

**SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL CONTROL DE UN CONVERTIDOR DC-DC  
PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO.**

**MELISSA ARCILA RESTREPO**

**INSTITUCION UNIVERSITARIA DE ENVIGADO  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
AREA DE INGENIERIA ELECTRONICA  
ENVIGADO  
2013**

**SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL CONTROL DE UN CONVERTIDOR DC-DC  
PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO.**

**MELISSA ARCILA RESTREPO**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico**

**Asesora  
Paula Andrea Ortiz Valencia  
Ingeniera Instrumentación y Control  
Magister Ingeniería área automática**

**INSTITUCION UNIVERSITARIA DE ENVIGADO  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
AREA DE INGENIERIA ELECTRONICA  
ENVIGADO  
2013**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a todas las personas que en su momento pusieron su mano en mi hombro, que me levantaron las millones de veces que caí durante mi carrera. A mis padres Nandito y Gloria, a mi hermana Anita (Guerrera).

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres por no abandonarme nunca, por su apoyo incondicional y por creer en mí, por hacer de mi la mujer que soy.

A mi hermana Ana María por enseñarme que no hay dificultad ni enfermedad que puedan contra un espíritu firme y bondadoso, por su ejemplo de vida y de entrega a su familia.

A la profesora Gladis Betancur, por creer en sus estudiantes y apoyarlos.

A mi asesora Paula Andrea Ortiz, por su comprensión, paciencia y apoyo durante este proceso.

A la señora Consuelo Rave, por su confianza, su apoyo y su cariño.

Profesores y amigos.

## CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	7
LISTA DE FIGURAS .....	8
RESUMEN .....	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCION .....	14
1. PRESENTACION DEL TRABAJO DE GRADO .....	16
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
1.2. OBJETIVOS.....	18
1.2.2. Objetivos específicos: .....	18
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	18
1.4. DISEÑO METODOLÓGICO .....	19
1.5. MODALIDAD DEL TRABAJO DE GRADO .....	19
1.6. PRESUPUESTO .....	20
1.7. IMPACTO Y RESULTADOS ESPERADOS.....	21
1.8. COMPROMISOS Y ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN .....	22
1.9. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	22
2. DEFINICION DE CONCEPTOS BASICOS DE CONVERTIDORES DC/DC , SISTEMAS FOTOVOLTAICOS Y CONTROL DIGITAL .....	23
2.1. ANTECEDENTES .....	23
2.1.1. Control de Seguimiento de tensión de salida de un Convertidor Boost... ..	23
2.1.2. Control de Convertidor DC/DC para carga de Batería en Sistemas fotovoltaicos de Potencia. ....	24
2.1.3. Modelos Mejorados de convertidores DC/DC .....	25
2.2. ENERGÍA SOLAR .....	25
2.2.1. El Sol	
2.2.2. Sistemas Fotovoltaicos .....	31
2.2.3. Celdas fotovoltaicas.....	36
2.2.3.1. Principio de funcionamiento.....	37

2.3.	CONTROL DIGITAL.....	39
2.3.1.	Componentes de un control digital: .....	40
2.4.	CONVERTIDORES DC/DC .....	44
2.4.1.	Convertidor Elevador o <i>Boost</i> .....	46
3.	MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA PANEL-CONVERTIDOR .....	52
3.1.	MODELADO DEL PANEL SOLAR.....	52
3.1.1.	Modelo Eléctrico de una Celda Solar.....	52
3.1.2.	Modelo matemático de una celda solar. ....	55
3.1.3.	Simulación de una celda solar por medio del software Simulink.....	56
3.1.4.	Modelo de un panel fotovoltaico.....	58
3.1.4.1.	Conexión en serie de celdas solares.....	58
3.1.5.	Simulación de un panel fotovoltaico mediante simulink .....	60
3.2.	MODELADO DEL CONVERTIDOR.....	61
4.	DISEÑO DE CONTROLADORES .....	71
4.1.	CONTROLADOR PI .....	71
4.1.1.	Selección de Periodo de Muestreo.....	73
4.1.2.	Discretización de la planta .....	73
4.1.3.	Parámetros del controlador .....	74
4.1.4.	Respuesta del controlador .....	75
5.	EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR OBTENIDO..	79
6.	CONCLUSIONES.....	82
7.	BIBLIOGRAFIA .....	83

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Presupuesto Global del Trabajo de Grado .....	20
<b>Tabla 2.</b> Descripción de Gastos de Personal .....	20
<b>Tabla 3.</b> Descripción de Material y Suministro.....	20
<b>Tabla 4.</b> Descripción de Salidas de Campo.....	21
<b>Tabla 5.</b> Descripción de Equipos .....	21
<b>Tabla 6</b> Tabla de Actividades .....	22
<b>Tabla 7</b> Características físicas del sol. ....	28
<b>Tabla 8</b> Error de estado Estable .....	72

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de Gantt .....	23
Figura 2 Espectro Solar .....	28
Figura 3 Tipos de Radiación .....	29
Figura 4 Dispersión de Rayos Solares.....	30
Figura 5 Componentes de un Sistema Fotovoltaico .....	32
Figura 6 Sistema Conectado a la Red .....	33
Figura 7 Central Hoya de los Vicentes, España.....	34
Figura 8 Estación Repetidora alimentada con paneles solares .....	35
Figura 9 Estación Solar de bombeo de agua .....	35
Figura 10 Equipos médicos con paneles solares.....	36
Figura 11 Satélites Solares.....	36
Figura 12 Efecto Fotoeléctrico .....	38
Figura 13 Funcionamiento de una celda solar .....	38
Figura 14 Diagrama de bloques Sistema de Control Análogo .....	39
Figura 15 Diagrama de Bloques Sistema de Control Digital .....	39
Figura 16 Símbolo Acción Proporcional.....	41
Figura 17 Símbolo de la Acción Integral .....	42
Figura 18 Símbolo de la acción Derivativa.....	42
Figura 19 Acción PI Ante un escalón unitario .....	43
Figura 20 Controlador PID .....	44
Figura 21 Conversor DC/DC .....	45
Figura 22 Circuito básico de un Convertidor DC/DC.....	45
Figura 23 Forma de Onda.....	46
Figura 24 Cuadripolo que representa un Convertidor DC/DC.....	46
Figura 25 Convertidor <i>Boost</i> Ideal .....	47
Figura 26 Conducción Continua.....	48
Figura 27 Formas de onda CC.....	48
Figura 28 Formas de onda CD.....	50
Figura 29 Modelo ideal de una celda solar .....	52
Figura 30 modelo real de una celda solar.....	53
Figura 31 Curva I-V de una celda solar .....	54
Figura 32 Efecto de la radiación solar sobre la potencia y la corriente .....	<b>¡Error!</b>
<b>Marcador no definido.</b>	
Figura 33 Circuito equivalente a una celda solar con resistencia de carga .....	55
Figura 34 Celda solar de Simulink .....	56
Figura 35 Estructura interna de la celda solar de Simulink .....	57



Figura 36 Bloque de parametrización Solar Cell.....	57
Figura 37 Bloque de parametrización de la temperatura Solar Cell.....	58
Figura 38 Conexión en serie de celdas solares en Simulink.....	58
Figura 39 Conexión en paralelo de celdas solares en Simulink.....	59
Figura 40 Bloque final del panel fotovoltaico .....	61
Figura 41 Resultado de la simulación del panel fotovoltaico .....	61
Figura 42 Boost Ideal Voltajes y Corrientes.....	62
Figura 43 Modelos .....	62
Figura 44 Circuito <i>Boost</i> con valores .....	69
Figura 45 Diagrama de Bloques Simulink del Sistema .....	75
Figura 46 Tiempo de Levantamiento .....	76
Figura 47 Tiempo de establecimiento .....	76
Figura 48 Error de Estado Estable.....	77
Figura 49 Respuesta con Variación en el Voltaje del Panel .....	78
Figura 50 Diagrama de Bode.....	78
Figura 51 Irradiancia a lo largo del día.....	79
Figura 52 Voltaje Vs Hora del Día.....	80
Figura 53 Valores de Simulación de la Irradiancia.....	81

## GLOSARIO

**Carga:** Elemento que exige un consumo de potencia en un circuito.

**Controlador:** Componente de un sistema de control que detecta desvíos existentes entre el valor medido por un sensor y el *Set Point*, emitiendo una señal de corrección hacia un actuador encargado de corregir.

**Convertor:** o inversores, son equipos que transforman la tensión continua en la entrada, bien sea a continua de otra magnitud o a alterna, según se requiera.

**Corriente:** es el flujo de electrones a través de un conductor entre 2 terminales.

**Duty Cycle:** es el porcentaje de tiempo que un tren de pulso permanece activado con respecto a tiempo que permanece inactivo.

**Efecto Fotoeléctrico:** es la propiedad que poseen ciertos materiales para emitir electrones a partir de la radiación electromagnética que incide sobre el material.

**Efecto fotovoltaico:** transformación de energía lumínica en energía eléctrica por medio del efecto fotoeléctrico.

**Efecto Mismatch:** Pérdidas causadas por la interconexión de células solares, debido a que las propiedades varían de unas a otras, y a que tienen condiciones de trabajo diferentes

**Energía Solar:** energía radiante del sol, que llega a la tierra.

**Fotón:** partícula encargada de transportar radiación electromagnética.

**MatLab:** lenguaje de alto nivel diseñado específicamente para realizar computación numérica, visualización y programación en un entorno dinámico e interactivo.

**Modelo matemático:** Es una descripción, en lenguaje matemático de un objeto que existe en universo no matemático.

**MosFet:** es un transistor de efecto de campo metal-oxido-semiconductor, cuyas características lo hacen especial para aplicaciones de conmutación a altas frecuencias

**Panel Fotovoltaico:** es un conjunto de células fotovoltaicas que producen electricidad al entrar en contacto con la luz solar.

**Perturbación:** variables que afectan el comportamiento de un sistema alterando las variables controladas.

**Potencia:** es la magnitud que relaciona la energía que fluye por unidad de tiempo por un semiconductor.

**Radiación Solar:** es la radiación electromagnética emitida por el sol debido a la fusión nuclear que ocurre en el interior del mismo.

**Selenio:** elemento químico, su símbolo Se, se encuentra de forma abundante en la corteza terrestre, con amplia gama de aplicaciones, desde la fabricación de vidrios, pasando por tratamientos médicos (SIDA), hasta la fabricación de productos cosméticos.

**Silicio:** metaloide de número atómico 14, es el segundo elemento más abundante sobre la corteza terrestre, sus aplicaciones son variadas, en el campo electrónico es muy utilizado debido a las propiedades semiconductoras.

**Sistema:** combinación de componentes que actúan conjuntamente para cumplir un objetivo determinado.

**Voltaje:** diferencia de potencial en los extremos de un elemento o un generador eléctrico.

## RESUMEN

En el presente trabajo de grado se realiza la modelación de un convertidor de corriente directa a corriente directa del tipo elevador, para el cual se toma su esquema básico, considerando los componentes ideales, sin pérdidas. El modelado se hace por medio de variables de estado de donde se obtiene la función de transferencia que relaciona la salida con la señal de control que gobierna el modulador por ancho de pulso.

A partir de la función de transferencia obtenida se diseña un controlador Proporcional-Integral. Se presenta también la simulación de un sistema conformado por un panel solar de 72 celdas, el convertidor, la carga y el controlador, por medio del complemento de MatLab Simulink, donde se realizan cambios en los parámetros equivalentes a la radiación solar y a los cambios en la carga.

## **ABSTRACT**

The present Works presents the modeling of a boost current converter from direct to direct current, for modeling process a basic scheme is consider using ideal components, its means with no losses. The model its obtain by the state variables method, where a transfer function, that relate system's output whit the output control signal that governs the pulse width modulator.

From the transfer function a Proportional \_ Integral. It also presents the simulation of a system consisting of a 72 cells solar panel, the converter, the load and controller, through the addition of MatLab Simulink, where changes are made to the parameters equivalent to sunlight and changes in load.

## INTRODUCCION

En el siglo XIX el 95 % de la energía primaria consumida en el mundo provenía de fuentes renovables, pero, las estadísticas cambiaron notablemente en el transcurso de un siglo, durante el siglo XX se redujo hasta el 38 % y a principios del presente siglo se calcula que solo un 16 % de la energía que abaste a diario hogares de todo el mundo proviene de una fuente inagotable de energía. Sin embargo, la mentalidad tanto de gobiernos como de ciudadanos ha venido cambiando en las últimas décadas, y este cambio se ve reflejado en la inversión monetaria que a nivel mundial, que en el año 2004 alcanzaba los 22.000 millones de dólares estadounidenses, y para el 2010 alcanzó los 221.000 millones USD. Los esfuerzos mundiales se hacen notar desde el ámbito político también, por medio de políticas de apoyo a la investigación y de la implementación de sanciones a quienes no se acogiesen.<sup>1</sup>

El cambio ha hecho impacto también en la mentalidad de los individuos, y se hace cada vez más común ver en zonas residenciales, viviendas en las que se ha incorporado sistemas de alimentación basados en paneles solares, que permiten el aprovechamiento del efecto fotovoltaico (propiedad de algunos materiales de generar energía eléctrica a partir de la radiación solar incidente).

El inconveniente presentado por la utilización de energía solar radica en que la radiación solar no es constante, varía a lo largo de día alcanzando su valor máximo a las 12 meridiano, y durante la noche es mínima, lo cual genera que el voltaje entregado por los paneles no sea invariable, por lo tanto, es necesario adicionar etapas intermedias entre el panel y la carga, con el fin de acondicionar el voltaje y la corriente, de forma que sean óptimos. Entre estas etapas se encuentran convertidores DC-DC, inversores, y protecciones.

El propósito de este trabajo de grado consistió en determinar la viabilidad mediante simulaciones del control de un convertidor DC-DC de un sistema de panel fotovoltaicos. Se seleccionó este tema debido a que, uno de los factores que influyen en la lenta apertura en el mercado de la energía solar, son los costos, y al

---

<sup>1</sup> ANNUAL ENERGY OUTLOOK 2012 U.S. WITH PROJECTIONS TO 2035 (3: Junio, 2012: Washington, EE.UU) Memorias Energy Information Administration (EIA). 252 p.

diseñar un controlador que no requiera un esfuerzo computacional elevado, se hace más accesible.

En el primer capítulo se hace una presentación formal del trabajo de grado exponiendo los objetivos planteados y la metodología a seguir para alcanzarlos. En el segundo capítulo se hace una breve explicación de la teoría en la que se basa el funcionamiento de los sistemas y controladores utilizados a lo largo del desarrollo matemático. En el tercer capítulo se realiza el modelamiento de los sistemas involucrados en el trabajo de grado. El cuarto capítulo se dedica específicamente al diseño de los controladores y el desarrollo matemático que ello implica. El quinto capítulo se realiza las simulaciones y se presentan los resultados obtenidos. Por último en el sexto capítulo se exponen las conclusiones.

# 1. PRESENTACION DEL TRABAJO DE GRADO

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

**1.1.1. Definición del problema:** Según el informe "2013 World Energy Issues Monitor" publicado en el presente año por el World Energy Council se espera que la demanda mundial de energía se habrá duplicado para el 2050, como consecuencia del inevitable crecimiento de la población mundial, la economía global, la urbanización continua, así como la demanda resultante del aumento de la movilidad y otros servicios energéticos dependientes. Lo cual hace estrictamente necesario reducir a la mitad las emisiones de gases de invernadero, para mantener el aumento de la temperatura global por debajo de 2 grados centígrados. Lo cual se dificultará si se continúa con los métodos de generación tradicionales, como por ejemplo el carbón, cuya extracción, almacenamiento y utilización generan grandes emisiones de CO<sub>2</sub>, que están acabando con el planeta.<sup>2</sup>

El impacto ambiental que genera la producción de energía por métodos tradicionales, y la inevitable necesidad de la misma, han generado que se convierta en un tema de alta prioridad para los intereses políticos de muchos países como Japón, Rusia y Alemania, convirtiéndose en prioridad para primeros ministros y presidentes. Es por esta razón que la mirada de los líderes mundiales se ha ido dirigiendo cada vez hacia la producción de energía por medio renovables no convencionales, dentro de los que se encuentran la hidráulica, eólica, geotérmica, biomasa y solar.<sup>3</sup>

Los recursos renovables representan una fuente de energía inagotable, lo que los hace competitivos frente a los recursos no renovables, por ejemplo, la energía solar fotovoltaica se ha convertido en una alternativa, que basada en una inversión inicial elevada, permite una recuperación de costos a largo plazo, con el valor

---

<sup>2</sup> 2013 WORLD ENERGY ISSUES MONITOR, (3: Junio, 2013: Londres, Reino Unido). Memorias Consejo Mundial de Energía. 40 p.

<sup>3</sup> GENERAR UN NUEVO IMPULSO, (2: junio, 2008: Londres, Reino Unido). Memorias Consejo Mundial de la Energía, 58p.



agregado del bajo impacto ambiental, pues los paneles solares encargados de convertir la luz solar en energía eléctrica, se fabrican a base de silicio, que es muy abundante, no siendo necesario explotar yacimientos de forma intensiva.

Las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica cubren una amplia gama de posibilidades tales como; viviendas alejadas de la red eléctrica convencional, (básicamente electrificación rural), iluminación de espacios públicos mediante lámparas autónomas, calles, monumentos, refugios de montaña, alumbrado de vallas publicitarias. Con la alimentación fotovoltaica de luminarias se evita la realización de zanjas, canalizaciones, necesidad de adquirir derechos de paso, conexión a red eléctrica; aplicaciones agrícolas y de ganado: bombeo de agua, sistemas de riego, iluminación de invernaderos y granjas, suministro a sistemas de ordeño, refrigeración, depuración de aguas; señalización y comunicaciones: navegación aérea (señales de altura, señalización de pistas) y marítima (faros, boyas), señalización de carreteras, vías de ferrocarril, repetidores y reemisores de radio y televisión y telefonía, cabinas telefónicas aisladas con recepción a través de satélite o de repetidores, sistemas remotos de control y medida, estaciones de tomas de datos, equipos sismológicos, estaciones meteorológicas, dispositivos de señalización y alarma.

Los recursos renovables no convencionales, como ya se ha mencionado, poseen propiedades intrínsecas que los convierten en fuentes alternativas de energía muy competitivas, siempre y cuando se desarrollen constantemente nuevas y mejores técnicas de optimización y aprovechamiento energético de las mismas.

En el caso específico de las células fotovoltaicas se hace necesaria la utilización de convertidores DC-DC, debido a las fluctuaciones en el voltaje de entrada, que varía según la cantidad de rayos solares aplicados al panel. Para garantizar un voltaje de salida estable, se debe controlar el ancho de los pulsos y la duración del mismo en determinado estado, de la señal que ejerce el mando sobre el elemento final de control, que para el caso del convertidor es el interruptor principal. De la

efectividad del control para mantener el convertidor trabajando en su punto de máxima potencia depende la eficacia del mismo.<sup>4</sup>

## 1.2. OBJETIVOS

**1.2.1. Objetivo General:** Simular y evaluar el control de un convertidor dc-dc para un sistema fotovoltaico

**1.2.2. Objetivos específicos:**

- Obtener el modelo matemático del sistema panel-convertidor-carga que describa su funcionamiento.
- Diseñar y evaluar un control que permita maximizar el tiempo durante el cual el convertidor DC/DC entrega una salida constante equivalente a un Set-Point determinado

## 1.3. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con las mejores estimaciones, las grandes inversiones en la infraestructura energética (22 trillones de dólares) se llevarán a cabo hasta el año 2030 para satisfacer la demanda energética global. Alrededor de la mitad de estas inversiones corresponderán al sector eléctrico, en su mayoría en los países desarrollados, que en el año 2030 alcanzarán aproximadamente el 80% de la capacidad de generación global instalada. Una cuarta parte corresponderá al sector petrolífero, principalmente en la exploración y en el desarrollo y la otra cuarta parte en el sector del gas, haciendo hincapié en el “*upstream*” y el GNL.<sup>5</sup>

En los países desarrollados, las grandes inversiones son necesarias para renovar y modernizar la infraestructura energética existente. Las economías con rápido crecimiento en África, América Latina y el Sur de Asia, se centrarán en el abastecimiento de nueva energía y en infraestructura para sostener su desarrollo.

La eficiencia energética debe convertirse en prioridad global en términos de producción y consumo. La conservación energética, también deberá poner en

---

<sup>4</sup> José Manuel Aranda Honrado, Convertidor DC/DC para carga de batería con seguimiento de punto de carga óptimo para panel solar.

<sup>5</sup> Consejo Mundial de la Energía, "Generar un Nuevo Impulso," Londres, Reino Unido, 2008

evidencia las posibles estrategias para incrementar el suministro energético disponible. Más del 50% de la energía total demandada en 2050 deberá conseguirse mediante el desarrollo de alternativas ambientalmente aceptables. Tras el análisis de los resultados de las proyecciones a futuro, se evidencia la necesidad de enfocar proyectos de investigación que busquen generar nueva tecnología, orientada a optimizar la extracción y distribución de la energía generada de forma limpia.<sup>6</sup>

## **1.4. DISEÑO METODOLÓGICO**

**1.4.1. Etapa de modelación:** en esta etapa se desarrollaran fundamentalmente 3 actividades:

- Obtención de ecuaciones que modelen matemáticamente el sistema.
- Validación de las ecuaciones obtenidas por medio del software MatLab
- Análisis de los resultados obtenidos en la simulación.

**1.4.2. Etapa de Diseño de Controladores:** en esta etapa se desarrollaran 3 actividades que se muestran a continuación:

- Obtención de la ley que gobernará al controlador, por medio de la aplicación de la teoría de control digital.
- Validación de la ley de control, a partir del análisis de la respuesta obtenida al simular perturbaciones inducidas al sistema
- Determinar la viabilidad del control diseñado

## **1.5. MODALIDAD DEL TRABAJO DE GRADO**

Este trabajo se realizó con un enfoque cuantitativo debido a que busca optimizar el rendimiento de un sistema fotovoltaico, compuesto por un panel solar y un convertor DC/DC, por medio de técnicas de control digital que actúan directamente sobre el ciclo de trabajo del elemento conmutador del convertor.

---

<sup>6</sup> GENERAR UN NUEVO IMPULSO, (2: junio, 2008: Londres, Reino Unido).Memorias Consejo Mundial de la Energía, 58p.

## 1.6. PRESUPUESTO

**Tabla 1 Presupuesto Global del Trabajo de Grado**

<b>PRESUPUESTO GLOBAL DEL TRABAJO DE GRADO</b>				
<b>RUBROS</b>	<b>FUENTES</b>			<b>TOTAL</b>
	<b>Estudiante</b>	<b>Institución - IUE</b>	<b>Externa</b>	
<b>Personal</b>	\$5'760.000	\$960.000	\$0.00	\$6'720.000
<b>Material y suministro</b>	\$160.000	\$0.00	\$0.00	\$160.000
<b>Salidas de campo</b>	\$120.000	\$0.00	\$0.00	\$120.000
<b>Bibliografía</b>	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Equipos</b>	\$1'400.000	\$0.00	\$0.00	\$1'400.000
<b>Software (Matlab)</b>	\$0.00	\$12'000.000	\$0.00	\$12'000.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$7'440.000</b>	<b>\$12'960,000</b>	<b>\$0.00</b>	<b>\$20'400.000</b>

**Tabla 2. Descripción de Gastos de Personal**

<b>DESCRIPCIÓN DE LOS GASTOS DE PERSONAL</b>						
<b>Nombre del Investigador</b>	<b>Función en el proyecto</b>	<b>Dedicación h/semana</b>	<b>Costo</b>			<b>Total</b>
			<b>Estudiante</b>	<b>Institución - IUE</b>	<b>Externa</b>	
<b>Melissa Arcila Restrepo</b>	Desarrolladores	18	\$20.000	\$0.00	\$0.00	\$5'760.000
<b>Paula Andrea Ortiz Valencia</b>	Asesor	2	\$0.00	\$30.000	\$0.00	\$960.000
<b>TOTAL</b>			<b>\$40.000</b>	<b>\$30.000</b>	<b>\$0.00</b>	<b>\$6'720.000</b>

**Tabla 3. Descripción de Material y Suministro**

<b>DESCRIPCIÓN DE MATERIAL Y SUMINISTRO</b>				
<b>Descripción de tipo de Material y/o suministro</b>	<b>Costo</b>			<b>Total</b>
	<b>Estudiante</b>	<b>Institución - IUE</b>	<b>Externa</b>	
Papelería	\$80.000	\$0.00	\$0.00	\$80.000
Tinta	\$80.000	\$0.00	\$0.00	\$80.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$160.000</b>	<b>\$0.00</b>	<b>\$0.00</b>	<b>\$160.000</b>

**Tabla 4. Descripción de Salidas de Campo**

<b>DESCRIPCIÓN DE SALIDAS DE CAMPO</b>				
<b>Descripción de las salidas</b>	<b>Costo</b>			<b>Total</b>
	<b>Estudiante</b>	<b>Institución - IUE</b>	<b>Externa</b>	
Asesorías de control	\$80.000	\$0.00	\$0.00	\$80.000
Visitas al ITM	\$40.000	\$0.00	\$0.00	\$40.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$120.000</b>	<b>\$0.00</b>	<b>\$0.00</b>	<b>\$120.000</b>

**Tabla 5. Descripción de Equipos**

<b>DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS</b>				
<b>Descripción de compra de equipos</b>	<b>Costo</b>			<b>Total</b>
	<b>Estudiante</b>	<b>Institución - IUE</b>	<b>Externa</b>	
Computador portátil	\$1'100.000	\$0.00	\$0.00	\$1'100.000
Calculadora TI 89t	\$300.000	\$0.00	\$0.00	\$300.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$1'400.000</b>	<b>\$0.00</b>	<b>\$0.00</b>	<b>\$1'400.000</b>

### **1.7. IMPACTO Y RESULTADOS ESPERADOS**

La creciente demanda de sistemas de generación de energía limpia genera la necesidad de optimizar el funcionamiento de estos sistemas con miras a aumentar su uso y comercialización.

Se espera realizar una comparación entre diferentes tipos de controladores, identificando aquel que genere la respuesta más adecuada para el propósito de mantener un voltaje constante, sin importar las perturbaciones generadas por los cambios climáticos o por los cambios en la carga a la cual se dese aplicar este voltaje.

















Una vez alcanzados los objetivos que se plantean en este trabajo, el controlador identificado como el más conveniente, podrá, en un futuro, ser implementado de forma física.

## 1.8. COMPROMISOS Y ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN

El modelado de los sistemas y el diseño de los controladores quedaran documentados en el presente trabajo, así como los archivos de simulación serán entregados a la biblioteca Jorge Franco Vélez de la Institución Universitaria de Envigado, en formato digital. Así mismo, se entregara un artículo en el cual se presenta el desarrollo de la investigación.

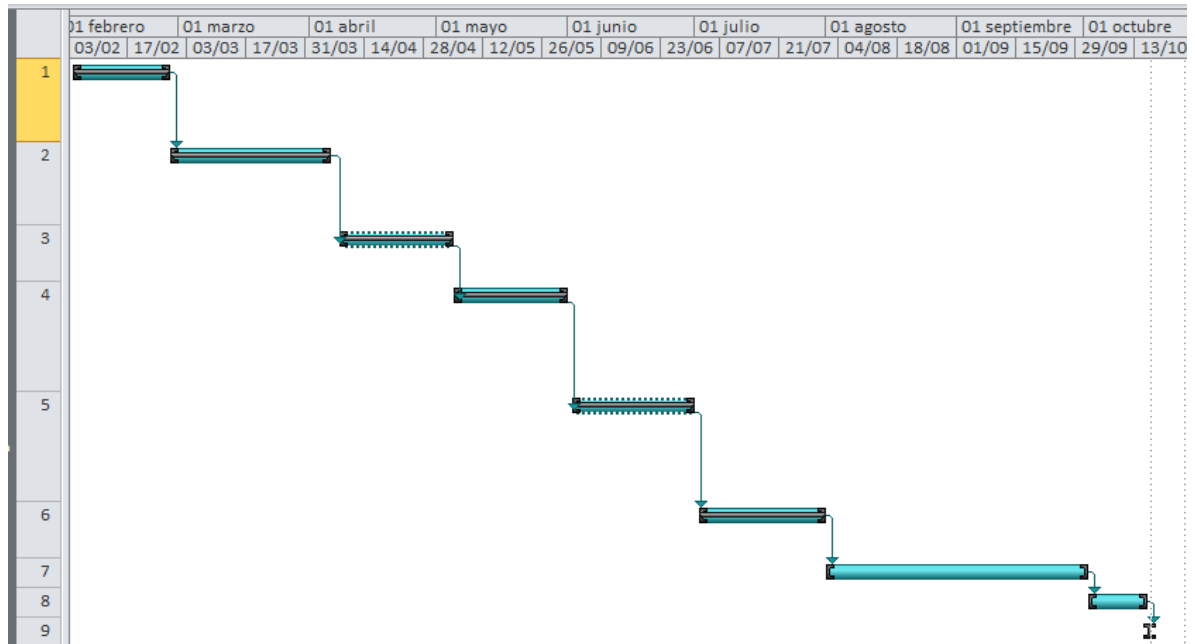
## 1.9. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

**Tabla 6** Tabla de Actividades

		Modo de	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
1			Obtencion de las ecuaciones que modelen matematicamente el sistema	8160 mins	lun 04/02/13	mar 26/02/13	
2			Validación de las ecuaciones obtenidas por medio del software MatLab.	13440 mins	mié 27/02/13	vie 05/04/13	1
3			Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la simulación.	21 días	lun 08/04/13	<u>sáb 04/05/13</u>	2
4			Obtención de la ley que gobernara al controlador, por medio de la aplicación de la teoría de control digital.	21 días	dom 05/05/13	<u>vie 31/05/13</u>	3
5			Validación de la ley de control, a partir del análisis de la respuesta obtenida al simular perturbaciones inducidas al sistema.	22 días	dom 02/06/13	<u>dom 30/06/13</u>	4
6			Determinar la viabilidad del control diseñado.	22 días	mar 02/07/13	mié 31/07/13	5
7			Entrega para correcciones	44 días	jue 01/08/13	mar 01/10/13	6
8			realizar correcciones	10 días	mié 02/10/13	mar 15/10/13	7
9			Sustentacion	1 día	mié 16/10/13	mié 16/10/13	8

**Fuente:** propia

**Figura 1 Diagrama de Gantt**



**Fuente:** Propia

## **2. DEFINICION DE CONCEPTOS BASICOS DE CONVERTIDORES DC/DC , SISTEMAS FOTOVOLTAICOS Y CONTROL DIGITAL**

### **2.1. ANTECEDENTES**

#### **2.1.1. Control de Seguimiento de tensión de salida de un Convertidor Boost**

Trabajo realizado por: Hugo Rodríguez Cortés, Miguel Francisco Escalante y Marco Tulio Mata-Jiménez

Los autores presentan el sistema de control para un convertidor DC/DC de topología Elevador, cuyo objetivo es mantener el voltaje entregado a la carga igual a una consigna preestablecida, sin que el diseño del controlador dependa de los parámetros del convertidor ni del ciclo de trabajo del elemento de conmutación. Proponen entonces, seguir el voltaje de referencia por medio de la linealización por retroalimentación y un control indirecto de la dinámica cero del sistema, para lo cual se demuestra que el convertidor Boost presenta dinámica cero estable,

propiedad que permite que el voltaje de salida sea controlado de forma indirecta por medio de la regulación de la corriente que circula a través de la bobina.

Se demuestra que la referencia de corriente de la bobina se puede generar directamente de la consigna o *set-point* establecido.

Se presentan los resultados gráficos obtenidos de la simulación, que se realizó por medio de un enlace entre SimuLink y Psim, en las cuales se observa un buen comportamiento del controlador, con tiempo de establecimiento muy bajo, se observa también un sobrepico inicial, que no supera los 3 voltios por encima del *set-point*.<sup>7</sup>

### **2.1.2. Control de Convertidor DC/DC para carga de Batería en Sistemas fotovoltaicos de Potencia.**

Trabajo realizado por: J.A. Ravelo, A. B. Rey y S. Lorenzo

En este trabajo los autores presentan el control para un convertidor DC/DC que será interconectado con una batería; debido a que la batería es equivalente a una carga variable, es necesario diseñar un sistema de control que identifique el punto de trabajo del generador para los diferentes estados de carga que presenta la batería.

Para cumplir con el objetivo los autores desarrollan un algoritmo de control que actúa de forma directa sobre un convertidor DC/DC tipo *Boost*, que en este caso se considera ideal (sin pérdidas), el algoritmo de control propuesto está conformado por 3 lazos, encargados de variar la corriente de referencia, la cual es una función del estado de carga de la batería, cuando la batería se encuentra en un estado de carga del 0 %, la corriente de referencia toma su máximo valor, y cuando está en el 100 % la corriente de referencia toma su valor mínimo, con el fin de producir una corriente de mantenimiento.

El control propuesto por los autores presenta dos inconvenientes importantes; por el desarrollo del algoritmo es posible que fuerce al convertidor a trabajar en modo de conducción discontinua. Y que bajo condiciones de poca radiación solar no sea

---

<sup>7</sup> RODRÍGUEZ CORTÉS, Hugo. Et al. Control de Seguimiento de la tensión de salida de un convertidos Boost. Trabajo de grado. Ingeniero Eléctrico. Universidad Autonoma de Nuevo León. Nuevo León, México.



capaz de entregar la corriente máxima. Sin embargo, bajo condiciones ideales el sistema trabaja de forma eficiente.<sup>8</sup>

### **2.1.3. Modelos Mejorados de convertidores DC/DC**

Trabajo realizado por: Bengt johansson

En este trabajo el autor hace énfasis en la influencia que tiene el modelo de los convertidores a la hora de diseñar un controlador, especialmente si se busca diseñar un control adaptativo.

Con el objetivo de generar un modelo que describa de forma fiable el comportamiento del convertidor, se tienen en cuenta parámetros como la carga, debido a que es sin duda, el componente cuyo valor presenta más variaciones, así como las pérdidas en cada uno de los elementos.

Teniendo en cuenta las características mencionadas anteriormente, se genera una función de transferencia Control a Salida para cada topología, por medio de un modelo promediado de espacios de estado.

El autor emplea los modelos obtenidos para diseñar controladores en modo de corriente, es decir, modificando la corriente de la bobina para obtener una corriente de salida específica, cuya simulaciones compara con la de los modelos tradicionales que no incluyen pérdidas, las gráficas generadas en SimuLink muestran la eficiencia del modelo y del control propuesto.

## **2.2. ENERGÍA SOLAR**

La Energía solar se define como la energía radiante del sol, que llega a la tierra, cuyas ventajas radican en su naturaleza, debido a que el sol es una fuente inagotable de radiación, que produce energía limpia. En contraparte, este tipo de energía tiene la desventaja de no ser constante pues su disponibilidad presenta

---

<sup>8</sup> RAVELO J.A. et al. Control de Convertidor DC/DC para carga de Batería en Sistemas fotovoltaicos de Potencia. Trabajo de Grado. Tecnólogo en electrónica. Universidad de Valladolid, Departamento de Tecnología en electrónica. Valladolid, España.

intermitencias periódicas, por lo que se hace necesario su transformación en energía eléctrica para almacenarla y redistribuirla.

La evolución de este tipo de energía comienza con el descubrimiento del efecto fotovoltaico en 1838 por parte de Alexandre Edmond Becquerel, quien notó un aumento de la corriente cuando exponía al sol uno de los electrodos de platino de una pila electrolítica, sentando así un precedente para que más adelante Willoughby Smith (1873) mediante diferentes experimentos comprobó que el selenio tenía propiedades que lo hacen sensible a la luz solar. En 1877, solo 4 años después, Richard Evans y su profesor de Filosofía natural en King College de Londres crearon la primera celda fotovoltaica de Selenio. Durante las 7 décadas siguientes se consideró el Selenio como el elemento sólido con las mejores propiedades fotovoltaicas, y aun así la energía obtenida de este era mínima, haciendo inviable las aplicaciones prácticas del mismo. Fue solo hasta 1953 cuando de forma accidental, Gerald Person, creó una célula fotovoltaica basada en silicio, cuyo rendimiento superaba el de la fabricada por Evans. A partir de este modelo, científicos de *Bell Laboratories* obtuvieron células que pudieran ser útiles en aplicaciones prácticas, no obstante, su costo de fabricación seguía siendo exageradamente alto, en comparación a las centrales energéticas convencionales.

Pero el costo de fabricación no fue un factor limitante para que se introdujera esta tecnología en los desarrollos de la industria espacial, donde la energía solar fotovoltaica no tenía competencia, por su flexibilidad para trabajar en ambientes hostiles y espacios reducidos. Convirtiéndose en la fuente de alimentación perfecta para satélites espaciales debido a que estos sistemas pueden funcionar durante muchos años sin requerir mantenimiento.<sup>9</sup>

El impulso dado a este tipo de energía por parte de las agencias espaciales en diferentes países permitió avances notorios, aumentando la eficiencia y reduciendo costos, haciendo que el uso de los paneles solares resultara económicamente viable en zonas sin acceso a la red eléctrica, donde resultaba más rentable instalar células fotovoltaicas que trazar líneas de cableado eléctrico o mantener bancos de baterías.

El siglo XX trajo consigo inversión en la investigación que ha permitido fabricar celdas solares sobre películas flexibles de bajo costo y rendimiento de hasta 20%.

---

<sup>9</sup> AMOROCHO CORTÉS, Enrique y OLIVEROS VILLAMIZAR, Germán. Apuntes Sobre Energía y Recursos Energéticos. 1 ed. Bucaramanga. Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB, 2000. ISBN 9589682111

Otro factor decisivo para el éxito de la energía solar fotovoltaica además de la inversión, ha sido la conciencia ambiental sobre la necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. En 2008 la Unión Europea aprobó una normatividad (20-20-20) en la que se hace énfasis en la obligación que tendrán los países de esta zona de reducir en un 20% las emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2020, es decir, el 20% de la energía en esta región deberá provenir de fuentes renovables.

**2.2.1. El Sol:** es la estrella más cercana a la tierra, se encuentra a una distancia de 149.6 millones de kilómetros, esta distancia es conocida como Unidad Astronómica (UA), es utilizada como referencia para la medida de distancias en todo el sistema solar.

El sol es una esfera en su mayoría conformada por gas ionizado, y está dividido en 6 regiones; el núcleo, zona radioactiva, zona convectiva interior, fotosfera (superficie visible), cromosfera, y la región ultra periférica llamada la corona.

En el núcleo la temperatura es aproximadamente de 15 millones de grados Celsius (Aprox. 27 millones de grados Fahrenheit), una temperatura suficiente para provocar fusiones termonucleares. La energía generada en el núcleo produce el calor y la luz recibida en la tierra, y es llevada al exterior en forma de radiación que rebota en la zona radioactiva durante 170.000 años para luego pasar a la zona convectiva, en este proceso la temperatura cae por debajo de los 3.5 millones de grados Fahrenheit, debido a los movimientos de las burbujas de plasma caliente (conocida como sopa de átomos ionizados), a este fenómeno debe esta zona su nombre, el calor se transmite por convección a la superficie.

La fotosfera es una región de 500 kilómetros de espesor, de la cual se escapa la mayor parte de radiación hacia el exterior y la luz que se observa en la tierra 8 minutos después de salir del sol. La temperatura en la fotosfera es de aproximadamente 10.000 grados Fahrenheit, y por encima de esta la temperatura aumenta con la altitud alcanzando hasta 3.5 millones de grados F, este fenómeno es un misterio para los científicos, pero se hacen estudios enfocados al estudio del campo magnético en esta zona, que podría ser el responsable del aumento de la temperatura.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION NASA. [Online][Citado 14 de Agosto 2001] Sitio Web Oficial de la NASA. Disponible: <[http://www.nasa.gov/pdf/62227main\\_Sun\\_Lithograph.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/62227main_Sun_Lithograph.pdf)>

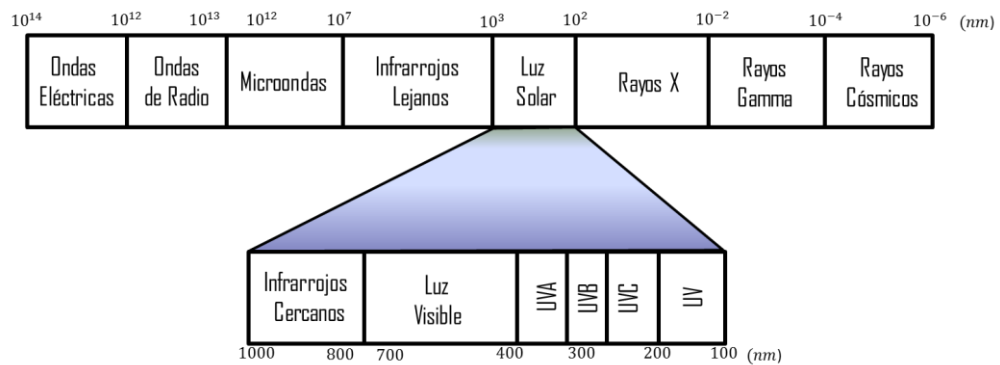
**Tabla 7 Características físicas del sol.**

Tipo espectral de Estrella	G2V
Edad	4.6 millones de años
Distancia Promedio de la tierra	149.6 millones de kilómetros
Periodo de rotación (Ecuador)	26.8 días
Periodo de rotación (Polos)	36 días
Radio ecuatorial	695.500 Km
Masa	$1.989 \times 10^{30}$ Kg
Densidad	1.409g/cm <sup>3</sup>
Composición	92.1% Hidrogeno, 7.8% Helio, 0.1% Otros
Luminosidad	$3.83 \times 10^{33}$ ergs/seg

**Fuente:** National Aeronautics and Space Administration NASA. (2001, Agosto) Sitio Web Oficial de la NASA. [Online]. [http://www.nasa.gov/pdf/62227main\\_Sun\\_Lithograph.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/62227main_Sun_Lithograph.pdf)

La radiación que emite el sol hacia la tierra, es la transferencia de energía por medio de ondas electromagnéticas que no necesitan un medio para propagarse, sino que atraviesan el espacio a una velocidad de 299.792 Km/s, estas ondas electromagnéticas pueden tener diferentes longitudes de onda, y se resumen por sus características en el espectro solar, como se observa en la **Figura 2**.

**Figura 2 Espectro Solar**



**Fuente:** propia

La energía emitida por el sol en forma de radiación térmica, tiene una potencia emisiva hemisférica, es decir, el flujo energético por unidad de tiempo y de área  $E[W/m^2]$ , igual al producto de la cuarta potencia de la temperatura del sol ( $T_e$  en  $^{\circ}K$ ) por la constante de Boltzmann ( $\sigma = 5.67 * 10^8 [W^2/m^2K^2]$ )

$$E = \sigma * T_e^4 \approx 63.3[MW/m^2]$$

La potencia de la energía emitida por el sol por unida de tiempo, es decir, la potencia, es llamada Luminosidad Solar( $L_S$ ), corresponde al producto del flujo energético por el área total del sol ( $A_S = 4 * \pi * r_s^2[Km]$ )

$$L_S = E * A_S \tag{1}$$

Debido a las características físicas de la atmosfera terrestre la radiación incidente puede llegar a sufrir variaciones, identificándose 3 tipos de radiación, distribuidas como se presenta en la **Figura 3**

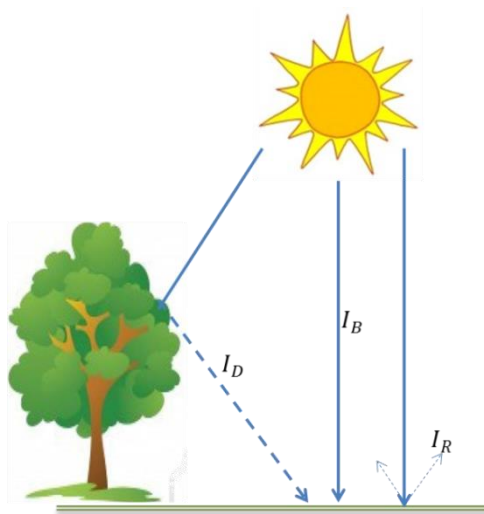
Radiación Directa  $I_B$ : No se ve afectada por la atmosfera, llega al la tierra tal cual sale del sol. Produce sombra definida al interceptar objetos no traslucidos.

Radiación Difusa  $I_D$ : es aquella que ve modificada su dirección infinidad de veces ya que es absorbida y reflejada por los objetos que encuentra en su trayectoria (arboles, nubes, *smoke*, etc.), las superficies ubicadas de forma horizontal perciben más radiación difusa ya que se encuentran orientadas al cielo. No produce sombra.

Radiación Reflejada  $I_R$ : es reflejada por las superficies que encuentra en su trayectoria, la cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión del material.

Radiación global  $I_G$ : es la suma de las 3 anteriores  $I_G = I_R + I_D + I_B$

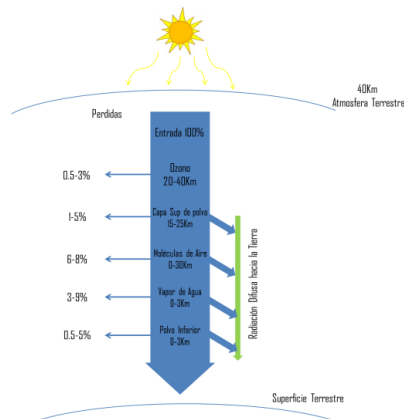
### Figura 3 Tipos de Radiación



**Fuente:** Propia

Otro fenómeno importante producido por las características físicas de la atmosfera es la dispersión de los rayos solares, **Figura 4**, que ocurre cuando los fotones que viaja en línea recta, encuentran objetos en su trayectoria, y no son absorbidos, sino que se modifica su dirección. La cantidad de dispersión depende de la longitud de onda, a menor longitud de onda más dispersión se presenta. <sup>11</sup>

**Figura 4** Dispersión de Rayos Solares



**Fuente:** Propia

<sup>11</sup> AMOROCHO CORTÉS, Enrique y OLIVEROS VILLAMIZAR, Germán. Apuntes Sobre Energía y Recursos Energéticos. 1 ed. Bucaramanga. Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB, 2000. ISBN 9589682111

La radiación solar también se ve modificada por diferentes factores geométricos, son nombrados a continuación:

**Latitud:** corresponde a la localización de un punto de la tierra ubicado al norte o al sur del ecuador. Técnicamente, la latitud es el ángulo formado por el paralelo y el ecuador del respectivo punto, su medida es en grados, minutos y fracción.

La latitud puede ser Norte ( entre 0 y  $90^{\circ}$  ) o Sur ( entre 0 y  $-90^{\circ}$  ).

**Longitud:** Corresponde a la distancia angular entre un punto específico en la superficie terrestre y el meridiano de Greenwich.

La longitud puede ser Oeste (entre 0 y  $-180^{\circ}$ ) o Este (entre 0 y  $180^{\circ}$ )

**Eclíptica:** es la línea que corresponde a la trayectoria recorrida por la tierra alrededor del sol.

**Ecuador celeste:** es la extensión del plano ecuatorial en el espacio.

**Azimut del sol:** corresponde a al ángulo formado por un punto cardinal de referencia (norte o Sur) y la proyección del sol sobre el horizonte.

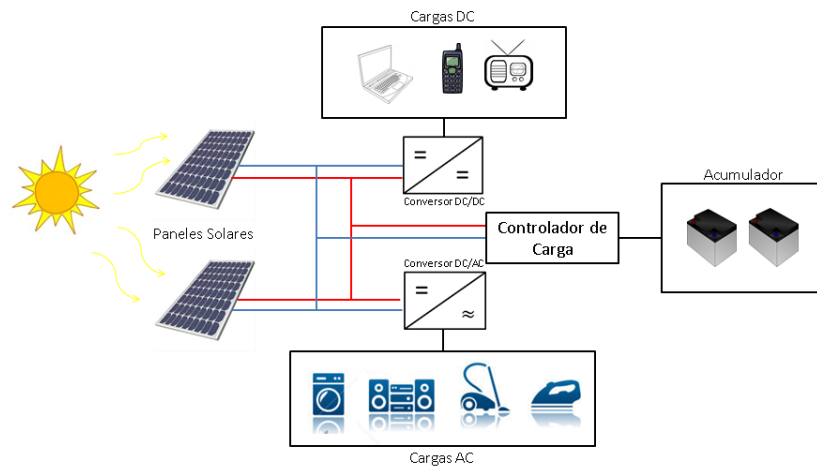
**Altura del Sol:** Corresponde al ángulo formado por la línea de vista de un observador que mira al sol y el horizonte.

**Angulo horario:** Corresponde a la distancia angular en el sol y el meridiano medida en horas, para lo cual se tiene en cuenta que  $1h = 15^{\circ}$

**Día del año:** Durante el año la posición del sol varia diariamente, por lo cual es posible conocer el ángulo correspondiente a la radiación directa que le llega al plano desde el sol.

**2.2.2. Sistemas Fotovoltaicos:** Un sistema fotovoltaico en general está conformado por las diferentes etapas que se pueden observar en la **Figura 5**

**Figura 5 Componentes de un Sistema Fotovoltaico**



**Fuente:** Propia

**Paneles Solares:** O módulos solares son un conjunto de células solares interconectadas entre sí para aprovechar el efecto fotovoltaico y convertir la radiación solar en corriente eléctrica.

**Controlador de carga:** este dispositivo tiene como misión controlar la carga de las baterías, desconectar cuando están cargadas y conectar cuando están descargadas.

**Acumulador:** es un banco de baterías recargables, donde se almacena la energía excedente durante la operación, y se encarga de suministrar energía al sistema cuando la corriente entregada por los paneles no es suficiente.

**Conversor DC/DC:** Es el encargado de entregar a la carga niveles de tensión constantes sin importar las fluctuaciones en los niveles de salida de los paneles.

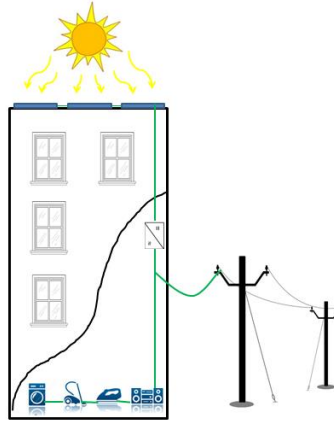
**Conversor DC/AC:** O inversor, es el encargado en convertir la corriente continua en corriente alterna, con el fin de alimentar cargas AC o en caso de interconectar el sistema a la red eléctrica.

**2.2.2.1. Sistemas conectados a la red:** Los sistemas conectados a la red, **Figura 6**, consisten básicamente en un arreglo de generadores fotovoltaicos acoplados a un convertidor DC/AC que opera en paralelo a la red eléctrica convencional como se muestra en la figura. Este inversor se encarga de



acondicionar la potencia generada y producir una tensión compatible con la red en fase y frecuencia de forma que sea segura y confiable<sup>12</sup>

**Figura 6 Sistema Conectado a la Red**



**Fuente:** Propia

Para garantizar que la potencia entregada siempre sea máxima se debe adicionar al inversor un elemento de control encargado de rastrear constantemente el punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) de los paneles, ajustando constantemente la impedancia de carga.

En este tipo de sistemas los paneles solares son generalmente ubicados sobre los techos de las edificaciones buscando la mejor exposición a la radiación solar. Los otros componentes del sistema se deben ubicar en espacios adecuados con las normas de seguridad y los medios que permitan la conexión y desconexión eléctrica del sistema y la red. Para tales efectos, se siguen las normas y recomendaciones establecidas por la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) en la norma STD1547 (*Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*).

**2.2.2.2. Sistemas Autónomos:** Son sistemas que no se conectan a la red de distribución energética convencional, debido a que se utiliza como alternativa a la misma, es decir, en zonas donde es difícil tender líneas de cableado. Este tipo de sistemas puede ser de tipo estacionario o móvil.

---

<sup>12</sup> María del Rosario Heras Celemin, *Fuentes de energía para el futuro*. Madrid, España, 2008.

Sistemas estacionarios autónomos: aplica para generadores fotovoltaicos que no se desplazan durante su funcionamiento. Cabe mencionar las siguientes como ejemplo.

**Centrales Eléctricas fotovoltaicas:** En España se encuentra la más grande de este tipo, llamada Central Hoya de los Vicentes se puede observar en la **Figura 7**, es la más grande del mundo, ubicada en Murcia, España, construida en 2008, cuenta con una potencia instalada de 23 megavatios , producidos por un parque solar de 120.000 placas solares, distribuidas en una extensión de 100 Hectáreas, y divididas en 200 plantas de 100Kw de potencia cada una, con capacidad de suministrar energía a 20.000 viviendas.<sup>13</sup>

**Figura 7 Central Hoya de los Vicentes, España**



**Fuente:** [www.rankigdolar.com](http://www.rankigdolar.com)

**Estaciones repetidoras de microondas y radio:** posibilitan las comunicaciones en zonas apartadas de difícil acceso, donde no es posible energizar desde la red. En la **Figura 8** se puede observar una antena utilizada para enviar datos obtenidos de un sistema de monitoreo volcánico, el cual también se alimenta de la energía generada por los paneles.

---

<sup>13</sup> HERAS CELEMIN, María del Rosario. Fuentes de energía para el futuro. 1era ed. Ministerio de Educación Español. Madrid, España, 2008. <Aulas de verano, serie: Ciencias> ISBN 8436946758

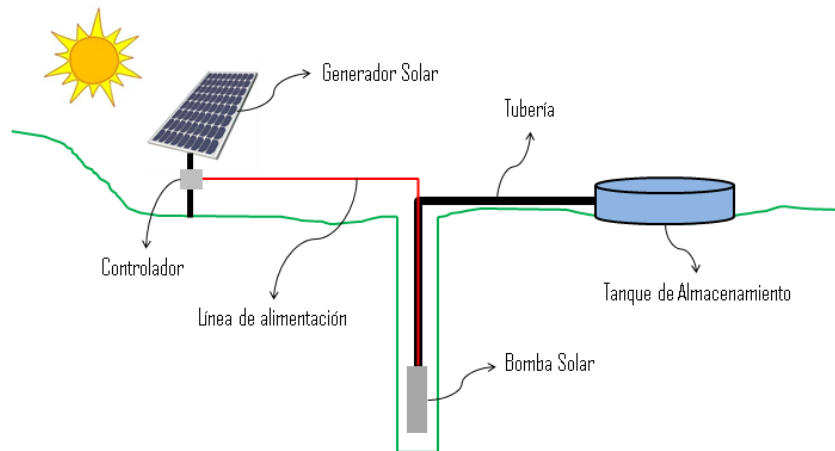
**Figura 8 Estación Repetidora alimentada con paneles solares**



**Fuente:** <http://www.cenapred.unam.mx/>

**Sistemas Bombeo de agua solar:** La energía producida por estos sistemas es de consumo inmediato, no disponen de sistemas de almacenamiento. Son de uso común en zonas rurales para abastecer de agua pozos para ganado y en zonas muy apartadas, para consumo humano. En la **Figura 9** se puede observar el mecanismo de funcionamiento de una bomba de agua solar.<sup>14</sup>

**Figura 9 Estación Solar de bombeo de agua**



**Fuente:** Propia

**Instalaciones médicas portables:** Consiste en equipamiento médicos que permite realizar procedimientos de primeros auxilios, monitoreo y cirugía, en zonas

---

<sup>14</sup> MEINEL, Aden B. y MEINEL Marjorie P., Aplicaciones de la energía solar. Edición ilustrada. Barcelona, España: Reverte, 1982. 699 p. ISBN 8429141995

de emergencia, rescates, o en zonas donde no hay hospitales. En la **Figura 10** se puede observar los diferentes equipos que operan con este sistema.

**Figura 10 Equipos médicos con paneles solares**



**Fuente:** <http://www.cenapred.unam.mx/>

**Aplicaciones espaciales:** los satélites y sondas, **Figura 11**, espaciales han permitido un avance gigantesco en la industria aeroespacial, debido al uso de paneles fotovoltaicos que generan la energía suficiente para mantener estos dispositivos en órbita de una forma altamente eficiente sin el impedimento de la atmósfera.

**Figura 11 Satélites Solares**



**Fuente:** [www.censolar.com](http://www.censolar.com)

**2.2.3. Celdas fotovoltaicas:** Las celdas Solares Fotovoltaicas se clasifican según su construcción en 3 generaciones que se presentan a continuación

- **Primera generación:** Las pertenecientes a esta generación son las celdas solares más básicas, constituidas en su mayoría de una amplia superficie de cristal, fabricado con láminas de silicio, por medio de un proceso de difusión, formando una unión p-n, capaz de generar energía a partir de los rayos solares directos que llegan a la tierra. A pesar tener una eficiencia muy baja (Aproximadamente del 10%), son las más comercializadas, debido a que los costes de producción son relativamente bajos.
- **Segunda generación:** Esta generación se caracteriza por el uso de depósitos epitaxiales de semiconductores que son aplicados sobre láminas de cristal. De esta generación se distinguen 2 tipos; Espaciales y terrestres. La espaciales se caracterizan porque su eficiencia está en un rango bastante alto, entre el 28% y el 30%, su uso en la tierra no es viable ya que están diseñadas para captar radiación AM0 (*Air Mass 0*), coeficiente atmosférico equivalente a cero atmosferas, lo que incrementa los costos de funcionamiento, pues tienen un valor por voltio más elevado. Las terrestres son de bajo costo de fabricación, pero se sacrifica eficiencia al momento de trabajar con AM0 por lo cual se descarta su uso en estaciones espaciales y satélites.<sup>15</sup>
- **Tercera generación:** esta generación esta en desarrollo, y propone utilizar para celdas espaciales, dispositivos de huecos cuánticos y con nanotubos de carbono, buscando eficiencias cercanas al 45%. Para aplicaciones terrestres, se proponen celdas fotoelectroquímicas, que se fabricarían en un futuro con polímeros, nanocristales y tintas sensibilizadas.

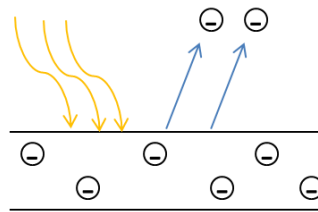
**2.2.3.1. Principio de funcionamiento:** Existen materiales que presentan una propiedad especial llamada efecto fotoeléctrico, que consiste en que dicho material es capaz de absorber fotones provenientes de una fuente de radiación electromagnética<sup>16</sup>, y a su vez liberar electrones como se puede observar en la **Figura 12**

---

<sup>15</sup> AMOROCHO CORTÉS, Enrique y OLIVEROS VILLAMIZAR, Germán. Apuntes Sobre Energía y Recursos Energéticos. 1 ed. Bucaramanga. Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB, 2000. ISBN 9589682111

<sup>16</sup> FERNANDEZ BARRERA, Manuel. Energía Solar: Electricidad Fotovoltaica. Madrid, España: Liber Factory, 1990. 76p. ISBN 8499490816

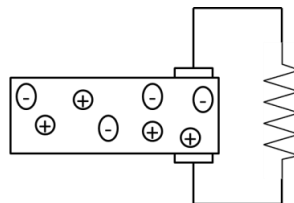
**Figura 12 Efecto Fotoeléctrico**



**Fuente:** Propia

Los electrones absorben energía de los fotones cuando son irradiados, lo que le permite ser liberado del enlace atómico. Cada vez que un fotón impacte al material con la energía suficiente para remover un electrón, se genera un hueco, que corresponde a un átomo que carece del electrón, ese hueco migrara hacia el interior del material. Un rayo de luz bombardea el material con grandes cantidades de fotones, lo cual genera muchos pares de electrones-huecos, estos pares se recombinan buscando llegar a una estabilidad, durante el proceso se produce calor cuando encuentran su posición de equilibrio, es ahí cuando se genera la corriente eléctrica, es posible conectar dos conductores al material, y estos a su vez conectados a una carga, como se muestra en la **Figura 13**, obteniendo así potencia eléctrica. La magnitud de la potencia depende de la superficie del material fotoeléctrico y de la potencia de los rayos incidentes.<sup>17</sup>

**Figura 13 Funcionamiento de una celda solar**



**Fuente:** Propia

---

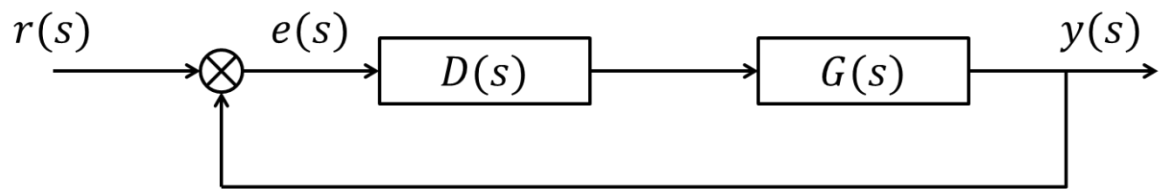
<sup>17</sup> FERNANDEZ BARRERA, Manuel. Energía Solar: Electricidad Fotovoltaica. Madrid, España: Liber Factory, 1990. 76p. ISBN 8499490816

### 2.3. CONTROL DIGITAL

A diferencia del control análogo, **Figura 14**, los sistemas digitales o discretos, operan en instantes de tiempo determinados (No de forma continua), dichos instantes son múltiplos del periodo de muestreo, es decir, presenta las características de un sistema síncrono.

La digitalización de las señales obtenidas del sistema, se realiza con el fin de sustituir los elementos que en sistema análogo, realizan la comparación de la salida y el *set point* (Comparador) y el elemento que mediante una ley de control previamente definida genera la señal de corrección dependiendo del error (Controlador), por una unidad de procesamiento.

**Figura 14 Diagrama de bloques Sistema de Control Análogo**

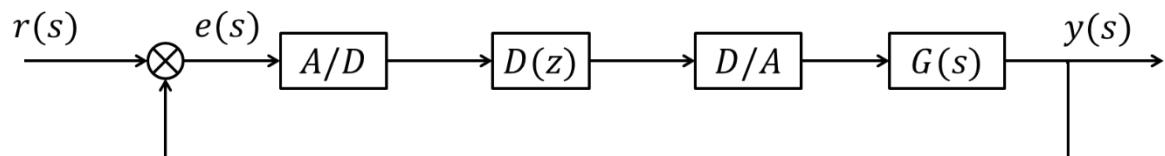


**Fuente:** Propia

Para la factibilidad del uso de la unidad de procesamiento se adicionan al sistema análogo, **Figura 15**, dos elementos básicos:

- Conversor de Análogo a Digital (A/D)
- Conversor de Digital a Análogo (D/A)

**Figura 15 Diagrama de Bloques Sistema de Control Digital**



**Fuente:** Propia

### 2.3.1. Componentes de un control digital:

- **Muestreador y retenedor (*sampler and hold*):** es un dispositivo analógico que captura muestras del voltaje de una señal analógica y mantiene su valor a un nivel constante durante un período mínimo de tiempo (un periodo de muestreo)
- **Conversor de Análogo a Digital (A/D):** es un dispositivo físico cuya función es transformar señales analógicas de voltaje en señales digitales con un numérico
- **Conversor de Digital a Análogo (D/A):** en un dispositivo electrónico, encargado de transforma señales digitales (valor numérico, por lo general, binarias), en señales analógicas de voltaje
- **Planta o proceso:** conjunto de componentes interconectados de forma que puedan realizar una tarea determinada, su operación y funcionamiento es controlable.
- **Comparadores:** su función es generar una señal de salida dependiendo de las señales de entrada, generalmente, es la diferencia, pero hay sistemas que requieren que se sumen las señales.
- **Controlador o regulador:** unidad que ante una determinada señal de entrada genera una señal de salida que al aplicarse a la planta produce en esta ultima la salida controlada deseada.

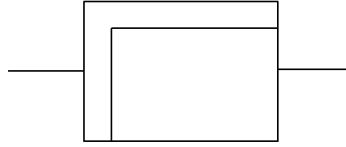
**2.3.2. Acciones de control:** en un sistema de control, el controlador es, por llamarlo de alguna manera, el cerebro del sistema, debido a que determina el comportamiento del mismo, modificando el funcionamiento del elemento actuador ante una desviación de la variable regulada, respecto a la de control, la forma en que este proceso se realiza, se conoce como acciones de control, y existen 3 tipos básicos que se enumeran a continuación.

**2.3.2.1. Acción Proporcional:** se presenta cuando la señal de control es proporcional al error, su símbolo se presenta en la **Figura 16** La relación entre estas dos variables es la constante proporcional o ganancia proporcional  $K_p$ . Si la ganancia proporcional es muy grande se generarán pequeñas desviaciones que inducen cambios bruscos en el actuador, pero, si es muy pequeña, la señal de control no será suficiente para compensar el error. La función de transferencia de la acción proporcional es



$$G(s) = K_p$$

**Figura 16 Símbolo Acción Proporcional**



**Fuente:** Propia

La desventaja que presenta este tipo de controladores consiste en que no pueden eliminar el error completamente, debido a que si el error se hace cero la acción de control también se haría cero, lo cual no tiene sentido, por lo tanto, quedara un error permanente llamado *Offset*, que disminuye con  $K_p$  pero no se anula.

Los parámetros que componen un controlador proporcional son:

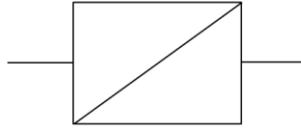
- Banda Proporcional:  $(100/K_p)$  es el porcentaje que tiene que variar el error para que la salida tenga una variación del 100 %
- Ganancia proporcional ( $K_p$ ): A medida que la banda proporcional aumenta, la ganancia disminuye. En el caso contrario, si la banda proporcional es mayor al 100 %, no se pueden obtener desviaciones del 100 % del actuador.

**2.3.2.2. Acción Integral:** Se presenta cuando la acción de control es proporcional a la integral del error respecto al tiempo, es decir, la acción de control no depende solo del error, sino, del tiempo que dura el error. La acción integral permite eliminar el error en régimen permanente, por lo que se mejora la respuesta permanente del sistema. La función de transferencia que define la acción integral es:

$$G(s) = \frac{K_i}{s}$$

El símbolo que la representa es:

**Figura 17 Símbolo de la Acción Integral**



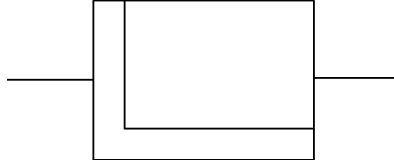
**Fuente:** Propia

**2.3.2.3. Acción derivativa:** Se produce cuando la acción de control es proporcional a la derivada del error respecto al tiempo. Se utiliza para mejorar el tiempo de respuesta del mismo, al oponerse a la velocidad con que varía el error. Presenta la desventaja de que ante cambios súbitos en el valor del error, genera una respuesta muy grande que tiende a inestabilizar el sistema en lazo cerrado, es debido a que este comportamiento que no se utiliza por sí sola. La función de transferencia que define la acción derivativa es:

$$G(S) = T_d s$$

El símbolo que lo representa es el que se muestra en la **Figura 18**

**Figura 18 Símbolo de la acción Derivativa**



**Fuente:** Propia

El parámetro que caracteriza la acción derivativa es el tiempo diferencial, el cual no tiene una representación física como tal, pero tiene asociado un parámetro, que relaciona el tiempo derivativo con la acción derivativa, dicho parámetro es llamado tiempo de avance ( $T_A$ ), dicho parámetro representa lo que se avanza una cierta posición utilizando la acción proporcional y derivativa, en relación a lo que se tardaría en alcanzarse tal proposición haciendo uso únicamente de la acción proporcional.

**2.3.2.4. Acciones proporcional e integral combinadas:** Como se mencionó en la sección **2.3.2.2** la acción integral no puede actuar por sí sola, es necesario complementarla con la acción proporcional. La dinámica de funcionamiento de esta combinación, consiste en que la acción proporcional actúa de forma

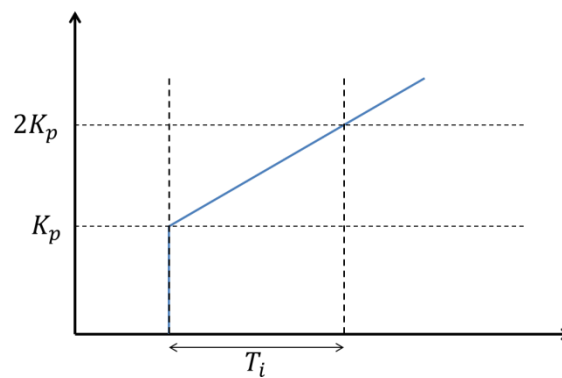
inmediata, mientras que, la acción integral actúa durante un intervalo de tiempo conocido como **tiempo integral ( $T_i$ )** como se muestra en la **Figura 19**.

La función de transferencia que define un controlador PI está dada por la siguiente ecuación

$$G(S) = K_p \left( \frac{1}{T_i S} + 1 \right)$$

Los parámetros que definen el funcionamiento de este tipo de controladores son  $K_p$  y  $T_i$  los cuales pueden ser manipulados para obtener un comportamiento específico que se ajuste al sistema y a la respuesta deseada.

**Figura 19 Acción PI Ante un escalón unitario**



**Fuente:** propia

En conclusión, la respuesta obtenida de un controlador PI es la suma de las respuestas del controlador P que se generan en los instantes en que se detecta el error y que no lo anula, y las respuestas del controlador integral que actúan con un retardo  $T_i$  y se encarga de anular el error.

**2.3.2.5. Acción proporcional integral y derivativa PID:** Un controlador PID es la combinación de las 3 acciones básicas, con el fin de sumar sus ventajas, dando prioridad a la acción que más disminuya el error dependiendo de la velocidad con que este varía

Este tipo de controladores es ampliamente utilizado debido a que ofrecen una respuesta rápida y además compensa el error.

Como desventaja se puede mencionar su propensión a volverse oscilatorio y la dificultad que presenta la sintonización de sus parámetros respecto a otros controladores. **Figura 20**

La ecuación que define la salida de este controlador es

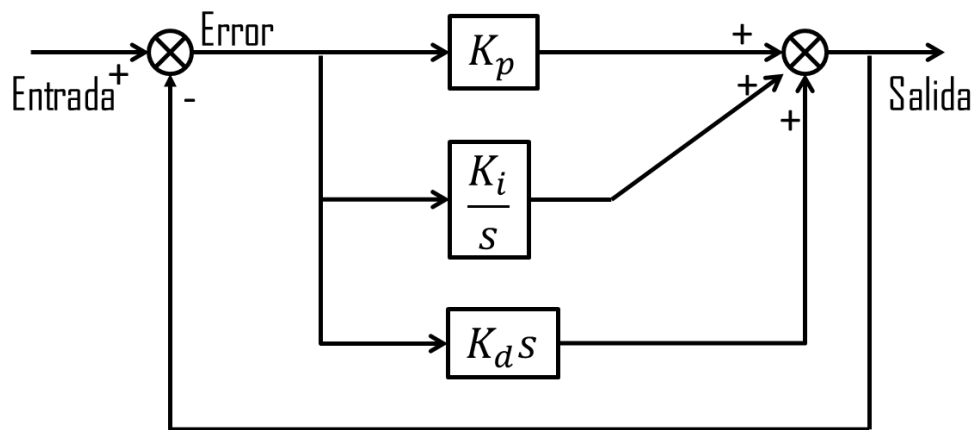
$$y(t) = K_p * e(t) + K_p * T_d * \frac{de(t)}{dt} + K_p * \frac{1}{T_i} \int e(t)dt$$

Por lo tanto la función de transferencia que lo define es

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  son ajustables dependiendo de las necesidades del sistema.

**Figura 20 Controlador PID**

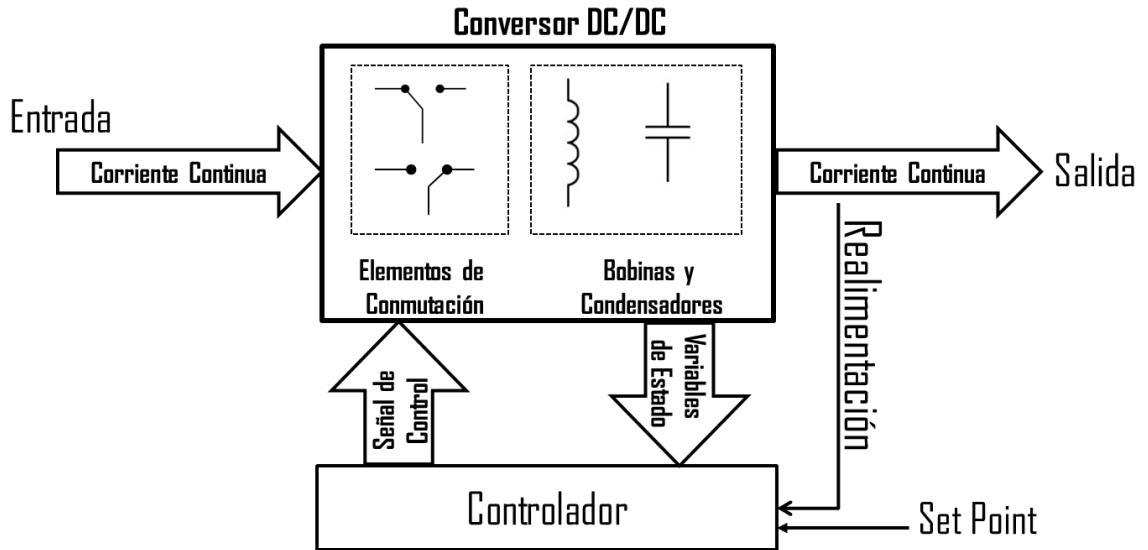


**Fuente:** Propia

## 2.4. CONVERTIDORES DC/DC

Convertidores o Conversores DC/DC son utilizados en aplicaciones cuyo fin es adaptar la naturaleza de la energía eléctrica dependiendo de las características de la carga. Ya que estos permiten regular la tensión (o la corriente) en la carga, a través del correspondiente circuito realimentado que actúa sobre el ciclo de trabajo del convertidor. Las características del ciclo de trabajo están dadas por el control aplicado a semiconductores, **Figura 21**, conocidos como llaves de potencia, los cuales conmutan a frecuencias más altas que la de la variación de las formas de onda de entrada y salida del convertidor, con el fin de controlar el flujo de energía entre dos sistemas de corriente continua.

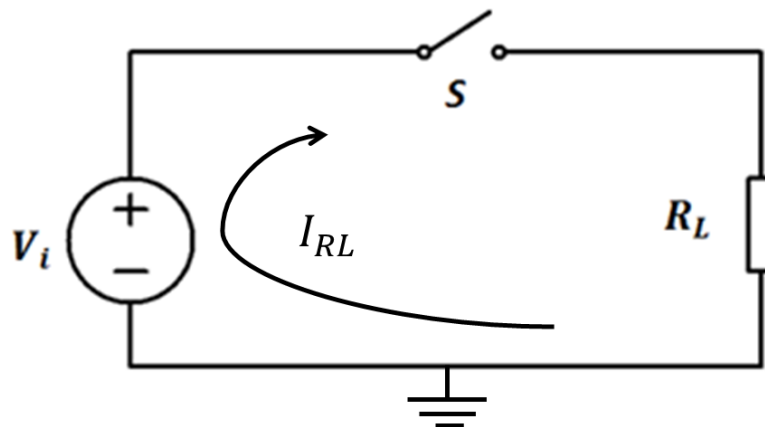
Figura 21 Conversor DC/DC



Fuente: propia

En la **Figura 22** el voltaje en la resistencia  $R_L$  tiene forma de onda rectangular y tiene un valor promedio de  $V_0 = \delta V_i$  donde  $\delta$  se llama **Ciclo de Dureza** o *Duty Cycle* y relaciona el tiempo que el *switch* S permanece conduciendo y el tiempo que permanece abierto.

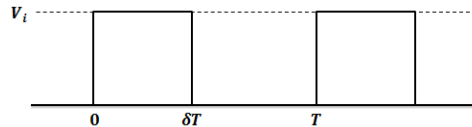
Figura 22 Circuito básico de un Convertidor DC/DC



Fuente: Propia

La alta frecuencia de conmutación que se presenta en el *switch*, genera contenido de armónicos en la señal de salida, por lo cual es necesario agregar un filtro, para mantener voltaje y corriente constante en la carga. La forma de onda que se genera al realizar la conmutación es la que se presenta en la **Figura 23**

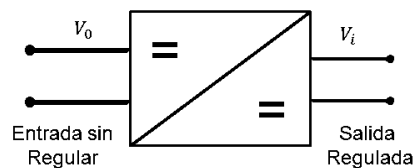
**Figura 23** Forma de Onda



**Fuente:** Propia

La forma más simple de describir un convertidor DC/DC es mediante un cuadripolo como el que se observa en la **Figura 24**, en cuyo puerto de entrada se extrae energía de una fuente primaria (batería, panel fotovoltaico, rectificador o pila de combustible) para suministrarla a la carga en el puerto de salida, logrando así, encontrar consumos estables y márgenes de tensión de salida estrictos en equipos de instrumentación, consumos pulsantes en alimentaciones laser o consumos muy variables en alimentación de motores.

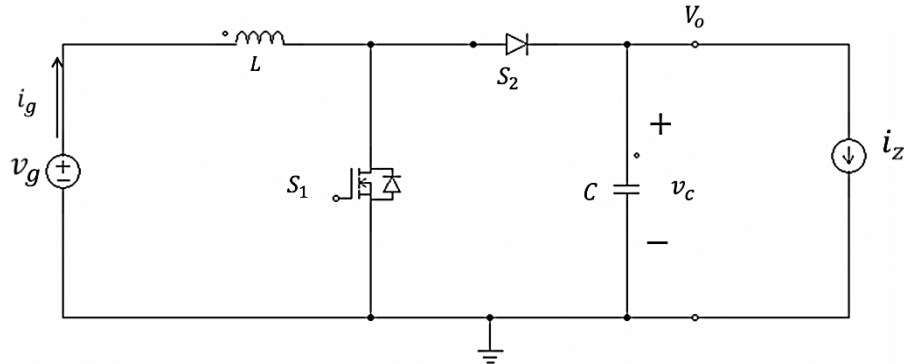
**Figura 24** Cuadripolo que representa un Conversor DC/DC



**Fuente:** Propia

**2.4.1. Convertidor Elevador o Boost:** La **Figura 25** representa el circuito de un convertidor elevador para el cual  $V_g$  representa el voltaje de entrada,  $V_o$  es el voltaje de salida del sistema.

**Figura 25 Convertidor Boost Ideal**



**Fuente:** propia

Este tipo de convertidores reciben diferentes nombres, tales como, Elevador, *Step-Up*, *boost* o “*Chopper paralelo*”, y todos hacen referencia a principalmente a su función, que consiste en mantener una tensión de salida regulada incluso teniendo variaciones en el voltaje de entrada o en la impedancia de la carga.

Las características de este circuito permiten que sea especialmente utilizado en fuentes de alimentación conmutadas, sistemas alimentados por bancos de baterías conectadas en serie (lo cual genera variaciones en el voltaje total), también cumplen un papel importan en los sistemas de energías renovables debido a que las fuentes primarias de estos sistemas no son generalmente controladas por el hombre y por lo tanto sus fluctuaciones son impredecibles.

El principio de funcionamiento del circuito, permite que no solo la salida sea regulada sino que siempre va a ser mayor que la entrada, debido a que cuando el elemento de conmutación, (que funciona a una frecuencia  $f = \frac{1}{T}$ ) se encuentra en estado de conducción, la bobina  $L$  almacena la energía entregada por la fuente  $V_g$ , y cuando el interruptor cambia a estado de corte, esa energía sumada a la proveniente de  $V_g$  son entregadas a la carga.

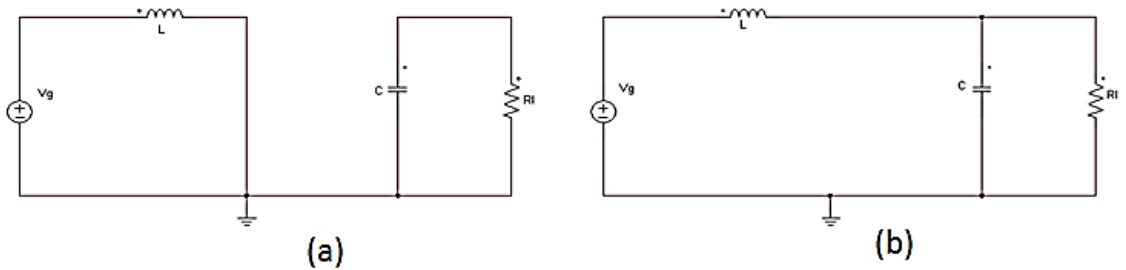
Existen dos modos diferentes de operación que dependen de la corriente que pasa por la bobina  $L$ , estos son: Modo de conducción continua y Modo de Conducción discontinua, a continuación se hace referencia a ambos.

### **Modo de Conducción Continua**

Este modo se presenta cuando el diodo y el MOSFET se encuentran en condiciones complementarias, es decir, cuando el MOSFET está conduciendo

(saturado) el diodo no está conduciendo **Figura 26 (a)** o cuando el diodo está conduciendo el mosfet no se encuentra saturado **Figura 26 (b)**

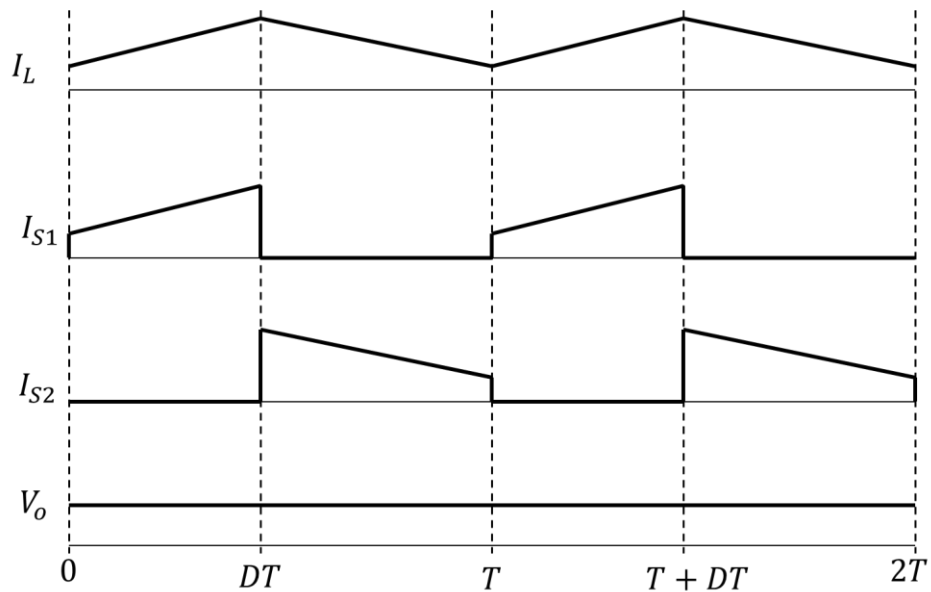
**Figura 26 Conducción Continua**



**Fuente:** Propia

Las formas de onda que se presentan en este modo de conducción son las que se observan en la siguiente **Figura 27**

**Figura 27 Formas de onda CC**



**Fuente:** Propia



En la **Figura 27** se pueden identificar que existen 2 intervalos

$0 < t < DT$  Donde se tiene que

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_g}{L}$$
$$i_{s1} = i_L; \quad i_{s2} = 0$$

$DT < t < T$  Donde

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_g - V_o}{L}$$

$$i_{s1} = 0; \quad i_{s2} = i_L$$

La estabilidad del circuito depende de que se cumpla la condición  $V_o > V_g$ , si no se cumple la corriente en la bobina empieza a decrecer indefinidamente.

La relación de la entrada y la salida del sistema se halla teniendo en cuenta que en estado estable el valor promedio de el voltaje en la bobina debe ser 0, y en el elemento conmutador es igual al voltaje de entrada. Por lo tanto:

$$V_s = V_g$$

$$(1 - D)V_o = V_i \quad \rightarrow \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (2)$$

Siendo  $D$  el ciclo de dureza, es decir, el porcentaje del tiempo  $T$  durante el cual el transistor permanece conduciendo.

El voltaje de salida no depende de la cantidad de corriente requerida por la carga lo que garantiza una salida regulada.

### **Modo de conducción discontinua**

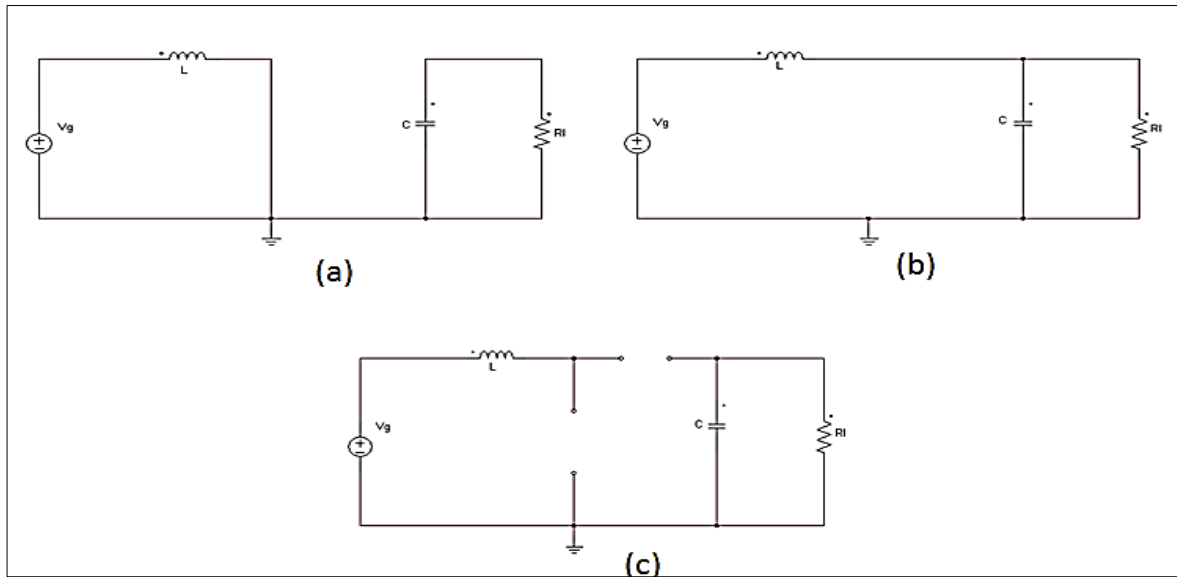
Si la corriente a través del diodo se hace 0 mientras  $D = 0$ , el diodo se abre (deja de conducir) entonces el convertidor está trabajando en modo de conducción

discontinua donde la corriente de salida es muy baja, la corriente por la bobina  $L$  se anula cuando el diodo  $D$  conduce, en este tipo de conducción se dan 3 etapas

- $DT > t > 0$
- $UT > t > DT$
- $T > t > UT$

Los circuitos que representan las etapas anteriores son los que se muestran en la **Figura 28** de forma correspondiente.

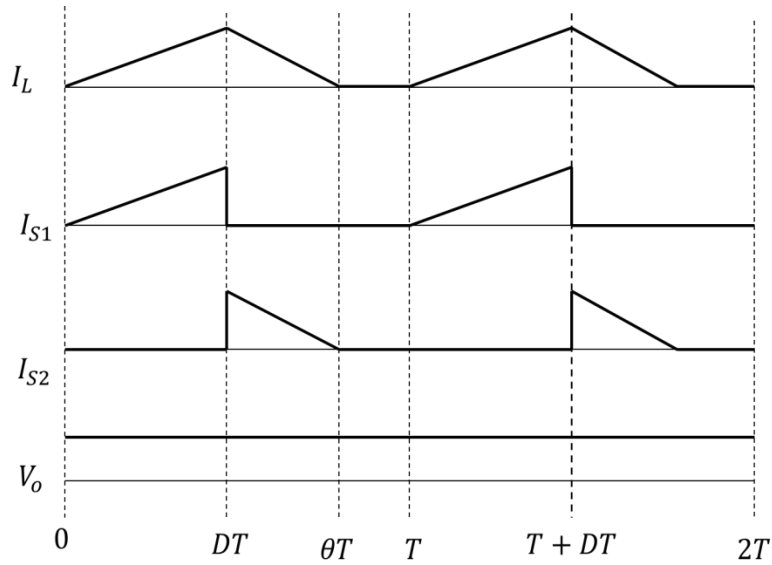
**Figura 28** Formas de onda CD



**Fuente:** Propia

Las formas de onda que se generan en las diferentes etapas se muestran a continuación en la **Figura 29**

**Figura 29** Formas de Onda conducción en MCD



**Fuente:** Propia

De donde se tiene que el valor promedio del voltaje en el elemento conmutador es igual al voltaje de salida, por lo tanto:

$$V_s(t) = V_i$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\theta}{\theta - D}$$

El tiempo  $\theta T$  corresponde al instante en el cual la corriente por la bobina se anula

$$i_L(t) = i_o$$

$$i_o = \frac{V_o}{R_L}$$

De las anteriores ecuaciones se obtiene la relación entre la entrada y la salida

$$i_L(t) = \frac{V_i}{2Lf} D(U - D)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{V_i D^2}{2Lf i_o}$$

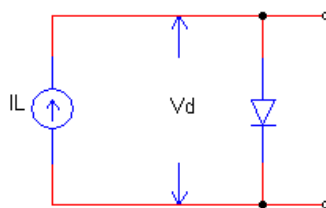
Que tampoco depende del comportamiento de la carga.

### 3. MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA PANEL-CONVERTIDOR

#### 3.1. MODELADO DEL PANEL SOLAR

**3.1.1. Modelo Eléctrico de una Celda Solar:** La forma más básica de representar una celda solar es haciendo un símil con una fuente de corriente como la que se observa en la **Figura 30**. El valor de la corriente entregada por dicha fuente, depende de la radiación captada por la celda. El diodo se utiliza para representar la juntura P-N que conforma la celda solar, y es el comportamiento de esta juntura lo que determina el voltaje entregado por la celda ante la variación de la carga conectada a esta.

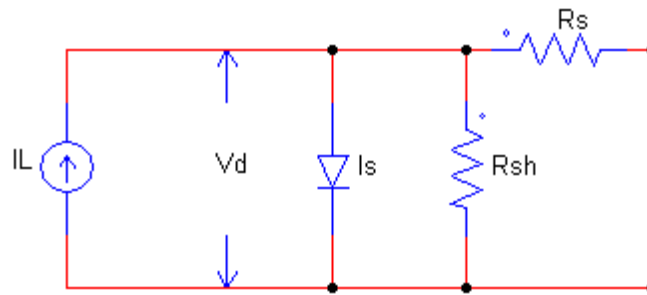
**Figura 30** Modelo ideal de una celda solar



**Fuente:** propia

El modelo anterior hace referencia al comportamiento de la celda en una situación ideal, en la realidad, como en todos los circuitos, se presentan pérdidas, en forma de calor, además el diodo debe tener características reales. Por lo tanto, un modelo más acertado se presenta en la **Figura 31**.

**Figura 31** modelo real de una celda solar

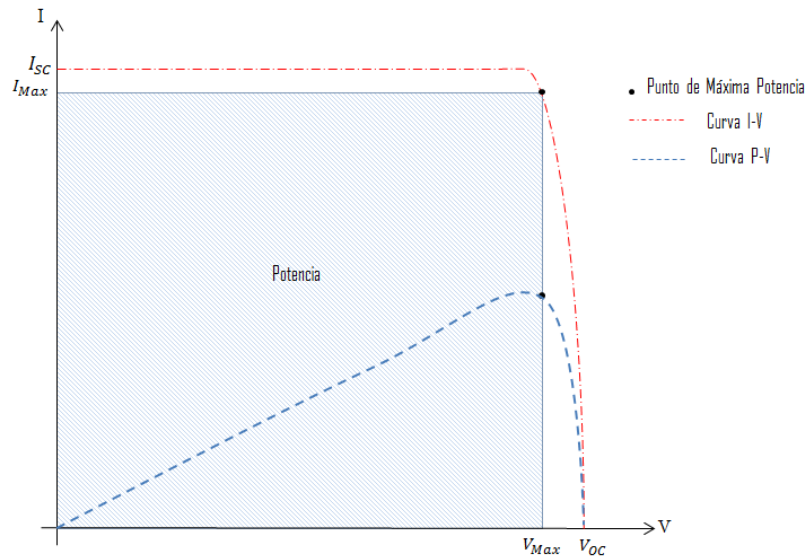


**Fuente:** Propia

En la **Figura 31**  $I_L$  corresponde a la corriente generada mediante el fenómeno fotoeléctrico, es decir, la magnitud de esta corriente depende de forma directamente proporcional a la irradiancia captada por la superficie de la celda. El voltaje  $v_d$  corresponde al voltaje del diodo, es decir, el voltaje de la juntura, que se ve afectado también por la temperatura de funcionamiento de la celda.  $I_s$  (Corriente por la resistencia  $R_s$ ) es la “corriente de oscuridad”, corresponde a la corriente de saturación de la juntura.

**Curvas características de las celdas solares:** Las curvas que describen las posibles combinaciones de Voltaje-Corriente y Voltaje-Potencia que se pueden presentar en el funcionamiento de una celda frente a diferentes condiciones ambientales (Principalmente temperatura e irradiancia), se presentan en la **Figura 32**.

**Figura 32 Curva I-V de una celda solar**



**Fuente:** Propia

A continuación se definen las convenciones necesarias para interpretar las curvas características.

$I_{SC}$ : Corriente de Corto Circuito, es la corriente que entrega la celda si se unen los terminales de salida, su valor depende de la radiación recibida.

$V_{OC}$ : Voltaje de Circuito Abierto, es el voltaje entregado por la celda cuando no tiene una carga conectada a los terminales de salida.

$I_{Max}$ : Corriente de Máxima Potencia, corriente a la cual la potencia entregada por la celda alcanza su máximo valor. (Aprox.  $0.9I_{SC}$ ).

$V_{Max}$ : Voltaje de Máxima Potencia, voltaje al cual la potencia entregada por la celda alcanza su máximo valor. (aproximadamente entre  $0.6V_{OC} - 0.85V_{OC}$ )

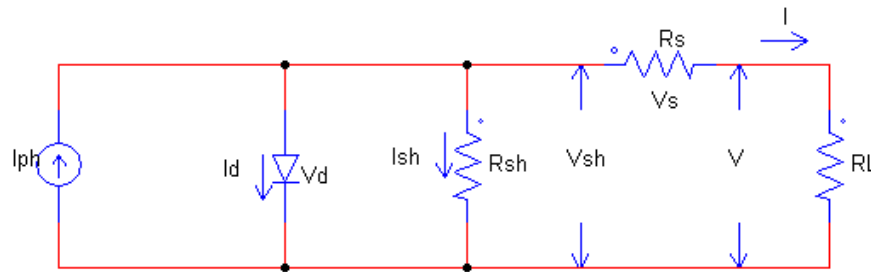
Punto de Máxima Potencia: es el punto de operación donde converge el máximo voltaje con la máxima corriente, su valor está dado por  $P_{Max} = I_{Max} * V_{Max}$ , en la curva  $I - V$  sus coordenadas son  $(I_{Max}, V_{Max})$ , y en la curva  $P - V$  las coordenadas son  $(P_{Max}, V_{Max})$ .

**Efecto de la radiación solar sobre los puntos de operación de la celda.**

La radiación captada sobre la superficie de la celda genera variaciones en el voltaje de circuito abierto  $V_{OC}$ , y cuando el nivel de radiación se vuelve muy bajo el valor de  $V_{OC}$  cae súbitamente, mientras  $I_{SC}$  e  $I_{Max}$  varían de forma casi lineal con la radiación. Por lo tanto, la potencia entregada por la celda varía lineal y proporcionalmente a la variación en la radiación. Las variaciones mencionadas se pueden observar más claramente en la ~~Figura 33~~. No se encuentra el origen de la referencia..

**3.1.2. Modelo matemático de una celda solar:** Partiendo del modelo equivalente de la celda solar, y adicionando a este una resistencia de carga, como se muestra en la Figura 33, es posible obtener ecuaciones que describen su comportamiento.

**Figura 33 Circuito equivalente a una celda solar con resistencia de carga**



**Fuente:** Propia

La corriente del diodo está dada por la siguiente ecuación

$$I_d = I_o \left\{ e^{\frac{V_d * q}{n * k * T}} - 1 \right\} \quad (2)$$

A partir del análisis por Ley de Kirchoff del circuito mostrado en la Figura 33 se obtienen las siguientes expresiones

$$I_{Ph} = I_d + I_{sh} + I \quad \rightarrow \quad I = I_{ph} - I_d - I_{sh}$$

$$V_{sh} = V_s + V \quad (3)$$

$$V_d = V_{sh} \quad (4)$$

De la Ecuación (4) se tiene que

$$V_{sh} = R_{sh} * I_{sh} = V_d = V + R_s * I \quad (5)$$

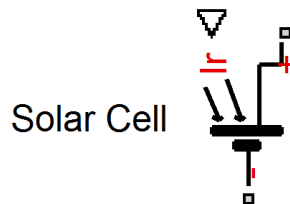
Por lo tanto la corriente entregada por la celda solar a la carga está dada por la siguiente expresión

$$I = I_{ph} - I_o \left\{ e^{\frac{V+R_s*I}{n*k*T}} - 1 \right\} - \frac{V + R_s * I}{R_{sh}} \quad (6)$$

### 3.1.3. Simulación de una celda solar por medio del software Simulink:

SimuLink es un entorno de diagramas de bloque diseñado para realizar simulaciones multidominio que se integra con MatLab. Dentro del paquete de software se incluye la caja de herramientas SimScape que proporciona un entorno para el modelado y simulación de sistemas físicos (Mecánicos, hidráulicos, eléctricos). La herramienta SimScape incluye en sus librerías un modelo de celda solar, **Figura 34**, basado en las ecuaciones antes descritas.

**Figura 34** Celda solar de Simulink

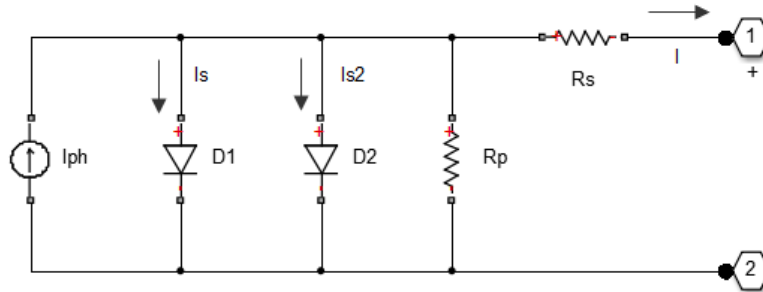


**Fuente:** propia

La estructura interna de este bloque, que se puede observar en la **Figura 35**, está compuesto por una fuente de corriente, dos diodos exponenciales, y una resistencia en paralelo  $R_p$  equivalente a la resistencia shunt  $R_{sh}$  del modelo presentado en la Ecuación (6).



**Figura 35 Estructura interna de la celda solar de Simulink**



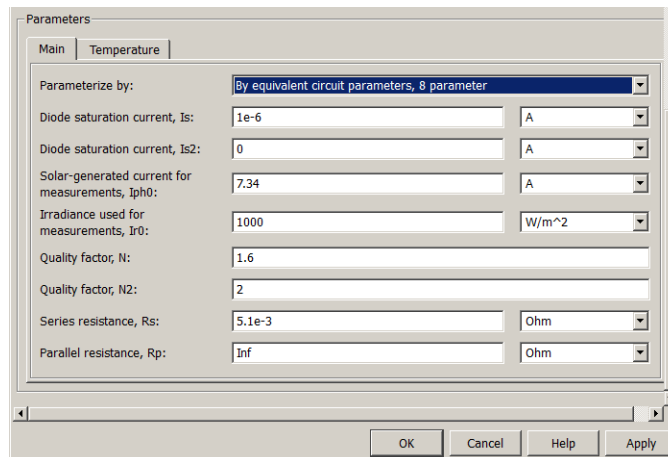
**Fuente:** Propia

Por lo tanto, la ecuación que define la corriente de salida de la celda es

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ e^{\frac{V+R_s*I}{n_1*k*T_1}} - 1 \right\} - I_{s2} \left\{ e^{\frac{V+R_s*I}{n_2*k*T_2}} - 1 \right\} - \frac{V + R_s * I}{R_p} \quad (7)$$

Los parámetros necesarios para la simulación del Solar Cell Model se introducen en el bloque de parametrización, que se puede observar en la Figura 36.

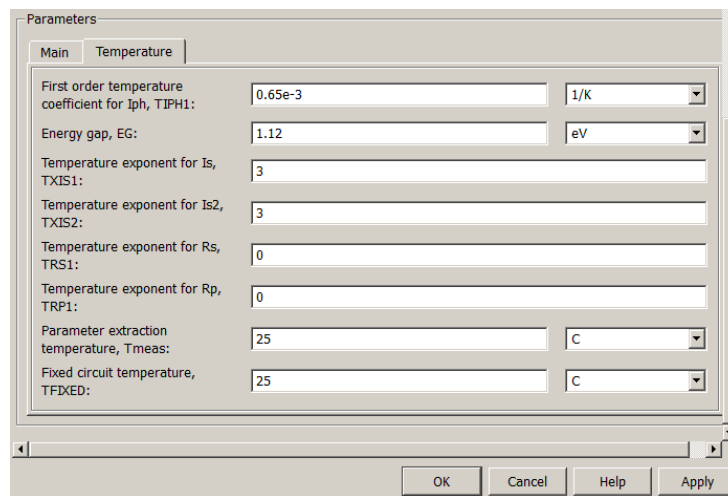
**Figura 36 Bloque de parametrización Solar Cell**



**Fuente:** Propia

La acción de la temperatura de trabajo de la celda afecta la corriente entregada, ese efecto se simula por medio de los parámetros introducidos en la pestaña de “Temperatura”, como se observa en la **Figura 37**.

**Figura 37** Bloque de parametrización de la temperatura Solar Cell

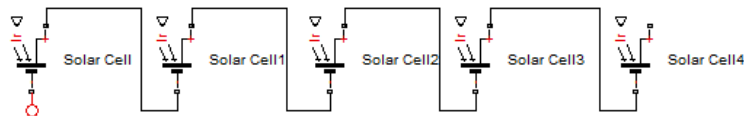


**Fuente:** Propia

**3.1.4. Modelo de un panel fotovoltaico:** La arquitectura de un panel fotovoltaico depende de la forma en que las celdas que lo conforman están conectadas, las conexiones posibles son: serie, paralelo y una combinación de las anteriores.

**3.1.4.1. Conexión en serie de celdas solares:** Un panel solar puede estar conformado por n celdas conectadas en serie como se aprecia en la Figura 38, la celdas pueden estar físicamente muy cerca, y aun así se considera que la irradiación recibida presenta variaciones de una a otra.

**Figura 38** Conexión en serie de celdas solares en Simulink



**Fuente:** Propia

La corriente entregada por el panel está dada por la celda que presente más pérdidas y/o esté recibiendo menos radiación, y que por lo tanto está entregando la menor corriente. Es decir, si se tiene un arreglo de  $n$  celdas, y se asume que  $j \in \{1, \dots, n\}$ , entonces la corriente entregada por el panel es

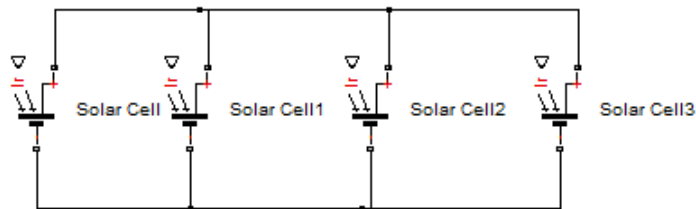
$$I_{PV} = \min_j(I_j) \quad (8)$$

Y el voltaje está dado por la sumatoria de los voltajes entregados por cada celda de independientemente;

$$V_{PV} = \sum_{j=1}^n V_j \quad (9)$$

**3.1.4.2. Conexión en Paralelo de celdas solares.** La topología de conexión en serie se observe en la **Figura 39**

**Figura 39 Conexión en paralelo de celdas solares en Simulink**



**Fuente:** propia

Por análisis mediante leyes de Kirchoff , se deduce que el voltaje entregado por el panel es equivalente al voltaje de la celda que tenga más pérdidas y/o esté recibiendo la menor cantidad de radiación solar, y que por lo tanto está entregando el menor voltaje de todo el arreglo, es decir,

$$V_{PV} = \min_j(V_j) \quad (10)$$

La corriente de salida del panel corresponde a la sumatoria de las corrientes entregadas por cada celda de forma independiente. Es decir,

$$I_{PV} = \sum_{j=1}^n I_j \quad (11)$$

**3.1.4.3. Combinación Serie-paralelo de celdas solares:** En un panel compuesto por p arreglos de celdas solares conectados en serie, y cada arreglo está compuesto por q celdas conectadas en paralelo el voltaje y la corriente están definidos de la siguiente manera:

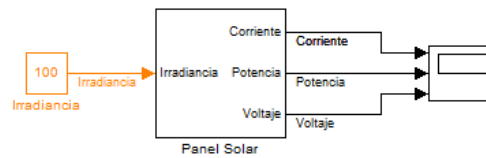
$$V_{PV} = \left( \sum_{i=1}^p \left( \min_{j \in \{1, \dots, q\}} (V_j) \right) \right)_i \quad (12)$$

$$I_{PV} = \min_{j \in \{1, \dots, p\}} \left( \left( \sum_{j=1}^q I_j \right) \right)_i \quad (13)$$

**3.1.5. Simulación de un panel fotovoltaico mediante simulink:** Para la simulación del panel se asume que este es de arquitectura plana, y por lo tanto la temperatura y la radiación es igual para las 72 celdas que lo componen las cuales están agrupadas en arreglos de 36 celdas en serie cada uno. Se seleccionó este tipo de panel debido a que la potencia entregada por los mismos (en promedio 270 Watts pico, dependiendo del fabricante), y su tamaño (en promedio 17,5 cm, dependiendo del fabricante) son ideales para aplicaciones en áreas limitadas, sin comprometer el funcionamiento.

A continuación se presenta el bloque final, **Figura 40**, que representa al sistema cuya entrada es la radiación solar medida en Watios por metro cuadrado  $[W/m^2]$ , y las salidas son el voltaje  $[V]$ , la corriente  $[A]$  y la potencia  $[W]$ .

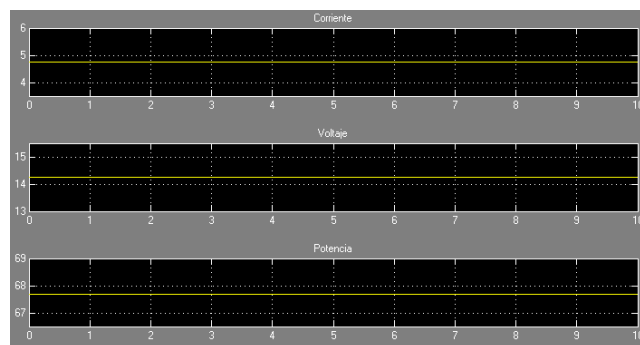
**Figura 40 Bloque final del panel fotovoltaico**



**Fuente:** Propia

El resultado de la simulación se puede observar en la **Figura 41**, la respuesta observada es la obtenida para una radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$

**Figura 41 Resultado de la simulación del panel fotovoltaico**

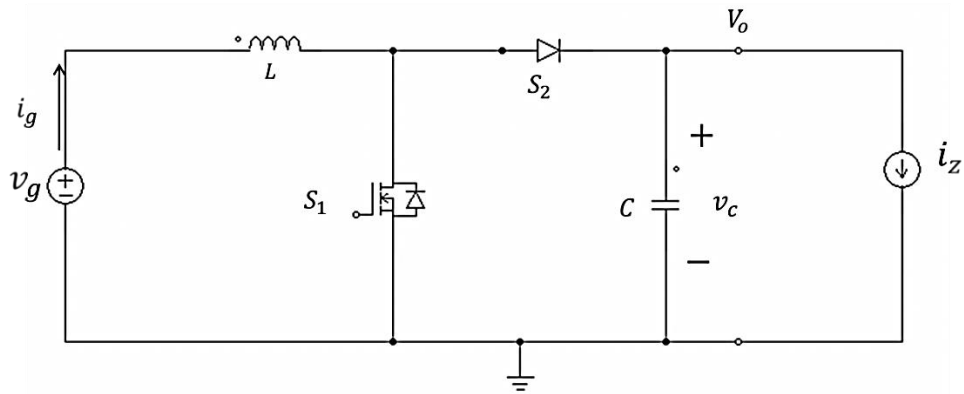


**Fuente:** Propia

### 3.2. MODELADO DEL CONVERTIDOR

Se considera el circuito de la **Figura 42**, con elementos ideales, donde  $i_z$  representa la corriente que circula por la carga  $R_L$  cuando la diferencia de potencial en sus extremos es equivalente al voltaje en el capacitor  $v_C$ .

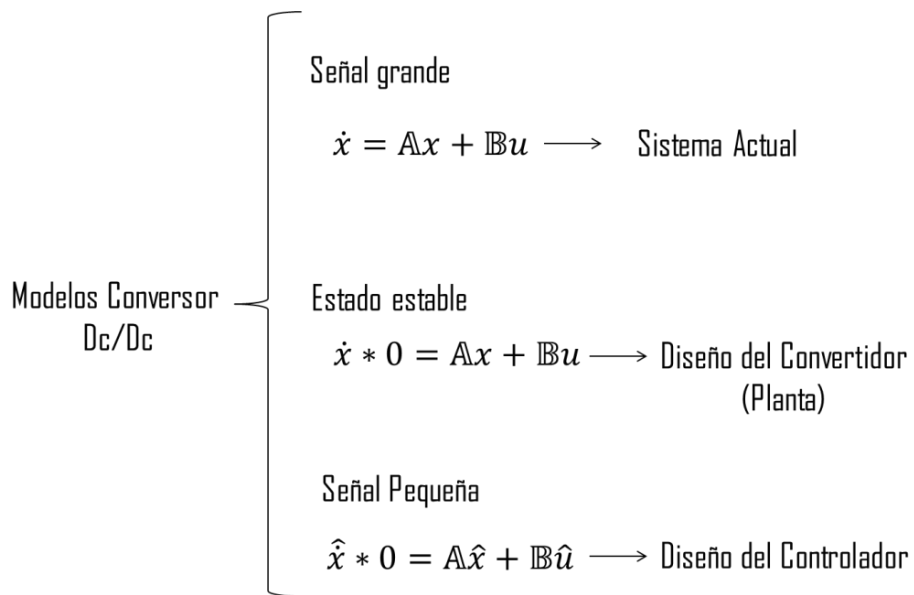
**Figura 42 Boost Ideal Voltajes y Corrientes**



**Fuente:** Propia

A continuación, en la **Figura 43**, se establecerán 3 modelos que permitirán deducir la función de transferencia necesaria para el diseño del controlador.

**Figura 43 Modelos**



**Fuente:** Propia

Para desarrollar los modelos propuestos es necesario conocer las ecuaciones de estado que definen tanto entradas, como salidas, para  $dT_s$  (Tiempo de

conducción del elemento conmutador) y para  $1 - dT_s$  (Tiempo en que el que el elemento conmutador no conduce). Es necesario tener en cuenta que el parámetro  $R$  corresponde a la resistencia de carga por la cual fluye la corriente  $i_z$  al aplicarse el voltaje  $v_o$ .

### Entradas

- $dT_s$

$$\begin{matrix} & \mathbb{A}_1 & & \mathbb{B}_1 \\ \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} & + & \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [v_g] & + & \begin{bmatrix} 0 \\ -1/C \end{bmatrix} [i_z] \end{matrix} \quad (14)$$

- $1 - dT_s$

$$\begin{matrix} & \mathbb{A}_2 & & \mathbb{B}_2 \\ \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L0} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} & + & \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [v_g] & + & \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C} \end{bmatrix} [i_z] \end{matrix} \quad (15)$$

### Salidas

- $dT_s$

$$\begin{matrix} & \mathbb{C}_1 \\ \begin{bmatrix} v_o \\ i_g \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (15)$$

- $(1 - d)T_s$

$$\begin{aligned} & \mathbb{C}_1 \\ & \begin{bmatrix} v_o \\ i_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

Una vez establecidas las ecuaciones de estado, se procede a la deducción del modelo promediado de señal grande, para el cual se combina los dos modos de operación  $dT_s$  y  $(1 - d)T_s$ , como se muestra a continuación.

$$\mathbb{A} = \mathbb{A}_1 d + \mathbb{A}_2 (1 - d)$$

$$\mathbb{B} = \mathbb{B}_1 d + \mathbb{B}_2 (1 - d)$$

$$\mathbb{C} = \mathbb{C}_1 d + \mathbb{C}_2 (1 - d)$$

De donde se obtiene

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-d)}{L} \\ \frac{(1-d)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [v_g] + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/C \end{bmatrix} [i_z] \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} v_o \\ i_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

Para obtener el modelo de estado estable es necesario hacer el siguiente cambio de variables.

$$\dot{x} = 0 \quad ; \quad d = D \quad ; \quad v_g = V_g \quad ; \quad i_g = I_g$$

Las letras mayúsculas se usan para representar las condiciones de equilibrio de cada variable. Al reemplazar las condiciones de equilibrio en el modelo promediado de señal grande, se obtiene:



$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-D)}{L} \\ \frac{(1-D)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [V_g] + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/C \end{bmatrix} [I_z] \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} V_o \\ I_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} \quad (18)$$

De la ecuación de estado estable  $\dot{x} * 0 = \mathbb{A}X + \mathbb{B}U$  se obtiene la expresión

$$X = -\mathbb{A}^{-1}\mathbb{B}U$$

Que corresponde a la relación entre las variables de estado, los parámetros del circuito y la entrada de control. En caso de que se requiera incluir la ecuación de salida, se debe tener en cuenta que  $Y = \mathbb{C}X$ , por lo tanto, reemplazando  $X$ ,

$$Y = -\mathbb{C}\mathbb{A}^{-1}\mathbb{B}U.$$

El modelo de pequeña señal se obtiene sustituyendo al modelo promediado, por la suma de una parte de estado estable y una pequeña señal de variación alrededor del punto de equilibrio. Esta variación se aplica para cada variable, como se muestra a continuación.

$$d = D + \hat{d}$$

$$v_o = V_o + \hat{v}_o$$

$$v_g = V_g + \hat{v}_g$$

$$i_z = I_z + \hat{i}_z$$

$$i_L = I_L + \hat{i}_L$$

$$v_C = V_C + \hat{v}_C$$

$$\begin{bmatrix} I_L + \hat{i}_L \\ V_C + \hat{v}_C \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-D-\hat{d})}{L} \\ \frac{(1-D-\hat{d})}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}}_{\mathbb{A}} \begin{bmatrix} I_L + \hat{i}_L \\ V_C + \hat{v}_C \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbb{B}} [V_g + \hat{v}_g] + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/C \end{bmatrix} [I_Z + \hat{i}_Z] \quad (18)$$

La matriz  $\mathbb{A}$  se debe descomponer en 3 partes debido a que tiene 3 componentes, una de estado estable, la variación alrededor del punto de equilibrio y adicionalmente la entrada de control  $\hat{d}$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_L + \hat{i}_L \\ V_C + \hat{v}_C \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-D-\hat{d})}{L} \\ \frac{(1-D-\hat{d})}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}}_{\mathbb{A}} \begin{bmatrix} I_L + \hat{i}_L \\ V_C + \hat{v}_C \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbb{B}} [V_g + \hat{v}_g] + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/C \end{bmatrix} [I_Z + \hat{i}_Z] \quad (19) \\ &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}}_{\text{estado estable}} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}}_{\text{variación}} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_C \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \hat{d} \\ -\hat{d} & 0 \end{bmatrix}}_{\text{entrada de control}} \begin{bmatrix} I \\ V_o \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_o}{L} \\ I \\ -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \hat{d} \end{aligned}$$

También es necesario eliminar las componentes de estado estable, que en la ecuación anterior aparecen en los recuadros rojos. Se obtiene la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_o}{L} \\ I \\ -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \hat{d} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [\hat{v}_g] + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/C \end{bmatrix} [\hat{i}_Z] \quad (20)$$

Este modelo tiene la forma:

$$\hat{x} = A\hat{x} + B_1\hat{d} + B_2\hat{v}_g + B_3\hat{i}_g$$

Combinando las entradas  $B_1\hat{d} + B_2\hat{v}_g + B_3\hat{i}_g$  en una misma matriz se obtiene el modelo

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & \frac{V_o}{L} \\ 0 & -\frac{1}{C} & -\frac{I_L}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_g \\ \hat{i}_g \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Este modelo tiene la forma

$$\hat{x} = A\hat{x} + Bu$$

Donde  $u$  corresponde al vector  $\begin{bmatrix} \hat{v}_g \\ \hat{i}_g \\ \hat{d} \end{bmatrix}$

### Obtención de la función de transferencia

Para obtener la función de transferencia a partir de la ecuación en espacio de estados, es necesario aplicar la transformada de Laplace

Para las entradas y parámetros del convertidor se tiene:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$sX(s) = AX(s) + BU(s)$$

Al despejar  $X(s)$

$$X(s) = (sI - A)^{-1}BU(s)$$

Para la salida del convertidor se tiene

$$y = Cx$$

$$Y(s) = CX(s)$$

Por lo tanto

$$Y(s) = \mathbb{C}(sI - \mathbb{A})^{-1}\mathbb{B}U(s)$$

Dependiendo la función de transferencia deseada la matriz  $\mathbb{B}$  corresponderá a la columna de la entrada con respecto a la cual se va a evaluar la salida. Para el caso del diseño del controlador, la entrada a considerar, es la modificación al ciclo de dureza del elemento de conmutación. Por lo tanto la función de transferencia

de interés es  $\frac{\hat{v}_o}{\hat{d}}$  con  $\mathbb{B} = \begin{bmatrix} \frac{V_o}{L} \\ -\frac{I_L}{C} \end{bmatrix}$

### Obtención de la función de transferencia

Para obtener la función de transferencia a partir de la ecuación en espacio de estados, es necesario aplicar la transformada de Laplace

Para las entradas y parámetros del convertidor se tiene:

$$\dot{x} = \mathbb{A}x + \mathbb{B}u$$

$$sX(s) = \mathbb{A}X(s) + \mathbb{B}U(s)$$

Al despejar  $X(s)$

$$X(s) = (sI - \mathbb{A})^{-1}\mathbb{B}U(s)$$

Para la salida del convertidor se tiene

$$y = \mathbb{C}x$$

$$Y(s) = \mathbb{C}X(s)$$

Por lo tanto

$$Y(s) = \mathbb{C}(sI - \mathbb{A})^{-1}\mathbb{B}U(s)$$

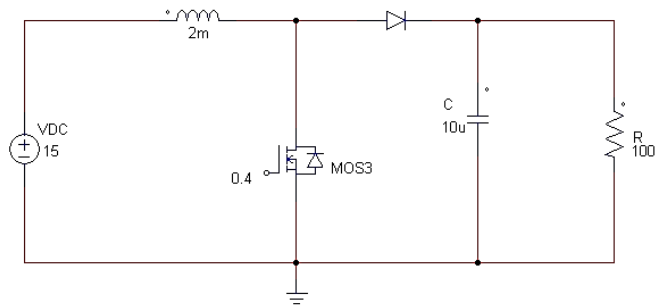
Dependiendo la función de transferencia deseada la matriz  $\mathbb{B}$  corresponderá a la columna de la entrada con respecto a la cual se va a evaluar la salida. Para el caso del diseño del controlador, la entrada a considerar, es la modificación al ciclo de dureza del elemento de conmutación. Por lo tanto la función de transferencia

de interés es  $\frac{\hat{v}_o}{\hat{d}}$  con  $\mathbb{B} = \begin{bmatrix} \frac{V_o}{L} \\ -\frac{I_L}{C} \end{bmatrix}$

## Características del sistema

Para el convertidor Dc/Dc Boost con los parámetros que se observan en la **Figura 44** se calcula la función de transferencia del sistema computando las ecuaciones en un código de MatLab diseñado para tal función. (**ANEXO B**)

**Figura 44 Circuito Boost con valores**



Fuente: Propia

Los sistemas obtenidos son

a =

	i1	vc
i1	0	-300.00000
vc	60000.00000	-1000.00000

b =

	vg	iz	d
i1	500.00000	0	0
vc	0	-100000.00000	0

c =

	i1	vc
vo	0	1.00000
ig	1.00000	0

d =

	vg	iz	d
vo	0	0	0
ig	0	0	0

a =

```
          il          vc
il          0  -300.00000
vc 60000.00000 -1000.00000
```

b =

```
          vg          iz          d
il  500.00000          0 12500.00000
vc          0 -100000.00000 -41666.66667
```

c =

```
          il          vc
vo          0          1.00000
```

d =

```
          vg          iz          d
vo          0          0          0
```

Y la función de transferencia obtenida en el mismo código es

$$\frac{v_o}{d} = \frac{-41666.6667(s - 1.8 * 10^4)}{s^2 + 1000s + 1.8 * 10^7}$$

Validación del modelo

Para comprobar que el modelo obtenido describe de forma fiel el comportamiento del sistema, se comparan los datos arrojados en el código de **Obtención de la función de transferencia**

Para obtener la función de transferencia a partir de la ecuación en espacio de estados, es necesario aplicar la transformada de Laplace

Para las entradas y parámetros del convertidor se tiene:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$sX(s) = AX(s) + BU(s)$$

Al despejar  $X(s)$

$$X(s) = (sI - A)^{-1}BU(s)$$

Para la salida del convertidor se tiene

$$y = Cx$$

$$Y(s) = CX(s)$$

Por lo tanto

$$Y(s) = C(sI - A)^{-1}BU(s)$$

Dependiendo la función de transferencia deseada la matriz  $B$  corresponderá a la columna de la entrada con respecto a la cual se va a evaluar la salida. Para el caso del diseño del controlador, la entrada a considerar, es la modificación al ciclo de dureza del elemento de conmutación. Por lo tanto la función de transferencia

de interés es  $\frac{\hat{v}_o}{\hat{d}}$  con  $B = \begin{bmatrix} \frac{V_o}{L} \\ -\frac{I_L}{C} \end{bmatrix}$

## 4. DISEÑO DE CONTROLADORES

### 4.1. CONTROLADOR PI

Un controlador PI es el resultado de la suma de la acción integral y la acción proporcional, por lo tanto su función de transferencia corresponde a la ecuación 21

$$G_{PI} = K_p + \frac{K_i T (z + 1)}{2(z - 1)} = \left( 2K_p + K_i \frac{T}{2} \right) * \frac{z + \frac{K_i T - 2K_p}{K_i T + 2K_p}}{z - 1} \quad (21)$$

El controlador Pi introduce un polo  $z = 1$ , lo cual mejora la respuesta temporal en régimen estacionario, y un cero en el eje real del plano Z dependiendo de los valores de  $K_p$  y  $K_i$ .

El método de diseño a seleccionar para el controlador PI depende de los resultados esperados. En caso de no existir especificaciones temporales, se puede optar por cancelar uno de los polos de lazo abierto de la planta con el cero

que introduce el controlador, este método se conoce como “cancelación de polos y ceros” o “filtro de muesca”.

En caso de tener como requisito un error de estado estable específico, el procedimiento a seguir para el diseño es el siguiente:

1. Establecer, a partir de la función de transferencia, el tipo de sistema (tipo 0, 1 o 2) con el cual se va a trabajar, para conocer con qué coeficiente de error se va a trabajar (potencia, aceleración o velocidad)

$$\text{Tipo 0} \quad \rightarrow G(z) = \frac{k\pi(z+z_i)}{\pi(z+p_i)} \quad K_p = \text{Coeficiente de potencia}$$

$$\text{Tipo 1} \quad \rightarrow G(z) = \frac{k\pi(z+z_i)}{(z-1)\pi(z+p_i)} \quad K_v = \text{Coeficiente de velocidad}$$

$$\text{Tipo 2} \quad \rightarrow G(z) = \frac{k\pi(z+z_i)}{(z-1)^2\pi(z+p_i)} \quad K_a = \text{Coeficiente de aceleración}$$

2. Calcular el coeficiente de error, el cual depende de del tipo de sistema y de la entrada de prueba a utilizar, como se relaciona en la tabla

**Tabla 8 Error de estado Estable**

Tipo	Entrada	Escalón	Rampa	Parábola
0		$e_{ss} = \frac{A}{1 + K_p}$	$\infty$	$\infty$
1		0	$e_{ss} = \frac{A}{K_v}$	$\infty$
2		0	0	$e_{ss} = \frac{A}{K_a}$

3. Despejar el parámetro  $K_i$  de la ecuación que define al coeficiente de error calculado. Tener en cuenta que FTLA son las siglas para función de transferencia de lazo abierto.

$$K_p = \lim_{z \rightarrow 1} (FTLA)$$

$$K_v = \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1) * FTLA$$



$$K_a = \frac{1}{T^2} \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1)^2 * FTLA$$

4. Calcular el parámetro  $K_c$ , igualando el polo  $(z - a)$  de la función de transferencia que desestabiliza el sistema con el cero del numerador

$$z + \frac{K_i T - 2K_c}{K_i T + 2K_c} = z - a \quad (21)$$

5. Con los parámetros conocidos en los numerales anteriores es posible obtener una expresión para el controlador del sistema.

#### 4.1.1. Selección de Periodo de Muestreo

La selección del periodo de muestreo se realiza utilizando Matlab (Código en ANEXO A)

La frecuencia de corte que arroja el código a partir del análisis de bode del sistema en lazo cerrado es  $w_c = 5.6902 * 10^4 rad/seg$ , la banda de frecuencias apropiada esta delimitada por  $8 * w_c < w < 12 * w_c$ , por lo tanto, el rango de en el que se encuentra el periodo de muestreo es

$$T_{min} < T < T_{max}$$

$$9.2017 * 10^{-6} < T < 1.3803 * 10^{-5}$$

El periodo de muestreo seleccionado es  $T = 1.15 * 10^{-5}$

#### 4.1.2. Discretización de la planta

Se aplica la transformada Z a la función de transferencia discretizada

$$G_P(s) = \frac{-4.167 * 10^4 s + 7.5 * 10^8}{s^2 + 1000s + 1.8 * 10^7} \quad (22)$$

Con  $T = 1.15 * 10^{-5}$

$$HG_p(z) = \frac{-0.4154z + 0.5081}{z^2 - 1.9867z + 0.98} \quad (23)$$

### 4.1.3. Parámetros del controlador

La función de transferencia de pulso del sistema tiene la forma

$$G(z) = \frac{K\pi(z + z_i)}{(z - 1)\pi(z + P_i)}$$

Es decir, es un sistema tipo 1, por lo tanto, para hallar el valor del error en estado estable se considera una entrada de prueba tipo rampa, para la cual se tiene que  $e_{ss} = A/K_V$ . Asumiendo el error de estado estable,  $e_{ss} = 2$  se tiene que el coeficiente de error de velocidad es

$$K_V = \frac{1}{e_{ss}} = 0.5$$

$$K_V = \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1) * D(z) * HG(z)$$

La función de transferencia del controlador

$$D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{[K_i T + 2K_c] \left[ z + \frac{K_i T - 2K_c}{K_i T + 2K_c} \right]}{2(z - 1)} \quad (23)$$

$$0.5 = \frac{1}{1.15 * 10^{-5}} \lim_{z \rightarrow 1} \left[ \frac{(z - 1)(K_i T + 2K_c) \left( z + \frac{K_i T - 2K_c}{K_i T + 2K_c} \right)}{2(z - 1)} * \frac{-0.4154z + 0.5081}{z^2 - 1.9867z + 0.98} \right] \quad (24)$$

Despejando el valor de  $K_i$  se tiene que  $K_i = -0.0361$

La función de transferencia discretizada tiene un polo por fuera del círculo unitario por lo que es necesario cancelarlo igualándolo a una porción del controlador para que el parámetro  $K_c$  lo elimine

$$z + \frac{K_i T - 2K_c}{K_i T + 2K_c} = z - 1.07 \quad (24)$$

$$K_c = 6.144 * 10^{-6}$$

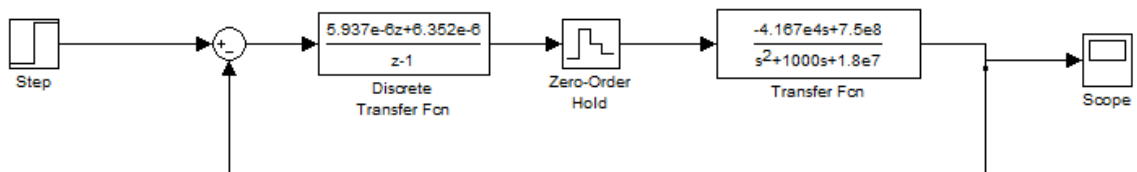
El controlador

$$D(z) = \frac{5.93 * 10^{-6}(z - 1.07)}{z - 1} \quad (24)$$

#### 4.1.4. Respuesta del controlador

A continuación se presenta el resultado de la simulación del sistema que se muestra en la **Figura 45** que corresponde a el lazo cerrado de la planta y el controlador con realimentación negativa

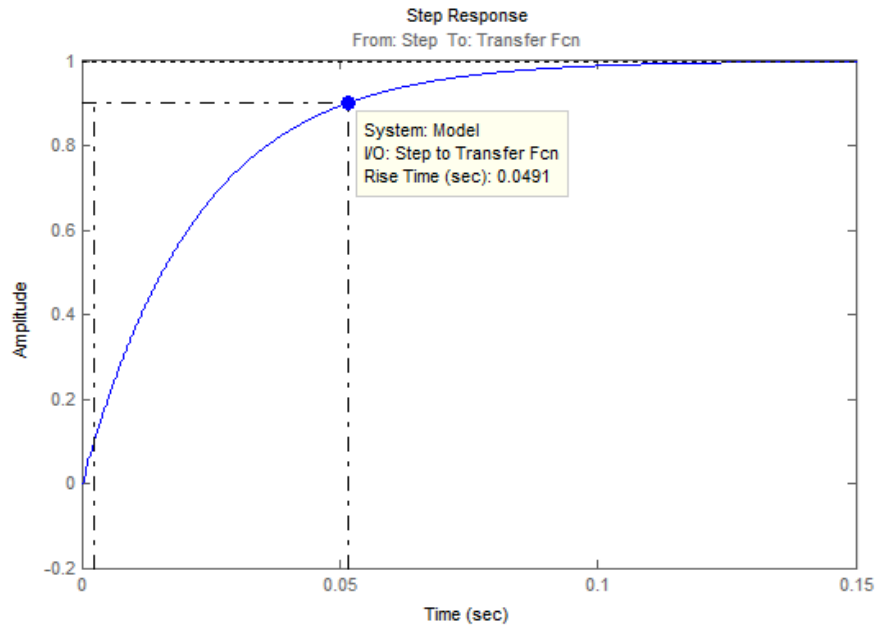
**Figura 45 Diagrama de Bloques Simulink del Sistema**



**Fuente:** Propia

En la **Figura 47** se observa que el tiempo de levantamiento es  $t_r = 0.0491s$  lo que indica que el sistema tiene una respuesta rápida a cambios abruptos en la entrada de referencia.

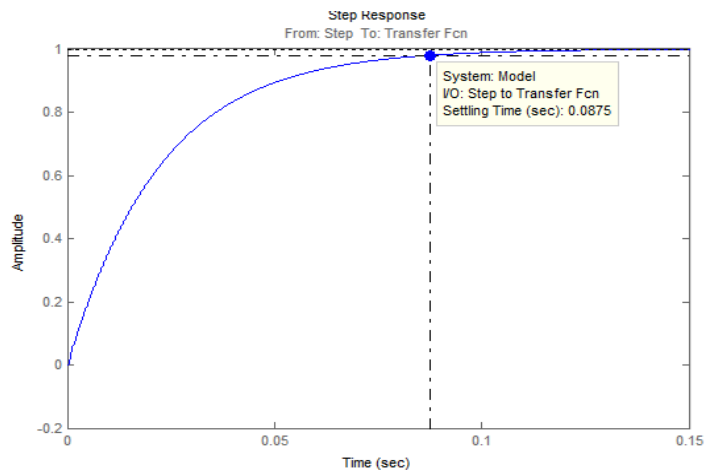
**Figura 46** Tiempo de Levantamiento



**Fuente:** Propia

El tiempo de establecimiento, **Figura 47**, es de  $t_s = 0.075s$ , la respuesta, aunque es bastante rápida, se ve limitada por el hecho de que el convertidor *boost* contiene elementos activos que almacenan energía. Sin embargo se aprecia que la banda de error es estrecha.

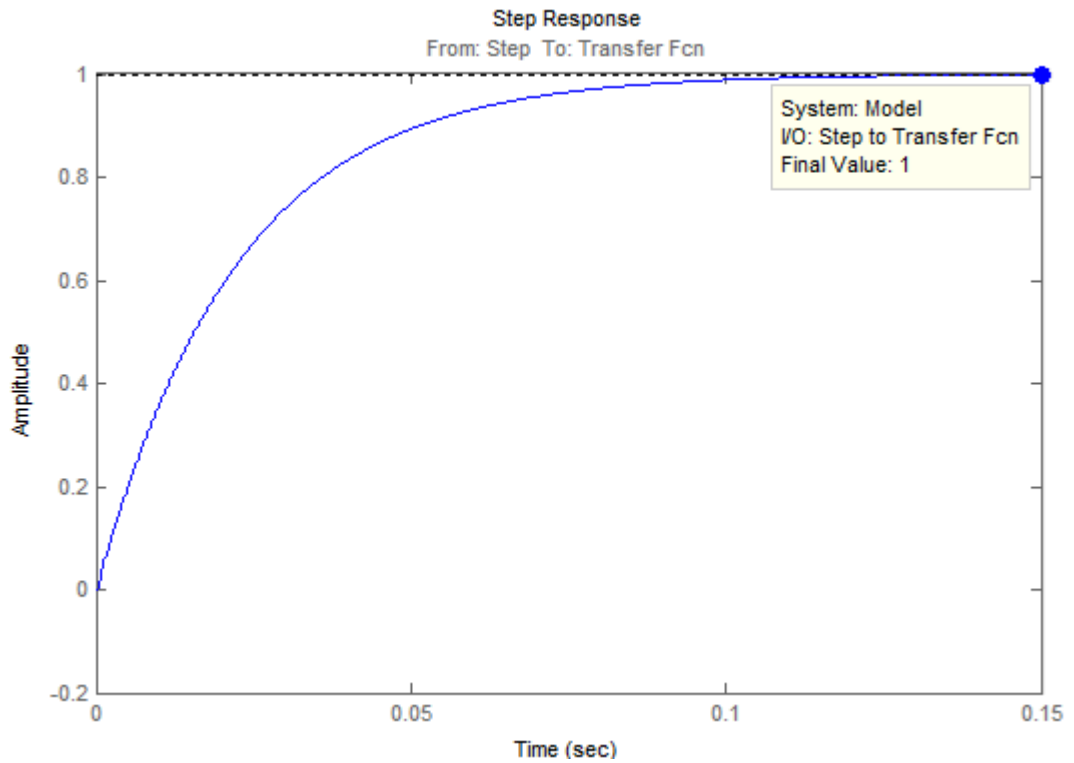
**Figura 47** Tiempo de establecimiento



**Fuente:** Propia

En la **Figura 48** se observa el valor final en el cual se estabiliza el sistema, de donde se deduce que el error en estado estable es cero. Al introducir una perturbación.

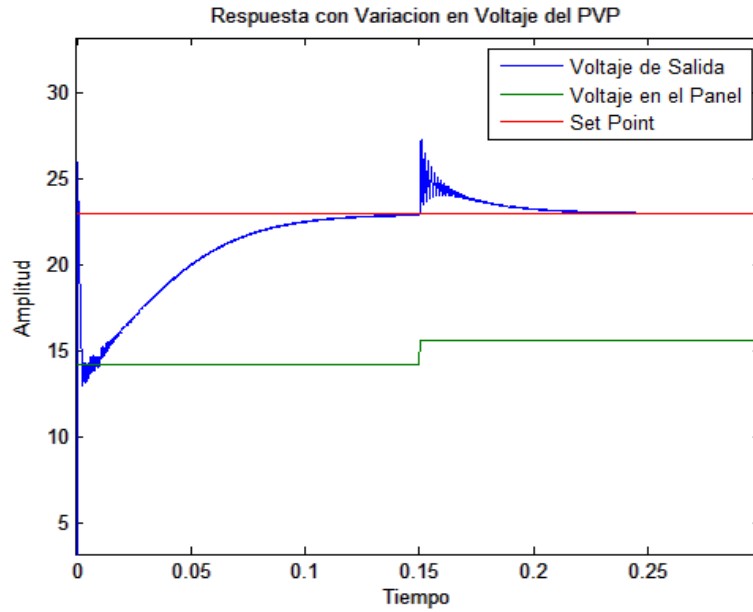
**Figura 48 Error de Estado Estable**



**Fuente:** Propia

El Comportamiento del sistema ante perturbaciones se puede observar en la **Figura 49**, en la cual se ven cambios bruscos en la radiación, que se traducen en cambios en el voltaje entregado por el panel solar.

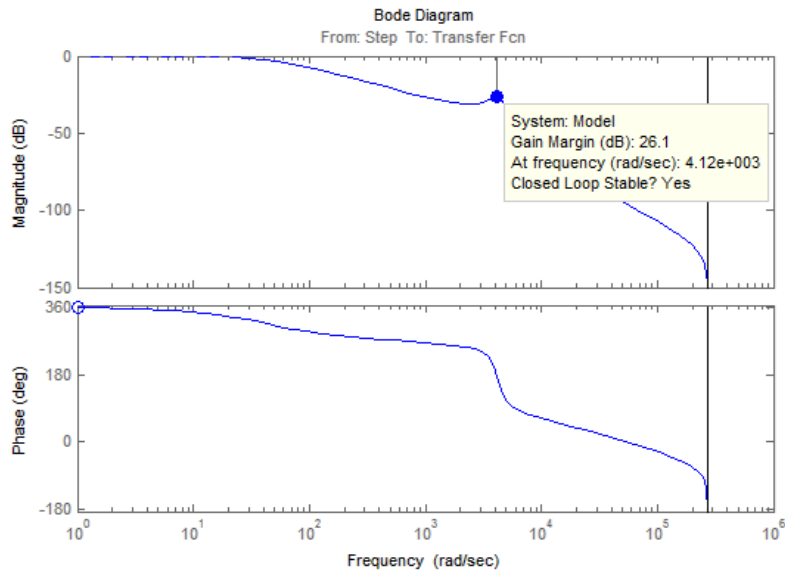
**Figura 49 Respuesta con Variación en el Voltaje del Panel**



Fuente: propia

La estabilidad del sistema se ve reflejada en el diagrama de Bode en la Figura 50

**Figura 50 Diagrama de Bode**



Fuente: Propia

## 5. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR OBTENIDO

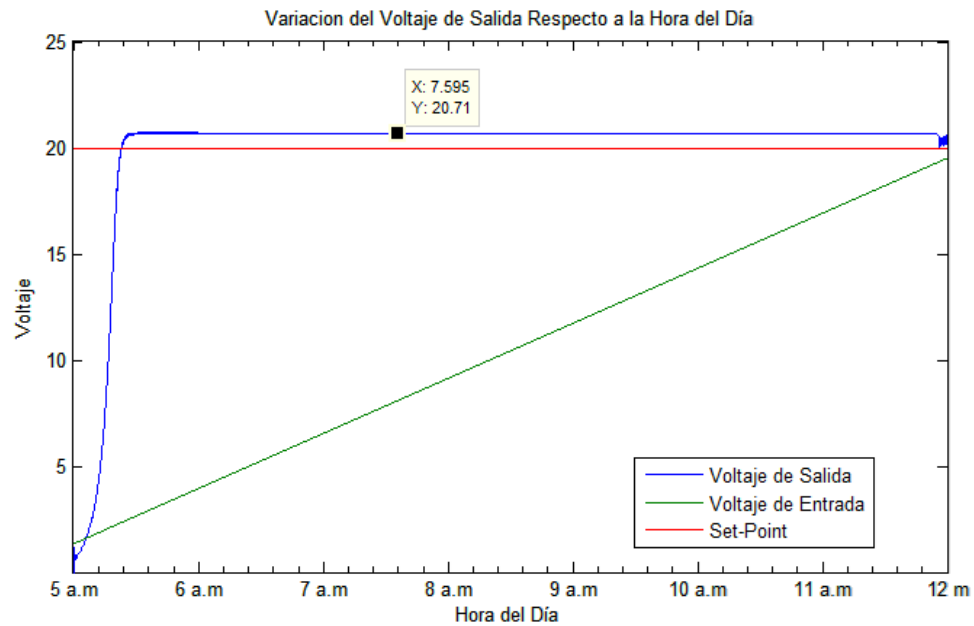
Para realizar la evaluación del controlador es necesario tener en cuenta las condiciones reales bajo las cuales operan los sistemas solares. En la **Figura 49** se observa que al aplicar un escalón o un cambio brusco se genera un pico de voltaje, pero en la realidad, los cambios en la radiación solar son progresivos, como se muestra en la **Figura 51**, por lo que se simula el sistema con una entrada de una rampa que emula el progreso de la radiación hasta llegar a una hora pico. El resultado de la simulación se muestra en la **Figura 52** en la cual se observa que no se producen sobrepicos por encima del Set-Point. A demás se puede deducir que mediante la aplicación del controlador al sistema es posible obtener un valor de  $\pm 8\%$  del valor de referencia, incluso, por fuera del rango de hora pico que equivale a el área sombreada de la **Figura 51**.

**Figura 51** Irradiancia a lo largo del día



**Fuente:** <http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/energia-solar-fotovoltaica>

**Figura 52 Voltaje Vs Hora del Día**

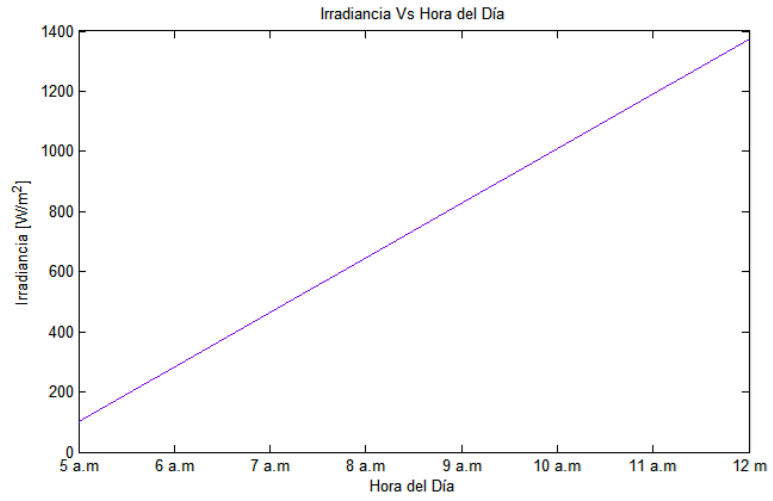


**Fuente:** Propia

El voltaje de entrada que se menciona en la **Figura 523** corresponde al voltaje que entrega el panel solar de 72 celdas en serie, como respuesta a una entrada de irradiancia que varía de forma lineal desde  $100 W/m^2$  hasta  $1370 W/m^2$ , **Figura 534**, lo cual corresponde a la tasa promedio de cambio en la radiación solar desde las 5 a.m hasta el mediodía.



**Figura 53 Valores de Simulación de la Irradiancia**



**Fuente:** Propia

## 6. CONCLUSIONES

- A partir de datos obtenidos de la simulación se concluye que un controlador diseñado por el método de cancelación de ceros para gobernar la frecuencia de conmutación de un Mosfet, en un convertidor DC/DC Tipo Boost es viable, debido a que cumple con las especificaciones mencionadas en la revisión bibliográfica.
- Se obtuvo un modelo matemático que describe el comportamiento de un convertidor DC/DC Elevador , el modelo matemático que se genero fue comparado con la salida de software de simulación de circuitos electrónicos que emulan las características físicas reales de los componentes, lo que permitió comprobar que el modelo es adecuado y describe de forma fiel el comportamiento del circuito.
- Se obtuvo un controlador que al ser implementado en el circuito de un convertido DC/DC elevador le permite al mismo, entregar un voltaje constante equivalente a una consigna o valor de referencia determinado, inclusive con poca radiación solar, lo cual se comprobó por medio de la simulación en la cual se aplica la radiación solar al modelo del panel solar obtenido.

## 7. BIBLIOGRAFIA

2013 WORLD ENERGY ISSUES MONITOR, (3: Junio, 2013: Londres, Reino Unido). Memorias Consejo Mundial de Energía. 40 p.

AMOROCHO CORTÉS, Enrique y OLIVEROS VILLAMIZAR, Germán. Apuntes Sobre Energía y Recursos Energéticos. 1 ed. Bucaramanga. Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB, 2000. ISBN 9589682111

ANNUAL ENERGY OUTLOOK 2012 U.S. WITH PROJECTIONS TO 2035 (3: Junio, 2012: Washington, EE.UU) Memorias Energy Information Administration (EIA). 252 p.

ARANDA HONRADO, José Manuel, Convertidor DC/DC para carga de batería con seguimiento de punto de carga óptimo para panel solar. Trabajo de Grado, Ingeniero técnico en Electrónica. Madrid. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Tecnología Electrónica.

ARTEAGA OROZCO, María Isabel. Control no Lineal de convertidores conmutado CC/CC: Análisis de prestaciones y verificación experimental, Tesis Doctoral. Cataluña. Universidad +politécnica de Cataluña. Doctorado en Automatización Avanzada y Robótica Noviembre 2006.

CASTILLO MIRANDA, Juan Pablo. Sistema Fotovoltaico para Aplicaciones Móviles de tracción eléctrica. Memoria Trabajo de grado. Ingeniero Civil Electricista. Santiago de Chile, Chile. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2008. 224p.

ELZINGA, David. *Et al.* (5: Septiembre, 2011: Paris, Francia). Memorias de Agencia Internacional de Energía para el foro del Sector Privado de las Naciones Unidas. 64 p.

FERNANDEZ BARRERA, Manuel. Energía Solar: Electricidad Fotovoltaica. Madrid, España: Liber Factory, 1990. 76p. ISBN 8499490816

GARCÍA JAIMES, Luis Eduardo. Control Digital, Teoría y Práctica, 3rd ed. Medellín: Politécnico Colombiano JIC, 2010.

GARCERÁ SANFELÍÚ, Gabriel, *et al.* Conversores Conmutados: Circuitos de Potencia y Control. Valencia, España: Editorial Universidad Politécnica de Valencia, 1998. ISBN 8477215715, 263 p.

GENERAR UN NUEVO IMPULSO, (2: junio, 2008: Londres, Reino Unido).Memorias Consejo Mundial de la Energía, 58p.

HERAS CELEMIN, María del Rosario. Fuentes de energía para el futuro. 1era ed. Ministerio de Educación Español. Madrid, España, 2008. <Aulas de verano, serie: Ciencias> ISBN 8436946758

MEINEL, Aden B. y MEINEL Marjorie P., Aplicaciones de la energía solar. Edición ilustrada. Barcelona, España: Reverte, 1982. 699 p. ISBN 8429141995

NEGRONI VERA, Juan José. Análisis y diseño de controladores para Inversores Multinivel en Sistemas Fotovoltaicos conectados a la Red, Tesis Doctoral, Doctor en Ingeniería Electrónica. Universidad Autónoma de Barcelona, Facultad de ingeniería. 2007. 140 p.

NATIONAL AERONAUTICS AN SPACE ADMINISTRATION NASA. [Online][Citado 14 de Agosto 2001] Sitio Web Oficial de la NASA. Disponible: <[http://www.nasa.gov/pdf/62227main\\_Sun\\_Lithograph.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/62227main_Sun_Lithograph.pdf)>

RAVELO J.A. *et al.* Control de Convertidor DC/DC para carga de Batería en Sistemas fotovoltaicos de Potencia. Trabajo de Grado. Tecnólogo en electrónica. Universidad de Valladolid, Departamento de Tecnología en electrónica. Valladolid, España.

RODRÍGUEZ CORTÉS, Hugo. *Et al.* Control de Seguimiento de la tensión de salida de un convertidos Boost. Trabajo de grado. Ingeniero Eléctrico. Universidad Autonoma de Nuevo León. Nuevo León, México

# ANEXOS

## ANEXO A.

Código para hallar el periodo de muestreo correcto para discretizar la planta. El código fue tomado de García Jaimes, Control Digital, Teoría y Práctica. Desarrollado para ser ejecutado en MatLab

### Código:

```
[nw, dw]=cloop(n, d, -1)
[mag, fase, w]=bode(nw, dw)
mag1=mag(1, 1);
mag2=0.707*mag1;
wc=interp1(mag, w, mag2, 'spline')
wmin=8*wc
wmax=12*wc
Tmin=2*pi/wmax
Tmax=2*pi/wmin
```

## ANEXO B.

Código desarrollado para realizar el modelado de la planta (Convertidor Boost)

```
%% modelo del convertidor Boost%%
clear all
clc
%% Parametro de la planta %%
% disp(['Por favor Introduzca los Siguentes paramtros de la planta']);
% L=input('El valor de la bobina es L=');
% C=input('El valor de capacitor es C=');
% Vg=input('el valor del voltaje no regulado de entrada Vg=');
% D=input('ciclo de dureza del PWM D=');
% R=input('Valor de la resistencia de carga R=')
Vg=15;
D=0.4;
L=2e-3;
C=10e-6;
R=100;

%% Obtencion del modelo de estado estable
% donde As Bs Cs y Ds son las matrices

As=[0 -(1-D)/L ; (1-D)/C -1/(R*C)]
Bs=[1/L 0 0; 0 -1/C 0]
Cs=[0 1; 1 0] % En esta matriz se selecciona si se controla corriente o
voltage
Ds=[0 0 0; 0 0 0 ] %matriz auxiliar

Vo=-Cs(1, :)*inv(As)*Bs(:, 1)*Vg
```

```

Ig=-Cs(2,:)*inv(As)*Bs(:,1)*Vg

%% Modelo de pequeña señal

a=[0 -(1-D)/L;(1-D)/C -1/R/C]
b=[1/L 0 Vo/L;0 -1/C -Ig/C]
c=[0 1]
d=[0 0 0]

% vectores
Entradas=['vg iz d'];
Salidas=['vo ig'];
Estados=['il vc'];

printsys(As,Bs,Cs,Ds,Entradas,Salidas,Estados)
disp('.....')
printsys(a,b,c,d,Entradas,Salidas,Estados)

%% funcion de transferencia
disp('funcion de transferencia Vo/d');
TFB=zpk(tf(ss(a,b(:,3),c,[0])))

```