controle mas de una variable para la evaluación del desempeño de celdas de combustible.

La construcción de la tarjeta de variación electrónica de carga fue un logro importante para no depender de un dispositivo electromecánico más complejo y costoso. Así como

también se logró integrar los componentes de control de flujo y acondicionamiento de señal.

La validación de los resultados se realizó comparando la adquisición de datos contra la medición del multímetro digital. En la última sección se realizó una corrida de prueba en el banco de pruebas marca Electrochem propiedad del CIDETEQ observando que las curvas de respuesta en el desempeño de la monocelda corresponden con el resultado obtenido en el prototipo y además los resultados en la celda de combustible prácticamente permanecen constantes en relación a los diferentes rangos de flujos utilizados.

Y por último se logró una interfaz de usuario amigable para la visualización y despliegue de los gráficos utilizando el software Labview, que permitirá adecuaciones y/o modificaciones de acuerdo a las necesidades de las nuevas líneas de trabajo propuestas y que demuestra el potencial y aplicabilidad que puede tener un software de análisis en el diseño de dispositivos de medición y control.

La tensión máxima registrada por el equipo construido fue de 0.95 V y en el equipo comercial en promedio fue 1 V, relacionado por con la densidad de corriente se obtuvo 120 mA/cm² y en el equipo comercial el promedio fue de 125 mA/cm² lo anterior verifica la correcta funcionalidad del equipo diseñado y construido.

BIBLIOGRAFÍA

1. *CONSIDERACIONES DE CARACTERIZACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE CON ELECTRODO DE GRAFITO PLATINO Y MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO PEM.* **M. A. Niño Galeano, C.I. Sánchez, D.A. Landínez Téllez, J. Roa-Rojas.** 1, Colombia : s.n., 2007, Vol. 39.
2. *Tubular reforming and autothermal reforming of natural gas an overview of available processes.* **Dybkjaer.I.** 1995.
3. *Hydrogen production from methane through catalytic partial oxidation reaction .* **freni, S. G.Gaologero and S Cavallaro.** 2000.

4. *LA TECNOLOGÍA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE Y SU INTERFASE ELECTRÓNICA DE POTENCIA PARA APLICACIONES DOMÉSTICAS E INDUSTRIALES.* **Ramírez, Ing. Néstor.** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico : s.n., Julio 2004.
5. *CONTROL DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN BASADO EN CELDAS DE COMBUSTIBLE CON MODELADO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.* **Sánchez, Ana Gabriela Wisther.** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico : s.n., Mayo 2012.
6. *"Fabricación de una Celda de Combustible Tipo PEM por Control Numérico para el Sector Automotriz.* **A- Del Valle Soberanes, Benigno Alejandro, Pathiyamattom Joseph Sebastian, Alonso Nuñez Gabrie, Gamboa Sanchez Sergio, Gutierrez Macedo Miriam, Alday Chavez Ana, Romano Acevedo Carlos, Pitoll Garcia Aniba, Zavaleta Olea Edi Ray.** 8vo. Congreso Nacional de Mecatrónica, Veracruz. : s.n., Noviembre 26 y 27 del 2009.
7. *"CELDAS DE COMBUSTIBLE: Determinación del tipo apropiado para la generación eléctrica utilizando gas natural como combustible".* **Jezi Plata Álvarez, Luis Esteban Siachoque Alarcon.** Universidad Industrial de Santander : s.n., 2011.
8. *"Modelamiento y simulación de la hidrodinámica de micro canales en placas bipolares para PEMFC".* **Gallo, Diana Constanza Orozco.** Universidas Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Química y Petroleos Medellín, Colombia. : s.n., 2012.
9. *PEM Fuel Cells.* **F., Barbir.** s.l. : Elseiver, 2005.
10. *"Hidrógeno. Pilas de combstible tipo PEM".* **Félix Barreras, Antonio Lozano.** Universidad de Zaragoza : LITEC, CSIC.
11. *"Development and Validation of a Computaionnal Model for a Proton Exchange Membrane and State University.* **Siegel, Nathan Phillip.** Dissertation Submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University : s.n., December 18, 2003.
12. **W. R. Grove, Phil. Mag. Ser. 127, 1839.**
13. *Elektrochem, 6. Z., W. Nernst.* 41, 1899.
14. *Fuell Cells.* **A. M. Adams, F. T. Bacon, R.G.T. Watson.** Editado por **W. Mitchell Jr.** 129, Academic Press, New York. : s.n., 1963.
15. *Fuel Cell and the Future .* **Appeby, J. A.** 29, 3, 1990.
16. *Constitución y funcionamiento de las Pilas de Combustible.* **Aktiengesellschaft, E. Weidlich. Siemens.** Marcombro, Barcelona : s.n., 1987.
17. *Platinum Metal Review.* **Ralph., T.** 41, 102, 1997.
18. *Fuel Cell Sistem Explained.* **James Larminie, Andrew Dicks, John Wiley and sons.** 2000.
19. *Electrochimica Acta.* **V. D. Bermudez, M. Armand, C. Poinsignon, L. Abello, J. Y. Sanchez.** 37 (9) 1603, 1992.
20. *Membrane Sci.* **K. D. Kreuer, J.** 185, 29, 2001.

21. *Electrochemical Acta*. **F. N. Buchi, B. Gupta, O. Haas, G. G. Sherer**. 40, 345, 1995.
22. *Electrochem Soc.* . **M. L. Lòpez, V. Compan, J. Garrido, E. Riande, J. L. Acosta, J.** 148 (9) 372, 2001.
23. *Adv mat.* **M. Nogami, H. Matsushita, Y. Goto, T. Kasuga**. 290, 93, 2000.
24. *Electrochem and solid State Letters*. **F. M. Vichi, M. T. Colomer, M. A. Anderson**. 2, 313, 1999.
25. *energy efficiency and renewable, hydrogen, fuel cells and infrastructure technologies program-hidrgen*. **energy, US departament of**. 2009.
26. *Review of small stationary reformers for hidrigen production* . **Ogden, J.M.** princeton university center for energy and environmental stdies : s.n., 2001.
27. **Escobedo E., L.A.** *Modelado dinámico de celdas de combustible*. s.l. : CENIDET, 2006.
28. *Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell stacks, part I*. **Chu D., R. Jiang**. s.l. : Journal of Power Sources, 1999, Vol. 83.
29. *Voltage-time behavior of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell stack at constant current discharge*. **Chu D., R. Jiang**. s.l. : Journal of Power Sources, 2001, Vol. 92.
26. *Ingeniería de control, 2 da edición*, **W. Bolton**, Alfaomega, pag 2-11, ISBN: 970-15-0636-7

ANEXOS

A. CARTA DE INVITACIÓN AL XI CONGRESO IBEROAMERICANO DE ENERGÍA SOLAR



XXXVIII SEMANA NACIONAL
DE ENERGÍA SOLAR
XI CONGRESO IBEROAMERICANO

Invitación al XXXVIII SNES ANES - XI CONGRESO IBEROAMERICANO

Para su consideración:

La AEDES (Asociación Española de Energía Solar) en conjunto con ANES (Asociación Nacional de Energía Solar Mexicana) organizan el XXXVIII SNES ANES - XI CONGRESO IBEROAMERICANO, a celebrarse del 8 al 10 de Octubre del 2014 en Querétaro Qro. México. Los objetivos de este congreso son promover y estimular la investigación, docencia, aplicación tecnológica y divulgación de la energía solar a nivel internacional.

El Comité Científico del Congreso ratifica que el "Prof Rafael Ocampo Martínez" presentó y se ha aceptado su resumen para su presentación en el XXXVIII SNES ANES - XI CONGRESO IBEROAMERICANO:

Abstract: 94

Título: Diseño Y Construcción De Un Sistema De Caracterización De Celdas De Combustible Y De Adquisición De Datos Con Labview

Coautores:

ALDO PÉREZ VILLANUEVA (UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SAN JUAN DEL RÍO)
MARIO RUIZ BOLAÑOS (UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SAN JUAN DEL RÍO)
JOSÉ ALBERTO DUARTE MOLLER (UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SAN JUAN DEL RÍO)
OMAR JIMÉNEZ SANDOVAL (CINVESTAV)
JUAN MANUEL OLIVARES RAMÍREZ (UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SAN JUAN DEL RÍO)

Esperando contar con la participación "Prof Rafael Ocampo Martínez" y "coautores" para enriquecer la difusión, desarrollo y alcances del XXXVIII SNES ANES - XI CONGRESO IBEROAMERICANO, le saluda muy atentamente,

Dr. Alvaro E. Lentz Herrera

XXXVIII SNES ANES - XI CONGRESO IBEROAMERICANO Presidente del Comité Científico

B. MEMORIA DEL XI CONGRESO IBEROAMERICANO DE ENERGÍA SOLAR



XXXVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR XI CONGRESO IBEROAMERICANO



UT SAN JUAN DEL RIO

XXXVIII Semana Nacional ANES - XI Congreso Iberoamericano

REGRESAR

Clasificación de Resúmenes

- » ENSEÑANZA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES
- ▼ FUENTES ALTERNAS DE ENERGÍA
- 33 DISMINUCIÓN DE CONTAMINACIÓN DE AGUA AL RECOLECTAR ACEITE VEGETAL USADO Y EMPLEARLO EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA DENTRO DE INSTALACIONES UNIVERSITARIAS.
- 84 ANÁLISIS DE LA REGIÓN AERODINÁMICA DEL HUB DE UNA TURBINA DE VIENTO DE BAJA CAPACIDAD
- 94 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLE Y DE ADQUISICIÓN DE DATOS CON LABVIEW**
- 96 RECUBRIMIENTO CONDUCTOR ELÉCTRICO EN CELDAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM UTILIZANDO ABS
- 98 SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN PARA CELDAS DE COMBUSTIBLE
- 104 DISEÑO AERODINÁMICO Y ESTRUCTURAL DE UN ALABE DE FIBRA DE VIDRIO PARA UNA TURBINA DE VIENTO DE EJE HORIZONTAL DE 600W
- 105 ESTUDIO PRELIMINAR DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO EN UN SITIO UBICADO EN EL MUNICIPIO DE SINGUILUCAN, HIDALGO
- 110 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIETANOL A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS
- 171 COMPOSTAJE DE RESIDUOS SÓLIDOS

Contenido del Resumen

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLE Y DE ADQUISICIÓN DE DATOS CON LABVIEW

Autor: Prof Rafael Ocampo Martínez

Coautores: Aldo Pérez Villanueva:UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SAN JUAN DEL RÍO Mario Ruiz Bolaños:UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SAN JUAN DEL RÍO José Alberto Duarte Moller:UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SAN JUAN DEL RÍO Omar Jiménez Sandoval:CNVESTAV Juan Manuel Olivares Ramirez:UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SAN JUAN DEL RÍO

Palabras Clave: Infraestructura de laboratorios, energía renovables, Celdas de combustible, PEMFC, variación de resistencia, adquisición de datos, interfaz gráfica, Labview.



Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear

C. CONSTANCIA DE PARTICIPACIÓN XI CONGRESO IBEROAMERICANO DE ENERGÍA SOLAR



OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA



A:

Rafael Ocampo Martínez

POR SU VALIOSA PARTICIPACIÓN CON EL ARTÍCULO:

Diseño Y Construcción De Un Sistema De Caracterización De Celdas De Combustible Y De Adquisición De Datos Con Labview

Presentación Oral



XXXXXXXXXX SEMANA NACIONAL
DE ENERGÍA SOLAR
XI CONGRESO IBEROAMERICANO

CENTRO DE CONGRESOS QUERÉTARO 8, 9 y 10 de octubre 2014

Dr. Alvaro Lentz Herrera
PRESIDENTE XVII CD ANES

