

Diseño y simulación de un sistema de generación fotovoltaica para una cocina de inducción magnética

Rubén David Vélez Ortuño
Departamento de Eléctrica y Electrónica
Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE
Sangolquí, Ecuador
rubendvelezo@gmail.com

Resumen— El presente proyecto consiste en diseñar y simular los elementos necesarios de las etapas que conforman un sistema de generación fotovoltaica para abastecer de energía a una cocina de inducción magnética. El documento desarrollado contiene los procedimientos de diseño de las etapas de potencia, almacenamiento y generación fotovoltaica, que conforman cada uno de los sistemas de generación fotovoltaica, dentro de los cuales se han planteado: un modelo para un sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, y dos modelos para un sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento. La simulación de cada uno de los modelos planteados se desarrolla en el software Matlab – Simulink, las etapas de potencia se desarrollan mediante la librería SimPowerSystems, el diseño de los controladores se desarrollan mediante la librería Sisotool, con el desarrollo de las simulaciones se procede a comprobar el correcto funcionamiento de los sistemas bajo los parámetros establecidos. Se realizará una comparación entre los modelos desarrollados, procedimiento que permitirá determinar cuál es el sistema más favorable para el abastecimiento de energía para la cocina de inducción magnética.

Palabras Clave— Sistemas fotovoltaicos, sistemas de potencia, cocina de inducción, control PID, paneles fotovoltaicos.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de energías renovables para la generación de energía eléctrica es una tendencia que se populariza con el pasar del tiempo. Dejar la dependencia de recursos fósiles es una necesidad para ser consecuentes con el respeto a la naturaleza. El estado Ecuatoriano impulsa el uso de recursos renovables como el agua, el viento y el sol, para la generación eléctrica, es así que varios proyectos eólicos, hidroeléctricos y fotovoltaicos se desarrollan en el país con la visión del cambio de la matriz energética que procura dejar la dependencia de recursos no renovables para la generación de energía. Dentro de los cambios que conlleva la matriz energética está el reemplazo del Gas Licuado de Petróleo por electricidad como fuente de generación de energía en las cocinas de uso doméstico. El Estado apoya proyectos que involucran el uso de energías renovables, de esta manera se plantea la inclusión de un sistema de generación fotovoltaica para una cocina de inducción magnética.[1] [2]

Un sistema de generación fotovoltaica, es un conjunto de dispositivos que trabajan conjuntamente para generar energía eléctrica en función de la radiación solar que está disponible en determinados horas del día, de este condicionamiento se plantea la inclusión de un sistema de almacenamiento al sistema de generación fotovoltaica para disponer de energía eléctrica para dejar de depender de la situación climatológica. Se plantea un sistema de generación fotovoltaica con y sin sistema de almacenamiento de energía, se realiza el análisis de las etapas de potencia (conversión e inversión), sistema de almacenamiento y sistema de generación fotovoltaica, se diseñan los controladores, se presentan los resultados obtenidos para las simulaciones realizadas.

II. FUNDAMENTO TEÓRICO

A continuación se presenta el fundamento teórico, las ecuaciones características y diseño de controladores para los dispositivos que conforman los sistemas que se van a desarrollar.

Nomenclatura:

- I_{SC} Corriente de Corto Circuito en [A]
- V_{OC} Tensión de circuito abierto
- P_M Potencia Máxima
- V_{mpp} Tensión Máxima
- I_{mpp} Corriente Máxima
- FF Factor de Forma
- η Eficiencia o Rendimiento
- I_D Es la corriente a través del diodo.
- I_0 Corriente de Saturación, normalmente entre 10^{-5} y 10^{-6} A.
- V_d Voltaje del diodo.
- k Constante de Boltzman 1.3805×10^{-23} [J/K]
- T Temperatura absoluta [K]
- q Carga del electrón 1.6022×10^{-19} (Coulomb) [C]
- K_i Coeficiente de la Célula en Corto Circuito [A/C]
- T_c Temperatura de Operación de la Célula en grados centígrados [C]
- T_{ref} Temperatura de Referencia de la célula en grados centígrados [C]
- β Irradiancia en [W/m²]
- N_p células configuradas en paralelo
- N_s células configuradas en serie

- V_L Voltaje en inductor
- V_i Voltaje de entrada
- D Ciclo de trabajo
- L Inductancia
- T Periodo
- V_o Voltaje de salida
- Δi_L Variación de corriente en inductor
- I_o Corriente de salida
- ΔV_o Variación de voltaje
- C Capacitancia
- f Frecuencia
- R Resistencia
- f_s frecuencia portadora
- f_1 frecuencia moduladora
- m_f modulación de frecuencia
- \hat{v}_{tri} amplitud de la señal portadora
- $\hat{v}_{control}$ amplitud pico de la señal moduladora
- m_a índice de modulación

A. Célula fotovoltaica

La célula fotovoltaica es un elemento fabricado con materiales semiconductores, que mediante el principio del efecto fotoeléctrico generan tensión eléctrica cuando reciben energía solar. [3] La energía que generan por unidad de área está en el rango de 10 mW/cm² a 25 mW/cm² que corresponde a 10% a 25 % de eficiencia. Una célula tiene un área aproximada de 225 cm², con un 15 % de eficiencia y una potencia de 3.37W. [4] [3] [5]

B. Módulo fotovoltaico

El módulo fotovoltaico está formado por la interconexión en serie y/o paralelo de varias células, esto se realiza para poder adaptar a los requerimientos de tensión y corriente de una aplicación determinada. [6] Las conexiones entre células forman un módulo con una potencia nominal de 3Wp hasta 300 Wp, y las conexiones entre módulos forman una matriz de módulos que entregan una potencia de unos pocos watts hasta cientos de mega watts. [4]

1. *Características eléctricas:* Las características eléctricas de un módulo [7], están determinadas por las células fotovoltaicas por la cual está formado, estas contienen características eléctricas que son descritas mediante los siguientes parámetros representados en la Figura 1.

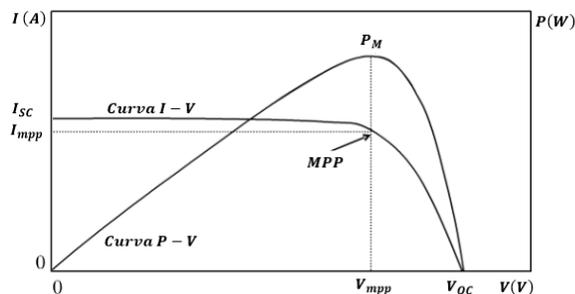


Figura 1. Características Eléctricas Módulo fotovoltaico, curva I-V y curva P-V

- Corriente de corto circuito I_{sc} : Es la máxima intensidad de corriente que proporciona el módulo bajo determinadas condiciones de radiación y temperatura, corresponde a la corriente que entrega cuando se conectan un circuito exterior con resistencia nula, se puede medir directamente con un amperímetro conectado a la salida del módulo, tiene valores aproximados a los 3 A.

- Tensión de circuito abierto V_{oc} : Es la máxima tensión que se medirá en un módulo cuando no hay paso de corriente entre los bornes del mismo. Suele ser menor a 22v para módulos que van a trabajar a 12v.

- Potencia Máxima P_m : Denominada también Potencia Pico, es el valor máximo de potencia que se obtiene de la multiplicación de la corriente y tensión de la salida del módulo, se muestra en la ecuación (1), su valor se mide en Vatios (W). Cuando se trabaja en este punto se obtiene el mayor rendimiento del módulo.

$$P_M = I_{mpp} \times V_{mpp} \quad (1)$$

- Tensión Máxima V_{mpp} y Corriente Máxima I_{mpp} : Tensión y corriente máxima son correspondientes al punto donde la potencia es máxima P_m , la tensión máxima V_{mpp} es aproximadamente el 80% del valor de la tensión de circuito abierto.

- Factor de Forma FF: Es la relación entre la potencia máxima y el producto de la corriente de corto circuito y la tensión de circuito abierto, se muestra en la ecuación (2). Sus valores comunes suelen estar entre 0.7 y 0.8, el FF determina la calidad del módulo mientras el valor se aproxime a la unidad, el módulo puede proporcionar mayor potencia.

$$FF = \frac{P_M}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2)$$

- Eficiencia o Rendimiento n : Es el cociente entre la potencia máxima que el panel puede entregar y la radiación solar PL, se muestra en la ecuación Ec. 1).

$$n = \frac{P_M}{P_L} \quad \text{Ec. 1}$$

- Condiciones Estándar (CE): Los valores de I_{sc} , V_{oc} , V_{pmax} , I_{pmax} , son valores entregados por los fabricante, estos valores eléctricos son calculados a condiciones estándar de prueba con sus siglas en ingles STC, que son las siguientes: Irradiancia G (CE)=1 KW/m², A nivel de mar $AM=1.5$, para temperatura de la célula T_c (CE)=25 grados centígrados. [8]

2. *Circuito equivalente célula y modulo fotovoltaico:* Mediante el análisis del circuito eléctrico equivalente de una célula fotoeléctrica, se plantearán las ecuaciones que representarán el modelo matemático y mediante las configuraciones serie o paralelo, se plantearán el modelo matemático de un módulo.

- Modelo simplificado: El modelo simplificado de la célula fotoeléctrica se determina al considerar que no existe pérdidas de potencia en el proceso de transformación de

energía. La variación de potencia entregada por la célula es producida por los cambios de temperatura de trabajo, además de los cambios de radiación solar a la cual es sometida, a través de un análisis de circuitos se determinara las ecuaciones que rigen el modelo al tomar en cuenta los dos factores mencionados. En la Figura 2 se muestra el circuito equivalente para un modelo de Célula Fotoeléctrica, este circuito consiste en una fuente de corriente y un diodo conectados en paralelo.

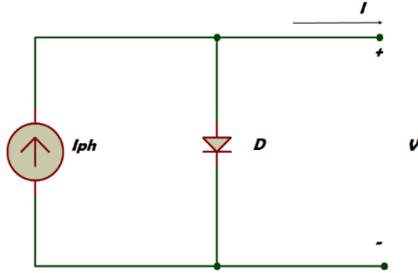


Figura 2. Modelo de Célula Fotoeléctrica

En la Figura 2, el diodo D representa la unión p-n de la célula fotoeléctrica en condiciones de oscuridad, la corriente en este estado es expresada por el modelo matemático de un diodo mediante la ecuación de Schokley que se muestra en la ecuación (3). Cuando la célula fotoeléctrica esta iluminada, a la ecuación de Schokley se suma la corriente fotogenerada por la célula.

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{n V_t}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

El coeficiente de emisión n depende del material y la construcción física del diodo. Generalmente la construcción de diodos se realiza con materiales semiconductores como germanio y silicio, siendo n=1 para el germanio y n=2 para el silicio, en la práctica los valores n para el silicio esta entre $1.1 < n < 1.8$. [9]

En la ecuación (4), el término V_t es conocido como voltaje térmico, cuya ecuación es la siguiente:

$$V_t = \frac{k T}{q} \quad (4)$$

Mediante el análisis de la Ley de Corriente de Kirchhoff aplicado a la Figura 2, se obtiene la ecuación (5), que representa la salida de corriente I del circuito simplificado equivalente a una Célula Fotoeléctrica.

$$I = I_{ph} - I_D \quad (5)$$

Al reemplazar la ecuación (3) en la ecuación (5).

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{n * V_T}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

La corriente I_{ph} generada por la fotocélula, depende de la radiación solar incidente y la temperatura de operación de la misma, expresada en la ecuación (7).

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i * (T_c - T_{ref})] \frac{\beta}{1000} \quad (7)$$

La temperatura de operación del diodo; semiconductor que representa la juntura p-n de la célula, no es constante, esta temperatura depende de dos factores: la temperatura ambiente y la potencia disipada, esta potencia disipada es una potencia que el diodo absorbe de generadores independientes, en este caso la producida por la fotocélula, y la convierte en calor, en consecuencia produce calentamiento dentro del diodo. [10] Al aumentar la temperatura del diodo, sus características se modifican mediante la variación de corriente de saturación inversa y el voltaje térmico, expresada en la ecuación (8) que representa la corriente de saturación para una célula fotovoltaica.

$$I_0 = I_{RS} \left(\frac{T_c}{T_{ref}}\right)^3 * \exp\left[\left(\frac{q * E_g}{k * A}\right) * \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c}\right)\right] \quad (8)$$

La corriente de saturación inversa se puede aproximar mediante la ecuación (9).

$$I_{RS} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{q * V_{oc}}{k * A * T_c * N_s}\right)} \quad (9)$$

• Modelo general de la célula fotovoltaica: Con la eliminación de R_p , se presenta el modelo general de una célula fotovoltaica, este circuito está compuesto por una fuente de fotocorriente, un diodo y una resistencia en serie, como se muestra en la Figura 3, en el modelo general se considerara R_p infinita. Mediante el análisis de Ley de Corriente de Kirchhoff se obtiene la ecuación (10), que representa las características Intensidad Voltaje de la célula en el modelo general.

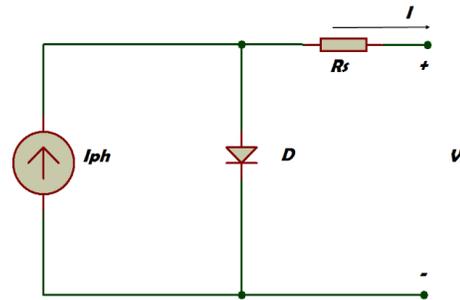


Figura 3. Modelo general de la célula fotoeléctrica

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I R_s}{n * V_T}\right) - 1 \right] \quad (10)$$

• Modelo general del módulo fotovoltaico: El modelo general del módulo, se realiza en relación del modelo general de la célula, el circuito eléctrico equivalente se presenta en la Figura 4, el circuito está formado por n número de células en serie N_s y n número de células en paralelo N_p , una fotocelda y una resistencia en serie R_s . La ecuación que representa las características de Corriente y Voltaje del módulo se presenta en la ecuación (11).

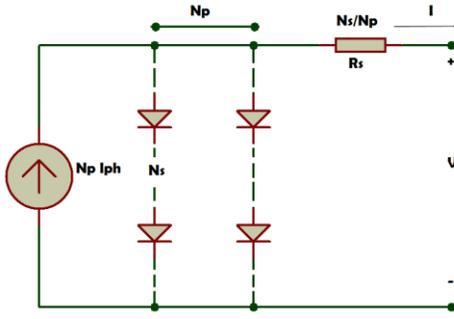


Figura 4. Modelo general de módulo fotoeléctrico

$$I = N_p * I_{ph} - N_p * I_0 \left[\exp \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right) - 1 \right] \quad (11)$$

Para el diseño del generador se usará el módulo fotovoltaico de la marca ISOFOTON modelo I165, cuyas características eléctricas se presentan en la Tabla 1, un solo modulo tiene la capacidad de entregar una potencia de 165 W bajo condiciones estándar.

Tabla 1. Características eléctricas Isofoton I165

No.	Marca	Modelo	Potencia (W)	I_{mpp} (A)	V_{mpp} (V)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)
1	Isfoton	I165	165	9.48	17.4	10.06	21.6

C. Convertidores de potencia

1. *Convertidor elevador DC-DC*: Es un dispositivo de potencia que proporciona a su salida una tensión superior a la tensión de entrada, $V_o > V_i$ [11]. La topología del convertidor se muestra en la Figura 5.

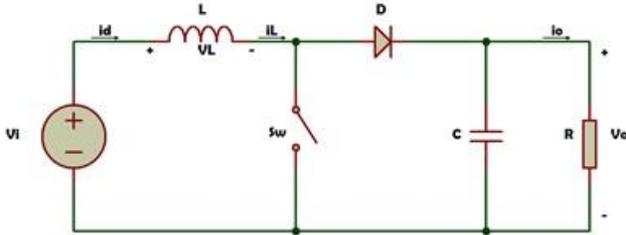


Figura 5. Convertidor elevador DC-DC

Se realizará el análisis del convertidor elevador en modo de conducción continua, el interruptor Sw presenta dos estados ON y OFF.

• Cuando Sw está en estado ON, la tensión de los bornes del diodo se polariza en sentido inverso y por lo tanto permanece bloqueado. La tensión en el inductor L es positiva y se carga por medio de la fuente Vi, el capacitor C tiene un valor lo suficientemente elevado como para poder mantener la tensión de salida constante sobre la carga. Se representa el estado ON con las ecuaciones (12) y (13) de voltaje y corriente respectivamente.

$$V_L = V_i \quad (12)$$

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \frac{V_i * D * T}{L} \quad (13)$$

• Cuando Sw está en estado OFF, el diodo permite la continuidad de corriente de la inductancia L y la energía almacenada en la bobina se transfiere al condensador C. Se representa el estado OFF con la ecuaciones (14) y (15), de voltaje y corriente respectivamente.

$$V_L = V_i - V_o \quad (14)$$

$$(\Delta i_L)_{\text{abierto}} = \frac{(V_i - V_o)(1 - D)T}{L} \quad (15)$$

El ritmo de variación de la corriente en la bobina es constante, tanto para el estado abierto como cerrado en el interruptor, la relación de corriente se expresa mediante la suma de la variación de corriente con el interruptor cerrado con la variación de la corriente con el interruptor abierto igualada cero, como se muestra en la ecuación (16). Al reemplazar las ecuaciones (13) y (15) en ecuación (16) y al simplificar se obtiene la ecuación (17), que expresa la relación entre el voltaje de entrada Vi, voltaje de salida Vo y el ciclo de trabajo D, denominada ecuación fundamental del convertidor elevador.

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} + (\Delta i_L)_{\text{abierto}} = 0 \quad (16)$$

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (17)$$

Para el diseño del convertidor elevador, se presentan las ecuaciones (18) y (19), que corresponden al valor de la inductancia y capacitancia del convertidor.

$$L = \frac{D(1 - D)V_o}{\Delta i_L f} \quad (18)$$

$$C = \frac{I_o * D}{\Delta V_o * f} \quad (19)$$

Para el diseño del controlador, se plantea el modelo matemático del convertidor elevador DC-DC mediante el análisis en estado estático y dinámico, de cuyo resultado se obtendrá la función de transferencia de la planta convertidor.

• *Análisis en estado estático*: El análisis se realiza para los dos estados que presenta el interruptor del convertidor (ON y OFF). Mediante el análisis de voltaje y de corriente por medio de las leyes de Kirchhoff en el circuito de la Figura 5, se plantean las ecuaciones (20) y (21), de voltaje y corriente respectivamente para el estado ON y para el estado OFF se presentan las ecuaciones (22) y (23).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad (20)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = -\frac{V_o}{C * R} \quad (21)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (22)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{CR} \quad (23)$$

• Análisis en estado dinámico: El comportamiento dinámico del convertidor elevador se expresa mediante espacio de estados, la topología del convertidor elevador contiene un solo interruptor, de esta manera el comportamiento dinámico será definido mediante las ecuaciones de acuerdo al estado del interruptor, para el estado ON mediante la ecuación (24) y para el estado OFF mediante la ecuación (25). La salida V_o se puede expresar mediante variables de estado para los dos estados del interruptor, expresados en la ecuación (26) y (27).

$$\dot{x} = A_{ON}x + B_{ON} \quad (24)$$

$$\dot{x} = A_{OFF}x + B_{OFF} \quad (25)$$

$$V_o = C_{ON}x \quad (26)$$

$$V_o = C_{OFF}x \quad (27)$$

Las ecuaciones se pueden aproximar mediante un modelo promediado en el espacio de estados, cuando el periodo de conmutación es constante, este modelo promediado permite encontrar un modelo continuo que aproxime el progreso de las variables en cada uno de los intervalos de conmutación, la ecuación (28) expresa el modelo promediado, y para la salida mediante la ecuación (29).

$$\dot{x} = [A_{ON}d + A_{OFF}(1-d)]x + [B_{ON}d + B_{OFF}(1-d)] \quad (28)$$

$$V_o = Cx \quad (29)$$

Para hallar la función de transferencia se relacionará la señal de salida con la señal de entrada, esta relación se calculará mediante las ecuaciones obtenidas tanto en el análisis en estado estacionario como en el estado dinámico, se plantearán las matrices de transición para el convertidor elevador para los dos estados del interruptor, se presenta para el estado ON mediante las ecuaciones (30) y (31), para el estado OFF mediante las ecuaciones (32) y (33).

$$A_{ON} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad B_{ON} = \begin{bmatrix} 1 \\ L \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$C_{ON} = [0 \quad 1] \quad (31)$$

$$A_{OFF} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad B_{OFF} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$C_{OFF} = [0 \quad 1] \quad (33)$$

El procedimiento para el cálculo de la función de transferencia se basa en las ecuaciones de estado del convertidor, procedimiento que se detalla a continuación:

$$\frac{V_o}{V_i} = -CA^{-1}B \quad (34)$$

$$\dot{x} = [sI - A]^{-1}[(A_{ON} - A_{OFF})x + (B_{ON} - B_{OFF})]d(s) \quad (35)$$

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{d(s)} = C[sI - A]^{-1}[(A_{ON} - A_{OFF})x + (B_{ON} - B_{OFF})V_{in}] + (C_{ON} - C_{OFF})x \quad (36)$$

La función de transferencia del convertidor elevador queda definida mediante la ecuación (37).

$$G(s) = \frac{V_o}{1-D} \frac{1 - \frac{Ls}{(1-D)^2 x R}}{\frac{LC s^2}{(1-D)^2} + \frac{Ls}{(1-D)^2 x R} + 1} \quad (37)$$

2. *Convertidor reductor DC-DC*: Es un dispositivo de potencia que proporciona a su salida una tensión media V_o o de valor inferior a la tensión de entrada V_i [12]. La topología del convertidor se muestra en la

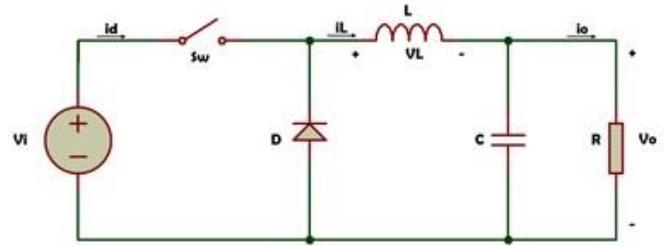


Figura 6. Convertidor reductor DC-DC

Se realizará el análisis del convertidor reductor en modo de conducción continua, el interruptor Sw presenta dos estados ON y OFF.

• Cuando en interruptor está en estado ON, el diodo D se polariza inversamente, anulando la corriente I_d y se produce un incremento de la corriente I_L a través de la bobina que ayuda a cargar el condensador C . Se representa el estado ON con la ecuaciones (38) y (39), de voltaje y corriente respectivamente.

$$V_L = V_i - V_o = L * \frac{di_L}{dt} \quad (38)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (39)$$

• Cuando en interruptor está en estado OFF, el diodo se polariza directamente para dejar pasar la corriente de la bobina.

Se representa el estado OFF con la ecuaciones (40) y (41), de voltaje y corriente respectivamente.

$$V_L = -V_o = L * \frac{di_L}{dt} \quad (40)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (41)$$

Se presenta la ecuación fundamental del convertidor reductor en la ecuación (42).

$$V_o = \frac{V_i}{D} \quad (42)$$

Para el diseño del convertidor reductor, se presentan las ecuaciones (43) y (44), que corresponden al valor de la inductancia y capacitancia del convertidor.

$$L = \frac{V_o}{\Delta i_L \cdot f} \quad (43)$$

$$C = \frac{I_o \cdot D}{\Delta V_o \cdot f} \quad (44)$$

Para el diseño del controlador, se plantea el modelo matemático del convertidor reductor DC-DC mediante el análisis en estado estático y dinámico, de cuyo resultado se obtendrá la función de transferencia de la planta convertidor. El análisis del convertidor en estado estático para los estados: ON se mostraron en las ecuaciones (38) y (39), y para el estado OFF en las ecuaciones (40) y (41). Se plantean las matrices de transición para el convertidor reductor bajo lo condición presentada en la ecuación (45). Se presentan las matrices de transición del convertidor reductor en las ecuaciones (46) y (47).

$$A_{ON} = A_{OFF}, B_{ON} = B_{OFF}, C_{ON} = C_{OFF} \quad (45)$$

$$A_{ON} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} B_{ON} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$C_{ON} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & 1 \end{bmatrix} \quad (47)$$

El procedimiento para el cálculo de la función de transferencia se basa en las ecuaciones de estado del convertidor reductor, el procedimiento fue detallado en el desarrollo del convertidor elevador. La función de transferencia del convertidor reductor queda definida mediante la ecuación (48).

$$\frac{V_{out}(s)}{D(s)} = \frac{\frac{1}{LC}}{\left[s^2 + \frac{1}{RC} s + \frac{1}{LC} \right]} \quad (48)$$

3. *Inversor DC-AC y filtro:* Los convertidores DC-AC son circuitos electrónicos formados con dispositivos semiconductores de potencia de alta velocidad, que mediante conmutación generan energía eléctrica de corriente alterna a partir de una fuente de energía de corriente continua, estos circuitos son conocidos comúnmente como inversores. [13] [14] La topología del inversor tipo puente completo y filtro LC se muestra en la

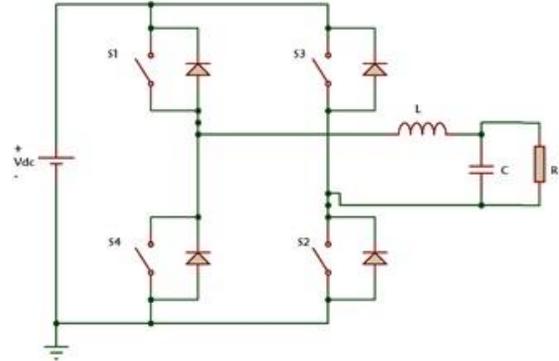


Figura 7. Inversor DC-AC y Filtro LC

Para el análisis del modelo matemático, la conmutación de los interruptores de los circuitos de la Figura 7 se considerara los estados de conmutación en los pares de interruptores (S1, S2) y (S3, S4).

- Cuando conmutan los interruptores S1 y S2, se representa las ecuaciones (49) y (50), de voltaje y corriente respectivamente.

$$L * \frac{di_L}{dt} = -V_o + V_{DC} \quad (49)$$

$$C * \frac{dv_C}{dt} = i_L - \frac{v_C}{R} \quad (50)$$

- Cuando conmutan los interruptores S3 y S4, se representa las ecuaciones (51) y (52), de voltaje y corriente respectivamente

$$L * \frac{di_L}{dt} = -V_o - V_{DC} \quad (51)$$

$$C * \frac{dv_C}{dt} = i_L - \frac{v_C}{R} \quad (52)$$

Para el diseño del controlador, se plantea el modelo matemático del inversor DC-AC, se realiza el análisis del circuito correspondiente al inversor de la Figura 7, de cuyo resultado se obtendrá la función de transferencia de la planta inversor. Mediante la ley de voltaje de Kirchoff se obtiene la ecuación:

$$V_{in} = V_{R_L} + V_L + V_o \quad (53)$$

Aplicando Laplace:

$$V_{in}(s) = I_L(s) \times R_L + I_L(s) \times sL + V_o \quad (54)$$

Mediante la ley de corriente de Kirchoff se obtiene la ecuación:

$$I_L = I_C + I_O \quad (55)$$

Aplicando Laplace:

$$I_L(s) = sC \times V_O(s) + \frac{V_O(s)}{R} \quad (56)$$

$$I_L(s) = V_O(s) \times \left(sC + \frac{1}{R} \right) \quad (57)$$

Se reemplaza la ecuación (57) en (54):

$$V_{in}(s) = V_O(s) \times \left[\frac{s^2 RCL + s(LRCR_L) + R + R_L}{R} \right] \quad (58)$$

La relación que expresa el voltaje de salida V_{in} con voltaje de entrada V_{DC} , se muestra en la ecuación (59). Donde m es el ancho de los pulsos con los que se controlan los interruptores del inversor.

$$V_{in}(s) = m(s) \times V_{DC} \quad (59)$$

Se reemplaza la ecuación (59) en (58).

$$m(s) \times V_{DC} = V_O(s) \times \left[\frac{s^2 RCL + s(LRCR_L) + R + R_L}{R} \right] \quad (60)$$

La función de transferencia del inversor que relaciona el voltaje de salida con la variación de pulsos que controlan los interruptores del inversor se muestra en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

$$\frac{V_O(s)}{m(s)} = \frac{V_{DC} \times R}{s^2 RCL + s(LRCR_L) + R + R_L} \quad (61)$$

Para el control de los interruptores del inversor se realiza mediante el método de conmutación modulado por ancho de pulsos. Este método controla la magnitud y frecuencia del voltaje de salida del inversor, mediante la generación de una señal de control y al compararla con una señal senoidal que contiene la frecuencia deseada y una forma de onda triangular de alta frecuencia, como se observa en la Figura 8, al comparar entre estas dos señales generara un tren de pulsos de ancho específico que serán utilizadas en la conmutación de los interruptores que conforman un inversor. [15] [16]

Las señales sinusoidales serán las encargadas de transmitir la información de frecuencia y amplitud, según los requerimientos para el funcionamiento de la carga, en la ecuación (62) se presenta la forma de la onda. [13]

$$V(t) = \hat{v}_{control} \cdot \text{sen}(w \cdot t + \beta) \quad (62)$$

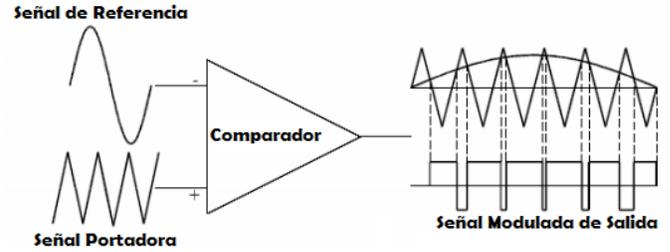


Figura 8. Modulación de ancho de pulsos sinusoidal SPWM

La señal triangular está definida por:

- Frecuencia Portadora f_s : es la frecuencia con que conmutarán los interruptores del inversor. [9]

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (63)$$

- Amplitud portadora \hat{v}_{tri} : El valor de \hat{v}_{tri} representa la amplitud máxima de la portadora, establece la relación con el índice de modulación de amplitud y la amplitud de la señal moduladora.

$$m_a = \frac{\hat{v}_{control}}{\hat{v}_{tri}} \quad (64)$$

D. Sistema de almacenamiento de energía

Para el diseño del sistema de almacenamiento, se usará una batería comercial como referencia para obtener las características técnicas y determinar el número de baterías necesarios para diseñar el sistema. Se usará la batería de la marca ULTRACELL modelo UCG 150-12 [18], cuyas características eléctricas se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Características eléctricas ULTRACELL modelo UCG 150-12

Voltaje nominal	12V	
Capacidad nominal	150 Ah	
Características de	160.8 Ah/8.04A	(20 hrs, 1.8 V/cell, 25°C)
Capacidad	150 Ah/15.0A	(10 hrs, 1.8 V/cell, 25°C)
	131.6 Ah/26.3A	(5 hrs, 1.8 V/cell, 25°C)

Se presenta la ecuación (65) que calcula la capacidad del sistema de almacenamiento, la ecuación (66) calcula el número de baterías que debe contener el sistema de almacenamiento.

$$C_{bat} = \frac{D_{total} \times A_{ut}}{V_{bat} \times DOD} \quad (65)$$

$$\text{NúmeroBaterías} = \frac{C_{bat}}{C_{carga}} \quad (66)$$

III. HIPÓTESIS DE PARTIDA

Para el diseño y simulación del sistema fotovoltaico con y sin sistema de almacenamiento se planteará una serie de hipótesis iniciales como base para el cálculo de los sistemas mencionados. Se considerará lo siguiente:

- La cocina de inducción tendrá una potencia máxima de 1300 watts, alimentada con un voltaje de 120 V y frecuencia de 60 Hz, dispositivo que consume 21.6 A.
- El uso diario de la cocina se limitará a 2 horas 45 minutos al día.
- La ubicación geográfica para la cual se realizará el análisis es para Quito-Ecuador.
- En el diseño del sistema fotovoltaico con y sin sistema de almacenamiento se usará el mismo modelo comercial de modulo fotovoltaico y batería.
- En el sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, se estimará un tiempo de autonomía de 1 día.
- El inversor DC-AC es el dispositivo que transforma energía directa en alterna además de dar las propiedades de magnitud y frecuencia que necesita la carga se realizará un solo diseño que servirá para el sistema fotovoltaico con y sin sistema de almacenamiento, este se desarrolla en el sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento.
- El dimensionamiento del sistema de almacenamiento será igual para el primer y segundo modelo del sistema fotovoltaico, este se desarrollará en el primer modelo.

IV. ANÁLISIS DE LA CARGA Y RADIACIÓN SOLAR

1. *Análisis de la carga:* La cocina de inducción es considerada una carga cíclica, y por hipótesis de partida se usará durante 2 horas 45 minutos al día, con un valor de 3600 Kwh/día. Se añade un 10% de margen de seguridad en el caso de sobrepasar el tiempo de uso, el resultado del consumo de energía se presenta en ecuación (67).

$$D_{total} = \frac{(3600 * 0.1) + 3600}{1000} = 3.96 \frac{KWh}{día} \quad (67)$$

2. *Radiación solar:* La radiación solar disponible para la ciudad de Quito se puede consultar en el “Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica” publicado por el CONECEL [19]. Los valores de interés para el diseño de los sistemas fotovoltaicos, son aquellos que presentan las peores condiciones en el transcurso del año, y los meses de abril, mayo y junio presentan esta característica con un valor de 4800Wh/m2/día.

V. DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO SIN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

Este sistema está formado por los dispositivos: arreglo de módulos fotovoltaicos, convertidor elevador DC-DC, inversor

DC-AC y Filtro. La configuración de este modelo se presenta en la

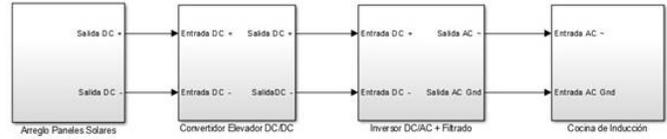


Figura 9. Topología sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

A. Diseño del arreglo de paneles:

Mediante la ecuación (68), reemplazando los valores obtenidos en el análisis de carga representada en la ecuación (67), radiación solar y considerando que el sistema tiene un rendimiento del 90%, se obtiene un número total de paneles fotovoltaicos expresados en la ecuación (69), por criterios de diseño se distribuyen tres módulos conectados en paralelo, con tres módulos conectados en serie, con una potencia total expresada en la ecuación

$$N_{paneles} = \frac{D_{total}}{P_{mpp} \times HSP \times F_g} \quad (68)$$

$$N_{paneles} = 9 \text{ paneles fotovoltaicos} \quad (69)$$

$$P_{mpp} = 1485 \text{ W} \quad (70)$$

B. Convertidores de Potencia

1. *Convertidor elevador DC-DC:* Para el diseño del convertidor elevador se realiza la siguiente consideración:

- $V_o = 200v$
- $V_i = 52v$
- $f = 20Khz$
- El máximo rizado de corriente pico-pico Δi_L permitido en el inductor, será el 10%.
- El máximo rizado de tensión pico-pico ΔV_o permitido en el capacitor, será el 1% de la tensión de salida.

Mediante las ecuaciones (18) y (19) se calcula la inductancia y capacitancia:

$$L = 829 \mu H \quad (71)$$

$$C = 200 \mu F \quad (72)$$

En la Figura 10 se muestra la simulación del convertidor elevador, en Figura 10(a) se muestra la corriente de salida del convertidor elevador y la corriente de entrada que genera el arreglo de paneles, en la Figura 10(b) se muestra el voltaje de salida del convertidor elevador y el voltaje de salida que genera el arreglo de paneles, en la figura se observa que en $t=0.35$ s, el convertidor alcanza el valor de 200V, voltaje que será entregado al inversor. Las características del tiempo de respuesta convertidor elevador con carga nominal se presentan en la

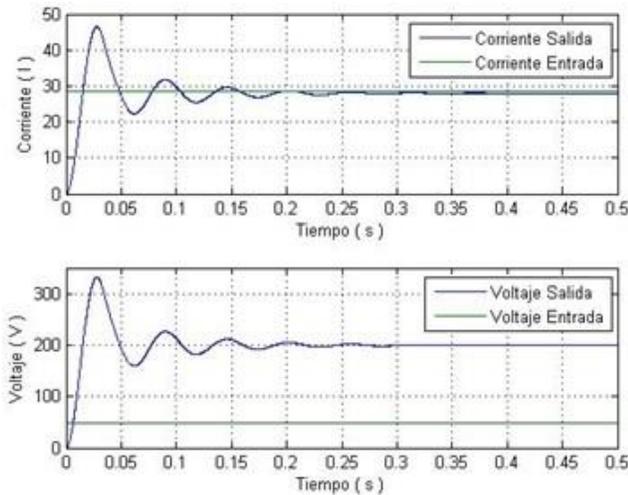


Figura 10. Simulación del convertidor elevador del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

Tabla 3. Características de tiempo de respuesta convertidor elevador con carga nominal

No.	Característica	Tiempo de respuesta (s)	
		Voltaje	Corriente
1	Respuesta de Pico	0.02644	0.0277
2	Tiempo de Estabilización	0.3874	0.3326
3	Tiempo de Subida	0.01345	0.01415
4	Estado Estable	0.4942	0.4008

Para las simulaciones se asume que se trabaja bajo condiciones ideales. La potencia generada por el arreglo de paneles abastece para el correcto funcionamiento de la carga, siempre y cuando las condiciones de generación de corriente y voltaje se mantengan estables bajo condiciones estándar.

2. *Inversor DC-AC*: Para el diseño del inversor se realiza la siguiente consideración:

- La tensión de entrada del inversor será la tensión entregada por el convertidor elevador, con un valor de 200 V.
- La tensión de salida del proceso de inversión y filtrado V_o será de 120 Vrms.
- Las características de la señal moduladora: frecuencia moduladora $f_{mod} = 60\text{Hz}$ y la amplitud pico de la señal de control $v_{control} = 200\text{ Vp}$.
- Las características de la señal portadora: frecuencia moduladora $f_s = 6\text{KHz}$ y la amplitud pico de la señal de control $v_{tri} = 240\text{ Vp}$.
- La técnica de modulación con la cual se controlará los interruptores del inversor será el método de modulado senoidal por ancho de pulsos SPWM unipolar.
- En la etapa de filtrado se usará un filtro pasa bajo de tipo LC.

En la Figura 11 se muestra la señal de voltaje y corriente de salida del inversor con etapa de filtrado, se observa que las señales son de tipo sinusoidal con una frecuencia de 60 Hz y una amplitud de 170 Vpico, 120 Vrms.

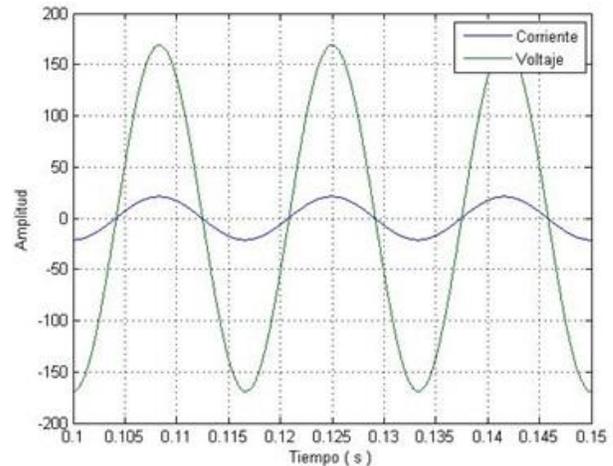


Figura 11. Simulación del inversor con etapa de filtrado del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

3. *Diseño de los controladores del sistema*: A continuación se diseñará los controladores del sistema fotovoltaicos sin sistema de almacenamiento, para las etapas de potencia del convertidor elevador DC/DC e inversor DC/AC y filtro. Reemplazando en la ecuación (37), los valores del inductor y capacitor ecuaciones (71) y (72) respectivamente, ciclo de trabajo D , se encuentra la planta del convertidor elevador, expresada en la ecuación (73), se realiza el mismo procedimiento para el inversor mediante la ecuación (61), la planta del inversor es expresada en la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$G_p(s) = \frac{-0.07974s + 200}{6.13 \times 10^{-6}s^2 + 0.0003987s + 1} \quad (73)$$

$$G_p(s) = \frac{120}{2.80 \times 10^{-8}s^2 + 1.80 \times 10^{-5}s + 1.07} \quad (74)$$

Usando las funciones de transferencia de las ecuaciones (73) y (74), mediante el segundo método de Ziegler-Nichols para la sintonización de controladores PID [20], se calcula la ganancia crítica K_{cr} , se determinan los valores de K_p y T_i , se reemplaza en ecuación (75), se encuentra el controlador. Las funciones de transferencia del controlador del convertidor elevador e inversor se presentan en las ecuaciones (76) y (77) respectivamente.

$$G_c(s) = \frac{K_p \cdot s + \frac{K_p}{T_i}}{s} \quad (75)$$

$$G_c(s) = \frac{3.97 \times 10^{-4}s + 1.199}{s} \quad (76)$$

$$G_c(s) = \frac{3.285s^2 + 2.475 \times 10^4s + 1.644 \times 10^7}{s^2 + 1.786 \times 10^5s} \quad (77)$$

El diagrama de bloques de la Figura 12 y Figura 13, representan a los sistemas en lazo cerrado de la planta $G_p(s)$ en serie con el

controlador PID $G_c(s)$, con realimentación unitaria, del convertidor elevador e inversor respectivamente.

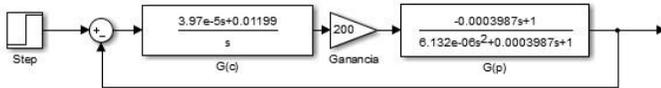


Figura 12. Diagrama de Bloques Controlador PI y Planta, para convertidor elevador de 52 V a 200 V

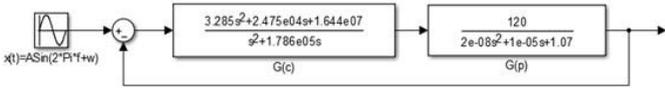


Figura 13. Diagrama de Bloques Controlador PID $G_c(s)$ y Planta $G(p)$, para inversor 200 VDC a 120 VAC

En la Figura 14, se presenta la emulación de variación radiación solar, se puede observar que frente a las diversas variaciones de radiación el controlador estabiliza la señal de voltaje de salida en el convertidor elevador hasta llegar a un valor estable de 200V. En la Tabla 4 se presentan las respuestas del convertidor elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta cuando existe perturbación a través de la variación de radiación.

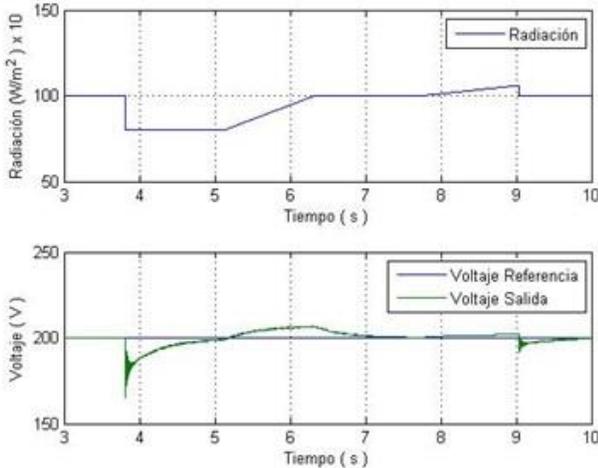


Figura 14. Simulación del Convertidor Elevador del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, frente variación de radiación solar.

Tabla 4. Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador con variación de radiación solar

No.	Característica	Tiempo de respuesta (s)
1	Respuesta de Pico	0.00778
2	Tiempo de Estabilización	0.119
3	Tiempo de Subida	0.00264
4	Estado Estable	0.18

En la Figura 15, se puede observar que frente a la variación de voltaje el controlador estabiliza la señal de voltaje de salida del inversor hasta llegar a un valor estable de 170Vpico.

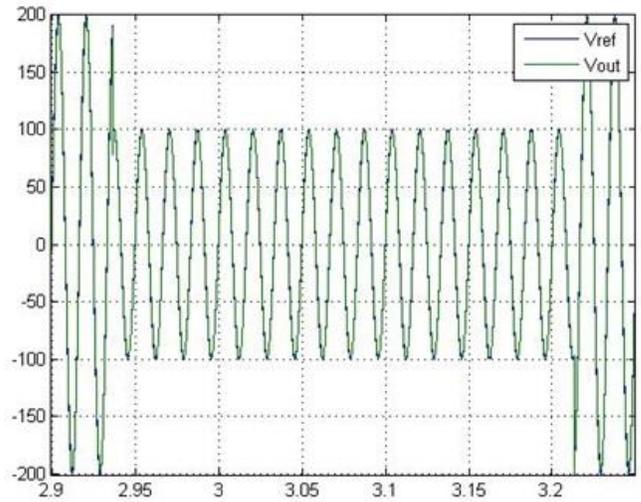


Figura 15. Simulación del inversor del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, frente variación de voltaje en convertidor elevador

VI. DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CON SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

En esta sección se analizarán dos modelos de sistema fotovoltaico, que en su composición de dispositivos constan con los mismos elementos tales como: arreglo de módulos fotovoltaicos, convertidor elevador DC-DC, convertidor reductor elevador DC-DC, inversor DC-AC, Filtro y sistema de almacenamiento, pero difieren en su funcionamiento que se describe a continuación:

- Primer modelo: se considerará que el arreglo de módulos entregue la energía generada al sistema de almacenamiento compuesto por baterías y la carga haga uso de esta energía únicamente.
- Segundo modelo: se considerará que tanto el arreglo de módulos como el sistema de almacenamiento entreguen la energía requerida por la carga.

A. Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, primer modelo.

La configuración de este modelo se presenta en la Figura 16.

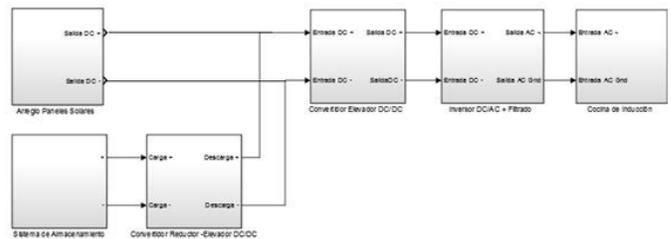


Figura 16. Diagrama de bloques del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, primer modelo

1. *Diseño del arreglo de paneles:* Mediante la ecuación (68), reemplazando los valores obtenidos en el análisis de carga representada en la ecuación (67), radiación solar y considerando que el sistema tiene un rendimiento del 90%, se obtiene un número total de módulos fotovoltaicos expresados

en la ecuación (78), por criterios de diseño se distribuyen tres módulos conectados en paralelo, con tres módulos conectados en serie, con una potencia total expresada en la ecuación (79).

$$N_{\text{paneles}} = 4 \text{ paneles fotovoltaicos} \quad (78)$$

$$P_{\text{mpp}} = 646 \text{ W} \quad (79)$$

2. *Diseño del sistema de almacenamiento:* Si la carga consume 21.6 A de acuerdo a la hipótesis de partida y la batería escogida tiene una $C_{\text{bat}} = 131.6\text{Ah}$ cuando se consume 26.3 A por el periodo de 5 horas de acuerdo a la Tabla 2, entonces una batería está en la capacidad de suministrar la corriente necesaria para el sistema por el tiempo mencionado, por lo que se debe dimensionar el sistema de abastecimiento para un periodo de autonomía de 1 día. Mediante la ecuación (65), reemplazando los valores obtenidos en el análisis de carga ecuación (67), porcentaje máximo de descarga del 70%, se calcula la capacidad del sistema de almacenamiento, expresado en la ecuación (80).

$$C_{\text{bat}} = 472 \text{ Ah} \quad (80)$$

$$\text{NúmeroBaterías} = 4 \text{ baterías} \quad (81)$$

El número de baterías se calcula mediante la ecuación (66), por criterios de diseño se distribuyen las 4 baterías conectadas en paralelo con una capacidad $C=472 \text{ Ah}$, voltaje nominal $V_{\text{bat}} = 12\text{V}$, que abastecerá durante 20 horas continuas al consumir una corriente de $I_{\text{bat}} = 26.3\text{A}$.

El sistema de almacenamiento tiene un porcentaje de descarga total después de 22 horas, como se observa en la Figura 17. El proceso de carga del sistema de almacenamiento será en un periodo de 12.44 horas, como se observa en la Figura 18.

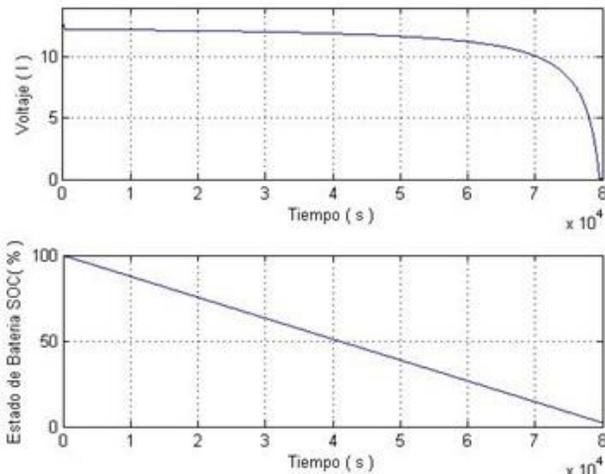


Figura 17. Estado de descarga del sistema de almacenamiento

1. *Diseño de convertidores de potencia:* Se realiza el diseño del convertidor elevador DC-DC, mediante los siguientes consideraciones:

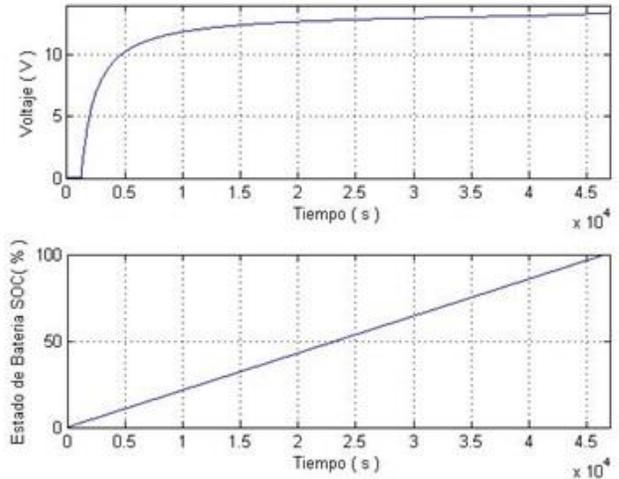


Figura 18. Estado de carga del sistema de almacenamiento

- $V_o = 200\text{v}$
- $V_i = 120\text{v}$
- $f = 20\text{Khz}$
- El máximo rizado de corriente pico-pico Δi_L permitido en el inductor, será el 10% de la corriente de salida.
- El máximo rizado de tensión pico-pico ΔV_o permitido en el capacitor, será el 1% de la tensión de salida.

Mediante las ecuaciones (18) y (19) se calcula la inductancia y capacitancia:

$$L = 900 \text{ uH} \quad (82)$$

$$C = 1000 \text{ uF} \quad (83)$$

En la Figura 19, se muestra la simulación del convertidor elevador, en la Figura 19(a) se muestra la corriente de salida del convertidor elevador y la corriente de entrada que genera el convertidor reductor-elevador, en la Figura 19(b) se muestra el voltaje de salida del convertidor elevador y el voltaje de entrada, se observa que en $t=0.2 \text{ s}$, el convertidor alcanza el valor de 200V, voltaje que será entregado al inversor. En la Tabla 5 se presentan las respuestas del convertidor elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para la etapa de descarga.

Para el diseño del convertidor reductor-elevador se realiza la siguiente consideración:

- $V_o = 120\text{v}$
- $V_i = 17\text{v}$
- $f = 20\text{Khz}$
- El máximo rizado de corriente pico-pico Δi_L permitido en el inductor, será el 10% de la corriente de salida.
- El máximo rizado de tensión pico-pico ΔV_o permitido en el capacitor, será el 1% de la tensión de salida.

Mediante las ecuaciones (43) y (44) se calcula la inductancia y capacitancia:

$$L = 290 \text{ uH} \quad (84)$$

$$C = 500 \text{ uF} \quad (85)$$

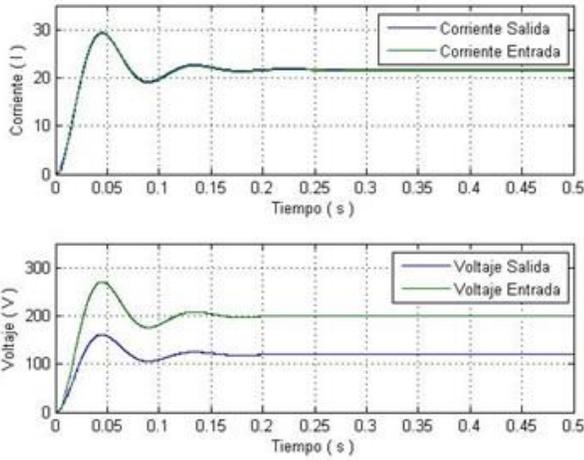


Figura 19. Simulación del convertidor elevador del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, primer modelo

Tabla 5. Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, etapa descarga

No.	Característica	Tiempo de respuesta (s)	
		Voltaje	Corriente
1	Respuesta de Pico	0.0453	0.04615
2	Tiempo de Estabilización	0.1388	0.207
3	Tiempo de Subida	0.02445	0.02248
4	Estado Estable	0.2264	0.2817

2. *Diseño de los controladores del sistema:* El diseño de los controladores del sistema fotovoltaicos con sistema de almacenamiento para el primer modelo, se presentan para las etapas de potencia del convertidor elevador DC/DC, convertidor reductor-elevador DC/DC. Mediante la ecuación (37), los valores del inductor y capacitor ecuaciones (71) y (72) para el inductor y capacitor respectivamente, ciclo de trabajo D, se encuentra la planta del convertidor elevador, expresada en la ecuación (86), se realiza el mismo procedimiento para el convertidor reductor-elevador mediante la ecuación, la planta del convertidor reductor-elevador es expresada en la ecuación (74).

$$Gp(s) = \frac{-0.01625s + 200}{2.5 \times 10^{-6}s^2 + 8.127 \times 10^{-5}s + 1} \quad (86)$$

$$G(s) = \frac{-0.1131s + 120}{1.45 \times 10^{-5}s^2 + 0.0009428s + 1} \quad (87)$$

Usando las funciones de transferencia de las ecuaciones (86) y (87), mediante el segundo método de Ziegler-Nichols para la sintonización de controladores PID [20], se calcula la ganancia crítica Kcr, se determinan los valores de Kp y Ti, se reemplaza en ecuación (75), se encuentra el controlador. Las funciones de transferencia del controlador del convertidor elevador y convertidor reductor-elevador se presentan en las ecuaciones (88) y (89) respectivamente.

$$Gc(s) = \frac{1.717s^2 + 912.6s + 1.067 \times 10^5}{s^2 + 3.94 \times 10^4s} \quad (88)$$

$$Gc(p) = \frac{0.0005315s + 0.03928}{s} \quad (89)$$

El diagrama de bloques de la Figura 20 y Figura 21, representan a los sistemas en lazo cerrado de la planta Gp(s) en serie con el controlador PID Gc(s), con realimentación unitaria, del convertidor elevador e inversor respectivamente.

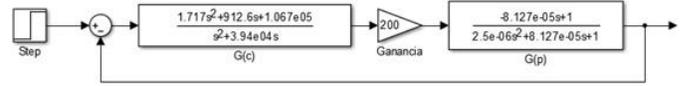


Figura 20. Diagrama de Bloques Controlador PI G(c) y Planta G(p), para convertidor elevador de 120 VDC a 200 VDC

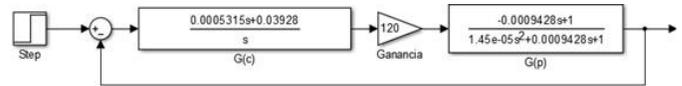


Figura 21. Diagrama de Bloques Controlador PID G(c) y Planta G(p), convertidor reductor-elevador 17 VDC-120 VDC

En la Figura 22, se puede observar que frente a las diversas variaciones de voltaje proveniente del convertidor reductor-elevador el controlador estabiliza la señal de voltaje de salida en el convertidor elevador hasta llegar a un valor estable de 200V. En la Tabla 7 se presentan las respuestas del convertidor reductor elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para variación de voltaje.

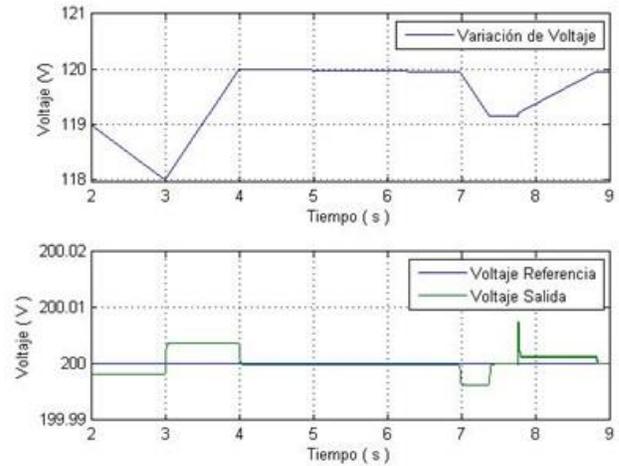


Figura 22. Simulación del Convertidor Elevador del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento primer modelo, frente variación de voltaje

En la Figura 23, se puede observar que frente a las diversas variaciones de voltaje proveniente del sistema de almacenamiento el controlador estabiliza la señal de voltaje de salida en el convertidor reductor-elevador hasta llegar a un valor estable de 120V. En la Tabla 7 se presentan las respuestas del convertidor reductor - elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para variación de voltaje

Tabla 6. Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, frente variación de voltaje

No.	Característica	Tiempo de respuesta (s)
1	Respuesta de Pico	0.00497
2	Tiempo de Estabilización	0.239
3	Tiempo de Subida	0.00168
4	Estado Estable	0.3

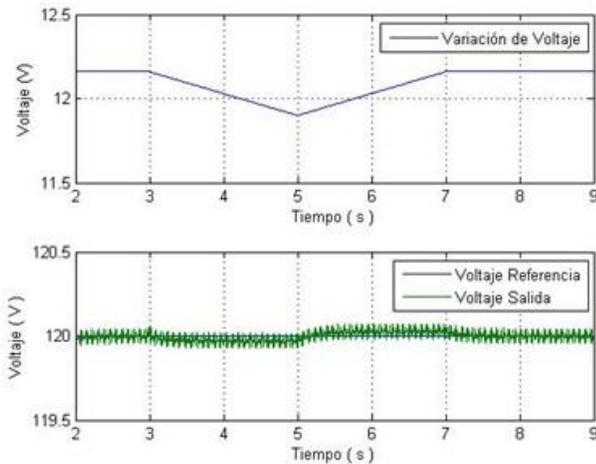


Figura 23. Simulación del convertidor reductor-elevador del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento primer modelo, frente variación de voltaje

Tabla 7. Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, frente variación de voltaje

No.	Característica	Tiempo de respuesta (s)
1	Respuesta de Pico	0.0132
2	Tiempo de Estabilización	0.113
3	Tiempo de Subida	0.00415
4	Estado Estable	0.18

B. Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo.

La configuración de este modelo se presenta en la Figura 24.

1. *Diseño del arreglo de paneles:* Mediante la ecuación (68), reemplazando los valores obtenidos en el análisis de carga representada en la ecuación (67), radiación solar y considerando que el sistema tiene un rendimiento del 90%, se obtiene un número total de módulos fotovoltaicos expresados en la ecuación (90), por criterios de diseño se distribuyen tres módulos conectados en paralelo, con tres módulos conectados en serie, con una potencia total expresada en ecuación (91).

$$N_{\text{paneles}} = 6 \text{ paneles fotovoltaicos} \quad (90)$$

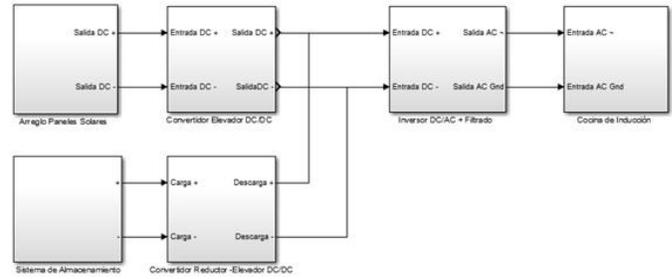


Figura 24. Diagrama de bloques del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo

$$P_{\text{mpp}} = 968 \text{ W} \quad (91)$$

2. *Diseño de convertidores de potencia:* : Se realiza el diseño del convertidor elevador DC-DC, mediante los siguientes consideraciones:

- $V_{o1}=80\text{v}$
- $V_{i1}=17\text{v}$
- $V_{o2}=200\text{v}$
- $V_{i2}=80\text{v}$
- $f=20\text{Khz}$
- El máximo rizado de corriente pico-pico Δi_L permitido en el inductor, será el 10% de la corriente de salida.
- El máximo rizado de tensión pico-pico ΔV_o permitido en el capacitor, será el 1% de la tensión de salida.

Mediante las ecuaciones (43) y (44) se calcula la capacitancia e inductancia para los dos convertidores conectados en cascada:

$$C1 = 520 \mu\text{F} \quad (92)$$

$$L1 = 300 \mu\text{H} \quad (93)$$

$$C2 = 400 \mu\text{F} \quad (94)$$

$$L2 = 1090 \mu\text{H} \quad (95)$$

En la Figura 25, se muestra la simulación del convertidor elevador conectado en cascada, en la Figura 25(a) se muestra la corriente de salida del convertidor elevador y la corriente de entrada que genera el arreglo de paneles, en la Figura 25(b) se muestra el voltaje de salida del convertidor elevador y el voltaje de entrada que genera el arreglo de paneles, en la figura se observa que en $t=0.1 \text{ s}$, el convertidor alcanza el valor de 200.4V, voltaje que será entregado al inversor. En la Tabla 8 se presentan las respuestas del convertidor elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para el segundo modelo.

Para el diseño del convertidor reductor-elevador se realiza la siguiente consideración:

- $V_o = 200\text{v}$
- $V_i = 12\text{v}$
- $f=20\text{Khz}$
- El máximo rizado de corriente pico-pico Δi_L permitido en el inductor, será el 10% de la corriente de salida.

- El máximo rizado de tensión pico-pico ΔV_o permitido en el capacitor, será el 1% de la tensión de salida.

Mediante las ecuaciones (43) y (44) se calcula la capacitancia e inductancia, respectivamente:

$$L = 325 \mu H \quad (96)$$

$$C = 650 \mu F \quad (97)$$

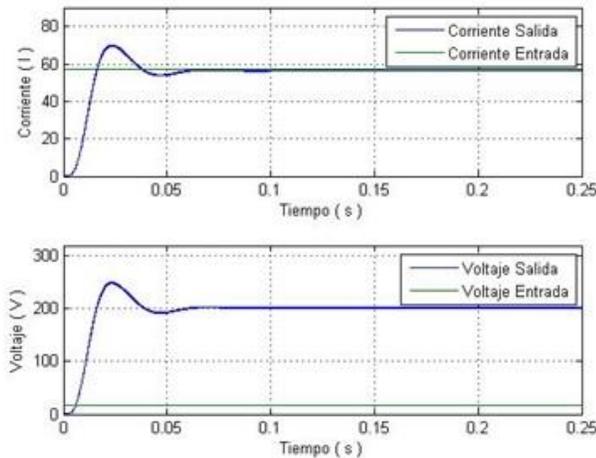


Figura 25. Simulación del Convertidor Elevador del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo

Tabla 8. Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, segundo modelo

No.	Característica	Tiempo de respuesta (s)	
		Voltaje	Corriente
1	Respuesta de Pico	0.023	0.0235
2	Tiempo de Estabilización	0.094	0.086
3	Tiempo de Subida	0.014	0.014
4	Estado Estable	0.108	0.11

En la Figura 26, se muestra la simulación del convertidor reductor-elevador, en Figura 26(a) se muestra la corriente de salida del convertidor en la etapa de elevación y la corriente de entrada que genera el sistema de almacenamiento, en la Figura 26(b) se muestra el voltaje de salida del convertidor en la etapa de elevación y el voltaje de entrada que genera el sistema de almacenamiento, en la figura se observa que en $t=0.35$ s, el convertidor reductor-elevador alcanza el valor de 200.2V . En la Tabla 9 se presentan las respuestas del convertidor reductor - elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para el segundo modelo.

3. *Diseño de los controladores del sistema:* El diseño de los controladores del sistema fotovoltaicos con sistema de almacenamiento, para el segundo modelo, se presentan para las etapas de potencia del convertidor elevador DC/DC, convertidor reductor-elevador DC/DC. Mediante la ecuación (37), los valores del inductor y capacitor

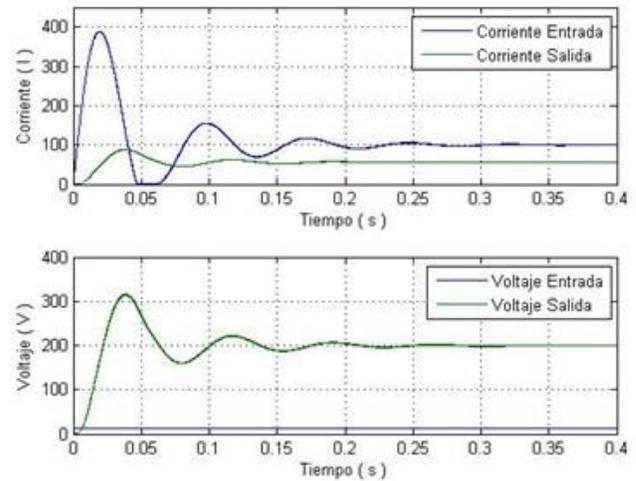


Figura 26. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Etapa Elevación del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo

Tabla 9. Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, segundo modelo

No.	Característica	Tiempo de respuesta (s)	
		Voltaje	Corriente
1	Respuesta de Pico	0.039	0.038
2	Tiempo de Estabilización	0.312	0.324
3	Tiempo de Subida	0.018	0.02
4	Estado Estable	0.484	0.384

Ecuaciones (71) y (72) respectivamente, ciclo de trabajo D , se encuentra la planta del convertidor elevador, expresada en la ecuación (98), se realiza el mismo procedimiento para el convertidor reductor-elevador expresada en la ecuación (99).

$$G_p(s) = \frac{-0.108 s + 80}{3.455 \times 10^{-6} s^2 + 0.00135 s + 1} \quad (98)$$

$$G_p(s) = \frac{-1.929 s + 200}{2.924 \times 10^{-5} s^2 + 0.009143 s + 1} \quad (99)$$

Usando las funciones de transferencia de las ecuaciones (98) y (99), mediante el segundo método de Ziegler-Nichols para la sintonización de controladores [20], se calcula la ganancia crítica K_{cr} , se determinan los valores de K_p y T_i , se reemplaza en ecuación (75), se encuentra el controlador. Las funciones de transferencia del controlador del convertidor elevador y convertidor reductor-elevador se presentan en las ecuaciones (100) y (101) respectivamente.

$$G_c(s) = \frac{0.001622 s + 0.2456}{s} \quad (100)$$

$$G_c(s) = \frac{0.002 s + 0.1041}{s} \quad (101)$$

El diagrama de bloques de la Figura 27 y Figura 28, representan a los sistemas en lazo cerrado de la planta $G_p(s)$ en serie con el controlador PID $G_c(s)$, con realimentación unitaria, del convertidor elevador y convertidor reductor-elevador respectivamente.

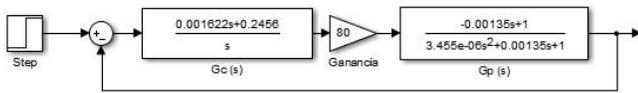


Figura 27. Diagrama de Bloques Controlador PI $G_c(s)$ y Planta $G_p(s)$, para convertidor elevador de 17 V a 200 V

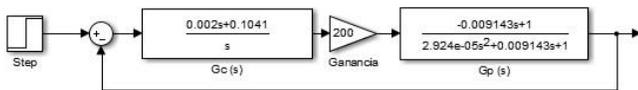


Figura 28. Diagrama de Bloques Controlador PID $G_c(s)$ y Planta $G_p(s)$, convertidor reductor-elevador 12 VDC a 200 VAc

En la Figura 29, se puede observar que frente a las diversas variaciones de radiación solar el controlador estabiliza la señal de voltaje de salida en el convertidor elevador hasta llegar a un valor estable de 200V. En la Tabla 10 se presentan las respuestas del convertidor elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para variación de radiación solar.

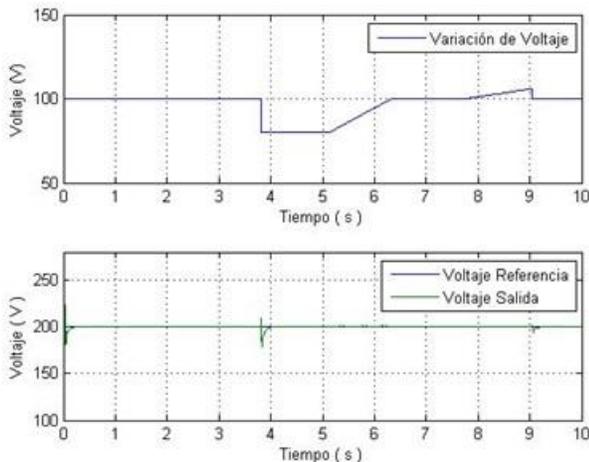


Figura 29. Simulación del Convertidor Elevador, segundo modelo frente variación de radiación solar

Tabla 10. Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, frente variación de radiación

No.	Característica	Tiempo de respuesta (s)
1	Respuesta de Pico	0.026
2	Tiempo de Estabilización	0.0119
3	Tiempo de Subida	0.035
4	Estado Estable	

En la Figura 30, se puede observar que frente a las diversas variaciones de voltaje proveniente del sistema de almacenamiento el controlador estabiliza la señal de voltaje de

salida en el convertidor reductor-elevador hasta llegar a un valor estable de 200V. En la Tabla 11 se presentan las respuestas del convertidor reductor - elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para variación de voltaje.

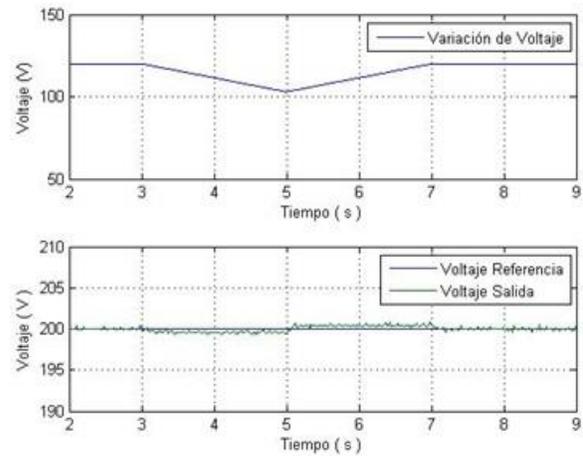


Figura 30. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Elevación, frente variación de voltaje en sistema de almacenamiento

Tabla 11. Características de tiempo de respuesta en convertidor reductor- elevador, frente variación de voltaje

No.	Característica	Tiempo de respuesta (s)
1	Respuesta de Pico	0.00144
2	Tiempo de Estabilización	0.0248
3	Tiempo de Subida	0.000507
4	Estado Estable	0.03

VII. EFICIENCIA

La eficiencia de los dispositivos que conforman cada uno de los sistemas diseñados se calcula a partir del principio de máximo rendimiento, para un circuito sin pérdidas se puede encontrar la eficiencia, mediante las ecuaciones (102) y (103).

$$P_{in} = P_{out} \quad (102)$$

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (103)$$

- Sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento: En la Tabla 12 se muestra los dispositivos que conforman el sistema, cada uno con sus valores de eficiencia. Este sistema tiene una eficiencia del 89.44 %.

Tabla 12. Eficiencia sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

No.	Dispositivo	Potencia Entrada (W)	Potencia Salida (W)	Eficiencia (%)
1	Arreglo de Paneles	No aplica	1375.130	
2	Convertidor Elevador [52Vdc-200Vdc]	1375.130	1327.589	96.54
3	Inversor [200Vdc-120Vac]	1327.589	1230.011	92.65

• Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, primer modelo: En la Tabla 13 se muestra los dispositivos que conforman el sistema, cada uno con sus valores de eficiencia. Este sistema tiene una eficiencia del 85.53%.

Tabla 13. Eficiencia sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, primer modelo.

No.	Dispositivo	Potencia Entrada (W)	Potencia Salida (W)	Eficiencia
1	Arreglo de Paneles	No aplica	659.808	
2	Convertidor Reductor- Elevador [12Vdc-120Vdc]	659.808	624.508	94.65
2	Convertidor Elevador [120Vdc-200Vdc]	624.508	609.145	97.54
3	Inversor [200Vdc-120Vac]	609.145	564.372	92.65

• Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo: En la Tabla 14 se muestra los dispositivos que conforman el sistema, cada uno con sus valores de eficiencia. Este sistema tiene una eficiencia del 86.66%.

Tabla 14. Eficiencia sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo.

No.	Dispositivo	Potencia Entrada (W)	Potencia Salida (W)	Eficiencia
1	Arreglo de Paneles	No aplica	989.712	
2	Convertidor Reductor- Elevador [12Vdc-200Vdc]	No aplica	975.133	
2	Convertidor Elevador [12Vdc-200Vdc]	989.712	925.776	93.54
3	Inversor [200Vdc-120Vac]	925.776	857.73	92.65

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se diseñó dos topologías de sistemas fotovoltaicos sin conexión a la red, los cuales difieren entre sí en la inclusión de un sistema de almacenamiento de energía.

- Se realizó el dimensionamiento de los dispositivos que contiene cada uno de los sistemas fotovoltaicos con y sin sistema de almacenamiento, específicamente para que abastecieran la demanda de energía que consume la cocina de inducción propuesta en el desarrollo del proyecto.
- El diseño realizado referente a los sistemas fotovoltaicos con y sin sistema de almacenamiento, para las etapas de potencia que componen dispositivos como Convertidor Elevador DC/DC, Inversor DC/AC y Filtro y Convertidor Reductor-Elevador DC/DC, satisfacen los parámetros de diseño propuestos, comprobados mediante simulaciones.
- Mediante el desarrollo de los modelos matemáticos de las etapas de potencia de a cada uno de los sistemas fotovoltaicos realizados, se diseñó los controladores de voltaje, los mismos que presentan buen desempeño frente a perturbaciones que se aplicaron en las simulaciones, los controladores estabilizaron al sistema frente a cambios de voltaje producido por el arreglo de paneles fotovoltaicos.
- El sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento presenta limitantes para la generación de energía, porque depende exclusivamente del arreglo de paneles para la generación eléctrica en comparación de los sistemas fotovoltaicos que contienen un sistema de almacenamiento de energía, por lo que se concluye que este sistema es el menos rentable de todos los sistemas presentados.
- La integración de un sistema de almacenamiento basado en baterías al sistema fotovoltaico representa un beneficio al momento de requerir energía a cualquier momento, aun cuando el arreglo de paneles fotovoltaicos no produzcan energía.
- Los resultados obtenidos mediante simulaciones, demuestran que el sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento tiene una eficiencia del 89.44 %, este es el sistema más eficiente en comparación a los dos modelos del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, dentro de estos el segundo modelo presenta una eficiencia del 86.66%. A pesar que el segundo modelo presenta menor eficiencia frente al sistema sin almacenamiento, este modelo representa ser más útil en el caso práctico de realizar una implementación por la disponibilidad de radiación solar a cualquier momento del día.
- Mediante los resultados obtenidos de las simulaciones desarrolladas, se puede determinar el comportamiento de los sistemas fotovoltaicos diseñados, a partir de variaciones de radiación solar y perturbaciones presentadas en las diferentes etapas que conforman cada uno de los sistemas.
- Los sistemas fotovoltaicos diseñados son una alternativa para la generación de energía eléctrica para el uso de la cocina de inducción, mediante el aprovechamiento de energía renovable, por lo que no alteran el medio ambiente como el clima, suelo, flora, fauna, ruido.

- Se recomienda la implementación del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento en su segundo modelo, debido a que representa la mejor opción considerando el costo-beneficio que ofrece este sistema.
 - Los valores obtenidos en el diseño de las etapas de potencia de cada sistema fotovoltaico, son valores teóricos, se recomienda usar valores de componentes aproximados a los calculados en este trabajo para la implementación del sistema sugerido.
 - La etapa de inversión DC-AC diseñada en este proyecto corresponde para un sistema monofásico, se recomienda el diseño de un inversor bifásico para la adaptación de una cocina de inducción que ofertan las casas comerciales en Ecuador y que se encuentren dentro de la potencia que genera el sistema fotovoltaico.
 - En trabajos futuros mediante la implementación del sistema sugerido, se puede realizar la medición de parámetros de calidad de energía AC, los cuales brindaran información para posibles cambios en el diseño de los dispositivos que ayuden a mejorar el rendimiento del sistema.
- [13] D. Hart, *Electronica de Potencia*. Madrid, España: Pearson Educación, S.A, 2001, p. 323.
- [14] R. Teodorescu, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. New Delhi, India, 2011, p. 416.
- [15] A. Pozo, *Convertidores Conmutados de Potencia. Test de Autoevaluación*. Barcelona, España: Marcombo, S.A, 2011, p. 214.
- [16] N. Mohan, *Electrónica de Potencia, Convertidores, aplicaciones y diseño.*, 3rd ed. Monterrey, Mexico: Mc Graw Hill, 2010, pp. 176–191.
- [17] A. Abreu, *Calidad de Potencia Electrica en Redes de Distribucion*. Venezuela, 2005, p. 124.
- [18] Ultracell, “Batería 12V 150Ah Ultracell UCG 150-12 AGM Ciclo Profundo,” 2013. [Online]. Available: <http://www.digishop.cl/index.php?a=851>.
- [19] Izquierdo, “Atlas Solar del Ecuador con fines de Generacion Electrica,” 2008. [Online]. Available: http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf
- [20] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, 5ta ed. España, 2010, p. 570.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Cerrano, *Hacia una matriz energética diversificada en Ecuador*. 2013, p. 42.
- [2] R. Correa, “Plan Nacional para el Buen Vivir 2009 – 2013, Estrategias para el Buen Vivir, Estrategia 7, Cambio de la Matriz Energética.” <http://plan.senplades.gob.ec/estrategia7>, 2013. .
- [3] A. Hermosa, *Electrónica Aplicada*. España: Marcombo, S.A, 2011, p. 69.
- [4] C. Solanski, *Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications*, Second Edi. India: Prentice-Hall, 2011, p. 512.
- [5] J. Valentín, *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. San Sebastian, España: Donostierra, 2012, p. 32.
- [6] M. Pareja, *Energía Solar Fotovoltaica: Calculo de una instalacion aislada*, Second Edi. Barcelona, España: Marcombo, S.A, 2010, p. 200.
- [7] M. Garcia, *Energía Solar Fotovoltaica y Cooperacion al Desarrollo*. Madrid, España: IEPALA Editorial, 1999, p. 62.
- [8] O. Style, *Energía solar autónoma, Oliver style*. EEUU: Paperback, 2012, p. 50.
- [9] M. H. Rasid, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*, Third Edit. Mexico: Pearson Educación, 2004, p. 33.
- [10] L. Prat, *Circuitos y Dispositivos Electrónicos: Fundamentos de Electrónica*. Catalunya, España: Universidad Politécnica de Catalunya, 1999, p. 463.
- [11] G. Garcerá, *Convertidores conmutados: circuitos de potencia y control*. Valencia, España: Camino de Vera, 1998, p. 76.
- [12] S. Ang, *Power-Switching Converters, Second Edition*. EEUU: CRC Press, 2005, p. 18.