

EMULADOR DE UN PANEL SOLAR CONSIDERANDO IRRADIANCIA Y TEMPERATURA

JHONATAN JOSE RODRIGUEZ RODRIGUEZ

DIRIGIDO POR:

ING. GABRIEL PERILLA GALINDO, MSc.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERIA

BOGOTA D.C.

JUNIO 2018

TABLA DE CONTENIDO

1.	OBJETIVO DEL PROYECTO.....	1
1.1.	OBJETIVO GENERAL.....	1
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	1
3.	MARCO TEORICO.....	3
3.1.	ECUACION CARACTERISTICA DE UN PANEL SOLAR.....	3
4.	DESARROLLO.....	4
4.1.	PARÁMETROS DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA, VOLTAJE CIRCUITO ABIERTO, CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO EN FUNCIÓN DE LA IRRADIANCIA Y LA TEMPERATURA.....	4
4.2.	CURVAS V-I DEL PANEL ECODELTA ED50-6M, A PARTIR DE LOS PARÁMETROS DADOS POR EL FABRICANTE.....	5
4.3.	ALIMENTACIÓN.....	8
4.4.	CIRCUITO DE APROXIMACION 1.....	9
4.5.	CIRCUITO DE APROXIMACION 2.....	11
4.5.1.	MODULADOR.....	12
4.5.2.	MUESTRA DE CORRIENTE.....	14
4.5.3.	FILTRO LC SALIDA.....	15
4.5.4.	HMI.....	18
4.6.	CIRCUITO DE APROXIMACION 3.....	19
4.6.1.	EMULACION CELDA SOLAR.....	20
4.6.2.	MUESTRA DE VOLTAJE.....	23
4.6.3.	HMI.....	23
5.	PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	24
5.1.	ALIMENTACION.....	24
5.2.	CIRCUITO DE APROXIMACION 1.....	24
5.3.	SEÑAL TRIANGULO.....	25
5.4.	CIRCUITO DE APROXIMACION 2.....	25
5.4.	CIRCUITO DE APROXIMACION 3.....	26
6.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	27
6.1.	ALIMENTACION.....	27
6.2.	CIRCUITO DE APROXIMACION 2.....	29
6.3.	SEÑAL TRIÁNGULO.....	29

6.4.	CIRCUITO DE APROXIMACION 2.....	29
6.5.	CIRCUITO DE APROXIMACION 3.....	30
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32
8.	REFERENCIAS	33
9.	ANEXOS.....	34
9.1.	ARCHIVOS PRODUCIDOS Y MEDICIONES REALIZADAS	34

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Circuito Equivalente de un panel solar.	3
Figura 2. Parámetros Eléctricos del Panel Ecodelta ED50-6M.....	4
Figura 3. Bloque PV Array en Simulink Matlab.....	5
Figura 4. Curva V-I del Panel Ecodelta ED50-6M en función de la irradiancia.....	6
Figura 5. Curva V-P del Panel Ecodelta ED50-6M en función de la irradiancia.....	6
Figura 6. Curva V-I del panel Ecodelta ED50-6M en función de la temperatura.....	7
Figura 7. Curva V-I del panel Ecodelta ED50-6M en función de la temperatura.....	7
Figura 8. Diagrama en Bloques de la Alimentación.	8
Figura 9. Esquemático Circuito de Alimentación	9
Figura 10. Diagrama en Bloques Circuito de Aproximación 1.....	9
Figura 11. Esquemático del Circuito de Aproximación 1.	10
Figura 12. Diagrama en Bloques del Circuito de Aproximación 2.....	12
Figura 13. Esquemático del bloque modulador.....	13
Figura 14. Esquemático Señal Triángulo	14
Figura 15. ACS 712-5A.	15
Figura 16. Circuito para incrementar sensibilidad y quitar offset.....	15
Figura 17. Tabla AWG.....	17
Figura 18. Voltaje de entrada al Filtro LC.	17
Figura 19. Corriente sobre la Inductancia	17
Figura 20. Corriente en el Condensador.....	18
Figura 21. Esquemático Filtro LC.....	18
Figura 22. Interfaz Hombre-Maquina.	19
Figura 23. Diagrama en Bloques del Circuito de Aproximación 3.....	19
Figura 24. Esquemático Filtro LC con R.	20
Figura 25. Curva Voltaje-Corriente Diodo 1N914.....	20
Figura 26. Curva Voltaje-Potencia Diodo 1N914.....	21
Figura 27. Circuito Emulador de Panel a escala.	21
Figura 28. Circuito Fuente de corriente para OTA A.....	22
Figura 29. Circuito Fuente de corriente para OTA B.....	22
Figura 30. Salida del Emulador de Panel	23
Figura 31. Circuito Muestra de Voltaje.....	23
Figura 32. Interfaz Hombre-Maquina.	24
Figura 33. Esquemático Circuito de Alimentación	24
Figura 34. Esquemático del Circuito de Aproximación 1.	25
Figura 35. Esquemático Señal Triángulo	25
Figura 36. Esquemático del Circuito de Aproximación 2.	26
Figura 37. Esquemático Circuito de Aproximación 3.....	26
Figura 38. Voltaje Rectificado con carga a la salida (Rosada) y Corriente de salida (Amarilla).....	27
Figura 39. Voltaje Rectificado sin carga a la salida (Rosada) y Corriente de salida (Amarilla).....	27
Figura 40. Voltaje de entrada al rectificador sin carga.....	27
Figura 41. Voltaje Rectificado con carga a la salida (Rosada) y Corriente de salida (Amarilla).....	28
Figura 42. Voltaje del condensador (Rosada) y Corriente de Salida(Amarillo).	28
Figura 43. Rizado del Condensador (Rosada) y Corriente de salida (Amarilla).	28
Figura 44. Voltaje de Salida del condensador sin carga (Rosada) y Corriente de salida (Amarilla).	28
Figura 46. Curva Voltaje-Corriente Circuito de Aproximación 1.....	29

Figura 45. Señal Triángulo.....	29
Figura 47. Curva Voltaje-Corriente Circuito de Aproximación 2.....	30
Figura 48. Curva Voltaje-Corriente Circuito de Aproximación 3.....	31
Figura 49. Curva Voltaje-Corriente Circuito Experimental con Teórica.....	31
Figura 50. Curva Voltaje-Potencia Circuito de Aproximación 3.....	32
Figura 51. Curva Voltaje-Potencia Circuito Experimental con Teórica	32

1. OBJETIVO DEL PROYECTO

1.1. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e implementar un circuito que emule la curva Voltaje-Corriente de un panel solar, con condiciones preestablecidas por usuario de irradiancia y temperatura.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener los parámetros del punto de máxima potencia, voltaje circuito abierto, corriente de corto circuito en función de la irradiancia y la temperatura.
- Elaborar las curvas V-I del panel ECODELTA ED50-6M, a partir de los parámetros dados por el fabricante.
- Diseñar un convertidor para que actúe como un emulador del panel solar ECODELTA ED50-6M con $I_{sc}=3.04$ A, $V_{oc}=22.4$ V, $V_{pmp}=17.4$ V, $I_{pmp}=2.85$ A.
- Implementar el emulador del panel solar ECODELTA ED50-6M.
- Contrastar la curva V-I del panel solar ECODELTA ED50-6M con el comportamiento del emulador implementado.
- Evaluar las condiciones de salida con diferentes cargas.

Este trabajo de grado logró cumplir con el diseño de un emulador de la curva Voltaje Corriente de un panel solar con condiciones preestablecidas por usuario de irradiancia y temperatura, el cual fue diseñado e implementado con circuitos integrados comerciales. El circuito es energizado a través de la acometida eléctrica. Con el circuito se puede establecer comunicación a través de un programa en Windows, de esta forma es posible indicarle los valores de irradiancia y temperatura, y visualizar en la interfaz el voltaje y corriente de salida.

El proyecto de grado consigna la medición experimental de la curva Voltaje-Corriente y Voltaje-Potencia, dependiendo de la irradiancia y temperatura, estas curvas al tenerlas con disponibilidad las 24 horas del día permiten diseñar circuitos como inversores o cargadores de batería, y no estar dependiendo de un panel solar, donde las condiciones varían un amplio rango y solo se puede utilizar en promedio 3 horas al día en Bogotá.

2. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el cambio climático es uno de los mayores desafíos de nuestra época, ya que amenaza la producción de alimentos, el aumento del nivel del mar, riesgo de inundaciones y cambios en la temperatura que desencadenan eventos catastróficos, los efectos del cambio climático nos afectan a todos y de igual manera. El principal causante del cambio climático son los gases de efecto invernadero (GEI), aunque parte de este se produce de manera natural y es necesario para la supervivencia de los seres vivos, existe otra parte debido a la industrialización, tala de árboles, entre otras actividades que incrementan estos gases. A medida que la población, las economías y el nivel de vida crecen, también lo hace el nivel acumulado de gases de efecto invernadero.

La Organización de Naciones Unidas ha relacionado científicamente varios hechos: La concentración de GEI en la atmósfera terrestre está directamente relacionada con la temperatura media mundial de la Tierra, esta concentración ha ido aumentando progresivamente desde la Revolución Industrial y, con ella, la temperatura mundial, y el GEI más abundante es el dióxido de carbono (CO_2) como resultado de la quema de combustibles fósiles [1].

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) publicó su “Quinto Informe de Evaluación”, que se centró en la ciencia del cambio climático. En su informe se demuestra

que el cambio climático es real y las actividades humanas son sus principales causantes, este informe también proporciona una evaluación del aumento del nivel del mar y sus causas en las últimas décadas.

Dentro de los hechos más importantes del informe, se encuentra que: “De 1880 a 2012 la temperatura media mundial aumentó 0,85 °C, los océanos se han calentado, las cantidades de nieve y hielo han disminuido y el nivel del mar ha subido. De 1901 a 2010, el nivel medio mundial del mar ascendió 19 cm, ya que los océanos se expandieron debido al hielo derretido por el calentamiento, la extensión del hielo marino en el Ártico ha disminuido en cada década desde 1979, con una pérdida de $1,07 \times 10^6$ km² de hielo cada diez años. Debido a la concentración actual y a las continuas emisiones de gases de efecto invernadero, es probable que el final de este siglo presencie un aumento de 1–2° C en la temperatura media mundial en relación con el nivel de 1990 (aproximadamente 1,5–2,5°C por encima del nivel preindustrial). Así, los océanos se calentarán y el deshielo continuará. Se estima que el aumento del nivel medio del mar será de entre 24 y 30 centímetros para 2065 y de 40 a 63 centímetros para 2100 en relación al periodo de referencia de 1986-2005. La mayoría de los efectos del cambio climático persistirán durante muchos siglos, incluso si se detienen las emisiones.” [1]

En la 21ª Conferencia en París, las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático alcanzaron un acuerdo histórico con el objetivo de combatir el cambio climático y acelerar e intensificar las acciones y las inversiones necesarias para un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono [1]. “El principal objetivo del Acuerdo de París es fortalecer la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático manteniendo el aumento de la temperatura mundial en este siglo por debajo de los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir con los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1,5 °C.” [1]

Dentro de las acciones acordadas para disminuir los efectos del GEI, se encuentra disminuir la quema de combustibles fósiles, actualmente la mayoría de la energía eléctrica mundial se obtiene a través de la quema de combustibles fósiles, debido a la gran contaminación que esto genera y que son combustibles finitos, se debe disminuir y sustituir su uso por recursos renovables para la generación de energía eléctrica. Hoy en día el uso de las energías renovables, especialmente la energía solar fotovoltaica está en constante evolución y desarrollo teniendo un crecimiento exponencial en los últimos años, llegando a aportar alrededor del 2.1% de la demanda mundial en 2017 [2].

Para seguir estimulando el uso de energías renovables, se deben de crear más circuitos que funcionen con energía solar fotovoltaica, sin embargo, el principal problema que se tiene respecto a crear estos circuitos electrónicos que funcionen con paneles solares, es que solo se pueden desarrollar cuando el panel solar esté funcionando, es decir, un promedio de alrededor de 3 horas por día en la ciudad de Bogotá y máximo 6 horas por día en el departamento de la Guajira, sin contar que muchas variables no son constantes como la irradiancia y temperatura, causando así que no se pueda trabajar con unos parámetros estables y a cualquier hora del día, un día lluvioso o nublado. Aunque ya se han implementado soluciones a este problema, la solución con que cuenta la Pontificia Universidad Javeriana está basada en dos fuentes de poder DC programables, que con un software logran emular las curvas de Voltaje-Corriente de un panel solar, pero replicar esta solución para que más estudiantes puedan tener acceso a ella resultaría muy costoso.

La justificación de este proyecto de grado es que con la construcción de un circuito de bajo costo, que produzca una emulación de la curva de voltaje-corriente de un panel solar con condiciones controladas, cualquier estudiante de Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana podrá desarrollar convertidores de voltaje programando los valores de irradiancia y temperatura, en cualquier momento del día y sin importar la condición climática para así fomentar y reforzar nuestra lucha contra el cambio climático y aportar a la disminución de los GEI construyendo circuitos que funcionen con energías renovables, en este caso, energía solar fotovoltaica.

3. MARCO TEORICO

3.1. ECUACION CARACTERISTICA DE UN PANEL SOLAR

La figura 1, muestra el circuito eléctrico equivalente de un panel solar, se observa que está constituido por dos resistencias, una en serie R_s y otra resistencia en paralelo o shunt R_p . La resistencia serie es debida a la resistencia de carga del material semiconductor, a los contactos metálicos y a las interconexiones y resistencias de contacto entre el semiconductor y los contactos metálicos [8]. La resistencia shunt se debe a las no idealidades y a las impurezas cerca de la unión p-n. También se detalla una fuente de corriente I_L , que representa la corriente generada por la radiación solar, y un diodo conectado en paralelo que representa la curva característica Corriente-Voltaje I-V. El comportamiento de la curva I-V de la célula fotovoltaica está descrita por las ecuaciones (1), (2) y (3) [3].

$$I = I_L(G_1, T_1) - N_P I_0(G_1, T_1) \left[e^{\left(\frac{V+IR_S}{V_t(T_1)} \right)} - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_P} \quad (1)$$

$$V_t(T_1) = m N_S k \frac{(T_1+273)}{q e} \quad (2)$$

$$I_0(G_1, T_1) = \frac{I_{SC}(G_1, T_1) - \frac{V_{OC}(G_1, T_1)}{R_P}}{e^{\left(\frac{V_{OC}(G_1, T_1)}{V_t} \right)} - 1} \quad (3)$$

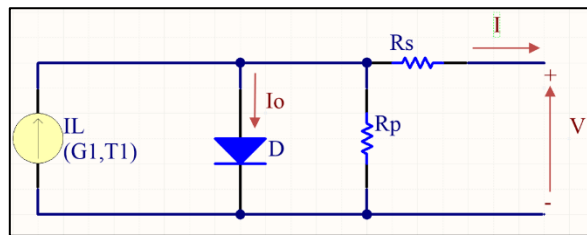


Figura 1. Circuito Equivalente de un panel solar.

Dónde:

N_S es el número de celdas en serie del panel solar.

N_P es el número de celdas en paralelo del panel solar.

k es la constante de Boltzman.

$q e$ es la carga del electrón.

m es el factor de idealidad del diodo; cercano a 1.

T_1 es la temperatura de trabajo del panel solar en $^{\circ}C$.

R_S es la resistencia serie del panel solar.

R_P es la resistencia en paralelo del panel solar.

$I_L(G_1, T_1)$ es la corriente fotogenerada y aproximadamente igual a $I_{SC}(G_1, T_1)$.

I_0 es la corriente inversa de saturación del diodo.

V_{OC} es la tensión de circuito abierto del panel solar.

Para utilizar la ecuación (1), es necesario conocer el valor de las resistencias R_S y R_P , parámetros característicos de cada panel y el factor de idealidad del diodo m . Estos parámetros están relacionados con el material empleado en su fabricación y en general se determinan de forma experimental ya que el fabricante no provee esta información. Una vez calculados se consideran constantes en todo el rango de operación y para cualquier valor de irradiación y temperatura. Para aumentar la precisión en los cálculos, en la ecuación (1) se introduce la dependencia de la corriente de cortocircuito y de la tensión de circuito abierto, del valor de la irradiación solar y de la temperatura de operación del panel

con relación a las condiciones estándar de medidas dadas por el fabricante; $T_{STD}= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G_{STD}=1000\text{ W/m}^2$. Estas dependencias son: ecuaciones (4), (5) y (6) [3].

$$I_{SC}(G_1, T_1) = N_P I_{SC} \frac{G_1}{G_{STD}} + \alpha I_{SC}(T_1 - T_{STD}) \quad (4)$$

$$I_L(G_1, T_1) = N_P I_L \frac{G_1}{G_{STD}} + \alpha I_L(T_1 - T_{STD}) \quad (5)$$

$$V_{OC}(G_1, T_1) = V_{OC} + V_t \ln \left[\frac{G_1}{G_{STD}} \right] + \beta V_{OC}(T_1 - T_{STD}) \quad (6)$$

Dónde:

α es el coeficiente de temperatura de la corriente de corto circuito del panel solar.

β es el coeficiente de temperatura del voltaje de circuito abierto del panel solar.

Para caracterizar totalmente el comportamiento de la curva Corriente-Voltaje de un panel, necesitamos identificar la irradiancia, temperatura y todos los elementos que componen el vector $P=[R_s R_p m \beta \alpha]$ [3].

4. DESARROLLO

En el desarrollo del proyecto de grado se realizó el diseño de tres circuitos de aproximación a la emulación de la curva Voltaje-Corriente, en los cuales el paso de un diseño a otro siempre existía mejoras, ventajas y desventajas.

4.1. PARÁMETROS DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA, VOLTAJE CIRCUITO ABIERTO, CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO EN FUNCIÓN DE LA IRRADIANCIA Y LA TEMPERATURA.

En la Figura 2, se pueden observar los parámetros dados por el fabricante.

Electrical Parameters (Standard Test Condition)		
	ED50-6M	ED55-6M
Rated Maximum Power(Mp)	50W	55W
Power Tolerance	0- +5W	
Cell Efficiency	17.6%	19.4%
Open Circuit Voltage(Voc)	22.4V	22.6V
Maximum Power Voltage(Vmp)	17.4V	17.6V
Short Circuit Current(Isc)	3.04A	3.31A
Maximum Power Current(Imp)	2.85A	3.13A
Temperature Coefficient of Isc	+0.06%	
Temperature Coefficient of Voc	-0.32%	
Temperature Coefficient of Pmp	-0.45%	
Standard Test Condition	Irradiance:1000W/M2,Cell Temperature:25°C,Spectrum AM:1.5	

Figura 2. Parámetros Eléctricos del Panel Ecodelta ED50-6M

El panel tiene 36 celdas en serie y una celda en paralelo. Las especificaciones son obtenidas bajo condiciones estándar de medida (STC): 1000 W/m^2 , Am 1.5, Temperatura de celda 25°C .

Para conocer los parámetros de I_{SC} , V_{OC} , V_{PMP} , I_{PMP} , en función de la irradiancia y temperatura, se utilizan los coeficientes de temperatura y la relación proporcional con la irradiancia en el caso de corriente.

$$I_{SC}(G_1, T_1) = 3.04 \frac{G_1}{1000} + 0.001824(T_1 - 25)$$

$$I_{PMP}(G_1, T_1) = 2.85 \frac{G_1}{1000} + 0.0002(T_1 - 25)$$

$$V_t(T_1) = 0.0029391011069(T_1 + 273)$$

$$V_{OC}(G_1, T_1) = V_{OC} + V_t \ln \left[\frac{G_1}{1000} \right] - 0.07168(T_1 - 25)$$

$$V_{PMP}(G_1, T_1) = 17.4 + V_t \ln \left[\frac{G_1}{1000} \right] - 0.073428(T_1 - 25)$$

4.2. CURVAS V-I DEL PANEL ECODELTA ED50-6M, A PARTIR DE LOS PARÁMETROS DADOS POR EL FABRICANTE.

Para realizar las gráficas de V-I necesitamos obtener todos los elementos que componen el vector $P=[R_s R_p m \beta \alpha]$, I_L , I_{SC} , V_{OC} , V_{PMP} , I_{PMP} y los valores de irradiancia y temperatura, los define el usuario.

Debido a que no se tenía el panel solar en físico, para conocer los valores de R_s , R_p , m , I_L , nos basamos en un bloque que ofrece la librería de Simulink Matlab llamado “PV Array”, el cual nos permite modelar una variedad de paneles fotovoltaicos previamente configurados o definidos por el usuario como lo muestra la Figura 3. En este caso ingresando los parámetros de I_{SC} , V_{OC} , V_{PMP} , β , α , el bloque nos indica los valores que necesitamos. Los valores obtenidos fueron: $R_s = 0.86108$, $R_p = 266.5304$, $m = 0.94746$, $I_L = 3.0766$

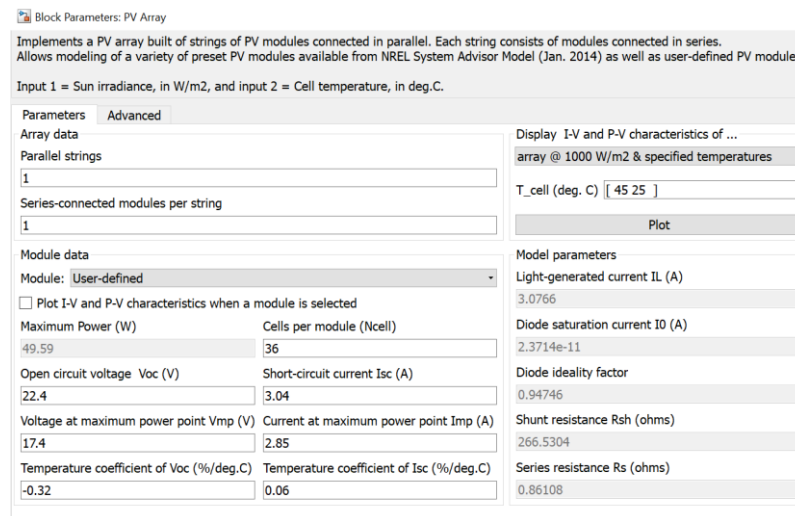


Figura 3. Bloque PV Array en Simulink Matlab

Ya con todos los valores definidos graficamos las curvas de V-I de nuestro panel solar en función de la temperatura e irradiancia. La gráfica Voltaje-Corriente del panel solar a una temperatura en la celda de 25°C para diferente valores de irradiancia, se puede apreciar en la Figura 4, la gráfica Voltaje-Potencia a una temperatura en la celda de 25°C para diferente valores de irradiancia, se puede apreciar en la Figura 5, la gráfica Voltaje-Corriente a una irradiancia de 1000 W/m² para diferentes temperaturas, se puede apreciar en la Figura 6, y la gráfica Voltaje-Potencia a una irradiancia de 1000 W/m² para diferentes temperaturas, se puede apreciar en la Figura 7.

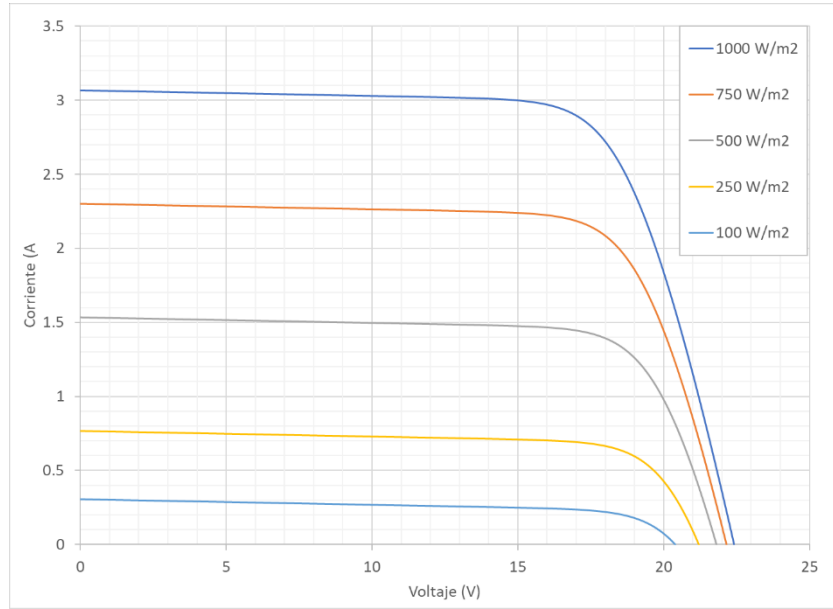


Figura 4. Curva V-I del Panel Ecodelta ED50-6M en función de la irradiancia

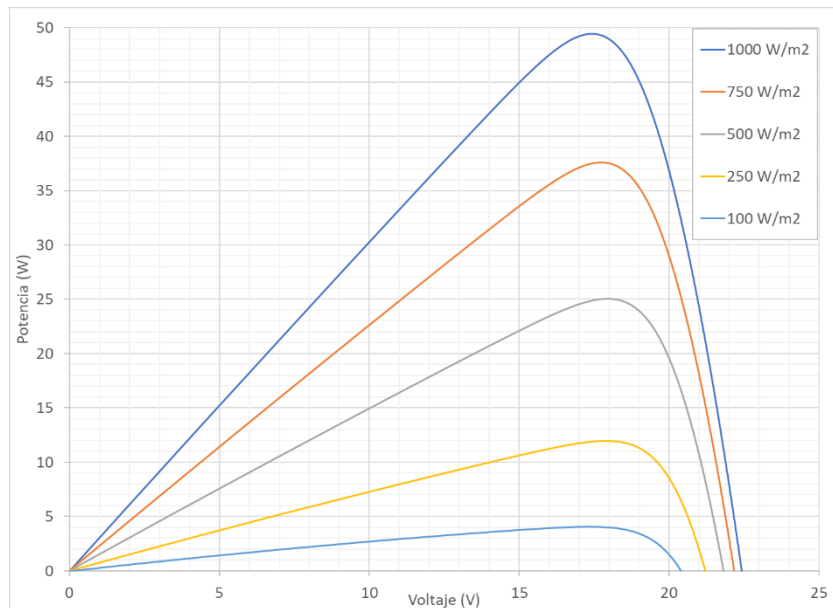


Figura 5. Curva V-P del Panel Ecodelta ED50-6M en función de la irradiancia

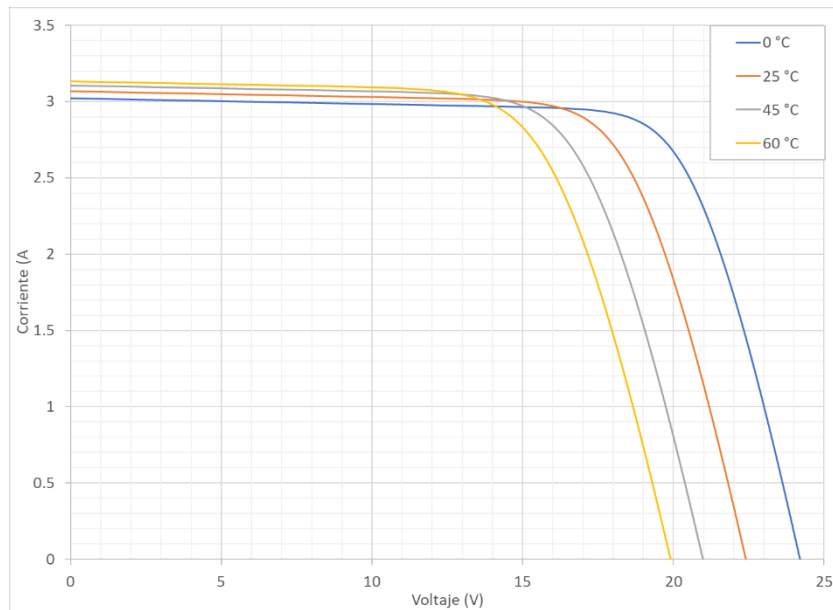


Figura 6. Curva V-I del panel Ecodelta ED50-6M en función de la temperatura

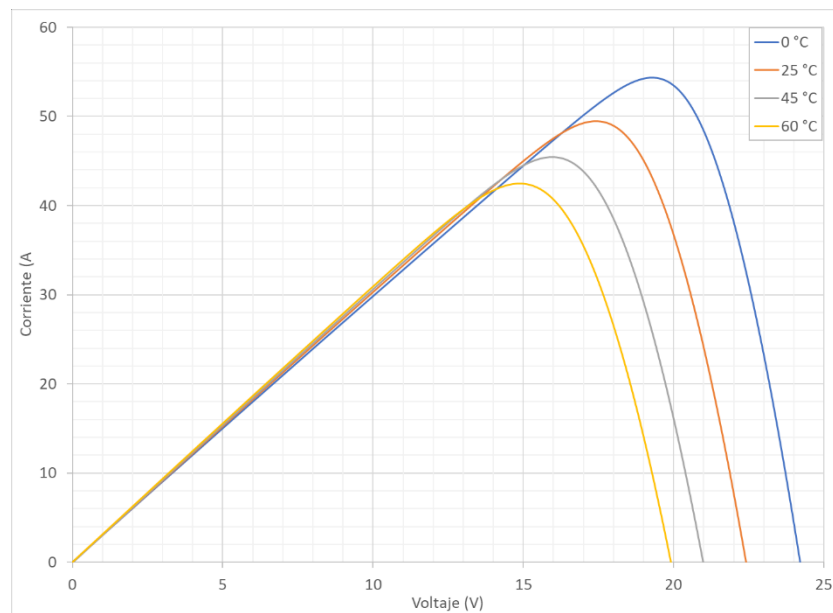


Figura 7. Curva V-I del panel Ecodelta ED50-6M en función de la temperatura

4.3. ALIMENTACIÓN

Con el fin de alimentar nuestro circuito emulador, realizamos el diagrama en bloques de la Figura 8.

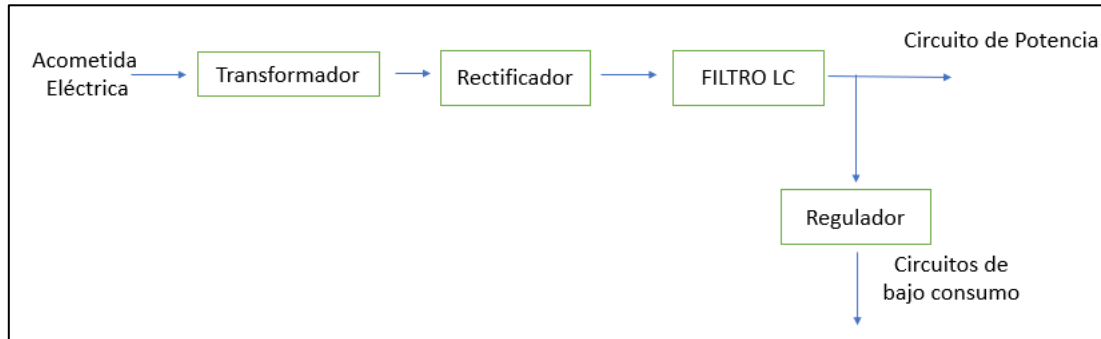


Figura 8. Diagrama en Bloques de la Alimentación.

En la Figura 9 se puede observar el circuito de alimentación, en el cual la acometida eléctrica pasa por un transformador con relación 12:5, el cual disminuye el voltaje de $120 V_{RMS}$ a $50 V_{RMS}$, que luego pasa por un puente rectificador KBL406, y por último un filtro L-C. Para la etapa de potencia se usará directamente la salida del filtro LC, mientras que para la alimentación de los circuitos integrados se usarán dos reguladores. Diseñamos un rectificador de puente completo con salida filtro L-C, el cual, nos entrega un voltaje DC filtrado.

El propósito de este filtro es producir una tensión de salida aproximadamente continua. El condensador mantiene la tensión de salida en un nivel constante y la bobina suaviza la corriente del rectificador y reduce la corriente pico en los diodos aumentando de esta manera el factor de potencia. El voltaje promedio que entrega este rectificador con filtro L-C es $2V_p/\pi$. Para el cálculo del filtro L-C, se tuvo en cuenta que la frecuencia de corte estuviera por debajo de 12 Hz y que la impedancia del filtro estuviera al menos 2 veces menor que la impedancia de la carga.

Conociendo que el voltaje de salida del rectificador es de alrededor de 43.2 V por la caída de los diodos en modo continuo, y la corriente de salida es de alrededor de 3.5 A, tendríamos que la impedancia de carga que vería el rectificador sería de $R_L = \frac{43.2 V}{3.5 A} = 12.34 \Omega$.

Por lo tanto, la impedancia del filtro tendría que ser al menos 2 veces menor a la impedancia de salida. Suponiendo un condensador de 10 mF para obtener un voltaje de rizado bajo, despejamos el valor de la bobina para una frecuencia de corte de 10 Hz y verificamos la impedancia de salida

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$
$$L = \left(\frac{1}{2\pi f_c}\right)^2 \frac{1}{C} = 25.33 \text{ mH}$$
$$Z_{LC} \ll 2R_L$$
$$Z_{LC} = \sqrt{\frac{L}{C}} = 1.58 \Omega$$
$$Z_{LC} \ll 24.68 \Omega$$

Si $\Delta V_{CPP} = 0.5 V$, el ΔI_{LPP} será:

$$\Delta I_{CPP} = \Delta I_{LPP} = \frac{\Delta V_{CPP}}{Z_C} = 2\pi(120 \text{ Hz})(10\text{mF})(0.5 V) = 3.77 A$$

$$I_L = I_O + \frac{3.77}{2} \sin(2\pi 120t)$$

$$I_{LMX} = 5.385 A$$

$$I_{LRMS} = \sqrt{3.5^2 + \left(\frac{1.885}{\sqrt{2}}\right)^2} = 3.745 A$$

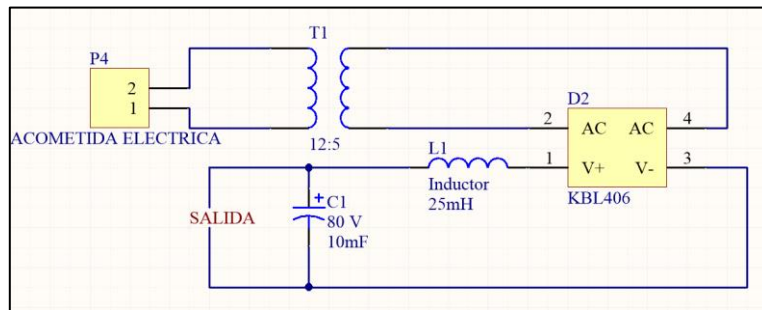


Figura 9. Esquemático Circuito de Alimentación

4.4. CIRCUITO DE APROXIMACION 1

En el primer circuito de aproximación se realizó el diagrama en bloques de la Figura 10.

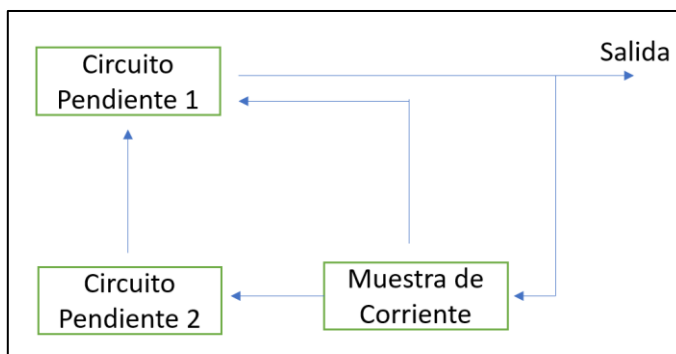


Figura 10. Diagrama en Bloques Circuito de Aproximación 1.

Se diseñó un circuito el cual tuviera dos pendientes dependiendo de la muestra de corriente. El bloque Circuito Pendiente 1, tenía una salida en la cual, cuando no había corriente en salida, la salida era igual al voltaje de circuito abierto a escala, y cuando llegaba a la corriente de máxima potencia, la salida era el voltaje de máxima potencia a escala, luego del punto de corriente de máxima potencia, el bloque Circuito Pendiente 2, comenzaba a actuar, quitándole corriente al primer circuito para lograr así, bajar el voltaje a 0 V cuando la corriente de salida llegase a ser la corriente de corto circuito. En la Figura 11, se puede observar el circuito de aproximación 1.

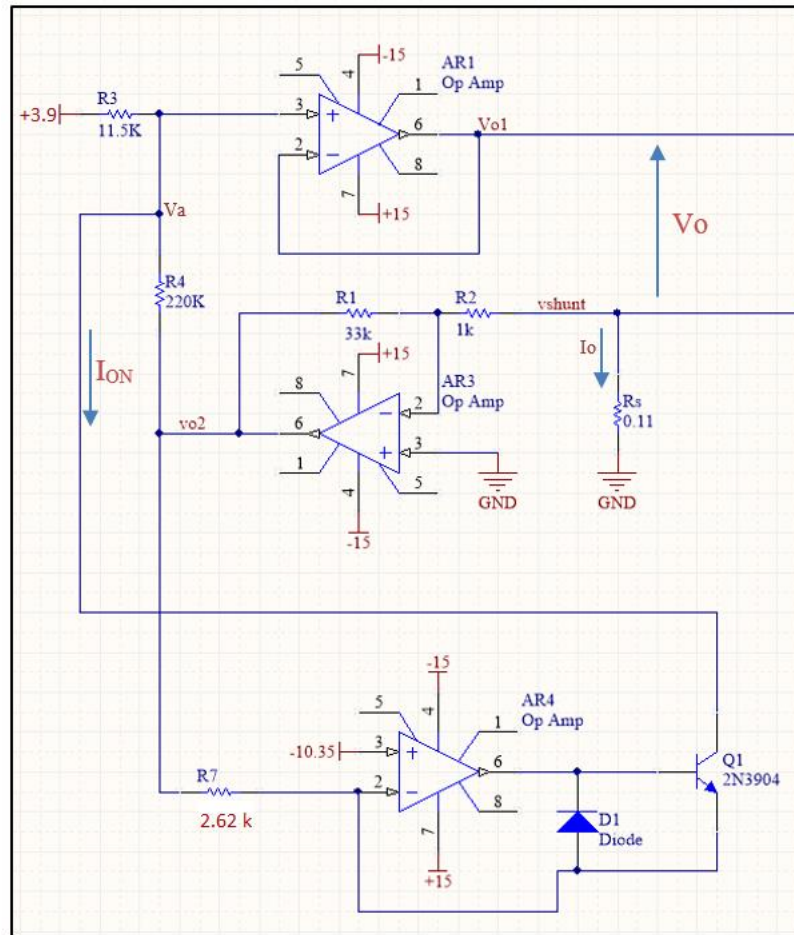


Figura 11. Esquemático del Circuito de Aproximación 1.

Ecuaciones del bloque Circuito Primer Pendiente

$$V_{O2} = -\frac{I_o R_s R_1}{R_2}$$

$$\frac{V_A - 3.9}{R_3} = \frac{V_{O2} - V_A}{R_4}$$

$$\frac{V_A}{R_3} - \frac{3.9}{R_3} = -\frac{I_o R_s R_1}{R_2 R_4} - \frac{V_A}{R_4}$$

$$V_A \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) = \frac{3.9}{R_3} - \frac{I_o R_s R_1}{R_2 R_4}$$

$$V_A = \left(\frac{3.9}{R_3} - \frac{I_o R_s R_1}{R_2 R_4} \right) \left(\frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

$$V_{O1} = V_A$$

$$V_S = I_o R_s$$

$$V_O = V_{O1} - V_S$$

$$V_O = \left(\frac{3.9}{R_3} \left(\frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) - I_o R_s \left(1 + \frac{R_1}{R_2 R_4} \left(\frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) \right) \right)$$

Debido a que la etapa de potencia tendrá una ganancia de 6, para obtener el V_o :
Asumimos $R_4=220K\Omega$, $R_2=1K\Omega$.

Para el punto voltaje circuito abierto la corriente de salida es 0, por lo tanto, la ecuación quedaría

$$\frac{22.4}{6} = \left(\frac{5}{R_3} \left(\frac{R_3 220 \text{ k}\Omega}{R_3 + 220 \text{ k}\Omega} \right) \right)$$

Para el punto voltaje máxima potencia (17.4 V) la corriente de salida es la corriente de máxima potencia (2.85 A), por lo tanto, la ecuación quedaría

$$\frac{17.4}{6} = \left(\frac{5}{R_3} \left(\frac{R_3 220 \text{ k}\Omega}{R_3 + 220 \text{ k}\Omega} \right) - 2.85(0.11 \Omega) \left(1 + \frac{R_1}{(1 \text{ k}\Omega) 220 \text{ k}\Omega} \left(\frac{R_3 220 \text{ k}\Omega}{R_3 + 220 \text{ k}\Omega} \right) \right) \right)$$

Solucionando estas dos ecuaciones, los valores de R1 y R3 deben ser aproximadamente 33 kΩ y 11.5 kΩ respectivamente.

Cuando la corriente pasa por la corriente de máxima potencia el circuito de pendiente 2, empieza a funcionar y a pedir corriente a un punto del circuito de corriente 1. Las ecuaciones del circuito pendiente 2 son:

$$I_{ON} = \frac{5 - V_{O1}}{R_3} - \frac{\frac{I_o R_s R_1}{R_2} - V_{O1}}{R_4}$$

$$V_{ON} = -I_{PMP} R_s \frac{R_1}{R_2}$$

$$R_{ON} = \left(\frac{V_{ON} + I_o R_s \frac{R_1}{R_2}}{I_{ON}} \right)$$

Para hallar la corriente que tendría que sacar el circuito pendiente 2 aplicamos la fórmula de corriente de encendido:

$$I_{ON} = \frac{3.9 \text{ V} - (3.04 \text{ A})0.11 \Omega}{11.5 \text{ k}\Omega} - \frac{3.04 \text{ A} (0.11 \Omega)33 - (3.04 \text{ A})0.11 \Omega}{220 \text{ k}\Omega} = 261.4 \mu\text{A}$$

El voltaje Vo2 es proporcional a la corriente de salida, por esto cuando la corriente pase más de la corriente de máxima potencia (2.85 A), este circuito debe de encender, es decir,

$$V_{ON} = -I_{PMP} R_s \frac{R_1}{R_2} = -10.35 \text{ V}$$

Sabiendo la corriente que debe de pedir cuando el circuito pendiente 2 este encendido, procedemos a hallar el valor de resistencia para que esto se cumpla.

$$R_{ON} = \left(\frac{-10.35 + (3.04 \text{ A})(0.11 \Omega)(33)}{261.4 \mu\text{A}} \right) = 2.62 \text{ k}\Omega$$

4.5. CIRCUITO DE APROXIMACION 2

En este circuito se realiza el cálculo de la curva Voltaje-Corriente en software. Por medio del bloque Muestra de corriente que está compuesto por un sensor de corriente ACS712 se tomaba una muestra de la corriente de salida, esta muestra la tomaba el PIC por medio de un ADC integrado, se la enviaba al computador a través de comunicación RS232, el computador realizaba un cálculo iterativo para determinar el voltaje de salida, y este voltaje luego era amplificado en el modulador. En el segundo circuito de aproximación se realizó el diagrama en bloques de la Figura 12.

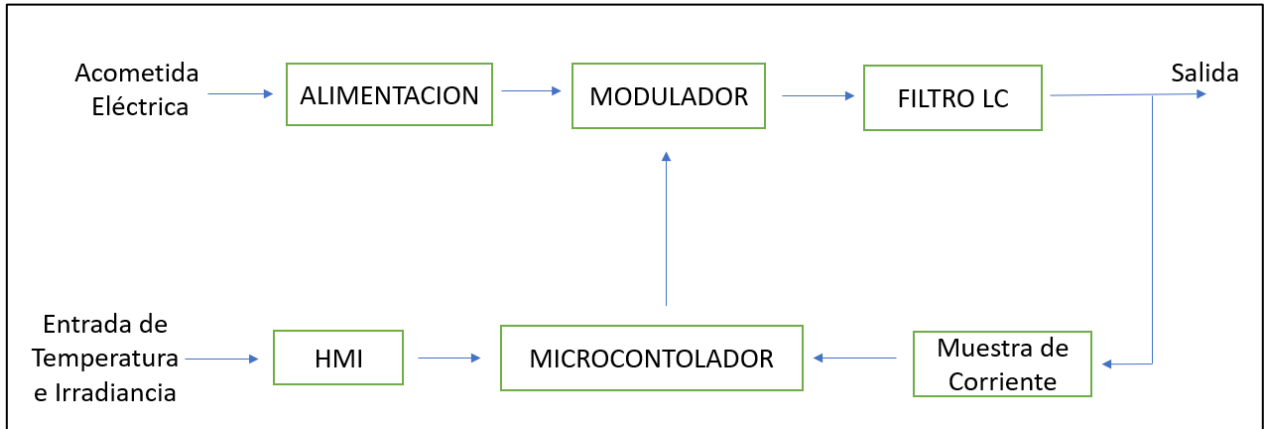


Figura 12. Diagrama en Bloques del Circuito de Aproximación 2

El Bloque de alimentación se encuentra en la sección 4.3.

4.5.1. MODULADOR

Este bloque está compuesto por un LM319 que tiene 2 comparadores de alta velocidad que crean dos señales PWM, comparando una señal triangulo de 50 kHz con la señal moduladora que entra del microcontrolador. Estas señales PWM, entran a un circuito de adaptación y tiempo muerto de señales para que el driver IR2110 pueda recibir de forma correcta las señales, dentro de sus rangos y lo más importante sin cruzarse una señal con la otra, ya que en caso de que haya un cruce de señales, los mosfets que controla el IR2110 entrarían en corto circuito. El tiempo muerto que se les dio a las señales de PWM fue alrededor de 300 ns. En el driver IR2110 se utiliza el shutdown para que los mosfets tengan un arranque controlado o que el driver se apague cuando circule por estos una corriente de 6 A. Los mosfets que se usaron en el diseño fueron IRF540N que tienen una resistencia de encendido de 77mΩ con tensión de ruptura de 100 V.

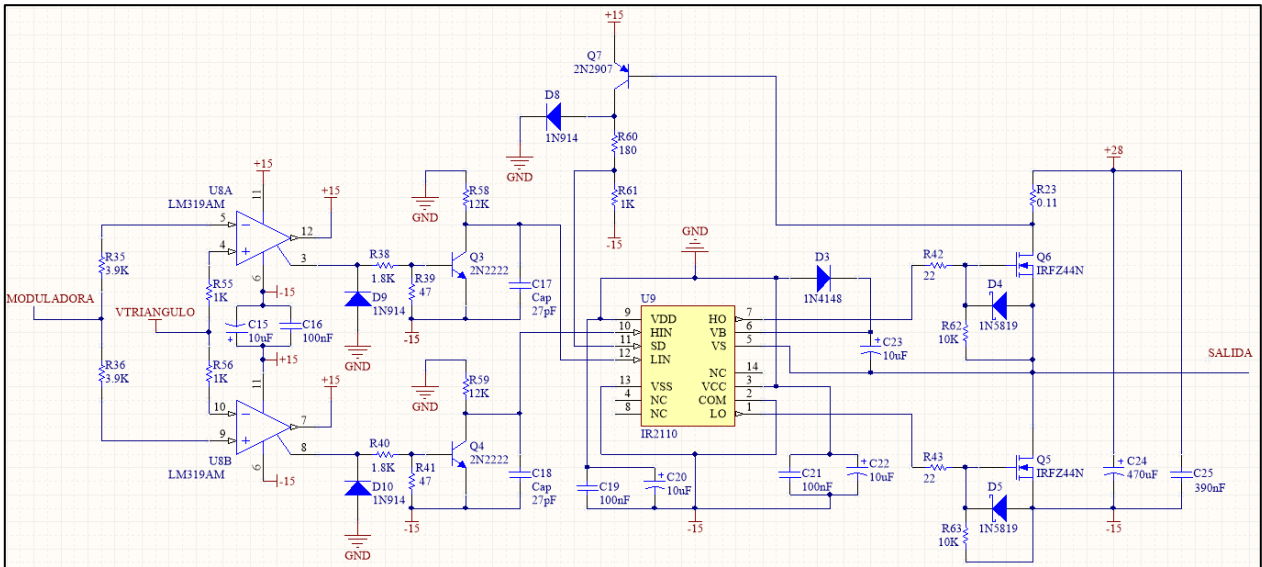


Figura 13. Esquemático del bloque modulador.

Para generar la señal triángulo se utiliza un amplificador operacional dual de transconductancia LM13700, y se elige una frecuencia de conmutación de 50 kHz, este operacional genera una señal triángulo con menos del 1% de THD. Teniendo en cuenta las especificaciones del integrado diseñamos la configuración mostrada en la Figura 14, la cual genera una señal triángulo de 0-5 V, frecuencia 50 kHz. Debido a que la señal triángulo que genera el OTA está de -2.5 a 2.5, fue necesario colocar un sumador inversor para sumar un offset de 2.5 V y lograr que la señal triángulo de salida se encuentre entre 0 y 5 V.

La corriente con la cual el condensador se carga y se descarga.

$$I_c = \frac{15 - (-15 + 2(0.7))}{R_{24}}$$

Voltaje pico de la señal cuadrada y triangular

$$I_a = \frac{15 - (-15 + 2(0.7))}{R_{25}}$$

$$V_{O1} = I_a(R_{26} + R_{27})$$

Sabiendo que el condensador se carga y se descarga por el mismo tiempo, tenemos que:

$$\frac{I_c}{C_{27}} = \frac{\Delta V_c}{\frac{T}{2}}$$

$$T = \frac{2C_{27}\Delta V_c}{I_c}$$

$$f = \frac{I_c}{2C_{27}\Delta V_c}$$

$$\Delta V_c = 2I_a(R_{26} + R_{27})$$

$$f = \frac{I_c}{4C_{27}I_a(R_{26} + R_{27})}$$

Para hallar el valor de los componentes se establecieron las siguientes consideraciones

$$\Delta V_c = 5 V$$

$$f = 50 kHz$$

$$C_{27} = 0.1 nF$$

$$R_{25} = 47 k\Omega$$

Despejando

$$2fC_{27}\Delta V_c = I_c = 50 \mu s$$

$$R_{24} = \frac{15 - (-15 + 2(0.7))}{I_c} = 568 k\Omega$$

$$I_a = 604.3 \mu A$$

$$\frac{\Delta V_c}{2I_a} = (R_{26} + R_{27}) = 4.137 k\Omega$$

Si se escogen resistencias de valores comerciales

$$R_{24} = 568 k\Omega$$

$$R_{26} = 1 k\Omega \text{ y } R_{27} = 3 k\Omega$$

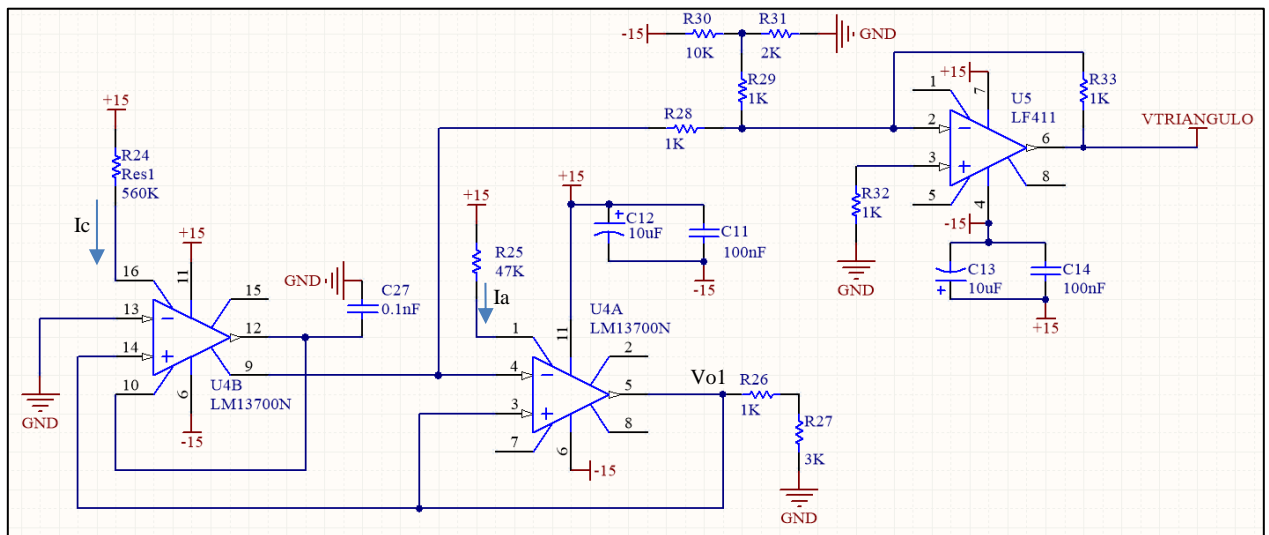


Figura 14. Esquemático Señal Triángulo

4.5.2. MUESTRA DE CORRIENTE

Para tomar una muestra de la corriente de salida del circuito se utiliza el sensor de corriente por efecto hall ACS712-5A. Este sensor funciona transformando el campo magnético por el paso de la corriente a través del sensor, y convirtiendo este campo en un voltaje proporcional a la corriente de salida. Las características técnicas de este sensor son: sensibilidad de 186 mV/A, máxima corriente = 5A, error del 1.5% a 25°C, 1.2 mΩ de resistencia interna, entre otras.

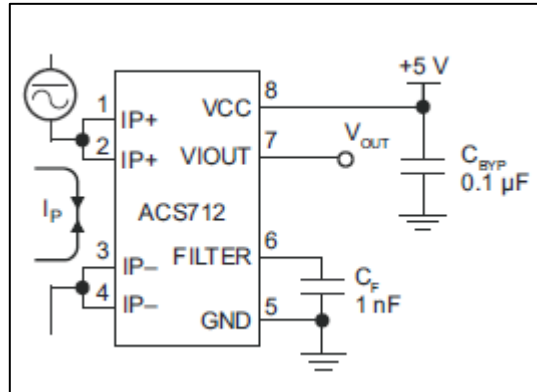


Figura 15. ACS 712-5A.

Para incrementar la sensibilidad y quitar el off-set de salida, se utiliza un amplificador con ganancia de 15, para lograr una sensibilidad de 2.79 V/A. De esta manera el voltaje de salida máximo que tendríamos en el momento de que el circuito este en corto (3.04 A) sería alrededor de 8.4816 V. Esta configuración queda como lo muestra la Figura 16.

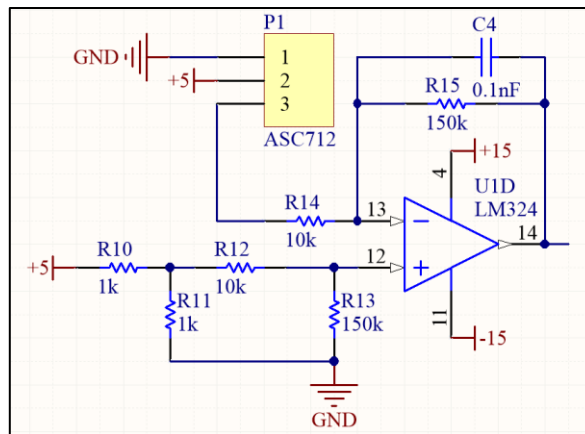


Figura 16. Circuito para incrementar sensibilidad y quitar offset.

4.5.3. FILTRO LC SALIDA

Para hallar el filtro LC, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones

$$\Delta I_L = 400 \text{ mA}$$

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} < 2R_L$$

Debido a que la resistencia de carga va a ser casi 0, se escoge un capacitor grande para que la impedancia del filtro LC también fuera muy pequeña.

Para hallar la inductancia con el rizado de corriente

$$\Delta I_L = -\frac{V_L}{L} t_{off}$$

$$t_{off} = 18.3 \mu s$$

$$L = \frac{6 V}{0.4 A} t_{off} \cong 280 \mu H$$

Para hallar el número de vueltas mínimo para que la bobina no se sature con el núcleo EA-77-500 que cuenta con $A_e=160\text{mm}^2$, resolvemos la ecuación ().

$$N > \frac{I_{LMAX}L}{A_e(0.2)} = \frac{3.24 A (280 \mu H)}{160 \text{ mm}^2(0.2)} = 28.35$$

Se elige $N=30$ vueltas.

Para ajustar el valor de la bobina se le coloca un GAP, que es calculado en la ecuación

$$l_{GAP} = \frac{\mu_0 A_e N^2}{2L} = 0.371 \text{ mm}$$

$$I_{LRMS} = \sqrt{3.04^2 + \left(\frac{0.4}{\sqrt{3}}\right)^2} = 3.05 \text{ A}$$

Tomando una densidad de corriente de 4 A/mm^2 , el valor de la sección transversal del alambre debe ser:

$$S_{\text{mm}^2} = \frac{I_{LRMS}}{4 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}} = 0.762 \text{ mm}^2$$

Mirando en la tabla AWG, se encuentra que el calibre #18 cumple con estas características.

Medium enamelled copper wires – AWG (B. & S.) (diameters based on BS1844: 1952 – medium covering)						
AWG (B. & S.)	nominal copper diameter (d)		max. overall diameter (d _o) mm	nominal cross-sect. area mm ²	nominal resistance at at 100 °C (r _{dc}) Ω/m	minimum winding pitch (l _{min}) mm
	inch	mm				
24	0,0201	0,5105	0,5817	0,205	0,10860	0,608
23	0,0226	0,5740	0,6502	0,259	0,08586	0,679
22	0,0253	0,6426	0,7214	0,324	0,06852	0,754
21	0,0285	0,7239	0,8052	0,412	0,05399	0,841
20	0,0320	0,8128	0,8966	0,519	0,04283	0,937
19	0,0359	0,9119	1,003	0,653	0,03403	1,048
18	0,0403	1,024	1,118	0,823	0,02700	1,168
17	0,0453	1,151	1,247	1,040	0,02137	1,303
16	0,0508	1,290	1,389	1,308	0,01699	1,452
15	0,0571	1,450	1,557	1,652	0,01345	1,627
14	0,0641	1,628	1,737	2,082	0,010670	1,815
13	0,0720	1,829	1,943	2,627	0,008460	2,030
12	0,0808	2,052	2,172	3,308	0,006717	2,270
11	0,0907	2,304	2,431	4,168	0,005331	2,540
10	0,1019	2,588	2,720	5,261	0,004224	2,842

Figura 17. Tabla AWG

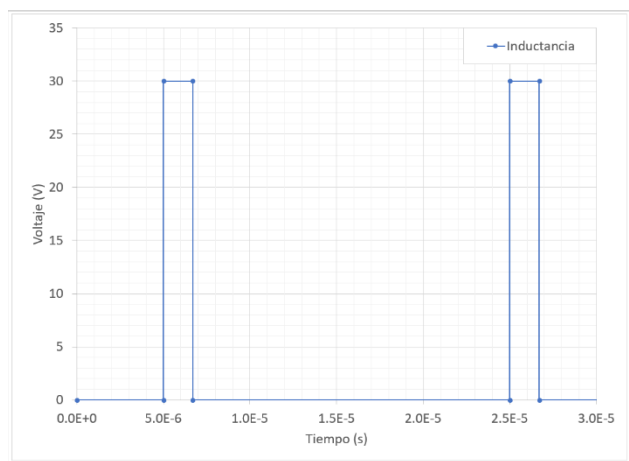


Figura 18. Voltaje de entrada al Filtro LC.

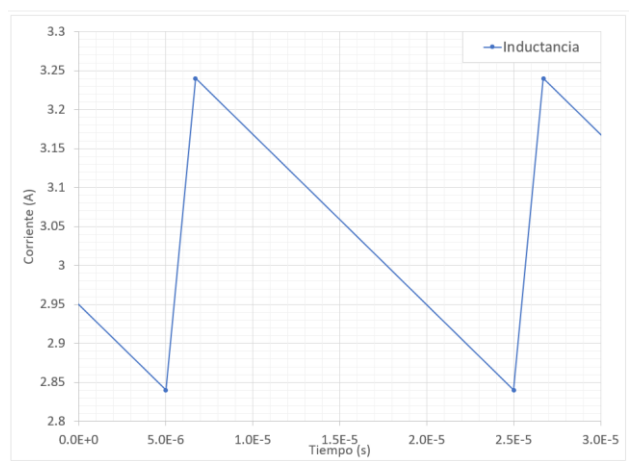


Figura 19. Corriente sobre la Inductancia

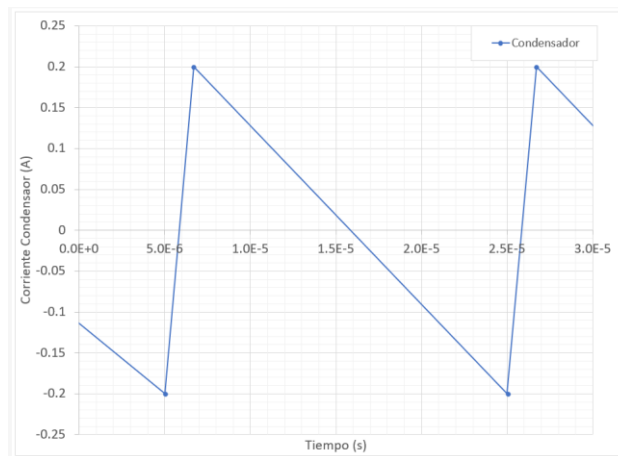


Figura 20. Corriente en el Condensador

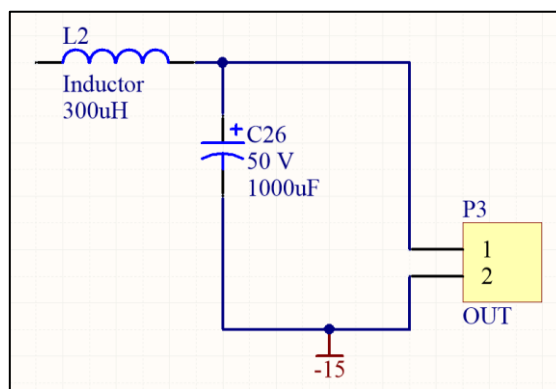


Figura 21. Esquemático Filtro LC.

4.5.4. HMI

La interfaz hombre maquina se desarrolló en Visual Basic a través de una aplicación en la cual el usuario ingresa los valores de irradiancia y temperatura, esta interfaz tenía un código el cual buscaba la solución del voltaje del panel de forma iterativa, ya que la solución es una ecuación trascendente dependiendo de la corriente de salida que recibía.

La interfaz Hombre-Maquina, se realiza a través de la aplicación creada en Visual Basic de la Figura 22, en donde el usuario puede ingresar los valores de Irradiancia desde 100 W/m² hasta 1000 W/m², y los valores de temperatura desde 0° C hasta los 60° C. El código en Visual Basic buscaba la solución del voltaje del panel de forma iterativa, ya que la solución es una ecuación trascendente dependiendo de la corriente de salida que recibía. La comunicación entre el computador y el circuito se realiza a través del FTDI232 que es un convertidor miniUSB a TTL y se realiza serial RS232.

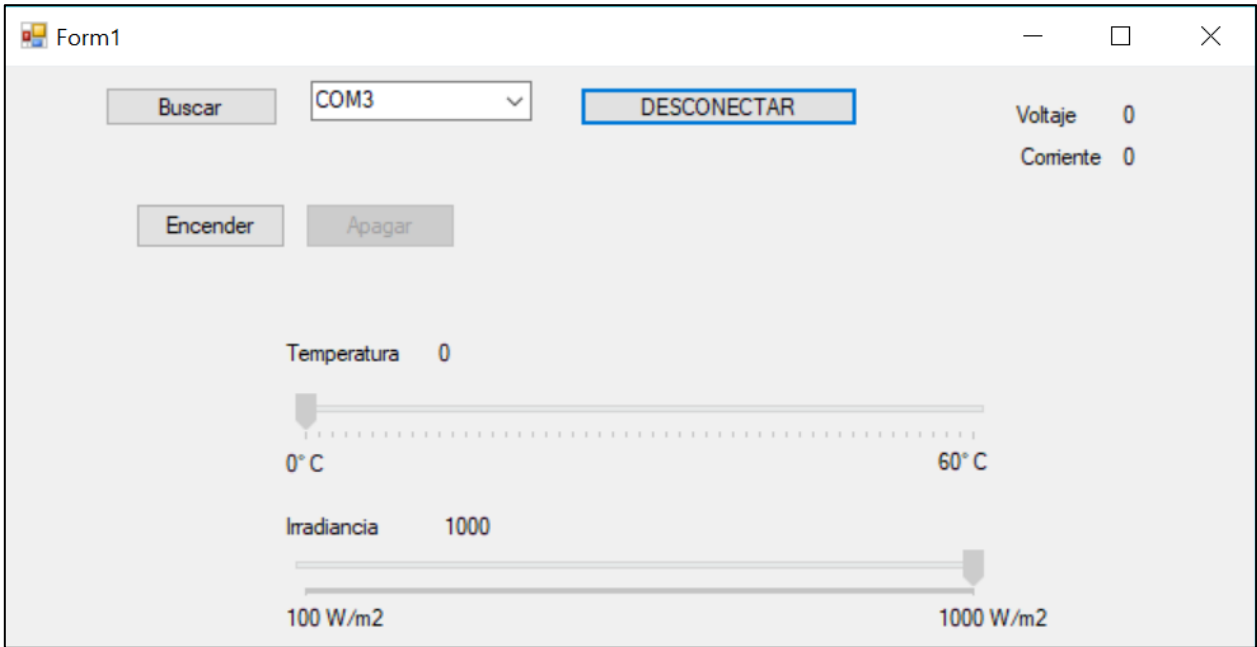


Figura 22. Interfaz Hombre-Maquina.

4.6. CIRCUITO DE APROXIMACION 3

En el tercer circuito de aproximación se realizó el diagrama en bloques de la figura ().

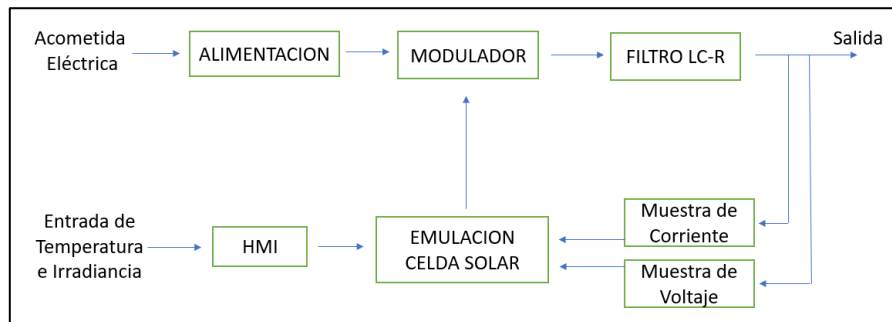


Figura 23. Diagrama en Bloques del Circuito de Aproximación 3

El Bloque Alimentación se encuentra en la sección 4.3.

El bloque Modulador se encuentra en la sección 4.5.1.

El bloque Filtro LC-R, es el mismo bloque que en la sección 4.5.3., con la diferencia que se le agrega una resistencia en la salida, con el objetivo de que cuando se este en la corriente de corto circuito y el voltaje de salida sea muy bajo, el filtro vea una resistencia mayor a su impedancia evitando así que el filtro entre en resonancia. El circuito de este bloque quedaría plasmado en la Figura 24.

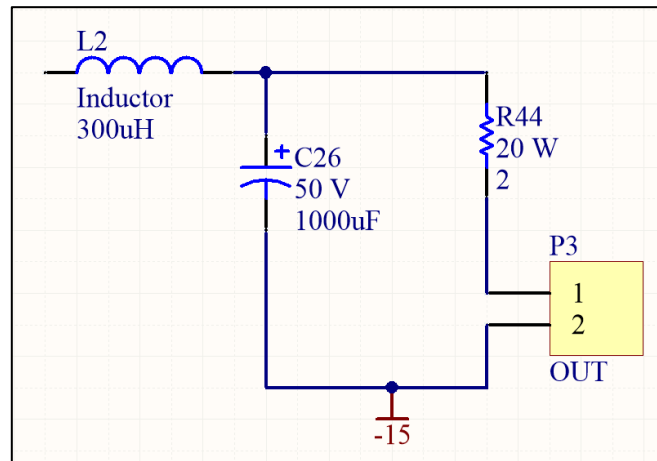


Figura 24. Esquemático Filtro LC con R.

4.6.1. EMULACION CELDA SOLAR

Para aproximarnos más a la curva del panel fotovoltaico, tratamos de imitar el modelo del panel solar el cual está compuesto por una fuente de corriente, un diodo, resistencia serie y resistencia paralelo. Para imitar la fuente de corriente utilizamos un amplificador de transconductancia el cual aporta la corriente dependiendo de una corriente de entrada que es proporcional a la irradiancia para determinar la corriente de corto circuito, un diodo 1N914, resistencia en paralelo de $2.7\text{ M}\Omega$, resistencia en serie de $22\ \Omega$ y otro amplificador de transconductancia que va a pedir una corriente a escala dependiendo de la corriente de salida del circuito para que la corriente que pasa por el diodo disminuya y así el voltaje cada vez sea menor logrando así una curva muy similar a la del panel ECODELTA ED50-6M.

Las curvas que genera el circuito de la Figura 27 se pueden observar en la Figura 25 y 26. En este circuito la parte A del OTA actúa como fuente de corriente fija entregando corriente dependiendo la irradiancia y temperatura, y la parte B, le quita corriente al diodo simulando igual como si se colocara una carga en la salida, ya que esta corriente que le quita es directamente proporcional con la corriente de salida.

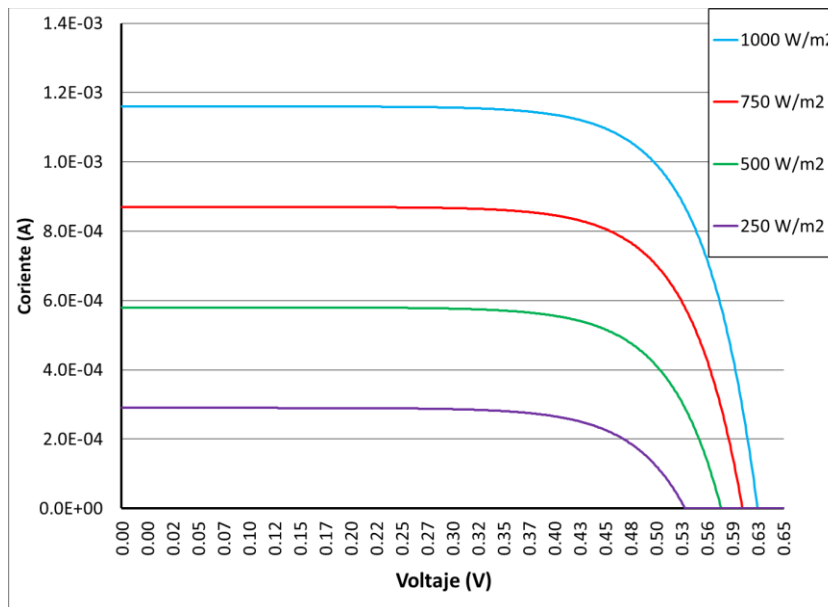


Figura 25. Curva Voltaje-Corriente Diodo 1N914

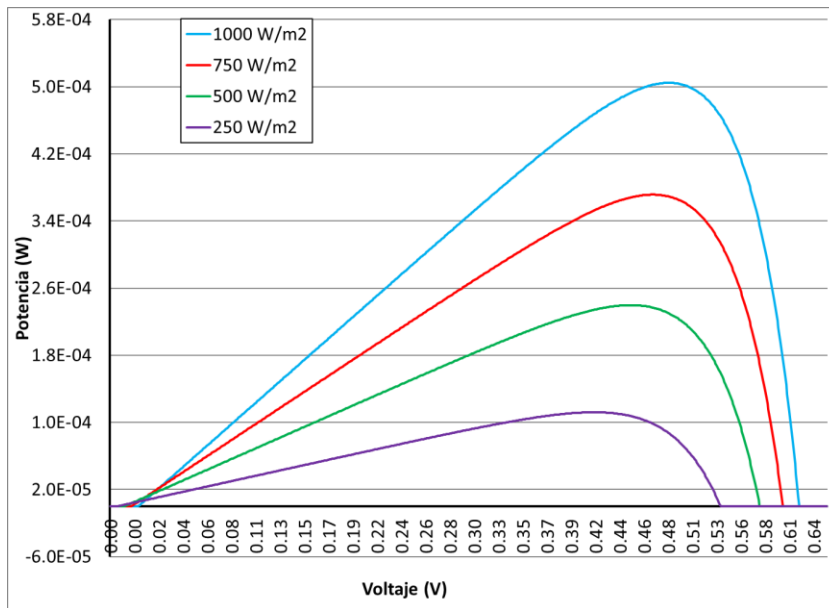


Figura 26. Curva Voltaje-Potencia Diodo 1N914

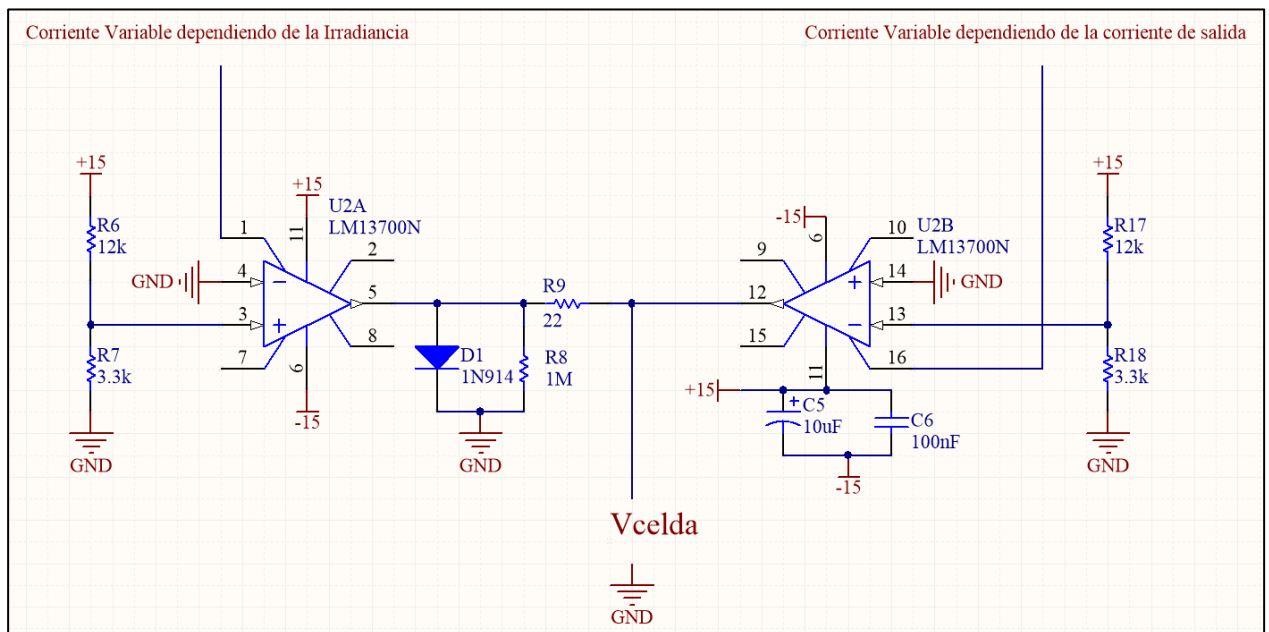


Figura 27. Circuito Emulador de Panel a escala.

El OTA A que actúa como fuente de corriente, recibe esta corriente dependiendo del circuito de la Figura 28, la señal PWM que envía el microcontrolador, es promediada, y luego amplificada por 2. El voltaje promedio que entrega el PIC cuando la irradiancia es 1000W/m^2 y temperatura de 25 grados centígrados es 4.76 V, si amplifcamos x2 con un inversor esta señal, tenemos -9.52 V, fijando así una corriente de $\frac{9.52\text{ V}}{8.2\text{ k}\Omega} = 1.16\text{ mA}$

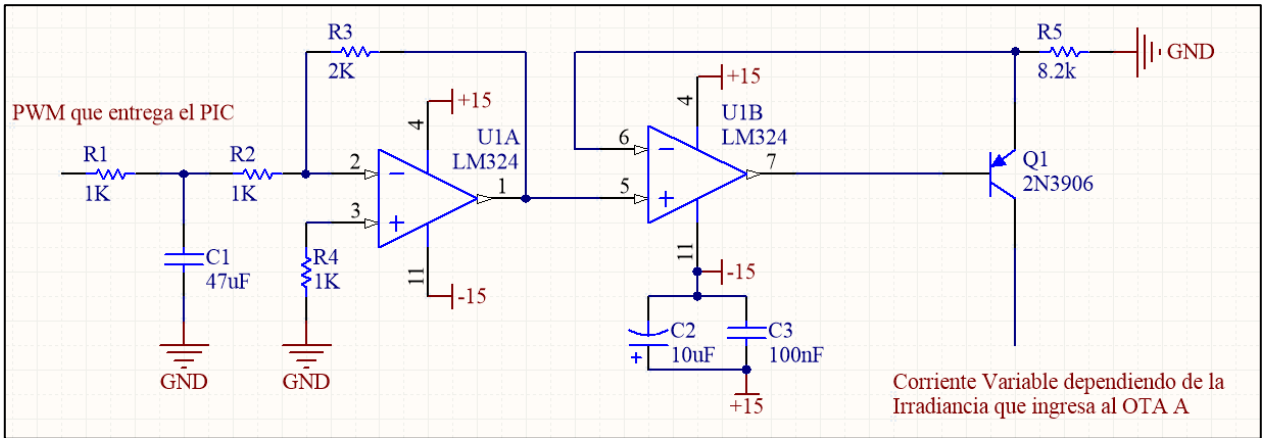


Figura 28. Circuito Fuente de corriente para OTA A

El OTA B que actúa pidiendo corriente, recibe esta corriente dependiendo del circuito de la Figura 29, la señal de salida del ACS712 luego de amplificar la sensibilidad y quitarle el offset esta entre 0 y -8.49 V, si tenemos -8.49 V, la corriente que está pidiendo el OTA B es de $\frac{8.44 V}{7.5 k\Omega} = 1.131 mA$, y así el voltaje de salida del diodo esta alrededor de los 0 V porque el OTA B, se esta consumiendo casi toda la corriente que entregando el OTA A.

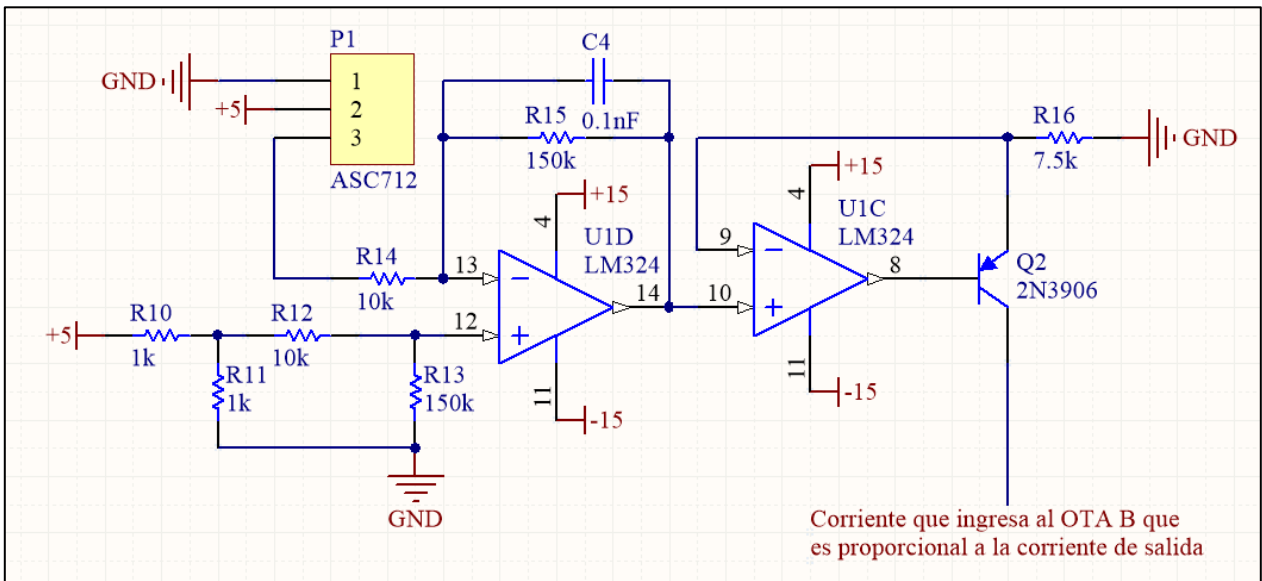


Figura 29. Circuito Fuente de corriente para OTA B

Por ultimo en la etapa de salida que se muestra en la Figura 30, el voltaje de celda pasa por un buffer para aislar esta señal, luego por un recortador, ya que si la corriente que está sacando el OTA B es muy parecida a la que entrega el OTA A, el voltaje de Celda llega a ser -15 V, como el voltaje de entrada del amplificador de error debe estar entre 0 y 5 V, debemos garantizar esto para que no opere por fuera de rango. En el amplificador de error se usó la acción de control Integral. Debido a que las señales de entrada del amplificador de error estaban entre 0 y 5 V, el circuito integrado que escogimos para el amplificador de error fue el MC33202, el cual es un amplificador Rail to Rail en las entradas y en las salidas.

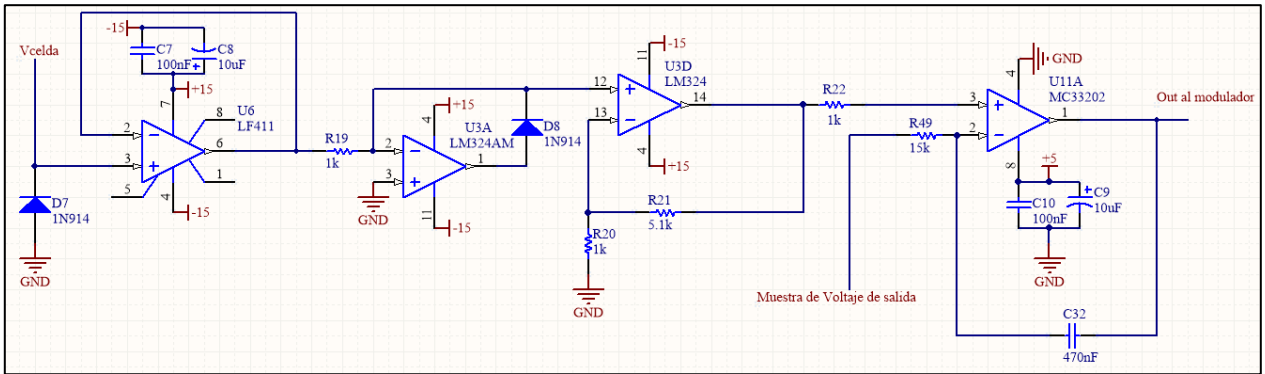


Figura 30. Salida del Emulador de Panel

4.6.2. MUESTRA DE VOLTAJE

El bloque muestra de voltaje de salida está definido por el circuito de la Figura 30, en el cual se atenúa 6 veces el voltaje de salida a través de un operacional, que luego pasa por un recortador para evitar que esta señal sea negativa ya que esta señal llega a un circuito integrado que esta polarizado entre 0 y +15 V.

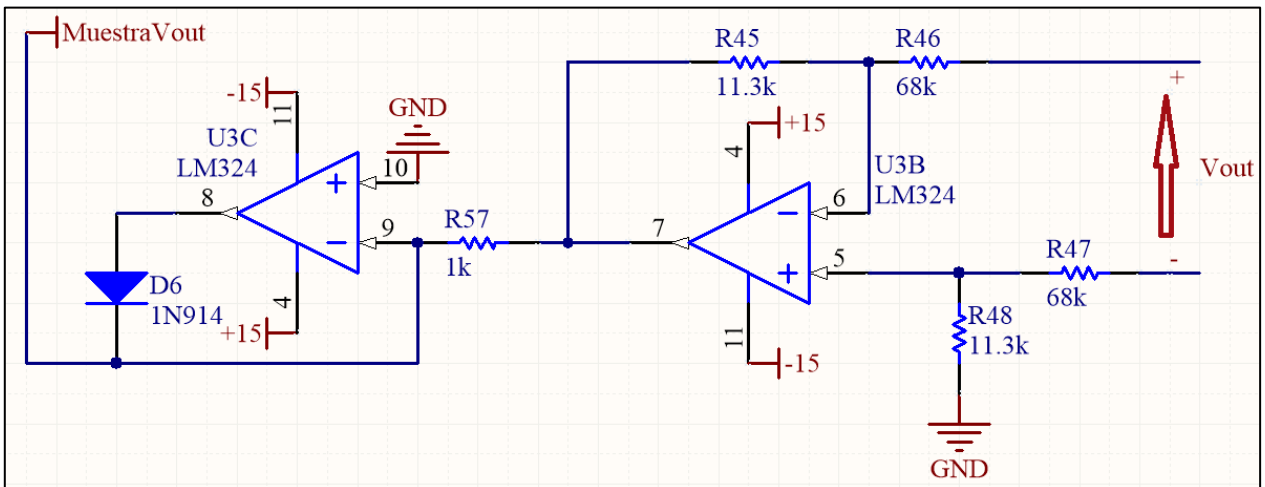


Figura 31. Circuito Muestra de Voltaje.

4.6.3. HMI

La interfaz Hombre-Maquina, se realiza a través de la aplicación creada en Visual Basic de la Figura 22, en donde el usuario puede ingresar los valores de Irradiancia desde 100 W/m² hasta 1000 W/m², y los valores de temperatura desde 0° C hasta los 60° C. El código en Visual Basic es diferente al código del circuito de aproximación 2, ya que en este circuito el único computo que se realiza en visual Basic, es definir la corriente de corto circuito y el porcentaje de atenuación del voltaje de salida en función de la irradiancia y temperatura. La comunicación entre el computador y el circuito se realiza a través del FTDI232 que es un convertidor miniUSB a TTL y se realiza serial RS232. La atenuación del voltaje de salida se hace a través de la resistencia R21, por medio de un potenciómetro digital XC103P controlado por el microcontrolador.

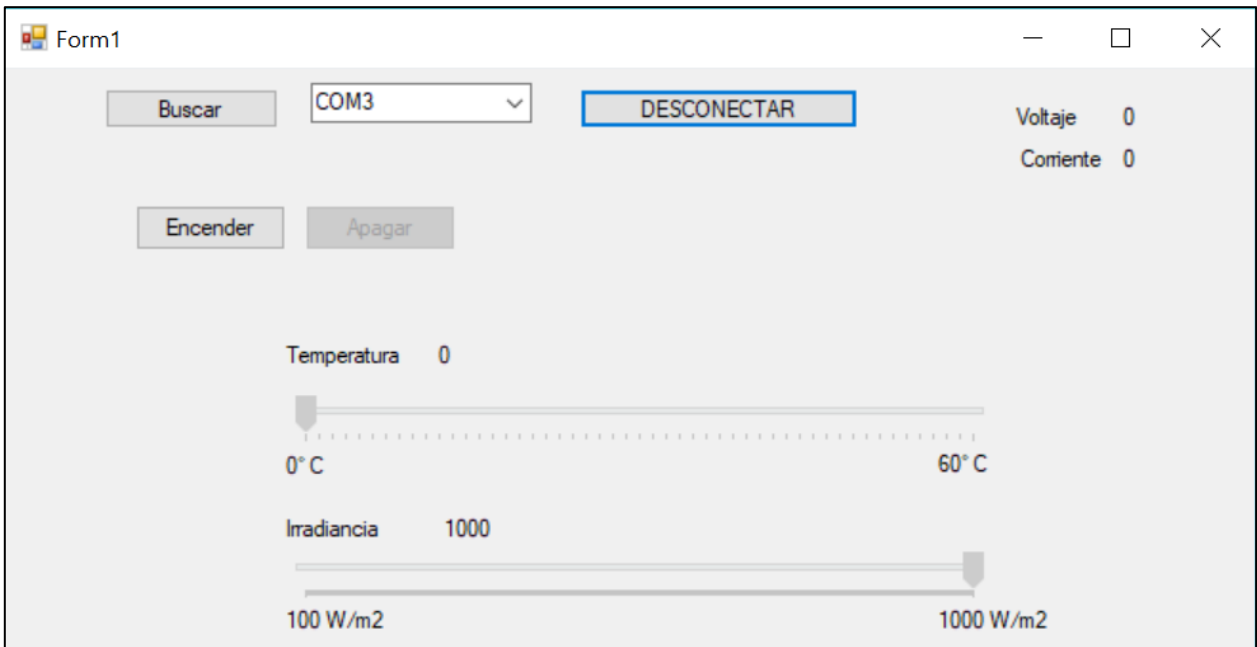


Figura 32. Interfaz Hombre-Maquina.

5. PROTOCOLO DE PRUEBAS

En esta sección se presentan los procedimientos realizados para medir los bloques principales del sistema. Algunos bloques no se midieron independientemente.

5.1. ALIMENTACION

Para comprobar el diseño se realizaron pruebas con un reóstato al circuito mostrado en la Figura 28, variándole la carga y observando cuanto es el voltaje de salida, corriente por la bobina, corriente de entrada cuando el rectificador con filtro LC está en modo continuo y modo discontinuo.

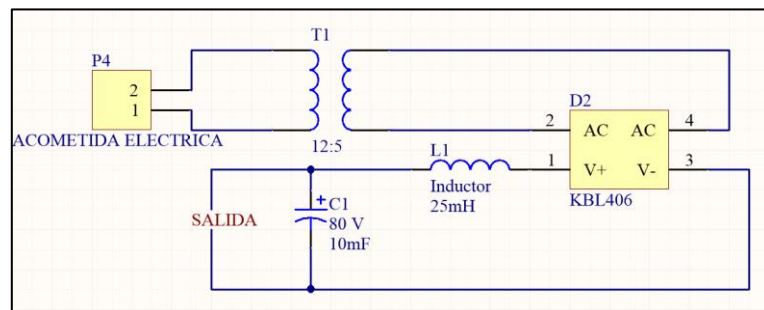


Figura 33. Esquemático Circuito de Alimentación

5.2. CIRCUITO DE APROXIMACION 1

Para comprobar el diseño de este primer circuito de aproximación se montó el circuito de la Figura 11. Como no se había montado la etapa de potencia en este primer circuito, para simular el voltaje shunt, se usó un trimmer el cual manejaba un voltaje entre 0 y 350 mV, para simular que pasaban alrededor de 0 a 3.1 A por la salida y se medía la salida de este circuito.

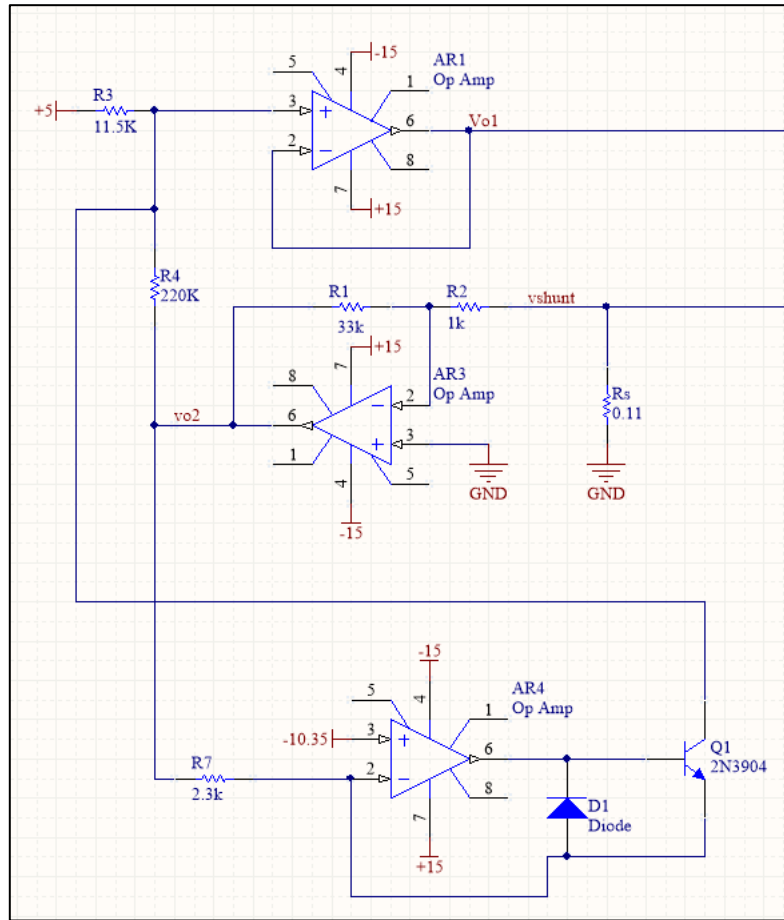


Figura 34. Esquemático del Circuito de Aproximación 1.

5.3. SEÑAL TRIANGULO

Para comprobar el diseño de este circuito se montó el circuito de la Figura 14.

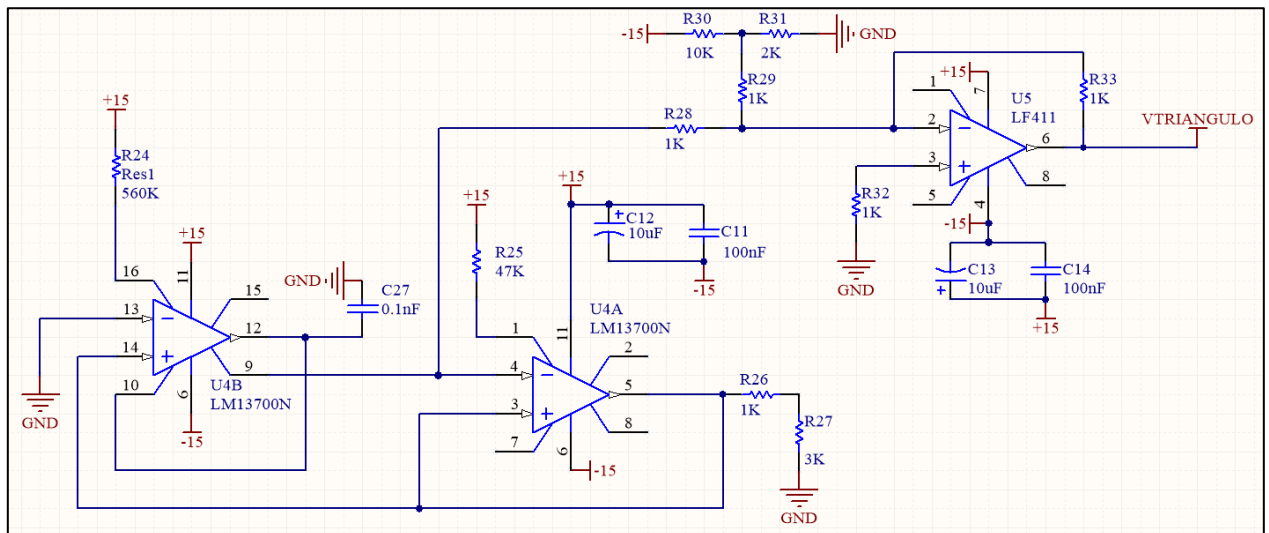


Figura 35. Esquemático Señal Triángulo

5.4. CIRCUITO DE APROXIMACION 2

Para comprobar el diseño de este circuito de aproximación 2, se montó el circuito de la Figura 36.

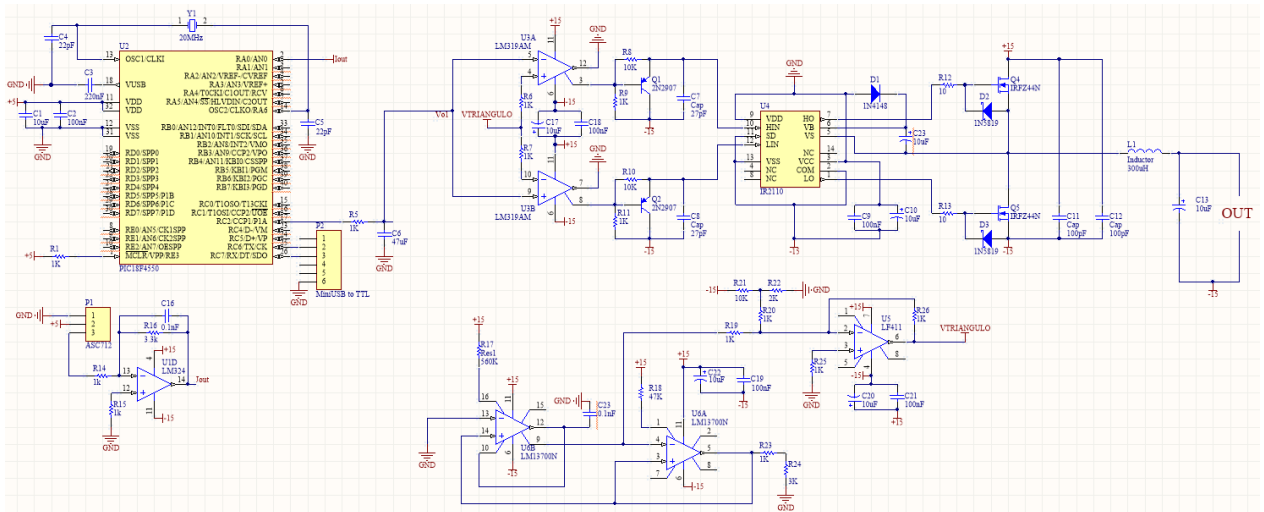


Figura 36. Esquemático del Circuito de Aproximación 2.

5.4. CIRCUITO DE APROXIMACION 3

Para comprobar el diseño del circuito de aproximación 3 se montó el circuito de la Figura 37.

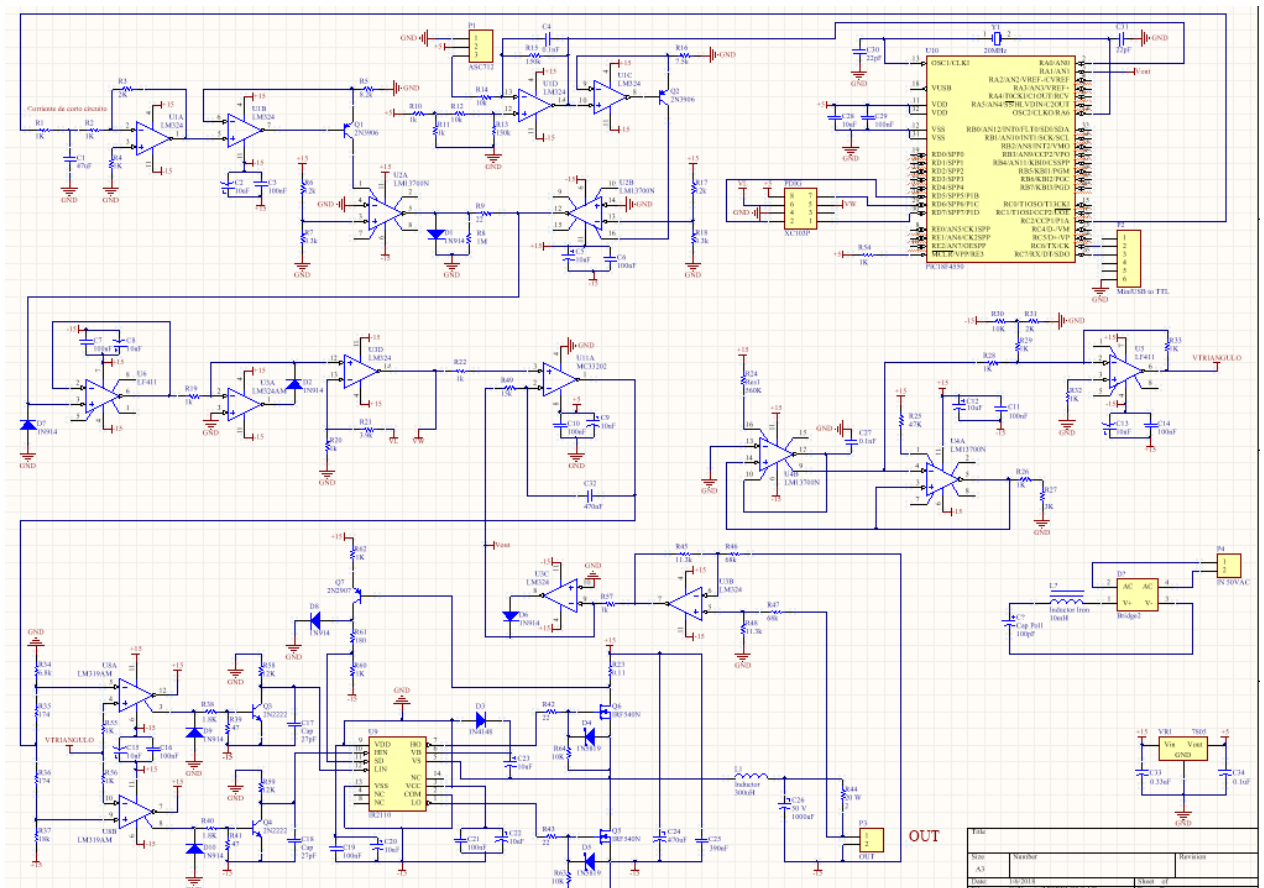


Figura 37. Esquemático Circuito de Aproximación 3

6. ANALISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos y las conclusiones de cada experimento y de las mediciones descritas en la sección de protocolo de pruebas.

6.1. ALIMENTACION

En el circuito de alimentación se obtuvieron las gráficas de voltaje de entrada, corriente de la bobina, corriente de entrada, voltaje del condensador, rizado en el condensador con carga y sin carga. Las graficas sin carga se puede apreciar que el circuito cambia a modo discontinuo por lo tanto las ecuaciones ya no son válidas, como lo es el voltaje de salida, ya no es $2V_p/\pi$, sino casi el voltaje pico, por lo tanto, hay que usar reguladores HV.

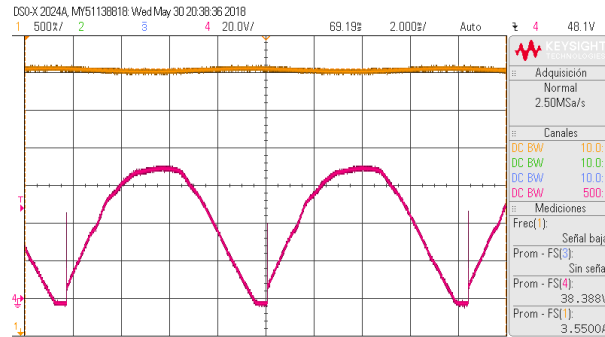


Figura 38. Voltaje Rectificado con carga a la salida (Rosada) y Corriente de salida (Amarilla).

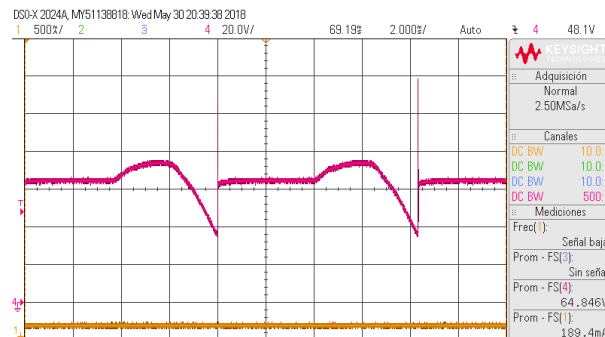


Figura 39. Voltaje Rectificado sin carga a la salida (Rosada) y Corriente de salida (Amarilla).

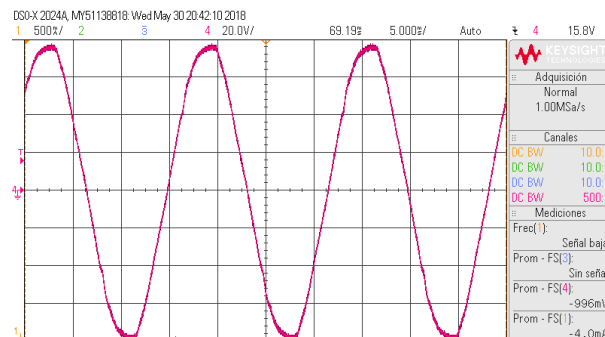


Figura 40. Voltaje de entrada al rectificador sin carga.

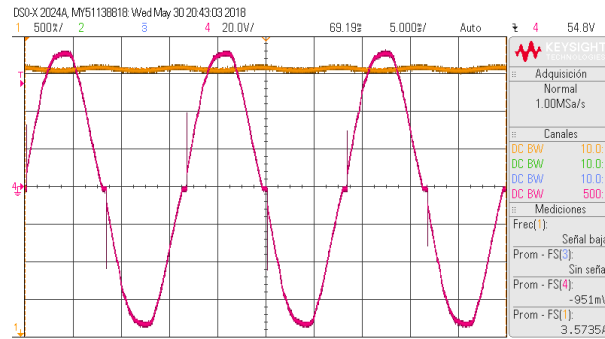


Figura 41. Voltaje Rectificado con carga a la salida (Rosada) y Corriente de salida (Amarilla).

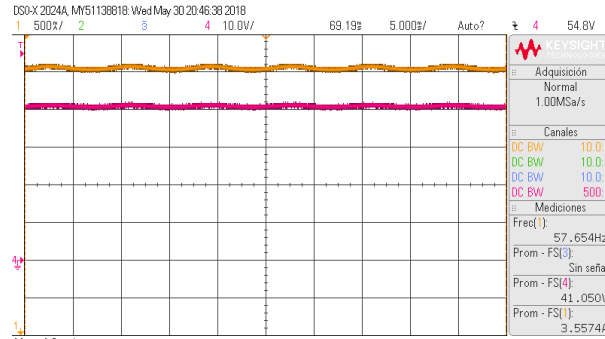


Figura 42. Voltaje del condensador (Rosada) y Corriente de Salida(Amarilla).

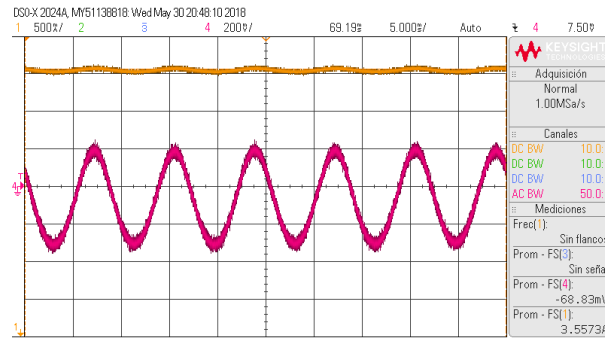


Figura 43. Rizado del Condensador (Rosada) y Corriente de salida (Amarilla).

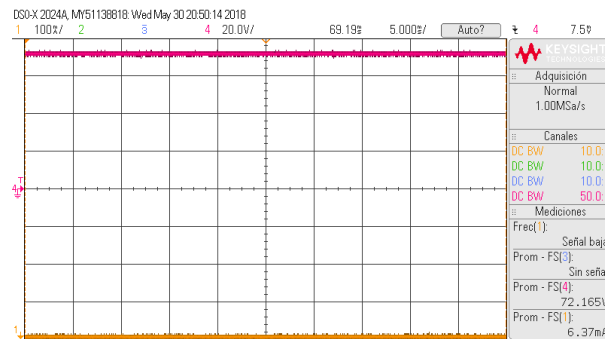


Figura 44. Voltaje de Salida del condensador sin carga (Rosada) y Corriente de salida (Amarilla).

6.2. CIRCUITO DE APROXIMACION 2

En la figura 46, se puede notar que solo se ven dos pendientes en la grafica experimental, justo como lo diseñamos, el problema de este circuito es que no tiene ese suavizado que tiene la curva teórica, pero es una buena aproximación a la curva de un panel solar con muy pocos circuitos integrados.

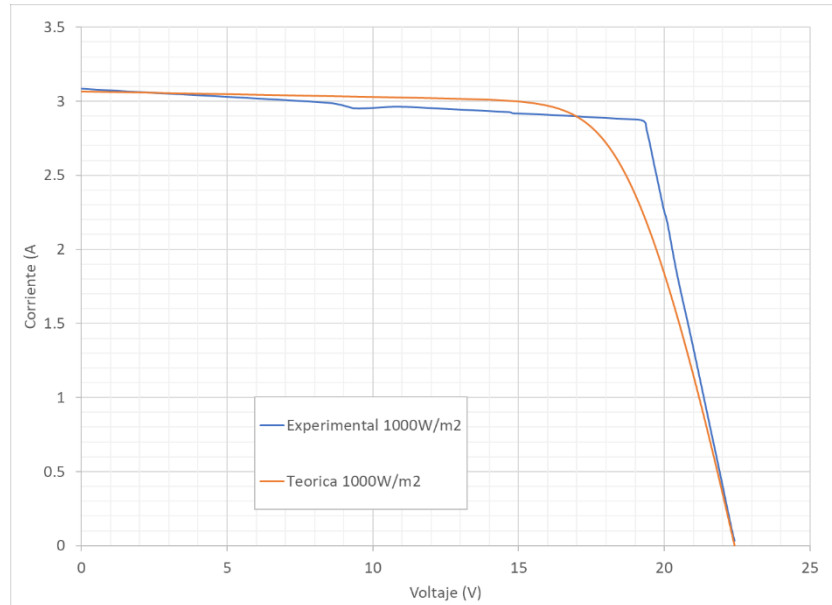


Figura 45. Curva Voltaje-Corriente Circuito de Aproximación 1.

6.3. SEÑAL TRIÁNGULO

En la Figura 45 se puede observar que es una señal triangular muy cercana a la frecuencia que fue diseñada 50 kHz y que sus valores están entre 0 y 5 V, lo que quiere decir que el circuito diseñado funciona correctamente y con muy poca distorsión armónica.

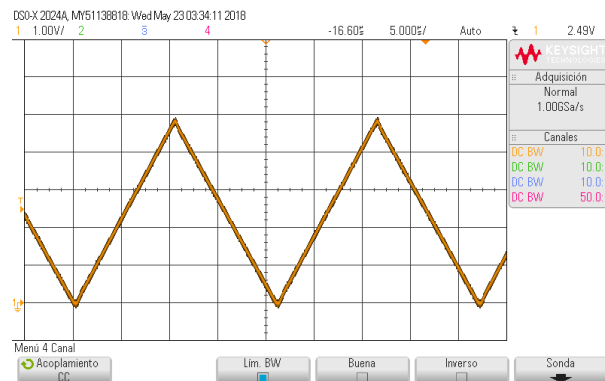


Figura 46. Señal Triángulo

6.4. CIRCUITO DE APROXIMACION 2

En la figura 47, se puede observar que este circuito da una muy buena aproximación, tiene una transición suave de una pendiente a otra, el efecto que se ve en las curvas teóricas alrededor de 23V es debido a que el circuito está en malla abierta, por lo que no puede garantizar que en la salida efectivamente se encuentre como la esperamos. El problema de este circuito es que el procesamiento que se realiza en software es muy lento, la velocidad de respuesta está alrededor de 57 ms, lo que quiere decir, que cuando exista un

corto circuito en la salida, el condensador no va a tener tiempo de recuperarse, pidiendo esa corriente a los mosfets haciendo caer en protección las fuentes. Por esta razón el voltaje no puede caer a 0 V.

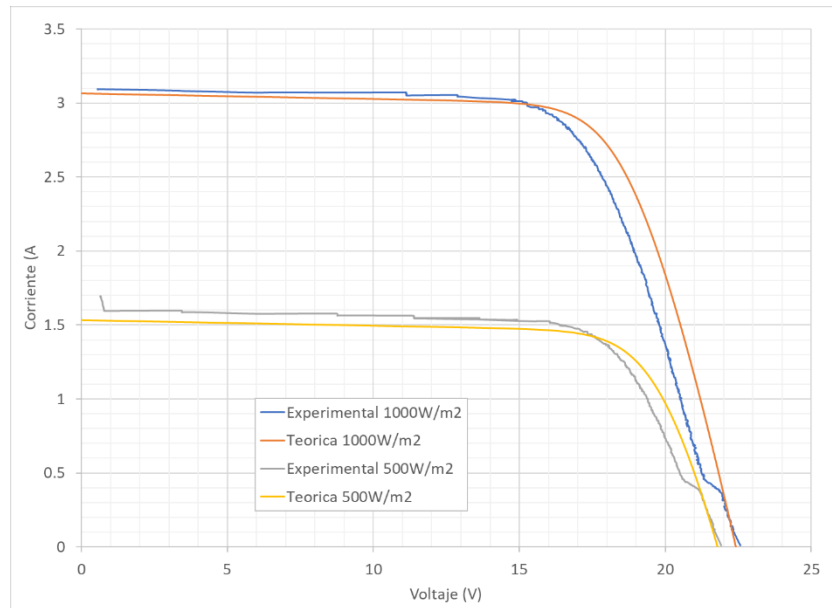


Figura 47. Curva Voltaje-Corriente Circuito de Aproximación 2.

6.5. CIRCUITO DE APROXIMACION 3

En las figuras 49 y 51, se puede observar que este circuito nos modela perfectamente el comportamiento de un panel solar, sin embargo, existen unas pocas diferencias en algunos puntos debido a que los diodos de los paneles y el diodo que se utilizó tienen parámetros diferentes, especialmente el factor de idealidad, este factor en el diodo 1N914 es de alrededor de 2, mientras que el factor que nos arrojó la herramienta de Simulink fue de 0.94746. En la figura 48 y 50 se puede observar que son las curvas perfectamente de un panel solar, y que por efectos prácticos de este trabajo de grado lo más importante era que el circuito emulara

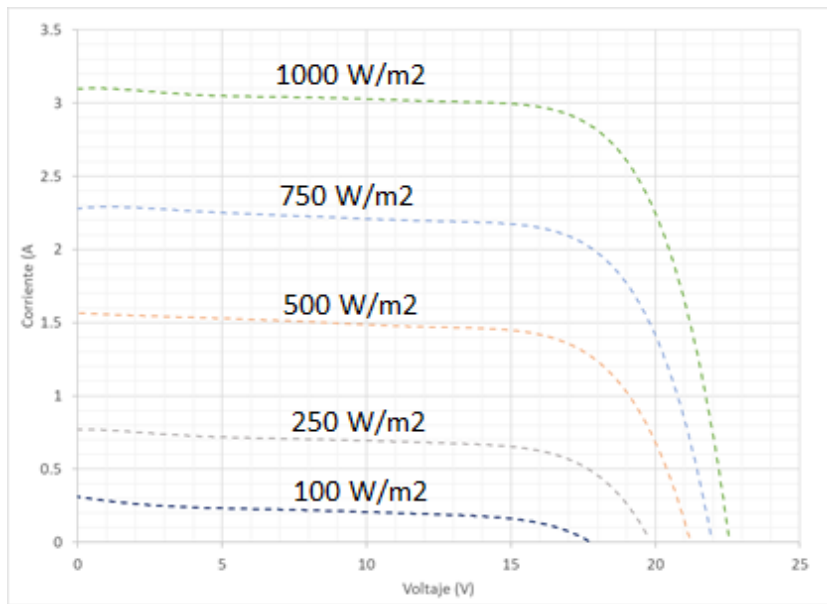


Figura 48. Curva Voltaje-Corriente Circuito de Aproximación 3

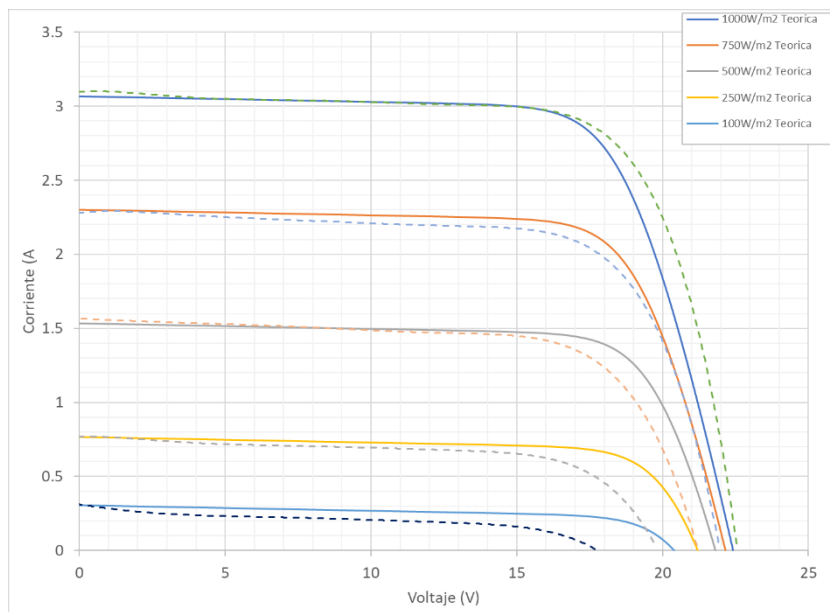


Figura 49. Curva Voltaje-Corriente Circuito Experimental con Teórica

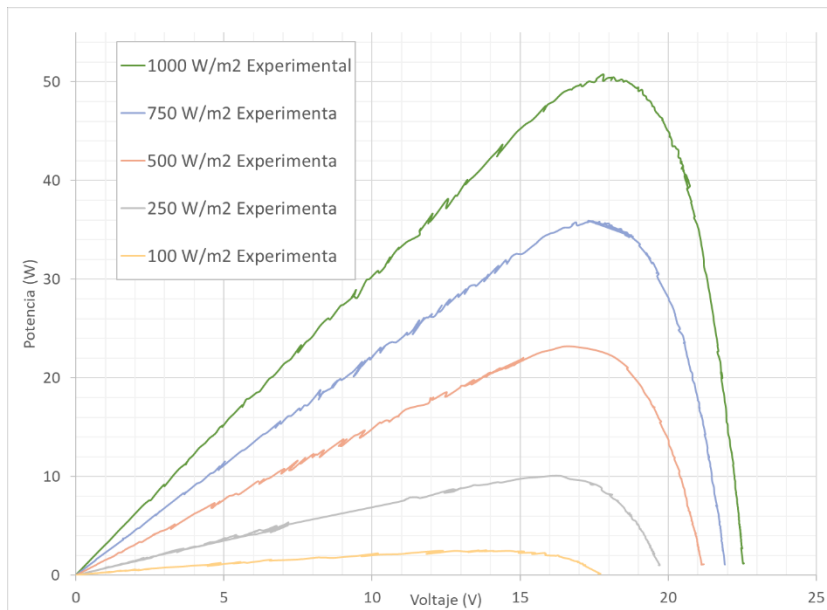


Figura 50. Curva Voltaje-Potencia Circuito de Aproximación 3

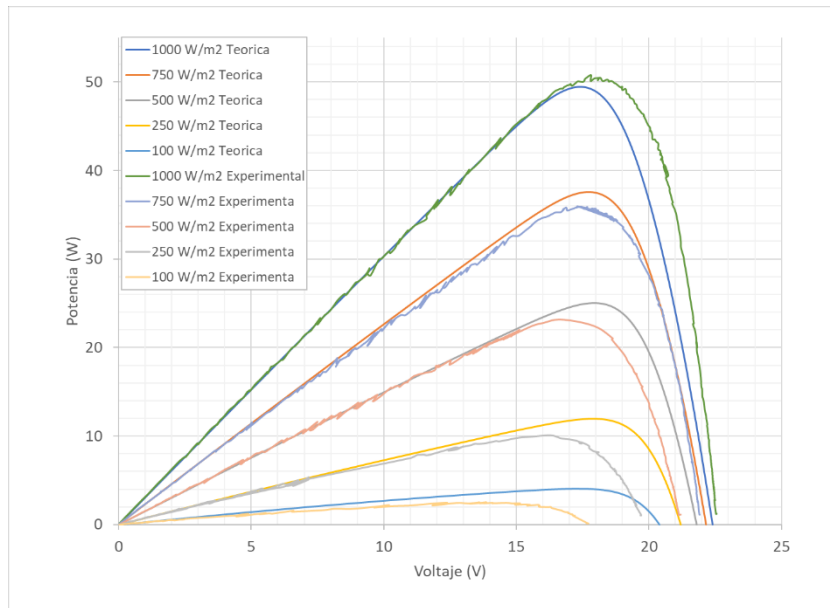


Figura 51. Curva Voltaje-Potencia Circuito Experimental con Teórica

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo del proyecto de grado supuso al final el uso del circuito de aproximación 3 para abordar los problemas que se generaron en el circuito de aproximación 1 y 2. El problema que se generó en la aproximación 1 es que la curva que realiza este circuito es muy rústica justo en el momento que cambia de pendiente, para lograr suavizar esa curva se planteó realizar el calculo en software, pero en el momento de implementación del circuito de aproximación 2, en las pruebas se notaba que el circuito respondía muy lento debido a que el procesamiento en software no era tan eficiente porque la ecuación del panel solar es una ecuación trascendente lo que hace realizar muchas iteraciones en el software.

Mientras se diseñaba el circuito de aproximación 3, se encontró un problema por el cual no llegaría a la corriente de corto circuito, el problema radica en donde va a ser la salida del circuito, ya que al momento de que ocurriera un corto circuito el circuito de emulador de celda, le iba a decir al modulador póngame voltaje 0 en la salida, pero un voltaje 0 significaba dejar prendido el mosfet de abajo, por lo cual no va a circular corriente, y si no circula corriente de nuevo el circuito de emulador de celda le dice al modulador que saque el voltaje de circuito abierto, en lo cual entraría en una especie de oscilación, es decir prende y apaga el circuito. Este problema se logro solucionar colocando una resistencia por la cual circulara corriente cuando el circuito haya llegado a la corriente de corto circuito. La desventaja de colocar esta resistencia en la salida es que se pierde mucha eficiencia, pero se logra cumplir con los objetivos del proyecto de grado que es emular la curva de un panel solar.

Por otra parte, es importante reconocer que, aunque el modelo teórico del panel solar está conformado por un diodo, resistencias y fuente de corriente, el diodo que utilizamos tiene unas características muy diferentes, especialmente en el factor de idealidad. Es por esta razón que las curvas tienen un pequeño error, sin embargo, la justificación con el que fue diseñado este trabajo de grado es que los estudiantes puedan usar un circuito que emule la curva voltaje-corriente de un panel solar para que los estudiantes puedan usarlo las 24 horas del día, y el circuito cumple este requisito.

Con respecto a la implementación en hardware, se puede afirmar que el sistema logra emular la curva Voltaje-Corriente del panel Ecodelta ED50-6M.

Las figuras 49 y 51 son las pruebas mas concluyentes, ya que a partir de estas se pudo establecer que lo diseñado es muy similar a curvas que genera el panel solar ECODELTA ED50-6M. Lo cual reafirma que lo planteado en el diseño si se cumplió.

TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro se podría pensar en soluciones que realicen el cálculo en software para así lograr un error muy pequeño y tener la posibilidad de cambiar parámetros como voltaje de circuito abierto, voltaje de máxima potencia, corriente de corte circuito y corriente de máxima potencia siempre y cuando estos parámetros no superen la potencia para la que fue diseñado. Esto le daría al estudiante que use el emulador más libertad a la hora de elegir un panel solar con menos o más potencia.

8. REFERENCIAS

[1] Naciones Unidas. (2018, Jun. 1). Cambio Climático. Disponible en:

<http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>

[2] IEA PVPS Reporting Countries, Becquerel Institute (BE), RTS Corporation (JP), “A snapshot of global PV: 1992-2017,” (IEA)., Switzerland, St. Ursen, Report IEA PVPS T1-33, 2018.

[3] MSc. Adalberto Ospino Castro, MSc. Carlos Robles Algarín, MSc. Alejandro Duran Pabón, “Modelado y simulación de un panel fotovoltaico empleando técnicas de inteligencia artificial,”

Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012014000300007.

9. ANEXOS

9.1. ARCHIVOS PRODUCIDOS Y MEDICIONES REALIZADAS

En el siguiente link se encuentran los archivos generados durante el trabajo de grado, como los esquemáticos, código de programación del microcontrolador, código de programación en Visual Basic, datos de las mediciones realizadas:

<https://www.dropbox.com/sh/ttuh7586pd1yht/AABQWvN5KHagcw6b2Xg2sDisa?dl=0>