

ANÁLISIS Y VERIFICACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y MONITOREO DE DATOS TÉRMICOS DEL PICOSATÉLITE ARTIFICIAL “LIBERTAD 1”.

Raúl Andrés Joya Olarte**
Heicer Enrique Ledezma Leudo*

Universidad Sergio Arboleda.
Calle 74 # 14 – 14 Bogotá – Colombia
Tel: (1) 541 46 80
Correo-e: electroledezma@yahoo.com.mx

Resumen- El proyecto espacial “Colombia en Órbita” de la Universidad Sergio Arboleda desarrolló un Satélite tipo CubeSat (picosatélite con una masa de 1 Kg y un volumen de 1 Litro) para aplicaciones tecnológicas en Colombia, cuya misión es monitorear la temperatura en las caras del satélite y dentro de éste. Este proyecto busca analizar los procesos de diseño del sistema de monitoreo del picosatélite. Tomando las etapas: adquisición de la temperatura (SEN ó sensórica), y fuente de energía eléctrica (EPS).

Abstract- The space project " Colombia en Órbita" of the Universidad Sergio Arboleda developed a Satellite type CubeSat (picosatellite with a mass of 1 Kg and a volume of 1 Liter) for technological applications in Colombia, which mission is to check the temperature in the faces of the satellite and inside this one. This project seeks to analyze the processes of design of the system of monitoring of the picosatélite. Taking the stages: acquisition of the temperature (SEN ó sensor), and energy power supply (EPS).

Palabras clave- Termodinámica, celda solar, modelo rotacional, satellite, cubesat.

I. INTRODUCCIÓN

Para deducir experimentalmente la función de transferencia del sensor LM 75BIM-5 implementado en el Picosatélite “Libertad 1” se requirió el diseño experimental de 2 pruebas con el objetivo de analizar en el laboratorio la respuesta de éste a una señal escalón unitario y a una señal rampa

unitaria. Teniendo en cuenta que estas son algunas de las señales que enfrenta el Picosatélite en diferentes periodos de tiempo a lo largo de su orbita. Seguidamente, se presenta la respuesta del sensor a la frecuencia con las herramientas de la transformada Z. Es muy importante para el equipo “Colombia en Órbita”, el modelo de circuitos para paneles solares y el circuito de prueba para los mismos desarrollado aquí.

II. CÁLCULOS Y PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS

La primera señal permite tabular la respuesta en instantes de tiempo muy cortos (en milisegundos ó microsegundos) para luego deducir la función de transferencia del sensor; la segunda señal permite tabular la respuesta en instantes de tiempo largos (en segundos) para luego deducir la función de transferencia.

Teniendo en cuenta que la función de transferencia es independiente de la señal aplicada, ambas pruebas conducirán a resultados iguales (ó muy aproximados con las condiciones experimentales adecuadas). Para efectuar dichas pruebas se diseñaron 4 sondas, 2 para Señal Escalón Unitario (completamente idénticas) y 2 para la Señal Rampa Unitaria (completamente idénticas). Luego, las leyes de la termodinámica y la ley de enfriamiento de Newton, permitieron determinar los metales con los cuales se fabricaron las sondas, correspondientes a dichas señales.

Como se sabe, la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un metal, depende del cambio de temperatura, la masa y capacidad calorífica, así:

** Director Proyecto ‘Colombia en Órbita’ Universidad Sergio Arboleda.
*Investigador Auxiliar proyecto ‘Colombia en Órbita’, Tecnólogo Electrónico Universidad Distrital ‘Francisco José de Caldas’.

Sistema de Ecuaciones Diferenciales

Ecuación 1 (Cantidad de calor)

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mc} \frac{dQ}{dt}$$

Ecuación 2 (Transferencia por conducción)

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{kA(T_h - T_c)}{L}$$

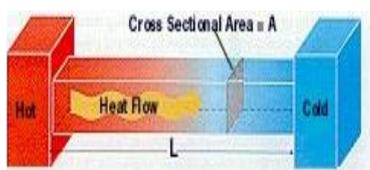


Fig 1. Corriente de calor.

Ecuación 3 (Ley de enfriamiento de Newton)

$$\frac{dT}{dt} = k[T_0 - T]$$

Donde la constante k del sistema es desconocida.

Finalmente se obtiene:

$$T(t) = T_E(1 - e^{-\frac{t}{\beta}})$$

Se tomaron los puntos de fusión y ebullición del agua como niveles de referencia, siendo necesaria su medición experimental, así:

Medición de los puntos de fusión y ebullición del agua en el Laboratorio “Benito Gonzáles Benito” del Observatorio Astronómico (lugar del experimento).

Debido a que el sensor LM75BIM-5 trabaja en el rango de - 55 °C a +125 °C, se considera como un sistema LTI (Lineal Invariante en el Tiempo) mientras es operado en este rango. Observando al dispositivo como un sistema de una entrada y una salida, se podrá colocar la entrada en el nivel CERO (punto de fusión) para aplicar la señal construida (a partir de las gráficas anteriores).



Fig 2. Agua, líquido elegido para analizar el sensor a temperaturas positivas.

La siguiente tabla muestra las mediciones realizadas.

Valores teóricos:

Punto de fusión = 0 °C, a presión de 1 atm

Punto de ebullición = 100 °C, a presión de 1 atm.

Medición	Punto de fusión [°C]	Punto de ebullición [°C]
1	0	+ 90
2	0	+ 90
3	0	+ 90
Promedio	0	+ 90
Error absoluto	0	10

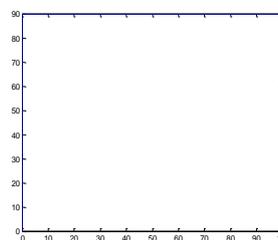
Tabla 1. Resultados experimentales.

Los niveles de referencia son

$$T_1 = 90, T_0 = 0$$

Finalmente, la Señal Escalón Unitario (ampliada) se construye recubriendo el sensor con Plata (Ag), cuya señal aproximada es:

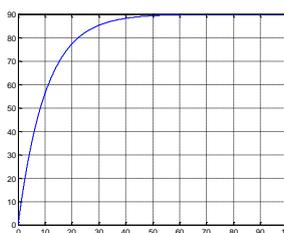
$$u(t) = T(t) = 90(1 - e^{-1959.t})$$



Grafica 1. Señal escalón unitario.

Debido a la adquisición de materiales fue necesario cambiar la Señal Rampa Unitaria por una Señal Exponencial, se construye recubriendo el sensor con Plomo (Pb) y su gráfica es:

$$u(t) = T(t) = 90(1 - e^{-0.09758t})$$



Grafica 2. Señal exponencial.

Es una curva de crecimiento exponencial desde 0 hasta la + 90 °C; por ello se ajusta perfectamente al software de adquisición Cross Studio (con el cual se realizó la prueba). El siguiente paso consistió en aplicar ambas señales al sensor, la respuesta más satisfactoria se obtuvo con la Señal Exponencial, así:

Parámetros del experimento: a partir de los cálculos teóricos.

A partir de la señal de entrada, se calculó el tiempo en que esta alcanza el 98% del punto de ebullición del agua (asíntota horizontal), siendo el tiempo suficiente para recoger los datos necesarios, así

$$t_p = -\beta \cdot \ln\left(\frac{T_0}{T} + 0.02\right)$$

$$t_p = 40.05 \text{ seg}$$

Sistema LTI = Sensor LM75BIM-5

Parámetro	Variable entrada	Variable salida
Nombre	Temperatura	Temperatura
Cantidad física	Escalar	Escalar
Tipo señal	Exponencial	Exponencial
Tiempo min. captura	40.05 seg	50.00 seg
Tiempo max. captura	2 minutos	2 minutos

Tabla 2: Parámetro del experimento

Observaciones y resultados

Luego, al aplicar la señal exponencial (entrada al sensor), se obtuvieron los siguientes datos en el computador:

n	tn [seg]	VLR HEX	VLR DEC	TEMP. [°C]
0	0.00	0	0	0
1	0.50	38	56	28
2	1.00	43	67	33.5
3	1.50	47	71	35.5
4	2.00	47	71	35.5
5	2.50	48	77	38.5
6	3.00	50	80	40
7	3.50	51	81	40.5
8	4.00	54	84	42
9	4.50	55	85	42.5
10	5.00	56	86	43
11	6.00	57	87	43.5
12	6.50	57	87	43.5
13	7.00	57	87	43.5

Tabla 3.



Gráfica 3.

De la cual se obtiene:



Gráfica 4. Señal de salida

Con Métodos Numéricos se realizó el siguiente ajuste de la curva (señal de salida):

$$y(t) = T(t) = 90(1 - e^{-0.09431t})$$

Cálculo de la función de transferencia.

Se aplica la Transformada de Laplace a las Señales de entrada y salida:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

$$U(s) = L\{u(t)\} = L\{90(1 - e^{-0.09758.t})\}$$

$$U(s) = 90\left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s+0.09758}\right]$$

$$Y(s) = L\{y(t)\} = L\{90(1 - e^{-0.09431t})\}$$

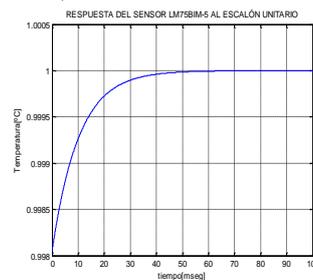
$$Y(s) = 90\left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s+0.09431}\right]$$

Finalmente:

$$G(s) = \frac{10.24s+1}{10.26s+1}$$

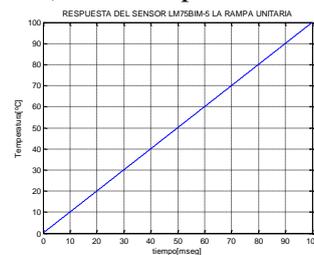
Respuesta del sensor a distintas señales de entrada:

1) Al Escalón unitario



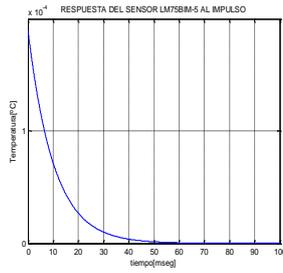
Gráfica 5

2) A la Rampa unitaria



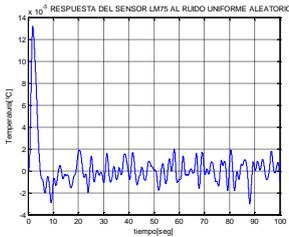
Gráfica 6

3) Al Impulso



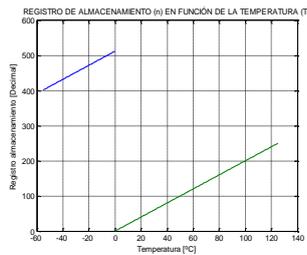
Gráfica 7

4) A un Ruido uniforme aleatorio



Gráfica 8

Funcionamiento del dispositivo:
Registro de almacenamiento vs.
Temperatura



Gráfica 9

III. COMPORTAMIENTO DEL SENSOR LM75BIM-5 EN TÉRMINOS DE LA FRECUENCIA

$$Y(Z) = 90 \left[\frac{Z}{Z-1} - \frac{e^{0.09431 \cdot T} \cdot Z}{e^{0.09431 \cdot T} \cdot Z - 1} \right]$$

IV. DISEÑO DE UN CIRCUITO DE PRUEBA PARA PANELES SOLARES.

Se busca diseñar un circuito de prueba con las siguientes condiciones:

- V1 = 5 volt
- V2 = 3.3 volt
- P = 900 mW



Fig 3. CubeSat Libertad 1.

Estructura de los Semiconductores. Uno de los materiales semiconductores que comúnmente se utiliza en la fabricación de celdas solares es el Silicio, posee la

capacidad de reaccionar frente a otros átomos y así provocar el denominado efecto fotovoltaico.

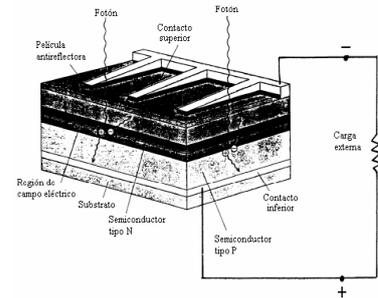


Fig 4. Estructura interna celda solar

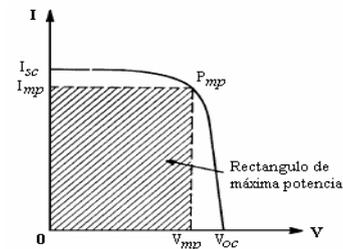
Modelo de paneles solares

La ecuación que representa el circuito equivalente ideal de una celda solar es:

$$I = C \cdot R - I_s \left[e^{\frac{q \cdot V}{K \cdot T}} - 1 \right]$$

En donde C es una constante,
R es la radiación solar en W/m^2 ,
 I_s es la corriente de saturación del diodo,
q es la carga eléctrica elemental
 $q = 1,60 \times 10^{-19} \text{Coulomb}$,
K es la constante de Boltzmann
 $K = 1,38 \times 10^{-23} J/K$,
T es la temperatura absoluta en Kelvin.

Característica I-V (Corriente vs Voltaje) de una celda solar.



Gráfica 10

Pruebas a los paneles solares del Laboratorio de Automática de la Universidad Distrital "Francisco José de Caldas"

Dimensiones físicas

1 Módulo (panel) = 36 celdas

Área bruta del módulo

$$A_b = (25.8cm)(40.0cm) = 0.1032m^2$$

Área de celda

$$A_{cel} = (0.067m)(0.038m) = 2.546 \times 10^{-3}m^2$$

Área de referencia

$$A_{ref} = 36 \cdot A_{cel} = 36(2.546 \times 10^{-3}m^2) = 91.656 \times 10^{-3}m^2$$

Tipo de celda = Silicio policristalina

- Mediciones experimentales. Se realizó el mismo procedimiento a cada panel.

Debido a que estas pruebas dependen de parámetros ambientales, se eligió trabajar entre las 12 M y 12:30 PM para que los rayos del sol sean aproximadamente perpendiculares a los paneles solares y obtener así el máximo voltaje y corriente de los mismos (según la gráfica I - V).

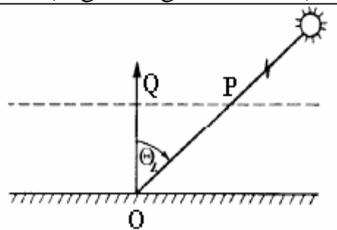


Fig 5. Ángulo entre el panel y rayos solares.

Inicialmente se midió el voltaje de corto circuito y la corriente de circuito abierto sin carga:

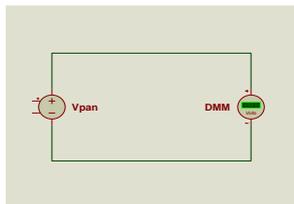


Fig 6. Primera medición.

Luego, se midió el voltaje y la corriente con una carga de 1k, obteniendo la siguiente tabla.

Prueba	Panel # 1		
	Voltaje	Corriente	Potencia
Sin carga	16.9 V	80.2 uA	1.355 mW
Con carga	80 mV	80.3 uA	6.424 uW

Prueba	Panel # 2		
	Voltaje	Corriente	Potencia
Sin carga	16.91 V	80.21 uA	1.356 mW
Con carga	80.1 mV	80.28 uA	6.430 uW

Tabla 4. Resultados prueba de paneles.

Se observa que ambos dispositivos tuvieron comportamientos muy similares, la siguiente es la media aritmética para cada medición.

Buscamos el modelo más adecuado para el panel solar asumiendo 2 circuitos equivalentes (Thévenin y Norton).

Modelo equivalente Thévenin

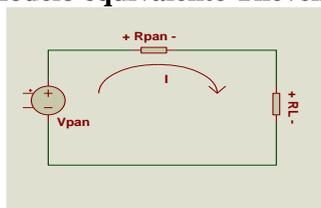


Fig 7.

Cálculo de Resistencia del panel:

$$R_P = R_1 \left(\frac{V_P}{V_{R1}} - 1 \right)$$

$$R_P = 1K \left(\frac{16.9 \text{ volt}}{80 \text{ mvolt}} - 1 \right) = 210.25K$$

Potencia en la Resistencia del panel (resistencia parásita)

$$P_{RP} = I^2 \cdot R_P = (80.3 \mu A)^2 (210.25k) = 1.355mW$$

Potencia en la Resistencia de carga

$$P_{RL} = I^2 \cdot R_L = (80.3 \mu A)^2 (1k) = 6.448 \mu W$$

Potencia del panel

$$P_{panel} = P_{RP} + P_{RL} = 1.355mW + 6.448 \mu W = 1.361mW$$

El Modelo Equivalente Thévenin sugiere que la pérdida de potencia en la Resistencia de celda es muy grande.

Modelo equivalente Norton

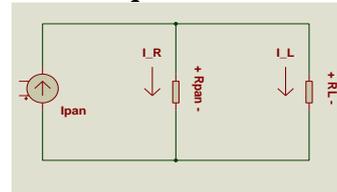


Fig 8.

Corriente entregada por el panel

$$I_P = \frac{16.9 \text{ volt}}{210.25k} = 80.38 \mu A$$

Corriente en la Resistencia del panel

$$I_{RP} = I_P - I_L = 80.38 \mu A - 80.3 \mu A = 80nA$$

Potencia en la Resistencia del panel

$$P_{RP} = I_1^2 \cdot R_P = (80.9nA)(210.25k) = 1.345nW$$

Potencia en la resistencia de carga

$$P_{RL} = I_{RL}^2 \cdot R_L = (80.3 \mu A)^2 \cdot (1k) = 6.448 \mu W$$

Potencia del panel

$$P_{panel} = 1.345nW + 6.448 \mu W = 6.449 \mu W$$

El M. Equivalente Norton sugiere que la pérdida de potencia en la Resistencia del panel es muy pequeña.

Observaciones

La potencia en la carga (RL) debe ser la misma en cualquier modelo que se utilice.

La corriente medida sin carga es muy aproximada a la corriente medida con carga. Y aunque el voltaje sobre la carga es mucho menor que el voltaje sobre la celda, la corriente permanece aproximadamente inalterada. Esto sugiere que, por simplicidad, se debe adoptar el MODELO EQUIVALENTE NORTON en experimentos con paneles solares.

Diseño del circuito probador:

Prueba de configuraciones serie y paralelo: se realizó para comparar los voltajes y corrientes más óptimos.

Configuración	Voltaje total [volt]	Corriente total [mA]
Serie	36.2	18.8
Paralelo	15.7	161.3

Tabla 6. Prueba de configuraciones

Se deduce que la configuración en paralelo de los paneles permite un mejor manejo de corriente, además se obtendría la mayor transferencia de potencia a la carga.

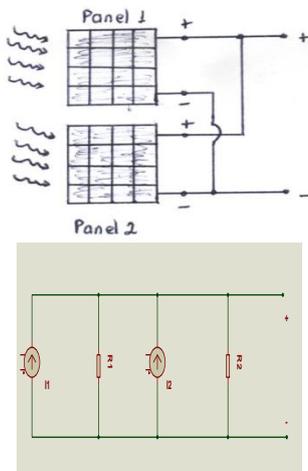


Fig 9. Configuración en paralelo

Inicialmente se probó un circuito de polarización estabilizada en emisor con fuente DC, y una batería tipo AA así:

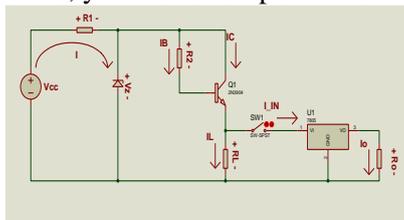


Fig 10. Circuito probador

Carga
V = 1.2 v
I = 130mA
T = 16h (Tiempo mínimo de carga)

Condiciones de diseño:

$$V_Z = 10v, \beta = 1000$$

Cargando la batería a la mitad de su corriente nominal, se tiene

$$R_C = \frac{V_Z - 2 \cdot V_L}{I_L} = 60 \text{ Ohm}$$

$$R_B = \frac{2 \cdot \beta (V_Z - V_L - 0.7)}{I_L} = 124.6 \text{ K}$$

En un tiempo de 3 horas se pudo cargar la batería.

Partiendo del diagrama en bloques de una fuente común, se diseñó un circuito sencillo con los siguientes bloques constitutivos:

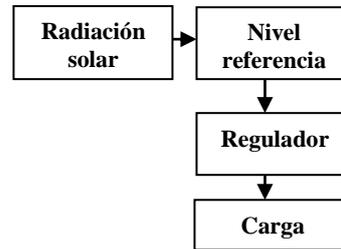


Fig 11. Diagrama en bloques del circuito probador

Se utilizaron con diodos Zener para mantener un voltaje de referencia, seguido de un circuito con transistor de polarización estabilizada en emisor en donde RL es la resistencia de carga.

Se determinó que para acoplar al circuito el arreglo de celdas, se debe balancear el circuito.

Mediciones con fuente DC:

$$V_{cc} = 11.02 \text{ V}$$

$$V_{R1} = 44 \text{ mV}$$

$$V_Z = 10.89 \text{ V}$$

$$I = 63.0 \text{ mA}$$

En el regulador			
Prueba	V in	I in	P in
Sin carga	9.8 V	19.16 mA	187.76 mW
Con carga	9.8 V	19.16 mA	187.76 mW

Prueba	V out	I out	P out
Sin carga	4.96 V	36.8 mA	182.52 mW
Con carga	4.97 V	13.27 mA	65.95 mW

Tabla 7. Mediciones en el regulador

Al acoplar el arreglo de paneles solares -en serie- al circuito anterior se realizaron las mediciones experimentales:

Con carga

$$V_{tot} = 3.8 \text{ v}$$

$$V_{R1} = 5 \text{ mv}$$

$$V_Z = 3.79 \text{ v}$$

En el regulador

$$V_{in} = 2.1 \text{ v}$$

$$V_{out} = 2.06 \text{ v}$$

- Al acoplar el arreglo de paneles solares -en paralelo- al circuito anterior se realizaron las mediciones experimentales:

Con carga

$$V_{tot} = 9.03 \text{ v}$$

$$V_{R1} = 0.0 \text{ v}$$

$$V_Z = 9.03 \text{ v}$$

En el regulador

$$V_{in} = 6.4 \text{ v}$$

$V_{out} = 4.43 \text{ v}$ * Aproximado al valor deseado (5 v).

- Al circuito anterior se le implementó un regulador de voltaje LM 317 balanceado para $V_{out} = 3.3 \text{ v}$, obteniendo las siguientes mediciones.

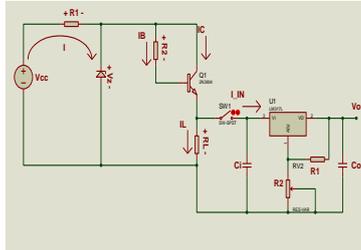


Fig 12. Circuito probador con LM 317

Con carga

$V_{tot} = 9.03 \text{ v}$

$V_{R1} = 0.0 \text{ v}$

$V_z = 9.03 \text{ v}$

En el regulador

$V_{in} = 6.4 \text{ v}$

$V_{out} = 3.4 \text{ v}$ * Aproximado al valor deseado (3.3 v).

VI. CONCLUSIONES

La función de transferencia obtenida permitirá conocer el comportamiento del sensor en diversas condiciones orbitales, dentro de su región de operación lineal.

Se tiene un escalón unitario en el momento que el satélite pasa de sombra terrestre a luz solar directa. De acuerdo a esto, mientras más rápido responda el sensor mejor será la estimación de su posición orbital en ésta y en futuras misiones.

El mismo procedimiento se podrá aplicar a un grupo de sensores para seleccionar el más óptimo. Teniendo en cuenta que la temperatura es una cantidad escalar, el pequeño margen de error del sensor (2 ó 3%) no afecta significativamente la medición; además, comparativamente permite una medición más sencilla que las cantidades vectoriales.

El modelo más óptimo para analizar arreglos de paneles solares es el Modelo equivalente Norton, al acoplarlos así en un satélite tipo CubeSat, cada panel estará aislado de posibles averías en los demás.

Estos parámetros muestran que la etapa de regulación para CubeSats se debe realizar con reguladores Clase A, de tipo (unregulated, quasi-regulated, o full-regulated) ya sea por técnica PPT (peak

power tracker) ó DET (direct energy transfer), según la previa caracterización de la misión.

VII. REFERENCIAS

[1] Kuo, Benjamin C. (1996). Sistemas de Control Automático.

Funciones de transferencia, 77-86.

[2] Bolton, W., (1995). Sistemas de control Modelos de sistemas, 36-60.

[3] Francis W. Sears, Mark W. Zemansky, Hugh D. Young, Roger A. Freedman (1999). Física Universitaria.

Termodinámica, 460-586

[4] Soto Enrich, Daniel Alejandro (2002). Aumento del rendimiento en un vehículo eléctrico, utilizando celdas fotovoltaicas (Pontificia Universidad Católica de Chile). 18 – 53.

[5] Viveprecidencia de la República de Colombia. Extraído el 19 de julio de 2007 http://www.cce.gov.co:8080/igac_web/cce

[6] Endrich Inc. Extraído el 19 de julio de 2007 <http://www.endrich.com.co>