



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“SIMULACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
INTEGRADOS A LA RED UTILIZANDO ATPDraw”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: GABRIEL SANTIAGO ORELLANA CABRERA
ROBERTO CARLOS SISALIMA GUAMAN**

TUTOR: ING. JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO, DR.

Cuenca - Ecuador

2026

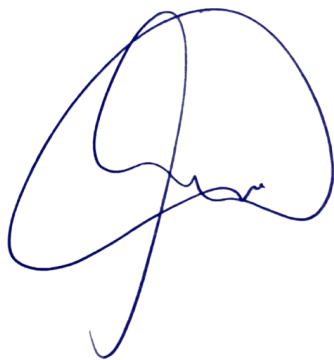
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Gabriel Santiago Orellana Cabrera con documento de identificación N° 0105805527 y Roberto Carlos Sisalima Guamán con documento de identificación N° 0105684427 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 26 de Febrero del 2026

Atentamente,



Gabriel Santiago Orellana Cabrera
0105805527



Roberto Carlos Sisalima Guamán
0105684427

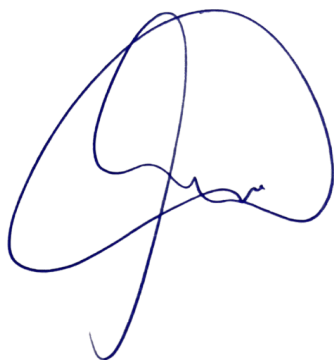
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN A
LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Gabriel Santiago Orellana Cabrera con documento de identificación N° 0105805527 y Roberto Carlos Sisalima Guamán con documento de identificación N° 0105684427, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Simulación de Sistemas Fotovoltaicos Integrados a la Red utilizando ATPDraw”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 26 de Febrero del 2026

Atentamente,



Gabriel Santiago Orellana Cabrera
0105805527



Roberto Carlos Sisalima Guamán
0105684427

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Manuel Aller Castro con documento de identificación N° 0151561800, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "SIMULACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS A LA RED UTILIZANDO ATPDraw", realizado por Gabriel Santiago Orellana Cabrera con documento de identificación N° 0105805527 y por Roberto Carlos Sisalima Guamán con documento de identificación N° 0105684427, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 26 de Febrero del 2026

Atentamente,



Ing. José Manuel Aller Castro, DR.
0151561800

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de todo corazón a mi familia: a mis padres, Santiago y Eva, por creer en mí, por su paciencia, sus consejos y por haberme brindado siempre un hogar desde el que pude estudiar y soñar. A Michelle, gracias por tu amor, tu compañía en las noches largas y por ser mi sostén en los momentos difíciles. A mi hijo, Evan: tu ternura, tu curiosidad y tu constante energía fueron la luz que guió mis días más largos. Cada vez que pensé en renunciar, recordé que quería ser un ejemplo para ti; por eso este logro también te pertenece. Este trabajo no habría sido posible sin ustedes.

Agradezco a Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, por haberme acompañado y sostenido a lo largo de todo este proceso. Su guía y su presencia han sido fundamentales para completar este trabajo.

Un agradecimiento especial a mi tutor, Ing. José Manuel Aller, por su inestimable orientación, su riguroso criterio académico y su constante disposición durante todo el proceso de elaboración de esta tesis. Sus observaciones precisas, sus sugerencias metodológicas y su paciencia en las revisiones enriquecieron notablemente la calidad del trabajo. Agradezco asimismo la confianza que depositó en este proyecto y el tiempo dedicado a guiarme en la toma de decisiones y en la superación de dificultades. Este logro no habría sido posible sin su apoyo profesional y humano.

A mi compañero, gracias por estar presente en las largas jornadas, por tu apoyo incondicional y por creer en este proyecto. Tu ayuda fue fundamental para que hoy pueda presentar este trabajo.

Gabriel Santiago Orellana Cabrera

Agradezco profundamente a mis familiares Hermanos, Tios y Abuelitos por el apoyo constante y la confianza depositada en mí, fundamentales para continuar y culminar mi proceso de formación académica. De manera especial, a mi madre, quien ha estado a mi lado en cada momento, brindándome apoyo incondicional, fortaleza y motivación para seguir adelante, a mi Hijo que fue el motor en mi carrera universitaria. Asimismo, a la memoria de mi Abuelita, quien, aunque ya no está físicamente, fue la que me impulso para que iniciara este camino profesional y cuya enseñanza y ejemplo continúan guiando mis pasos.

A Dios, por brindarme fuerza y valor para seguir adelante, por concederme salud y por ser mi guía constante a lo largo de este proceso.

Al Ing. José Manuel Aller, por la paciencia, la orientación y los conocimientos compartidos durante el desarrollo de este proyecto, los cuales fueron fundamentales para resolver dificultades y avanzar de manera significativa a lo largo de este trabajo.

Finalmente, agradezco a mi compañero, por su apoyo y colaboración, aportando cada uno con su esfuerzo y haciendo de este proceso una experiencia enriquecedora.

Roberto Carlos Sisalima Guamán

DEDICATORIA

A mis padres, Manuel Santiago Orellana Guartatanga y Luz Eva Cabrera Carrasco: A ustedes, que con su amor incondicional, sus desvelos y su entrega han construido el refugio desde el cual siempre he podido soñar y trabajar, dedico esta tesis. Papá, gracias por enseñarme con el ejemplo la importancia de la responsabilidad y la perseverancia; por mostrarme que con disciplina y honradez se alcanzan las metas. Mamá, gracias por tu ternura, por las palabras de aliento en los momentos de duda y por creer siempre en mis capacidades.

Espero que este trabajo sea una modesta muestra de gratitud y un motivo de orgullo para ustedes; lo ofrezco con todo mi cariño y reconocimiento por haberme acompañado, sostenido y enseñado a no rendirme.

A mi esposa Michelle Vargas y a mi hijo Evan Orellana: A ti, Michelle, por tu amor incondicional, tu paciencia ante las largas jornadas y tu permanente confianza en mis capacidades. Gracias por acompañarme en cada paso de este camino, por tus consejos que siempre me ayudaron a enmendar y mejorar, y por el calor del hogar que me permitió concentrarme y seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Tu compañía y tu apoyo fueron el pilar que sostuvo este proyecto. A ti, Evan, por tus sonrisas que iluminaban mis días y por ser la razón por la que quise perseverar. Este logro es también de ustedes: por sus desvelos compartidos, por comprender mis ausencias y por ser mi motivación constante. Con todo mi cariño y gratitud, les ofrezco este trabajo como símbolo de nuestro esfuerzo y de la vida que construimos juntos.

A Dios y a la vida: A Dios, por su guía, fortaleza y por sostenerme en los momentos de incertidumbre; su luz y su gracia fueron mi refugio y mi esperanza a lo largo de este recorrido. A la vida, por las experiencias, los aprendizajes y las oportunidades que me llevaron a crecer y perseverar. Agradezco profundamente ambas presencias por dar sentido a este esfuerzo y por permitirme culminar esta tesis. Este trabajo es fruto de la fe, la constancia y la gratitud.

Gabriel Santiago Orellana Cabrera

Dedico el presente proyecto técnico a mi madre, abuelitos e Hijo, Gloria Beatriz Guaman Landi, Angel Lauro Guaman Fajardo, Rosa Margarita Landi Criollo y Matias Sisalima, quienes han sido pilares fundamentales a lo largo de mi formación universitaria. A mi madre, por su amor, apoyo incondicional y por acompañarme en cada momento de este camino, brindándome fortaleza y motivación para no rendirme, a mi abuelito que es mi apoyo incondicional, a la memoria de mi abuelita, quien, aunque ya no se encuentra físicamente, fue la que me impulso para que iniciara mis estudios en Ingeniería Eléctrica, y cuyo ejemplo, enseñanzas y confianza continúan guiando mi vida y mis decisiones, a mi hijo que fue el motor para que no decayera un motivo para continuar mi carrera universitaria.

De igual manera, dedico este logro a Dios, por concederme salud, fortaleza y sabiduría, por estar presente en los momentos en que más lo he necesitado y por ser mi guía constante en cada etapa de mi vida, permitiéndome alcanzar los objetivos que hoy se ven reflejados en este trabajo y a la vida, por las valiosas enseñanzas adquiridas durante mi experiencia universitaria, las cuales permanecerán conmigo.

Roberto Carlos Sisalima Guamán

RESUMEN

En este trabajo, se simula un sistema fotovoltaico (FV) acoplado a la red eléctrica de potencia, utilizando un control óptimo directo de potencia (ODPC). El modelo desarrollado comprende tres subsistemas: las celdas fotovoltaicas, la conversión CC-CC mediante un circuito Elevador de voltaje tipo Boost, controlado por un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), y la conexión a la red eléctrica a través de un inversor trifásico controlado vectorialmente utilizando la técnica ODPC. Para representar los diferentes subsistemas, se empleó la herramienta ATP-EMTP y su entorno gráfico ATPDraw. Las simulaciones se llevaron a cabo mediante la combinación de modelos circuitales, programación en el entorno MODELS y controladores TACS. Los resultados obtenidos demuestran la eficacia de estas herramientas para diseñar y evaluar sistemas fotovoltaicos, así como para desarrollar nuevas estrategias de control para las fuentes alternativas de energía.

ABSTRACT

This work simulates a photovoltaic (PV) system connected to the electrical grid using direct optimal power control (ODPC). The developed model comprises three subsystems: the photovoltaic cells, the DC-DC conversion using a boost voltage circuit controlled by a maximum power point tracking (MPPT) algorithm, and the grid connection through a three-phase inverter controlled by vector control using the ODPC technique. The ATP-EMTP tool and its graphical environment, ATPDraw, were used to represent the different subsystems. The simulations were carried out by combining circuit models, programming in the MODELS environment, and TACS controllers. The results obtained demonstrate the effectiveness of these tools for designing and evaluating photovoltaic systems, as well as for developing new control strategies for alternative energy sources.

PALABRAS CLAVES TEMÁTICAS

Sistemas Fotovoltaicos

Control Óptimo Directo de Potencia

MPPT

Convertidor Boost

ATP-EMTP

ATPDraw

Simulación de Sistemas Fotovoltaicos Integrados a la Red utilizando ATPDraw

Gabriel S. Orellana
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca, Ecuador
gorellanac@est.ups.edu.ec

Roberto C. Sisalima
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca, Ecuador
rsisalimag@est.ups.edu.ec

José M. Aller
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca, Ecuador
jaller@ups.edu.ec

Resumen—En este trabajo, se simula un sistema fotovoltaico (FV) acoplado a la red eléctrica de potencia, utilizando un control óptimo directo de potencia (ODPC). El modelo desarrollado comprende tres subsistemas: las celdas fotovoltaicas, la conversión CC-CC mediante un circuito Elevador de voltaje tipo *Boost*, controlado por un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), y la conexión a la red eléctrica a través de un inversor trifásico controlado vectorialmente utilizando la técnica ODPC. Para representar los diferentes subsistemas, se empleó la herramienta ATP-EMTP y su entorno gráfico ATPDraw. Las simulaciones se llevaron a cabo mediante la combinación de modelos circuitales, programación en el entorno MODELS y controladores TACS. Los resultados obtenidos demuestran la eficacia de estas herramientas para diseñar y evaluar sistemas fotovoltaicos, así como para desarrollar nuevas estrategias de control para las fuentes alternativas de energía.

Palabras clave—Sistemas FV, Control óptimo de potencia, MPPT, Conversión CC-CC, ATP-EMTP, ATPDraw.

NOMENCLATURA

ATP	Programa de transitorios alternativo
ATPDraw	Procesador gráfico para ATP-EMTP
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
EMTP	Programa de transitorios electromagnéticos
FV	Fotovoltaica
MODELS	Lenguaje de programación en ATP-EMTP
MPPT	Seguidor de punto de máxima potencia
ODPC	Control óptimo directo de potencia
TACS	Análisis transitorio de sistemas de control

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la tecnología fotovoltaica FV, se inicia en 1839 cuando Becquerel descubrió que al iluminar uno de dos electrodos sumergidos en un electrolito, aparece entre ambos una diferencia de potencial dando lugar al efecto fotovoltaico [1]. Los estudios que fueron realizados por Einstein en 1905 proporcionaron la base teórica del efecto fotoeléctrico [2]. El modelo utilizado para explicar el fenómeno fotoeléctrico se fundamenta en la mecánica cuántica y determina como los fotones al tener una frecuencia y energías específicas liberan electrones de los átomos en una superficie metálica, generando una diferencia de potencial cuando la frecuencia supera un umbral que depende de los materiales utilizados [3]. Esto

determinó las bases fundamentales de la conversión de energía solar en energía eléctrica.

Las celdas solares tuvieron un desarrollo creciente durante la carrera espacial librada en la década de los setentas entre Estados Unidos y la Ex Unión Soviética [4]. No obstante, la tecnología FV era demasiado costosa para ser utilizada comúnmente. Es así que los gobiernos y las empresas privadas utilizaron millones de dólares en investigación y desarrollo de los sistemas FV, así como para incrementar la eficiencia de la conversión de energía en este proceso [5].

Todos los aportes tecnológicos en el desarrollo de sistemas de conversión FV van encaminados a enfrentar y reducir el cambio climático ocasionado en gran medida por la producción de dióxido de carbono en los procesos de generación eléctrica. La comunidad científica internacional recomienda que todos los países reduzcan las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero para evitar que la situación empeore [6]–[8].

La energía solar generalmente es rentable en zonas rurales y/o viviendas aisladas, donde la conexión a la red eléctrica es costosa [9]. Los generadores FV permiten transmitir información desde y hacia lugares remotos, como es el caso de retransmisores de señales de TV, radioenlaces y estaciones meteorológicas. Los sistemas FV son confiables y presentan bajos costos de operación y mantenimiento.

La generación de energía solar está transformando la red eléctrica tradicional, que opera de manera vertical: generación, transmisión y distribución, con flujos de potencia unidireccionales [10]. La introducción de los sistemas FV permiten la autogeneración o generación aislada de la red eléctrica, así como la interconexión a redes existentes con capacidad de generación o consumo. Este abanico de posibilidades se estudia hoy bajo el concepto de la generación distribuida [11].

En la actualidad una de las principales líneas de investigación se centra en la posibilidad de mejorar la eficiencia de los sistemas solares FV, así como de los convertidores de potencia asociados a su operación y reducir los costos de producción de las celdas. Esto incluye el desarrollo de convertidores de potencia más eficientes, económicos y con mejores prestaciones [12].

Por todo lo anteriormente expuesto, se propone en este trabajo la simulación de un sistema solar FV mediante la herramienta ATP-EMTP, utilizando su entorno gráfico ATP-

Draw y la programación de rutinas en lenguaje MODELS, que permita diseñar y analizar el comportamiento de estos sistemas interconectados a la red eléctrica.

II. METODOLOGÍA

Un sistema FV conectado a la red está compuesto por las celdas FV, el sistema de acoplamiento CC-CC controlado mediante el algoritmo MPPT y el sistema de conversión CC-CA para la conexión a la red eléctrica.

II-A. Modelo de las celdas FV

Una celda FV puede modelarse como un diodo semiconductor cuya unión $p-n$ se expone a la luz. En la Fig. 1 se presenta el esquema básico del modelo de una celda FV. Este modelo incluye una fuente de corriente impulsada por la energía de los fotones que alcanzan la juntura $n-p$. Esta juntura es un diodo por el cual parte de los electrones generados por el efecto FV pueden fluir dependiendo de su característica constructiva y el exceso de carga se obtiene a la salida de la celda, después de haber pasado por las resistencias serie y paralelo que configuran el sistema.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento de la celda FV son [13],

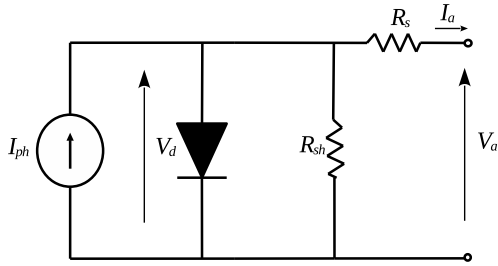


Figura 1: Modelo de célula fotovoltaica de un solo diodo

$$I_a = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_a + I_a R_s}{n V_t}} - 1 \right) - \frac{V_a + I_a R_s}{R_p} \quad (1)$$

donde,

- I_a es la corriente de salida
- V_a es el voltaje de salida
- I_0 es la corriente de saturación del diodo
- I_{ph} es la corriente generada por la celda fotovoltaica
- R_s resistencia en serie
- R_p resistencia en paralelo
- V_t es la tensión térmica del diodo $V_t = k \frac{T}{qk}$
- k constante de Boltzmann $k = 1,38 \times 10^{-23} J/K$
- q carga del electrón $1,602 \times 10^{-19} C$
- T temperatura de la celda K
- n factor ideal del diodo

La expresión (1), relaciona el voltaje y la corriente de la celda en forma implícita. Se requiere de un algoritmo iterativos para determinar este comportamiento no lineal o utilizar aproximaciones de primer o segundo orden para una representación simplificada [13], [14].

Para realizar las simulaciones se utilizó un método aproximado basado en series de Taylor de primer orden para determinar los parámetros de un módulo FV, utilizando el circuito de un solo diodo Fig1. Estos parámetros incluyen la corriente fotovoltaica I_{ph} , la corriente de saturación I_0 , el factor ideal modificado A , y las resistencias serie R_s y paralelo R_{sh} . Los parámetros de este modelo se obtienen mediante el modelo implícito $I_a f(I_o, V_o)$ descrito en (1), utilizando los datos del fabricante bajo Condiciones de Prueba Estándar (STC), que incluyen la corriente de cortocircuito I_{sc} , el voltaje de circuito abierto V_{oc} , así como el voltaje y la corriente a máxima potencia V_{mp} y I_{mp} , descritos en la Tabla I.

Tabla I: Hoja de datos del fabricante del panel fotovoltaico

PV Cell	GSPV250P
$P_{max}(W)$	250
$I_{sc}(A)$	8.82
$V_{oc}(V)$	37.00
$I_{mp}(A)$	8.25
$V_{mp}(V)$	30.5
$k_f(mA/C)$	5.73
$k_v(V/C)$	-0.080
N_s	60
SPR	1.4126

Con estos datos y las expresiones no lineales que definen el comportamiento de las celdas FV se obtiene el modelo correspondiente [15],

$$I_{sc} = f(0, I_{sc}) = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{R_s I_{sc}}{V_t N_s}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}} \quad (2)$$

$$0 = f(V_{oc}, 0) = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_a}{V_t N_s}} - 1 \right) - \frac{R_s I_a}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$0 = f(V_{mp}, I_{mp}) - I_{mp} \Rightarrow$$

$$I_{ph} = I_0 \left(e^{\frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{V_t N_s}} - 1 \right) + \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_{sh}} + I_{mp} \quad (4)$$

Y para complementar las ecuaciones anteriores se necesitan dos ecuaciones adicionales relacionadas con el punto de máxima potencia,

$$\frac{dp}{dV_a}(V_{mp}, I_{mp}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dI_a}{dV_a}(0, I_{sc}) = \frac{df(0, I_{sc})}{dV_a} = -\frac{1}{R_{sh}} \quad (6)$$

La ecuación resulta de derivar $p = V_a I_a = V_a f(V_a, I_a)$ en el punto de máxima potencia $p_{max} = V_{mp} I_{mp}$ donde $dp/dV_a = 0$. De la ecuación (2) y (3),

$$I_0(R_s, R_{sh}, V_t) = \left(\frac{I_{sc}(R_s + R_{sh}) - V_{oc}}{R_{sh}} \right) e^{\frac{V_{oc}}{V_t N_s}} \quad (7)$$

$$I_{ph} = \frac{I_{sc}(R_s + R_{sh})}{R_{sh}} \quad (8)$$

Reemplazando (7) y (8) en (4), (5) y (6), se obtienen tres ecuaciones no lineal que dependen de R_s , R_{sh} y V_t .

Por otra parte, en (1), se observa que la corriente fotónica I_{ph} depende de la radiación solar incidente en la juntura y la característica del diodo depende de la temperatura. Estas dependencias se pueden considerar en el modelo utilizando las siguientes expresiones para la corriente de cortocircuito I_{sc} y el voltaje de circuito abierto V_{oc} ,

$$I_{sc}(G, T) = I_{sc}(STC) \frac{G}{G_{STC}} (1 + k_i \Delta T) \quad (9)$$

$$V_{oc}(G, T) = V_{oc}(STC) (1 + k_v \Delta T) \quad (10)$$

donde,

- I_{sc} Corriente de cortocircuito
- V_{oc} Voltaje de circuito abierto
- STC Standard Test Conditions
- G_{STC} Irradiación STC $1000 W/m^2$
- ΔT Variación de la temperatura
- k_i Coeficiente de corriente
- k_v Coeficiente de voltaje

La variación de temperatura es importante porque si aumenta, su eficiencia disminuye debido a la mayor conductividad del diodo de la juntura $n - p$ que aumenta con la movilidad electrónica. Por esta razón, los fabricantes especifican una temperatura estándar de prueba de las celdas FV a $25^\circ C$ [16], [17].

La variación de irradiación influye directamente en la potencia generada por el panel FV porque la corriente fotónica I_{ph} es directamente proporcional a la radiación solar recibida G [18]. La potencia se ve influenciada por la temperatura, como se discutió en el párrafo anterior. Los fabricantes también definen una radicación estándar para los ensayos de las celdas FV que se asumen en $1000 W/m^2$. Las configuraciones serie y paralelo de celdas FV permiten incrementar los niveles de tensión y corriente del panel. La configuración de las celdas fotovoltaicas depende del número de elementos en serie n_s o paralelo n_p [19], [20],

$$I_{panel} = n_p \times I_a \quad (11)$$

$$V_{panel} = n_s \times V_a \quad (12)$$

II-B. Convertidor $CC - CC$ tipo Boost

En el convertidor tipo *Boost* el voltaje de salida es mayor al voltaje de entrada y para obtener este resultado se utilizan un inductor y un capacitor como elementos almacenadores de energía. Estos elementos permiten elevar la corriente que suministra la fuente e inyectarla al condensador para que el voltaje de la carga sea mayor que el de la fuente tal como se observa en el circuito de la Fig. 2 [21], [22].

Los parámetros del convertidor $CC - CC$ desarrollados en este trabajo se presentan en la Tabla II.

A partir de los parámetros mostrados en la Tabla II, se puede determinar el ciclo de trabajo [23].

$$D = 1 - V_i/V_o \quad (13)$$

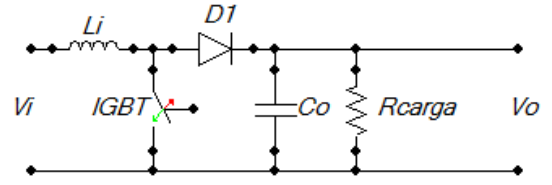


Figura 2: Convertidor $CC - CC$ tipo Boost

Tabla II: Parámetros del convertidor de potencia $CC - CC$

Parámetro	Valor
V_i (V)	250
V_o (V)	600
f_{sw} (kHz)	20
P_{salida} (W)	1750
D	0.58
R_{carga} (Ω)	205.71
L_i (mH)	6.9
C_o (μF)	2.83

Para obtener el periodo T primero se tiene que definir la frecuencia de conmutación f_{sw} que por lo general se encuentra en los $10kHz$ y $100kHz$ en este caso se eligió $20kHz$ con el objetivo de que L_i y C_o no sean demasiado grandes [23].

$$T = 1/f_{sw} \quad (14)$$

Para calcular la resistencia de carga, es crucial conocer la potencia de salida deseada y el voltaje de salida, lo que ayuda a evitar sobrecalentamientos y optimiza la eficiencia del convertidor [21].

$$R_{carga} = V_o^2/P_{salida} \quad (15)$$

En el calculo de la inductancia es necesario determinar la frecuencia de conmutación, el voltaje de entrada y salida definidos en la Tabla II, y también el ciclo de trabajo. Otro aspecto importante a considerar es su factor de rizado, un valor típico para este factor es entre el 10% y 30% de la corriente de carga [22].

$$L_i = R_{carga}(1 - D)^2/DT frL \quad (16)$$

De la misma manera que se hizo con la inductancia se procede con la capacitancia con la diferencia de que el factor de rizado típico se encuentra entre el 1% y 10% [21].

$$C_o = DT/R_{carga} frC \quad (17)$$

En la Fig. 3 se observa la respuesta del convertidor Boost.

II-C. Algoritmo MPPT P&O

El algoritmo MPPT tiene como objetivo extraer la potencia del sistema fotovoltaico, operando en el punto de máxima disponibilidad, independientemente de los cambios en la irradiación y la temperatura [24].

Por su parte la técnica P&O consiste en ajustar el voltaje del panel en función de la variación de potencia permitiendo realizar pequeños ajustes y mejorar significativamente la eficiencia del panel FV. El algoritmo MPPT utilizado se presenta en la Fig.4 [25].

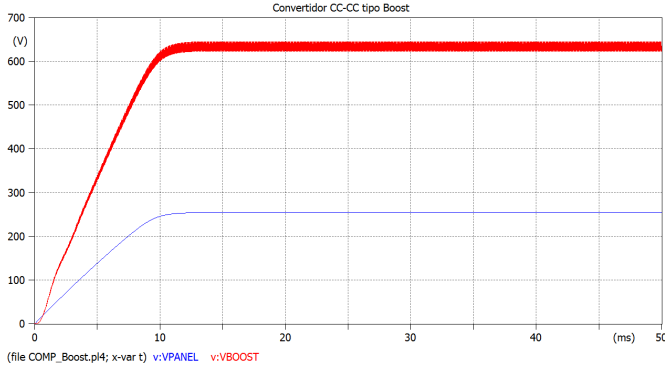


Figura 3: Respuesta del convertidor Boost

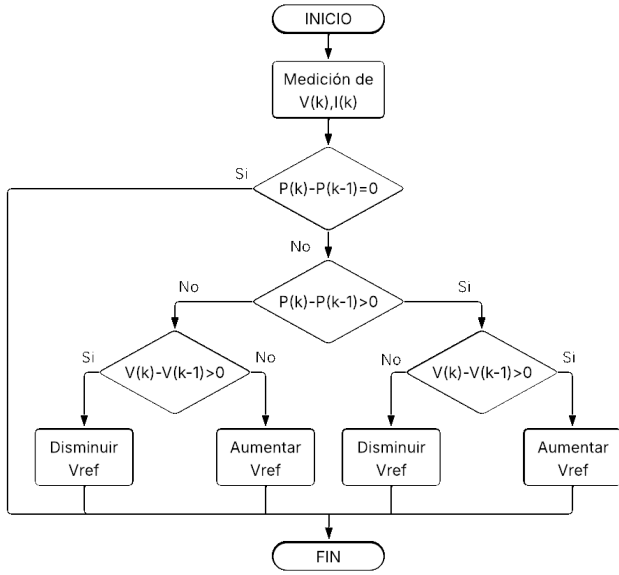


Figura 4: Diagrama de flujo del Algoritmo $P\&O$ MPPT

II-D. Modelo del panel Fotovoltaico

Para el modelado del panel FV, se implementaron las ecuaciones de la sección II-A, utilizando la herramienta ATP-EMTP, su interfaz gráfica ATPDraw y el lenguaje de simulación MODELS. Esto se ilustra en la Fig. 5. Para elaborar el modelo FV, se utilizaron los datos del fabricante de las celdas FV que se presentan en la Tabla I.

II-E. Descripción de curvas $I - V$

La curva $I-V$ que se muestra en la Fig. 6, representan la relación entre la corriente y el voltaje que genera un panel FV a la salida. Esta característica permite determinar la disponibilidad y la eficiencia de la transformación de la energía solar en energía eléctrica. Esta curva también suministra información que ayuda a determinar la corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto y la potencia máxima. Esta información es de utilidad debido a que permite diseñar sistemas que aprovechen la máxima potencia del panel FV.

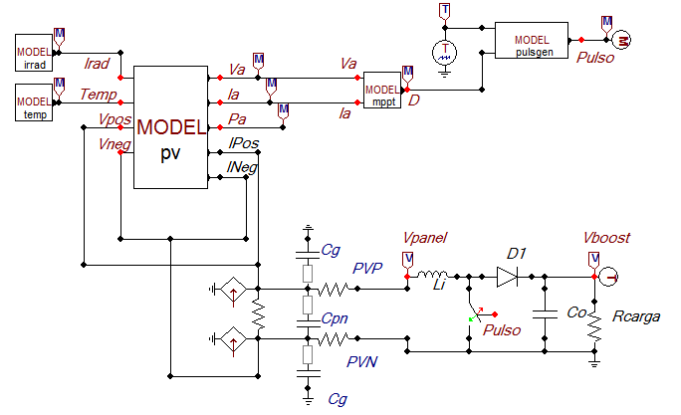


Figura 5: Integración del panel PV y el Convertidor CC-CC tipo Boost

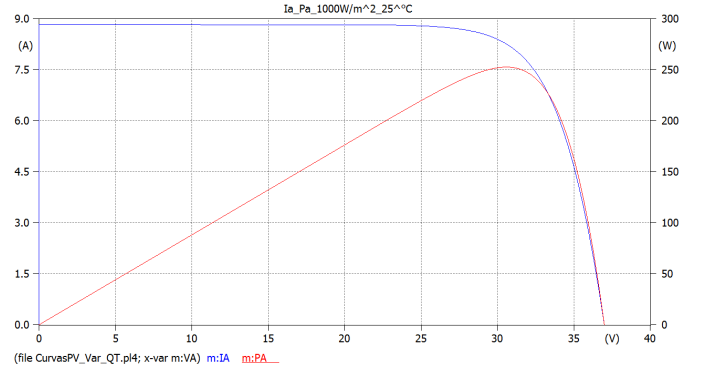


Figura 6: Curva $I - V$

II-F. Inversor ODPC

El control óptimo directo de potencia es una técnica vectorial que permite ajustar la potencia activa y reactiva de forma independiente. Esta técnica se puede utilizar en sistemas FV, donde se desea controlar la potencia inyectada a la red, manteniendo los reactivos a su mínimo valor $Q_{ref} \approx 0$ para poder garantizar un factor de potencia cercano a la unidad y para mejorar la calidad de energía suministrada a la red [26] [27]. En la Fig. 7, se presenta el diagrama del inversor desarrollado en ATPDraw.

El algoritmo que controla este inversor se fundamenta en seleccionar el vector de tensión que en cada paso de integración minimiza la diferencia entre los cuadrados de potencia activa y reactiva con respecto a las referencias.

$$\text{mín } \psi = (P_{ref} - P_{sis}(\vec{v}_{inv}))^2 + (Q_{ref} - Q_{sis}(\vec{v}_{inv}))^2 \quad (18)$$

donde,

$$S_{sis} = P_{sis} + jQ_{sis} = \vec{v}_{sis} \vec{i}_{inv}^* \quad (19)$$

$$\vec{i}_{inv}(t) \approx \frac{\vec{v}_{inv} - \vec{v}_{sys}}{L_{filtro}} \Delta t + \vec{i}_{inv}(t - \Delta t) \quad (20)$$

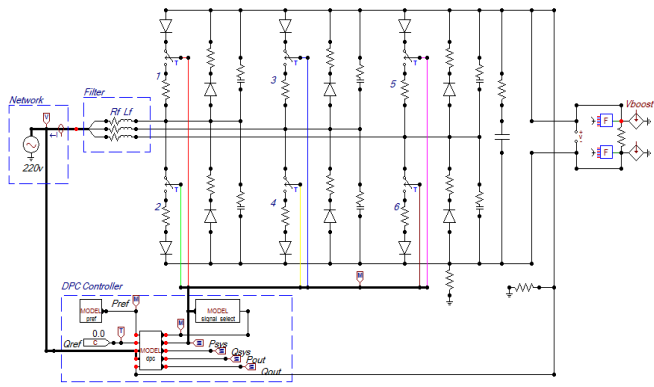


Figura 7: Inversor ODPC

La técnica utilizada para obtener los vectores espaciales realiza cálculos del espacio de voltaje y el vector que minimiza la función de costos descrita en (18) probando todos los vectores espaciales posibles como se ilustra en la Fig. 8 [26].

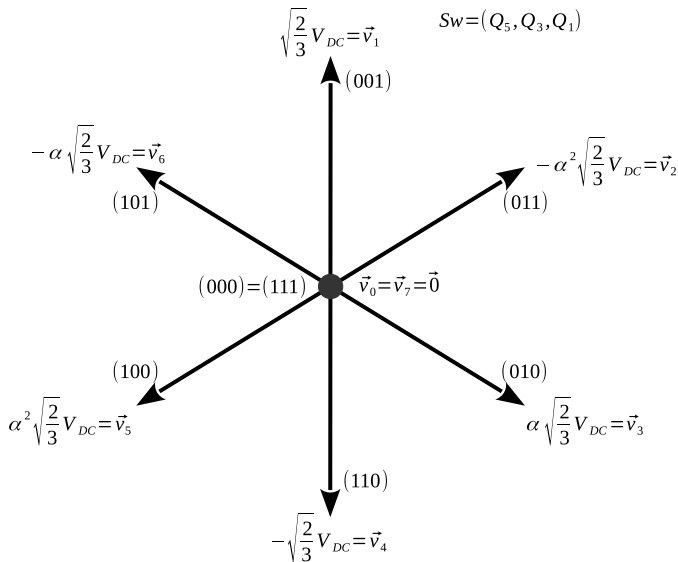


Figura 8: Vectores espaciales

III. RESULTADOS

Los resultados de la implementación y simulación del sistema FV utilizando EMT-ATP muestran que el modelo del panel FV cumple con las características $I - V$ suministradas por el fabricante.

El convertidor CC-CC tipo *Boost* controlado por el algoritmo MPPT permite convertir las tensiones de las celdas FV a niveles utilizables por el inversor que conecta el sistema a la red con la máxima potencia para un determinado nivel de radiación y temperatura.

El inversor con control ODPC y a través de un filtro L , inyecta la energía obtenida de los paneles FV a la red eléctrica.

La configuración esquemática del modelo desarrollado en este trabajo se presenta en la Fig. 9.

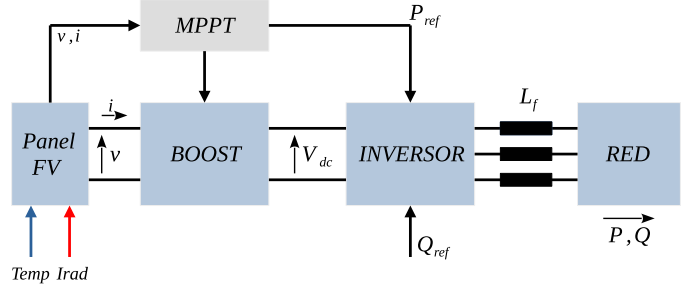


Figura 9: Sistema FV conectado a la red eléctrica

Para analizar el comportamiento del sistema FV se parte de las condiciones STC del panel con una configuración de siete paneles en serie y cuatro en paralelo. La respuesta del sistema se puede presentar en la Fig. 10a.

La temperatura afecta el rendimiento del sistema fotovoltaico. Temperaturas mayores a los $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, reducen la tensión de circuito abierto, disminuyendo la eficiencia del sistema FV, como se puede observar en la Fig. 10b.

La irradiación es crucial para la eficacia de los sistemas FV porque influye directamente en la corriente de cortocircuito. A mayor irradiación, mayor corriente y potencia generada. El efecto del cambio de irradiación presenta en la Fig. 10c.

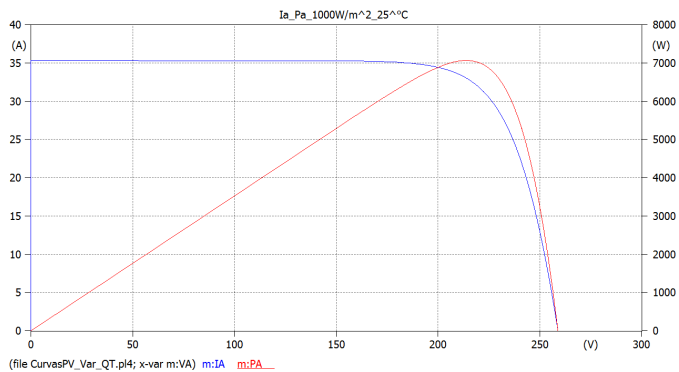
Se analizó la capacidad del algoritmo MPPT el cual busca mantener el valor del duty cycle de manera constante, este ajuste se realiza basado en las diferencias de potencia y voltaje del sistema FV y para complementar el sistema de control del circuito elevador de voltaje *Boost* se implemento un generador de pulsos el cual depende de una señal portadora y el valor del duty cycle previamente ya ajustado, esto se puede observar en la Fig. 11.

El ODPC permite inyectar a la red la energía entregada por el sistema FV. Este método de control vectorial facilita la sincronización y reducción del contenido armónico inyectado a la red eléctrica, contribuyendo con la estabilidad y seguridad del suministro energético. Ofrece también flexibilidad para adaptarse a variaciones en la demanda y producción de la energía solar mejorando la fiabilidad del sistema. Esto se muestra en la Fig.12, donde se observa la rápida respuesta para acoplarse a la referencia de potencia activa y reactiva.

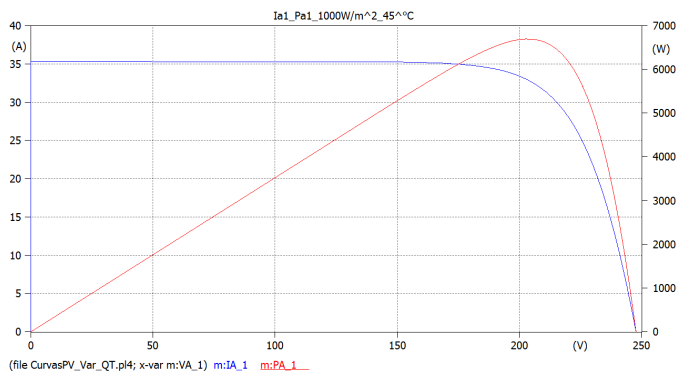
IV. CONCLUSIONES

El modelo FV implementado en ATPDraw y MODELS demuestra que esta herramienta permite una implementación simplificada del sistema FV acoplado a la red al combinar circuitos eléctricos, programación en lenguaje MODELS y controladores TACs.

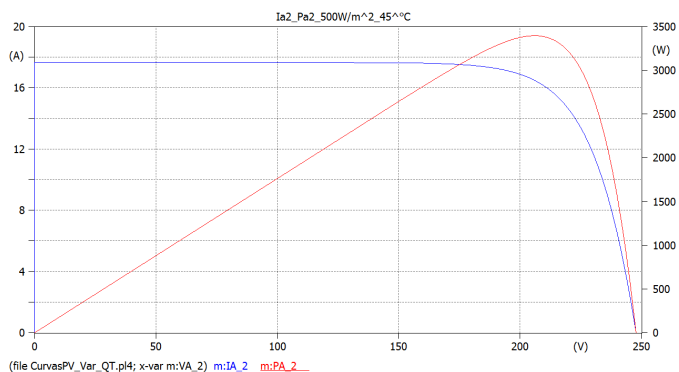
Mediante las simulaciones realizadas se puede observar que la corriente de cortocircuito I_{sc} y voltaje de circuito abierto V_{oc} en condiciones STC de funcionamiento, coinciden con los datos del panel proporcionados por el fabricante. Esto permite validar el modelo implícito aproximados de la celda FV utilizado en este trabajo.



(a) I_a y P_a a 1000 W/m^2 y 25°C



(b) I_a y P_a a 1000 W/m^2 y 45°C



(c) I_a y P_a a 500 W/m^2 y 45°C

Figura 10: Características de corriente y potencia de la celda FV con respecto al voltaje a diferentes radiaciones y temperaturas

El lenguaje de simulación MODELS permitió la programación en código del componente no lineal e implícito del sistema FV. Esto es de importancia debido a que el programa ATP-EMTP no cuenta con un bloque que realice esta función.

La herramienta MODELS permitió modelar el perfil de temperatura e irradiación, así como las estrategias de control del MPPT y del ODPC.

Se utilizaron bloques TACS para simular los sistemas de control y la parte circuital del modelo se implementó utilizando fuentes de tensión, corriente, resistencias, inductancias, condensadores e interruptores controlados mediante bloques

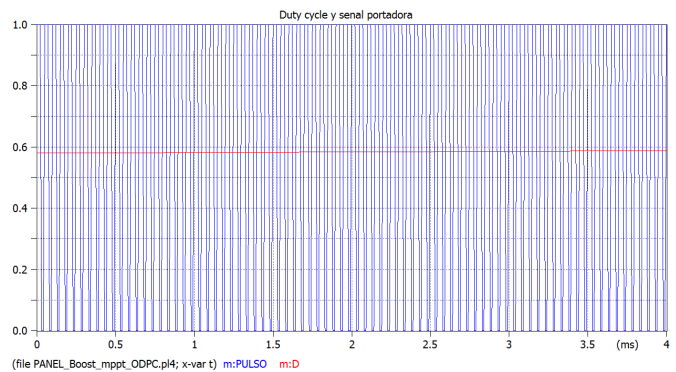


Figura 11: Duty cycle y señal portadora

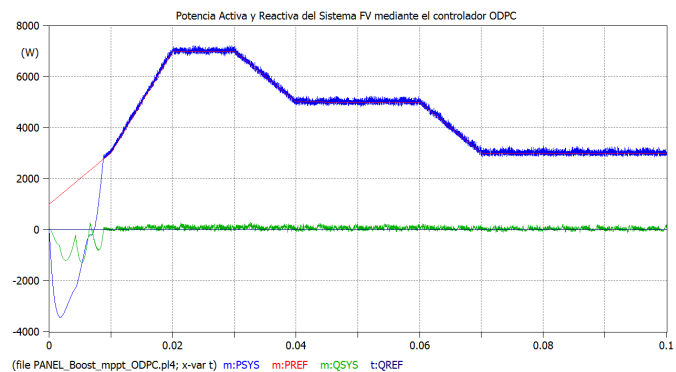


Figura 12: Potencia activa y reactiva del sistema FV mediante el ODPC

TACS.

Los resultados obtenidos demuestran las capacidades del programa ATPDraw y sus herramientas MODELS y TACS para realizar este tipo de simulaciones. Las principales ventajas de estas herramientas son su rapidez, facilidad de uso y precisión. Por otra parte, la licencia es libre, sujeta solamente a firmar un compromiso de que el código fuente del programa no se utilice para desarrollar programas comerciales alternativos.

Todo esto permite a los investigadores y diseñadores la realización de nuevos prototipos de control utilizando estas herramientas de simulación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca y en especial al Grupo de Investigación en Energía GIE, por todo el apoyo prestado para la realización de esta investigación.

ANEXO A: LISTADO MODEL FV

```

MODEL PV
DATA Pmax_STC(dflt:250), Isc(dflt:8.82), Voc(dflt:37),
    Imp(dflt:8.25), Vmp(dflt:30.5)
DATA kv(dflt:-0.08), ki(dflt:0.005733), Ns(dflt:60),
    QSTC(dflt:1000), Nser(dflt:1), Npar(dflt:1)
INPUT IRAD, TT, VPVP, VPVN
OUTPUT PVV, PVI, WATT, IPV, IPVN
VAR k, qK, kp, NOCT, aux, Gammai, Gammav, r, SPR, Lambda1,
    Lambda2, Rs_axintota, Rs, Rp

```

```

VAR A1,A2,A3,R1,A6,A4,A5,Vt,Io,Iph,A,Vt_axin,Io_axin
,A_axin,w,v,e,f,x
VAR PVI,WATT,aa,bb,cc,PVI_Taylor,Io_Tal,Isc_Tal,Tal,
PVV_aux
VAR IRp,Vd,Rp_axintota,Id,alpha,Im,Voc_Tal
VAR PVV,IPVP,IPVN
INIT
k:=0, qk:=11604.519193, NOCT:=47, aux:=-2.5827
w:=-2, v:=0, e:=0, f:=0, x:=0, Im:=Imp
IPVP:=0.0, IPVN:=0.0, PVV:=0.0, PVI:=0.0
WATT:=0.0
ENDINIT

EXEC
Voc_Tal := 39 - 0.08 * TT -- Ajuste de temperatura
TT sin conversion a Kelvin

Gammai := Imp / Isc; -- Gammai relacion Imp y Isc
Gammav := Vmp / Voc; -- Gammav relacion Vmp y Voc

r := (Gammai*(1-Gammav))/(Gammav*(1-Gammai)); --
Calcula 'r' a partir de Gammai y Gammav

SPR := (1-Gammai)*exp(r); -- Calculo factor de
rendimiento ajustado

Lambdal := ((1-Gammav)*(2*Gammai-1))/((1-Gammai)*(
Gammai+Gammav-1)); -- Calcula Lambdal
Lambda2 := Gammav/(1-Gammai); -- Calcula Lambda2

-- Factor de rendimiento
x := -SPR*Lambdal*exp(-Lambdal); -- Calcula 'x'
basado en SPR y Lambdal

--Lambert
w := -2 -- Inicializa 'w' para el metodo de Lambert
v := inf*w -- Establece 'v' como infinito

-- Haley's method
while abs(w - v)/abs(w) > 0.000000001 do -- Itera
hasta que el cambio relativo en 'w' sea muy
pequeno
v := w -- Guarda el valor actual de 'w' en 'v'
e := exp(w) -- Calcula e elevado 'w'
f := w*e-x -- Calcula la funcion f que se quiere
hacer cero
w := w-f/((e*(w+1)-(w+2)*f/(2*w+2))) -- Actualiza
'w' usando el metodo de Haley
endwhile

aux:=w -- Guarda el valor final de 'w' en 'aux'
if SPR > 1 then -- Verifica si SPR es mayor que 1
Rs_axintota:=Voc/Isc*(Gammav/Gammai*(1-Gammai)*
ln(1-Gammai)+(1-Gammav))/((1-Gammai)*ln(1-Gammai
)+Gammai) -- Calcula Rs_axintota si SPR > 1
Rs:=Rs_axintota -- Asigna Rs_axintota a Rs
Rp:=5000 -- Establece Rp a 5000
else
Rs:=0 -- Si SPR <= 1, establece Rs a 0
Rp:=Voc/Isc*(Lambda2*aux+Lambdal)/(aux+Lambdal)
-- Calcula Rp basado en Lambda2 y Lambdal
endif

-- Calcula el voltaje termico Vt_axin
Vt_axin:=(Vmp-Voc+Rs_axintota*Imp)/(Ns*ln((Isc-Imp)/
Isc));
-- Calcula la corriente de saturacion
Io_axin:=Isc*exp(-Voc/(Vt_axin*Ns));
-- Calcula el factor de idealidad del diodo
A_axin:=Vt_axin*qK/298.15

--Calcula Isc_Tal ajustado por temp e irad
Isc_Tal := Isc * (IRAD / QSTC) + ki
Io_Tal := Isc_Tal / (exp(Voc_Tal/(Ns*Vt_axin))-1)

```

```

PVV_aux:=PVV -- Guarda Va en Va_aux

-- Calcula 'aa', 'bb' y 'cc' para el modelo
aa:=0.5 * ((Rs_axintota * (Nser / Npar)) * 2) / ((
Vt_axin * Ns * Nser) * 2) * Io_Tal * Npar * exp(
PVV_aux / (Vt_axin * Ns * Nser));
bb:=1 + Rs_axintota * (Nser / Npar) / (Vt_axin * Ns
* Nser) * Io_Tal * Npar * exp(PVV_aux / (Vt_axin
* Ns * Nser));
cc:=Io_Tal * Npar * (exp(PVV_aux / (Vt_axin * Ns *
Nser)) - 1) - Isc_Tal * Npar;

-- Resuelve la ecuacion cuadratica para Ia
PVV:=ABS(VPVP-VPVN)
PVI:=(-bb + sqrt(bb * bb - 4 * aa * cc)) / (2 * aa);
WATT:=PVV * PVI -- Calcula la potencia del panel Pa
alpha:=Nser / Npar -- Calcula la relacion entre
series y paralelos
Im:=Isc_Tal * Npar - Io_Tal * Npar * (exp((PVV + Rs
* PVI * alpha) / (Vt_axin * Ns * Nser)) - 1)
-- Calcula la corriente del modulo Im
IPVP:=PVI
IPVN:=-PVI

ENDEXEC
ENDMODEL

```

Listado 1: MODELS Panel FV basado en series de Taylor de primer orden por aproximaciones

ANEXO B: LISTADO MODEL MPPT

```

MODEL Mppt
INPUT vpv, ipv -- Voltaje y corriente del panel FV
OUTPUT D -- Ciclo de trabajo (duty cycle) ajustado

VAR Dinit, Dmax, Dmin, deltaD, Vold, Pold, Dold, dV,
dP, P, D

INIT
D:=0.58 -- Inicializa el duty cycle
Dinit:=0.58 -- Valor inicial del duty cycle
Dmax:=0.9 -- Valor maximo permitido duty cycle
Dmin:=0.1 -- Valor minimo permitido duty cycle
deltaD:=20e-6 -- Paso de ajuste (20 microvoltios)
Vold:=0 -- Inicializa el volt anterior en 0
Pold:=0 -- Inicializa la pot anterior en 0
Dold:=Dinit -- Establece D anterior al valor
inicial
ENDINIT

EXEC
P:=vpv * ipv -- Potencia actual del panel
dV:=vpv - Vold -- Diferencia de voltaje entre el
paso actual y el anterior
dP:=P - Pold -- Diferencia de potencia entre el
paso actual y el anterior

-- Ajusta el duty cycle basado en las diferencias de
potencia y voltaje
if dP <> 0 then -- Si la potencia ha cambiado
if dP > 0 then -- Si la potencia ha disminuido
if dV < 0 then -- Si el voltaje ha disminuido
D:=Dold + deltaD -- Reduce el duty cycle
else
D:=Dold - deltaD -- Aumenta el duty cycle
endif
elseif dV < 0 then -- Si la potencia ha aumentado
y el voltaje ha disminuido
D:=Dold + deltaD -- Aumenta el duty cycle
else

```

```

    D:=Dold - deltaD -- Aumenta el duty cycle
    (aunque el voltaje haya aumentado)
endif
else
    D:=Dold -- Mantiene el duty cycle actual si no
    hay cambio en la potencia
endif

-- Controla los limites del duty cycle para evitar
valores no deseados
if D >= Dmax or D <= Dmin then
    D:=Dold -- Restringe el duty cycle al valor
    anterior si excede los limites
endif

-- Actualiza las variables para el proximo ciclo
Dold:=D -- Actualiza el duty cycle anterior
Vold:=vpv -- Actualiza el voltaje anterior
Pold:=P -- Actualiza la potencia anterior

ENDEXEC
ENDMODEL

```

Listado 2: MODELS Algoritmo MPPT basado en diferencias de potencia y voltaje

REFERENCIAS

- [1] R. Williams, "Becquerel photovoltaic effect in binary compounds," *The journal of Chemical physics*, vol. 32, no. 5, pp. 1505–1514, 1960.
- [2] A. Einstein, "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz," *Annalen der Physik*, vol. 17, pp. 132–148, 1905.
- [3] M. Rodríguez-Meza and J. L. Cervantes-Cota, "El efecto fotoeléctrico," *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, vol. 13, no. 3, pp. 303–311, 2006.
- [4] G. C. A. Rubio, "Geopolítica del petróleo y de la energía alternativa," Universidad Militar Nueva Granada, Tech. Rep., 2013.
- [5] A. Salazar-Peralta, A. Pichardo-S, and U. Pichardo-S, "La energía solar, una alternativa para la generación de energía renovable," *Revista de Investigación y Desarrollo*, vol. 2, no. 5, pp. 11–20, 2016.
- [6] Á. S. Benítez Garza, "Desarrollo de celdas solares utilizando el cusbs como capa absorbidora por la técnica de depósito por baño químico." Ph.D. dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2018.
- [7] A. E. Cárdenas Ortega and P. I. Ortiz Gómez, "Análisis de la deforestación en zonas prohibidas de la amazonía ecuatoriana y peruana, y su consecuencia a nivel local y global," B.S. thesis, Universidad del Azuay, 2023.
- [8] P. Dudiuk, "Transición energética en clave sociológica," B.S. thesis, Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación, 2022.
- [9] M. F. X. Grijalva, "Viabilidad técnico - económica de la generación eléctrica en red con tecnología fotovoltaica," Master's thesis, UNIVERSIDAD DEJAÉN, 2020.
- [10] J. A. Plaza, "Evolución tecnológica fotovoltaica en Ecuador respecto a Latinoamérica en la última década," Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, Tech. Rep., 2018.
- [11] M. R. Gámez, "El potencial solar y la generación distribuida en la provincia de Manabí en el Ecuador," *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología*, 2017.
- [12] J. Armijos and C. Encarnación, "Análisis de un sistema fotovoltaico residencial acoplado a la red utilizando un convertidor q-z con acumuladores de energía," Master's thesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [13] J. Aller, J. Viola, F. Quizhpi, J. Restrepo, A. Ginart, and A. Salazar, "Explicit model of pv cells considering variations in temperature and solar irradiance," in *2016 IEEE ANDESCON*, 2016, pp. 1–4.
- [14] S. Cannizzaro, M. C. Di Piazza, M. Luna, and G. Vitale, "Generalized classification of pv modules by simplified single-diode models," in *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2014, pp. 2266–2273.
- [15] J. Aller, J. Viola, F. Quizhpi, J. Restrepo, A. Ginart, and A. Salazar, "Implicit pv cell parameters estimation used in approximated closed-form model for inverter power control," in *2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, 2017, pp. 1–6.
- [16] N. Flores and M. Domínguez, "Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio," Master's thesis, Centro de investigación en materiales avanzados, 2016.
- [17] Sameera, M. Tariq, and M. Rihan, "Analysis of the impact of irradiance, temperature and tilt angle on the performance of grid-connected solar power plant," *Measurement: Energy*, vol. 2, p. 100007, 2024. [Online]. Available: <https://surl.li/awjdbw>
- [18] W. G. Jacho, "Análisis y modelamiento del impacto de la radiación difusa en la generación eléctrica usando paneles solares fotovoltaicos policristalinos," Master's thesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2014.
- [19] J. P. Castillo, "Sistema fotovoltaico para aplicaciones móviles de tracción eléctrica," Master's thesis, Repositorio Academico de la Universidad de Chile, 2008.
- [20] S. Salamanca-Ávila, "Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. caso de aplicación en la ciudad de Bogotá," *Revista científica*, no. 30, pp. 263–277, 2017.
- [21] L. González, R. Cáceres *et al.*, "Diseño y construcción de un convertidor boost de pequeña potencia, con propósitos educativos y de investigación," *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, vol. 6, no. 2, 2014.
- [22] C. Díaz, W. Romano, and G. Gallego, "Diseño e implementación de un convertidor boost regulado empleando una estrategia de control pi," *Universidad Francisco de Paula Santander*, 2024.
- [23] V. C. Nascimento, "Estudo da influência de fatores externos no desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de bt utilizando o software atp," Master's thesis, Universidade Federal Rural do Semi-Arido, 2022.
- [24] Z. Fan, S. Li, H. Cheng, and L. Liu, "Perturb and observe mppt algorithm of photovoltaic system: A review," in *2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2021, pp. 1413–1418.
- [25] S. Manna and A. K. Akella, "Análisis comparativo de varios algoritmos po mppt para sistemas fotovoltaicos en condiciones de radiación variables," in *2021 1.ª Conferencia Internacional sobre Electrónica de Potencia y Energía (ICPEE)*, 2021, pp. 1–6.
- [26] J. M. Aller and D. A. Naranjo, "Optimal direct power control (odpc) model using atpdraw and models," in *2022 IEEE Sixth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, 2022, pp. 1–6.
- [27] M. A. Mantilla Villalobos, J. F. Petit Suárez, and G. Ordóñez Plata, "Control directo de potencia aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados a la red," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 72, pp. 47–60, 2014.