



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE TRANSDUCTORES ENERGÉTICOS COMO INDUCCIÓN AL USO RACIONAL DE LA ENERGÍA

XIOMARA DEL PILAR MURILLO CASTAÑEDA

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Física

Bogotá, Colombia

2017

**CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE TRANSDUCTORES ENERGÉTICOS
COMO INDUCCIÓN AL USO RACIONAL DE LA ENERGÍA**

XIOMARA DEL PILAR MURILLO CASTAÑEDA

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en física

Director:

Pedro Hernán Sánchez Mache, Ph D

Línea de investigación
Energías renovables

Grupo de Investigación:
Grupo de Superconductividad y Nuevos Materiales
Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Física

Bogotá, Colombia

2017

*“continuo esfuerzo, no la fuerza o la inteligencia,
Es la clave para liberar nuestro potencial”*

Winston Churchill.

Nota de aceptación

Firma del Director

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Agradecimientos

Deseo expresar mi profunda gratitud:

Principalmente a Dios el creador de la vida, que en su magnífica misericordia me ha permitido contemplar y estudiar la naturaleza intentando darle una explicación a tan bella creación desde la física.

En segundo lugar quiero manifestar, no solo mi agradecimiento, sino mi profundo aprecio y mi gran admiración, a mi director de tesis Prof. Dr. Pedro Hernán Sánchez, quien no solo me guio con sus sabias palabras en el ámbito académico sino que también me mostro que la persistencia, la paciencia y la motivación, pueden llevar a cada quien a lo que desea.

En todo este proceso, mi profesor ha llegado a ser una persona importante para mí, quien merece todo mi respeto y mi lealtad, hasta el punto de sentirme en deuda por su tiempo, dedicación y compromiso a lo largo de mi carrera en la Universidad Nacional. Además que dejo sembrado en mi la semilla del amor a la física experimental con la diligencia única que lo caracteriza.

A mi familia, mi papa, que con su ejemplo y dedicación me mostro que la clave del éxito está en nunca rendirse a pesar de las dificultades. Mi mama que siempre me mantiene en sus oraciones pidiendo por mi vida y por cada uno de los proyectos que emprendo para que puedan llegar a un feliz término. Mis hermanos que con su amor siempre me motivan a hacer mejor.

Mis compañeros de universidad y de grupo que con la guía del profesor se convirtió en una segunda familia, en el que era el padre y nosotros sus hijos adoptivos.

Cada una de las personas del laboratorio que en algún momento dedicaron su tiempo y su conocimiento desde su quehacer diario. Por último a cada persona que incondicionalmente me ofreció su ayuda durante este periodo académico que hoy culmina con el cierre de este trabajo.

RESUMEN

En el presente trabajo se caracterizaron dos transductores energéticos con la finalidad de conocer sus alcances y limitaciones en el uso racional de la energía. El primer transductor con el que se trabajó fue el motor de Stirling, al que inicialmente se le midió la energía que se le suministra para su funcionamiento, posteriormente se evaluó la energía mecánica que se puede obtener de este, para ello se usó el programa de laboratorio TRACKER, que permitió encontrar las gráficas de velocidad, posición y aceleración de diferentes masas, que fueron conectadas al motor por medio de un mecanismo de poleas.

Una vez que se obtuvo la energía mecánica que es capaz de bridar el motor, se midió la energía eléctrica que este puede ofrecer, para ello fue necesario acoplar un motor eléctrico y elaborar un circuito conocido con el nombre de “ladrón de Julios” que permitió extraer la energía utilizable para encender un LED.

Una vez que se realizó los montajes anteriores se calculó la eficiencia del motor, tanto en energía eléctrica como en energía mecánica. Como última parte en esta sección se realizó un protocolo de laboratorio, para aprovechar de forma óptima los beneficios que puede ofrecer el motor de Stirling en un contexto académico con finalidad en la enseñanza.

El segundo transductor que se caracterizó, fue el PEMPower 1- Eco, la cual consta de una celda solar, un electrolizador y finalmente la llamada celda de combustible. Cada una de estas es capaz de convertir energía solar y energía química, en energía eléctrica. En el laboratorio se inició con la caracterización voltaje- corriente de la celda solar; posteriormente se realizó la caracterización

corriente – voltaje del electrolizador con la finalidad de producir hidrógeno y poder comprobar así la primera ley de Faraday. Por último se realizó la caracterización corriente – voltaje para la celda de combustible, calculando la eficiencia de ésta a partir de la primera ley de Faraday.

Siguiendo la secuencia realizada en el motor de Stirling, se diseñó material didáctico con propósito ilustrativo en el proceso de aprendizaje para que estudiantes de ciencias básicas, a nivel de ingeniería o del departamento de física, puedan encontrar el máximo aprovechamiento de estos equipos en el laboratorio y poder así cuantificar la energía.

Palabras Claves: Transductores energéticos, Motor de Stirling, Celda solar, Celda de combustible, Electrolizador y cuantificación de energía.

Abstract

In this work the energetic transducers were characterized in order to know its scopes and limits in the rational use of energy. The Stirling engine was the first transducer to which was measured the energy it requires to be able to work. After that, it was evaluated the mechanics energy that could be get from it, in this case the laboratory TRACKER software was used which let it find the speed, position and accelerate plots.

Once the mechanic energy was obtained from the engine, it was measured the electric energy that it could offer, therefore it was necessary to couple an electric engine and develop an electrical circuit known as “Ladrón de Julios” which allowed to extract the necessary energy to light a LED.

After assembling, it was calculated the efficiency of the engine, both in electrical energy and in mechanical energy. As a last part in this section, a laboratory protocol was carried out, to make the most of the benefits that the Stirling engine can offer in an academic context with a teaching purpose.

The second transducer that was characterized was the PEMPower 1- Eco, which consists of a solar cell, an electrolyser and finally the so-called fuel cell. Each of these is capable of converting solar energy and chemical energy into electrical energy. In the laboratory, it began with the voltage-current characterization of the solar cell; Subsequently, the current - voltage characterization of the electrolyser was carried out in order to produce hydrogen and thus prove the first law of

Faraday. Finally, the current - voltage characterization was performed for the fuel cell, calculating the efficiency of this one from the first law of Faraday.

Following the sequence carried out in the Stirling engine, didactic material was designed with illustrative purpose in the learning process so that students of basic sciences, at engineering level or in the physics department, can find the maximum use of these equipment in the laboratory and thus be able to quantify the energy

Key words: Energy transducers, Stirling engine, solar cell, fuel cell, electrolyzer and energy quantification.

Contenido

	Pág.
1. Marco Teórico.....	5
1.1 Motor de Stirling.....	5
1.1.1 Funcionamiento del Motor de Stirling.....	6
1.1.2 Tipos de configuración de los Motores de Stirling.....	12
1.1.3 Ciclo termodinámico del motor de Stirling.....	13
El trabajo consumido en este proceso es igual al calor rechazado en el ciclo	14
1.2 PEMPOWER 1-ECO.....	18
1.2.1 Celda Solar.....	18
Punto de máxima potencia (PMP):.....	24
1.2.2 Producción de hidrogeno mediante electrolizador.....	26
1.2.3 Celda de Combustible.....	29
2. Detalles Experimentales	33
2.1 Motor de Stirling.....	33
2.1.1 Medición de la cantidad de calor suministrada al motor de Stirling	33
2.1.2 Medición de la energía mecánica generada por el motor de Stirling	34
2.1.3 Calculo del momento de inercia del motor de Stirling	35
2.1.4 Acoplamiento de un motor eléctrico al motor de Stirling.....	35
2.2 Ladrón de Julios.....	36
2.3 PEMPower 1 –Eco.....	37
2.3.1 Celda Solar.....	37
FF= Factor de llenado	39
2.3.2 Producción de Hidrogeno en el electrolizador.....	39
2.3.3 Uso del hidrogeno en la celda de combustible.....	41
3. Resultados y análisis.....	43
3.1 Motor de Stirling.....	43
3.1.1 Medición de la cantidad de calor suministrada al motor.....	43

3.1.2	Medición de la energía mecánica generada por este motor	45
3.1.3	Medición del momento de inercia del motor de Stirling.....	51
3.1.4	Energía cinética rotacional del motor de Stirling	54
3.1.5	Eficiencia mecánica del motor de Stirling	56
3.1.6	Acoplamiento de un motor eléctrico al motor de Stirling	58
3.1.7	Medición de la energía eléctrica obtenible.....	59
3.2	Celda de Combustible.....	61
3.2.1	Caracterización de la celda Solar <i>I-V</i>	61
3.2.2	Ajuste	62
3.2.3	Producción de hidrógeno en el electrolizador	70
3.2.4	Uso del Hidrógeno en la celda de combustible	73
4.	Prácticas de laboratorio	77
4.1	Práctica de laboratorio Motor de Stirling	77
4.1.1	Medición de la energía mecánica que puede producir el motor de Stirling	77
4.1.2	Medición de la energía eléctrica producida por un motor eléctrico acoplado al motor de Stirling.....	81
4.2	Prácticas de laboratorio del PEMPower 1 –Eco	85
4.2.1	Caracterización de la celda solar	85
4.2.2	Característica del electrolizador a partir de la producción de hidrógeno	87
5.	Conclusiones y recomendaciones	91
5.1	Conclusiones	91
5.2	Recomendaciones	92
5.2.1	Motor de Stirling	92
5.2.2	Dispositivo PEMPower	93

Lista de Figuras

Figura 1-1 Esquema del calentamiento del aire en un cilindro del motor de Stirling	6
Figura 1-2 Enfriamiento del gas en el cilindro	7
Figura 1-3 Conversión de la variación de volumen en movimiento, a través de un mecanismo.....	7
Figura 1-4 Conversión de la disminución de volumen en movimiento, a través de un mecanismo.....	8
Figura 1-5 Esquema general del funcionamiento de un Motor de Stirling	8
Figura 1-6 Componentes del motor de Stirling	8
Figura 1-7 Motor de Stirling, Objeto de estudio.....	9
Figura 1-8 Motor de Stirling, configuración alfa.....	12
Figura 1-9 Motor de Stirling, configuración Beta.....	12
Figura 1-10 Motor de Stirling, configuración Gama.....	13
Figura 1-11 Ciclo ideal se Stirling.	13
Figura 1-12 Compresión Isotérmica (proceso 1-2).....	14
Figura 1-13 Suministro de calor a volumen constante (proceso 2-3)	14
Figura 1-14 Expansión Isotérmica (proceso 3-4)	15
Figura 1-15 Extracción de calor a volumen constante (proceso 4-1).	15
Figura 1-16 Ciclo real del motor de Stirling.....	17
Figura 1-17 Efecto de τ sobre el ciclo ideal Stirling $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$	18
Figura 1-18 Efecto fotovoltaico de una celda solar	19
Figura 1-19 Dopado del Silicio.....	20
Figura 1-20 Panel solar de silicio mono cristalino	20
Figura 1-21 Panel solar de silicio policristalino (prototipo de celda solar del dispositivo PEMPower 1- Eco).....	21
Figura 1-22 Desplazamiento de electrones mediante la captación de fotones.....	21
Figura 1-23 Esquema de funcionamiento de un panel solar	23
Figura 1-24 Curva I vs V, y P vs V para un modulo fotovoltaico típico a 1000 W/m ² y 25°C	24
Figura 1-25 Factor de Forma (FF)	25
Figura 1-26 Celda solar conectada directamente al ventilador	26
Figura 1-27 Principios básicos de electrolizador PEM	28
Figura 1-28 Principios básicos de la celda de combustible PEM	30
Figura 1-29 Dispositivo PEMPower 1-Eco	31
Figura 1-30 Esquema de funcionamiento del PEMPower 1-Eco.....	31
Figura 2-1 Diseño experimental para la medición de calor proporcionada al motor de Stirling	34
Figura 2-2 Diseño experimental para la medición de la energía transferida por el motor de Stirling a un cuerpo	35
Figura 2-3 Vista lateral adaptación motor eléctrico y polea.....	36

Figura 2-4 Vista frontal del diseño experimental para la medición de energía eléctrica obtenible a partir del motor de Stirling.....	36
Figura 2-5 Circuito “ladrón de Julios”	37
Figura 2-6 Iluminación de la celda solar con la luz de una lámpara por aproximadamente 5 minutos	38
Figura 2-7 Montaje experimental de la característica corriente voltaje de la celda solar.	38
Figura 2-8 Montaje experimental de la característica corriente voltaje del electrolizador	40
Figura 2-9 Montaje experimental de la característica corriente voltaje de la celda de combustible	41
Figura 3-1 Montaje experimental usando el sistema COBRA para calcular el calor suministrado por el mechero al motor de Stirling.....	43
Figura 3-2 Montaje experimental para calcular el trabajo dado por el motor de Stirling.	46
Figura 3-3 Cigüeñal y la polea del motor de Stirling	51
Figura 3-4 Esquema del cigüeñal y la polea del motor de Stirling	52
Figura 3-5 Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre el volante del motor de Stirling.....	52
Figura 3-6 Montaje experimental de la adaptación del motor eléctrico al motor de Stirling a partir del circuito denominado “ladrón de Julios”	58
Figura 3-7 Voltaje Producido por el circuito “Ladrón de Julios”	59
Figura 3-8 Voltaje obtenido por el motor eléctrico acoplado al motor de Stirling a partir de un ladrón de Julios, para encender un LED	60
Figura 3-9 Montaje Experimental por el motor eléctrico acoplado al motor de Stirling a partir de un Ladrón de Julios, encendiendo un LED	60
Figura 3-10 Montaje experimental usado en la caracterización de la celda solar	61
Figura 3-11 Medición de la corriente de la celda expuesta a la luz sol	67
Figura 4-1 Montaje Experimental Medición de la energía mecánica del motor de Stirling	79
Figura 4-2 Esquema del circuito ladrón de Julios	83
Figura 4-3 Esquema del montaje Motor eléctrico y Motor de Stirling.....	83
Figura 4-4 Circuito para la caracterización de la celda solar	86
Figura 4.5 Montaje experimental para la caracterización del electrolizador	88

Lista de gráficas

Gráfica 3-1 Variación de la temperatura del agua en función del tiempo	44
Gráfica 3-2 Ascenso de la masa de 6.1g en función del tiempo. El ajuste en este caso es de tipo parabólico.....	47
Gráfica 3-3 Comportamiento de la posición de la masa de 11.0g en función del tiempo. El ajuste en este caso es de tipo parabólico.....	47
Gráfica 3-4 Posición de la masa de 16g vs tiempo. El ajuste en este caso es de tipo parabólico.....	48
Gráfica 3-5 Posición de la masa de 20.8g en función del tiempo. El ajuste en este caso es de tipo parabólico.....	49
Gráfica 3-6 Posición para cada una de las masas utilizadas en función del tiempo.....	50
Gráfica 3-7 Inverso del tiempo cuadrado en función de la masa	54
Gráfica 3-8 Caracterización de la celda solar Corriente – Voltaje	62
Gráfica 3-9 Ajuste lineal de la gráfica 3-12	63
Gráfica 3-10 Ajuste de los datos representados en la gráfica 3-8.....	64
Gráfica 3-11 Variación de la potencia según el voltaje	65
Gráfica 3-14 Método gráfico para calcular el factor de llenado	68
Gráfica 3-15 Caracterización corriente voltaje del electrolizador	70
Gráfica 3-16 Rata de cambio del volumen en la generación de hidrógeno experimental	72
Gráfica 3-17 Característica I – V de la celda de combustible	74
Gráfica 3-18 Característica P – I de la celda de combustible	74

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1 Valores de calor específico y la masa del recipiente y su contenido	45
Tabla 3-2 Balance del gasto energético del motor energético en vacío y acoplado a la masa de 16g	56
Tabla 3-3 Datos arbitrarios para calcular la constante C	63
Tabla 3-4 Producción de hidrógeno en el tiempo a una corriente fija de 1A y 1,8V	71
Tabla 3-5.....	75

Introducción

En la actualidad han surgido ciertas problemáticas que están atrapando la atención del mundo científico. Uno de estos es la llamada “Crisis energética” en las que se están implementadas campañas pedagógicas con la intención de concientizar a la población del buen uso de los recursos naturales y el aprovechamiento de una energía limpia. Sin embargo con el aumento de la población, el consumismo y otros factores sociales ha conllevado a la comunidad científica a hacer un alto en el camino y replantear las necesidades principales de la humanidad. Por tal motivo es de gran importancia retroceder en la historia, evaluar los errores cometidos y propiciar situaciones que permitan mejorar la calidad de vida con ayuda de la tecnología sin dejar de lado la formación de un pensamiento crítico y consecuente del aprovechamiento de los recursos en las nuevas generaciones. De otro lado, a pesar de los esfuerzos las políticas de enseñanza, para la mayoría de estudiantes las diversas transformaciones de energía siguen siendo alquimistas, en ocasiones por la ausencia de “observar” dichas transformaciones

Partiendo de este hecho se pretende presentar aplicaciones prácticas que permitan establecer un ciclo energético a partir de transductores energéticos que se encuentran en el laboratorio de física de la universidad Nacional de Colombia, facilitando el diseño de un material apropiado que especifique las características, utilidad y limitación de estos implementos. De allí nace la necesidad de mostrar a la comunidad académica y a cualquier persona en particular, las diferentes formas de convertir energía para usos habituales a partir de lo que se tiene en el laboratorio del departamento de física

Enfocando la atención en el campo energético; la ingeniería en su continuo desarrollo busca el diseño de dispositivos que permitan convertir el calor en

trabajo. Tarea difícil, desde el punto de vista de la conversión de calor en trabajo; ya que esta viene limitada por la segunda ley de la termodinámica la cual afirma *“No es posible un proceso cuyo único resultado sea la absorción de calor procedente de un foco y la conversión íntegra de este calor en trabajo, sin producir ningún otro efecto”* (enunciado de Kelvin- Planck). En otras palabras, ninguna máquina de calor cíclica puede convertir su aporte de calor totalmente en trabajo.

Por consiguiente, una máquina térmica es un dispositivo mediante el cual se realiza un ciclo en el que absorbe calor de un foco de alta temperatura, cede una cantidad de calor a un foco de temperatura inferior, y realiza un trabajo sobre el exterior.

En 1846 Rev. Robert Stirling, ministro escocés diseñó un motor de aire caliente, que podía convertir en trabajo parte de la energía liberada al quemar algún combustible. Tenía la ventaja de trabajar a presiones inferiores y ofrecer, por tanto, menor riesgo de explosión que la máquina de vapor. Posteriormente las dos primeras décadas del siglo XX aun se diseñaban artefactos domésticos con el motor de Stirling sin embargo este fue abandonado al desarrollarse el motor de combustión interna.

Desde aproximadamente la década de los ochenta, en todas partes del mundo, al parecer, ha estado aumentando el interés por el motor de Stirling, un ejemplo de este es la gran inversión que han hecho países, tales como; Estados Unidos, Suiza y Holanda en investigaciones, de Stirling para automóviles, bomba de calor en calefacción, aire acondicionado, entre otros. En Latinoamérica la atención está concentrada, en el diseño de bombas de agua de riego de combustible diferente a la gasolina, Tal motivación en el estudio del motor de Stirling es debida a las muchas ventajas que este puede ofrecer. Por ejemplo, constituye un sistema de trabajo cerrado, siendo el mayor beneficio, que puede funcionar con diferentes combustibles, lo que permite indagar también en los aspectos ambientales de nuestra sociedad.

En este trabajo se realizó la caracterización de uno de los motores del Stirling del laboratorio de física de la Universidad Nacional, diseñando un material guía útil para el apoyo de la enseñanza de la termodinámica en el laboratorio.

Por otra parte, todos los suministros de energía tienen desventajas comunes, tales como; limitación de los recursos, poca disponibilidad, impactos ambientales, baja eficiencia y riesgos en la salud. Es por eso que actualmente los esfuerzos en investigación de fuentes energías están encaminados, en encontrar una fuente de tal manera que sea capaz de satisfacer nuestra demanda energética pero al mismo tiempo no presente los problemas listados anteriormente.

Sin embargo una posible solución para nuestro problema energético ya había sido pensada y a su vez escrita por Julio Verne en su novela "La Isla Misteriosa". En donde uno de los personajes de la historia el ingeniero Cyrus Harding, declara, "yo creo que un día el agua llegará a ser combustible". En efecto el autor no se encontraba aislado de nuestra realidad actual ya que a partir del agua es posible producir combustible.

Sin embargo la producción de combustible a partir del agua no es algo novedoso; ya que la misma naturaleza lo ha desarrollado de manera eficiente, nosotros únicamente hemos intentado construir un modelo artificial. Las plantas producen sus nutrientes usando agua y luz, (*proceso conocido por el nombre de fotosíntesis*). La energía de la luz solar es usada para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno es transformado en glucosa y así almacenado como nutrientes o alimentos.

Este proceso biológico de las plantas puede ser descrito en tres paso::

1. División del agua a partir de la captación de energía solar
2. Almacenamiento de hidrógeno
3. Transformación de energía química en otra forma de energía. En este caso transformación del hidrógeno a partir de reacciones químicas en glucosa.

En 1820 Michael Faraday (1791 -1867) formuló el principio de la electrólisis, la cual consiste en la separación de un compuesto por medio de la electricidad. En este caso el agua es separado en hidrógeno y oxígeno a partir de este principio.

Posteriormente el científico francés Alexandre Becquerel, (1820-1891) descubre que ciertos materiales pueden producir una corriente cuando incide luz sobre ellos. Bajo este principio se encuentran diseñadas las celdas solares.

Bajo los dos principios expuestos anteriormente y siguiendo el modelo brindado por la naturaleza, se encuentra diseñada la PEMPower1-Eco. De allí la importancia de entender su funcionamiento, para poder así darlo a conocer a estudiantes de educación superior ya que las próximas generaciones son las principales afectadas por los impactos ambientales actuales ocasionados por fuentes de energía contaminantes.

En consecuencia al igual que el motor de Stirling se presenta una caracterización de la PEMpower1-Eco que se encuentra en el laboratorio, para que docentes y estudiantes encuentren un manual que le permita medir las limitaciones y alcances que tiene este dispositivo.

1. Marco Teórico

Este capítulo estará dividido en dos secciones; la primera, describirá el diseño y funcionamiento del motor de Stirling en general, sus componentes y el estudio termodinámico del ciclo de Stirling. En la segunda parte se hablará al respecto de la celda de combustible, conocida como *PEM^{Power1-Eco}* en la que se hará una descripción detallada de cada uno de sus elementos, tales como; celda solar, electrolizador, tanque de almacenamiento del gas y por último celda de combustible. Además de los principios físicos que componen cada una de sus partes, como lo es electrólisis y fotoconductividad.

1.1 Motor de Stirling

En general, estamos familiarizados con motores a gasolina, Diessel y quizás hasta de propulsión; al igual que todos estos, el motor de Stirling es un motor en el cual su fuente de energía es un foco calor.

Sin embargo, el motor de Stirling es diferente a los demás ya que el foco de calor es ocasionado por una combustión externa. Esto significa que la combustión es amigable con el medio ambiente. Ya que un motor de combustión interna, es aquel, en el que su combustible es quemado dentro de sus pistones creando varios gases dañinos para el medio; este es el caso del motor a gasolina, diessel o gas.

Además el motor de Stirling posee la ventaja, de ser utilizado con cualquier tipo de combustible, como por ejemplo; energía solar, madera, aserrín, carbón, desechos o cualquier sustancia de combustión. Además, que la energía suministrada puede ser aprovechada al máximo, ya que no necesita invertir esta en refrigerar los émbolos a presiones elevadas.

Otra de sus ventajas es que son motores amigables con el ambiente ya que dependiendo del tipo de combustible que se utilice para proporcionar el foco de calor inicial, no produce monóxido de carbono o hidrocarburos, y el nivel de óxidos de nitrógeno es relativamente bajo. De lo que se puede llegar a concluir que es uno de los motores más limpios que en la actualidad existe y esto explica el interés actual en el motor por los fabricantes de automóviles

1.1.1 Funcionamiento del Motor de Stirling

El principio de funcionamiento es simple, ya que la presión de aire o cualquier otro gas, aumenta al incrementar la temperatura y disminuye en el efecto contrario.

A continuación se hace una explicación del funcionamiento del motor de Stirling explicando cada una de sus partes

1. Al encerrar un gas en un cilindro, y posteriormente calentarlo, se observa que la presión dentro del cilindro se incrementa; asumiendo que cada una de las tapas del cilindro es un émbolo y que este es hermético, entonces el gas se expande, por consiguiente aumenta el volumen del gas en el interior, hasta cierta posición final del embolo

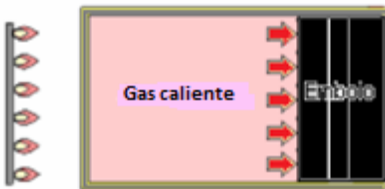


Figura 1-1 Esquema del calentamiento del aire en un cilindro del motor de Stirling

2. Del mismo modo, si el cilindro, en su estado de expansión, disminuye su temperatura rápidamente, lo mismo ocurrirá con la presión del gas, entonces el volumen se contrae y la posición del émbolo regresara a su estado inicial.

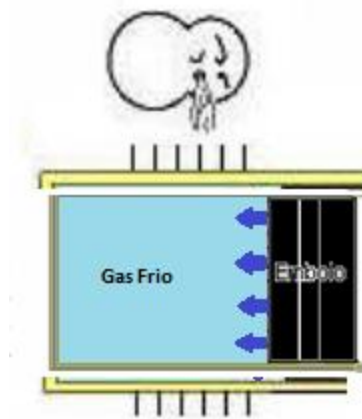


Figura 1-2 Enfriamiento del gas en el cilindro

3. Si el proceso del estado 1 se repite, pero ahora uniendo un émbolo a un volante. El incremento de la presión forzará al émbolo a moverse ocasionando un giro en el volante, con lo que se consigue que una variación en el volumen se transforme en movimiento.

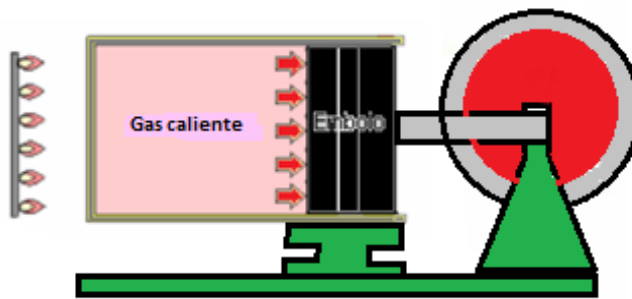


Figura 1-3 Conversión de la variación de volumen en movimiento, a través de un mecanismo

4. Se repite nuevamente el paso 2, disminuye la temperatura rápidamente el pistón, retorna el movimiento del volante y se produce la disminución de la presión y el volumen.

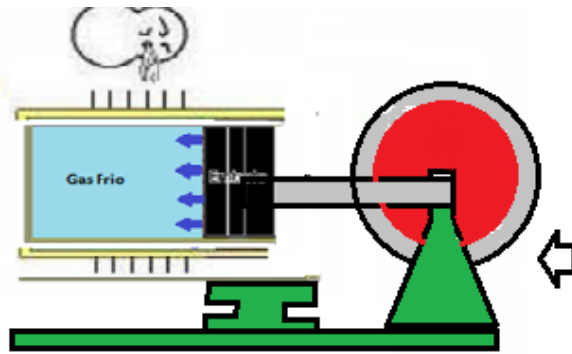


Figura 1-4 Conversión de la disminución de volumen en movimiento, a través de un mecanismo

5. Ahora los procesos 3 y 4 son combinados en un mismo, cilindro, con un desplazador, que producirá el movimiento del motor debido a la expansión del gas, y, durante la compresión el pistón retornará a su posición debido a la energía de la volante (Zamora, 2006, págs. 26-27)

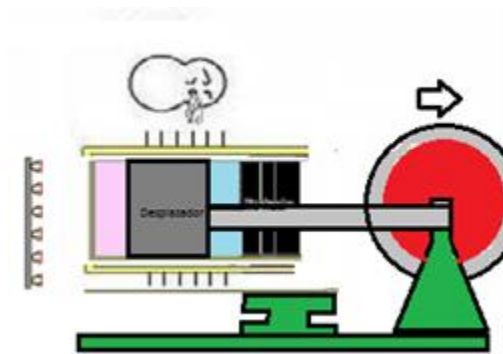


Figura 1-5 Esquema general del funcionamiento de un motor de Stirling

1.1.1. Descripción de los componentes de un motor de Stirling

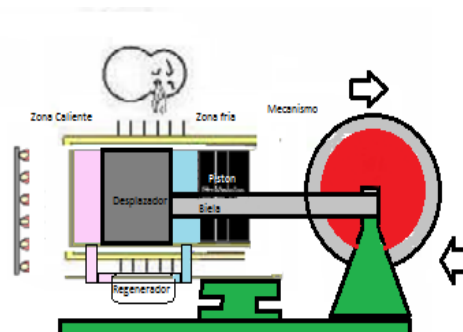


Figura 1-6 Componentes del motor de Stirling

- **Zona caliente**

Es la parte del motor en la que se transfiere calor y por consiguiente estará sometida a altas temperaturas (cerca de 800°C). Uno de materiales más usados en la fabricación de este componente es acero inoxidable.

El motor de Stirling, objeto de estudio de este trabajo, es de los más sencillos ya que no tiene ningún tipo de presurización dentro cilindro, es decir que este es de tapa plana.

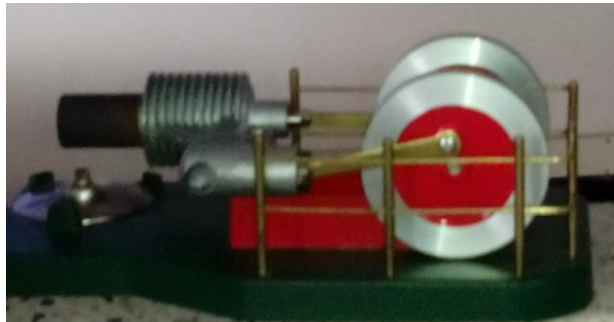


Figura 1-7 Motor de Stirling, objeto de estudio.

En el caso que se desee presurizar el cilindro del motor Stirling, debería tener una forma de tal manera que aumentemos el área de transferencia de calor, debido a que la cantidad de fluido de trabajo que se requiere calentar es mayor (debido a la presurización).

El diseño de la zona caliente varía de acuerdo al fluido de trabajo a utilizar, esto es debido a las propiedades del fluido. Por ejemplo, el He tiene una conductividad térmica de seis veces la conductividad del aire, por esta razón el diámetro interno de los tubos de la zona caliente debería ser más pequeño si utilizamos aire como fluido de trabajo, esto es para hacer más eficiente la transferencia de calor debido a la baja conductividad térmica del aire. Un motor diseñado para utilizar aire, si funciona eficientemente utilizando He y H_2 , pero no ocurre lo contrario.

- **Zona Fría**

De esta parte se extrae el calor del motor, esto se puede realizar mediante convección libre o forzada. En el caso que sea libre, ésta puede realizarse mediante la colocación de aletas de aluminio para disipar rápidamente el calor.

En el caso de una refrigeración forzada, ésta se realiza acondicionando una camiseta de agua. Esta parte puede hacerse de acero inoxidable, hierro fundido, aluminio, cobre, etc. Estos dos últimos materiales se pueden utilizar en motores de baja potencia experimentales, ya que en motores de alta potencia sería necesario un mayor espesor de éstos, y el costo sería elevado.

- **Sistema de refrigeración**

El sistema de refrigeración tiene como objeto evacuar el calor del gas de trabajo hacia un medio exterior más frío. Este es una parte muy importante del motor, porque debe ser capaz de evacuar por lo menos el 50% del calor que recibe el motor, y que lo debe hacer a la menor temperatura posible para mejorar la eficiencia térmica del motor. Existen dos tipos de refrigeración.

- **Refrigeración por aire**

Puede ser por convección natural o forzada. Es necesario acoplar aletas al cilindro; es una transmisión poco eficiente y se utiliza en motores lentos y no presurizados, mayormente se utiliza en pequeños motores demostrativos. (El motor de Stirling trabajado, presenta este tipo de refrigeración)

- **Refrigeración por agua**

Es la más eficiente si se dispone de una fuente duradera de agua a temperatura ambiente (ríos, lagos, red pública). Sólo se puede utilizar en motores estacionarios. De lo contrario lo más recomendable es utilizar un circuito de agua con radiador, el único inconveniente es que se consume energía para bombear el agua e impulsar el aire.

- **Regenerador**

El regenerador absorbe y entrega calor al fluido de trabajo compensando una parte del calor perdido por el motor, haciendo que la potencia y velocidad del motor se incrementen, esto sucede porque cuando trabaja el regenerador el gas de trabajo necesitaría absorber menos calor en cada período, con lo cual hace que el ciclo necesite de menos tiempo para realizarse y también se consume menos cantidad de combustible (el motor de estudio no posee regenerador, ya que este no es presurizado).

- **Pistón**

Esta parte es la que realiza el trabajo motriz, y va conectado al mecanismo de transformación de movimiento. Este debe ser ligero porque el gas realiza trabajo sólo durante la expansión.

- **Desplazador**

.Es el encargado de generar un gradiente de temperatura entre la zona caliente y fría. En el caso del motor de estudio el desplazador se comporta como un regenerador haciendo que éste tenga paredes lo más delgadas posible.

- **Mecanismo de conversión de movimiento**

Es el mecanismo que hace posible transformar la energía térmica en energía mecánica.

- **Volante**

Esta es la parte que entrega energía al ciclo para que se produzca la compresión del fluido de trabajo y también ayuda a mantener estable el giro del motor.

(Zamora, 2006, págs. 28-35)

1.1.2 Tipos de configuración de los motores de Stirling

Existen tres tipos de configuraciones

- **Configuración alfa**

Consta de dos cilindros independientes unidos mediante un ducto; este tipo de motor, no tiene desplazador, pero tiene dos pistones desfasados 90° . Uno de los cilindros se calienta mediante suministro de calor y el otro se enfría mediante aletas o agua.

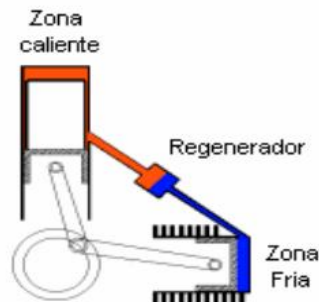


Figura 1-8 Motor de Stirling, configuración alfa.

- **Configuración Beta**

En este tipo, el pistón y el desplazador están en el mismo cilindro, por eso tiene poco volumen muerto, y, por lo tanto, es el de mayor potencia específica de las tres configuraciones. Existe una holgura entre el desplazador y el cilindro para permitir el paso del gas de la zona caliente a la fría y viceversa. Su desventaja está en su fabricación, porque ésta es muy complicada y requiere de bastante precisión.

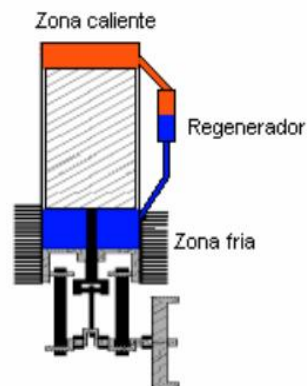


Figura 1-9 Motor de Stirling, configuración Beta

▪ **Configuración Gamma.**

Este es derivado de la configuración beta, pero más sencillo de construir. Consta de dos cilindros separados, en uno de los cuales se sitúa el desplazador y en el otro el pistón de potencia. Es el de menor potencia específica debido a su gran volumen muerto. El motor que se caracterizó en el laboratorio es de tipo gamma (Zamora, 2006, págs. 40-41)

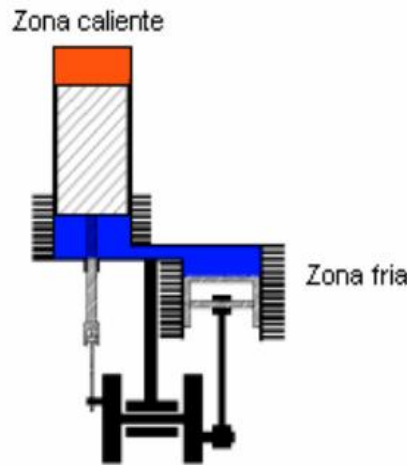


Figura 1-10 Motor de Stirling, configuración Gamma.

1.1.3 Ciclo termodinámico del motor de Stirling

▪ **Ciclo termodinámico ideal del motor de Stirling**

El ciclo ideal Stirling se compone de dos procesos isotérmicos y dos isocóricos; la regeneración se efectúa a volumen constante, tal como se muestra en el gráfico siguiente:

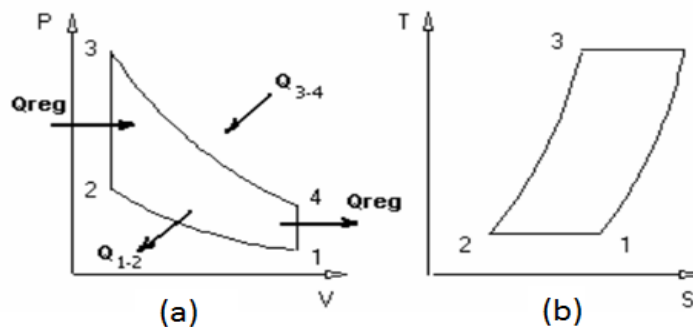


Figura 1-11 Ciclo ideal de Stirling.

En la figura 1-11 (a), se parte del estado 1. Los elementos son: cilindro, pistón, fluido, desplazador. Todo el gas está en la zona fría, y el pistón está en la posición inferior.

Proceso 1-2 Cuando el pistón pasa del estado 1 al 2, se realiza una compresión isotérmica a la temperatura más baja. El proceso está representado en la figura 1.9 (a). Aquí se le extrae calor al ciclo.

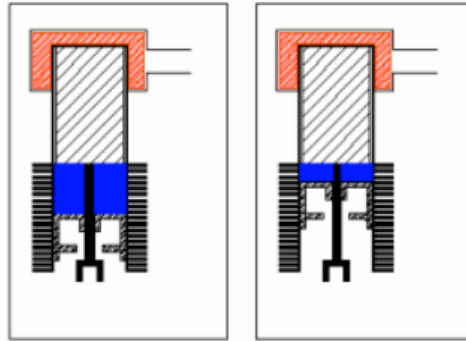


Figura 1-12 Compresión Isotérmica (proceso 1-2)

El trabajo consumido en este proceso es igual al calor rechazado en el ciclo

$$Q_{1-2} = W_{1-2} \quad (1)$$

$$Q_{1-2} = nKT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (2)$$

Proceso 2-3 Si se mantiene fijo el pistón y se mueve el desplazador, se hace pasar todo el gas a la zona caliente, obteniendo un proceso isovolumétrico, en el que aumenta la presión sin cambiar el volumen. Aquí el regenerador entrega calor a la sustancia de trabajo (en el caso de estudio es aire), elevando su temperatura de T_{\min} a T_{\max} .

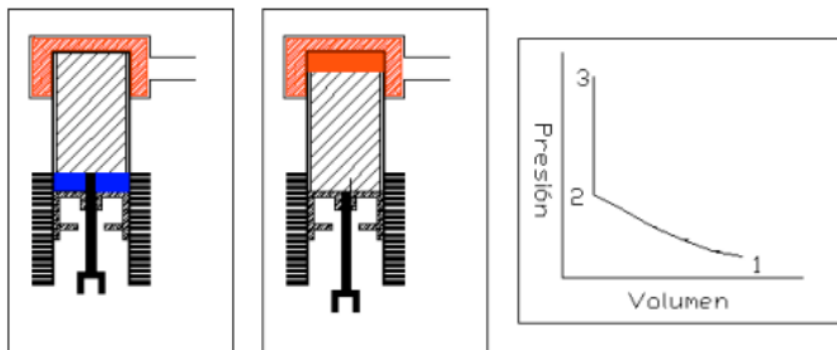


Figura 1-13 Suministro de calor a volumen constante (proceso 2-3)

$$W_{2-3} = 0 \tag{3}$$

$$Q_{reg} = Q_{2-3} = C_v(T_2 - T_3) \tag{4}$$

Proceso 3-4 En este momento, se puede obtener una expansión isotérmica a la temperatura superior haciendo bajar juntos al pistón y al desplazador. En este proceso se entrega calor externo a la sustancia de trabajo.

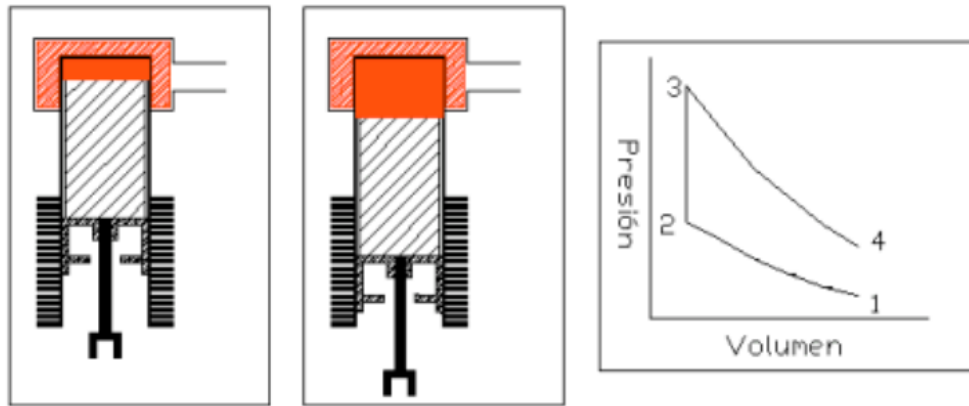


Figura 1-14 Expansión Isotérmica (proceso 3-4)

$$Q_{3-4} = W_{3-4} \tag{5}$$

$$Q_{3-4} = nKT_3Ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \tag{6}$$

Proceso 4-1 Moviendo el desplazador al estado inicial, se obtendrá otro proceso isocórico que finalizará el ciclo termodinámico representado por el proceso 1- 4. Aquí el regenerador absorbe calor

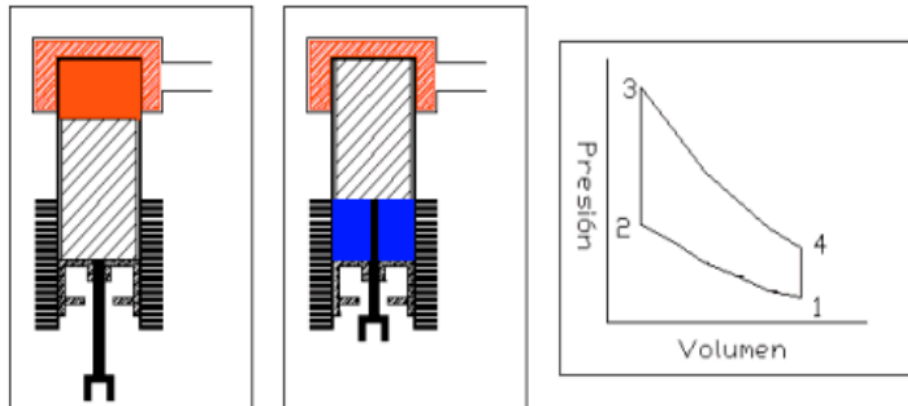


Figura 1-15 Extracción de calor a volumen constante (proceso 4-1).

$$W_{4-1} = 0 \quad (7)$$

$$Q_{4-1} = Q_{reg} = C_v(T_4 - T_3) \quad (8)$$

La eficiencia de una máquina térmica está definida como el cociente de la energía producida (en un ciclo de funcionamiento) y la energía suministrada a la máquina (para que logre completar el ciclo termodinámico).

La eficiencia térmica del ciclo Stirling se calcula con la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{Q_{3-4} - Q_{1-2}}{Q_{3-4}} = \frac{nKTLn\left(\frac{V_4}{V_3}\right) - nKTLn\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}{nKTLn\left(\frac{V_4}{V_3}\right)} \quad (9)$$

De donde finalmente se obtiene

$$\eta = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (10)$$

$$T_{min} = T_1 = T_2 \quad (11)$$

$$T_{max} = T_3 = T_4 \quad (12)$$

Con esto queda demostrado que el ciclo ideal Stirling tiene la misma eficiencia que el ciclo de Carnot, la cual es la máxima eficiencia que puede alcanzar una máquina térmica considerando que todas las pérdidas sean cero. El ciclo de Carnot utiliza procesos isoentrópicos, no procesos regenerativos de intercambio de calor, asumiendo que el calor específico del regenerador es infinitamente grande, como el ciclo Stirling. (Zamora, 2006, págs. 41-44)

▪ Ciclo real del motor de Stirling

Debido a que no existe un mecanismo que realice el movimiento ideal del pistón y del desplazador para la realización del ciclo y a la dificultad de obtener los ciclos puramente isotérmicos debido a los mecanismos de transferencia de calor,

asociados a la velocidad con que se pretende realizar el ciclo, se pierde potencia y rendimiento, el resultado final es un ciclo “redondeado” en forma de elipse.

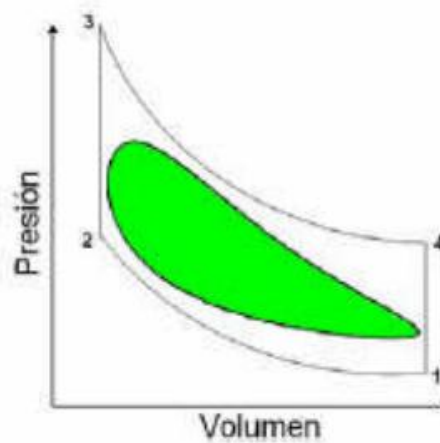


Figura 1-16 Ciclo real del motor de Stirling

- **Efecto de la relación de temperaturas (τ)**

-La relación de temperaturas de la zona fría y la zona caliente $\tau = T_c/T_H$, hace que el ciclo sea más delgado a medida que el valor es mayor ($0 < \tau < 1$) (Zamora, 2006, págs. 45-46)

- **Efecto de la velocidad de giro del motor.**

El giro del motor tiene el mismo efecto que la relación de temperaturas τ , debido a que éste afecta directamente a la relación de temperaturas. Esto sucede porque a mayor velocidad de giro, el tiempo de realización del ciclo se acorta. A mayor velocidad de rotación τ incrementa su valor.

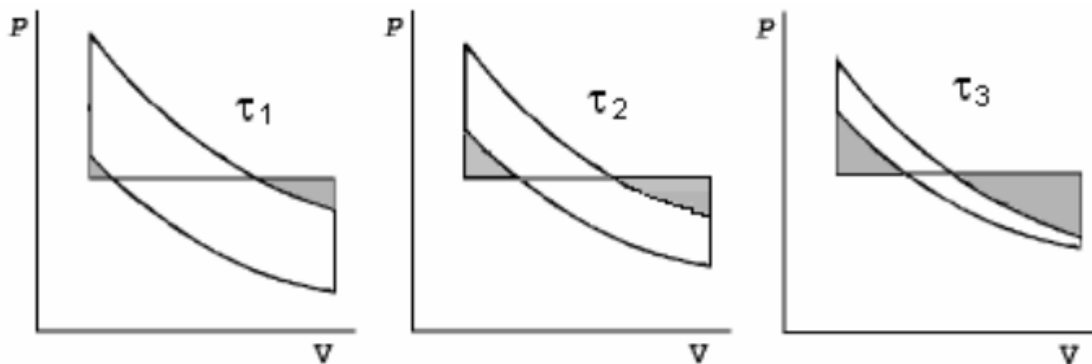


Figura 1-17 Efecto de τ sobre el ciclo ideal Stirling $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$

1.2 Pempower 1-Eco

Es un dispositivo diseñado con la finalidad de que cada uno de sus componentes sea lo más amigable con el medio ambiente en la producción de energía. El sistema es un modelo que permite ilustrar la tecnología del hidrógeno a partir de una fuente de voltaje como lo es, la celda solar y la celda de combustible. De allí se hace un estudio de cada uno de los elementos que la componen.

1.2.1 Celda Solar

Una celda solar o fotovoltaica, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (movimiento de electrones) mediante el efecto fotovoltaico. El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con radiación electromagnética, estos electrones salen del material. La diferencia entre el efecto fotoeléctrico y el efecto fotovoltaico, es que en el segundo los electrones quedan “libres” dentro del material y generan una corriente en el interior.

La unión de celdas fotovoltaicas da origen a un panel fotovoltaico, el que consiste en una red de celdas solares conectadas en serie para aumentar la tensión de salida continua hasta el valor deseado. También se conectan en paralelo con el propósito de aumentar la corriente de salida del sistema.

(Simec Chile Srl, 2015, pág. 63)

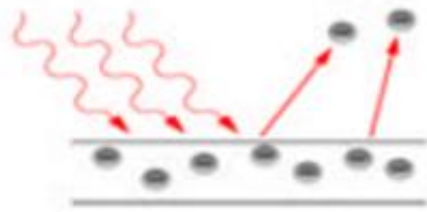


Figura 1-18 Efecto fotovoltaico de una celda solar, Simec Chile Srl, Pág. 64

▪ Dopado de silicio y la unión P-N

Un átomo del silicio posee cuatro electrones de valencia, estos electrones enlazan a los átomos adyacentes. Si se sustituye un átomo de silicio por otro átomo que tenga tres o cinco electrones de valencia, en el primer caso, la falta de un electrón dejará un hueco disponible, quedando de esta forma con mayor carga positiva (capa P), mientras que en el segundo caso quedará un electrón libre, lo que genera una mayor cantidad de carga negativa (capa N), a este proceso de sustitución de átomos se le conoce como dopado. El dopado se puede hacer por difusión a alta temperatura (existen otros métodos para dopar al silicio), donde las láminas se introducen en un horno con el dopante introducido en forma de vapor.

Ambas capas se preparan sobre el mismo semiconductor, para formar una unión P-N. Para el dopado tipo P se utilizan generalmente átomos de boro, el cual posee tres electrones de valencia, mientras que para el dopado tipo N, se puede utilizar átomos de fósforo, que poseen cinco electrones de valencia.

El proceso de formación de la unión P-N, provoca una difusión de electrones de las zonas con mayores concentraciones, es decir, desde la capa de tipo N de la unión, hacia la capa P con menores concentraciones de electrones.

Esta difusión de electrones a través de la unión P-N, produce una recombinación con los huecos de la cara de tipo p, generando un campo eléctrico en la juntura hasta que se alcance el equilibrio, luego de esto no existe flujo de cargas a través de la unión, a no ser que sea excitada por una fuente externa.

El campo eléctrico establecido a través de la creación de la unión P-N crea un diodo que permite la circulación de corriente en un solo sentido a través de la juntura. Los electrones pueden pasar del lado N hacia el interior del lado P y los huecos pueden pasar del lado P hacia el lado N. A la zona de difusión de electrones se le llama región de agotamiento o región de espacio de carga, ya que son escasos los portadores de carga móviles existentes. Finalmente, a la unión P-N se le colocan los contactos eléctricos en ambas capas de la celda, por medio de evaporación o pintando con metal. La parte posterior de la placa se puede cubrir totalmente con metal, pero el frente de la misma tiene que tener solamente un patrón en forma de rejilla o de líneas finas de metal, a fin de evitar el bloqueo de los rayos solares. (Simec Chile Srl, 2015, pág. 65)



Figura 1-19 Dopado del Silicio, Simec Chile Srl, Pág. 65

▪ Tecnologías de fabricación de celdas fotovoltaicas

Las celdas solares de silicio se construyen utilizando placas monocristalinas, placas policristalinas o láminas delgadas (amorfas). (Simec Chile Srl, 2015, pág. 68)



Figura 1-20 Panel solar de silicio mono cristalino, Simec Chile Srl, Pág. 68



Figura 1-21 Panel solar de silicio policristalino (prototipo de celda solar del dispositivo PEMPower 1- Eco) Simec Chile Srl, Pág. 68

▪ **Funcionamiento de un panel fotovoltaico**

El principio de funcionamiento de los paneles fotovoltaicos se basa en el efecto fotovoltaico, mediante la captación de fotones provenientes de la luz solar, los cuales inciden con una cierta cantidad de energía en la superficie del panel, esta interacción provoca el desprendimiento de los electrones de los átomos de silicio, rompiendo y atravesando la barrera de potencial de la capa semiconductor. Esto genera una diferencia de potencial en la capa N con respecto a la P. Luego si se conecta una carga eléctrica o elemento de consumo entre los terminales del panel se iniciará una circulación de corriente continua

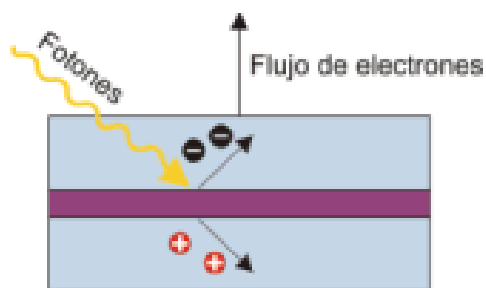


Figura 1-22 Desplazamiento de electrones mediante la captación de fotones, Simec Chile Srl, Pág. 71

El nivel de energía proporcionado por un panel fotovoltaico depende de lo siguiente:

- Tipo de panel y área del mismo
- Nivel de radiación e insolación
- Longitud de onda de la luz solar

Una celda fotovoltaica común de silicio monocristalino de 100 cm² de superficie, puede producir aproximadamente 1.5 Watt de energía, a 0.5 volt (CC) y 3 amperes de corriente bajo condiciones óptimas (luz solar al medio día una radiación de 1000W/m²). La energía entregada por la celda es casi directamente proporcional al nivel de radiación solar.

El nivel de potencia de salida por panel es denominado potencia pico, la cual corresponde a la potencia máxima entregable por el conjunto de celdas bajo las siguientes condiciones estándares de prueba (STC: Standard Test Conditions):

- Radiación de 1000 W/m²
- Temperatura de celda de 25° C (no corresponde a la temperatura ambiente).
- Masa de aire (AM=1,5).

Bajo estas condiciones es posible medir los siguientes parámetros:

- **Corriente de corto circuito (Isc):**

Corresponde a la máxima corriente en amperios generada por cada panel, al conectar una carga de resistencia cero en sus terminales de salida. Su valor depende de la superficie del panel y de la radiación solar.

- **Voltaje de circuito abierto (Voc):** corresponde al voltaje máximo que genera un panel solar y medido en los terminales de salida cuando no existe carga conectada, es decir, a circuito abierto.

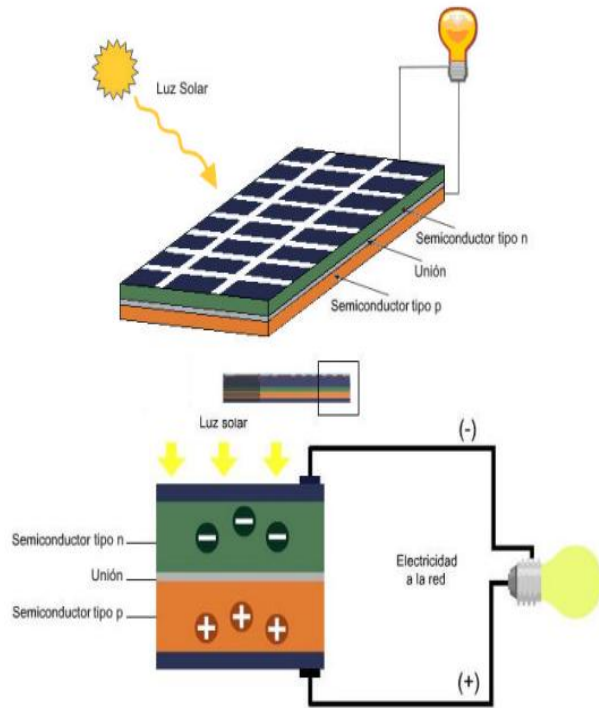


Figura 1-23 Esquema de funcionamiento de un panel solar, Simec Chile Srl, Pág. 72

El comportamiento eléctrico de los paneles está dado por las curvas de corriente voltaje (curva I-V) o potencia vs voltaje (curva P-V). La curva de potencia está dada por el producto entre la corriente y el voltaje en cada punto de la curva I-V. Bajo las condiciones estándares de prueba mencionadas anteriormente, cada modelo de panel tiene una curva I-V o P-V característica. La corriente nominal (I_{mp}) y el voltaje nominal (V_{mp}) del panel se alcanzan en el punto de máxima potencia. Mientras el panel opere fuera del punto de máxima potencia, la potencia de salida será significativamente más baja. (Simec Chile Srl, 2015, págs. 71-75)

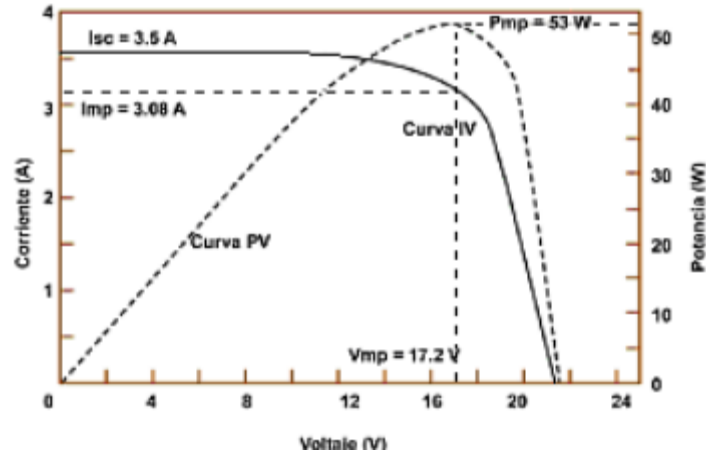


Figura 1-24 Curva I vs V, y P vs V para un módulo fotovoltaico típico a 1000 W/m^2 y 25°C , Simec Chile Srl, Pág. 73

▪ Factores de eficiencia

Punto de máxima potencia (PMP):

corresponde a la máxima potencia que el panel puede entregar, la cual se da cuando el producto por voltaje corriente alcanza sus valor máximo simultánea, como se puede ver en el rectángulo inscrito dentro la curva I vs V de la Figura 1.24, donde el vértice sobre la curva, denominado PMP, representa el valor de máxima potencia. Este valor se consigue de acuerdo al valor de la ecuación (13)

$$PMP = V_{mp} \times I_{mp} \quad (13)$$

• Eficiencia en la conversión de energía (η):

La eficiencia de un panel fotovoltaico, corresponde al porcentaje de energía eléctrica generada en relación a la cantidad de energía luminosa recibida desde el sol, cuando el panel se encuentra conectado a un circuito eléctrico. Esta se encuentra definida por:

$$\eta = \frac{PMP}{E \times A_c} = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{p_i} \quad (14)$$

Donde:

- η = representa a la eficiencia de la conversión de la energía.
- PPM =: punto de potencia máxima (W).
- E: nivel de radiación solar en la superficie del panel (W/m^2), bajo condiciones STC.
- A_c : =Area de superficie del panel fotovoltaico (m^2).
- P_i : Potencia Recibida por el panel

• **Factor de llenado (FF)**

También se conoce como Fill Factor en ingles y define la eficacia de un panel solar, relacionando el punto de máxima potencia (PPM), dividido por el producto entre el voltaje a circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{sc}).

$$FF = \frac{PPM}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{\eta \times A_c \times E}{V_{oc}I_{sc}} \quad (15)$$

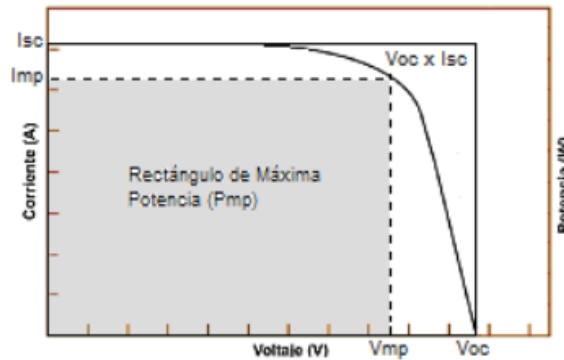


Figura 1-25 Factor de Forma (FF), Simec Chile Srl, Pág. 75

▪ **La celda solar en el PEMPower 1- Eco**

La principal función de la celda solar en el dispositivo, es transformar luz solar en energía eléctrica. En la fabricación de la celda se utilizan materiales conocidos como semiconductores, uno de los cuales es el silicio

Si la celda solar es conectada directamente a un ventilador (como se muestra en la figura 1-26); este inicia a rotar, siempre y cuando haya luz incidiendo sobre la celda. Si la polaridad entre la celda solar y el ventilador está conectada en sentido opuesto; la dirección de rotación del ventilador estará en la dirección contraria.

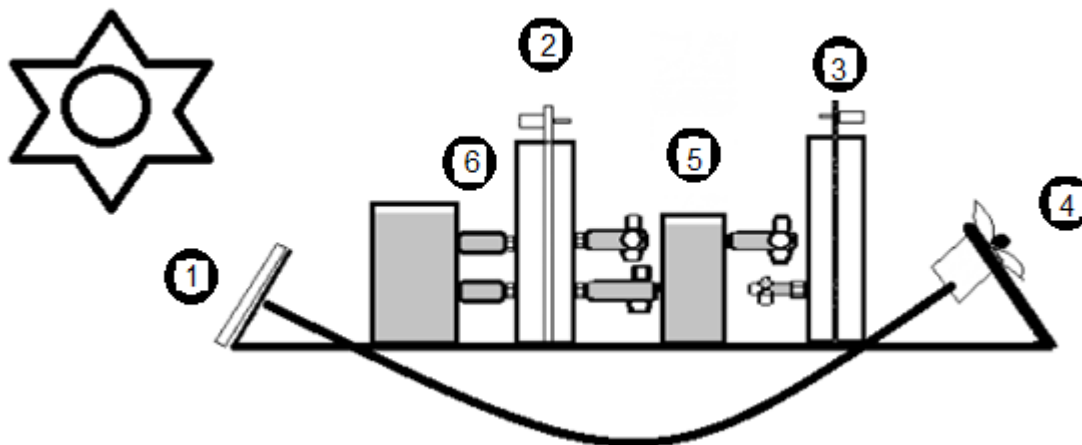


Figura 1-26 Celda solar conectada directamente al ventilador

- 1 Celda Solar
- 2 Electrolizador
- 3 Celda de combustible
- 4 Ventilador
- 5 Tanque
- 6 Llave

1.2.2 Producción de hidrógeno mediante electrolizador

En la obtención electroquímica del hidrógeno juegan un papel importante tanto los aspectos termodinámicos como los cinéticos de la reacción. Especialmente estos últimos, ya que dependen fuertemente de la composición de los materiales de los electrodos.

Otro aspecto importante lo juega, el separador, es decir el elemento físico que mantiene aislado el compartimiento anódico del catódico, evitando la difusión de gases. Existen separadores físicos denominados diafragmas y físico químico o membranas, cada uno con sus ventajas y desventajas.

▪ **Funcionamiento de un electrolizador**

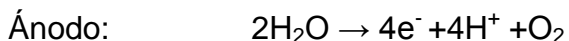
El electrolizador contiene dos electrodos de níquel o platino. Cuando los dos electrodos se colocan en un líquido electrolítico y se aplica una corriente continua a los electrodos, se producen hidrógeno y oxígeno

▪ **Tecnología PEM**

Los electrolizadores más tradicionales utilizan fluidos que facilitan la división del agua, sin embargo, estos están siendo reemplazados cada vez más por la tecnología PEM.

PEM es la sigla inglesa de Proton Exchange Membrane, que significa membrana de intercambio de protones. La parte central de la tecnología PEM es una fina membrana polimérica conductora de protones que está cubierta con una capa de material catalizador en ambos lados.

Con esta forma de reacciones químicas



Los iones H^+ se mueven a través de la membrana permeable hacia el cátodo y se combinan con electrones desde el circuito eléctrico hasta el hidrógeno.

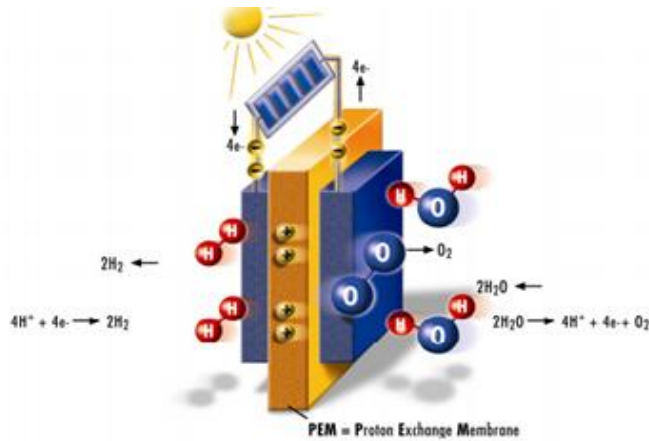


Figura 1-27 Principios básicos de electrolizador PEM, Instruction manual suggestion for class room instructions experiments, pág. 17

▪ Eficiencia del electrolizador PEM

La primera ley de Faraday describe la relación entre la corriente aplicada y la producción de gas en el tanque. La eficiencia del electrolizador está dada por la razón entre el volumen de gas producido y el volumen del gas calculado teóricamente.

$$\eta = \frac{V_{H_2}(\text{producido experimentalmente})}{V_{H_2}(\text{producido teóricamente})} \quad (16)$$

Donde el volumen teórico se puede expresar de la siguiente forma:

$$V = \frac{R I T t}{F P Z} \quad (17)$$

V = Volumen del gas producido en m^3

R = Constante universal de los gases ($8,314 J/(molK)$)

T = temperatura ambiente

I = corriente en A

t = tiempo en s

P = Presión atmosférica

F = Constante de Faraday ($96485 C/mol$)

Z = Número de electrones en exceso ($z(H_2)=2, Z(O_2)=4$)

▪ Eficiencia energética del electrolizador PEM

La eficiencia puede ser calculada por la razón entre la energía utilizable y la energía gastada, en otras palabras la razón entre el calor energético almacenado en la producción de hidrógeno y la energía eléctrica gastada en producirlo.

$$\eta = \frac{E_{\text{Hidrógeno}}}{E_{\text{Eléctrica}}} \quad (18)$$

$$\eta = \frac{H_0}{V I} \frac{V_{H_2}}{t} \quad (19)$$

V_{H_2}/t = Volumen de H_2 por unidad de tiempo producida experimentalmente en unidades del sistema internacional

H_0 = Calor de combustión de hidrógeno = 12745 KJ/m³

V = Voltaje en Voltios

I = Corriente

t = Tiempo en segundos

1.2.3 Celda de Combustible

Dispositivo electroquímico cuyo concepto es similar al de una batería. Consiste en la producción de electricidad mediante el uso de químicos, que para este caso son, hidrógeno y oxígeno, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible, y el oxígeno es obtenido directamente del aire.

El funcionamiento de la celda de combustible consiste básicamente en la oxidación del hidrógeno en agua, generando energía eléctrica y calor directamente, sin pasar por generadores u otros artefactos.

La celda de combustible está compuesta por un ánodo, un cátodo y electrolitos. La reacción producida da lugar a la formación de electricidad, calor y agua. Se logra alimentando el hidrógeno en el ánodo de la celda y el oxígeno en el cátodo, los cuales están separados por una membrana electrolítica.

El hidrógeno fluye hacia el ánodo de la celda, donde una cubierta de platino ayuda a quitar los electrones a los átomos de hidrógeno dejándolo ionizado, o sea, en forma de protones (H⁺). La membrana electrolítica permite el paso solo de los protones hacia el cátodo

Debido a que los electrones no pueden pasar a través de la membrana, se ven forzados a salir del ánodo por un circuito externo generando una corriente

eléctrica. Luego, a medida que el oxígeno fluye a través del cátodo, se combina con los protones y los electrones para formar agua.

La reacción se produce dentro de la celda misma. La producción de agua toma lugar en distintas partes de la celda dependiendo del electrolito utilizado [https://www.ecured.cu/Celda_de_combustible]

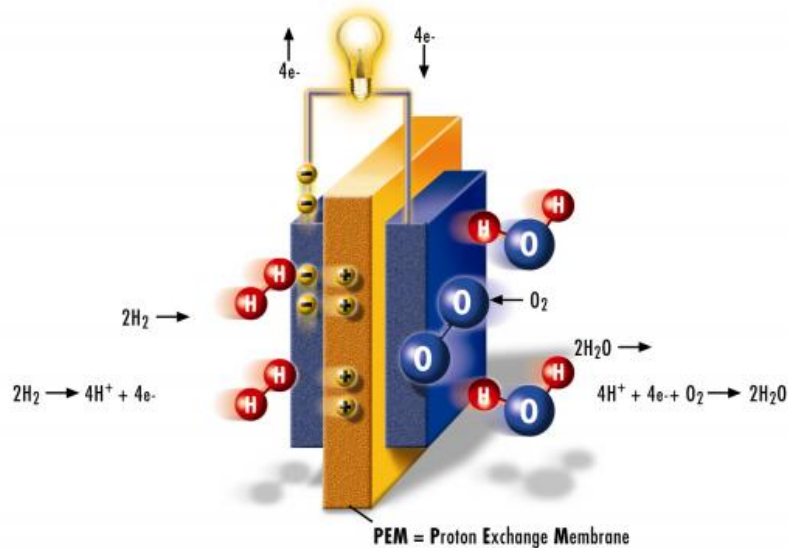


Figura 1-28 Principios básicos de la celda de combustible PEM, , Instruction manual suggestion for class room instructions experiments, pág. 19

- **Eficiencia de la celda de combustible PEM**

A partir de la primera ley de Faraday se calcula la eficiencia de la celda de combustible, similar al electrolizador. Se realiza el cálculo teórico de consumo y se compara con el consumo de combustible experimental (H-TEC, 1997, págs. 16-19)Funcionamiento del sistema del PEMPower 1 -Gráfica 1-1Eco

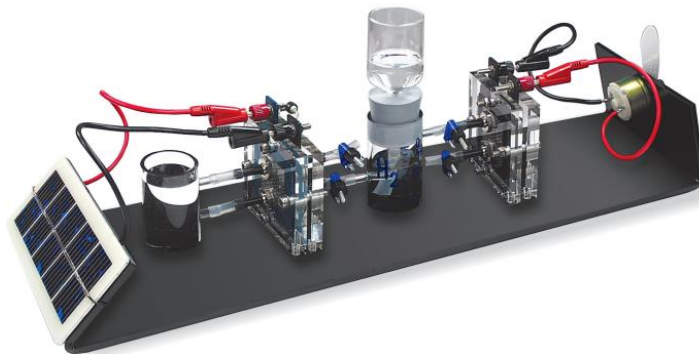


Figura 1-29 Dispositivo PEMPower 1-Eco, , Instruction manual suggestion for class room instructions experiments, portada.

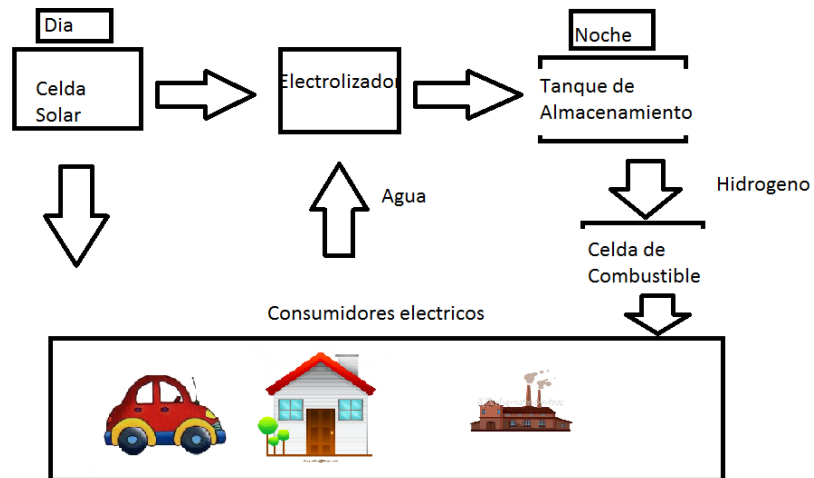


Figura 1-30 Esquema de funcionamiento del PEMPower 1-Eco

El Diseño de funcionamiento del PEMPower tiene como finalidad suplir las necesidades energéticas, en forma óptima pero al mismo tiempo amigable con el ambiente. De ahí que cada uno de sus componentes, garantizan la producción de energía limpia.

La celda solar está fabricada con materiales foto conductivos, de tal forma que cuando esta es sometida a la luz solar produce una corriente que pasa por el electrolizador el cual, separa al hidrogeno y al oxigeno del agua (el equipo requiere agua destilada)

Cuando se tiene la separación el hidrógeno cumple la función de combustible en la pila, produciendo así finalmente energía eléctrica. Esto es ventajoso en el sentido que puede ser usado tanto de día como de noche

El dispositivo caracterizado es de un tamaño pequeño, con finalidades pedagógicas, sin embargo es un modelo utilizable para producción de energía a gran escala.

2. Detalles Experimentales

La eficiencia puede ser calculada por la razón entre la energía utilizable y la energía gastada, en otras palabras la razón entre el calor energético almacenado en la producción de hidrógeno y la energía eléctrica gastada en producirlo.

2.1 Motor de Stirling

Según la definición, la eficiencia de una máquina termodinámica, es el cálculo del cociente entre la energía producida y la energía suministrada.

$$\eta = \frac{E_{Salida}}{E_{suministrada}} \quad (20)$$

De allí, se buscó encontrar la energía de entrada y la de salida con base en el calor proporcionado por la llama al motor de Stirling y el máximo trabajo que este pueda llegar a realizar. Por consiguiente esta primera fase se encuentra dividida en cuatro etapas; estas son: medición de la cantidad de calor suministrada al motor, medición de la energía mecánica generada por este, medición del momento de inercia, y finalmente, acoplamiento de un motor eléctrico al motor de Stirling para encontrar la energía eléctrica obtenible del sistema.

2.1.1 Medición de la cantidad de calor suministrado al motor de Stirling

Para calcular el calor suministrado por la llama, al motor de Stirling, se parte del principio, de transferencia de energía. El calor puede desplazarse de un lugar a otro por conducción, tal como ocurre en el motor, por consiguiente se sometió un recipiente de aluminio que contenía 100cm³ de agua, a la llama producida por el mechero del motor, para calcular la cantidad de calor que se transfería del cuerpo

de mayor energía al de menor. Para los registros de las mediciones se utilizó el termómetro de la maleta COBRA, lo cual permitió observar la variación de la temperatura del agua en función del tiempo y partiendo del hecho que se conoce el calor específico del agua y del aluminio se pudo calcular la cantidad de calor del mechero. El esquema del montaje experimental se encuentra en la gráfica 2-1

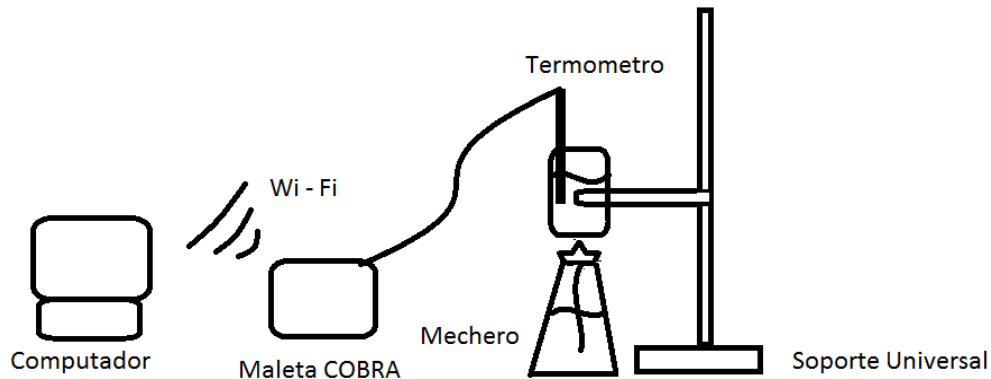


Figura 2-1 Diseño experimental para la medición de calor proporcionada al motor de Stirling

2.1.2 Medición de la energía mecánica generada por el motor de Stirling

La definición de energía más sencilla y completa, basada en la mecánica y la termodinámica es que ésta es la capacidad que tienen los cuerpos para realizar trabajo. En consecuencia la energía cinética, está íntimamente relacionada con el trabajo. Acorde a lo anterior, en el laboratorio se midió la energía cinética del motor transferida a un cuerpo; en efecto se realizó la grabación de videos analizados con la ayuda del software TRACKER de la elevación de cuatro masas diferentes conectadas al motor de Stirling por medio de un sistema de poleas; los valores de estas fueron de: 6.1g, 11g, 16g y 20.8g. El diseño experimental para la medición de velocidad de las masas se encuentra representado en la figura 2.2

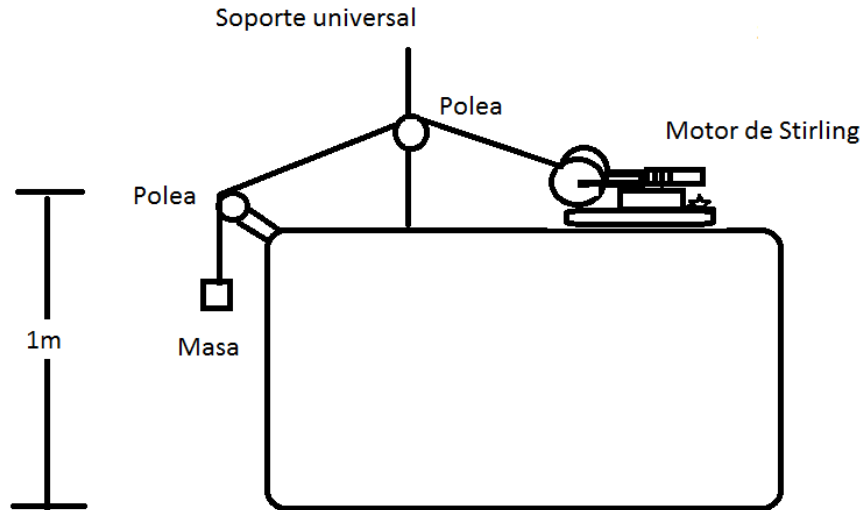


Figura 2-2 Diseño experimental para la medición de la energía transferida por el motor de Stirling a un cuerpo

2.1.3 Cálculo del momento de inercia del motor de Stirling

Para la medición del momento de inercia del motor de Stirling, fue necesario desacoplar el mecanismo de generación de movimiento del motor (pistones), y se le enrolló un hilo sujeto a una masa. Esta masa se dejó caer desde una altura de 1,50m y se registró el tiempo de caída. Cada medida se realizó tres veces para cada una de las distintas masas utilizadas.

2.1.4 Acoplamiento de un motor eléctrico al motor de Stirling

Dando inicio a la descripción de los detalles utilizados en esta sección, el objetivo principal de esta práctica era medir la cantidad de energía eléctrica que puede producir el Motor de Stirling acoplado a un generador eléctrico. Para dicho fin se utilizó un motor eléctrico de corriente continua, al cual se acopló al motor de Stirling. Usando una polea de diámetro similar al del volante del motor.

Al entrar en funcionamiento, el motor de Stirling, hace girar la polea dando al motor eléctrico movimiento que se transforma en energía eléctrica

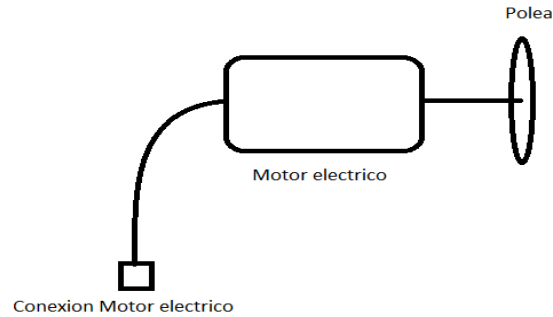


Figura 2-3 Vista lateral acoplamiento del motor eléctrico y polea

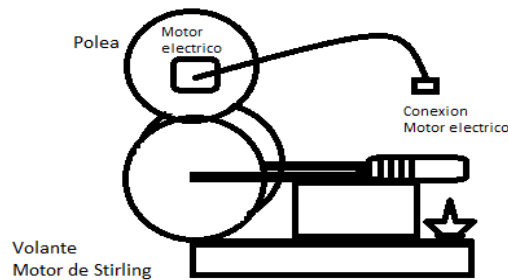


Figura 2-4 Vista frontal del diseño experimental para la medición de energía eléctrica obtenible a partir del motor de Stirling

2.2 Ladrón de Julios

Para observar que el motor eléctrico produce energía, al acoplarse al motor de Stirling se elabora un circuito llamado ladrón de julios el cual actúa como amplificador búfer, acoplador de impedancias de ganancia unitaria .

El ladrón de julios es un circuito que permite adecuar la energía eléctrica producida por una pila o batería es decir al circuito de consumo. La batería produce un voltaje de 1V y una corriente de 10mA; con la ayuda del circuito se puede obtener un voltaje mayor a expensas de una corriente menor

Los materiales requeridos para la construcción de este circuito, fueron un 1 toroide de ferrita, 1 transistor NPN 2N2222A encapsulado, 1 resistencia de 1Ω y un LED rojo. A continuación se presenta el esquema del circuito de ladrón de julios utilizado

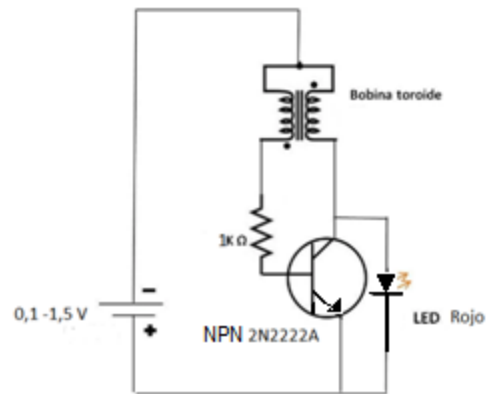


Figura 2-5 Circuito “ladrón de julios”

2.3 PEMPower 1 –Eco

Dado el diseño del dispositivo fue necesario caracterizar cada una de las partes que lo componen, a saber: Celda solar, electrolizador y celda de combustible. Para cada elemento se realizó un montaje experimental para conocer los alcances y limitaciones energéticas del equipo.

2.3.1 Celda Solar

▪ Caracterización de la celda Solar $I - V$

El objetivo de las mediciones, busca hallar el PMP de la celda solar; para dicho fin se iluminó con la luz generada por un retroproyector la celda solar de manera uniforme y se esperó aproximadamente unos 5 minutos para evitar fluctuaciones, debido a la variación de la temperatura. Posteriormente con la ayuda de un potenciómetro, un amperímetro y un voltímetro se realizó el montaje representado en la figura 2.6 en las que se midió corriente y voltaje.

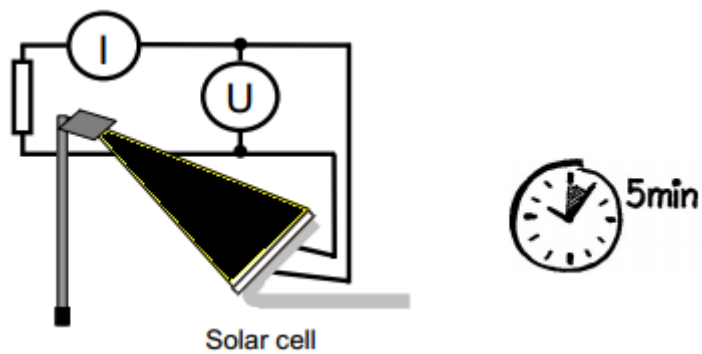


Figura 2-6 Iluminación de la celda solar con la luz de una lámpara por aproximadamente 5 minutos

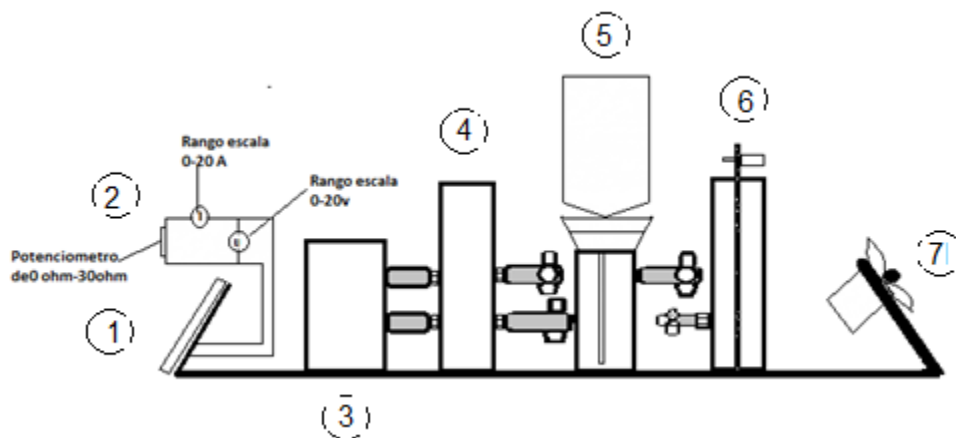


Figura 2-7 Montaje experimental de la característica corriente voltaje de la celda solar

1. Celda Solar
- 2 Circuito
- 3 Tanque
- 4 Electrolizador
- 5 Tanque de almacenamiento de hidrogeno
6. Celda de combustible
7. Ventilador

- **Eficiencia de la celda solar**

La ecuación 14 del capítulo anterior permite hallar la eficiencia de la celda solar, sin embargo este término se puede encontrar expresado también con la ayuda de la ecuación (21) como:

$$\eta = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{K_{solar} A} \quad (21)$$

Donde

FF= Factor de llenado

I_{sc} = Corriente de corto circuito

V_{oc} = Voltaje de circuito abierto

K_{solar} = Constante de radiación solar

A= Área de la celda

Para encontrar la eficiencia de la celda solar del dispositivo fue necesario exponer la celda solar a las 16:00 horas, bajo la incidencia del rayo de sol ($K_{solar} = 75 \text{ mW/cm}^2$) en la ciudad de Bogotá, y a su vez medir, voltaje de circuito abierto y corriente de corto circuito.

2.3.2 Producción de Hidrógeno en el electrolizador

El electrolizador se caracteriza de dos formas diferentes. En un primer experimento se hace la caracterización corriente - voltaje, del electrolizador y en el segundo se mide la eficiencia de este.

- **Caracterización corriente voltaje del electrolizador**

El objetivo principal en esta caracterización, es encontrar el voltaje mínimo con el que se produce hidrógeno. Para ello es necesario realizar las medidas de corriente y voltaje según el circuito, que se muestra en la figura 2.8. Para lo cual se conecta, el electrolizador a una fuente de voltaje variable de 0V hasta 1,9 V. Se conecta un amperímetro en serie y un voltímetro en paralelo. Se registran los valores de corriente y voltaje a medida que se ajusta el voltaje de la fuente.

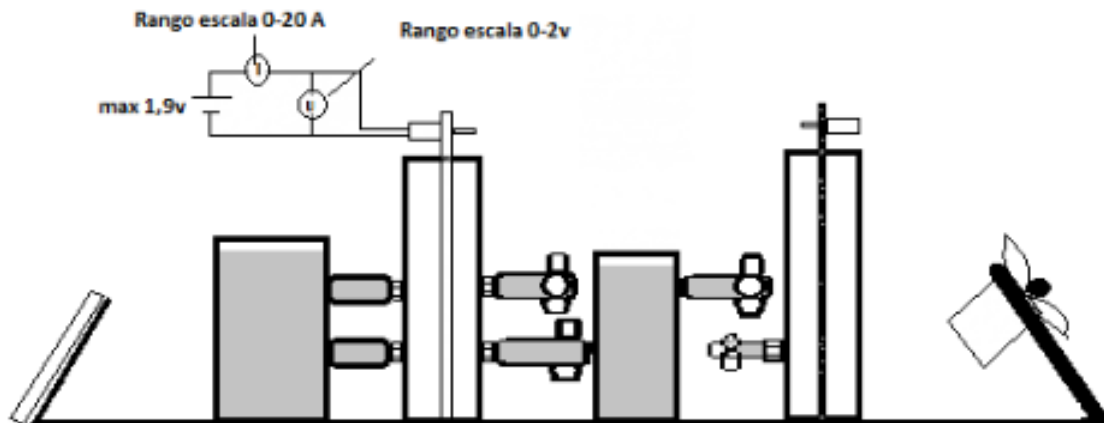


Figura 2-8 Montaje experimental de la característica corriente voltaje del electrolizador

▪ Primera ley de Faraday y eficiencia del electrolizador

La primera ley de Faraday describe la relación entre la corriente aplicada al electrolizador y la producción de gas resultante. En este sentido la eficiencia del electrolizador está dado por la relación entre la producción de gas experimental y la producción de gas teórico.

Para realizar el cálculo de la eficiencia del electrolizador, se tomó el montaje experimental mostrado en la figura 2.8 pero dejando una corriente constante y un voltaje constante. En este caso se toma 1A y 1,8V.

Una vez establecidos los parámetros constantes de corriente y voltaje se observa la producción de hidrógeno en el tanque de almacenamiento. Para lo cual se mide el volumen generado en un determinado tiempo. El volumen de hidrógeno se mide con ayuda del volumen de agua desplazada en el tanque de almacenamiento.

2.3.3 Uso del hidrógeno en la celda de combustible

Al igual que en electrolizador, la característica corriente – Voltaje y la eficiencia, es usada para caracterizar la celda de combustible.

▪ Característica corriente – voltaje de la celda de combustible

De acuerdo al montaje experimental mostrado en la figura 2.9 se conecta un potenciómetro, en paralelo a la celda de combustible. Una vez se tiene el montaje preparado se abre la llave de la celda de combustible y se hace circular el hidrogeno por esta. Se abre la llave inferior de la celda para recolectar el agua producida. La característica corriente - voltaje se toma iniciando con un voltaje sin carga y se varía la resistencia hacia valores menores. Las resistencias usadas estan entre 0.1Ω y 30Ω . Al finalizar se espera unos segundos para estabilizar la lectura. Cabe aclarar que la corriente de corto circuito no se deja circular por mas de 10 segundos pues la celda podia ser destruida

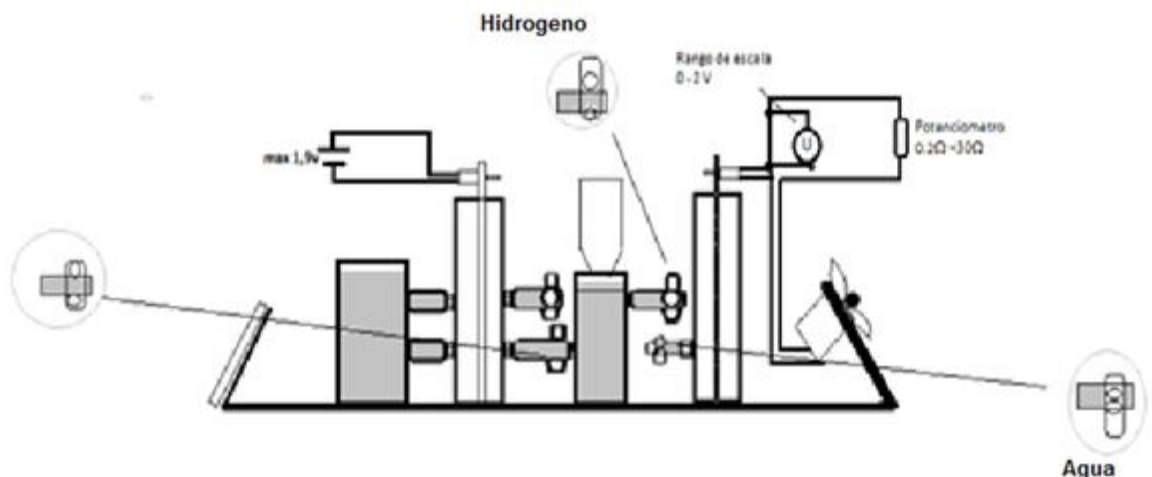


Figura 2-9 Montaje experimental de la característica corriente voltaje de la celda de combustible

▪ Primera ley de Faraday I la eficiencia de la celda de combustible

Similar el proceso realizado para calcular la eficiencia del electrolizador se calcula la eficiencia de la celda de combustible. A partir de la primera ley de Faraday se obtiene la razón entre el consumo teórico y el consumo real de hidrogeno

Es importante hacer una preparación previa del dispositivo antes de tomar las medidas por eso es necesario cerrar la llave de la celda de combustible y desconectar el ventilador por alrededor de unos 5 minutos mientras el tanque de hidrógeno se llena. Posteriormente se cierra la llave de paso del electrolizador (es decir se cierra el paso de corriente). Nuevamente se abre la llave de la celda de combustible y se da paso para que el tanque llegue a un nivel aproximado de 30 cm³. Por último se cerró nuevamente la llave de la celda de combustible y se conecto el ventilador, dando inicio a las mediciones de corriente voltaje volumen y tiempo.

3. Resultados y análisis

3.1 Motor de Stirling

3.1.1 Medición de la cantidad de calor suministrada al motor

En primera instancia se determina el calor producido por la llama, para lo cual se utiliza el sistema COBRA, la figura 3.1 se muestra el montaje utilizado.

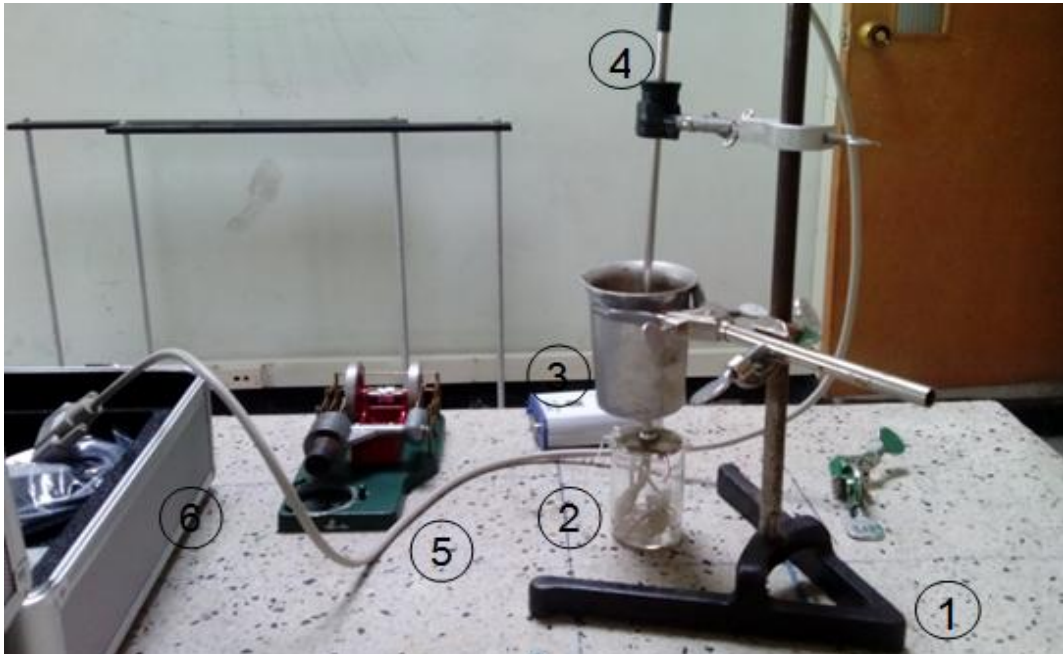
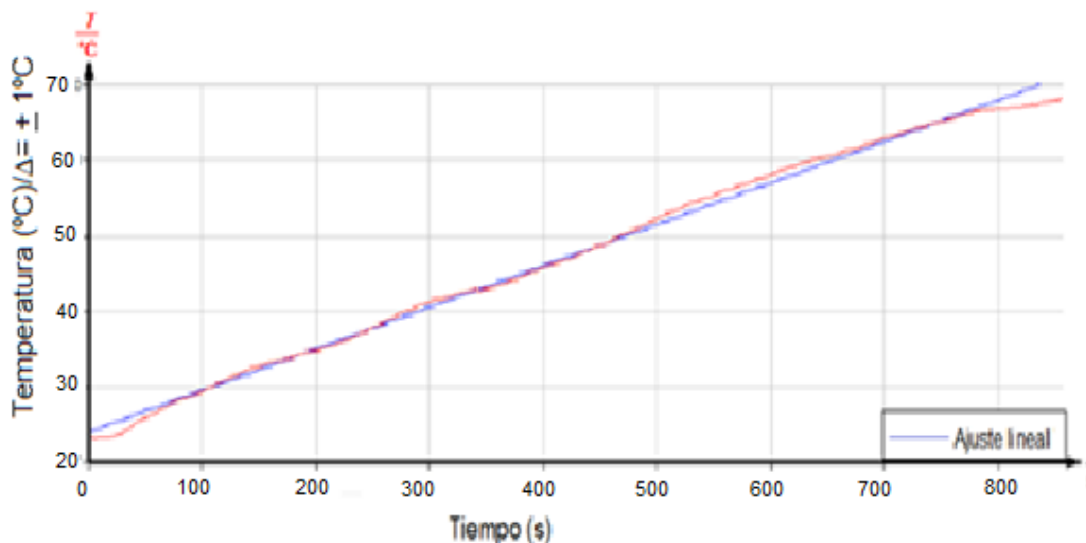


Figura 3-1 Montaje experimental usando el sistema COBRA para calcular el calor suministrado por el mechero al motor de Stirling

1. Soporte universal
2. Mechero
3. Recipiente de aluminio con agua
4. Termómetro
5. Motor de Stirling
6. Maleta COBRA

Con ayuda del sistema COBRA se mide la temperatura T del agua con un error estimado $\pm 1^\circ\text{C}$ en función del tiempo de calentamiento, los resultados obtenidos son mostrados en la gráfica 3-1



Gráfica 3-1 Variación de la temperatura del agua en función del tiempo

El calor específico c_v es un parámetro físico, que relaciona el calor suministrado ΔQ por unidad de masa m para obtener un incremento de temperatura ΔT .

$$c_v = \frac{1 \Delta Q}{m \Delta T} \quad (22)$$

Por definición el calor puede transferirse de un lugar a otro por tres mecanismos diferentes tales como; convección, radiación y conducción; en este caso el calor que produce el mechero es transferido al recipiente y a su vez al líquido que este pueda contener a partir del tercer mecanismo.

Por otra parte la potencia P o energía por unidad de tiempo suministrada a un cuerpo está dada por:

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (23)$$

$$P = \frac{c_v m \Delta T}{\Delta t} \quad (24)$$

De la pendiente de la gráfica 3-1 ($\Delta T/\Delta t = 0,059 \text{ }^\circ\text{C/s}$), y teniendo en cuenta que la llama calienta tanto al recipiente de aluminio como al agua en el contenida, entonces

$$P = \frac{[(mc_v)_{agua} + (mc_v)_{aluminio}]\Delta T}{\Delta t} \quad (25)$$

Siendo:

	Agua	Aluminio
$C_v \text{ (J/g}^\circ\text{C)}$	4,184	0,895
$m \text{ (g)}$	100	55,7

Tabla 3-1 Valores de calor específico y la masa del recipiente y su contenido

Se obtiene el valor de la potencia del mechero $P \approx 28W \pm 1W$, lo que se puede expresar en unidades de energía por unidades de tiempo como $P \approx 27,9J/s$.

3.1.2 Medición de la energía mecánica generada por este motor

Para calcular el trabajo mecánico máximo realizado por el motor de Stirling se usa el programa de análisis de videos y construcción de modelos; tracker.jar, que permite el seguimiento manual y automático de objetos con superposición de la posición, velocidad y aceleración. Ofreciendo múltiples opciones de calibración; tales como, medida, puntos de calibración y/o origen corrido. Además tiene diferentes herramientas para medir fácilmente la posición y realizar análisis de datos que incluyen ajuste de cuervas. El montaje experimental usado en la experiencia se muestra en la figura 3-2.

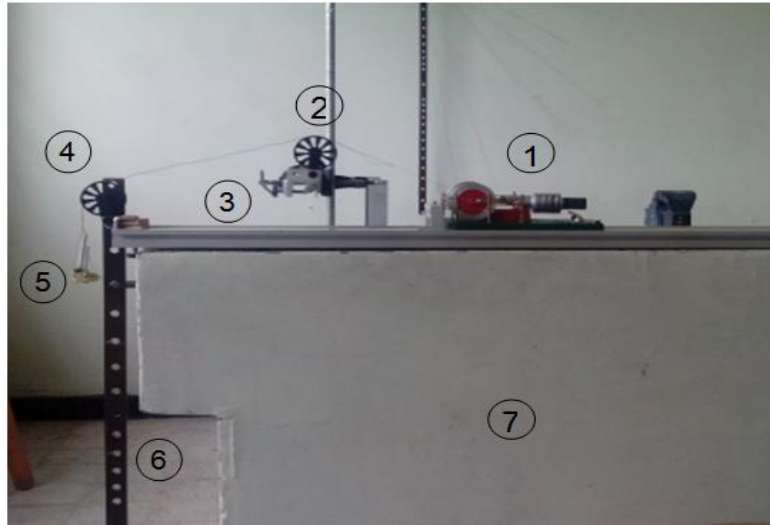
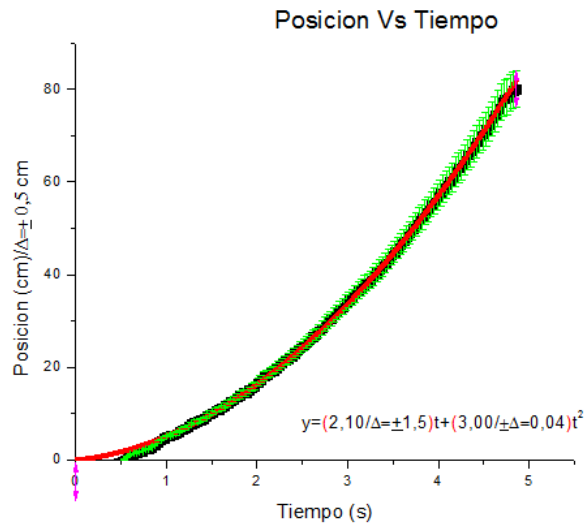


Figura 3-2 Montaje experimental para calcular el trabajo dado por el motor de Stirling

1. Motor de Stirling
2. Soporte Universal
3. Polea central
4. Polea del extremo izquierdo
5. Masa
6. Regla referencia

De acuerdo con la figura 3-2 se sujeta una cuerda en la polea que se encuentra en el cigüeñal del motor (1) y que pasa por los puntos (3) y (4) representados en el gráfico, a una masa que se encuentra en el suelo. Se le da un impulso al motor en una de las ruedas de derecha a izquierda, de tal forma que el cuerpo sea elevado hasta la parte superior del mesón. La altura que se toma como patrón de referencia para el ascenso de la masa es de un metro y se estima que el error esta dado por $\Delta = \pm 0,5cm$

Con ayuda del montaje se tomaron varios videos, para cada uno de los cuales se vario la masa de ascenso. Los resultados obtenidos para las masas de 6.1g, 11g, 16g, y 20g se muestran en las graficas 3-2 a 3-10

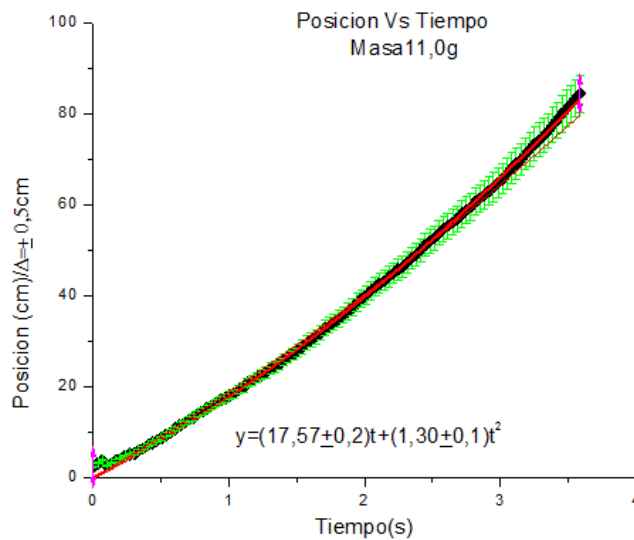


Gráfica 3-2 Ascenso de la masa de 6.1g en función del tiempo. El ajuste en este caso es de tipo parabólico.

De la gráfica 3-2 se observa que la masa se encuentra acelerada con un valor de $(6,0)\text{cm/s}^2$. La velocidad del cuerpo esta dada por:

$$v_f = (2,10 \pm 1,5) \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right) + (6,0) \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}\right) t \tag{26}$$

Se experimenta con un segundo cuerpo donde el valor de la masa es $m=11,0\text{g}$ para lo que se obtiene un ascenso representado en la gráfica 3-3

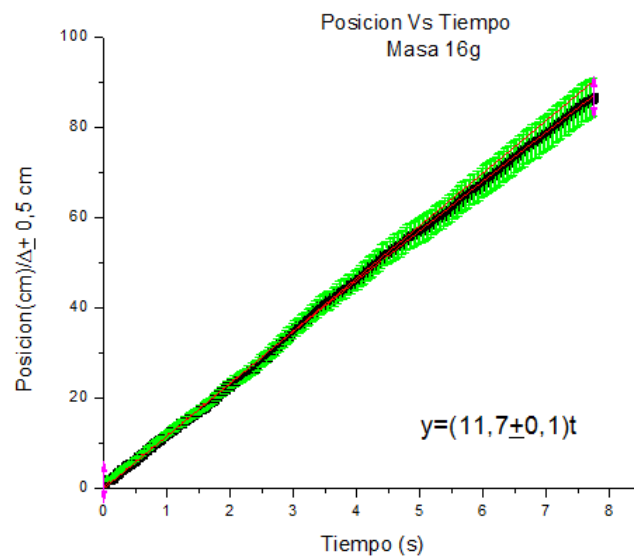


Gráfica 3-3 Comportamiento de la posición de la masa de 11.0g en función del tiempo. El ajuste en este caso es de tipo parabólico

En este caso se puede observar que la masa se encuentra acelerada (la aceleración en este caso disminuye comparada con la aceleración de la masa de 6.1g), con un valor de $a = (2,6 \pm 0,1)(\text{cm}/\text{s}^2)$. La velocidad final del cuerpo está dada por:

$$v_f = (17,6 \pm 0,2) \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right) + (2,6 \pm 0,1) \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}\right) t \quad (27)$$

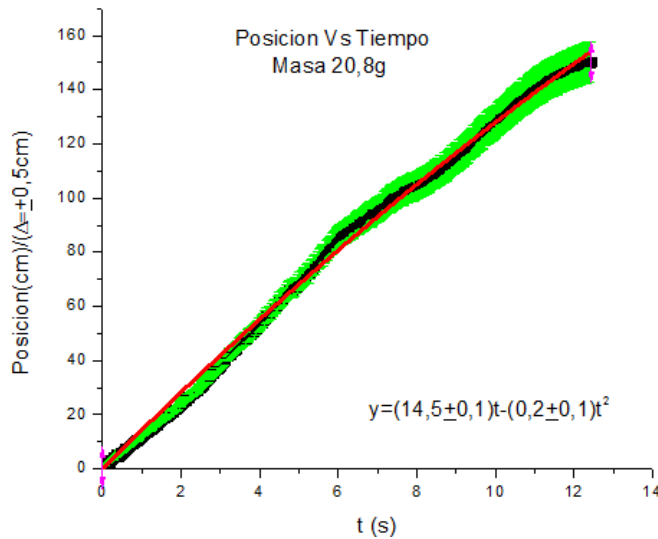
En esta secuencia, se experimenta nuevamente con un cuerpo de masa $m = 16\text{g}$, obteniendo como resultado la variación de la posición representada en la gráfica 3-4



Gráfica 3-4 Posición de la masa de 16g vs tiempo. El ajuste en este caso es de tipo parabólico

Se observa en la gráfica 3-4, que el cuerpo asciende con una velocidad constante de $V = (11,7 \pm 0,1)(\text{cm}/\text{s})$ por lo tanto la aceleración es $a = 0$

Para finalizar, se experimenta con una masa $m = 20,8$. En la gráfica 3-5, se muestra el comportamiento del cuerpo en función del tiempo.

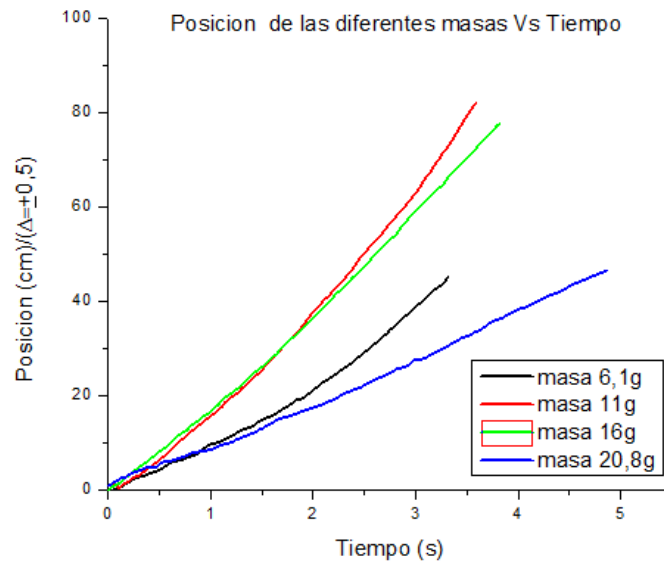


Gráfica 3-5 Posición de la masa de 20,8g en función del tiempo. El ajuste en este caso es de tipo parabólico

La masa $m=20,8g$ se encuentra desacelerada, esto se evidencia en la gráfica 3-5, en la que el valor de la aceleración es negativo es $a=(-0,4 \pm 0,1)(cm/s^2)$. La velocidad final del cuerpo está dada por:

$$v_f = (14,5 \pm 0,1) \left(\frac{cm}{s}\right) - (0,4 \pm 0,1) \left(\frac{cm}{s^2}\right) t \tag{28}$$

Comparando el movimiento de subida para las cuatro masas, se aprecia en la gráfica 3-6, que el tiempo de $m=6,1g$ es el mas pequeño, lo que significa que el cuerpo asciende con la mayor aceleración de las cuerpos. Para $m=11,0g$ el tiempo de subida supera los 3,5s, esto implica que la aceleración disminuyó con respecto al primer objeto. Para el cuerpo de $m=16,0g$ la velocidad es constante y el tiempo de ascenso es muy similar al de la masa anterior. Por último, para $m=20,8g$, alcanza un tiempo estimado cerca de de los 5s, esto significa que el ascenso es el más prolongado con aceleración negativa.



Gráfica 3-6 Posición para cada una de las masas utilizadas en función del tiempo.

A partir de las ecuaciones de la cinemática, se puede entender el significado físico de las gráficas. Es bien sabido que cuando un cuerpo experimenta una aceleración constante, la ecuación que relaciona la posición con respecto al tiempo es:

$$y = y_0 + v_0 t \pm \frac{a}{2} t^2 \quad (29)$$

En la gráfica 3-2 se observa que el ajuste obtenido corresponde a la ecuación (29), con una aceleración positiva de aproximadamente $a \approx 6,00 \text{ cm/s}^2$. En otras palabras la masa 6,1g se mueve aceleradamente.

La posición de la masa de 11g, en función del tiempo se observa en la gráfica 3-3, nuevamente el movimiento es acelerado, y en este caso la aceleración es aproximadamente de $a \approx 2,6 \text{ cm/s}^2$.

La posición en función del tiempo para la masa de 16g, se observa en la gráfica 3-4 y en este caso el comportamiento es de tipo lineal, es decir que la masa se mueve con rapidez constante de $v \approx 11,7 \text{ cm/s}$. Lo que indica que la fuerza neta en este caso es cero, y por tanto la fuerza realizada por el motor es igual al peso de la masa, es decir 15680 Dinás.

Según la definición de potencia, esta es la cantidad de trabajo realizada en unidad de tiempo, que a su vez se puede expresar como el producto de la fuerza y la velocidad, para lo que se tiene:

$$P = Fv \quad (30)$$

Conociendo la fuerza a la que se mueve la masa a velocidad constante, se calcula que la potencia suministrada por el motor $P=0,01834W$ ó también se puede expresar como $P=18,34mW$.

La gráfica 3-5 muestra el comportamiento acelerado al igual que la gráfica 3-2 y 3-3, con la diferencia que en este caso la aceleración es negativa (frenado) ($a \approx -0,4cm/s^2$), lo que significa que para la masa de 20,8g ésta hace trabajo sobre el motor. De los resultados anteriores se deduce que para la masa de 16,0g el motor emplea toda su potencia para aumentar la energía potencial del cuerpo y no su energía cinética.

3.1.3 Medición del momento de inercia del motor de Stirling

Un modelo del cigüeñal del motor de Stirling se representa en la figura 3.3



Figura 3-3 Cigüeñal y la polea del motor de Stirling

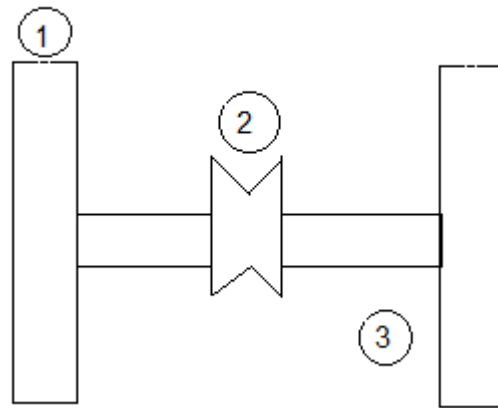


Figura 3-4 Esquema del cigüeñal del motor de Stirling

1. R , Radio del Volante
2. r , Radio de la polea
3. R^* , radio del eje

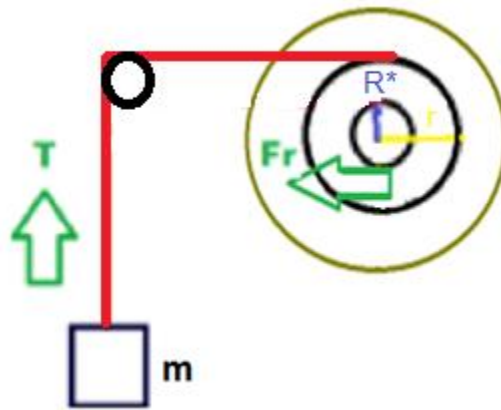


Figura 3-5 Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre el volante del motor de Stirling

T , Tensión de la cuerda

M , Masa del cuerpo

F_r , Fuerza de fricción

De acuerdo a la figura 3-5 se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\sum f = mg - T = ma \quad (31)$$

$$\sum \tau = TR - rf_r = I \frac{a}{R} \quad (32)$$

De la ecuación (32) se despeja la tensión para lo que se obtiene:

$$T = I \frac{a}{R^2} + \frac{r}{R} f_r \quad (33)$$

Ahora, reemplazando la ecuación (33) en (31) se obtiene que la aceleración de caída de la masa m , está dada por:

$$a = \frac{mg - \frac{r}{R} f_r}{\left(m + \frac{I}{R^2}\right)} \quad (34)$$

También se puede encontrar el valor de la aceleración de caída en función del camino recorrido y el tiempo empleado si el cuerpo parte del reposo. Esta es:

$$h = \frac{a}{2} t^2 \quad (35)$$

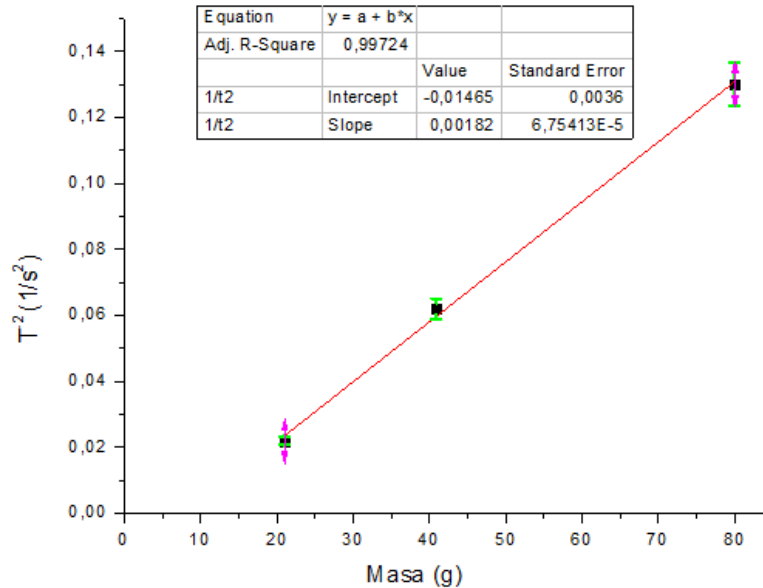
De la ecuación (35) se deduce que la aceleración debe ser:

$$a = \frac{2h}{t^2} \quad (36)$$

Ahora igualando la ecuación (34) y (36) y asumiendo que la masa del cigüeñal es mucho más grande que la masa acelerada $I/R^2 \gg m$, se obtiene:

$$\frac{1}{t^2} = \frac{R^2 g}{2hI} m - \frac{rf_r R}{2hI} \quad (37)$$

La medida se realiza enrollando un hilo en la polea que se encuentra en el cigüeñal del motor de Stirling (ver figura 3-3 y 3-4), simulando el movimiento de un “yoyo”, halando luego con una masa atada al otro extremo, que se deja caer en consecuencia se mide diferentes tiempos para masas de 21g, 40,9g y 80g, a una altura de $h=151\text{cm}$ y sabiendo que: $R=12,5\text{mm}$, $r=5\text{mm}$ y $R^*=2,3\text{mm}$. En consecuencia se grafica el inverso del tiempo al cuadrado en función de la masa, obteniendo la siguiente gráfica



Gráfica 3-7 Inverso del tiempo cuadrado en función de la masa

De la ecuación (37) y a partir del ajuste obtenido de la gráfica 3-7 se tiene que:

$$\frac{1}{t^2} = (0,00182 \pm 7 * 10^{-5})m - (0,0146 \pm 3 * 10^{-4}) \quad (38)$$

De lo que se concluye que el momento de inercia del motor de Stirling es de $I \cong 446 \text{ g} * \text{cm}^2$ y la fuerza de fricción es de $f_f \cong 17000 \text{ gcm/s}^2$

3.1.4 Energía del motor de Stirling

En esta sección se establece un balance energético, a partir de la energía que utiliza el motor para su propio movimiento, la energía disipada por fricción y la energía que se invierte para elevar el cuerpo. Para lo que se hace los cálculos de cada una de estas, según las condiciones que se presentan a continuación.

- **Energía cinética rotacional en condición de vacío**

Por medio de un estroboscopio se determinó que la frecuencia con que gira el motor libremente (sin ninguna adaptación), es de 14 rev/s, esta información permite determinar la energía rotacional, el cual está definido por:

$$E_{Rot} = \frac{I}{2} \omega^2 \quad (39)$$

$$E_{Rot} = \frac{I}{2} (2\pi f)^2 \quad (40)$$

Remplazando en la ecuación (40) esta frecuencia y el momento de inercia encontrado en la sección anterior, se deduce que la energía de rotación del motor, es de 1724516.76 erg ó 172mJ. Del teorema del trabajo se concluye que el motor utiliza esta cantidad de energía para ponerse en movimiento.

- **Energía cinética rotacional con masa acoplada**

Experimentalmente se encontró que el motor gira a velocidad constante para el caso en el que cuelga la masa $m= 16g$, bajo esta condición, la frecuencia estimada de rotación es $f = 3,7 \pm 0,1 \text{ Hz}$. Este valor se halló al calcular el número de vueltas que da el hilo en un tiempo $t=8,5s$, para 1m de altura.

Una vez que se tiene el valor de la frecuencia del motor bajo la condición del acoplamiento de la masa, se remplazan los valores en la ecuación (40), y se tiene que la energía de rotación es de: $E_r = 12mJ$

- **Energía transferida al la masa**

Como se ha mencionado anteriormente, la masa asciende a una velocidad constante $v=11,7 \text{ cm/s}$ una altura $h=1m$, por lo tanto la energía de la masa está dada por la ecuación (41)

$$E_t = \frac{1}{2} mv^2 + mgh \quad (41)$$

Remplazando los valores se tiene que esta energía es $E_m = 157mJ$

• Energía disipada por fricción

En la sección 3.1.3 se encontró que la fuerza de fricción para el motor es $f_f = 17000 \text{ Dinás}$. Según este valor es posible encontrar la energía disipada, según la ecuación (42) se tiene que:

$$P_{disipada} = \frac{E_{disipada}}{\Delta t} = r f_f \omega \quad (42)$$

Retomando los valores de las variables de tiempo, frecuencia y radio de la polea, (para el caso cuando el motor eleva la masa a velocidad constante) expuesto anteriormente, se encuentra que la energía disipada es $E_d = 1,2 \text{ mJ}$

Haciendo un balance energético entre las energías del rotor, disipada y la masa se tiene:

Energía del rotor en vacío mJ	Energía del rotor con masa acoplada de 16g mJ	Energía de la masa de ascenso mJ	Energía disipada con masa acoplada de 16g mJ
$172 \pm 0,3$	$12 \pm 0,3$	$157 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,3$

Tabla 3-2 Balance del gasto energético del motor energético en vacío y acoplado a la masa de 16g

De acuerdo a la tabla 3-2 se concluye que la energía que utiliza el motor cuando se mueve libremente es de 172mJ, mientras que cuando el motor se encuentra adaptado para elevar el cuerpo invierte tan solo 12mJ para su movimiento, 157 mJ para elevar la masa y 1,2mJ se disipa por fricción. .

3.1.5 Eficiencia mecánica del motor de Stirling

Se sabe que todas las máquinas que efectúan trabajo, tiene una parte de la energía aportada que se pierde por fricción o alguna otra causa. En esencia la eficiencia mecánica es una medida de lo que se obtiene a cambio de lo que se aporta, es decir el trabajo útil producido en comparación con la energía aportada. Por lo que está dada por:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (43)$$

Retomando la información anterior, se encontró que la potencia suministrada por la llama al motor $P_{in}=27,9W$ y la potencia de salida $P_{out}=18mW$. De lo que se obtiene que la eficiencia es de

$$\eta = 0.06\%:$$

De lo que se puede concluir que la eficiencia del motor de Stirling caracterizado es demasiado baja, lo que implica que su utilidad sólo puede ser de tipo demostrativo en el aula de clase. Es razonable considerar que la mayor cantidad de la potencia de entrada se utiliza en el calentamiento del motor, ya que éste tarda alrededor de 5 minutos en iniciar el movimiento. Otra cantidad de energía se disipa por radiación y su valor puede ser alto, ya que la temperatura del desplazador alcanzaba los $400^{\circ}C$. Por último una pequeña cantidad de energía, se utiliza en generar sonido.

3.1.6 Acoplamiento de un motor eléctrico al motor de Stirling

Con fines puramente demostrativos se acopla un motor eléctrico al motor de Stirling, utilizando el montaje mostrado en la figura 3-6:

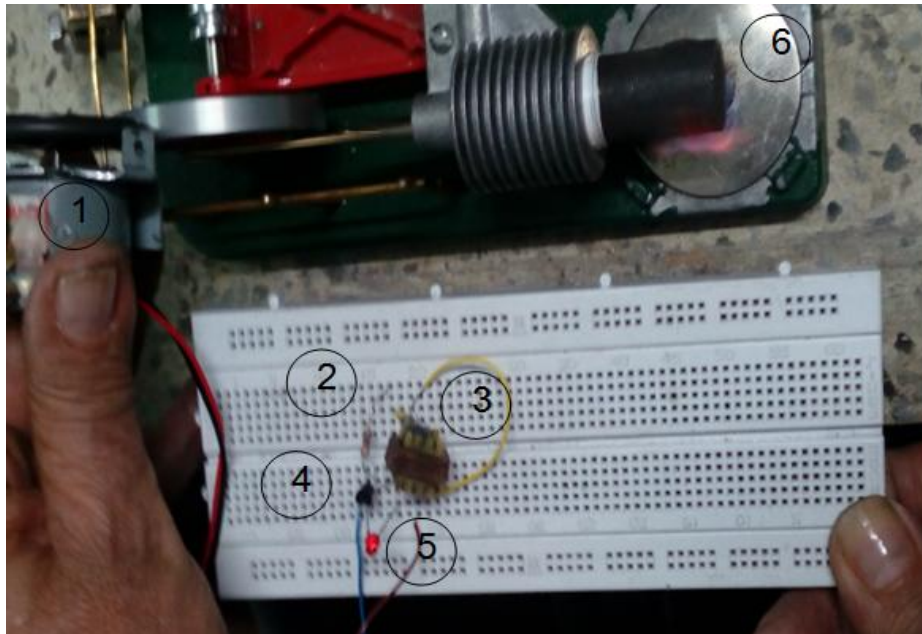


Figura 3-6 Montaje experimental de la adaptación del motor eléctrico al motor de Stirling a partir del circuito denominado “ladrón de Julios”

1. Motor Eléctrico
2. 1 Resistencia de $1K\Omega$
3. Transformador
4. Transistor
5. LED rojo
6. Motor de Stirling

Fue necesario usar el montaje denominado “Ladrón de Julios” para optimizar la conversión de la energía producida por el motor de Stirling en energía eléctrica. Para lograr esto se trasmite el movimiento a través de una polea en relación de 1:1 con el motor de Stirling. El resultado final es el encendido de un LED de color rojo

3.1.7 Medición de la energía eléctrica obtenible

La primera medición consiste en comprobar que con el circuito “ladrón de Julios” se puede encender un LED con una pila que no tiene el voltaje necesario para hacerlo directamente. Luego se reemplaza la pila por el motor eléctrico y se obtiene una señal como la mostrada en la figura 3-7

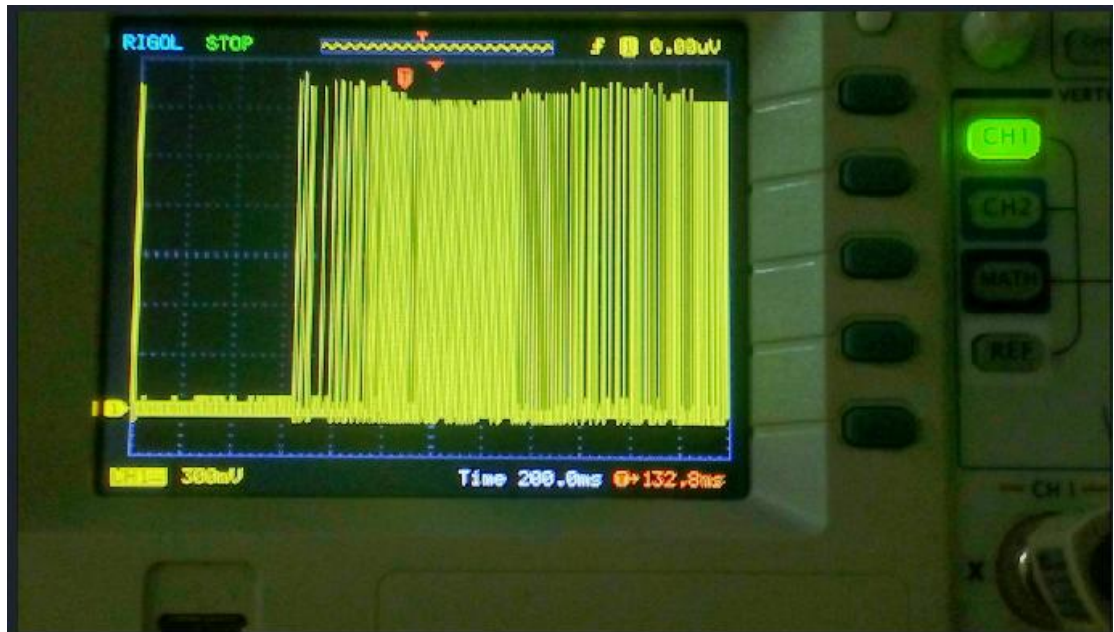


Figura 3-7 Voltaje Producido por el circuito “Ladrón de Julios”

En la figura 3-8 se observa que para el canal 1 se tiene 300mV por división, y en total son aproximadamente 6 divisiones, de lo que se estima un voltaje de alrededor de 1800mV o 1,8V, que es el voltaje necesario para encender un LED rojo. Para efecto de cuantificación se reemplaza el LED por una resistencia de 1K Ω y usando como fuente de poder el motor de Stirling se obtienen 2V.

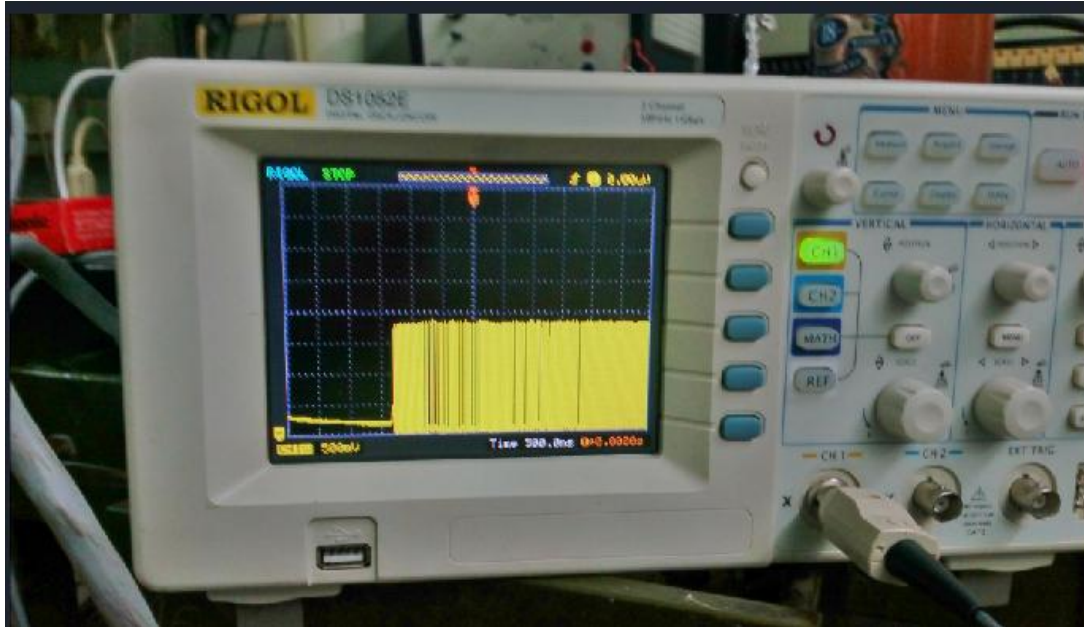


Figura 3-8 Voltaje obtenido por el motor eléctrico acoplado al motor de Stirling a partir de un ladrón de Julios, para encender un LED



Figura 3-9 Montaje Experimental por el motor eléctrico acoplado al motor de Stirling a partir de un Ladrón de Julios, encendiendo un LED

Se conoce que la potencia eléctrica disipada por una resistencia R sometida a un voltaje V está dada por:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (44)$$

De acuerdo con los valores obtenidos de voltaje (2V) y la resistencia utilizada (1K Ω) se obtiene que la potencia eléctrica producida por el motor es de 0,004w ó 4mW.

3.2 Celda de Combustible

3.2.1 Caracterización de la celda Solar *I-V*

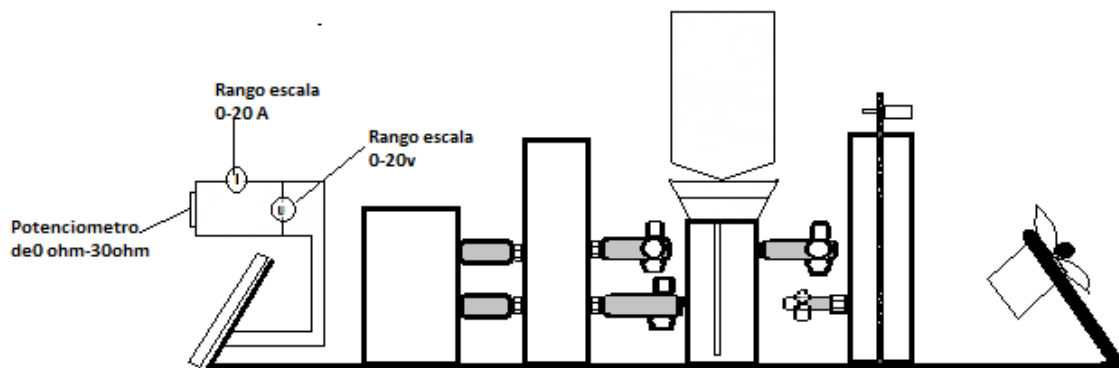
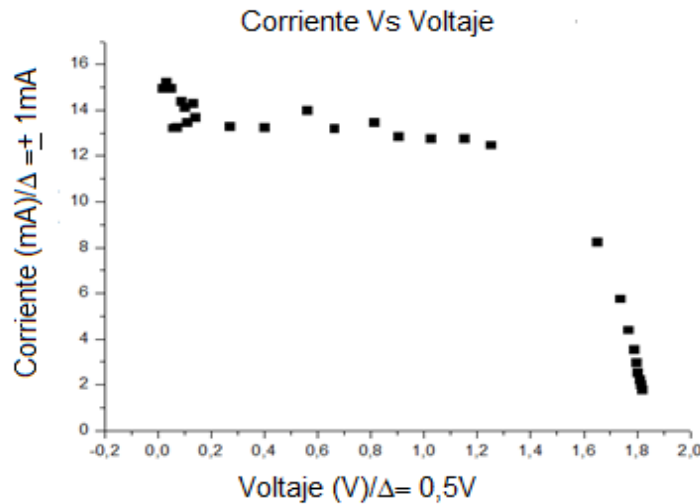


Figura 3-10 Montaje experimental usado en la caracterización de la celda solar

Para determinar las propiedades de la celda solar se mide el voltaje y la corriente, bajo iluminación con un potenciómetro conectado en serie y un voltímetro conectado en paralelo a la celda solar. Para realizar las mediciones se varía la resistencia del potenciómetro entre 0-30 Ω de lo que se obtuvieron los resultados que se muestran en la gráfica 3-8



Gráfica 3-8 Caracterización de la celda solar Corriente – Voltaje

3.2.2 Ajuste

Al observar la gráfica 3-8 se puede deducir que el ajuste que más se aproxima a la curva es una de tipo exponencial de la forma

$$y = -ae^{-bx} + c \quad (45)$$

De donde se tiene tres incógnitas constantes, a, b y c para hallar los valores de cada una de estas se plantea tres ecuaciones (46), (47) y (48)

$$y_1 = -ae^{-bx_1} + c \quad (46)$$

$$y_2 = -ae^{-bx_2} + c \quad (47)$$

$$y_3 = -ae^{-bx_3} + c \quad (48)$$

Escogiendo tres puntos experimentales tales que se cumpla la condición representada en la ecuación (49):

$$x_1 + x_2 - 2x_3 = 0 \quad (49)$$

Se soluciona el sistema de tres ecuaciones representado en las ecuaciones (46), (47) y (48),

Finalmente se encuentra el valor de la constante C dado por

$$c = \frac{y_1 y_2 - y_3^2}{y_1 + y_2 - 2y_3} \tag{29}$$

Algunos de los datos que se tienen en cuenta se muestran en la tabla 3-3

Y (corriente)	X (Voltaje)
Y ₁ = 12,85	X ₁ = 0,9
Y ₂ = 8,25	X ₂ =1,65
Y ₃ = 12,5	X ₃ =1,25

Tabla 3-3 Datos arbitrarios para calcular la constante c

Reemplazando los valores de la variable Y, mostrados en la tabla 3-3, se obtiene el valor de la constante c, haciendo la aclaración que para encontrar el valor más aproximado de c se hace un promedio de las mismas, encontrando que el valor de c promedio es:

$$\bar{c} = 13,26(\text{mA})$$

Utilizando las propiedades del logaritmo natural, se tiene

$$\ln(c - y) = -bx + \ln(a) \tag{51}$$

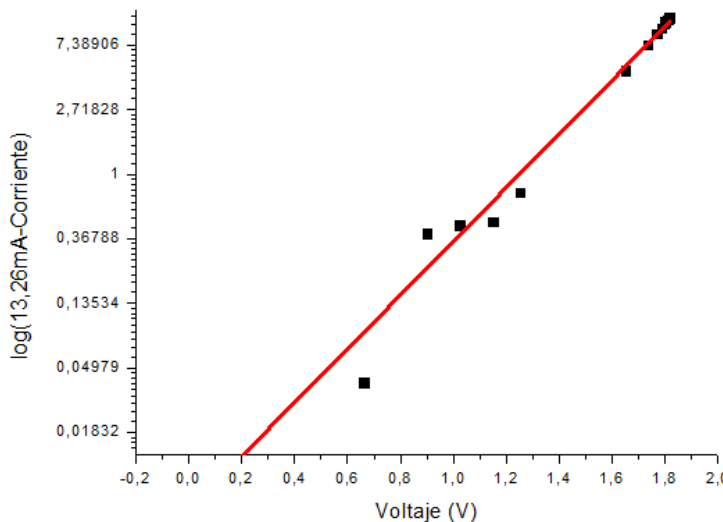
Realizando el siguiente cambio de variables:

$$Z = \ln(c - y)$$

$$\ln(a) = Q$$

$$x = X$$

Se obtiene la gráfica semi-logarítmica que se muestra a continuación:



Gráfica 3-9 Ajuste lineal de la gráfica 3-12

La ecuación del ajuste de la gráfica 3-9 se encuentra representado en la ecuación (52)

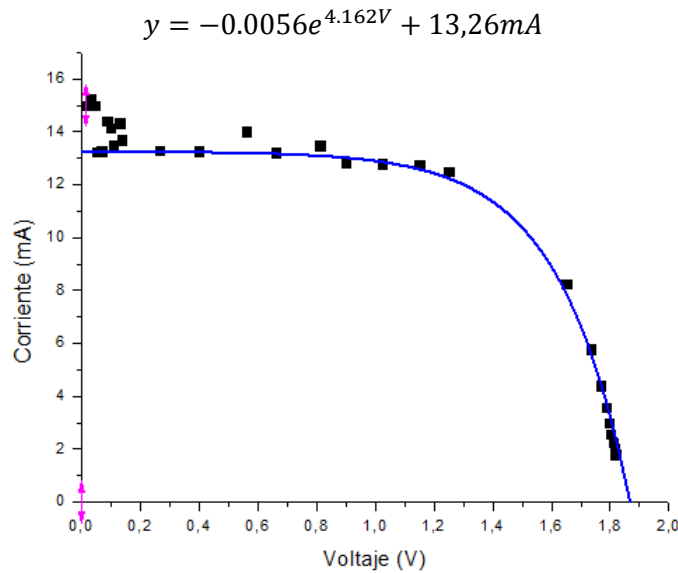
$$y = (4,2 \pm 0,2)x + (-5,2 \pm 0,2) \quad (52)$$

Realizando los cálculos respectivos a las ecuaciones (50) y (52) para encontrar las constantes se obtiene que:

$$-b = 4.2(C/J)$$

$$Q = -5.19(\text{mA})$$

Reescribiendo la ecuación (45) se tiene:



Gráfica 3-10 Ajuste de los datos representados en la gráfica 3-8

De lo anterior, se puede asociar el comportamiento de la corriente con respecto al voltaje, con la ecuación (53)

$$J = J_{PH} - J_0 \left[e^{\left(\frac{qV}{K_B T}\right)} - 1 \right] \quad (53)$$

Reorganizando se tiene:

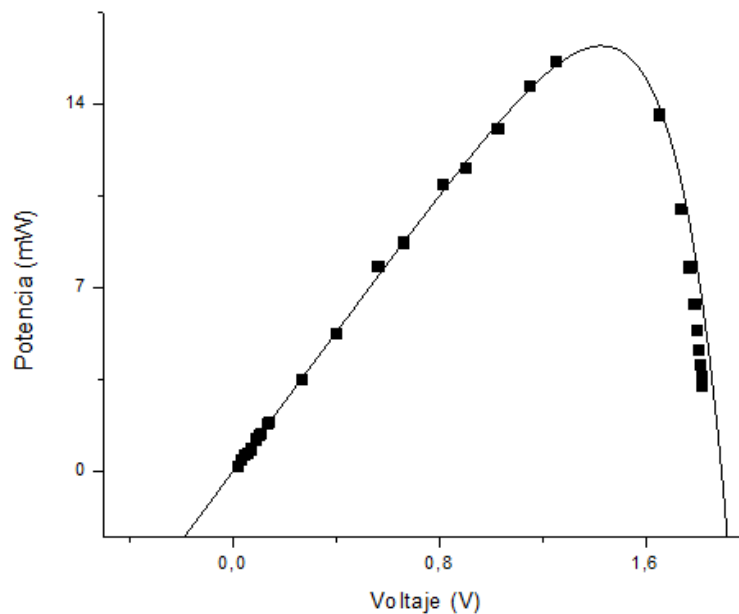
$$J = (J_{PH} + J_0) - J_0 e^{\left(\frac{qV}{K_B T}\right)} \quad (54)$$

▪ Punto de Máxima Potencia PMP

La potencia suministrada por la celda corresponde al producto de la corriente (I) y el voltaje (V). Lo que se puede expresar en la ecuación (55)

$$P = V_0(I_{ph} - I_0 - I_0 e^{\alpha V}) \quad (55)$$

En la gráfica 3-11 se observa la variación de la potencia en función del aumento del voltaje



Gráfica 3-11 Variación de la potencia según el voltaje

Para este caso, haciendo una estimación del valor de la potencia máxima, se tiene que el voltaje de potencia es máxima está entre 1,28V y 1,68V.

Se conoce el valor de la corriente máxima, de lo que se obtiene el punto de máxima potencia el cual se encuentra definido por

$$PMP = V_M I_M \quad (56)$$

$$PMP = (16,30mA)(1,43V)$$

$$MPP = 23,30mW$$

- **Factor de llenado**

Por definición el factor de llenado (FF) está definido por:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (57)$$

Observando los valores de la Gráfica 3-10 se tiene que $I_{sc} = 1,83\text{mA}$ y $V_{oc} = 13,95\text{V}$. Reemplazando estos valores en la ecuación (57) se obtiene que el Factor de llenado es:

$$FF = \frac{23,30\text{mW}}{(1,43\text{v})(16,30\text{mA})} \quad (58)$$

$$FF = 0,69$$

- **Eficiencia**

La eficiencia en una celda solar es el porcentaje de potencia de la luz solar total absorbida que convertida en energía eléctrica. Este término se encuentra a partir de la siguiente relación:

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{in}} \quad (59)$$

Lo cual se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{K_{solar} A} \quad (60)$$

Para calcular la eficiencia, se realizaron las medidas bajo iluminación solar a las cuatro de la tarde con lo cual se toma la constante de potencia solar k como 75mW/cm^2



Figura 3-11 Medicion de la corriente de la celda expuesta a la luz sol

FF= Factor de llenado

I_{sc} = Corriente de corto circuito

V_{op} =Voltaje de circuito abierto

K_{solar} =Constante de radiacion solar

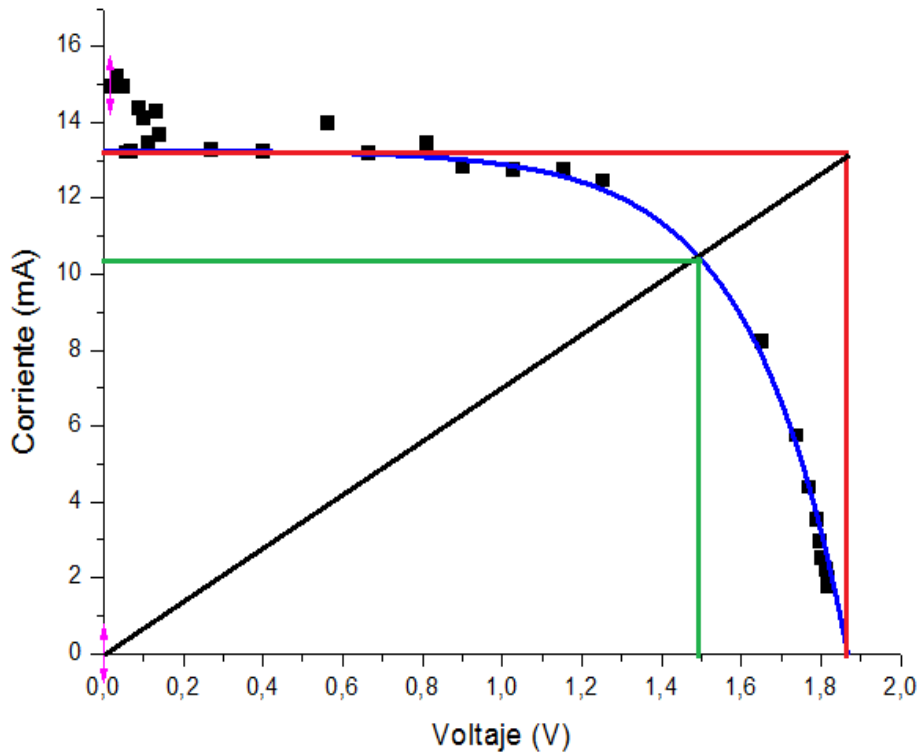
A= Area de la celda

Sabiendo que el area de la celda es de 60cm^2 , la corriente de corto circuito medida fue $54.3\text{mA} \pm 0,1\text{mA}$ y El voltaje de circuito abierto de $1.97\text{V} \pm 0,1\text{V}$. Se remplazan los valores especificados en la ecuacion (60), se obtiene que la eficiencia de la celda es:

$$\eta = \frac{0,69 * 54,3\text{mA} * 1,97\text{V}}{75\text{mW}/\text{cm}^2 * 60\text{cm}^2}$$

$$\eta = 1.64\%$$

Método Gráfico para calcular el factor de llenado



Gráfica 3-12 Método gráfico para calcular el factor de llenado

Se sabe que toda fuente de energía (pila, celda solar, de combustible, dinamo, ...etc) genera voltaje y genera corriente pero la potencia útil, depende de la resistencia que se le conecte. En cada una de las fuentes se puede tener voltaje sin corriente (resistencia infinita) o corriente sin voltaje (resistencia cero). Siendo en estos casos la potencia suministrada igual a cero

Existe por tanto una resistencia que garantiza que la potencia suministrada sea máxima y a esa potencia la llamamos potencia real. Ahora, existe una potencia no real pero calculable como la máxima potencia que se obtendría en el caso que el voltaje no se cayera a cero al hacer corto ni la corriente desapareciera cuando no hay conexión. A eso le llamamos potencia nominal.

La potencia real (PR) es menor que la nominal (PN) y su razón o cociente se le llama factor de llenado (FF) o factor de transferencia (FT)

$$FF = \frac{P_R}{P_N} \quad P_R < P_N \quad (61)$$

El método gráfico permite calcular el factor de llenado a partir de la gráfica de caracterización de corriente y voltaje, Este consiste inicialmente en esbozar un rectángulo por encima de la función, que represente la potencia nominal, luego se traza una recta desde el origen, hasta el vértice del extremo opuesto del rectángulo, (esta recta representa la resistencia interna de la fuente).

A partir del punto en el que corta la recta con la curva de caracterización se hace nuevamente el bosquejo de un rectángulo que representa la potencia real.

El método gráfico se ve representado en la grafica 3-14 donde la potencia nominal esta representada por el rectángulo color rojo circunscrito a la curva I-V,; la recta que une el extremo del rectángulo con el origen es de color negro y por último el rectángulo de la potencia real es de color verde.

Los valores que obtuvieron a partir del método gráfico son :

$$FF = \frac{15,53}{24,49} = 0,63 \quad (62)$$

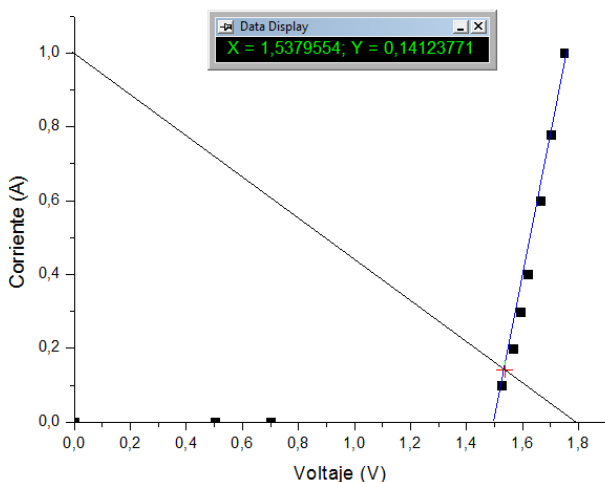
Si se compara las ecuaciones (62)y (58) se observa que los resultados son aproximados, con un margen de error del 1%, lo que significa que el método gráfico se acerca bastante.

Este método fue desarrollado por el Profesor Hernàn Sánchez en su tesis doctoral .

3.2.3 Producción de hidrógeno en el electrolizador

▪ Caracterización Corriente – Voltaje del electrolizador

Inicialmente se pone en funcionamiento el electrolizador durante aproximadamente un minuto, luego se desconecta durante otro minuto y a continuación se reconectan nuevamente. Variando el voltaje desde 1.9V hacia abajo; finalmente se registra, los valores de la corriente, con lo que se obtienen los siguientes resultados:



Gráfica 3-13 Caracterización corriente-voltaje del electrolizador

El objetivo principal de la caracterización corriente –voltaje del electrolizador es encontrar el voltaje mínimo para la producción de hidrógeno, de lo que se puede observar en la gráfica 3-15 que la recta de color azul corta en el eje de las abscisas el punto aproximado 1,49V; de lo que se deduce que a partir de este valor es el voltaje mínimo para la descomposición del agua, para valores menores no se observa ninguna reacción química para la electrólisis. Del mismo modo, para corriente bajas el comportamiento de la curva es lineal, debido a que las pérdidas dominantes en el electrolito son óhmicas.

▪ **Eficiencia del electrolizador a partir de la primera ley de Faraday**

La primera ley de Faraday describe la relación existente entre la corriente aplicada al electrolizador y la producción de gas resultante. De allí se deduce que la eficiencia del electrolizador es la razón entre el volumen calculado teóricamente en función de la corriente y el volumen medido experimentalmente. Esto se puede reescribir según las ecuaciones (16) y (17) del anterior capítulo. Para encontrar el volumen de la producción de hidrógeno, se conecta el electrolizador a voltaje y corriente constantes durante aproximadamente 10 minutos; en este caso 1A y 1.8V a fin de limpiar los electrodos.

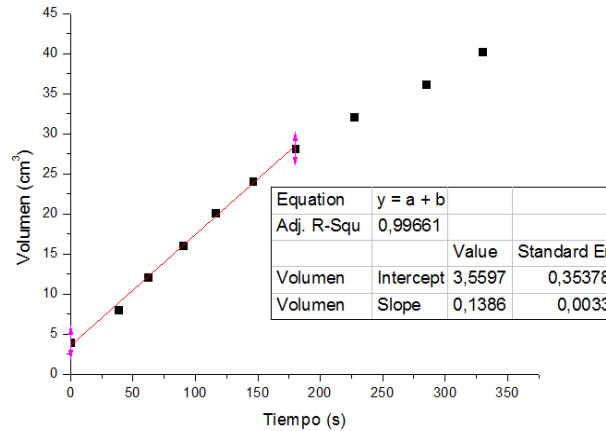
Para iniciar la toma de datos se llena el tanque principal con agua destilada y se sobrepone a este tanque un cilindro que permita almacenar el gas del hidrógeno producido.

Finalmente se conecta y fija la corriente a 1A y se da inicio al registro del volumen producido en función del tiempo, obteniendo los siguientes datos:

Produccion	Tiempo (s)
8,04	38
12,06	62
16,08	90
20,10	116
24,12	146
28,14	180
32,16	227
36,19	285
40,21	330

Tabla 3-4 Producción de hidrogeno en el tiempo a una corriente fija de 1A y 1,8V

A partir de la tabla 3-4 se calcula un promedio del caudal de la producción de hidrógeno, de lo que se obtiene:



Gráfica 3-14 Tasa de cambio del volumen en la generación de hidrógeno experimental

De la curva experimental el valor la pendiente de es:

$$\frac{\Delta V_{H_2}}{\Delta t} (\text{Experimental}) = 0.139 \pm 0,033 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$\text{Tasa teórica de generación de hidrógeno} = 0,16 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Esto significa que el electrolizador produce el 83% de hidrógeno esperado o lo que es equivalente, que el 17% de la energía eléctrica suministrada se pierde en el proceso de descomposición del agua.

Por otra parte la eficiencia en energía puede ser determinada por la razón entre la energía potencialmente utilizable y la energía consumida. En otras palabras la energía térmica almacenada en el hidrógeno y la energía eléctrica necesaria para producirlo.

Remplazando los valores correspondientes a la tabla 3-4 en las ecuaciones (18) y (19) se obtiene:

$$\eta = \frac{0.139 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} (12745 * 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3})}{1.8 \text{ V} * 1 \text{ A}} = 0.98$$

La eficiencia energética es de un 98%. Esto significa que tan solo un 2% de la energía utilizable es disipada al ambiente en forma de calor, el resto es utilizada en la descomposición del agua destilada. Este tipo de eficiencia es calculado a partir de las reacciones químicas inherentes en el combustible o en otras palabras la energía de Gibbs.

3.2.4 Uso del Hidrógeno en la celda de combustible

▪ Caracterización Corriente – Voltaje en la celda de combustible

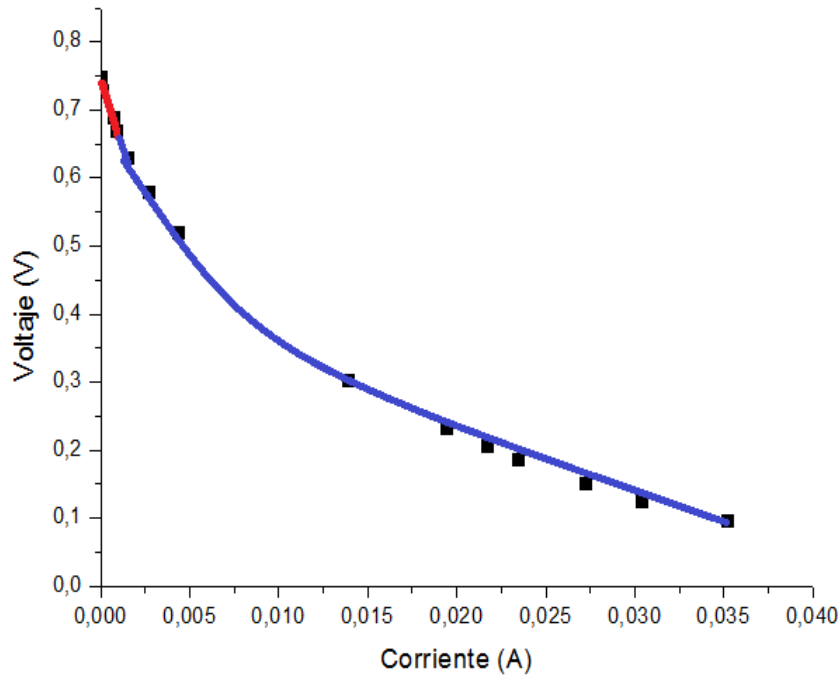
Cuando están separados el hidrógeno (combustible) y oxígeno (oxidante) a temperatura ambiente, tienen un comportamiento estable, sin embargo si se suministra suficiente energía, ellos explotan violentamente. Esta reacción ocurre a una temperatura de 580°C, en ocasiones puede ocurrir a temperaturas inferiores a ésta. En el caso del trabajo realizado en el laboratorio, las pruebas fueron realizadas a temperatura ambiente y presión atmosférica. Autores, tales como; Marco Vinicio Felix Lerma, Juan Jose Contreras Pacheco, Rigoberto Gonzalez Martinez, Jose Senen Guzman y de Santiago comentan en su artículo “Diseño de electrolizador con eficiencia óptima para la generación de hidrógeno industrial” que a partir de las condiciones ideales presentadas anteriormente, se esperaría que la eficiencia de la celda de combustible caracterizada en el laboratorio fuera aproximadamente de 0,83.

En situaciones reales la eficiencia de la celda es menor que en el caso ideal, en consecuencia los diferentes tipos de disipación de energía (procesos irreversibles), se deben a situaciones tales como; energía de activación¹, pérdidas óhmicas y pérdidas por transporte de masa.

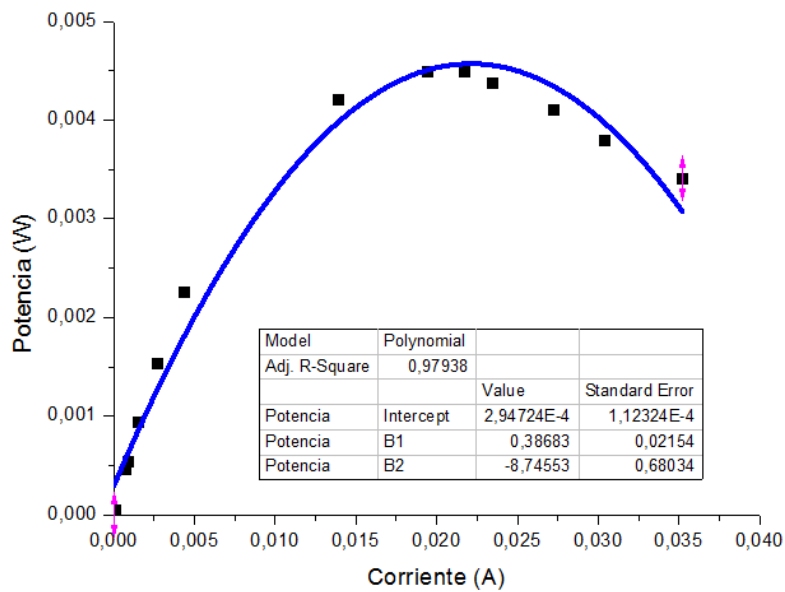
De la gráfica 3-17 se puede decir que el rango de las pérdidas por activación en la celda trabajada en el laboratorio se encuentra aproximadamente en un voltaje de 0,75 V, de acuerdo a la literatura la región de pérdidas por resistencia se encuentra en el intervalo 0,09V -0,75V. La región de pérdidas por transporte de masa se espera para valores de voltaje inferiores a 0,09V. En la gráfica 3-18 no

¹ La energía de activación, tanto en química como en biología, es la energía mínima que necesita un sistema antes de iniciar un determinado proceso

se evidencia de forma concreta debido a que los instrumentos utilizados no poseen la sensibilidad necesaria.



Gráfica 3-15 Característica I – V de la celda de combustible



Gráfica 3-16 Característica P – I de la celda de combustible

A partir de la gráfica 3-18 se puede afirmar que la potencia máxima de la celda de combustible es de 0,0045W lo que también puede expresarse como 4,5 mW

▪ **Comprobación de la primera de Faraday y la eficiencia de la celda de combustible**

Al igual que el electrolizador, la eficiencia de la celda combustible se calcula a partir de la razón entre el volumen de consumo teórico y el volumen de consumo real. Los resultados obtenidos en el laboratorio fueron tomados a partir del montaje experimental presentado en la sección 2.2.2, figura 2-9. En el laboratorio se conectó al ventilador en paralelo a una resistencia de 20Ω obteniendo los resultados expuestos en la tabla 3-5

Volumen Consumo	Tiempo (s)	Voltaje (V)	Corriente (A)
12,71	1800	0.36	0.01

Tabla 3-5

De acuerdo a la ecuación (17) y los datos obtenidos en la tabla 3-5 se calcula el volumen de consumo teórico

$$V_{H_2} (\text{teórico}) = \frac{\left(8,314 \frac{\text{J}}{\text{molK}}\right) (291\text{K})(0,1\text{A})(1800\text{s})}{(74642.10 \text{ Pa}) \left(96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}\right) (2)} = 3,6\text{cm}^3$$

El volumen de consumo experimental es:

$$V_{H_2} (\text{Experimental}) = 12,7\text{cm}^3$$

Por lo tanto la eficiencia es dada por la siguiente expresión.

$$\eta = \frac{3,60\text{cm}^3}{12,71\text{cm}^3}$$

$$\eta = 0.28$$

Algo de denotar es que en este caso el volumen experimental o real es mayor en relación al calculado a partir de la teoría. Lo que significa que en la práctica se consumió más el hidrógeno que el calculado para obtener la misma cantidad de energía.

Además, para calcular la eficiencia en energía se reemplazan los valores en la ecuación (19) para lo que se obtiene:

$$\eta = \frac{0,36V * 0,1A * 1800}{25 * 10^{-6}m^3 * 10800 * 10^3 J/m^3} = 0,24$$

El valor de la eficiencia energética de la celda es de 24% y el cálculo de la eficiencia a partir de la primera ley de Faraday es de 28%, de ahí que al compararlos se puede afirmar que son similares, esto es, que entre un 72% y un 76% la energía es emitida al medio ambiente y representa las pérdidas

De los elementos caracterizados del PEMPower 1 –Eco, el menos eficiente es la celda solar seguido por la celda de combustible (generación de energía a través de hidrógeno) y finalmente por electrolizador.

4. Prácticas de laboratorio

El objetivo principal de este capítulo es el diseño de dos prácticas de laboratorio para desarrollar con estudiantes de ciencias o ingeniería, involucrando los alcances que pueden ofrecer el motor de Stirling y el PEMPower 1 –Eco, teniendo en cuenta la información recolectada al momento de caracterizar los aparatos.

El material para la clase de laboratorio pretende mostrar la importancia de la enseñanza de dispositivos energéticos amigables con el ambiente, además de permitir a los estudiantes el desarrollo de habilidades de conversiones de unidades de energía cotidianos desde la misma experiencia.

4.1 Práctica de laboratorio Motor de Stirling

4.1.1 Medición de la energía mecánica que puede producir el motor de Stirling

Objetivo

Determinar el rendimiento, la energía mecánica y la potencia que puede producir el Motor de Stirling.

Conocimientos Previos

En esta práctica de laboratorio el estudiante debe profundizar y entender cada uno de los siguientes conceptos físicos.

- Fuerza de fricción
- Energía potencial gravitacional
- Energía cinética
- Movimiento uniformemente acelerado
- Movimiento rectilíneo uniforme

Materiales y Equipo

- 1 Soporte Universal.
- 2 poleas sin fricción (diámetro aproximado 5cm)
- 1 cuerda de alrededor de dos metros de longitud
- Motor de Stirling demostrativo
- Alcohol
- 4 Masas de 6g, 11g, 16g, y 20g.
- Equipo de grabación de video en cualquiera de los siguientes formatos (mov/avi/flv/mp4/wmv etc)
- Programa de análisis de video Tracker

Metodología

Esta sección se encuentra dividida en dos partes, la primera hace referencia a la explicación descriptiva para hacer el montaje experimental; la segunda describe el proceso de la recolección de los datos

- Descripción montaje experimental

Es necesario buscar un espacio en el que se puedan ubicar los elementos de laboratorio a una altura aproximada de un metro; se sugiere una mesa o escritorio con muy buena estabilidad ya que las vibraciones del movimiento del motor pueden ocasionar que el montaje no quede sujeto adecuadamente.

1. Ubique el motor de Stirling en la parte central de la superficie de donde se realizaran las mediciones; agregue suficiente alcohol en la parte del mechero del motor
2. Ubique el soporte universal a una distancia media entre el motor y la el borde de la superficie; Coloque la polea (A) sujeta al soporte
3. En el extremo de la superficie ubique la segunda polea (B) a una altura adecuada en relación a la anterior polea
4. En el eje del volante del motor de Stirling enrolle la cuerda, de tal forma que cuando el motor inicie su funcionamiento, este pueda recoger el hilo

simulando el ascenso de un yoyo. El otro extremo de la cuerda debe quedar alrededor de 3 a 5 cm por encima del suelo.

5. En el extremo de la cuerda que da al suelo sujete fuertemente la masa, de tal forma que cuando el motor inicie su funcionamiento pueda levantar la masa desde el suelo hasta la polea (B) sujeta al extremo de la superficie.

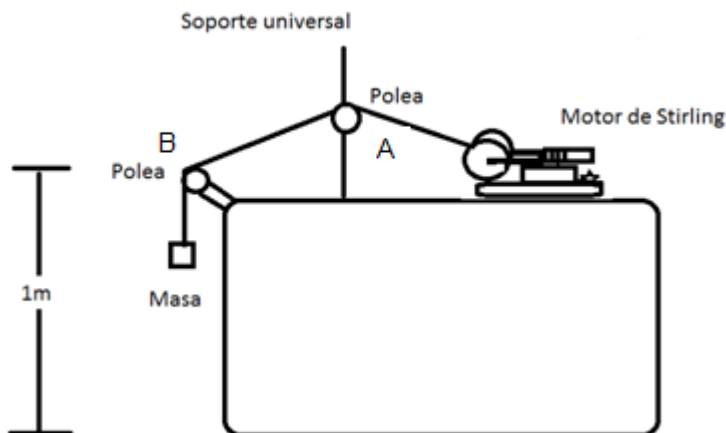


Figura 4-1 Montaje Experimental Medición de la energía mecánica del motor de Stirling

- Descripción toma de datos

Una vez se tiene hecho el montaje experimental, se da inicio a la toma de datos, para ello es necesario encender la cámara de video para registrar el ascenso de la masa ocasionado por el motor, para ello es necesario esperar a que el motor alcance la temperatura adecuada (aproximadamente 5 minutos) para darle el impulso de inicio y que este empiece a girar para que así pueda ascender la masa.

Una vez se haya realizado el registro de video para la primer masa, repetir el ejercicio utilizando los diferentes valores de masas indicados

Análisis de datos

Para el análisis de los datos es necesario tener instalado el programa TRACKER en el computador de trabajo, (ver tutorial de funcionamiento del programa, en la página oficial <http://old.dgeo.udec.cl/~andres/Tracker/>). Seguidamente encontrar

la gráficas de, posición, velocidad y aceleración, de las masas de 6g, 11g, 16g, y 20g.

Hacer el análisis de cada una de las gráficas y encontrar para cual fuerza (peso de la masa) el motor gira a velocidad constante. Calcule el trabajo realizado por este.

Hacer sus propias conclusiones sobre la potencia mecánica obtenida.

Preguntas sugeridas

¿Cómo puede utilizar el hecho que la masa sube a velocidad constante para encontrar el valor de la potencia entregada por el motor a la masa? ¿Qué concluye?

¿Qué posible ajuste haría al motor para aumentar la potencia entregada al cuerpo que realiza trabajo?

Indique situaciones cotidianas en las que usa este valor de potencia

¿Por qué es considerado el motor de Stirling como una fuente de energía renovable?

¿Para el caso de la práctica con el motor de Stirling como se relacionan entre si la potencia y eficiencia?

¿Cuánta energía de la suministrada al motor se convierte en energía mecánica?

¿Qué se puede afirmar de la energía “no convertida” en mecánica? ¿donde esta ella?. Discuta este resultado.

4.1.2 Medición de la energía eléctrica producida por un motor eléctrico acoplado al motor de Stirling

Objetivo

Generar energía eléctrica para encender un LED a partir de la energía mecánica producida por el Motor de Stirling. Además hallar la conversión de unidades de potencia a energía y sus posibles aplicaciones.

Conocimientos Previos

Energía mecánica

Energía Eléctrica

Potencia

Circuito eléctrico en serie y paralelo

Circuito ladrón de Julios.

Materiales

- 1 Motor eléctrico de 12 V
- Motor de Stirling demostrativo
- 1 polea sin fricción
- 2 cables delgados del mismo grosor y diferente color
- Varios cables pequeños
- Transistor 2N2222
- Núcleo de ferrita (Esta se puede obtener de equipos PC que ya no funcionan)
- 4 Diodo LED rojo, verde, amarillo y naranja
- Resistencia de 1K
- Osciloscopio

Metodología

En esta práctica de laboratorio el objetivo principal es la conversión de energía mecánica en eléctrica, sin embargo estará dividida en dos partes. Una de ellas corresponde a la construcción del circuito conocido comúnmente como ladrón de julios. La otra parte está enfocada en la observación de la conversión de energía.

- Primera parte (Construcción del circuito ladrón de Julios)
 1. Se estiran los dos alambres para luego introducirlos en el núcleo de ferrita y enrollándolos alrededor de este hasta cubrirlo totalmente; el enrollamiento debe quedar muy compacto.
 2. Al finalizar de enrollar los alambres, al núcleo de ferrita deben quedar cuatro puntas. Remueva el aislante de cada punta.
 3. Para sellar las puntas de los cables se deben unir dos puntas de cable de diferente color. (si los dos cables son rojo y azul, se debe unir una de las puntas sobrantes del rojo con una de las puntas sobrantes del azul). La unión de los dos cables se conecta al ánodo del motor eléctrico
 4. Realice el montaje de la figura 4.2 donde la pila se reemplaza por el motor.

Para ampliar la información acerca de la construcción de un ladrón de julios puede consultar la página web:

<https://www.taringa.net/posts/hazlo-tu-mismo/18538702/Ladron-de-Joules-con-Transistor-PNP.html>

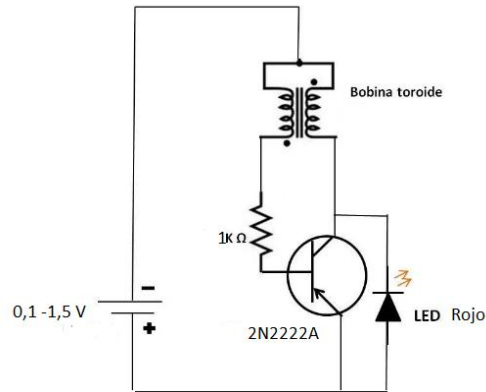


Figura 4-2 Esquema del circuito ladrón de julios

- Segunda parte (adaptación del motor eléctrico al motor de Stirling)
 1. Una vez que se tiene el montaje del circuito ladrón de julios se conecta a la polea el eje central del inducido del motor. Es necesario adaptarle a la polea un buje para no tener inconvenientes con la fricción.
 2. Se debe preparar el motor de Stirling por alrededor de 5 minutos de tal forma que se encuentre a la temperatura ideal para su funcionamiento.
 3. Se sostiene el motor eléctrico justo en el volante del motor de Stirling de tal forma que el movimiento del volante haga girar el motor eléctrico produciendo así la energía necesaria para encender el LED.

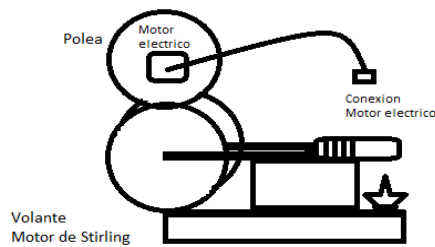


Figura 4-3 Esquema del montaje Motor eléctrico y Motor de Stirling

4. Cuando se encienda el LED a partir de la energía producida por el motor de Stirling conecte un osciloscopio o un voltímetro y mida el voltaje que este está generando.

5. Por último reemplace el LED por una resistencia y determine voltaje y corriente con diferentes valores de R. (al menos 5 valores)

Análisis de datos

Una vez que se ha encendido el primer LED (se recomienda iniciar con el de color rojo) se hace la medición de voltaje, repita este ejercicio el mayor número de veces posible variando el color del LED.

En el momento que se tienen los datos de laboratorio se grafica I-V según el valor de R. De igual forma se grafica P-I

A través del análisis de datos encuentre la potencia máxima que puede generar el motor de Stirling en la conversión de energía mecánica a energía eléctrica

Preguntas sugeridas

¿Que concluye sobre la conversión de energía mecánica a energía eléctrica?

A partir de la potencia eléctrica hallada en el laboratorio ¿A Cuántos metros se podría levantar un cuerpo de 6g con rapidez casi cero (muy lentamente)?

¿Qué energía se necesita para enviar una pelota de beisbol de 50g al espacio exterior? Asuma que la altura es de 100000m. Compare esta energía con la que una casa habitual consume a diario.

4.2 Prácticas de laboratorio del PEMPower 1 –Eco

4.2.1. Caracterización de la celda solar

Objetivo

Encontrar el punto de máxima potencia de la celda solar que compone el dispositivo PEMPower -1 Eco

Conceptos previos

Propiedades fundamentales de los semiconductores

Diodo

Celda solar

Factor de llenado

Voltaje de circuito abierto

Corriente de circuito cerrado

Punto de máxima Potencia

Característica I-V

Materiales

- Dispositivo PEM Power 1-Eco
- Potenciómetro $1\Omega - 30\Omega$
- 1 Voltímetro
- 1 Amperímetro
- Lámpara aproximadamente 500W

Metodología

1. Se Conecta en paralelo a la celda solar el voltímetro como se representa en el esquema

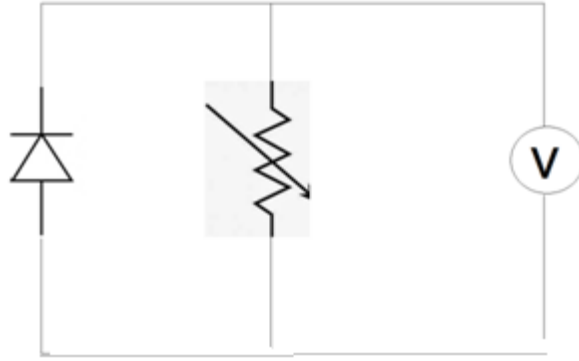


Figura 4-4 Circuito para la caracterización de la celda solar

2. Una vez que se tenga preparado el circuito descrito anteriormente, dejar incidir la luz (solar o de una lámpara de un retroproyector) sobre la celda por alrededor de 5 minutos.
3. Para registrar los valores de corriente y de voltaje, varié los valores de la resistencia desde 1Ω hasta 30Ω
4. Registre los valores de corriente, voltaje y resistencia.

Análisis de datos

Con los datos registrados en el laboratorio, elabore la grafica de corriente vs voltaje y a su vez la grafica de potencia vs corriente, discuta sus resultados .

Se pretende en el análisis de datos encontrar el punto de potencia máxima de la celda solar .Que concluye sobre el significado del valor del punto de potencia máxima en la celda solar.

Preguntas Sugeridas

¿Es posible calcular la eficiencia de la celda a partir del punto de máxima potencia?

¿En que influye el área de la celda en la eficiencia?

¿El desarrollo de celdas solares podría llegar a ser la solución de nuestras necesidades energéticas?

¿Qué dispositivos eléctricos domésticos podrían funcionar con la potencia ofrecida por la celda caracterizada en el laboratorio?

4.1.3 Característica del electrolizador a partir de la producción de hidrogeno

Objetivo

Encontrar la eficiencia del electrolizador en la producción de hidrogeno a partir de la primera ley de Faraday

Conceptos previos

Eficiencia

Primera ley de Faraday

Energía libre de Gibbs

Materiales

- Dispositivo PEM Power 1-Eco
- Fuente de 1,9 V y 1A
- Papel milimetrado
- Cronometro
- Agua destilada

Metodología

1. Se Conecta en serie al electrolizador la fuente, como se representa en el esquema. Dejar funcionar el electrolizador cerca de 10 minutos a una corriente de 1A y voltaje de máximo 1,9V

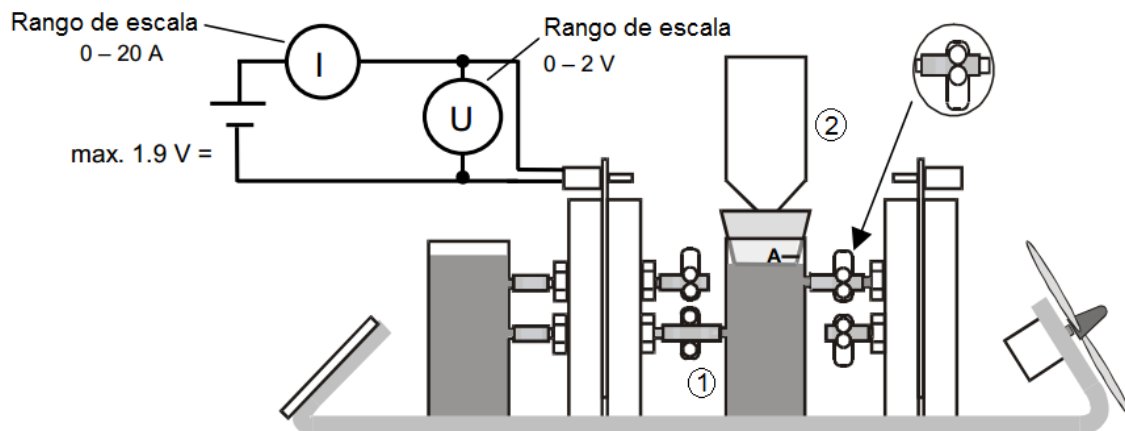


Figura 4.5 Montaje experimental para la caracterización del electrolizador

2. Una vez que se tenga preparado el circuito descrito en la figura 4.5, se llena el tanque de almacenamiento (1) con agua destilada y se sella con el tanque (2) vacío; este será el depósito del gas, además debe tener sobre puesta una escala de división cada 5 milímetros (se sugiere que la escala puede ser realizada en papel milimetrado).
3. A continuación se debe registrar el cambio de la altura del tanque con respecto al tiempo.

Análisis de datos

Al terminar de registrar los datos en el laboratorio, elaborar la gráfica del cambio del volumen con respecto al tiempo y finalmente calcule el volumen teórico a partir de la siguiente expresión.

$$V = \frac{R I T t}{F P Z}$$

V = Volumen del gas producido en m^3

R = Constante universal de los gases (8,314 J/(molK))

T = temperatura ambiente

I = corriente en A

t = tiempo en s

P = Presión atmosférica

F = Constante de Faraday (96485 C/mol)

Z = Número de electrones en exceso ($z(H_2)=2$, $Z(O_2)=4$)

Cuando haya encontrado el volumen teórico realice el cálculo de la relación entre el volumen experimental y el teórico para encontrar finalmente la eficiencia del electrolizador a partir de la primera ley de Faraday

Preguntas Sugeridas

¿Que concluye sobre la el significado del valor de la eficiencia del electrolizador en la producción de hidrógeno y su uso energético?

¿Por qué es considerado el hidrógeno una fuente de energía limpia?

¿Por qué aún la tecnología del hidrógeno no se ha desarrollado en la industria?

¿Qué volumen de hidrogeno es necesario para cargar completamente un smartphone?

¿Cuál es la diferencia entre eficiencia y potencia?

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo se ha presentado la caracterización de dos fuentes limpias de energía que pueden ser utilizados en procesos de enseñanza pedagógica con la finalidad de demostrar las diferentes transformaciones de energía tanto eléctrica como mecánica y la relación existente entre estas en la escala de valores de la utilización de la misma.

Nuestro país Colombia tiene la fortuna de poseer riqueza natural en fuentes hidráulicas, lo que en la actualidad ha permitido el sostenimiento energético de electricidad de los colombianos, sin embargo en zonas rurales o en lugares donde no es asequible este tipo de generación de energía es necesario implementar otros sistemas energéticos que sean amigables con el medio, de allí la importancia en la formación de futuros profesionales que puedan desarrollar transductores de energía económicos y viables como lo puede llegar a ser el Motor de Stirling y el PEMPower 1- Eco a un bajo costo. Por consiguiente implementar la cátedra energética desde el nivel preescolar hasta la educación superior se convertirá en una necesidad educativa, para lo que quizás puede llegar a ser de gran utilidad en este tipo de formación las prácticas de laboratorio propuestas en este trabajo.

Por otra parte, entrando en los detalles físicos de la caracterización de los dispositivos del motor de Stirling se puede afirmar que el aparato caracterizado en el laboratorio no es de fácil manejo y se dificulta a veces dar inicio de movimiento,

debido a que no tiene un sistema de refrigeración por agua, sino únicamente por aire con lo que se puede evidenciar una baja eficiencia.

Para el caso del electrolizador, su eficiencia es buena, según los resultados experimentales sin embargo, es de baja potencia, lo que implica que no es competitiva con otras formas de generación de energía.

La eficiencia energética de la celda de combustible es inferior a un 50%. Esto puede ser ocasionado por el deterioro del equipo.

Una mejor alternativa a nivel económico en la producción de energía según lo enmarcado en el aspecto teórico podría ser la producción de celdas de combustible, sin embargo la caracterización de la celda en el laboratorio, dejó evidenciar un bajo eficiencia comparado con el electrolizador, de lo que se puede llegar a afirmar que a nivel de energía limpia la mejor opción entre la celda solar, el electrolizador y la celda de combustible, es el segundo mencionado.

La eficiencia de una celda solar de tipo comerciar es aproximadamente de 10%, sin embargo la eficiencia de la celda caracterizada es de 1,47% .Este valor puede ser atribuido a que esta es poli cristalino

5.2 Recomendaciones

5.2.1 Motor de Stirling

- Antes de dar el impulso de movimiento, es necesario dejar el mechero encendido por alrededor de 5 minutos.
- Se recomienda un tiempo de por lo menos 5 minutos de funcionamiento, antes de iniciar cualquier tipo de prueba.
- Se observo que la velocidad máxima del movimiento en el volante era aproximadamente de 840 RPM.

- Una de las observaciones más importantes a tener en cuenta del motor, es que al no tener un sistema de refrigeración, se eleva rápidamente la temperatura, por tal motivo en ocasiones es necesario humedecer el desplazador, para que este pueda continuar en funcionamiento.

5.2.2 Dispositivo PEMPower

- Para la caracterización del electrolizador y la celda de combustible es necesario utilizar agua destilada. Ya que el uso de otro combustible puede dañar el equipo.
- En la caracterización Corriente vs Voltaje de la celda de combustible, la corriente de corto circuito no debe exceder mas de 10segundos ya que esto puede dañar la celda
- En la caracterización Corriente vs Voltaje del electrolizador, en ocasiones si la fuente no registra la variación manual del voltaje, esto puede deberse a que se encuentra polarizada electroquímicamente. Se recomienda despolarizarla invirtiendo la polaridad en los cables.
- Para la caracterización de la celda solar se recomienda una lámpara de alta potencia. En el laboratorio se utilizó la luz que brinda un retroproyector.

A. Anexo: Rúbrica de Evaluación

A continuación se presenta una sugerencia de rúbrica de evaluación para el docente.

En el recuadro inicial “aspecto” se propone evaluar los principales ítems de la práctica de laboratorio asignado un porcentaje a cada uno de estos a partir del nivel de dificultad que este puede tener. Los dos primeros aspectos hacen referencia al desempeño del estudiante en el laboratorio. Los dos posteriores evalúan el informe escrito presentado. La escala de valoración se encuentra representada de uno a cinco

Característica del electrolizador a partir de la producción de hidrogeno

Aspecto	%	5	4	3	2	1
Materiales: Utilizo los materiales adecuados para realizar la practica	5					
Metodología: Realizo el montaje de forma adecuada de tal manera que puedo realizar las mediciones de volumen y tiempo	25					
Análisis: Encontró la eficiencia del electrolizador	40					
Conclusiones : Las conclusiones del trabajo son coherentes con el análisis de resultados y a su vez con los conceptos teóricos	30					

Bibliografía

Antonio Luque, S. H. (2011). *Handbook of photovoltaic Science and Engineering, Second Edition*. Chennai: A John Wiley and son, Ltd, Publication.

Garcia, J. C. (26 de Noviembre de 2012). *IngenieríaQuímica.net* . Obtenido de IngenieríaQuímica.net : <https://www.ingenieriaquimica.net/>

González-Llorente, J. (2012). Maximizando la potencia en celdas solares: Un enfoque pedagógico. *10th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology* (pág. Refereed Paper #223). Ciudad de panama : Universidad Sergio Arboleda.

Hernán, S. M. (1982). *Herstellung and einge schaften*. Dissertation luclausthal (Germany): Von Cdse Mis Solarzellen.

H-TEC. (1997). *Model for Clasroom Instruction PEMPower 1-Eco*. Sueddeutsche Zeitung: Luebeck.

Jezir Plata Alvarez, L. E. (2011). *Celdas de combustible: Determinacion del tipo apropiado para la generacion electrica utilizando gas natural como combustible* . Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander .

Lerma, M. (8 de mayo de 2017). *Academia.edu*. Obtenido de Academia.edu: http://www.academia.edu/11850581/Dise%C3%B1o_de_electrolizador_con_eficiencia_%C3%B3ptima_para_la_producci%C3%B3n_de_hidr%C3%B3geno_industrial

Luis Gabriel Vallejo Moreno, C. E. (2013). *La tecnología del hidrogeno una oportunidad estrategica para la perdurabilidad del sector energetico en Colombia*. Bogota: Universidad de Nuestra Señora del Rosario.

R. Saïssset, G. F. (2005). ENERGIES RENOUVELABLES ET PILE A COMBUSTIBLE. *J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes*, , 2,9.

Ramírez, J. R. (2 de Febrero de 2010). *Modelo dinámico de un electrolizador alcalino*. Obtenido de Bibibg.us: bibing.us.es/proyectos/.../Modelo+dimánico+de+un+electrolizador+alcalino.pdf

Red, E. (9 de Mayo de 2017). *Ecu Red*. Obtenido de Ecu Red: https://www.ecured.cu/Celda_de_combustible

Simec Chile Srl. (14 de Octubre de 2015). *Documents.mx*. Obtenido de Documents.mx:
<http://documents.mx/documents/proyecto-simec-chile.html>

Zamora, V. R. (2006). *Diseño y construcción de un motor de stirling para la generación de energía eléctrica*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.