



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE  
ALIMENTACIÓN BASADO EN ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA UN  
MEDIDOR DE VELOCIDAD VEHICULAR**

**AUTOR: BÁEZ ESPINOSA ALEX MAURICIO**

**DIRECTOR: DR. ARCOS AVILÉS, DIEGO GUSTAVO**

**SANGOLQUÍ**

**2018**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN BASADO EN ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA UN MEDIDOR DE VELOCIDAD VEHICULAR**” fue realizado por el señor *Báez Espinosa, Alex Mauricio* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 31 Agosto de 2018

Firma:

**Dr. Diego Arcos Avilés.**

**C.C. 171087944-4**



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Báez Espinosa, Alex Mauricio*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Dimensionamiento del sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica para un medidor de velocidad vehicular** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 31 Agosto de 2018

Firma

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Alex Báez Espinosa', is written over a horizontal dashed line.

Alex Báez Espinosa

C.C. 1722992508



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORIZACIÓN

Yo, *Báez Espinosa, Alex Mauricio* autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Dimensionamiento del sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica para un medidor de velocidad vehicular** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad

Sangolquí, 31 Agosto de 2018

Firma

Alex Báez Espinosa

C.C. 1722992508

**DEDICATORIA**

*A mi madre, una maestra que con su ejemplo, enseñanza y perseverancia sembró en mí y la juventud de su comunidad, los pilares para la búsqueda de la luz, conocimiento y persecución de los sueños.*

*Alex Mauricio Báez Espinosa*

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios, mis padres, mis queridos hermanos y amigos que estuvieron presentes en este camino que el destino nos ha colocado para cumplir y compartir las metas alcanzadas hacia el éxito de la vida.*

*Al Dr. Diego Arcos por su gran labor como director del proyecto y sus ideas que ayudaron a realizar el proyecto, a los ingenieros e investigadores de la rama de la ingeniería electrónica que compartieron su conocimiento para el desarrollo de esta investigación.*

*Alex Mauricio Báez Espinosa*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes del proyecto .....	2
1.2 Justificación e importancia.....	3
1.3 Alcance del proyecto.....	4
1.4 Objetivos .....	7
1.4.1 Objetivo General.....	7
1.4.2 Objetivos Específicos.....	7
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>8</b>
<b>DISEÑO DEL RADAR DE VELOCIDAD.....</b>	<b>8</b>
2.1 Introducción .....	8
2.2 Medidores de velocidad vehicular .....	8
2.3 Tipos de radares de velocidad .....	9
2.3.1 De acuerdo al tipo de sensor .....	9
2.4 Selección de componentes del radar de velocidad .....	12
2.4.1 Etapas que conforman el radar de velocidad .....	13
2.4.2 Selección del sensor de onda electromagnética (OEM).....	13
2.4.3 Selección de un computador de placa reducida .....	19
2.4.4 Selección de una cámara de video .....	24
2.4.5 Selección de un iluminador led infrarrojo.....	25
2.4.6 Selección de un módulo GSM/GPRS .....	26
2.4.7 Selección de un indicador de velocidad.....	28
2.5 Demanda de energía del radar de velocidad.....	29
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>33</b>
<b>DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN FOTOVOLTAICO.....</b>	<b>33</b>
3.1 Introducción .....	33
3.2 Energía solar .....	33
3.2.1 Irradiancia solar .....	34
3.2.2 Irradiación solar .....	34
3.3 Generador fotovoltaico .....	36

3.3.1	Celda fotovoltaica .....	36
3.3.2	Módulo fotovoltaico.....	37
3.4	Dimensionamiento del módulo fotovoltaico .....	38
3.4.1	Radiación solar en Quito.....	39
3.4.2	Energía total en corriente continua .....	40
3.4.3	Corriente diaria de carga.....	40
3.4.4	Corriente pico del sistema de alimentación .....	41
3.4.5	Número de módulos fotovoltaicos .....	42
3.5	Modelo matemático del módulo fotovoltaico .....	43
3.5.1	Modelo matemático para una celda fotovoltaica .....	43
3.5.2	Implementación del módulo fotovoltaico en Simulink.....	49
3.6	Convertidores de potencia DC-DC .....	51
3.6.1	Convertidor DC-DC tipo reductor .....	52
3.7	Dimensionamiento del convertidor DC-DC tipo reductor .....	53
3.7.1	Diseño del convertidor DC-DC tipo reductor .....	53
3.7.2	Implementación del convertidor DC-DC tipo reductor en Simulink.....	63
3.7.3	Función de transferencia del convertidor DC-DC tipo reductor.....	63
3.8	Controlador PID.....	66
3.8.1	Características del control PID .....	66
3.8.2	Diseño del controlador digital PID .....	67
3.8.3	Implementación del controlador PID y convertidor en Simulink .....	73
3.9	Seguidor de punto de máxima potencia (MPPT) .....	74
3.9.1	Características del algoritmo MPPT P&O.....	75
3.10	Implementación del algoritmo MPPT y controlador PID.....	77
3.11	Sistema de almacenamiento de energía.....	78
3.11.1	Tipos de baterías para sistemas fotovoltaicos.....	79
3.11.2	Niveles de carga de una batería.....	80
3.12	Dimensionamiento de la batería.....	81
3.12.1	Cálculo de capacidad de la batería.....	81
3.12.2	Selección de la batería .....	82
3.13	Modelo eléctrico de la batería .....	84
3.13.1	Circuito equivalente eléctrico .....	84

	<b>viii</b>
3.13.2 Ecuación estado de carga (SOC).....	86
3.13.3 Modelos físicos con Simscape .....	88
3.13.4 Librería para batería de litio en Simscape.....	89
3.13.5 Descarga de una celda de litio .....	90
3.13.6 Estimación de parámetros de elementos eléctricos.....	92
3.13.7 Proceso de modelamiento eléctrico .....	93
3.14 Diseño del sistema autónomo de almacenamiento.....	97
3.14.1 Sistema de baterías.....	97
3.14.2 Desarrollo del algoritmo de control .....	98
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>100</b>
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS.....</b>	<b>100</b>
4.1 Pruebas y resultados del sistema de almacenamiento .....	100
4.2 Pruebas y resultados del generador fotovoltaico.....	102
4.3 Pruebas y resultados del sistema de alimentación completo.....	105
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>108</b>
<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>108</b>
5.1 Conclusiones .....	108
5.2 Trabajos futuros .....	109
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>110</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Especificaciones técnicas del Radar Stationary Speed Sensor II</i> .....	14
<b>Tabla 2</b> <i>Especificaciones técnicas del Radar UMMR Automotive Type 42</i> .....	14
<b>Tabla 3</b> <i>Especificaciones técnicas del sensor OEM IcomSpeed V2.4</i> .....	15
<b>Tabla 4</b> <i>Consumo de energía del sensor OEM Icomspeed V2.4 Radar</i> .....	16
<b>Tabla 5</b> <i>Especificaciones técnicas del Radar AGD 331 Radar</i> .....	17
<b>Tabla 6</b> <i>Comparación consumo de energía de radares OEM investigados</i> .....	18
<b>Tabla 7</b> <i>Comparación de computadoras de placa simple</i> .....	23
<b>Tabla 8</b> <i>Especificaciones técnicas de la cámara Genius 312</i> .....	25
<b>Tabla 9</b> <i>Especificaciones técnicas del iluminador infrarrojo EC-ILIR80</i> .....	26
<b>Tabla 10</b> <i>Especificaciones técnicas del módulo SIM 900</i> .....	27
<b>Tabla 11</b> <i>Consumo de potencia de los dispositivos del medidor de velocidad</i> .....	30
<b>Tabla 12</b> <i>Consumo energético diario de los dispositivos del medidor de velocidad</i> .....	32
<b>Tabla 13</b> <i>Datos iniciales para el diseño del convertidor</i> .....	57
<b>Tabla 14</b> <i>Constantes obtenidas del diseño del convertidor</i> .....	63
<b>Tabla 15</b> <i>Variables para función de transferencia de convertidores DC-DC elementales</i> .....	64
<b>Tabla 16</b> <i>Datos iniciales para dimensionamiento de la batería</i> .....	81
<b>Tabla 17</b> <i>Batería RELION RB80 12V80AH</i> .....	83
<b>Tabla 18</b> <i>Costos del medidor de velocidad y sistema de alimentación</i> .....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Esquema del sistema autónomo de almacenamiento de energía .....	6
<b>Figura 2</b> Radar para aviso de velocidad .....	9
<b>Figura 3</b> Radar por visión artificial .....	10
<b>Figura 4</b> Radar por ultrasonido .....	10
<b>Figura 5</b> Radar por sensor de lazo inductivo.....	11
<b>Figura 6</b> Radar de efecto Doppler de la Policía .....	12
<b>Figura 7</b> Radar IcomSpeed V2.4.....	18
<b>Figura 8</b> Tarjeta Raspberry pi 3 .....	20
<b>Figura 9</b> Tarjeta ODROID X-U4 .....	21
<b>Figura 10</b> Función de los 8 cores de la tarjeta Odroid X-U4 .....	21
<b>Figura 11</b> Tarjeta UP Board Intel x5-z8350.....	22
<b>Figura 12</b> Cámara Genius 312.....	24
<b>Figura 13</b> Iluminador EC-ILIR80 .....	26
<b>Figura 14</b> Módulo GSM/GPRS SIM900.....	27
<b>Figura 15</b> Indicador de velocidad en leds .....	29
<b>Figura 16</b> Irradiación en un determinado día .....	35
<b>Figura 17</b> Semiconductores tipo P y N en celdas solares.....	36
<b>Figura 18</b> Movimiento de electrones.....	37
<b>Figura 19</b> Módulo PV tipo monocristalino .....	38
<b>Figura 20</b> Módulo PV tipo policristalino .....	38
<b>Figura 21</b> Mapa de Irradiación Global del Ecuador.....	39
<b>Figura 22</b> Especificaciones del Panel solar SHS150-36P .....	42

<b>Figura 23</b> Circuito eléctrico equivalente para celda solar .....	43
<b>Figura 24</b> Corriente de salida I del módulo PV en base al modelo matemático .....	45
<b>Figura 25</b> Corriente de saturación $I_s$ del diodo en Simulink .....	46
<b>Figura 26</b> Corriente de saturación $I_{rs}$ a STC.....	47
<b>Figura 27</b> Corriente $I_{ph}$ en Simulink.....	48
<b>Figura 28</b> Modelo matemático del módulo PV policristalino SHS150-36P .....	49
<b>Figura 29</b> Subsistema que contiene el modelo del módulo PV .....	49
<b>Figura 30</b> Gráficas PV del módulo PV .....	50
<b>Figura 31</b> Gráficas IV del módulo PV .....	50
<b>Figura 32</b> Esquema de un Convertidor DC-DC .....	51
<b>Figura 33</b> Convertidor DC-DC tipo reductor .....	52
<b>Figura 34</b> Circuito con interruptor cerrado .....	53
<b>Figura 35</b> Circuito con interruptor abierto .....	54
<b>Figura 36.</b> Formas de onda en modo de conducción continua.....	56
<b>Figura 37.</b> Modo conducción discontinua.....	57
<b>Figura 38.</b> Corriente en el condensador .....	61
<b>Figura 39.</b> Convertidor DC-DC tipo reductor en Simulink.....	63
<b>Figura 40.</b> Diagrama de polos y ceros de la planta .....	66
<b>Figura 41</b> Esquema de un controlador PID .....	67
<b>Figura 42</b> Esquema del controlador PID discreto para convertidor DC-DC .....	68
<b>Figura 43</b> Respuesta al escalón del convertidor DC-DC reductor .....	69
<b>Figura 44</b> Controlador PID discreto y convertidor DC-DC reductor.....	73
<b>Figura 45</b> Set-Point y Voltaje de salida del convertidor .....	74

<b>Figura 46</b> Curvas características de un panel solar .....	75
<b>Figura 47</b> Diagrama de flujo del MPPT P&O.....	76
<b>Figura 48</b> Sistema fotovoltaico con controlador PID basado en MPPT P&O .....	77
<b>Figura 49</b> Implementación de MPPT P&O en Simulink .....	77
<b>Figura 50</b> Sistema fotovoltaico con regulador MPPT P&O.....	78
<b>Figura 51</b> Zonas de trabajo en una celda.....	80
<b>Figura 52</b> Batería RELION RB80 12V80AH .....	83
<b>Figura 53</b> Modelos eléctricos: (a) Thevenin, (b) Impedancia (c) Runtime .....	84
<b>Figura 54</b> Modelo circuito equivalente .....	85
<b>Figura 55</b> Modelo eléctrico general .....	85
<b>Figura 56</b> Modelo eléctrico 1-RC .....	88
<b>Figura 57</b> Modelo eléctrico 1-RC con Simscape .....	89
<b>Figura 58</b> Directorio de Matlab de la librería LiBatteryElements .....	89
<b>Figura 59</b> Librería para modelo eléctrico 1-RC de celda de litio.....	90
<b>Figura 60</b> Descarga experimental de una celda de litio .....	91
<b>Figura 61</b> Caída de voltaje en una celda electroquímica de Litio .....	92
<b>Figura 62</b> Estimador de Parámetros .....	92
<b>Figura 63</b> Diagrama de flujo del estimador de parámetros .....	93
<b>Figura 64</b> Selección de parámetros para estimación .....	94
<b>Figura 65</b> Datos de corriente de descarga y voltaje de salida .....	94
<b>Figura 66</b> Voltaje experimental y voltaje simulado .....	95
<b>Figura 67</b> Iteraciones realizadas por el estimador .....	95
<b>Figura 68</b> Resultados de $E_m$ , $R_0$ , $R_1$ y $C_1$ .....	96

<b>Figura 69</b> Similitud entre simulación y experimento .....	96
<b>Figura 70</b> Modelo de batería de Litio 12V@80Ah .....	97
<b>Figura 71</b> Esquema del Sistema de Almacenamiento de Energía .....	98
<b>Figura 72</b> Esquema hipotético de la variación SOC en el tiempo de cada batería.....	99
<b>Figura 73</b> Flujograma del control On/Off .....	99
<b>Figura 74</b> Variación del SOC de cada batería para 96 horas .....	100
<b>Figura 75</b> Variación de voltaje en las celdas de cada batería.....	101
<b>Figura 76</b> Variación de voltaje en cada batería durante 96 horas .....	101
<b>Figura 77</b> Simulación del voltaje provisto hacia la carga .....	102
<b>Figura 78</b> Irradiación solar en el sistema fotovoltaico .....	103
<b>Figura 79</b> Voltaje y corriente del sistema basado en MPPT P&O.....	103
<b>Figura 80</b> Voltaje y corriente del sistema basado en PID y MPPT P&O .....	104
<b>Figura 81</b> Corriente provista por el sistema PV durante 96 horas .....	105
<b>Figura 82</b> Variación SOC en las baterías del sistema de almacenamiento .....	105
<b>Figura 83</b> Variación de voltaje en las baterías del sistema de almacenamiento .....	106
<b>Figura 84</b> Voltaje provisto para el medidor de velocidad vehicular .....	106

## RESUMEN

El presente proyecto presenta el dimensionamiento de un sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica para un medidor de velocidad vehicular, tradicionalmente conocido como radar de velocidad. Su principal objetivo, es dar a conocer los conocimientos y fundamentos que intervienen en el diseño de un medidor de velocidad vehicular. De acuerdo a las tecnologías disponibles ya sea en el mercado nacional como en el extranjero, se utilizan técnicas y dispositivos electrónicos para la construcción de un radar de velocidad vehicular a nivel nacional. Luego, se identifica el consumo energético que requieren los componentes del medidor de velocidad vehicular para establecer una carga que permita, dimensionar un sistema de generación fotovoltaico donde se aplican técnicas de control, electrónica de potencia y fundamentos de la energía fotovoltaica. El sistema de alimentación comprende de un sistema autónomo de almacenamiento de energía para suministrar automáticamente la energía que se necesita hacia el radar de velocidad. El análisis sobre el diseño del generador fotovoltaico, estudio del consumo energético del radar, simulaciones, pruebas y resultados se realizan con la herramienta SimPowerSystems de Simulink. Finalmente, se presenta un estudio técnico-económico para analizar la viabilidad de realizar la construcción de un medidor de velocidad vehicular con mano de obra nacional.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **RADAR DE VELOCIDAD**
- **SISTEMA FOTOVOLTAICO**
- **SEGUIMIENTO DE PUNTO MÁXIMO DE POTENCIA**
- **CONTROL PID**
- **CONVERTIDOR DC/DC TIPO REDUCTOR**

## ABSTRACT

The present project pretends to size a power supply system based in photovoltaic energy for a vehicles speed-meter, commonly known as speed radar. The main objective for making this thesis, is giving to know the knowledge and concepts that joins in the design of a vehicles speed radar. According to the available technologies either in the national market or in the international market, are utilized techniques and electronics devices for the construction of a speed radar of vehicles to national level. Then, the energy consumption required by the components of the speed radar will be identified to establish a load that allows to dimension a photovoltaic energy generation system where control techniques, power electronics and fundamentals of photovoltaic energy are applied. The power system includes an autonomous energy storage system to connect the energy that is needed toward the speed radar. The analysis on the design of the photovoltaic generator, study of the energy consumption of the radar, simulations, tests and results are performed in the Simulink SimPowerSystems tool. Also it will be make a study about economic to see the viability and cost that would imply the construction of a vehicles speed radar with national labor.

### KEYWORDS:

- **SPEED RADAR**
- **PHOTOVOLTAIC SYSTEM**
- **MPPT**
- **PID CONTROL**
- **DC/DC BUCK CONVERTER**

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, las aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos crecieron e instauraron rápidamente el camino para que la energía solar se convierta en un competidor de fuente de energía alternativa importante en todo el mundo (Gaëtan Masson, Marie .Latour, Manoël Rekinger, Ioannis-Thomas Theologitis, n.d.). Por un lado, en Europa en el año 2012 la energía fotovoltaica tuvo un crecimiento importante respecto a la década pasada, la capacidad de los sistemas de generación fotovoltaica instalados en ese año (2012) fue suficiente para cubrir la alimentación de energía eléctrica anual de más de 21 millones de hogares europeos (Satheesh Krishnamurthy, 2015). Adicionalmente, la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (EPIA) estimó en el año 2014 que la potencia total de los generadores fotovoltaicos instalados se habría duplicado o incluso triplicado en menos de 5 años con una capacidad de 430 (GW), y que la energía fotovoltaica cubrirá entre un 10 y 15 % de la demanda de energía eléctrica en Europa para el 2030 (Augusto, Paulino, & Mauricio, 2015). Por otro lado, en América Latina, los generadores fotovoltaicos se han implementado desde ya hace varios años, un ejemplo es Chile con el proyecto de construcción de la planta fotovoltaica Huatacondo cuya generación eléctrica se estima sea de 103 (MW) (Manríquez, 2013).

La energía fotovoltaica puede ser el soporte de varias aplicaciones, ya que promueve la rentabilidad al ser independientes del suministro de red eléctrica pública y trabajar al servicio de la comunidad (Wilhelm & Teske, 2011). Ejemplos aplicativos basados en energía fotovoltaica se tiene: Iluminación en zonas remotas, electricidad en estaciones de comunicaciones, electricidad en

eventos de desastre natural, estaciones de carga de batería para vehículos y energización fotovoltaica para medidores de velocidad vehicular (Satheesh Krishnamurthy, 2015).

### **1.1 Antecedentes del proyecto**

Los medidores de velocidad vehicular pueden ser alimentados por la red eléctrica pública o por sistemas fotovoltaicos, existen diferentes tipos de medidores de velocidad de acuerdo con la tecnología que se diseñaron, esto significa, que en cada tipo de medidor de velocidad vehicular se utilizan distintos componentes electrónicos, y a la vez estos componentes tienen diferentes consumos que están relacionados a la función que cumplen dentro del sistema radar. Por consiguiente la potencia total consumida en un determinado medidor de velocidad es diferente a otro medidor de distinta tecnología. Los tipos de tecnología de medidores más comúnmente conocidos son: lazo inductivo, microondas, visión artificial, ultrasonido (Huidobro, 2016).

Un elemento en común que tienen los medidores de velocidad vehicular en su mayoría, es el sistema de alimentación que se abastece de energía fotovoltaica. Los medidores de velocidad vehicular necesitan de un sistema de alimentación que abastezca su demanda energética, caso contrario el medidor de velocidad no cumpliría el trabajo de medir, mostrar y transmitir la velocidad a la que viajan los conductores en sus vehículos. Estos sistemas de alimentación basados en energía fotovoltaica deben cumplir ciertos retos como el aprovechamiento de la energía solar en un día despejado, almacenamiento de energía en un sistema de almacenamiento (simple o compuesto) para asegurar el suministro de energía (autonomía) en momentos de pérdida de la energía solar (e.g., noches, días nublados o lluviosos) (La Hora, 2015).

## 1.2 Justificación e importancia

Como se menciona en el apartado anterior, de acuerdo al tipo de tecnología, los medidores de velocidad pueden utilizar diferentes componentes en su hardware, lo que implica que el consumo de potencia en el hardware de los distintos tipos de tecnologías de los medidores puede variar.

En la actualidad gran parte de los medidores de velocidad vehicular trabajan con sistemas de alimentación basados en energía fotovoltaica, puesto que estos medidores se encuentran en su mayoría instalados en sectores perimetrales de la ciudad o lugares remotos de las carreteras que no cuentan con la red de suministro eléctrico público (MotoYCasco, 2015). Por este motivo resulta primordial que el sistema de alimentación de energía hacia el medidor de velocidad esté siempre disponible para su correcto funcionamiento (radarsign, 2017).

La importancia del sistema de alimentación como componente fundamental de los medidores de velocidad vehicular, motiva a realizar el dimensionamiento del sistema de alimentación que cumpla con los desafíos que se presentan en un ambiente externo y se entregue la energía suficiente hacia el medidor de velocidad. En el presente proyecto el medidor de velocidad también será diseñado de acuerdo al tipo de tecnología que se emplee.

Un medidor de velocidad vehicular puede manifestar un correcto funcionamiento al conectarse a una fuente de alimentación en la red eléctrica pública, sin embargo, el funcionamiento de los componentes del radar pueden no rendir de manera eficiente, sin una administración autónoma de energía que garantice el suministro de alimentación hacia el medidor de velocidad vehicular.

Los desafíos que debe cumplir el sistema de alimentación fotovoltaica son la extracción máxima de energía en el módulo fotovoltaico, la autonomía en el sistema de almacenamiento de energía en

baterías con una conmutación automática y control de abastecimiento de energía hacia el medidor de velocidad.

El correcto dimensionamiento del sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica conlleva a la selección apropiada de los diferentes elementos que se utilizan en su diseño, estos son: el módulo fotovoltaico, baterías, convertidores y controladores, que se requieren para la captación de energía del sistema de alimentación y se suministre hacia el medidor de velocidad.

Por un lado el proyecto busca viabilizar el desarrollo de un medidor de velocidad vehicular que pueda ponerse en ejecución en el servicio del control de tráfico en el país, además mostrar el coste económico que puede incurrir el desarrollo de un medidor a nivel nacional.

Por otro lado el proyecto pretende alinearse a los objetivos y bases del “Plan Nacional del Desarrollo 2017 – 2021. Toda una vida” que se dicta en el actual gobierno, uno de los objetivos es impulsar la productividad y competitividad en la economía del país para su crecimiento y sostenibilidad, y esto se lograría si se impulsa el crecimiento de la generación eléctrica del país por medio de las energías renovables. Por lo tanto el presente proyecto se adapta a estas iniciativas enmarcadas por el plan, puesto que se utiliza un recurso energético renovable que es la energía solar, además se promueve el desarrollo de un producto que es el medidor de velocidad vehicular que puede adentrarse dentro de la economía ecuatoriana (SENPLADES, 2017).

### **1.3 Alcance del proyecto**

El alcance del proyecto es realizar el dimensionamiento y simulación del sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica, para un medidor de velocidad vehicular. Para el

diseño del medidor de velocidad se tendrá en cuenta las siguientes etapas: adquisición de señales, procesamiento digital de señales, transmisión de datos, actuadores (visualizador de velocidad).

Para tal efecto del diseño, se identificarán los diferentes equipos y componentes que conforman cada una de las etapas del medidor de velocidad y se realizará un estudio del consumo energético (potencia, voltaje y corriente) que demandan cada uno de los equipos requeridos en las etapas del medidor.

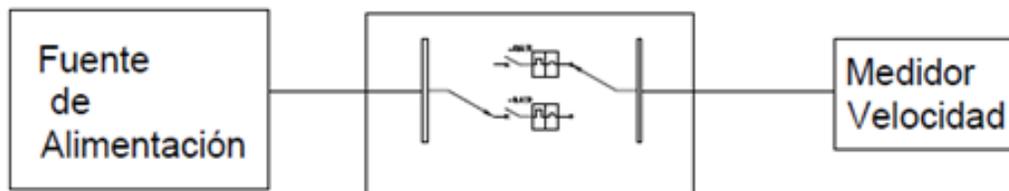
Una vez determinado el consumo energético de todo el sistema de medición de velocidad, se realizará el correcto dimensionamiento del sistema de alimentación. Para lo cual, se desarrollará el modelo matemático del módulo fotovoltaico, el diseño de un convertidor de potencia DC/DC tipo reductor y el diseño de un controlador PID basado en un regulador de carga MPPT (Seguimiento de punto máximo de potencia), el cual es requerido por el convertidor DC/DC para que el módulo fotovoltaico trabaje en el punto máximo de potencia y se extraiga al máximo la energía que se recibe el módulo fotovoltaico, luego se diseñará un sistema autónomo de almacenamiento de energía en baterías.

Una vez obtenido el diseño del convertidor DC/DC tipo reductor se adaptará la tensión de salida del módulo fotovoltaico con la entrada del sistema de almacenamiento, lo cual esta última se simulará con un modelo eléctrico de batería que describe su estado de carga, denominado SOC (i.e., State-of-Charge), el cual mide el nivel de energía de la batería.

El sistema autónomo de almacenamiento de energía tendrá un escenario donde se observará el nivel de carga de las baterías con la ecuación de estado de carga. El escenario se muestra en la Figura 1 que comprende dos baterías, se observa que la batería inferior está desconectada del

medidor de velocidad y está conectada a la fuente de alimentación dado que su estado de carga es bajo, mientras que la batería superior está conectada al medidor de velocidad y desconectada de la fuente de alimentación dado que su estado de carga es alto, bajo este hecho se realizará el diseño del sistema de control para la autonomía del sistema de almacenamiento.

El dimensionamiento y simulación del sistema de alimentación fotovoltaico, convertidor DC-DC reductor, sistema autónomo de almacenamiento y estudio del consumo energético del medidor de velocidad serán realizados con la herramienta de SimPowerSystems de Matlab donde se obtendrán todas las pruebas y resultados.



**Figura 1.** Esquema del sistema autónomo de almacenamiento de energía

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

Dimensionar un sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica para un medidor de velocidad vehicular.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar el consumo energético requerido por los elementos electrónicos que conforman un medidor de velocidad vehicular para calcular las dimensiones del sistema de alimentación.
- Diseñar el sistema de alimentación con el convertidor DC/DC tipo reductor, con un controlador MPPT (Perturbar y Observar) para sustraer al máximo la energía del módulo fotovoltaico y un controlador PID para regular el voltaje de salida del convertidor DC-DC reductor.
- Analizar el sistema autónomo de almacenamiento de energía para evaluar el rendimiento de suministro hacia el medidor de velocidad vehicular, mediante el escenario comprendido por las dos baterías.
- Simular el sistema de alimentación y almacenamiento de energía fotovoltaica hacia el medidor de velocidad vehicular, para obtener un análisis de resultados que beneficiarán en la implementación real del sistema.

## CAPÍTULO 2

### DISEÑO DEL RADAR DE VELOCIDAD

#### 2.1 Introducción

En este capítulo se presenta los fundamentos teóricos que son necesarios conocer para el desarrollo del proyecto. Dentro de estos fundamentos se presenta información acerca de la clasificación tecnológica que tienen los radares de velocidad vehicular. Luego, con una noción sobre la estructura de los radares, se procede a seleccionar los componentes electrónicos para conformar un radar de velocidad que se dimensiona en una propuesta de diseño. Por último, se determina el consumo energético global de todo el sistema electrónico del medidor de velocidad vehicular, para realizar en el siguiente capítulo el dimensionamiento del sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica.

#### 2.2 Medidores de velocidad vehicular

Los medidores de velocidad vehicular son también conocidos como radares de velocidad vehicular o radares de tráfico que están presentes en las vías públicas o carreteras con el fin de que se cumplan las leyes de tránsito por parte de los conductores. Dentro de las funciones que realiza un radar de tráfico se pueden encontrar las siguientes: identificar un vehículo que excede el límite de velocidad, notificar a los conductores la velocidad a la que circulan para prevención de accidentes (ver Figura 2), determinar vehículos que comenten infracciones, conteo y clasificación de vehículos, entre otros. En general los radares de tráfico están para la contribución de la seguridad vial y ciudadana.



**Figura 2.** Radar para aviso de velocidad  
Fuente: (Juan Ingol Valdivieso, 2015)

## 2.3 Tipos de radares de velocidad

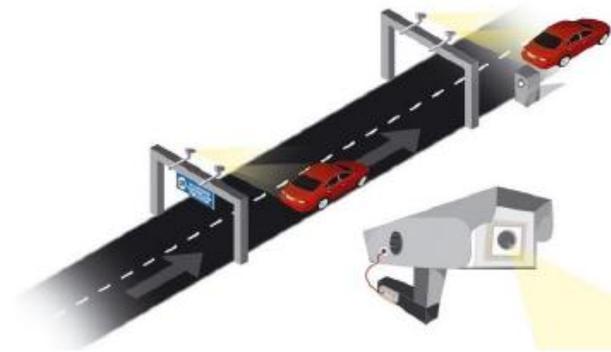
Existe una diversidad tecnológica de los radares de velocidad que se han desarrollado hasta la actualidad, ya sea por la funcionalidad que cumple, el tipo de instalación o el tipo de sensor para adquirir parámetros que el radar necesita (Huidobro, 2016; MotoYCasco, 2015). Por esto a continuación se conocerá una clasificación resumida de los tipos de radares de velocidad que se han desarrollado e instalado.

### 2.3.1 De acuerdo al tipo de sensor

- **Radar por visión artificial**

Se basa en el procesamiento de imágenes obtenidas por una cámara que se instala en los tramos de la carretera y graba el vehículo en tiempo real como se explica en la Figura 3. El radar contiene una unidad de procesamiento (CPU) donde se utilizan algoritmos que determinan cambios en el fondo de la imagen. La velocidad se determina por el cambio de la posición del vehículo en imágenes sucesivas en función del tiempo (MotoYCasco, 2015). Una ventaja adicional de la

tecnología de visión artificial es que también se pueden identificar las placas vehiculares de los vehículos que exceden la velocidad límite (Rosero Prado, 2015).



**Figura 3.** Radar por visión artificial  
Fuente: (MotoYCasco, 2015)

- **Radar por sensor de ultrasonido**

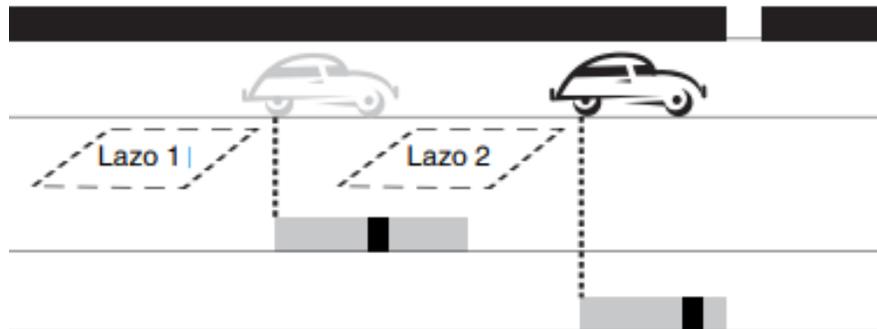
Este radar emite ondas de ultrasonido de forma perpendicular sobre la carretera, la frecuencia de las ondas de ultrasonido oscila entre 25 (kHz) a 50 (kHz), que están por encima de las frecuencias audibles. La velocidad de un vehículo se determina por el tiempo que tarda la onda en retornar, desde el pavimento o del vehículo cursante (MotoYCasco, 2015). En la Figura 4 muestra un ejemplo del radar por ultrasonido.



**Figura 4.** Radar por ultrasonido  
Fuente: (MotoYCasco, 2015)

- **Radar por sensor lazo inductivo**

Este tipo de radar se basa en el principio de inducción electromagnética, en la Figura 5 se muestra la implementación de este tipo de radar. Como se observa, se realizan unos cortes en forma de cuadrados de 2 (m) en el pavimento, se entierra una bobina en estos cortes y luego se rellena el piso. Al pasar un vehículo, su masa metálica induce una corriente en la bobina, lo que interpreta el paso de un vehículo, de esta manera al tener dos bobinas enterradas se puede calcular la velocidad con la distancia que recorre el vehículo entre dos puntos, que son las bobinas, respecto al tiempo, esto quiere decir  $v = d / (t_2 - t_1)$ . Este método también sirve para medir la distancia de un vehículo y clasificarlo en si es ligero o pesado (Carlo Gavazzi, 2009; Fuel Portilla, 2009; Huidobro, 2016).



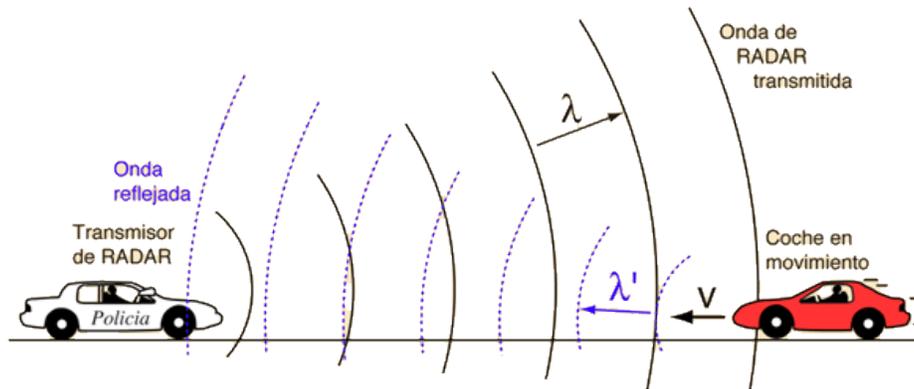
**Figura 5.** Radar por sensor de lazo inductivo  
Fuente: (Carlo Gavazzi, 2009)

- **Radar por microondas**

Los radares microonda emiten ondas electromagnéticas a altas frecuencias, entre 220 (MHz) y 35 (GHz) (Skolnik, 1981). Estos radares utilizan el principio del efecto Doppler sobre las ondas para determinar la velocidad de los vehículos, por ejemplo, si se emite una onda en dirección del desplazamiento del vehículo, la onda que se refleja hacia el radar tiene un cambio de longitud de onda que es proporcional a la velocidad del vehículo, (Huidobro, 2016; M. Olmo R. Nave, 2000),

el efecto Doppler se explica en la Figura 6 donde se observa que el radar emite una onda hacia el vehículo y esta retorna con una longitud de onda diferente, con la cual puede calcularse la velocidad del vehículo.

Existen sensores exclusivamente para cumplir la función de medir la velocidad de un vehículo en base al efecto Doppler, estos sensores tienen el nombre de sensores de onda electromagnética (OEM), que emiten energía, captan de nuevo esa energía que retorna y luego procesan las señales para calcular la velocidad del vehículo.



**Figura 6.** Radar de efecto Doppler de la Policía  
Fuente: (M. Olmo R. Nave, 2000)

## 2.4 Selección de componentes del radar de velocidad

En esta sección se describen los diferentes componentes electrónicos que se seleccionan para conformar un radar de velocidad vehicular. El estudio se basa en un radar del tipo microonda, en el que se agregan componentes de hardware que son usados para realizar visión artificial, lo cual serviría para actividades como la detección de placas de vehículos que exceden de velocidad. Además se adiciona una etapa de transmisión de datos y un visualizador de velocidad.

### 2.4.1 Etapas que conforman el radar de velocidad

El radar de velocidad vehicular se divide en cuatro etapas que cumplen con una función específica, cada etapa contiene los dispositivos de hardware necesarios para realizar ciertas tareas.

- Etapa de adquisición de señales: sensor de onda electromagnética (OEM), cámara de video Genius 312.
- Etapa de procesamiento digital de señales: tarjeta Odroid X-U4, microcontrolador PIC18F23K22.
- Etapa de transmisión de datos: módulo GPRS/GSM Sim900
- Etapa de actuadores: iluminador led infrarrojo EC-ILIR80, indicador de velocidad (display).

### 2.4.2 Selección del sensor de onda electromagnética (OEM).

Se realizó una investigación en el mercado global sobre los radares por microonda o sensores OEM. Estos sensores pueden ser instalados en radares de postes, pórticos o instalaciones de remolque. Existen diferentes marcas y patentes de diseño por parte de las empresas que fabrican los sensores OEM, sin embargo la mayoría de estos radares operan en la banda K a 24.125 (GHz). Ejemplos de estos radares se tienen a continuación.

- **Stationary Speed Sensor II**

Este radar pertenece a la empresa estadounidense STALKER, su ventaja es que posee puertos de comunicación serial para transferencia de información a un microcontrolador o unidad de procesamiento (“Stalker Stationary Speed Sensor II,” 2018). A continuación sus detalles en la tabla 1.

**Tabla 1***Especificaciones técnicas del Radar Stationary Speed Sensor II*

<b>RENDIMIENTO Y COMUNICACIÓN</b>	
Máximo rango de medición	Hasta a 400 m
Mínima velocidad	1.6 km/h
Máxima velocidad	321 km/h
Precisión de velocidad	+/- 0.8 km/h
Tipos de comunicación serial	RS-232
	RS-485 half & full duplex
Tasa de baudios	9.6k a 921.6 baudios
<b>MICROONDAS</b>	
Potencia de transmisión	100 mW
Frecuencia de Operación	24.125 GHz
Frecuencia de estabilidad	100 MHz
<b>ALIMENTACIÓN</b>	
Voltaje	12 VDC
Corriente	Transmisión On: 85 mA
	Transmisión Off: 40 mA
Potencia de consumo	< 1 W

Fuente: ("Stalker Stationary Speed Sensor II," 2018)

- **UMMR Automotive Type 42**

Este radar proviene de la empresa Alemana smartmicro, que es un radar con el que se realiza detección de velocidad y posición de vehículos a la vez en varios carriles (Smartmicro, n.d.). Sus especificaciones técnicas se detallan a continuación.

**Tabla 2***Especificaciones técnicas del Radar UMMR Automotive Type 42*

<b>RENDIMIENTO Y COMUNICACIÓN</b>	
Máximo rango de medición	Hasta a 340 m
Mínima velocidad	5 km/h
Máxima velocidad	300 km/h
Mínimo rango de medición	1.5 m

**CONTINÚA**



Precisión de velocidad	+/- 1 Km/h
Tipos de comunicación	RS-485 half & full duplex 10/100 Ethernet
Tasa de baudios	
<b>MICROONDAS</b>	
Potencia de transmisión	<20 Db
Frecuencia de Operación	24...24.5 GHz
Frecuencia de estabilidad	250 MHz
<b>ALIMENTACIÓN</b>	
Voltaje	13 Vdc hasta 32 Vdc
Corriente	1 A
Potencia de consume	12 W

Fuente: (Smartmicro, n.d.)

- **IcomSpeed V2.4 Radar.**

El radar IcomSpeed V2.4 es de fabricación belga y es distribuido por la empresa española Quadrex S.A. De acuerdo a la información técnica proporcionada por el fabricante, el radar sirve para trabajar con un indicador para mostrar la velocidad del vehículo (Icoms Detections, 2018). Sus especificaciones técnicas se detallan a continuación.

**Tabla 3**

*Especificaciones técnicas del sensor OEM IcomSpeed V2.4*

<b>RENDIMIENTO Y COMUNICACIÓN</b>	
Máximo rango de medición	Vehículos livianos: 120 m Vehículos pesados 250 m
Mínima rango de medición	1.5 m
Precisión de velocidad	98 %
Tipos de comunicación	RS-485 half & full duplex 10/100 Ethernet
Tasa de baudios	9600 a 57600 baudios
<b>MICROONDAS</b>	
Potencia de transmisión	<5 mW

**CONTINÚA**



Frecuencia de Operación	24...24.125 Ghz
<b>ALIMENTACIÓN</b>	
Voltaje	5.5 a 18 Vdc
Corriente	Ver Tabla 4
Potencia de consumo	Ver Tabla 4

Fuente: (Icoms Detections, 2018)

En la tabla 4 se muestra cuanta potencia que consume el sensor IcomSpeed de acuerdo al número de vehículos que detecta en la vía.

**Tabla 4**

*Consumo de energía del sensor OEM Icomspeed V2.4 Radar*

Número de detecciones por segundo	Consumo (mA @12Vdc)	Potencia de consumo
0.4	6	72 mW
1	8	96 mW
2	10.3	123.6 mW
4 (default)	15.7	188.4 mW
6	20.3	243.6 mW
8	23.3	279.6 mW
10	26.7	320.4 mW
continuamente	65.3	783.6 mW

Fuente: (Icoms Detections, 2018)

De acuerdo a las especificaciones técnicas, el sensor tiene un bajo consumo de potencia al no detectar ningún vehículo, sin embargo al momento de detectar vehículos la potencia de consumo se incrementa a medida que el número de vehículos aumenta.

- **AGD 331 Radar**

Este sensor proviene de la empresa alemana AGD Systems, cuya gama de sensores tienen una alta innovación al complementar visión artificial y de realizar tareas extras como conteo y clasificación de vehículos. Sin embargo el radar AGD 331 se asemeja al radar IcomSpeed al ser un

sensor OEM (AGD Intelligent Traffic Systems, 2016). A continuación en la tabla 5 las especificaciones técnicas.

**Tabla 5**

*Especificaciones técnicas del Radar AGD 331 Radar*

<b>RENDIMIENTO Y COMUNICACIÓN</b>	
Máximo rango de medición	180 m
Mínimo rango de medición	Ajustable
Máxima velocidad	160 Km/h
Mínima velocidad	11 Km/h
Precisión de velocidad	> 93 %
Tipos de comunicación	RS-485 half & full duplex
Tasa de baudios	115200 baudios
<b>MICROONDAS</b>	
Potencia de transmisión	<100 mW
Frecuencia de Operación	24.200 GHz
<b>ALIMENTACIÓN</b>	
Voltaje	5.5 a 15 Vdc
Corriente	15mA @ 12 Vdc
Potencia de consumo max	0.6W @ 12Vdc

Fuente: (AGD Intelligent Traffic Systems, 2016)

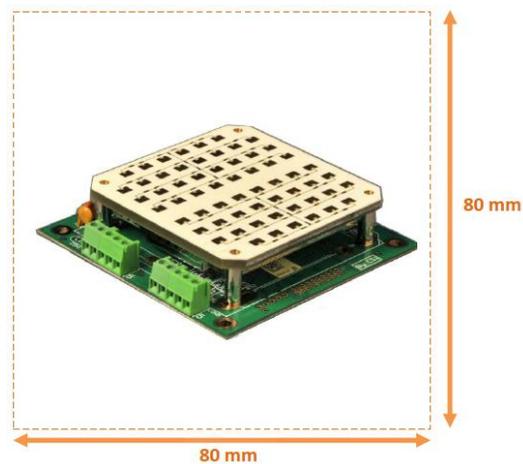
- **Comparación de sensores OEM**

Se realizó una comparación del consumo de potencia de los radares OEM investigados. Para seleccionar el dispositivo adecuado que se podría utilizar para el diseño del medidor de velocidad vehicular a nivel nacional.

**Tabla 6***Comparación consumo de energía de radares OEM investigados*

ALIMENTACIÓN	Stationary Sensor II	Speed UMMR Type 42	Automotive IcomSpeed Radar V2.4	AGD 331 Radar
Voltaje	12 VDC	13 Vdc a 32 Vdc	5.5 a 18 Vdc	5.5 a 15 Vdc
Corriente	Trans. On: 85 mA Trans. Off: 40 mA	1 A	26.7 mA (consumo max)	15mA @ 12 Vdc
Potencia	< 1 W	12 W	320.4 mW (consumo max)	0.6W @ 12Vdc

De acuerdo a la tabla 6 se seleccionó el radar IcomSpeed V2.4 que es el que se aprecia en la Figura 7, debido a que se tiene mayores especificaciones sobre el consumo de corriente en función del número de vehículos detectados, la ventaja de este radar es el consumo de potencia menor a 1 (W), cuyo valor se tomará en cuenta para el posterior dimensionamiento del sistema de alimentación fotovoltaica.

**Figura 7.** Radar IcomSpeed V2.4

Fuente: (Icoms Detections, 2018)

### 2.4.3 Selección de un computador de placa reducida

Un computador de placa reducida se conoce en inglés como *Single-board computers*, las cuales son computadoras embebidas en una tarjeta. En el diseño del medidor de velocidad se había propuesto realizar actividades de visión artificial, como obtener la placa de aquel vehículo que exceda la velocidad. Para realizar esto se necesita de una tarjeta computadora donde se implementan los algoritmos de procesamiento de imagen y una cámara de video que realiza adquisición de imágenes.

Existen varias tarjetas en el mercado mundial por lo que se investigó y analizó los siguientes opciones: **Raspberry pi 3**, **Odroid X-U4**, **Intel Atom x5-Z8350**, que sirven para implementar los algoritmos de visión artificial y procesar la imágenes adquiridas por la cámara.

- **Raspberry pi 3.**

Raspberry pi 3 es un computador de placa simple (i.e., Single-Board Computer) proveniente de la Fundación Raspberry Pi fundada en mayo del 2009 por un grupo de profesores, académicos y entusiastas de la Universidad de Cambridge. Esta tarjeta se muestra en la Figura 8.

El software de este mini computador es abierto (open source) y se puede correr un sistema operativo GNU/Linux (Debian, Fedora, Arch Linux) sobre una arquitectura ARM de 64 bits, es decir una arquitectura RISC (i.e., Reduced Instruction Set Computer), el cual utiliza una cantidad menor de transistores que conlleva a una reducción de costes, disipación de calor y consumo de energía, en general un procesador ARM es ideal para aplicaciones de baja potencia (“¿Qué es Raspberry PI y para qué sirve?,” 2013).

La arquitectura ARM se utiliza bajo permisos y una de las compañías que utiliza la arquitectura es la empresa estadounidense Broadcom, la cual fabrica los dispositivos, microprocesadores, SoC (System on Chip) y unidades de procesamiento para la tarjeta raspberry.

Además el sistema operativo Debian tiene una versión adaptativa particular para Raspberry que se denomina Raspbian. La ventaja de esta tarjeta es el alto índice de participantes para el soporte técnico y la difusión de información para su manejo.



**Figura 8.** Tarjeta Raspberry pi 3  
Fuente: (“¿Qué es Raspberry PI y para qué sirve?,” 2013)

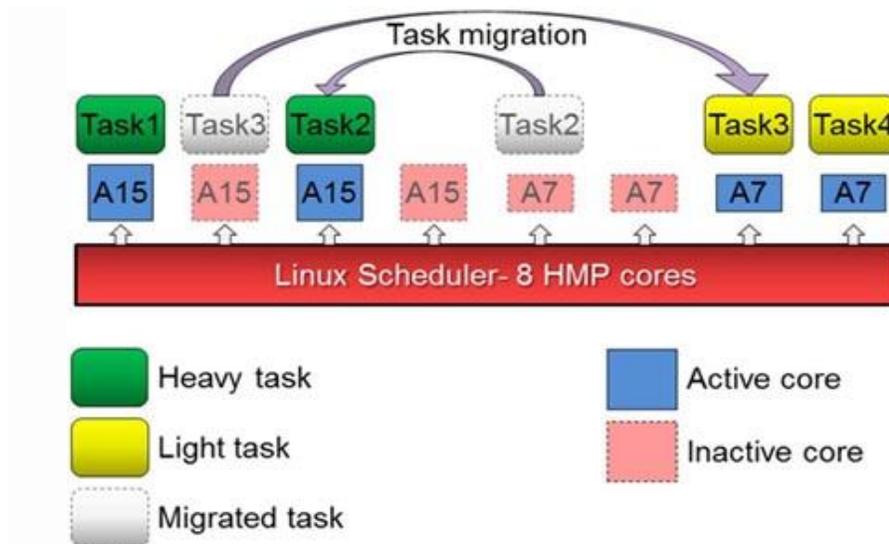
- **Odroid X-U4**

Esta tarjeta como se presenta en la Figura 9, es una nueva generación de dispositivos de computación más potentes y eficientes en energía para el hardware. Es un dispositivo de software libre que puede correr varias plataformas de Linux como Ubuntu 16.04 como también Android 4.4 KitKat, 5.0 Lollipop y 7.1 Nougat (ODROID, 2017).



**Figura 9.** Tarjeta ODROID X-U4  
Fuente: (ODROID, 2017)

El diseño de esa plataforma se basa en los bosquejos de multitarea de la computación heterogénea (Heterogeneous Multi-Processing) como se indica en la Figura 10, dentro de la arquitectura se comprende de 8 cores que conforman su System on Chip, que se dividen en 4 núcleos ARM Cortex-A15 y 4 núcleos ARM Cortex-A7, con los cuales se obtiene mayor velocidad de procesamiento de acuerdo a los benchmark (bancos de prueba) utilizados en esta tarjeta. Con esta arquitectura, las tareas se dividen para los 8 procesadores que posee esta tarjeta (ODROID, 2017).



**Figura 10.** Función de los 8 cores de la tarjeta Odroid X-U4  
Fuente: (ODROID, 2017)

- **Intel Atom x5-z8350**

Esta computadora fue creada por Intel en el año 2015 y se muestra en la Figura 11, las tarjetas se conocen como tarjetas UP-Board, que tienen instalada un System on Chip que es el Intel Atom x5-z8350. La capacidad de cómputo de esta tarjeta es mayor respecto a una tarjeta Raspberry pi 3, puesto que tiene una memoria RAM más allá de los 2 (GByte). Además utiliza memorias caché en cada uno de los 4 cores o procesadores para la aceleración del procesamiento (Intel, 2015).

La alimentación requerida de esta tarjeta es 5 (Vdc) con una corriente de 3 (A), además incorpora la tarjeta gráfica: *Intel HD 400 Graphics*, que lo hace ideal para el manejo de un software de OpenGL y OpenCL en el procesamiento digital de imágenes (up-board.org, 2017).



**Figura 11.** Tarjeta UP Board Intel x5-z8350

Fuente: (Intel, 2015)

- **Comparación de computadoras de placa reducida**

A continuación en la tabla 7. Se realiza una comparación de las tres tarjetas computadoras para seleccionar una en el diseño del medidor de velocidad vehicular.

**Tabla 7***Comparación de computadoras de placa simple*

	<b>Raspberry pi 3</b>	<b>ODROID X-U4</b>	<b>Intel Atom x5-z8350</b>
<b>Fuente de alimentación</b>	5V @ 2A DC	4.8Volt ~ 5.2Volt 4 A	5V DC-in @ 3A
<b>Procesador</b>	Broadcom BCM2837 64-bit quad-core ARM Cortex-A53 ARMv8	ARM® Cortex™- A15 Quad 2.0GHz/ Cortex™-A7 Quad 1.4GHz	Intel® Atom™ x5 Z8350 Processor 64 bit quad-core.
<b>Velocidad</b>	1.2 GHz	2 GHz/1.4 GHz	1.92GHz
<b>RAM</b>	1 GB	2 GB	4 GB
<b>GPU</b>	VideoCore IV a 400MHz	Mali-T628 MP6: 6 @ 600 MHz	Intel® HD 400 Graphics up to 500MHz
<b>Almacenamiento</b>	microSD	microSD	64GB eMMC
<b>Ethernet</b>	Fast Ethernet 100Mbps	Fast Ethernet 100Mbps	1Gb Ethernet (full speed) RJ-45
<b>Wi-Fi</b>	<b>802.11n</b>	USB IEEE 802.11 ac/b/g/n	NO
<b>Video</b>	HDMI 1.4	HDMI 1.4 <sup>a</sup>	HDMI
<b>GPIO</b>	40 pin GPIO/UART/ I2C/ I2S	30 pin GPIO/UART/ I2C/ I2S/ADC	40 pins GPIO General Purpose
<b>Sistemas Operativos</b>	GNU/Linux <b>Windows 10 IoT</b>	Ubuntu 16.04/ Android 4.4.2	Windows 10, Linux (Ubuntu), Android.

Se seleccionó la tarjeta ODROID X-U4, por la gran capacidad de procesamiento que posee debido a los 8 cores, aunque la tarjeta Intel Atom x5-z8350 también tiene una gran capacidad de procesamiento, la tarjeta ODROID X-U4 tiene más cantidad de cores que la tarjeta Intel, por lo tanto si se utilizan algoritmos de mayor complejidad para el procesamiento de imágenes o se adquieren imágenes de elevada resolución, entonces la tarjeta ODROID X-U4 puede ayudar en la velocidad de cómputo para la detección de placas vehiculares.

Por otro lado la tarjeta ODROID X-U4 requiere de una fuente de alimentación de 20 W, una exigencia de potencia un poco mayor respecto a las otras tarjetas, sin embargo mediante la fuente de alimentación fotovoltaica, comprendida por un sistema autónomo de almacenamiento y provisión de energía, esta tarjeta computadora tendrá la potencia necesaria para realizar su trabajo.

#### 2.4.4 Selección de una cámara de video

De acuerdo con la investigación de detección placa de vehículos (Rosero Prado, 2015), se había utilizado una cámara de 1280x720 (píxeles). En los radares de visión artificial para detectar infracciones generalmente se utiliza una cámara de hasta 5 (Megapíxeles) en HD (Simec, n.d.). En la propuesta de diseño el límite máximo de píxeles que debe tener una cámara será de hasta 2 (Megapíxeles), con el objetivo de no ralentizar el cómputo que la tarjeta ODROID X-U4 realiza sobre las imágenes adquiridas, pues si la imagen es muy pesada, al aplicar los algoritmos de reconocimiento de placa vehicular, el costo computacional puede incrementarse en la tarjeta y con esto se genera más consumo de potencia (Cañadas Betancourt & Haro Figueroa, 2011).

La cámara a utilizar será una Genius 312 como se observa en la Figura 12, sus características se indican en la tabla 8.



**Figura 12.** Cámara Genius 312  
Fuente: (“Genius Eye 312 Specs,” 2016)

**Tabla 8***Especificaciones técnicas de la cámara Genius 312*

<b>Sensor</b>	CMOS
<b>Resolución (video)</b>	640x480
<b>Matriz</b>	0.3 Megapíxeles
<b>Resolución (foto)</b>	640x480; 1280x1024
<b>Frecuencia FPS</b>	30 Hz
<b>Resolución interpolada en megapíxeles (foto)</b>	1.3 Megapíxeles
<b>Conexión</b>	USB 2.0
<b>Fuente de alimentación</b>	5V @ 90~125mA
<b>Consumo de potencia</b>	< 1W

Fuente: Fuente: (“Genius Eye 312 Specs,” 2016)

#### 2.4.5 Selección de un iluminador led infrarrojo

La identificación de placas de vehículos en un horario nocturno, será imposible con solo utilizar la cámara, por lo que se necesita de la incorporación de un dispositivo de iluminación. El propósito de realizar iluminación en la adquisición de imágenes es para:

- Optimizar el contraste de las imágenes
- Normalizar cualquier variación de la iluminación ambiente
- Simplificar el proceso de tratamiento posterior de la imagen

En la actualidad lo más utilizado para iluminación y grabación en lugares de poca luminosidad, son los iluminadores led infrarrojos, por lo tanto el iluminador de leds infrarrojo que se seleccionó es el EC-ILIR80 de la marca ecorp, como se muestra en la Figura 13.



**Figura 13.** Iluminador EC-ILIR80

Fuente: (“ADISES,” 2017)

Las especificaciones técnicas del iluminador led infrarrojo están en la tabla 9.

**Tabla 9**

*Especificaciones técnicas del iluminador infrarrojo EC-ILIR80*

<b>Tipo de iluminador</b>	Led
<b>Tipo de LED</b>	Alta eficiencia (Ø 8~14µ)
<b>Cantidad de leds</b>	114
<b>Alimentación</b>	12 Vdc
<b>Consumo de potencia</b>	16 W
<b>Dimensiones</b>	150 mm x120 mm x 88 mm
<b>Montaje</b>	3 grados de libertad
<b>Alcance</b>	80 m

Fuente: (“ADISES,” 2017)

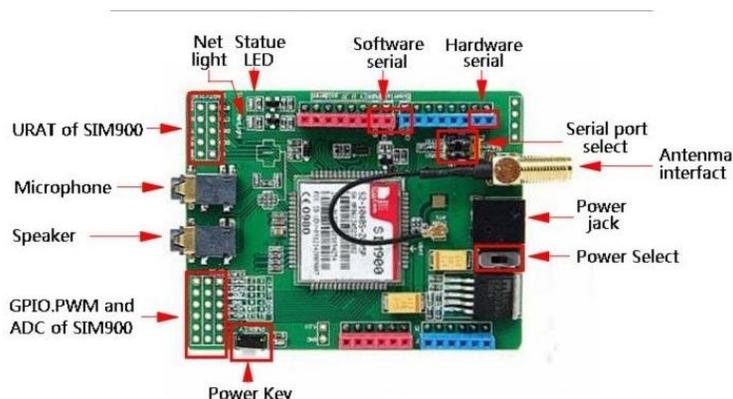
#### **2.4.6 Selección de un módulo GSM/GPRS**

El módulo GSM/GPRS SIM900 se utiliza para conectarse con cualquier red de datos o sitio de internet en el mundo a través de una red telefónica, se tiene la capacidad de utilizar hasta 4 bandas de la red (850/900/1800/1900MHz) y contiene un slot para la tarjeta SD donde se coloca un chip de celular (Chávez, 2015). Mediante este dispositivo se puede enviar información importante hacia un servidor remoto que se aloja en alguna central, con el uso del protocolo FTP y comandos AT

que se utiliza en la tarjeta, es decir, se puede enviar la imagen del vehículo e identificación de placa vehicular, y datos adicionales como: lugar, fecha y hora (Guaña Larco & Onofa Sánchez, 2016).

Este módulo soporta una transmisión serial UART RS-232, con la cual se puede receptor de la tarjeta ODROID X-U4 la información del vehículo identificado que se obtuvo con el procesamiento de imágenes ejecutada, y luego enviar la información a través del módulo GSM/GPRS hacia un servidor remoto, como una central de policial de monitoreo.

En la Figura 14 se indica las partes principales del módulo GSM/GPRS SIM900



**Figura 14.** Módulo GSM/GPRS SIM900

Fuente: (“ESTACIÓN DE MONITOREO GSM SIM900,” 2016)

También se tiene las características principales del módulo SIM900 en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Especificaciones técnicas del módulo SIM 900*

<b>Módulo</b>	SIM900
<b>Empresa</b>	SIMCOM
Bandas GSM/GPRS	850/900/1800/1900 MHz
Modulación	2GFSK, 2FSK
Sensibilidad de Recepción	-125 dBm
Clase multi-slot	Clase 10
Rango de Voltaje de Alimentación	3.2 V – 4.8 V
Corriente en modo <i>sleep</i>	1.5 mA

**CONTINÚA**



Corriente en modo de datos GPRS	76 mA – 440 mA
Corriente durante ráfaga de transmisión (Tx)	2 A
Aplicaciones	Voz, SMS, Datos, Internet.

Fuente: (Chávez, 2015)

De acuerdo a la tabla 10 la mayor demanda de energía ocurre en los instantes de transmisión hacia la red donde se puede alcanzar una corriente de 2 (A), si se recomienda un voltaje de alimentación de 5 (V), por lo que el consumo de potencia máximo en esos instantes llegaría a 10 (W).

#### 2.4.7 Selección de un indicador de velocidad

Este dispositivo consta de un arreglo de 200 leds para indicar la velocidad del vehículo en kilómetros por hora, mediante tres dígitos como se indica en la Figura 15. El consumo de potencia total depende del número de leds que se tengan en el letrero y la cantidad de luces que se enciendan.

Un led de luz blanca tiene un consumo promedio de 20 (mA). Si se supone el caso que todos los leds del letrero se enciendan en absoluto, entonces la corriente total en (A) que demanda el letrero se obtiene con la expresión (2.1) y la potencia total en (W) con la expresión (2.2)

$$I_{total} = \text{Número}_{Leds} \cdot I_{Led} \quad (2.1)$$

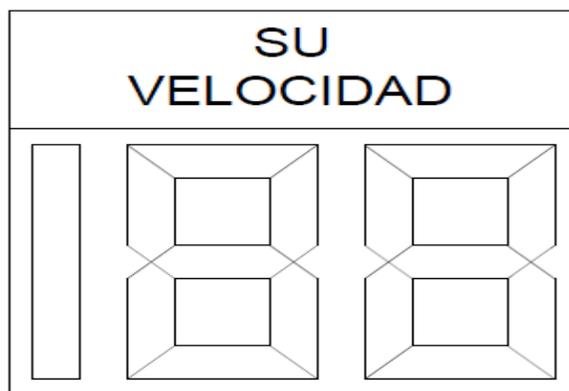
$$I_{total} = 200 \times 0.02$$

$$I_{total} = 4$$

$$P_{total} = I_{total} \times V_{Led} \quad (2.2)$$

$$P_{total} = 4 \cdot 5$$

$$P_{total} = 20$$



*Figura 15.* Indicador de velocidad en leds

Sin embargo, para el control de encendido de las luces del letrero, se necesita de un microcontrolador, que en este caso se ha elegido el PIC18F23K22, el cual tiene un consumo de potencia muy bajo (“PIC18F23K22 - Microcontrollers and Processors,” 2018).

El dispositivo tiene dos interfaces de comunicación RS-232. La primera interfaz se conecta al radar OEM para recibir los datos de velocidad del vehículo, mientras que con la segunda interfaz se envían los datos de velocidad hacia la tarjeta, Odroid X-U4, para luego transmitir los mismos datos hacia el módulo GSM/GPRS SIM900, y después enviarse hacia a un servidor remoto.

Luego de seleccionar los componentes que conforman el diseño del radar de velocidad vehicular, se plantea un diagrama donde se interconectan todas estas etapas en el Anexo A.

## **2.5 Demanda de energía del radar de velocidad**

- **Consumo de Potencia**

En la tabla 11, se muestra el consumo de potencia de los dispositivos electrónicos seleccionados. Se indica la potencia máxima y mínima que cada dispositivo puede demandar de acuerdo a las circunstancias presentadas, por ejemplo el sensor OEM en base al número de vehículos detectados

presenta distintos consumos de corriente o la tarjeta ODROID X-U4 si trabaja en un modo de máxima capacidad de procesamiento tiene un mayor consumo de potencia.

Se calculó la potencia y corriente máxima que podría demandar el radar de velocidad en una circunstancia donde todos los dispositivos trabajen al máximo. Esto se realizó con la sumatoria de las corrientes y potencias que están sombreadas.

**Tabla 11**

*Consumo de potencia de los dispositivos del medidor de velocidad*

Dispositivo Electrónico	Consumo de corriente	Voltaje requerido	Potencia de consumo(W)
Sensor OEM (4 detecc./seg)	15.7 mA	12 Vdc	188.4 mW
IcomSpeed (0 detecc./seg)	0.375 mA	12 Vdc	4.5 mW
Tarjeta Odroid X-U4 (max)	4 A	5 Vdc	20 W
(min)	2 A	5 Vdc	10 W
Módulo Sim 900 (modo: tx)	2 A	5 Vdc	10 W
(modo: sleep)	1.5 mA	5 Vdc	7.5 mW
Iluminador EC-ILIR80 (noche)	1.33 A	12 Vdc	16 W
Mostrador de velocidad	4 A	5 Vdc	20 W
<b>Total</b>	<b>11.35 A</b>		<b>66.18 W</b>

- **Consumo de Energía**

El estudio del consumo de energía del radar de velocidad se basa en la cantidad de vehículos detectados que circulan por la vía, cuya tarea se realiza por el sensor OEM IcomSpeed V2.4, el cual tiene la capacidad de detectar más de un vehículo por cada segundo, como se indicó en la tabla 4. En la tabla 12, se hace una suposición que el sensor OEM detecta 4 vehículos en la vía constantemente cada segundo, durante un tiempo de 16 horas respecto a las 24 horas del día, mientras que las 9 horas que restan del día se hace una suposición que el sensor OEM no detecta

ningún vehículo. Los datos de consumo de potencia del sensor OEM IcomSpeed V2.4 de acuerdo al número de vehículos, se extrajeron de la tabla 4.

De forma similar se analiza el consumo de energía de los demás componentes del radar, sin embargo se debe aclarar, que no todo el tiempo los conductores cometerán infracciones pese a que el sensor OEM los detecte. Por esto se hace una suposición que los demás equipos que realizan tareas como, visión artificial para detección de placas o transmisión de información de los vehículos detectados, tengan un trabajo que demanda energía solo para ciertos periodos de tiempo. Por ejemplo en la tabla 12 se observa, que la tarjeta Odroid X-U4 trabaja al máximo con 20 *W* durante 13 horas seguidas para adquirir las imágenes de los vehículos y el módulo SIM 900 trabaja al máximo con 10 *W* durante 6 horas seguidas para realizar las transmisiones de información hacia un servidor externo.

De la misma forma, el iluminador led EC-ILIR80 solo trabajará en horario nocturno debido a la iluminación que necesita la cámara de video en esos momentos, caso contrario sería un desperdicio de energía que el iluminador trabaje durante las horas del día.

Por lo tanto la tabla 12 muestra el consumo de energía diario que demanda cada componente del radar para obtener un consumo de energía global del sistema, con el cual se procederá con el dimensionamiento del sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica.

**Tabla 12***Consumo energético diario de los dispositivos del medidor de velocidad*

<b>Dispositivo Electrónico</b>	<b>Consumo de corriente</b>	<b>Potencia de consumo(W)</b>	<b>Uso diario (h/día)</b>	<b>Consumo diario (Wh/día)</b>
Sensor OEM (4 detecc./seg)	15.7 mA	188.4 mW	16	3.0144 Wh
IcomSpeed (0 detecc./seg)	0.375 mA	4.5 mW	9	40.5 mWh
Tarjeta Odroid X-U4 (max)	4 A	20 W	13	260 Wh
(min)	2 A	10 W	10	100 Wh
Módulo Sim 900 (modo: tx)	2 A	10 W	6	60 Wh
(modo: sleep)	1.5 mA	7.5 mW	19	142.5 mWh
Iluminador EC-ILIR80 (noche)	1.33 A	16 W	3	48 Wh
Mostrador de velocidad	4 A	20 W	7	140 Wh
<b>Total</b>				611.19 Wh

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN FOTOVOLTAICO

#### 3.1 Introducción

En este capítulo se realiza el diseño del sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica para suministrar la energía hacia el radar de velocidad vehicular propuesto en el capítulo anterior, del cual se identificó el consumo energético diario que demanda.

Se realiza el dimensionamiento y modelamiento matemático del módulo fotovoltaico (PV) para su simulación. El diseño del convertidor DC-DC tipo reductor para disminuir el voltaje del módulo PV y luego utilizarlo en la alimentación de un sistema autónomo de almacenamiento de energía (SAAE), el cual comprende de un arreglo de 2 baterías de litio y de un control tipo On/Off que gestiona la autonomía del SAAE por medio del estado de carga (SOC) de las baterías.

Para el manejo eficiente de la potencia del módulo PV se diseña un regulador MPPT tipo Perturbar y Observar (P&O) para la extracción máxima de su energía ante cambios de irradiación solar. También se diseña un control PID que sirve para regular y asegurar que la tensión de salida del convertidor DC-DC reductor sea 12 V, ante cambios de voltaje que puedan presentarse en el módulo PV.

#### 3.2 Energía solar

La energía solar es un recurso importante en las energías renovables, debido a que es una fuente de energía limpia y no contaminante hacia el medio ambiente. La energía solar tiene la capacidad de sustituir los recursos energéticos fósiles tradicionales, que se han utilizado por la humanidad

durante mucho tiempo desde la época de la revolución industrial hasta la actualidad. Esta energía puede traer grandes cambios en la economía, desarrollo humano y protección del ecosistema

La energía solar proviene de las ondas electromagnéticas generadas por el sol que viajan por el espacio, esta energía se conoce como radiación solar. Dentro de los sistemas fotovoltaicos, la radiación solar puede estudiarse bajo el concepto de irradiancia e irradiación solar, como parámetros que miden la potencia y energía que se obtiene del sol. Estos parámetros son importantes para el dimensionamiento del generador fotovoltaico en el sistema de alimentación.

### 3.2.1 Irradiancia solar

Esta magnitud cuantifica la potencia de la radiación solar, se describe como la potencia incidente sobre una unidad de superficie, esto puede explicarse en la expresión (3.1) (Lamigueiro, n.d.).

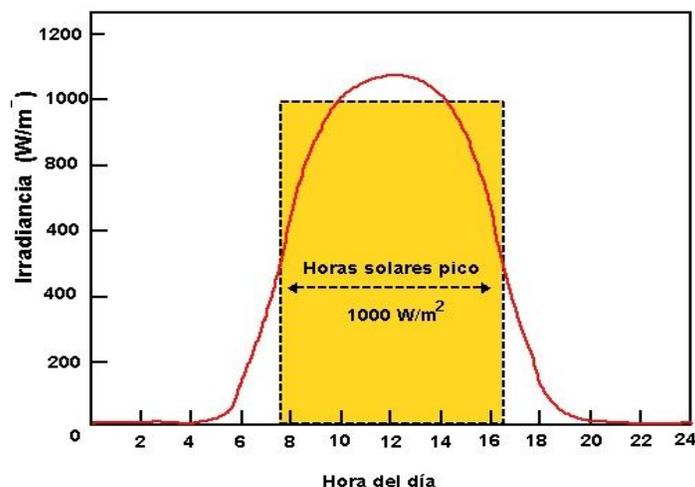
$$Irr = \frac{P_{in}}{A} \quad (3.1)$$

Las unidades de esta expresión según el Sistema Internacional son en ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). La irradiación promedio que llega a la superficie terrestre en un día despejado es de  $1000 (\text{W}/\text{m}^2)$ .

### 3.2.2 Irradiación solar

Para un sistema fotovoltaico la irradiación solar es una magnitud que equivale a la potencia incidente en una superficie durante un periodo de tiempo, el cual se mide en ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{día}$ ) o ( $\text{kW}/\text{m}^2/\text{día}$ ). La irradiación solar integra o suma todas las irradiancias dadas en un intervalo de tiempo, o se conoce como la energía solar recibida en un período de tiempo (“CALCULATIONSOLAR,” 2014).

Por ejemplo en la Figura 16 se muestra una irradiación solar de  $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$  en un determinado día y durante un intervalo de tiempo. El área bajo la curva y dividido para  $1000$  equivale a las unidades de energía ( $\text{kWh/m}^2$ ). Del concepto de irradiación solar también salen las unidades “horas solar pico” (HSP), que es el tiempo en horas que dura una hipotética irradiación solar constante de  $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ .



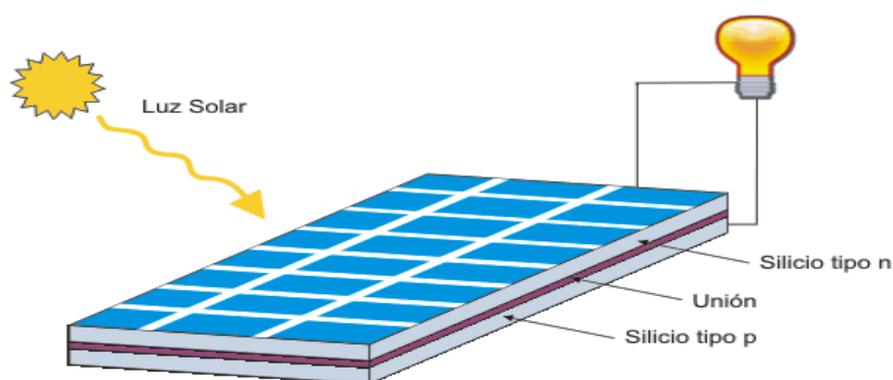
**Figura 16.** Irradiación en un determinado día  
Fuente: (“CALCULATIONSOLAR,” 2014)

La energía solar varía según el lugar geográfico y las condiciones climáticas, entonces como una de las alternativas para captar la energía solar y convertirla en energía eléctrica es utilizar un módulo fotovoltaico (PV) o panel solar, que se compone de celdas fotovoltaicas. Las celdas fotovoltaicas conforman un módulo PV si varias de estas se interconectan en serie o en paralelo. Al conectar varias celdas en paralelo se aumenta la corriente del módulo PV y al conectar varias celdas en serie se aumenta la tensión, lo que significa que la potencia de un módulo PV depende del número de celdas que posea.

### 3.3 Generador fotovoltaico

#### 3.3.1 Celda fotovoltaica

Una celda fotovoltaica o celda solar es un elemento que se compone de la unión de 2 capas de semiconductores tipo P y N, los cuales se separan por una unión P-N, en la mayoría de celdas el material semiconductor del que están hechos es de silicio monocristalino o silicio policristalino. La celda fotovoltaica es capaz de generar energía debido a que sucede un fenómeno físico llamado *efecto fotoeléctrico*, que se trata de la capacidad de los semiconductores de convertir la radiación electromagnética directamente en corriente eléctrica de manera proporcional, esta corriente se conoce como fotocorriente  $I_{ph}$ . En la Figura 17 se muestra un esquema de varias celdas fotovoltaicas donde se muestra los materiales tipo P, tipo N y la unión de ambos. (Michael & Fonseca, 2012; Sanz Morales & Konstantin Kostov, 2010).

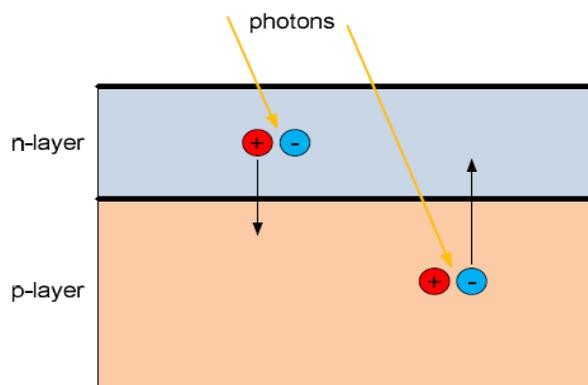


**Figura 17.** Semiconductores tipo P y N en celdas solares  
Fuente: (Textos Científicos, 2015)

Las capas P y N de silicio son dopadas con átomos de impureza que hacen que la capa N quede con un electrón adicional llamado “portador” y la capa P con un electrón menos llamado “hueco”, cuando los fotones de la irradiación impactan en ambas capas los electrones portadores pasan hacia la capa P y los electrones huecos pasan hacia la capa N como se indica en la Figura 18, lo que hace

que la capa P tenga carga positiva y la capa N tenga carga negativa (Sanz Morales & Konstantin Kostov, 2010).

Esto produce un campo eléctrico en los electrones libres, que es capaz de generar y conducir una corriente a través de un circuito externo.



**Figura 18.** Movimiento de electrones

Fuente: (Textos Científicos, 2015)

### 3.3.2 Módulo fotovoltaico

La interconexión de varias celdas fotovoltaicas ya sea en serie o en paralelo conforma un módulo fotovoltaico (PV). Los tipos de módulos fotovoltaicos se ensamblan de acuerdo al tipo de celda fotovoltaica que se utiliza, estos pueden ser de silicio monocristalino o de silicio policristalino.

- **Módulo fotovoltaico monocristalino**

Este módulo se caracteriza por la lentitud del proceso de su calentamiento, lo que significa que tienden a absorber mejor la irradiación en climas fríos con condiciones de tormentas o de niebla, por lo tanto no soportan sobrecalentamientos que se provocan en climas de altas temperaturas (AutoSolar, 2017). En la **Figura 19** se observa un ejemplo de este módulo PV.



**Figura 19.** Módulo PV tipo monocristalino  
Fuente: (AutoSolar, 2017)

- **Módulo fotovoltaico policristalino**

Este módulo tiene rapidez en el proceso de calentamiento y el coste de fabricación resulta más económico. Se recomienda este módulo para climas cálidos, puesto que absorbe el calor a una mayor velocidad y le afecta en menos medida el sobrecalentamiento (AutoSolar, 2017). En la Figura 20 se observa un ejemplo de este módulo PV.



**Figura 20.** Módulo PV tipo policristalino  
Fuente: (AutoSolar, 2017)

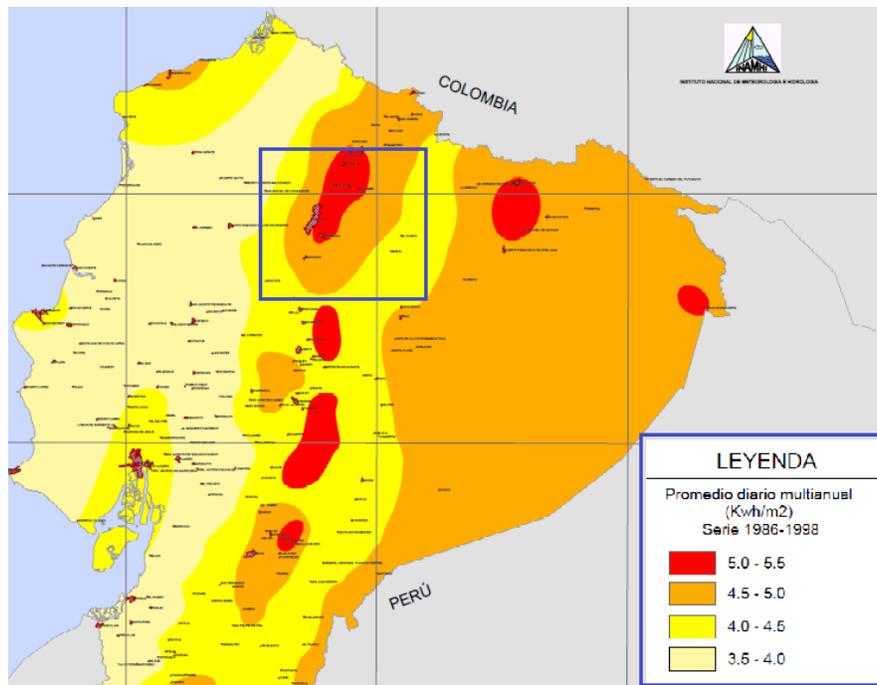
### **3.4 Dimensionamiento del módulo fotovoltaico**

Para el dimensionamiento del módulo PV primero se determina el nivel de irradiación solar, del lugar donde va a realizarse la instalación del sistema fotovoltaico (Chávez Guerrero, 2013). Luego se utiliza el valor del consumo de energía total diaria de la carga, que es el radar de velocidad

vehicular, para después de una serie de pasos calcular el número de módulos PV que se necesita en el sistema de alimentación.

### 3.4.1 Radiación solar en Quito

De acuerdo al Servicio Meteorológico del Ecuador, la irradiación solar promedio en la ciudad de Quito oscila entre 4.5 y 5 (kWh/m<sup>2</sup>/día), por lo tanto el valor medio de irradiación es de 4.75 (kWh/m<sup>2</sup>/día). En la Figura 21 se muestra la distribución de irradiación solar en todo el Ecuador, cuya información se extrajo del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) (INAMHI, 2013).



**Figura 21.** Mapa de Irradiación Global del Ecuador

Fuente: (INAMHI, 2013)

Con el valor de irradiación promedio que equivale a 4.75 (kWh/m<sup>2</sup>/día), se calcula la irradiación solar total, que es el producto de la irradiación promedio por el tiempo que perdura. En el Ecuador

el tiempo que dura la irradiación es desde 6 a 8 horas (Chávez Guerrero, 2013), para este cálculo se utiliza la expresión (3.2).

$$Rad_{ST} = R_s \cdot H_{irr} \quad (3.2)$$

$$Rad_{ST} = 4.75 \cdot 6$$

$$Rad_{ST} = 28.5$$

Donde,  $R_s$  es la irradiación solar promedio en ( $kWh/m^2/día$ ),  $H_{irr}$  son las horas de irradiación al día en el sistema y  $Rad_{ST}$  es la radiación solar total que recibe el sistema de alimentación expresada en ( $kWh/m^2/día$ ) durante el día.

### 3.4.2 Energía total en corriente continua

Por seguridad, se agrega el 30 % a la energía que consume el radar de velocidad que se había calculado en la tabla 12, para asegurar el dimensionamiento del módulo fotovoltaico. Para esto se utiliza con la expresión (3.3)

$$E_T = E_{TD} \cdot F_{seg} \quad (3.3)$$

$$E_T = 611.1974 \cdot 1.3$$

$$E_T = 794.56$$

Donde,  $E_{TD}$  es la energía total diaria que demanda el sistema medidor de velocidad,  $F_{seg}$  es el factor seguridad para agregar el 30 % extra y  $E_T$  es la energía final expresada en (Wh).

### 3.4.3 Corriente diaria de carga

Se calcula la corriente diaria que demanda el medidor de velocidad vehicular, con la expresión (3.4)

$$I_{DC} = \frac{E_T}{T_s} \quad (3.4)$$

$$I_{DC} = \frac{794.56}{12}$$

$$I_{DC} = 66.21$$

Donde,  $E_T$  es la energía que consume la carga en (Wh),  $T_s$  es la tensión de la carga en (V) y  $I_{DC}$  es la corriente diaria DC que demanda el medidor de velocidad vehicular, expresada en (Ah). También se considera un factor de corrección del 20% puesto que habrá pérdidas en el sistema, mediante la expresión (3.5) la corriente diaria de carga corregida  $I_{DCC}$  expresada en (Ah) es:

$$I_{DCC} = I_{DC} \cdot 1.2 \quad (3.5)$$

$$I_{DCC} = 66.21 \cdot 1.2$$

$$I_{DCC} = 79.46$$

#### 3.4.4 Corriente pico del sistema de alimentación

Con la radiación total solar, se procede a calcular la corriente pico que requiere el sistema de alimentación para la carga por medio de la expresión (3.6).

$$I_{picoS} = \frac{I_{DCC}}{Rad_{ST}} \quad (3.6)$$

$$I_{picoS} = \frac{79.46}{28.5}$$

$$I_{picoS} = 2.8$$

Donde,  $I_{DCC}$  es la corriente diaria de carga corregida,  $Rad_{ST}$  es la irradiación solar total que se recibe en el sistema fotovoltaico y  $I_{picoS}$  es la corriente pico expresada en (A).

### 3.4.5 Número de módulos fotovoltaicos

Se selecciona un módulo PV que suplemente una corriente mayor que la corriente pico del sistema de alimentación  $I_{picoS}$ , para esto se analiza la corriente de máxima operación  $I_{mp}$  del módulo PV (Chávez Guerrero, 2013). En la Figura 22 se muestra la hoja técnica de un grupo de módulos fotovoltaicos policristalinos, disponibles en la distribuidora Autosolar (AutoSolar, 2015).

ALL SPECIFIED PARAMETERS ARE AT STC 25°C AMBIENT, 1000W/M <sup>2</sup> IRRADIANCE AND AM 1.5				
ELECTRICAL SPECIFICATIONS				
Model Type	SHS135-36P	SHS140-36P	SHS145-36P	SHS150-36P
Max Power	135W	140W	145W	150W
Power Tolerance	+0~+5	+0~+5	+0~+5	+0~+5
Max-Power Voltage (Vmp)	17.8	17.9	18	18.1
Max-Power Current (Imp)	7.61	7.85	8.09	8.33
Open Circuit Voltage (Voc)	22.1	22.2	22.3	22.4
Short Circuit Current (Isc)	8.21	8.41	8.62	8.82
Cell Efficiency (%)	15.9	16.5	17.1	17.6
Module Efficiency (%)	13.5	14	14.5	15

**Figura 22.** Especificaciones del Panel solar SHS150-36P

Fuente: (AutoSolar, 2015)

De acuerdo a los modelos anteriores, se selecciona el módulo PV policristalino SHS150-36P de 150 W que trabaja con un voltaje de máxima potencia  $V_{mp} = 18.1$  (V) y una corriente de máxima potencia  $I_{mp} = 8.33$  (A),  $I_{mp}$  supera a la corriente pico del sistema que es 2.8 (A). Esta sobredimensión se realiza debido a que el tiempo de carga de cada batería del sistema autónomo de almacenamiento, se lo realiza en 10 horas y para ello se necesita un valor mínimo de 8 (A). Para calcular el número módulos fotovoltaicos del sistema de alimentación se utiliza la expresión (3.7)

$$Num_{mod PV} = \frac{I_{picoS}}{I_{pm}} \quad (3.7)$$

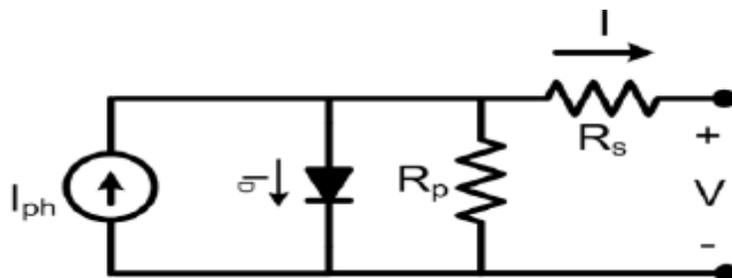
$$Num_{mod PV} = \frac{2.8}{8.33}$$

$$Num_{modPV} = 0.33 \rightarrow 1 \text{ módulo}$$

Donde,  $I_{picoS}$  es la corriente pico del sistema de alimentación en (A), la variable  $I_{mp}$  es la corriente de máxima operación del módulo PV en (A), y  $Num_{modPV}$  la cantidad de módulos requerida.

### 3.5 Modelo matemático del módulo fotovoltaico

Para realizar la simulación de una celda solar, se puede utilizar su modelo matemático que se rige en un circuito eléctrico equivalente como se muestra en la Figura 23, este esquema es llamado como modelo eléctrico equivalente para una celda fotovoltaica, el cual depende de una irradiación solar de entrada y una temperatura determinada (Hua, Lin, & Shen, 1998).



**Figura 23.** Circuito eléctrico equivalente para celda solar

Fuente: (Alsayid, 2012)

#### 3.5.1 Modelo matemático para una celda fotovoltaica

El modelo matemático para la celda fotovoltaica de la Figura 23 se describe en la expresión (3.8), la cual se asemeja con la curva característica de un diodo simple (Arcos, Urbina, & Sotomayor, 2012).

$$I = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3.8)$$

Donde:

$I$  es la corriente de salida de la celda solar, (A)

$V$  es el voltaje de salida en los terminales de la celda solar, (V)

$I_{ph}$  es la corriente fotogenerada por la irradiación solar

$I_s$  es la corriente de saturación reversa del diodo debido a la difusión mecánica

$A$  es el factor de calidad del diodo que depende del tipo de celda, generalmente se coloca 2 en todos los tipos de celda

$R_s$  Es la resistencia en serie de la celda

$R_p$  Es la resistencia en paralelo o shunt de la celda

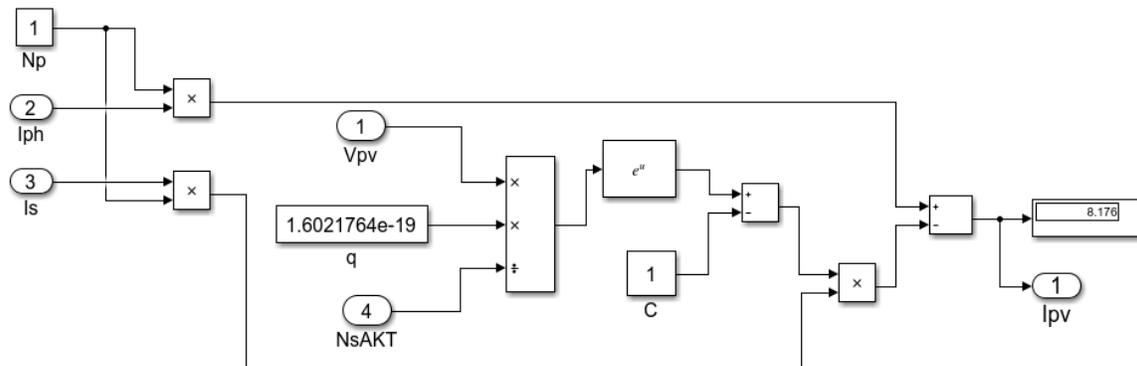
$q$  es la carga del electrón,  $1.6 \times 10^{-19}$  (C)

$K$  es la constante de Boltzmann,  $1.38 \times 10^{-23}$  (J/K)

Sin embargo las resistencias  $R_s$  y  $R_p$  pueden anularse de la expresión (3.8), es decir sea,  $R_s = 0$  como un corto circuito y  $R_p = \infty$  como un circuito abierto. De tal forma que la ecuación del modelo matemático de una celda fotovoltaica se reformula como indica la expresión (3.9) (Arcos et al., 2012).

$$I = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{q \cdot V}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (3.9)$$

La implementación de esta expresión con los bloques de Simulink se muestra en la Figura 24, sin embargo se tienen a las variables  $N_s = 36$  que son el número de celdas en serie y  $N_p = 1$  que son el número de celdas en paralelo que conforman el módulo PV SHS 150-36P. Estas variables  $N_s$  y  $N_p$  forman parte del modelo matemático del módulo PV, el cual se explicará más adelante en la expresión (3.13).



**Figura 24.** Corriente de salida  $I$  del módulo PV en base al modelo matemático

La corriente de saturación del diodo  $I_s$  se obtiene mediante la expresión (3.10) (Arcos et al., 2012).

$$I_s = I_{rs} \left[ \frac{T}{T_r} \right]^3 e^{\left[ q \cdot V_g \left( \frac{1/T_r - 1/T}{K \cdot A} \right) \right]} \quad (3.10)$$

Donde:

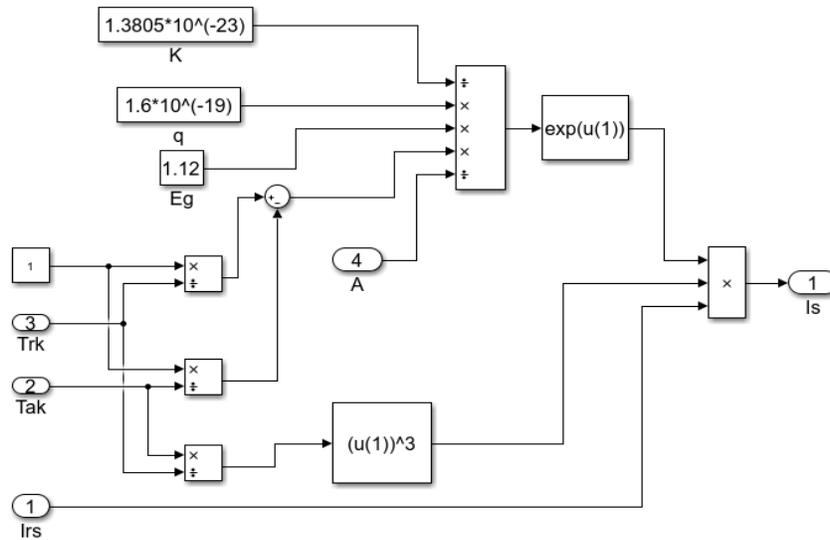
$V_g$  es el voltaje de banda, (V)

$T$  es la temperatura ambiente, (K)

$T_r$  es la temperatura referencia a STC (standard test conditions): 25 (°C) y 1 (kW/m<sup>2</sup>)

$I_{rs}$  es la corriente de saturación inversa del diodo a la temperatura de referencia  $T_r$

La implementación de la corriente de saturación reversa del diodo en Simulink se muestra en la Figura 25.



**Figura 25.** Corriente de saturación  $I_s$  del diodo en Simulink

La corriente  $I_{rs}$  a una temperatura de referencia viene dado por la expresión (3.11):

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left[ \frac{q \cdot V_{oc}}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T_r} \right]} - 1} \quad (3.11)$$

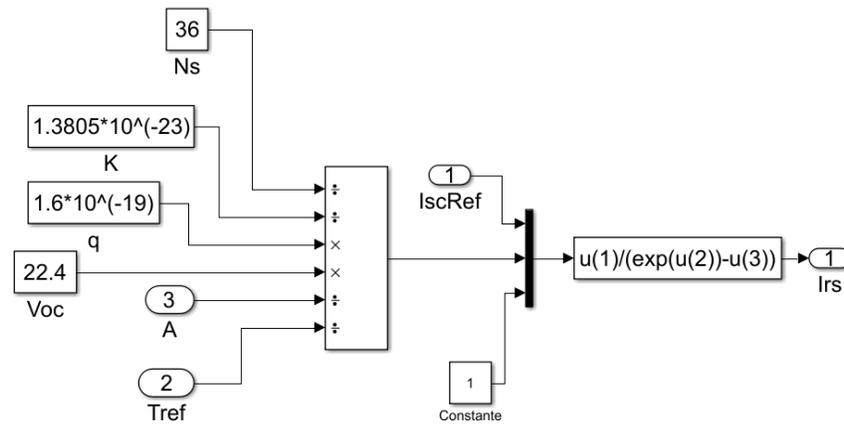
Donde:

$I_{sc}$  es la corriente de corto circuito de la celda a STC: 25 (°C) – 1 (kW/m<sup>2</sup>)

$V_{oc}$  es el voltaje de circuito abierto de la celda a STC: 25 (°C) – 1 (kW/m<sup>2</sup>)

STC en inglés “Standard Test Conditions” es un estándar usado por los fabricantes, bajo el cual evalúan el rendimiento de la potencia de sus módulos fotovoltaicos.

La implementación de la corriente  $I_{rs}$  en Simulink se muestra en la Figura 26.



**Figura 26.** Corriente de saturación  $I_{rs}$  a STC

Luego la corriente fotogenerada  $I_{ph}$  obtenida de la irradiación solar viene dada por la expresión (3.12) (Arcos et al., 2012).

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_I (T_c - 25)] \cdot \frac{S}{100} \quad (3.12)$$

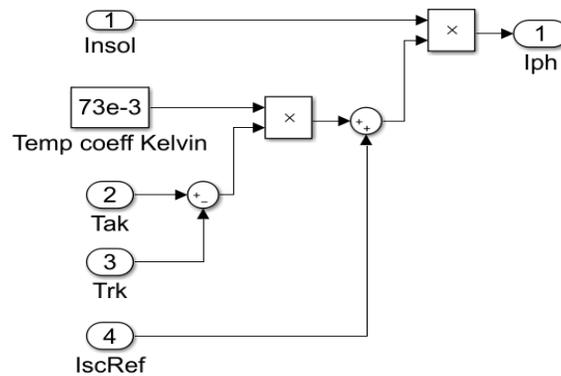
Donde:

$S$  es la Irradiación solar en ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )

$T_c$  es la temperatura ambiente, (K)

$I_{sc}$  es la corriente de corto circuito de la celda a STC: 25 ( $^{\circ}\text{C}$ ) – 1 ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )

La implementación de la corriente fotogenerada en Simulink se muestra en la Figura 27.



**Figura 27.** Corriente  $I_{ph}$  en Simulink

Todas las expresiones anteriores son dadas para la curva característica de una celda fotovoltaica. En consecuencia, para obtener la salida de corriente de un módulo PV, en la expresión (3.13) se agregan las variables  $n_s$  y  $n_p$ , que son el número de celdas en serie y en paralelo respectivamente que se conectan para conformar un módulo PV (Arcos et al., 2012).

$$I_m = n_p I_{ph} - n_p I_s \left[ e^{\left( \frac{q}{K \cdot T \cdot A} \cdot \frac{V_m}{n_s} \right)} - 1 \right] \quad (3.13)$$

La expresión  $I_m$  es la corriente de salida y  $V_m$  es el voltaje de salida en los terminales del módulo PV. Donde  $V_m$  equivale al producto del número de celdas fotovoltaicas en serie por el voltaje que produce cada celda como se indica en la expresión (3.14) e  $I_m$  equivale al producto del número de celdas fotovoltaicas en paralelo por la corriente que produce cada celda como se indica en la expresión (3.15) (Arcos et al., 2012).

$$V_m = n_s \cdot V \quad (3.14)$$

$$I_m = n_p \cdot I \quad (3.15)$$

### 3.5.2 Implementación del módulo fotovoltaico en Simulink

De acuerdo a las expresiones anteriores dadas para el modelo matemático de un módulo PV, en la Figura 28 se presenta el modelo matemático en bloques de Simulink para el módulo PV policristalino SHS150-36P.

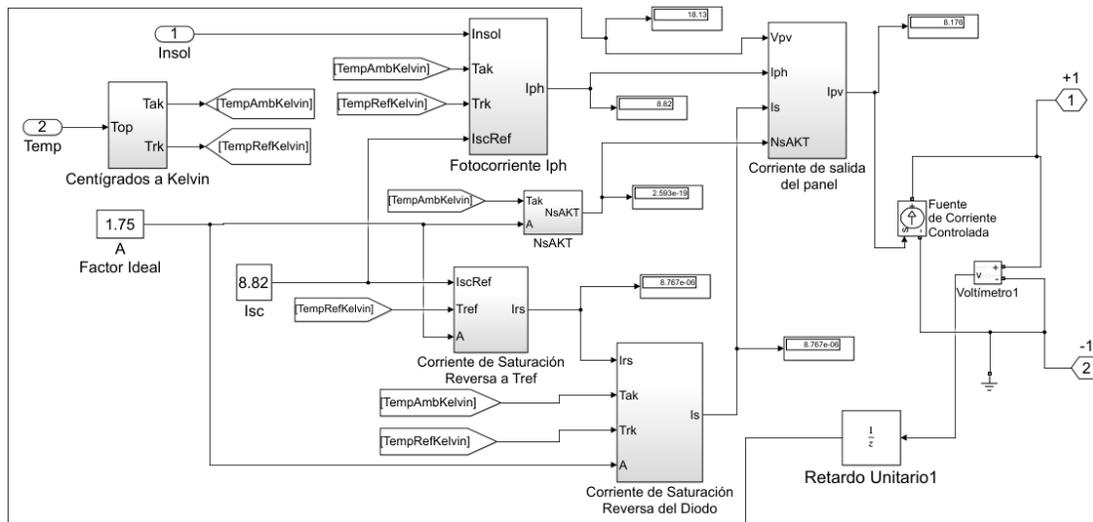


Figura 28. Modelo matemático del módulo PV policristalino SHS150-36P

Del mismo modo en la Figura 29 se muestra en un bloque de Simulink, el Módulo PV, el cual contiene el modelo matemático módulo fotovoltaico que se indicó en la Figura 28.

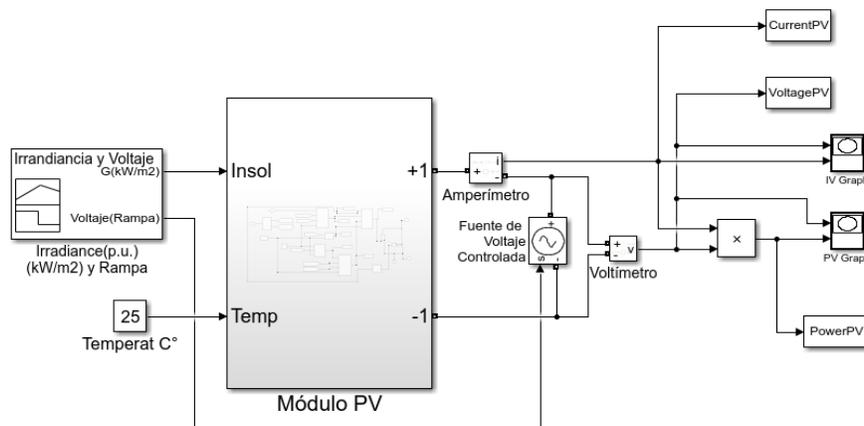
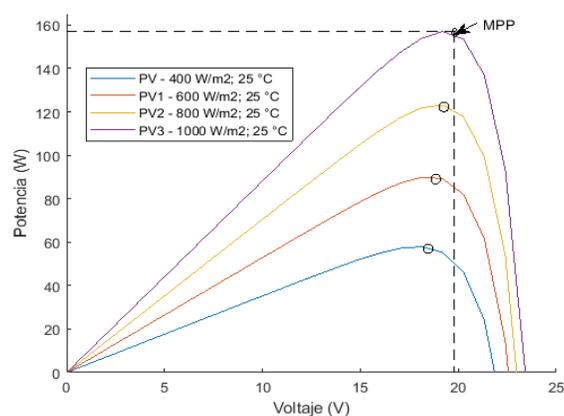


Figura 29. Subsistema que contiene el modelo del módulo PV

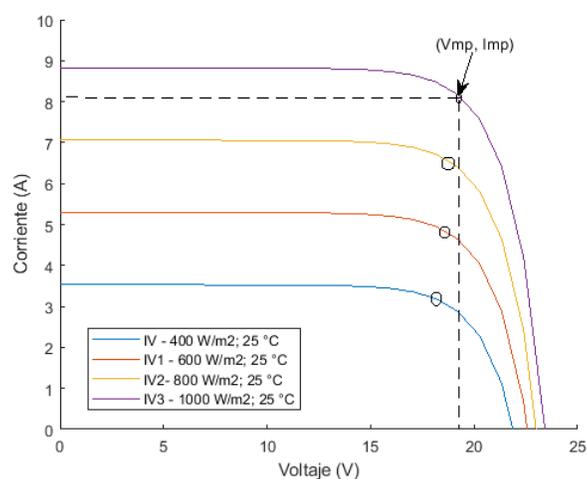
Las curvas características del módulo PV sobre Potencia vs Voltaje (PV) y Corriente vs Voltaje (IV) en distintas irradiaciones y a una temperatura constante de 25 (°C), se muestran en las Figura 30 y Figura 31 respectivamente. Las cuales corresponden al módulo PV SHS150-36P de 150 (W).

En la Figura 30 se observa el punto de potencia máxima del módulo PV para cada irradiación, este punto se encuentra alrededor del voltaje  $V_{mp} = 18.1$  (V), tal como se indicó en las especificaciones técnicas del panel.



**Figura 30.** Gráficas PV del módulo PV

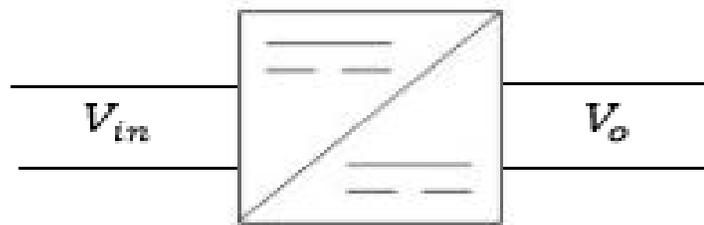
En la Figura 31 se observa, la corriente de máxima operación o potencia  $I_{mp}$ , para cada irradiación diferente, que se obtiene cuando el voltaje del módulo PV está por los 18.1 (V).



**Figura 31.** Gráficas IV del módulo PV

### 3.6 Convertidores de potencia DC-DC

Dentro de un sistema de alimentación fotovoltaico se puede tener un convertidor de potencia DC-DC, el cual es un circuito electrónico de potencia que se encarga de transformar una señal de tensión en corriente continua (DC) a otra señal de tensión en corriente continua, esta explicación se esquematiza en la Figura 32. De acuerdo al tipo de convertidor, se puede elevar o reducir el voltaje de entrada  $V_{in}$  que proviene del módulo PV.



**Figura 32.** Esquema de un Convertidor DC-DC

Una gran característica del convertidor DC-DC es que maneja de manera eficiente la potencia que adquiere en su entrada y reduce las pérdidas en la transmisión de energía que van hacia una siguiente etapa.

Entre los convertidores DC-DC más importantes se tienen los siguientes:

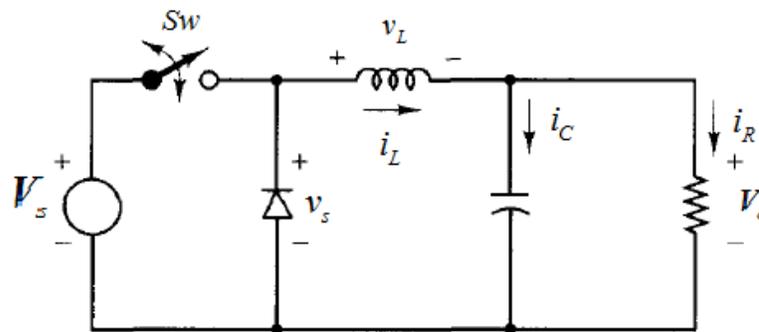
1. Convertidor reductor (Buck),  $V_{in} < V_o$
2. Convertidor elevador (Boost),  $V_{in} > V_o$
3. Convertidor reductor-elevador(Buck-Boost),  $V_{in} < V_o$  ó  $V_{in} > V_o$

El convertidor que se utiliza en el sistema fotovoltaico del presente proyecto es el tipo reductor, debido a que se necesita reducir la tensión de entrada  $V_{in}$  proveniente del módulo PV, a una tensión

de salida  $V_o$  de 12 V, el cual es la tensión de alimentación para el arreglo de baterías que suministran energía al dispositivo medidor de velocidad vehicular.

### 3.6.1 Convertidor DC-DC tipo reductor

El convertidor DC-DC tipo reductor se muestra en la Figura 33, donde la tensión  $V_{in}$  se reduce a la tensión de salida  $V_o$ . También se muestra como fluyen las corrientes en los elementos del circuito.



**Figura 33.** Convertidor DC-DC tipo reductor

Fuente: (Hart, 2001)

El convertidor DC-DC trabaja en base a la activación y desactivación del interruptor  $S_w$  dirigida por una señal de modulación por ancho de pulso (PWM) que trabaja a una frecuencia entre 20 kHz - 150 kHz y con un ciclo de trabajo  $D$ , el cual determina el tiempo de activación y desactivación del interruptor  $S_w$ . El convertidor DC-DC reductor puede tener dos modos de operación: continua y discontinua, los cuales se explicarán en el diseño del convertidor DC-DC tipo reductor en la siguiente sección.

El ciclo de trabajo  $D$  es un valor que configura el tiempo de activación de la señal PWM, que a su vez sincroniza la conmutación del convertidor DC-DC para obtener un voltaje de salida  $V_o$ . El ciclo de trabajo  $D$  es también una variable que puede ser controlada por un mecanismo externo

como un control PID, con el cual se puede regular a la tensión de salida  $V_o$  del convertidor DC-DC en un valor determinado. Pues si varía la tensión  $V_{in}$  proveniente del módulo fotovoltaico PV, el controlador PID asegura que la tensión de salida del convertidor DC-DC sea el valor deseado.

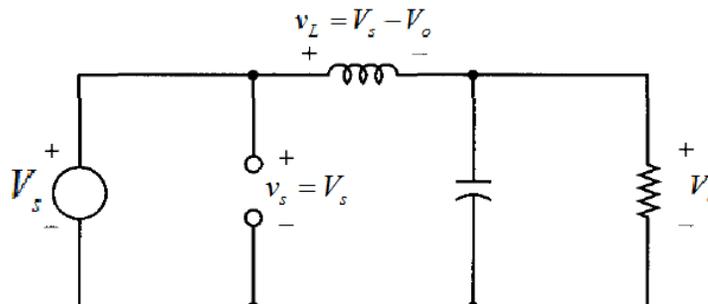
### 3.7 Dimensionamiento del convertidor DC-DC tipo reductor

El convertidor DC-DC que se utiliza es el tipo *buck* o conocido en español como *reductor*, el cual reduce el voltaje obtenido en la entrada y trata de mantener la potencia adquirida por la fuente de alimentación, que es el módulo PV, para no obtener grandes pérdidas de energía.

#### 3.7.1 Diseño del convertidor DC-DC tipo reductor

El convertidor DC-DC tipo reductor trabaja en base a la conexión y desconexión del interruptor  $Sw$  que se ubica al inicio del circuito de la Figura 33, el interruptor puede ser un transistor BJT o MOSFET que conmuta en base a una señal externa de activación o desactivación como es la señal PWM, para abrir o cerrar el interruptor.

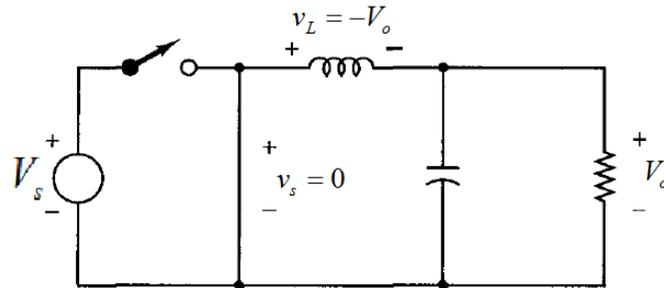
Si el interruptor se cierra, se tiene un tiempo de conexión  $T_{ON}$  donde el circuito queda como se muestra en la Figura 34.



**Figura 34.** Circuito con interruptor cerrado

Fuente: (Hart, 2001)

Mientras que si el interruptor se abre, se tiene un tiempo de desconexión  $T_{OFF}$  donde el circuito queda como se muestra en la Figura 35.



**Figura 35.** Circuito con interruptor abierto

Fuente: (Hart, 2001)

Existen propiedades importantes en los convertidores DC-DC en general, estas propiedades se consideran para el funcionamiento en un régimen permanente:

- 1) La corriente en la bobina es periódica.

$$i_L(t+T) = i_L(t) \quad (3.16)$$

- 2) La tensión media en la bobina es cero.

$$\begin{aligned} \langle V_L \rangle &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda \\ \langle V_L \rangle &= 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

- 3) La corriente media en el capacitor es cero

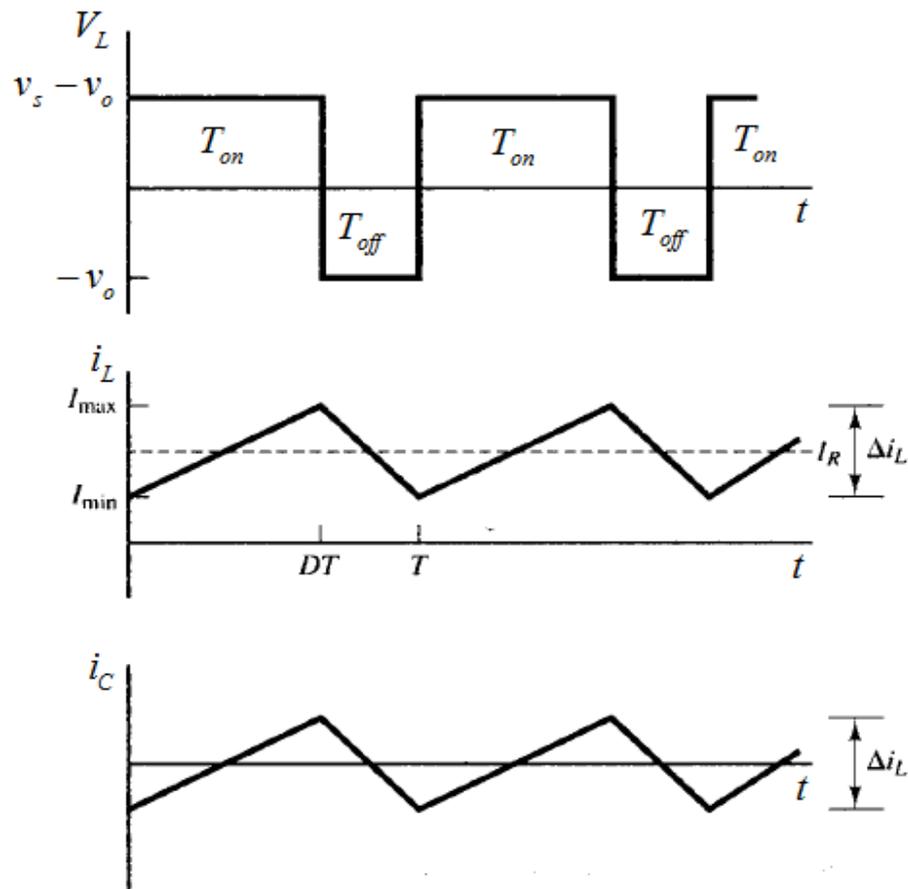
$$\begin{aligned} \langle I_C \rangle &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_c(\lambda) d\lambda \\ \langle I_C \rangle &= 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

De acuerdo a la Figura 34 y Figura 35 donde el convertidor opera en los tiempos  $T_{ON}$  y  $T_{OFF}$  respectivamente, al aplicar las leyes de tensión de Kirchhoff, se tiene la expresión (3.19) para la tensión en la bobina  $L$ .

$$V_L = \begin{cases} V_s - V_o, & 0 \leq t \leq T_{ON} \\ -V_o, & T_{ON} < t \leq T_s \end{cases} \quad (3.19)$$

Un convertidor DC-DC puede trabajar bajo dos modos de conducción que dependen del diseño del circuito: continua y discontinua, estos modos se refiere a la cantidad de corriente que fluye por la bobina  $L$  del convertidor.

Por un lado, en la Figura 36 se muestra el modo de conducción continua en la bobina  $L$ , para los tiempos  $T_{on}$  y  $T_{off}$  del circuito, la corriente en la bobina  $I_L$  oscila entre  $I_{max}$  y  $I_{min}$ , y esta nunca llega a cero (Hart, 2001).



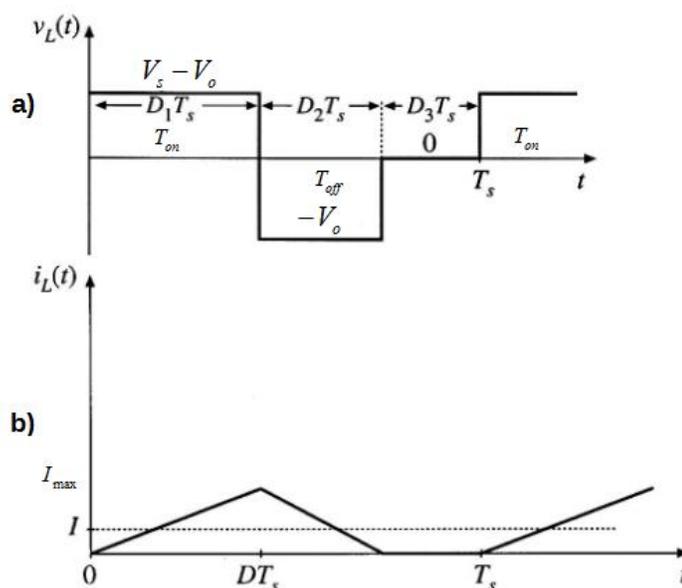
(a) Tensión en la bobina.

(b) Corriente de la bobina. (c) Corriente del condensador.

**Figura 36.** Formas de onda en modo de conducción continua

Fuente: (Hart, 2001)

Por otro lado en la Figura 37 se muestra el modo de conducción discontinua en la bobina  $L$ . En los tiempo  $T_{on}$  y  $T_{off}$ , la corriente en la bobina  $I_L$ , oscila entre un valor máximo  $I_{max}$  y un valor  $I_{min}$  que equivale a cero.



**Figura 37.** Modo conducción discontinua

Fuente: (Erickson & Dragan, 2006)

En el diseño se consideran datos iniciales como el voltaje de entrada proveniente del módulo PV, el voltaje y corriente de salida necesario para cargar las baterías y la frecuencia para la conmutación en el convertidor DC-DC reductor. Esto sirve para calcular los elementos del convertidor DC-DC reductor que son: inductor, capacitor, resistor y el ciclo de trabajo  $D$  para el generador PWM. Los datos iniciales se indican en la tabla 13.

**Tabla 13**

*Datos iniciales para el diseño del convertidor*

<b>Voltaje de entrada</b>	$V_s = 22.4$ (V)
<b>Voltaje de salida</b>	$V_o = 14.6$ (V)
<b>Corriente de salida máxima</b>	$I_{omax} = 8.33$ (A)
<b>Corriente de salida mínima</b>	$I_{omin} = I_o = 8$ (A)
<b>Frecuencia</b>	$f_s = 40$ (kHz)

En la salida del convertidor se tienen oscilaciones en el voltaje de salida  $V_o$ . Mediante la expresión (3.20) se calcula el máximo rizado en voltios  $\Delta V_o$  que se tendrá en la salida del convertidor, para este caso se consideró el 1 % de rizado.

$$\Delta V_o = 1\% \cdot V_o \quad (3.20)$$

$$\Delta V_o = 1\% \cdot 14.6$$

$$\Delta V_o = 0.146$$

Para encontrar el ciclo de trabajo  $D$ , se considera el voltaje medio del inductor dado en la expresión (3.17) para un periodo desde 0 a  $T_s$ , de esta forma el voltaje medio en el inductor queda como indica la expresión (3.21).

$$\int_0^{T_s} v_L \cdot dt = \left[ \int_0^{T_{ON}} v_L \cdot dt + \int_{T_{ON}}^{T_s} v_L \cdot dt \right] = 0 \quad (3.21)$$

Si se reemplaza en la expresión (3.21), los términos de  $V_L$  dados en la expresión (3.19), queda entonces el ciclo de trabajo  $D$  como se indica en la expresión (3.22).

$$(V_s - V_o) \cdot T_{ON} = V_o \cdot (T_s - T_{ON})$$

$$V_s \cdot T_{ON} = V_o \cdot T_s$$

$$D = \frac{V_o}{V_s} = \frac{T_{ON}}{T_s} \quad (3.22)$$

Al reemplazar los datos de voltaje de entrada  $V_s$  y voltaje de salida  $V_o$  de la tabla 13 se encuentra el ciclo de trabajo para el generador PWM que es  $D = 0.652$ .

- **Análisis con el interruptor cerrado.**

Con el objetivo de explicar la fórmula que calcula el valor del inductor  $L$  del convertidor, se analiza en el nodo de la resistencia de carga  $R_o$  del circuito de la Figura 33 y con la ley de corrientes de Kirchhoff, se obtiene la expresión (3.23). Además dado que la corriente media en el capacitor es cero (i.e.,  $\langle i_C \rangle = 0$ ) y al aplicar la ley de Ohm en la carga, se obtiene la expresión (3.24).

$$I_L = I_C + I_o \quad (3.23)$$

$$\langle i_L \rangle = \langle \cancel{i_C} \rangle + \langle i_o \rangle$$

$$\langle i_L \rangle = \langle i_o \rangle = I_o = V_o / R \quad (3.24)$$

Con la ley de tensiones de Kirchhoff en la malla izquierda del circuito de la Figura 34 se obtiene la expresión (3.25). Luego se reemplaza la equivalencia de corriente instantánea de la bobina, en el voltaje  $V_L$ , y se despeja  $di_L/dt$  para obtener la expresión (3.26).

$$V_s = V_L + V_o \quad (3.25)$$

$$V_s = L \cdot \frac{di_L}{dt} + V_o$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (3.26)$$

En la Figura 36 se observa que la corriente  $I_L$  varía linealmente en  $T_{on}$ , por lo tanto se considera la variación instantánea de corriente como constante. Además el tiempo que el interruptor está cerrado equivale a  $\Delta t = T_{on} = D \cdot T_s$ . Por lo tanto se obtiene la expresión (3.27)

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

$$\Delta i_L = \left( \frac{V_s - V_o}{L} \right) \cdot D \cdot T_s \quad (3.27)$$

Es importante garantizar que el convertidor DC-DC reductor trabaje en modo de conducción continua y esto es que la corriente que fluye por el inductor  $L$  no llegue a cero. Por lo tanto establece la condición en la expresión (3.28).

$$\langle i_L \rangle \geq \frac{\Delta i_L}{2} \quad (3.28)$$

Luego al reemplazar las expresiones (3.24) y (3.27) en la expresión (3.28), y se obtiene la expresión (3.29).

$$\frac{V_o}{R} \geq \left( \frac{V_s - V_o}{2 \cdot L} \right) \cdot D \cdot T_s \quad (3.29)$$

En la carga  $R$  se cumple la ley de Ohm que es  $R = V_o / I_o$ , además se tiene la relación del ciclo de trabajo  $D = V_o / V_s$ , y ambas relaciones se reemplazan en la expresión (3.29).

Luego se despeja  $L$  donde y se obtiene la expresión (3.30), que es la fórmula para calcular los valores que debe tomar el inductor  $L$  en ( $\mu H$ ) para en convertidor DC-DC reductor. De esta forma se reemplazan los datos de la tabla 13.

$$L \geq \frac{(1-D) \cdot V_o}{2 \cdot f_s \cdot I_o} \quad (3.30)$$

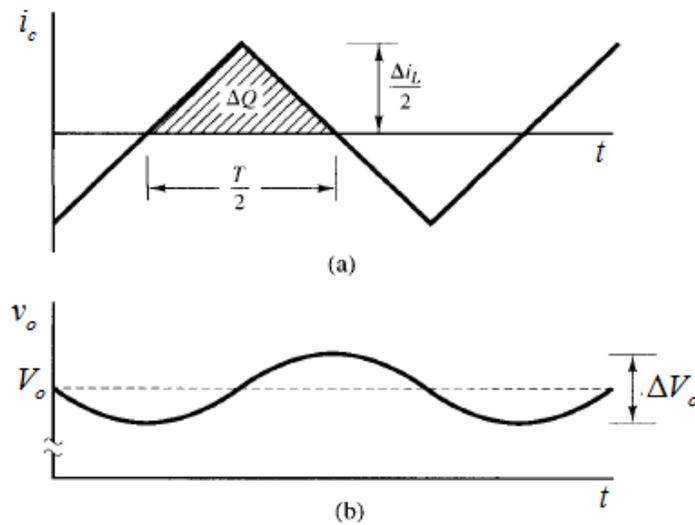
$$L \geq \frac{(1-0.652) \cdot 14.6}{2 \cdot (40 \cdot 10^3) \cdot 8}$$

$$L \geq 7.938 \cdot 10^{-6}$$

Por lo tanto el inductor seleccionado para el convertidor es  $L = 15$  ( $\mu H$ ) cuya resistividad aproximada es  $R_L = 1$  ( $\Omega$ ).

- **Análisis en el rizado de la tensión**

El siguiente análisis tiene el objetivo de explicar la fórmula para encontrar el valor del capacitor del convertidor DC-DC reductor. En la Figura 38 se observa que tanto exista variación en la corriente del capacitor se tiene variación en su voltaje, y que mientras la corriente del capacitor sea positiva el capacitor también se carga.



(a) Corriente en el condensador.

(b) Tensión de rizado en el condensador.

**Figura 38.** Corriente en el condensador

Fuente: (Hart, 2001)

La carga o capacidad del capacitor se explica mediante la expresión (3.31).

$$Q = C \cdot V_o \quad (3.31)$$

$$\Delta Q = C \cdot \Delta V_o$$

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C}$$

Luego, la variación de carga del capacitor se calcula con el área bajo la curva de la Figura 38 donde la corriente es positiva, esto por medio de la expresión (3.32).

$$\Delta Q = \frac{\frac{T_s}{2} \cdot \frac{\Delta i_L}{2}}{2} \quad (3.32)$$

$$\Delta Q = \frac{T_s \cdot \Delta i_L}{8}$$

Se reemplaza la expresión (3.31) resuelta y la expresión (3.32) para obtener la expresión (3.33)

$$\Delta V_o = \frac{T_s \cdot \Delta i_L}{8 \cdot C} \quad (3.33)$$

Luego mediante la combinación de las expresiones (3.27) y (3.30) el resultado se reemplaza en la expresión (3.33), y se obtiene la expresión (3.34) denominada como relación del rizado en la tensión de salida y la tensión de salida (Hart, 2001).

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1}{8 \cdot C} \cdot \frac{(1-D)}{f_s^2 \cdot L} \quad (3.34)$$

Luego se despeja  $C$  para obtener la expresión (3.35) que es la expresión para encontrar el valor del capacitor en el convertidor DC-DC reductor. Se reemplazan los datos de la tabla 13, el rizado de tensión  $\Delta V_o$  y el ciclo de trabajo  $D$  encontrado en las expresiones (3.20) y (3.22) respectivamente, y se calcula los valores que debe tomar el capacitor  $C$  en ( $\mu\text{F}$ ) para el convertidor.

$$C \geq \frac{1-D}{8 \cdot L \cdot \frac{\Delta V_o}{V_o} \cdot f_s^2} \quad (3.35)$$

$$C \geq \frac{1-0.652}{8 \cdot (15 \cdot 10^{-6}) \cdot \frac{0.146}{14.6} \cdot (40 \cdot 10^3)^2}$$

$$C \geq 181.25 \cdot 10^{-6}$$

Posterior al resultado, el capacitor seleccionado para el convertidor es  $C = 220$  ( $\mu\text{F}$ ) con una resistividad  $R_C = 0.096$  ( $\Omega$ ).

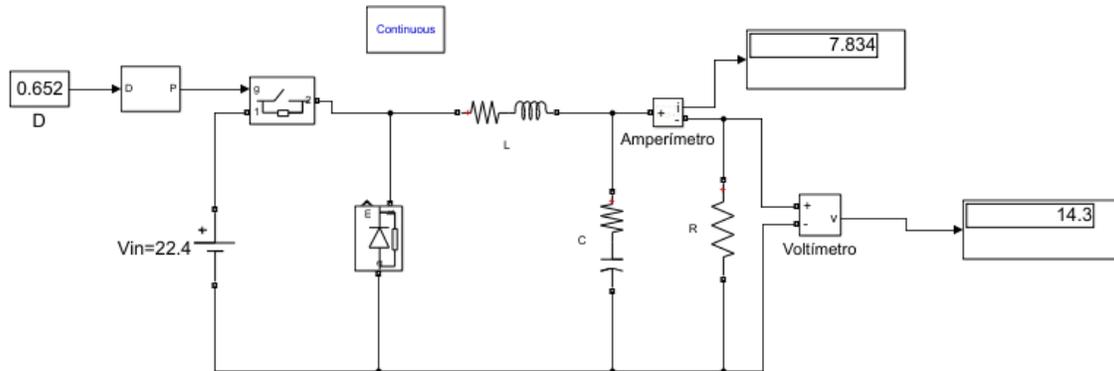
Para resumir el valor de los elementos y constantes encontradas para el convertidor DC-DC reductor, estas se ubican en la tabla 14.

**Tabla 14***Constantes obtenidas del diseño del convertidor*

Constante	Valor
Ciclo de trabajo D	0.652
Resistencia R	1.825 $\Omega$
Capacitor C	220 $\mu\text{F}$
Resistor del capacitor $R_C$	0.096 $\Omega$
Inductor L	15 $\mu\text{H}$
Resistor del inductor $R_L$	1 $\Omega$

### 3.7.2 Implementación del convertidor DC-DC tipo reductor en Simulink

Con los datos de los elementos obtenidos en el diseño del convertidor DC-DC reductor, la implementación del circuito en Simulink se muestra en la Figura 39. Se observa que para un voltaje de entrada  $V_{in} = 22.4$  (V), la salida de voltaje  $V_o$  es 14.3 (V) y con una corriente  $I_o$  de 7.834 (A).



**Figura 39.** Convertidor DC-DC tipo reductor en Simulink

### 3.7.3 Función de transferencia del convertidor DC-DC tipo reductor

La función de transferencia de un convertidor DC-DC reductor se obtiene para diseñar el controlador PID, el cual sirve para controlar la variable  $D$  que es ciclo de trabajo del generador PWM, que va hacia el convertidor DC-DC tipo reductor para regular su conmutación y obtener el voltaje de salida deseado por el controlador.

Las fórmulas para obtener la función de transferencia del convertidor DC-DC reductor, se extrajeron de la investigación (Wester & Middlebrook, 1973) cuyo trabajo se basa en la caracterización de convertidores DC-DC elementales. Estas fórmulas se resumen en la tabla 15 donde se consideran los elementos que conforman un convertidor DC-DC.

Las fórmulas de la tabla 15 se reemplazan en las variables de la expresión (3.36), el cual representa la función de transferencia de un convertidor DC-DC elemental donde se relaciona el voltaje de salida con el voltaje entrada.

$$G_s(s) = \frac{\hat{v}(S)}{\hat{v}_g(S)} = A_{so} G_{fo} \frac{1 + \frac{s}{\omega_z}}{1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2} \quad (3.36)$$

**Tabla 15**

*Variables para función de transferencia de convertidores DC-DC elementales*

<b>Buck</b>	<b>Boost</b>	<b>Buck-Boost</b>	
$D$	$1/D'$	$D/D'$	$A_S$
$V_s$	$\frac{D'^2 R - R_l}{D'^2 R + R_l} \cdot \frac{V_g}{D'^2}$	$\frac{D'^2 R - (D - D')R_l}{D'^2 R + R_l} \cdot \frac{V_g}{D'^2}$	$A_{co}$
$\frac{R}{R + R_l}$	$\frac{R}{R + R_l/D'^2}$	$\frac{R}{R + R_l/D'^2}$	$G_{fo}$
$\frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{R + R_l}{R + R_c}}$	$\frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{D'^2 R + R_l}{R + R_c}}$	$\frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{D'^2 R + R_l}{R + R_c}}$	$\omega_o$
$\frac{1}{\omega_o} \left( CR_c + \frac{CRR_l + L}{R + R_l} \right)^{-1}$	$\frac{1}{\omega_o} \left( CR_c + \frac{CRR_l + L}{D'^2 R + R_l} \right)^{-1}$	$\frac{1}{\omega_o} \left( CR_c + \frac{CRR_l + L}{D'^2 R + R_l} \right)^{-1}$	$Q$
$\frac{1}{CR_c}$	$\frac{1}{CR_c}$	$\frac{1}{CR_c}$	$\omega_z$
$\infty$	$\frac{D'^2 - R_l}{L}$	$\frac{D'^2 - (D - D')R_l}{DL}$	$\omega_a$

Fuente: (Wester & Middlebrook, 1973)

Al reemplazar las variables del convertidor DC-DC tipo reductor en la expresión (3.36), la función de transferencia queda como se indica en la expresión (3.37).

$$1 + \frac{s}{\frac{1}{C \cdot R_C}} \quad (3.37)$$

$$1 + \frac{s}{\frac{1}{\omega_o \left( C \cdot R_C + \frac{C \cdot R \cdot R_L + L}{R + R_L} \right)^{-1}} \cdot \omega_o} + \left( \frac{s}{\frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{R + R_L}{R + R_C}}} \right)^2$$

La simplificación de la expresión (3.37) queda como indica la expresión (3.38):

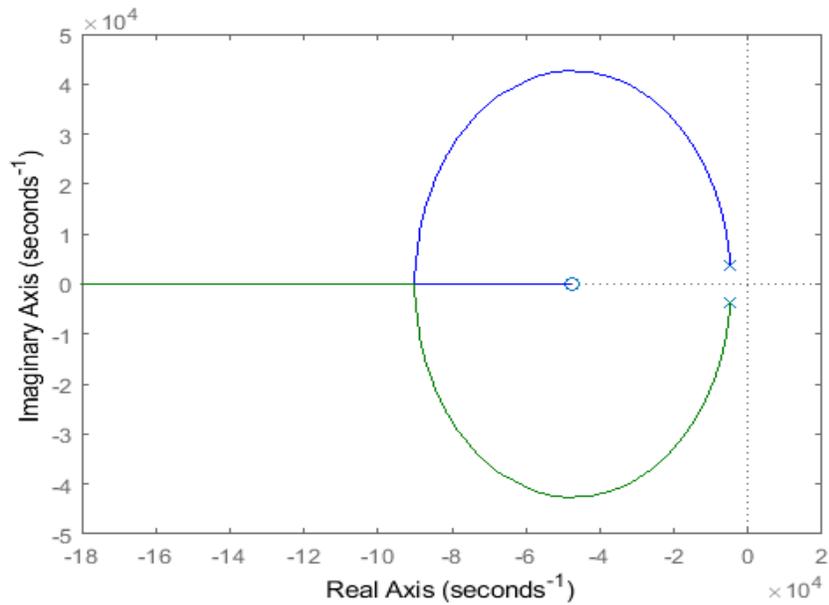
$$\frac{D \cdot R \cdot (1 + C \cdot R_C \cdot s)}{R + R_L + (C \cdot R_C \cdot R + C \cdot R_C \cdot R_L + C \cdot R \cdot R_L + L)s + L \cdot C \cdot (R + R_C)s^2} \quad (3.38)$$

Posteriormente se reemplazan en la expresión (3.38) las constantes obtenidas en el dimensionamiento del convertidor DC-DC, las cuales se mostraron en la tabla 14.

El resultado final de la función de transferencia del convertidor DC-DC reductor del sistema fotovoltaico, se indica en la expresión (3.39).

$$G(s) = \frac{270.2s + 1.279 \times 10^7}{s^2 + 9599s + 3.576 \times 10^7} \quad (3.39)$$

El diagrama de polos y ceros de la función de transferencia se muestra en la Figura 40, donde se aprecia que los polos se encuentran a la izquierda del origen, lo que acredita que la función de transferencia es estable y se puede diseñar un controlador PID para la planta.

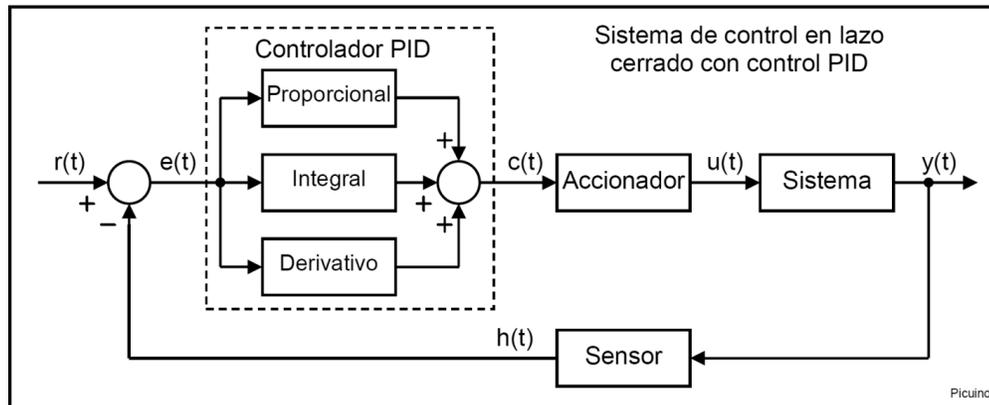


**Figura 40.** Diagrama de polos y ceros de la planta

### 3.8 Controlador PID

#### 3.8.1 Características del control PID

El controlador PID es un mecanismo con realimentación como se muestra en la Figura 41, que sirve para controlar un proceso mediante la medición del error  $e(t)$  entre el valor del proceso  $h(t)$  y el valor deseado para el proceso  $r(t)$ , es decir,  $e(t) = r(t) - h(t)$ . En base al error  $e(t)$ , el controlador calcula la variable de control  $c(t)$  que acciona sobre el proceso para obtener su valor deseado que es  $y(t)$ .



**Figura 41.** Esquema de un controlador PID

Fuente: (Picuino, 2017)

Un controlador PID consta de 3 acciones: proporcional, integral y derivativa. La acción *proporcional* da una salida del controlador proporcional a la señal de error, la acción *integral* da una salida del controlador proporcional al error acumulado, es decir, a los pequeños errores que se acumulan en el tiempo, y la acción *derivativa* da una salida del controlador proporcional a la tasa de cambio de la señal de error.

La razón de utilizar un controlador PID en el sistema fotovoltaico, es para regular el voltaje de salida del convertidor DC-DC, a un valor alrededor de 14.4 V, el cual es el voltaje que se necesita para cargar las baterías del sistema autónomo de almacenamiento de energía (SAAE). Para diseñar el controlador PID se utiliza la función de transferencia del convertidor DC-DC reductor del proyecto.

### 3.8.2 Diseño del controlador digital PID

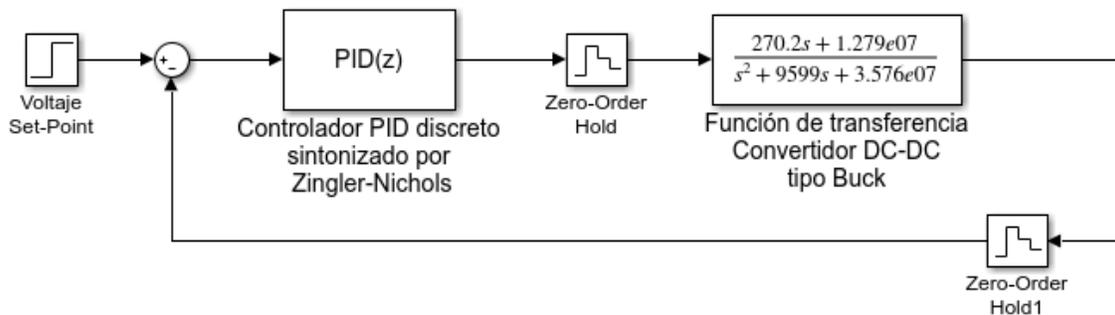
El controlador PID tiene la formulación matemática que se indica en la expresión (3.40).

$$G_c(s) = K_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.40)$$

Donde  $G_c(s)$  es la función de transferencia de un controlador PID,  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $T_i$  es el tiempo integral y  $T_d$  es el tiempo derivativo.

Adicionalmente, se desea diseñar un controlador PID digital, el cual es un controlador que tiene la ventaja de implementarse en un microcontrolador o microprocesador para aprovechar sus recursos computacionales como procesamiento y mayor velocidad en la respuesta.

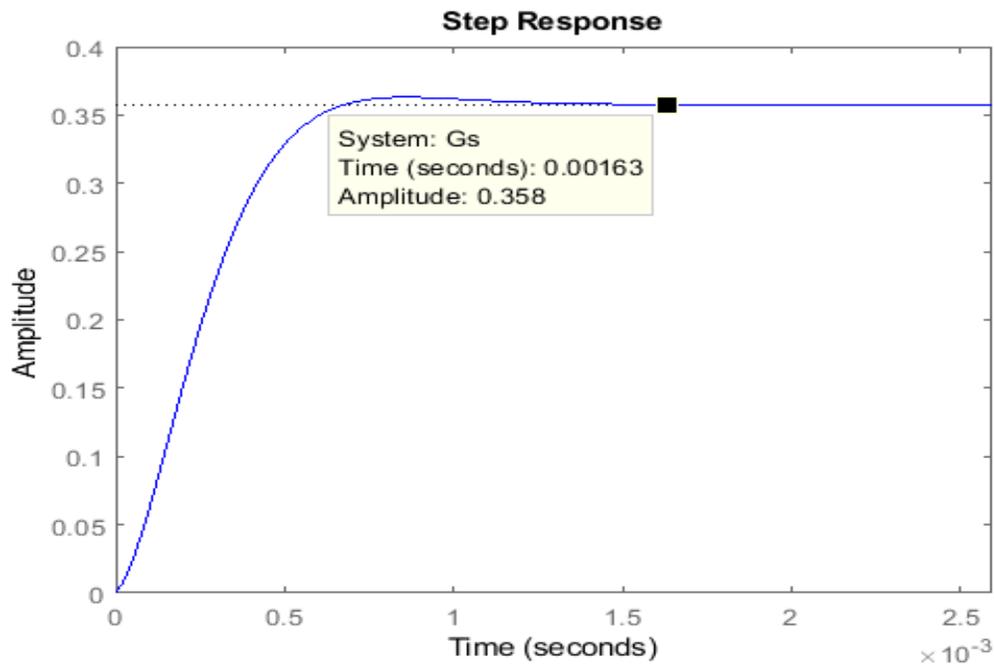
El controlador digital PID necesita también que la función de transferencia de convertidor DC-DC reductor esté en tiempo discreto, y esto es posible con el uso del retenedor de orden cero (ZOH) de Simulink, tal como indica la Figura 42.



**Figura 42.** Esquema del controlador PID discreto para convertidor DC-DC

- **Procedimiento**

Primero se analiza la respuesta a un escalón unitario de la función de transferencia  $G(s)$  dada en la expresión (3.39) en lazo cerrado. La respuesta al escalón se muestra en la Figura 43.



**Figura 43.** Respuesta al escalón del convertidor DC-DC reductor

De la gráfica se observa que la planta es un sistema subamortiguado, el tiempo de establecimiento es aproximadamente a los 1.63 (ms), y se tiene un sobreimpulso bastante bajo. Con el diseño de un controlador PID se impone tener un límite de sobreimpulso  $M_p < 5\%$  de la respuesta de la planta y un tiempo de establecimiento  $t_s = 1.6$  (ms).

También se obtiene el factor de amortiguamiento  $\xi$  con la ecuación de sobreimpulso  $M_p$  que se indica en la expresión (3.41).

$$M_p = 100 \cdot e^{\frac{-\pi \cdot \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (3.41)$$

$$\xi^2 = \frac{\ln\left(\frac{5}{100}\right)^2}{\ln\left(\frac{5}{100}\right)^2 + \pi^2}$$

$$\xi = 0.69$$

Luego se obtiene la frecuencia natural de la planta en (rad/s) dada en la expresión (3.42).

$$ts = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (3.42)$$

$$\omega_n = \frac{4}{0.69 \cdot 1.6 \times 10^{-3}}$$

$$\omega_n = 3622.6$$

El método que se utilizó para el diseño del controlador PID, es el de última ganancia de Ziegler-Nichols, donde el procedimiento para encontrar la ganancia proporcional  $K_p$ , el tiempo integral  $T_i$  y tiempo derivativo  $T_d$ , es utilizar los parámetros iniciales que se obtuvieron en la respuesta al escalón unitario de la planta en lazo cerrado. (Katsuhiko Ogata, 2010).

Para la digitalización de la función de transferencia se necesita de un tiempo de muestreo. Primero se calcula la constante de tiempo dominante de la planta con los parámetros  $\xi$  y  $\omega_n$  mediante la expresión (3.43), esta constante es parte de la función de lazo cerrado del sistema (J. Bollinger and A. Wesley, 1988).

$$\tau_{dom} = \frac{1}{\xi\omega_n} \quad (3.43)$$

$$\tau_{dom} = \frac{1}{\xi\omega_n}$$

$$\tau_{dom} = \frac{1}{0.69 \cdot 3622.6}$$

$$\tau_{dom} = 400(\mu s)$$

Luego se consideró una décima parte de la constante de tiempo, para definir el tiempo de muestreo (Ver expresión (3.44)).

$$T_s < \frac{\tau_{dom}}{10} \quad (3.44)$$

$$T_s < \frac{400}{10}$$

$$T_s < 40$$

$$T_s = 30(\mu s)$$

Con el tiempo de muestreo  $T_s$  obtenido se procede a digitalizar la función de transferencia del convertidor DC-DC tipo reductor, por medio de la función `c2d` en Matlab, el cual da como resultado la expresión (3.45).

$$G(z) = \frac{0.06266z + 0.0172}{z^2 - 1.16z + 0.3829} \quad (3.45)$$

Luego con la función de transferencia en tiempo discreto, se procede a encontrar la ecuación característica que proviene del sistema discreto en lazo cerrado, ésta se indica en la expresión (3.46) (J. Bollinger and A. Wesley, 1988).

$$\begin{array}{cccc} a_1 & a_1 & b_1 & b_2 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \Delta z = z^2 - 1.16z + 0.3829 + k(0.06266z - 0.0172) \end{array} \quad (3.46)$$

$$a_1 = -1.16$$

$$a_2 = 0.3829$$

$$b_1 = 0.06266$$

$$b_2 = 0.0172$$

A continuación se utilizan las fórmulas de Ziegler – Nichols para hallar los valores de las constantes de  $K_u$ ,  $\alpha$ ,  $T_o$ , mediante las expresiones (3.47), (3.48) y (3.49) respectivamente

$$Ku = \frac{1 - a_2}{b_2} \quad (3.47)$$

$$Ku = \frac{1-0.3829}{0.0172}$$

$$Ku = 35.88$$

$$\alpha = -\frac{1}{2}(Ku \cdot b1 + a1) \quad (3.48)$$

$$\alpha = -\frac{1}{2}(35.88 \cdot 0.06266 - 1.16)$$

$$\alpha = -0.5441$$

$$To = \frac{2\pi T}{\cos^{-1} \alpha} \quad (3.49)$$

$$To = \frac{2\pi \cdot 30 \cdot 10^{-6}}{\cos^{-1}(-0.5441)}$$

$$To = 1.4635 \times 10^{-4}$$

Las fórmulas para hallar las constantes de  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  del controlador PID se muestran en las expresiones (3.50), (3.51) y (3.52) (J. Bollinger and A. Wesley, 1988).

$$K_p = 0.6 \cdot Ku \quad (3.50)$$

$$K_p = 0.6 \cdot 35.88 = 21.528$$

$$T_i = To / 2 \quad (3.51)$$

$$T_i = 1.4635 \times 10^{-4} / 2 = 7.3175 \times 10^{-5}$$

$$T_d = To / 8 \quad (3.52)$$

$$T_d = 1.4635 \times 10^{-4} / 8 = 1.8294 \times 10^{-5}$$

También forma de representar a las partes integral y derivativa del controlador PID, es como se indican en las expresiones (3.53) y (3.54) respectivamente.

$$K_i = K_p / T_i \quad (3.53)$$

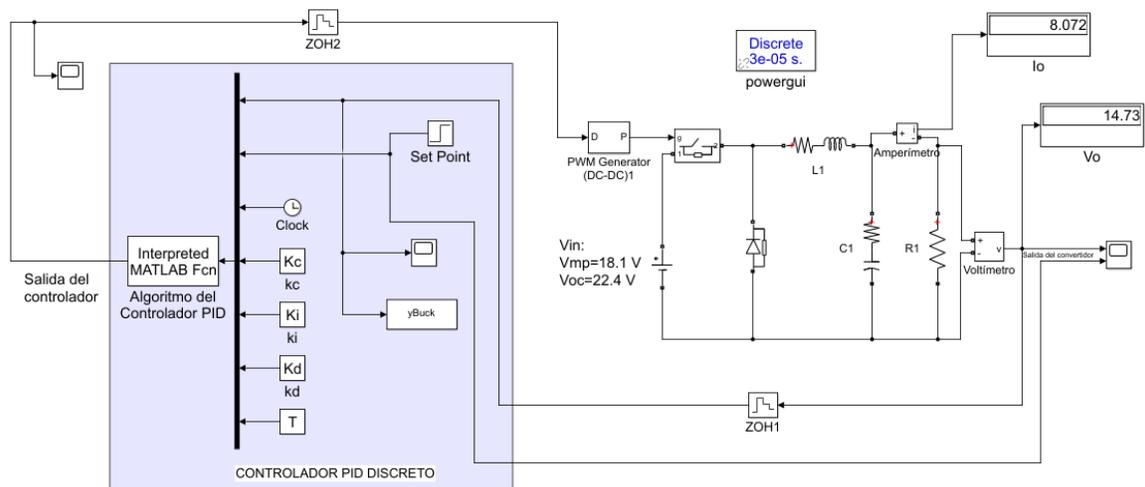
$$K_i = 21.528 / 7.3175 \cdot 10^{-5} = 294198.83$$

$$K_d = K_p \cdot T_d$$

$$K_d = 21.528 \cdot 1.8294 \cdot 10^{-5} = 3.938 \cdot 10^{-4}$$

### 3.8.3 Implementación del controlador PID y convertidor en Simulink

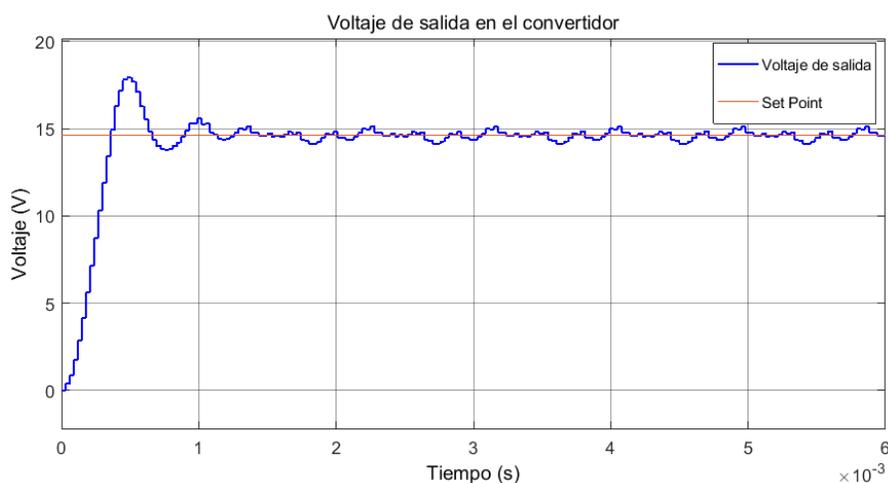
Una vez encontradas las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , se realizó la implementación Simulink del controlador PID discreto en conjunto con el convertidor DC-DC tipo reductor, esto puede visualizarse en la Figura 44. También se tienen en la salida y entrada del controlador, retenedores de orden cero (ZOH) para la digitalización del controlador PID con el tiempo de muestreo  $T_s$ .



**Figura 44.** Controlador PID discreto y convertidor DC-DC reductor

El código para la implementación del controlador PID digital se muestra en el Anexo H del documento, que es un código realizado para lenguaje C.

En la Figura 45 se observa como el controlador actúa en la regulación convertidor DC-DC reductor para obtener en la salida el voltaje  $V_o = 14.6$  (V).



**Figura 45.** Set-Point y Voltaje de salida del convertidor

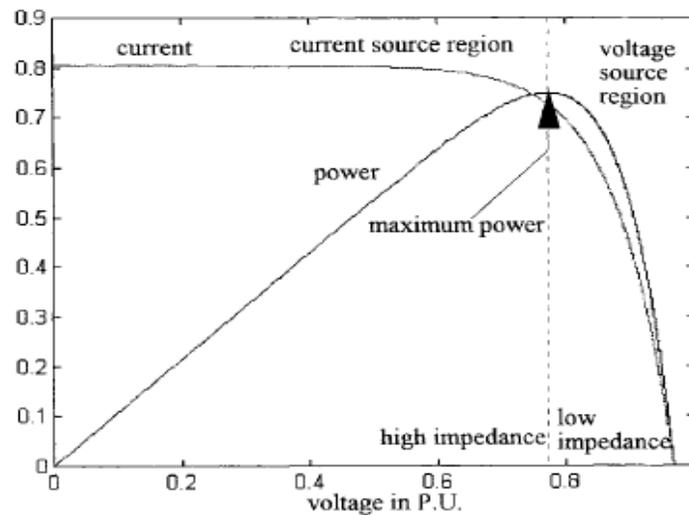
### 3.9 Seguidor de punto de máxima potencia (MPPT)

El seguidor de punto de máxima potencia (MPPT) es un algoritmo que trabaja en conjunto con el módulo fotovoltaico (PV) y el convertidor DC-DC reductor, para extraer al máximo la energía del módulo PV ante las distintas irradiaciones que varían en el día. El objetivo del MPPT es acoplar la impedancia del convertidor DC-DC con la impedancia del módulo fotovoltaico, es decir lograr tener las impedancias equivalentes tanto en el módulo PV como en el convertidor DC-DC. Al realizar esto se cumple la ley de conservación de energía o máxima transferencia de la energía que obtiene el módulo PV hacia el convertidor DC-DC (Hua, Lin, & Shen, 1998).

Existen varios tipos de algoritmos que se implementan en un regulador MPPT, estos son: Perturbar & Observar (P&O), Incremental-Conductancia (IncCond). Para este proyecto se utiliza el algoritmo P&O debido a su simplicidad y bajo coste computacional que se requiere al implementar en un procesador digital de señal (DSP).

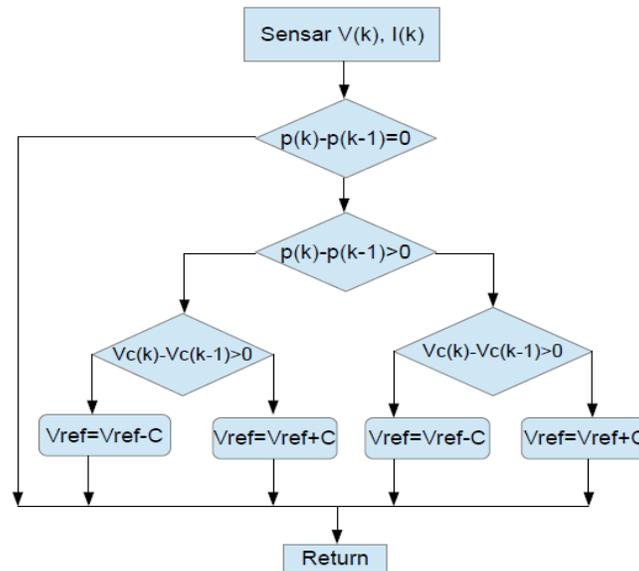
### 3.9.1 Características del algoritmo MPPT P&O

La función del algoritmo MPPT P&O es verificar el punto de operación donde trabaja el módulo fotovoltaico en un determinado tiempo, y luego trasladar ese punto al punto de máxima potencia como se indica en la Figura 46, donde se tiene un voltaje de máxima potencia  $V_{mp}$  y una corriente de máxima potencia  $I_{mp}$ .



**Figura 46.** Curvas características de un panel solar  
Fuente: (Hua, Lin, & Shen, 1998)

El diagrama de flujo del algoritmo MPPT P&O se muestra en la Figura 47.



**Figura 47.** Diagrama de flujo del MPPT P&O

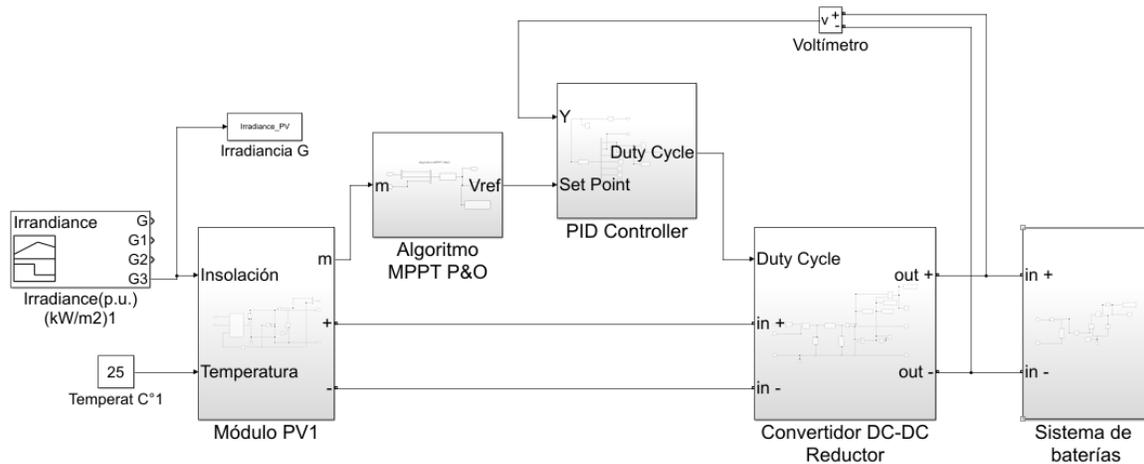
Este algoritmo trabaja en base a perturbaciones periódicas donde compara la potencia actual del módulo PV con la potencia de un tiempo anterior, luego en base a la variación del voltaje en los terminales del módulo PV, se incrementa el voltaje de referencia  $V_{ref}$  si la potencia del módulo PV ha aumentado, o decrementa  $V_{ref}$  si la potencia del módulo PV ha disminuido.

La variable  $V_{ref}$  es un dato que tiene como valor inicial el voltaje de potencia máxima  $V_{mp}$  del módulo PV. Entonces esta variable puede ser destinada al controlador PID digital para ser considerada como referencia. De esta forma el controlador PID se encarga de manipular el ciclo de trabajo  $D$  del generador PWM que se dirige hacia el convertidor DC-DC reductor, con el fin de regular la tensión de salida a un valor alrededor de 14.4 (V).

Al mismo tiempo el algoritmo MPPT P&O realiza la tarea de aprovechar y extraer al máximo la energía que recibe el módulo fotovoltaico, mientras que el controlador PID regula el voltaje.

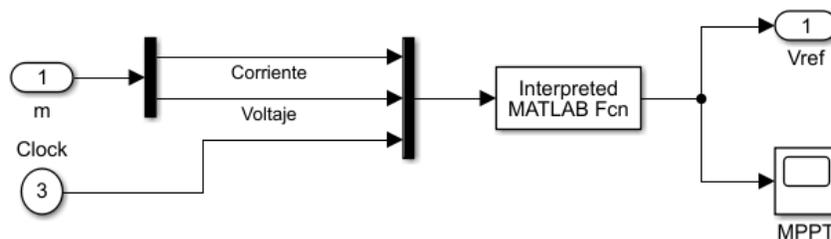
### 3.10 Implementación del algoritmo MPPT y controlador PID

En el sistema fotovoltaico del presente proyecto, se ha implementado el algoritmo MPPT P&O para la extracción máxima de energía del módulo PV y se ha agregado un controlador PID digital para controlar que la tensión de salida del convertidor DC-DC reductor esté en un valor alrededor de 14.4 V. El esquema se muestra en la Figura 48.



**Figura 48.** Sistema fotovoltaico con controlador PID basado en MPPT P&O

Dentro del bloque Algoritmo MPPT P&O se tiene el bloque Interpreted MATLAB Fcn, como se muestra en la Figura 49, el cual contiene el algoritmo MPPT que trabaja en base a la lectura de corriente y voltaje del módulo PV a una tasa de muestreo  $t_s = 0.001$  (s).

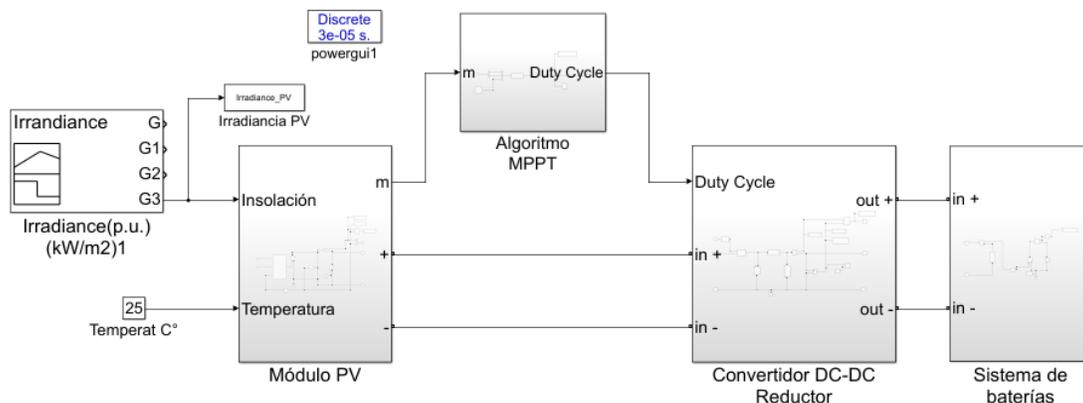


**Figura 49.** Implementación de MPPT P&O en Simulink

El código de implementación del algoritmo MPPT P&O, se indica en el Anexo I del documento, el cual está basado en Lenguaje C.

En adición, se implementó también un sistema fotovoltaico con solamente el diseño del algoritmo MPPT P&O como se muestra en la Figura 50, donde se observa que no tiene el controlador PID que se había indicado en la Figura 48.

Este planteamiento servirá en el capítulo 5 para comparar las eficiencias de extraer energía en el sistema fotovoltaico ya sea con utilizar solamente la técnica MPPT P&O o también al utilizar la técnica MPPT P&O y un controlador PID digital.



**Figura 50.** Sistema fotovoltaico con regulador MPPT P&O

### 3.11 Sistema de almacenamiento de energía

En el sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica, se consideran elementos de almacenamiento de energía que pueden ser los supercapacitores o baterías. En el sistema de alimentación del presente proyecto se utilizan baterías de litio, para almacenar la energía que se adquiere en los módulos fotovoltaicos y luego suministrar esa misma energía hacia una carga que se conectada, en este caso el radar de velocidad. Las baterías se conforman por pequeños

acumuladores de energía que se conectan en serie y son conocidas como celdas. Antes de seleccionar una batería, a continuación se muestran los tipos de baterías más comunes en los sistemas fotovoltaicos.

### 3.11.1 Tipos de baterías para sistemas fotovoltaicos

- **Plomo-ácido**

Este tipo de batería se encuentra en los vehículos convencionales como son las *baterías de arranque* que soportan ciclos cortos de descarga, o en los vehículos eléctricos donde se encuentran las *baterías de tracción* para ciclos de descarga muy profundas. También se tienen las *baterías estacionarias* que se encuentran en sistemas de alimentación ininterrumpida por ejemplo en aplicaciones de telecomunicaciones o sistemas de ordenadores (Miguel Alonso Abella, 2002).

En general sus ciclos de vida útil oscilan entre 250-750. Las ventajas de estas baterías son el bajo costo y alta eficiencia. La desventaja es el bajo tiempo de vida útil y ser contaminantes (Jossen, Garche, & Sauer, 2004).

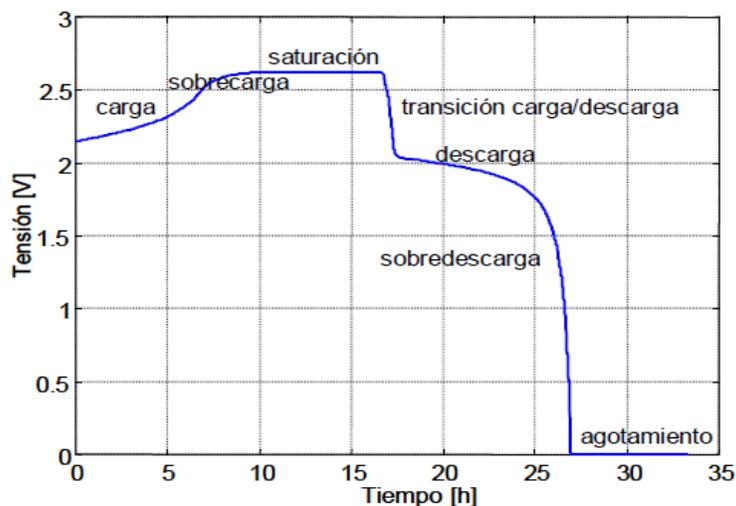
- **Litio**

Las baterías de litio son la tecnología más común y utilizada en las aplicaciones a nivel global, se las encuentra en los celulares, laptops, tablets y vehículos eléctricos. Los ciclos de descarga y vida útil de estas baterías son mayores que las baterías de plomo ácido y presentan mayor eficiencia en la carga y descarga de energía. La desventaja de estas baterías son los altos costos y de no mostrar reacción química alguna ante una sobrecarga (Jossen et al., 2004).

Bajo estas características, las baterías que se utilizarán en el sistema de alimentación fotovoltaico del presente proyecto serán las de tipo Litio.

### 3.11.2 Niveles de carga de una batería

Existen alternativas que sirven para medir el nivel de carga de una batería. Una es mediante la medición del voltaje en los terminales de la batería, otra es mediante la medición del estado de carga (SOC) que se aplica como un contador de Amperios-hora. Por ejemplo en la Figura 51, se observa los niveles de tensión en el transcurso del tiempo de una celda de batería de 2V, donde se tienen varios niveles de carga.



**Figura 51.** Zonas de trabajo en una celda  
Fuente: (Guasch Murillo & Silvestre Berges, 2003)

Se observa que hay tres zonas de trabajo: carga, sobrecarga y saturación, esto significa que en la celda hay una determinada cantidad de corriente que entra y alimenta la energía de la batería. Mientras que en las siguientes zonas el nivel de tensión disminuye, lo que significa que la corriente sale hacia alguna carga para suministrar la energía.

Trabajar en las zonas de carga y descarga son las más recomendables puesto que se tiene el mejor rendimiento energético de la batería. Asimismo la zona de sobredescarga significa que se ha extraído una cantidad excesiva de energía de la batería y mientras que la zona de agotamiento se califica de muy peligrosa puesto que puede dañar a la batería (Guasch Murillo & Silvestre Berges, 2003).

Existe un concepto llamado Profundidad de descarga (DOD), que es un parámetro que indica hasta donde puede descargarse una batería y no afectar en mayor medida a sus ciclos de vida útil, este parámetro es importante para el dimensionamiento de una batería.

### 3.12 Dimensionamiento de la batería

El tipo de batería a dimensionar es el de Litio, se calcula la capacidad de acuerdo a la carga que representa el radar de velocidad vehicular.

#### 3.12.1 Cálculo de capacidad de la batería

En la tabla 16 se indican los datos iniciales para el dimensionamiento, los cuales son: el consumo energético  $Wh$  del medidor de velocidad, los días de consumo  $d$ , la profundidad de descarga  $DOD$ , el voltaje que trabaja el sistema medidor  $V$  y el porcentaje de pérdidas de potencia por temperatura  $Pe_{temp}$  de la batería. Todos estos datos se utilizan en la expresión (3.55) para calcular la capacidad de la batería en (Ah).

**Tabla 16**

*Datos iniciales para dimensionamiento de la batería*

Consumo energético del radar, $Wh$	611.19 Wh
Días de consumo, $d$	1
Profundidad de descarga, $DOD$	0.8

**CONTINÚA**



Voltaje, $V$	12 V
Pérdidas por temperatura, $Pe_{temp}$	15 %

Amperio-hora batería:

$$Ah = \frac{Wh / día \cdot días}{DOD \cdot V} \cdot Pe_{temp} \quad (3.55)$$

$$Ah = \frac{611.1974 \cdot 1}{0.8 \cdot 12} \cdot 1.15$$

$$Ah = 73.22 \approx 80$$

- **Tiempo de carga.**

Se calcula la corriente que se necesita para cargar la batería de Litio de 80 (Ah), en un lapso de 10 horas, esto se realiza mediante la expresión (3.56):

$$I_{ca} = \frac{C_{nomB}}{T_{cargaB}} \quad (3.56)$$

$$I_{ca} = \frac{80}{10} = 8$$

Donde,  $C_{nomB}$  es la capacidad nominal de la batería en (Ah),  $T_{cargaB}$  es el tiempo de carga en horas y  $I_{ca}$  es la corriente en (A) que se requiere para cargar la batería.

### 3.12.2 Selección de la batería

La batería seleccionada proviene de la distribuidora española AutoSolar, la cual es una batería de litio de ciclo profundo de descarga, que se utiliza para descargas cíclicas frecuentes, en este caso es apto para la aplicación de alimentación hacia el medidor de velocidad vehicular. Las especificaciones técnicas se muestran en la tabla 17 y Figura 52.

**Tabla 17****Batería RELION RB80 12V80AH**

<b>ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS</b>	
Voltaje Nominal	12.8 V
Capacidad Nominal	80 Ah
Capacidad @ 25A	192 min
Energía	1024 Wh
Resistencia	30 mΩ
Módulos en serie	6
<b>ESPECIFICACIONES MECÁNICAS</b>	
Dimensiones (L×W×H)	305×168×219 mm
Peso	11.3 kg
Tipo de celda	Cilíndrica – LiFePO <sub>4</sub>
<b>ESPECIFICACIONES CARGA</b>	
Corriente de carga recomendada	40 A
Corriente máxima de carga	80 A
Voltaje de carga recomendada	14.2 V – 14.6 V
Voltaje de corte de carga (Cut-Off)	15.6 V
<b>ESPECIFICACIONES DE DESCARGA</b>	
Máxima corriente de descarga continua	80 A
Corriente pico de descarga	160 A(7.5s ± 2.5s)
Voltaje menor de desconexión recomendado	11 V
Voltaje de corte de descarga (Cut-Off)	8 V

Fuente: (RELION, 2018)

**Figura 52.** Batería RELION RB80 12V80AH

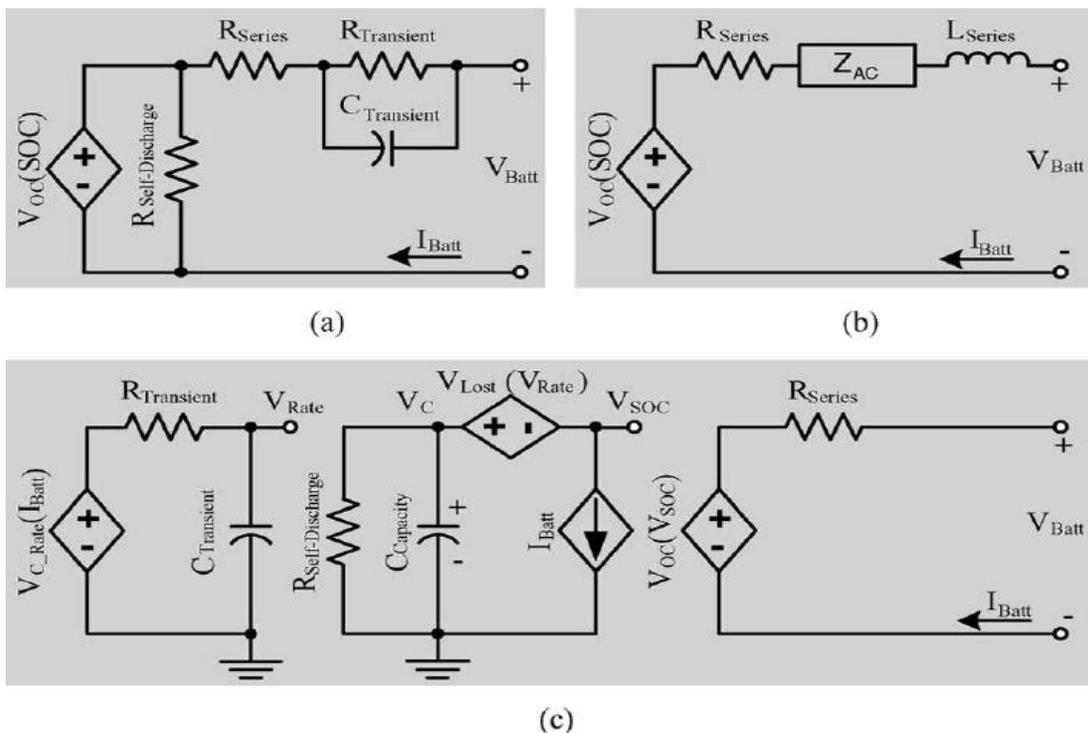
Fuente: (RELION, 2018)

De acuerdo al generador fotovoltaico que se diseñó en las secciones anteriores donde se tiene un módulo PV con una corriente de máxima operación  $I_{mp} = 8.33$  (A) y los respectivos controladores para la extracción de máxima energía. Se puede asegurar que con la corriente  $I_{mp}$ , la batería se cargará en 10 horas máximo.

### 3.13 Modelo eléctrico de la batería

#### 3.13.1 Circuito equivalente eléctrico

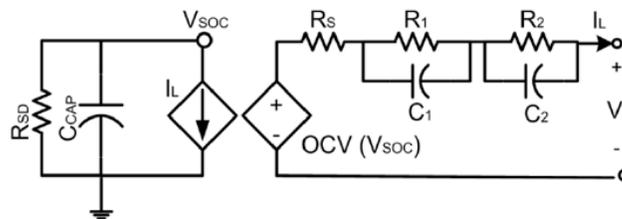
Los modelos de circuitos equivalentes se han aplicado en su mayoría para obtener el modelamiento de una batería del tipo plomo ácido o de litio, entre los modelos principales de baterías se tienen los siguientes: Modelo eléctrico de Thevenin, Impedance y Runtime (Chen & Rincon-Mora, 2006; Salameh, Casacca, & Lynch, 1992), estos pueden visualizarse en la Figura 53.



**Figura 53.** Modelos eléctricos: (a) Thevenin, (b) Impedancia (c) Runtime

Fuente: (Chen & Rincon-Mora, 2006)

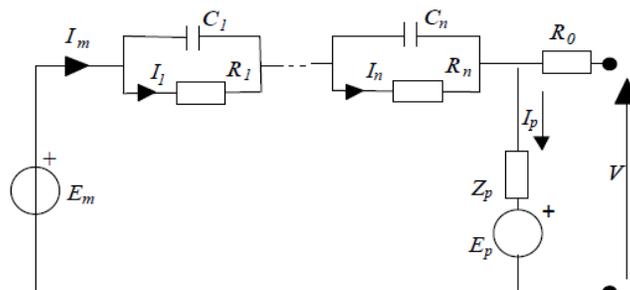
También se menciona en la investigación (Yao, Aziz, Kong, & Idris, 2013) una propuesta de combinación intuitiva de los 3 tipos de modelos anteriores, tal como se muestra en la Figura 54, por diversas razones se creó este modelo para obtener una mayor precisión en la simulación de la batería y rendimiento de la información de corriente y voltaje sobre la batería, con el fin de optimizar el diseño de circuitos que conjugan con la batería, mejorar la eficiencia energética, la predicción de consumo de energía de la batería en distintas cargas, entre otras.



**Figura 54.** Modelo circuito equivalente

Fuente: (Yao et al., 2013)

Existe otro modelo fue propuesto en la investigación (Huria, Ceraolo, Gazzarri, & Jackey, 2012) y es conocido como Modelo eléctrico general, que se utilizaron para celdas de litio. El modelo se indica en la Figura 55, el cual tiene una fuente de voltaje  $E_m$ , una resistencia interna  $R_0$  y varias ramas  $RC_{1...n}$ , y también se asemejan al modelo de Thevenin.



**Figura 55.** Modelo eléctrico general

Fuente: (Huria et al., 2012)

Con este modelo eléctrico general se puede simular una celda de batería de litio y como se mencionó, las celdas al conectarse en serie o en paralelo forman una batería completa, en este caso se formaría un modelo eléctrico para una batería de Litio.

El elemento  $R_s$  representa a la resistencia interna que existe en la celda el cual se opone al flujo de corriente que ingresa o sale de la misma celda (Yao et al., 2013). En las ramas  $RC$ ,  $R_l$  representa la resistencia de los electrodos en las celdas de la batería, mientras que  $C_l$  representa la capacitancia que tienen los mismos electrodos en las celdas (Chen & Rincon-Mora, 2006; Salameh, Casacca, & Lynch, 1992; Yao et al., 2013).

La fuente de voltaje  $E_m$  se considera como una fuente de alimentación que varía en función del estado de carga de la celda de litio. El término SOC puede compararse como el indicador de combustible de un vehículo convencional, donde se puede calcular el nivel de energía que la batería tiene en el transcurso del tiempo.

El modelo de este proyecto se basa en el modelo eléctrico de la Figura 55, al utilizarse una sola rama RC, y esto puede denominarse como modelo eléctrico 1-RC para celda de litio.

### 3.13.2 Ecuación estado de carga (SOC)

El término  $SOC$  es una expresión matemática que mide la cantidad de energía que tiene una batería respecto a su capacidad nominal, en este caso el  $SOC$  se aplica a una celda de litio y se define con la expresión (3.57) (Arcos-Aviles et al., 2017).

$$SOC(t) = SOC(t-1) - \frac{Q_e}{C_Q} \quad (3.57)$$

Donde la variable  $SOC(t-1)$  es el estado de carga en un instante anterior,  $SOC(t)$  el estado de carga actual y  $C_Q$  es la capacidad de la batería, la cual se mide en función de la corriente de descarga y a una temperatura determinada, como se indica en la expresión (3.58) (Huria, Ceraolo, Gazzarri, & Jackey, 2012).

$$C_Q = C_Q(I, T) \quad (3.58)$$

También  $Q_e$  es la carga extraída a través de la corriente de la batería, esta se calcula con la integración de la corriente en función del tiempo, esto se muestra en la expresión (3.59).

$$Q_e = \int_0^t I_m(\tau) d\tau \quad (3.59)$$

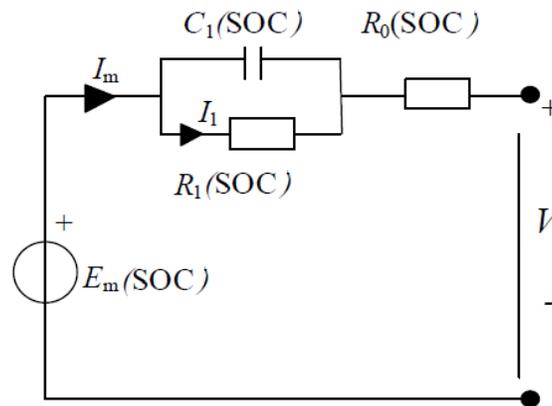
Por deducción, la variación instantánea de carga es igual a la corriente que la batería genera en función del tiempo como se indica en la expresión (3.60).

$$\frac{dQ_e(t)}{dt} = I_m(t) \quad (3.60)$$

Si se asume que la celda de litio está completamente cargada en  $t = 0$ , es decir  $SOC_0 = 1$ , la fórmula  $SOC$  para la celda es la que se muestra en la expresión (3.61) (Huria et al., 2012).

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C_Q} \quad (3.61)$$

El propósito de usar la ecuación  $SOC$  y el modelo eléctrico de 1-RC de la celda de litio es hacer que sus componentes sean dinámicos, es decir, que los valores  $E_m$ ,  $R_0$  y rama  $RC$  se modifiquen en cada  $SOC$  de la celda, en la Figura 56 se explica el circuito en función del  $SOC$ .



**Figura 56.** Modelo eléctrico 1-RC

Matemáticamente, la variación de los parámetros del modelo se puede explicar las siguientes expresiones (3.62), (3.63), (3.64) y (3.65).

$$R_0 = R_0(SOC) \quad (3.62)$$

$$R_1 = R_1(SOC) \quad (3.63)$$

$$C_1 = C_1(SOC) \quad (3.64)$$

$$E_m = E_m(SOC) \quad (3.65)$$

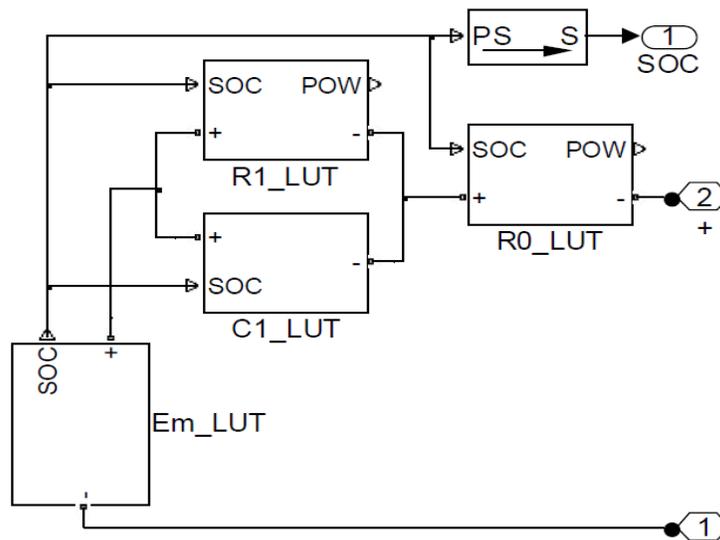
### 3.13.3 Modelos físicos con Simscape

Matlab es un potente software que dispone del programa Simulink y la librería SymPowerSystems, las cuales se utilizan para diseñar, simular, analizar circuitos y sistemas eléctricos. Para modelar la batería se utilizó 3 herramientas en conjunto Simulink, SymPowerSystems y Simscape.

Simscape es un software de desarrollo que maneja un lenguaje de programación conocido como lenguaje Simscape, y que permite la opción de crear modelos físicos similares a los bloques que se dispone en Simulink. Mediante esta herramienta se puede diseñar los elementos del modelo

eléctrico 1-RC que son: la fuente de voltaje  $E_m$ , la resistencia  $R_s$  y las ramas  $RC$ , tal como se muestra en la Figura 57, el cual se asemeja al circuito de la Figura 56.

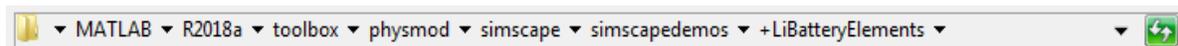
La necesidad de crear un modelo físico para cada uno de los elementos del modelo eléctrico 1-RC, es para simular la variación de cada una de sus magnitudes en función del SOC que disponga la celda de Litio (Huria, Ceraolo, Gazzarri, & Jackey, 2012).



**Figura 57.** Modelo eléctrico 1-RC con Simscape  
Fuente: (Huria et al., 2012)

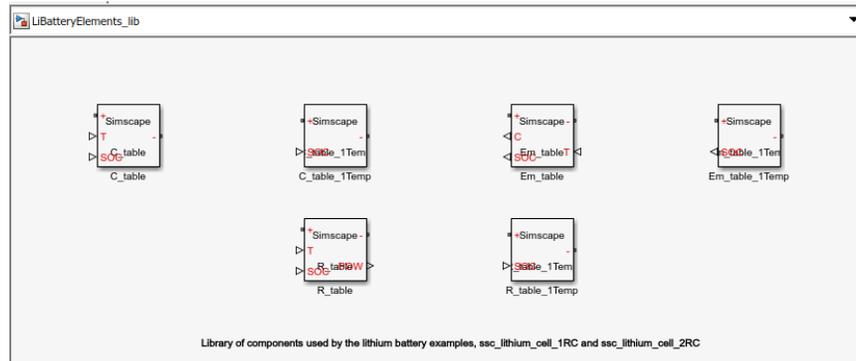
### 3.13.4 Librería para batería de litio en Simscape

El siguiente directorio de Matlab que se muestra en la Figura 58, indica la dirección de la librería 'LiBatteryElements', la cual contiene en bloques de Simscape, los elementos eléctricos para conformar el modelo eléctrico 1-RC de una celda litio que se indicó en la Figura 57.



**Figura 58.** Directorio de Matlab de la librería LiBatteryElements

Los bloques Simscape de la librería se muestran en la Figura 59, y dentro de cada bloque se desarrolla un código de programación basado en lenguaje Simscape. Pues se había mencionado que un modelo físico en Simscape se compone del bloque y el código en Simscape.



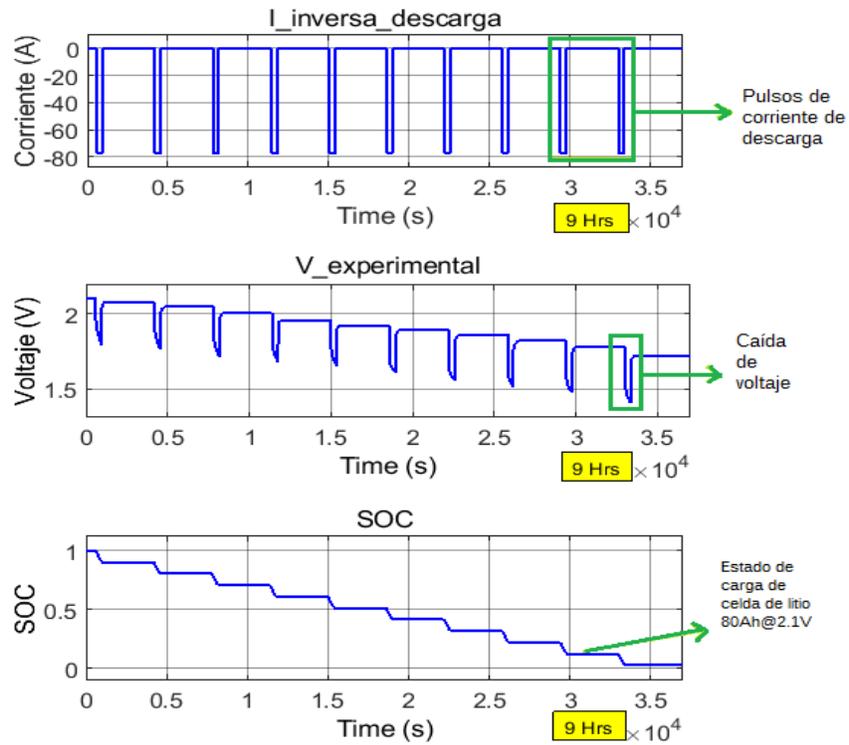
**Figura 59.** Librería para modelo eléctrico 1-RC de celda de litio

Los códigos de programación que desarrollan los bloques: voltaje  $E_m$ , resistencia interna  $R_s$ , y elementos  $R_l$  y  $C_l$ , se indican en los Anexos D, E, y F. Dentro de cada código se declara una sentencia de interpolación, donde se relaciona la magnitud (por ejemplo resistividad, capacitancia) que debe tomar el modelo físico para cada SOC. Además dentro del bloque  $E_m$ , se codifica en exclusivo la ecuación  $SOC$  dada en la expresión (3.61), para calcular el estado de carga de la celda, en base a la corriente que circula en el modelo eléctrico.

### 3.13.5 Descarga de una celda de litio

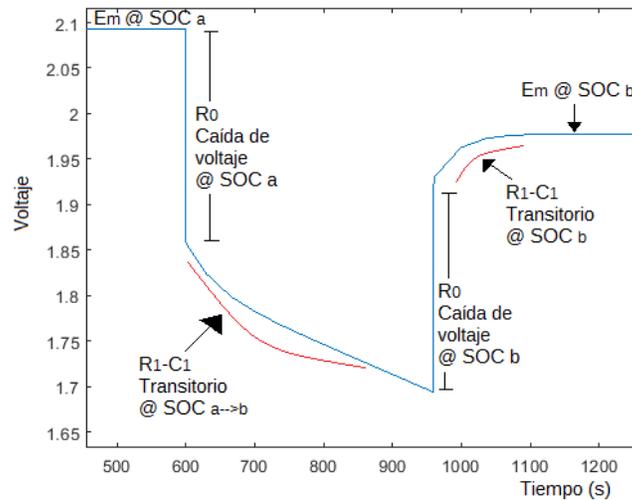
De acuerdo a las investigaciones (Huria et al., 2012; Jackey et al., 2013) que desarrollaron un modelo eléctrico. Primero se realiza una descarga casi total de la energía de una celda de batería, por medio de la conexión hacia una carga que demanda una determinada cantidad corriente. Esta conexión se realiza periódicamente varias veces hasta descargar casi en su totalidad a la celda. Esta práctica se la puede llevar también a cabo mediante una simulación con las baterías de SymPowerSystems en Simulink.

En la Figura 60 se observa una señal de pulsos de corriente negativos que vienen de una carga, esta señal disminuye el nivel de voltaje de la celda de litio durante casi 10 horas. Se observa que por cada pulso de corriente, hay una caída de voltaje en la celda.



**Figura 60.** Descarga experimental de una celda de litio

La descarga de una celda de litio se realiza para obtener los datos de su caída de voltaje y respuestas transitorias. En la Figura 61 se observa lo que sucede en la caída de voltaje de una celda de litio cuando se emite un pulso de corriente de descarga.

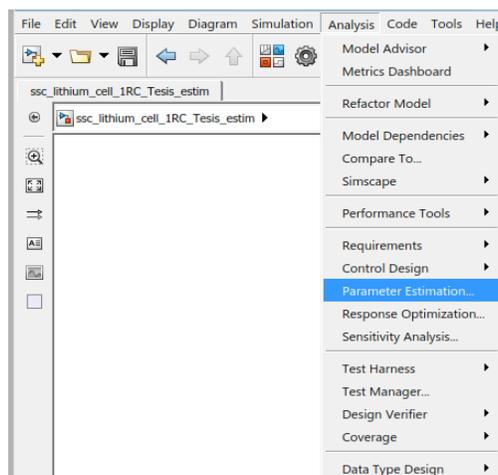


**Figura 61.** Caída de voltaje en una celda electroquímica de Litio

Estos datos se plantean después como referencia para la herramienta **Estimación de parámetros** de Simulink. La cual realiza una búsqueda de los valores que deben tomar los elementos  $E_m$ ,  $R_0$ ,  $R_1$  y  $C_1$  en cada nivel de voltaje de la celda y estado de carga de la celda.

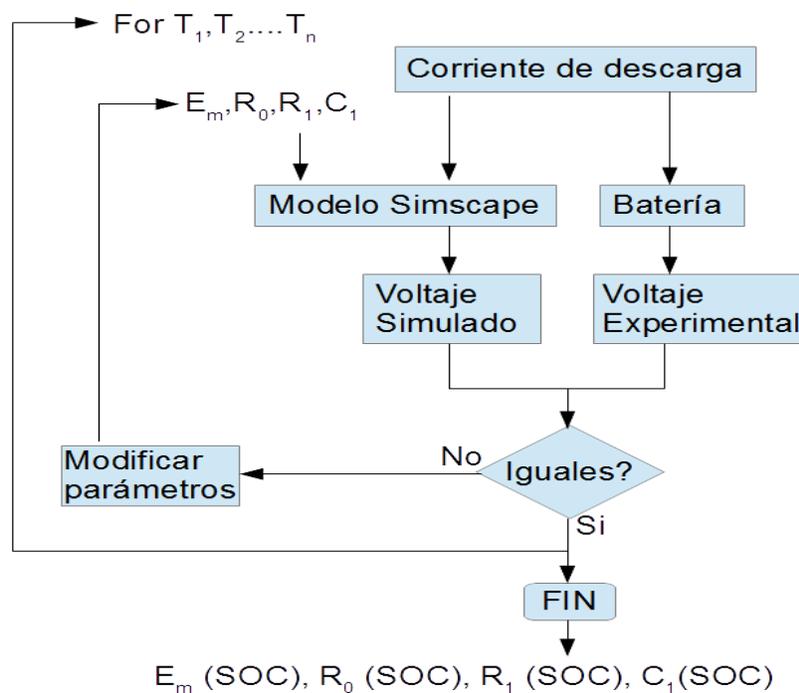
### 3.13.6 Estimación de parámetros de elementos eléctricos

La herramienta **Estimación de Parámetros** de Simulink, se encuentra en la opción Análisis de la barra de menú como se muestra en la Figura 62.



**Figura 62.** Estimador de Parámetros

El estimador de parámetros trabaja en base al diagrama de flujo de la Figura 63, que consta de una modificación aleatoria de los parámetros eléctricos en cada SOC de la batería. Luego se simula el modelo eléctrico para descargar su energía y se verifica si la salida de voltaje del modelo eléctrico es similar a la salida de voltaje que se obtuvo en la descarga inicial de la celda. Si la simulación del modelo y la descarga experimental son similares se detiene el proceso, caso contrario se repite el proceso hasta encontrar los valores adecuados en los elementos eléctricos.



**Figura 63.** Diagrama de flujo del estimador de parámetros

Fuente: (Huria, Ceraolo, Gazzarri, & Jackey, 2012)

### 3.13.7 Proceso de modelamiento eléctrico

En la herramienta **Estimación de Parámetros**, se asignan las variables a estimar de los elementos del modelo eléctrico como se muestra en la Figura 64.

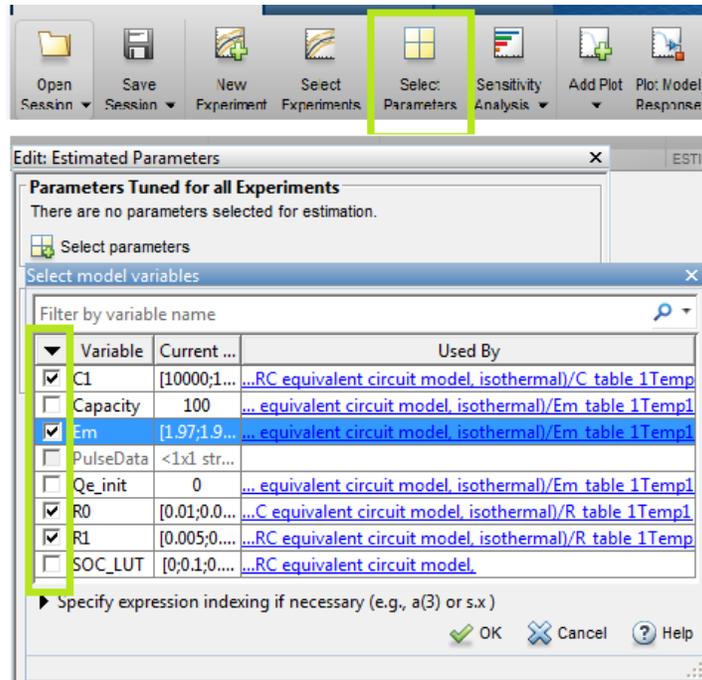


Figura 64. Selección de parámetros para estimación

Luego se agregan los datos experimentales tomados de la primera descarga de la celda de litio, que son los pulsos de corriente de descarga y el voltaje de salida de la celda. En la Figura 65 se muestran estos datos.

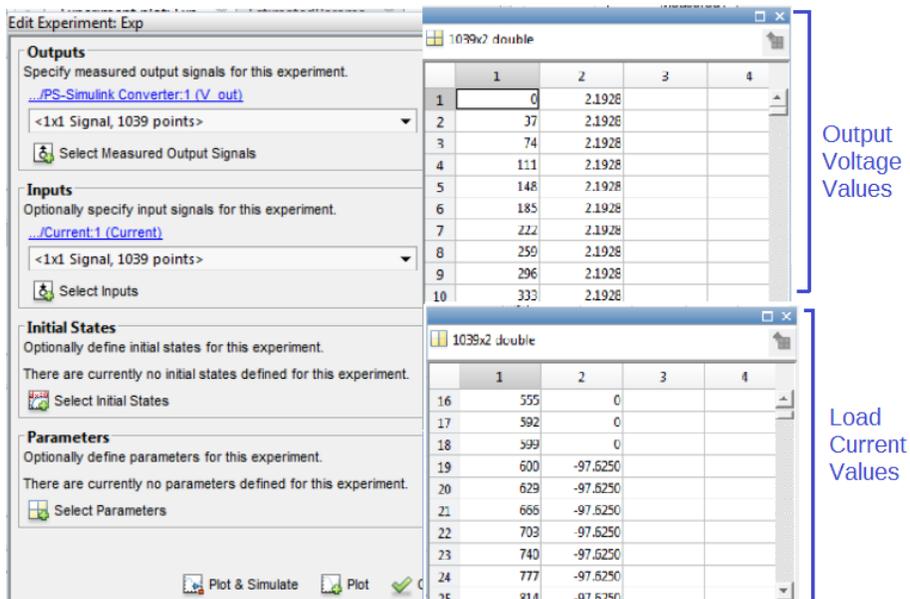
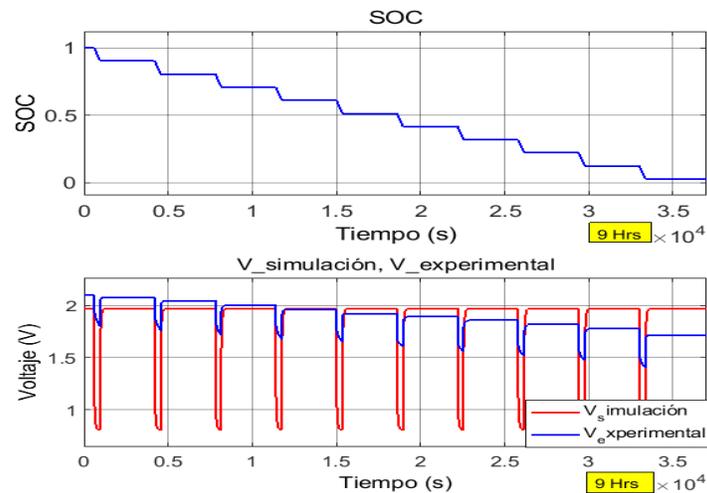


Figura 65. Datos de corriente de descarga y voltaje de salida

Con los datos experimentales y parámetros del modelo, el estimador realiza las iteraciones y simulaciones necesarias para variar los parámetros hasta obtener el modelo eléctrico correcto. En la Figura 66, se observa la diferencia que existe en un inicio entre el voltaje de salida experimental y voltaje de salida simulado del modelo eléctrico 1-RC.



**Figura 66.** Voltaje experimental y voltaje simulado

En la Figura 67 se presentan las iteraciones realizadas por el estimador. En la iteración 8, el error entre los datos experimentales y los datos simulados es menor al 1%, por lo que se detuvo el proceso de la estimación y se utilizaron los resultados de los elementos eléctricos para el modelo eléctrico 1-RC.

Iteration	F-count	Exp (Minimize)
0	89	36.1552
1	179	36.1552
2	268	29.0722
3	357	20.8075
4	446	11.4064
5	535	3.0863
6	624	0.0106
7	713	0.0030
8	715	0.0017

**Figura 67.** Iteraciones realizadas por el estimador

Los valores de los elementos eléctricos estimados se muestran en la Figura 68, estos corresponden a  $E_m$ ,  $R_0$ ,  $R_l$  y  $C_l$  para 11 estados de carga del modelo eléctrico, es decir, elemento el valor correspondiente al nivel de SOC que se encuentre el modelo eléctrico 1-RC.

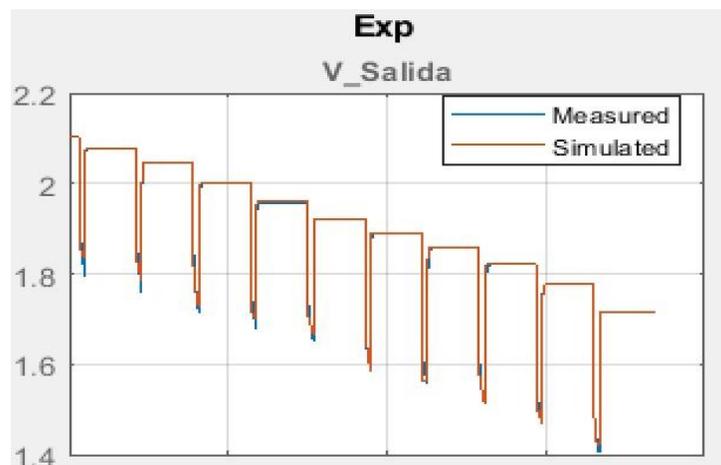
Em		R0	
	1	2	
1	1.4904		0.0027
2	1.5555		0.0025
3	1.6027		0.0024
4	1.6426		0.0023
5	1.6772		0.0024
6	1.7019		0.0024
7	1.7886		0.0021
8	1.8760		0.0023
9	1.9717		0.0022

Rl		Cl	
	1	2	
1	5.5614e-04		4.2288e+04
2	5.7275e-04		3.6987e+04
3	7.3910e-04		8.8001e+04
4	6.9923e-04		6.3430e+04
5	5.9678e-04		6.5564e+04
6	3.8832e-04		4.8787e+04
7	6.7564e-04		4.4397e+04
8	6.6879e-04		5.2415e+04
9	7.1377e-04		2.7706e+04

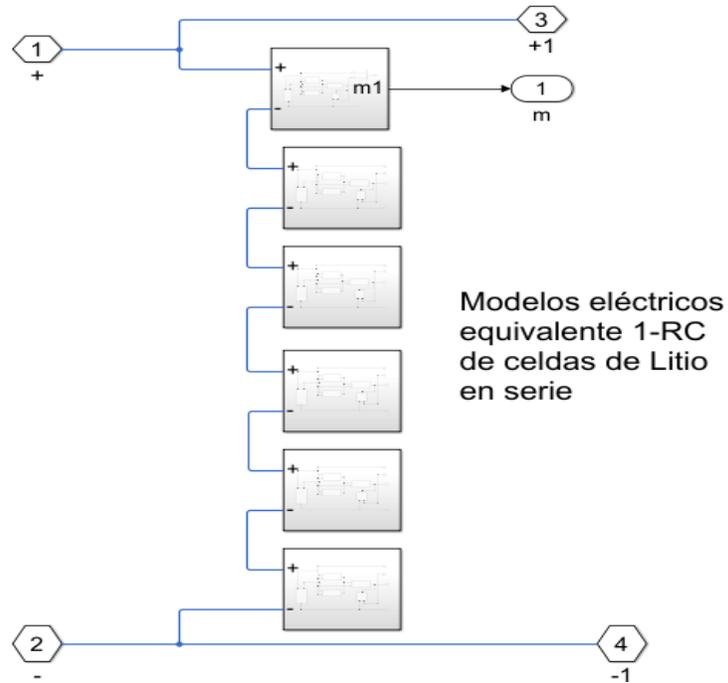
**Figura 68.** Resultados de  $E_m$ ,  $R_0$ ,  $R_l$  y  $C_l$

En consecuencia la simulación del voltaje de salida del modelo eléctrico 1-RC es casi igual al voltaje de salida experimental de la celda de litio, como se muestra en la Figura 69.



**Figura 69.** Similitud entre simulación y experimento

Se había mencionado que una batería está conformada por celdas. En este caso para formar el modelo eléctrico de la batería de litio dimensionada, se conectan en serie 6 modelos eléctricos 1-RC de celda de litio, esto se aprecia en la Figura 70, donde cada bloque contiene el modelo eléctrico indicado en la Figura 57.



*Figura 70.* Modelo de batería de Litio 12V@80Ah

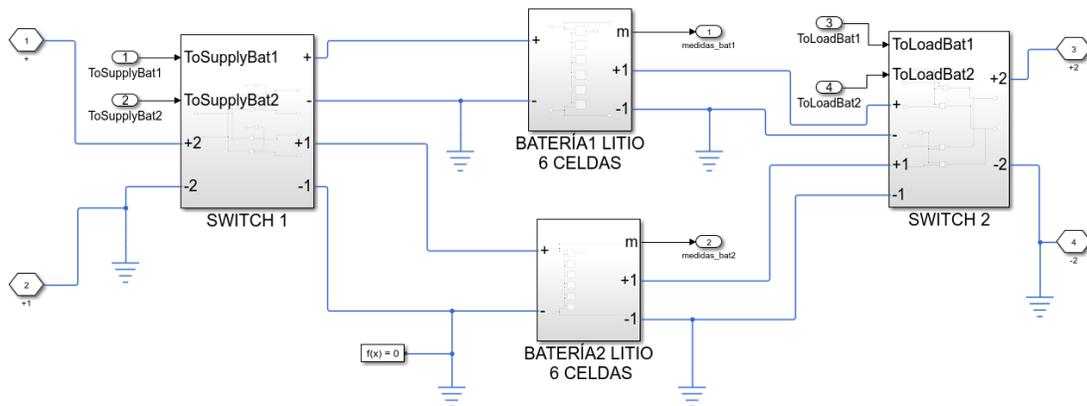
### 3.14 Diseño del sistema autónomo de almacenamiento

#### 3.14.1 Sistema de baterías

La tarea fundamental del sistema autónomo de almacenamiento de energía (SAAE) es proporcionar energía constantemente hacia el radar de velocidad, por lo tanto se instalan 2 baterías dentro del sistema como se indica en la Figura 71.

La autonomía del sistema se maneja mediante un controlador tipo On/Off, que se basa en el SOC de las baterías, para que éstas conmuten hacia la carga del radar o al suministro de energía que es el sistema fotovoltaico.

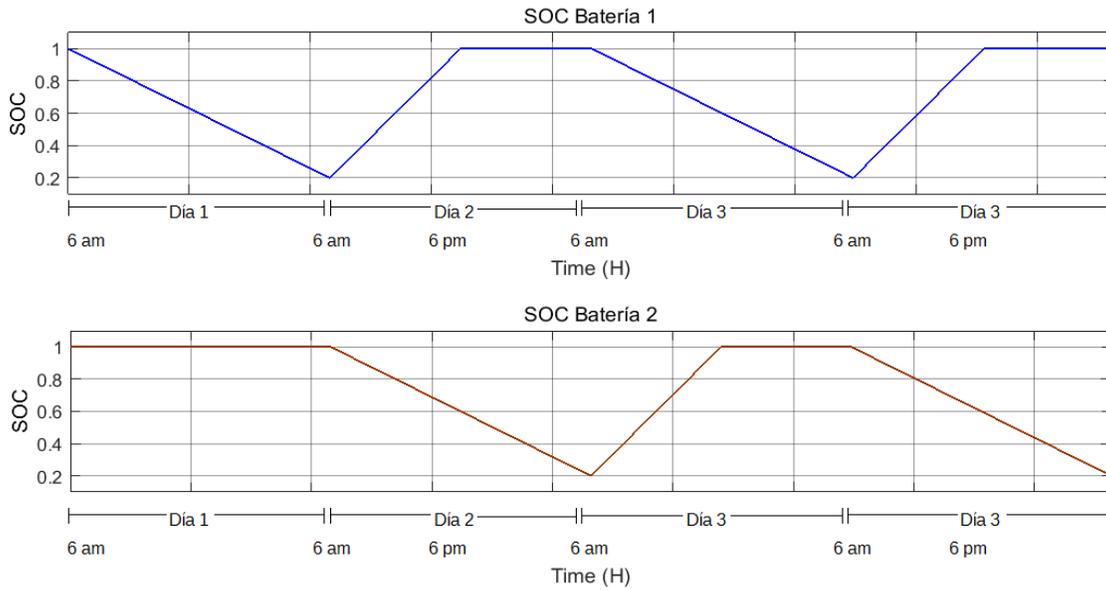
La ubicación del controlador On/Off se lo puede apreciar en el Anexo B, donde se tiene también la fuente de alimentación y una carga que representa al radar de velocidad vehicular.



**Figura 71.** Esquema del Sistema de Almacenamiento de Energía

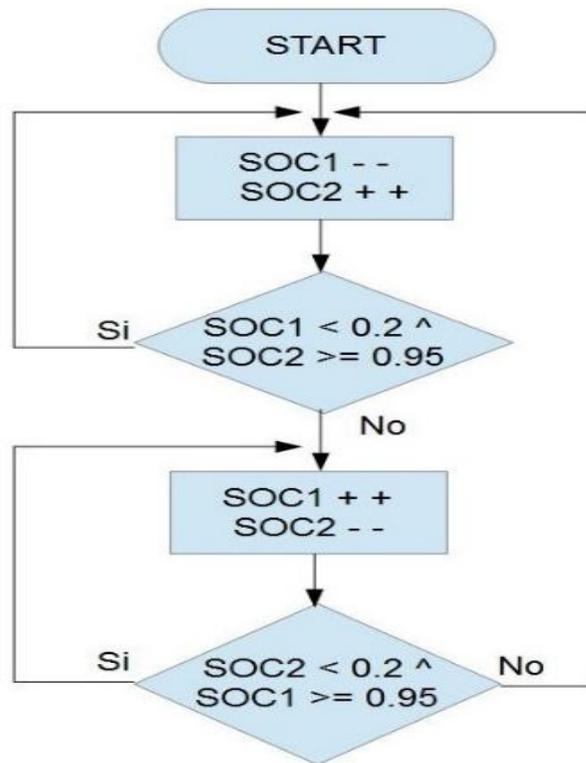
### 3.14.2 Desarrollo del algoritmo de control

Para el desarrollo del algoritmo de control se consideran las siguientes condiciones: una de las baterías se conecta a la fuente de alimentación cuando tenga un *SOC* por debajo del 20 %, mientras que la otra batería si tiene un *SOC* mayor al 99 %, se conecta a la carga del radar que demanda energía, esta explicación se puede ver en la Figura 72 durante un lapso de 4 días.



**Figura 72.** Esquema hipotético de la variación SOC en el tiempo de cada batería

La programación del algoritmo de control se basa en el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 73, el código del algoritmo está en lenguaje C y se muestra en el Anexo G.



**Figura 73.** Flujograma del control On/Off

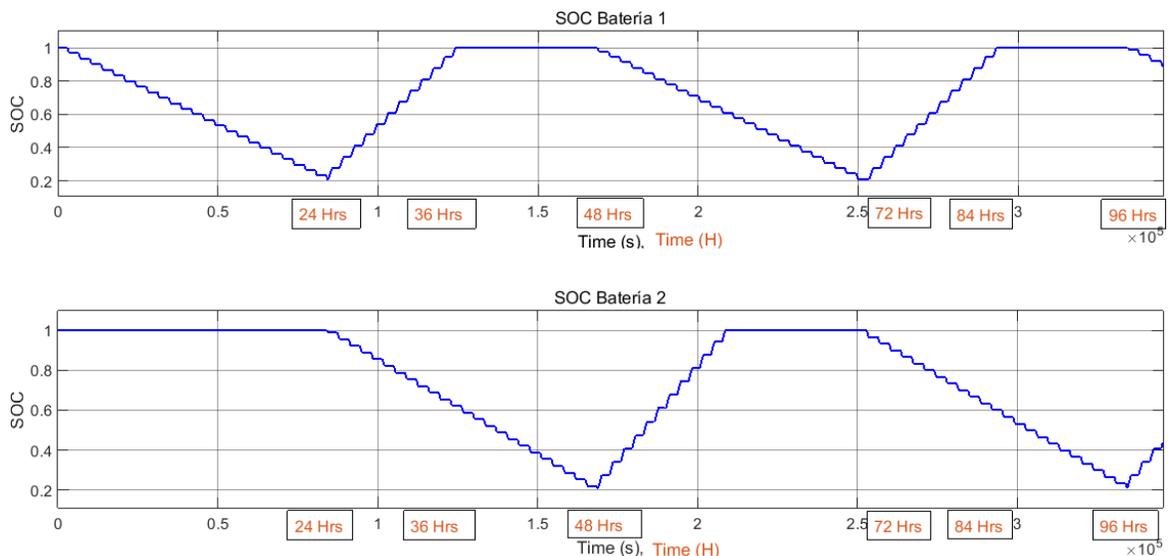
## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se realizan pruebas sobre el sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica. Las pruebas se dividen en 3 secciones, la primera sección muestra las pruebas del sistema autónomo de almacenamiento de energía, la segunda muestra las pruebas sobre el generador fotovoltaico, y en la última sección las pruebas de todo el sistema para suministrar de energía hacia la carga que representa el radar de velocidad.

#### 4.1 Pruebas y resultados del sistema de almacenamiento

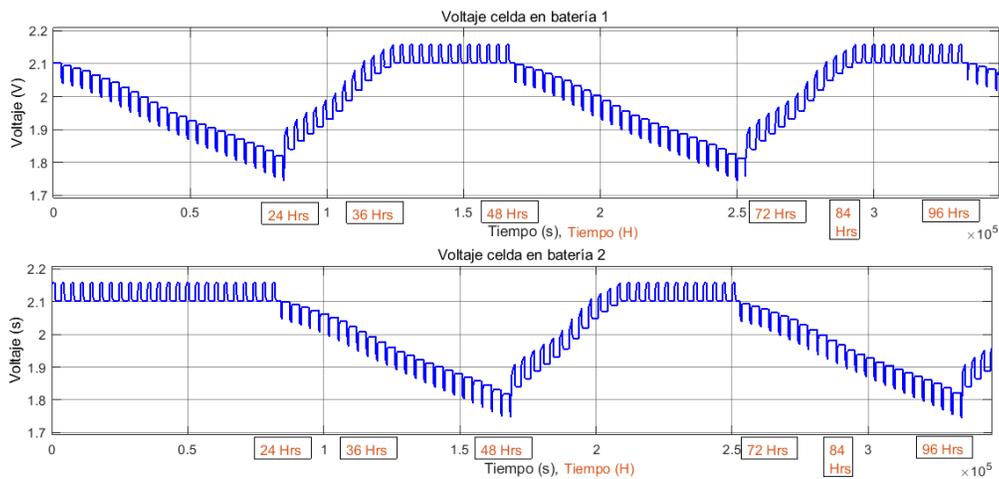
EL *SOC* de cada batería comienza con un nivel ideal del 100% y una de las baterías comienza a descargarse, cuando el *SOC* llega a menos del 20% hay un cambio de conexión de las baterías hacia el suministro y hacia la carga. En la Figura 74 se muestra en un rango de 0 a 1 la administración de energía que se alterna en las baterías durante un lapso de 96 horas.



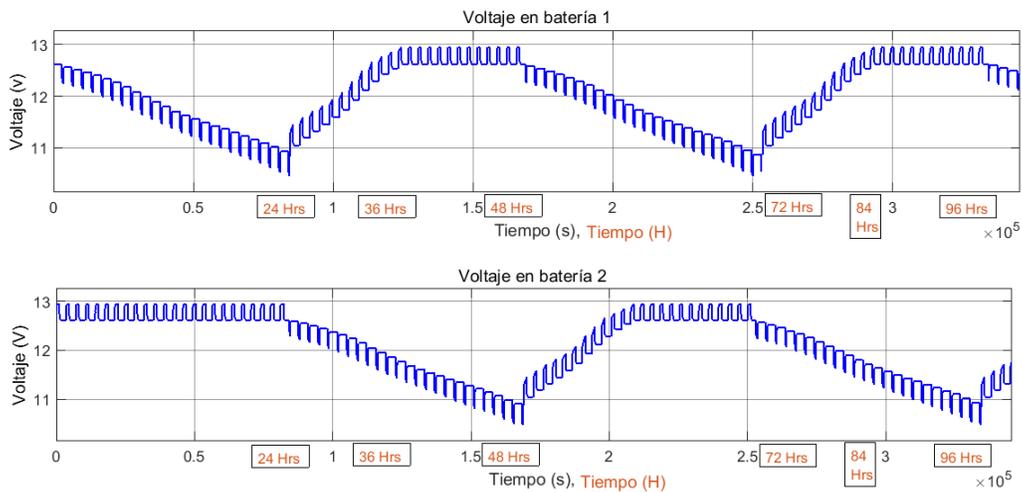
**Figura 74.** Variación del SOC de cada batería para 96 horas

En cada celda de las baterías de litio, sucede la misma dinámica en el nivel de voltaje de las baterías. En la Figura 75 se muestra la subida y bajada de tensión en las celdas, y en consecuencia en la Figura 76 se muestra también la subida y bajada de tensión en las baterías de litio de 12 V, debido al trabajo de suministro y recarga de energía.

Los picos y caídas de tensión se producen ante el efecto de los pulsos de corriente de carga y descarga de la batería, como se había explicado en la sección 4.13.5 sobre la descarga de una celda de litio.

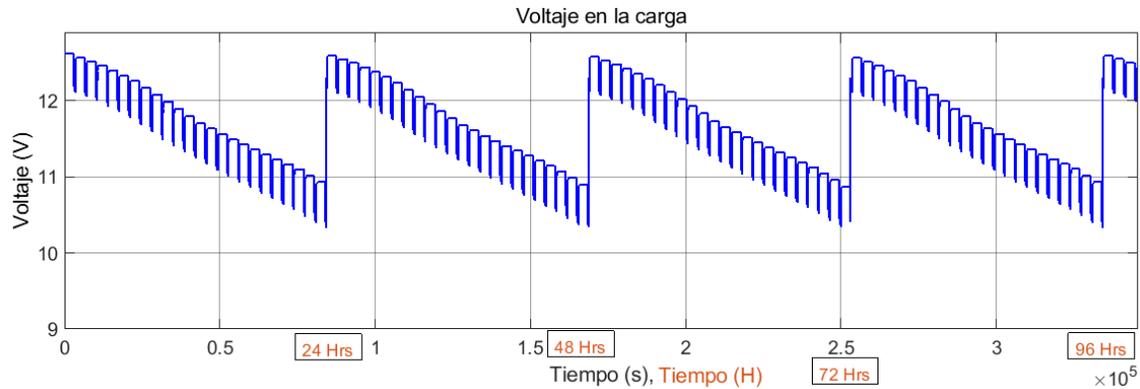


**Figura 75.** Variación de voltaje en las celdas de cada batería



**Figura 76.** Variación de voltaje en cada batería durante 96 horas

En la Figura 77 se muestra el constante suministro de energía hacia la carga por parte del sistema autónomo de almacenamiento de energía. El voltaje de salida está siempre entre el rango de 11.5 (V) y 12.6 (V), debido a la interacción de ambas baterías, suficiente para la alimentación necesaria de los equipos que componen el medidor de velocidad vehicular.

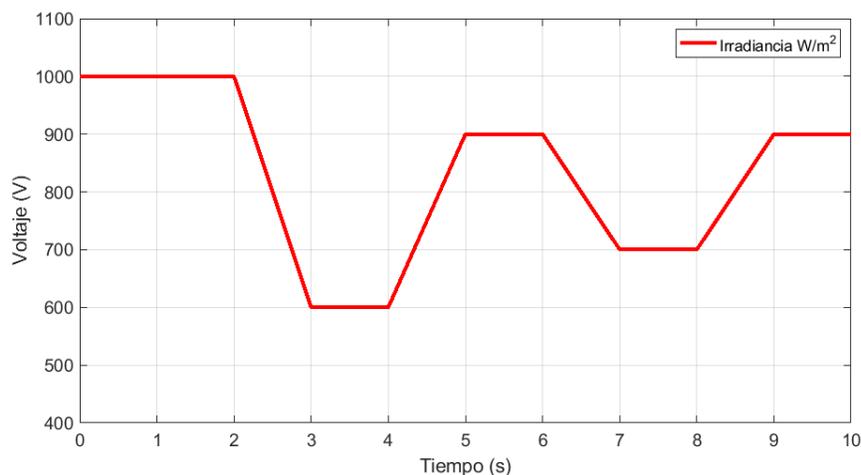


**Figura 77.** Simulación del voltaje provisto hacia la carga

## 4.2 Pruebas y resultados del generador fotovoltaico

Las pruebas se realizaron en base al generador fotovoltaico que posee el algoritmo MPPT P&O y controlador PID en un caso, y el generador fotovoltaico que posee solamente el algoritmo MPPT P&O, como se había explicado en la sección 4.10.

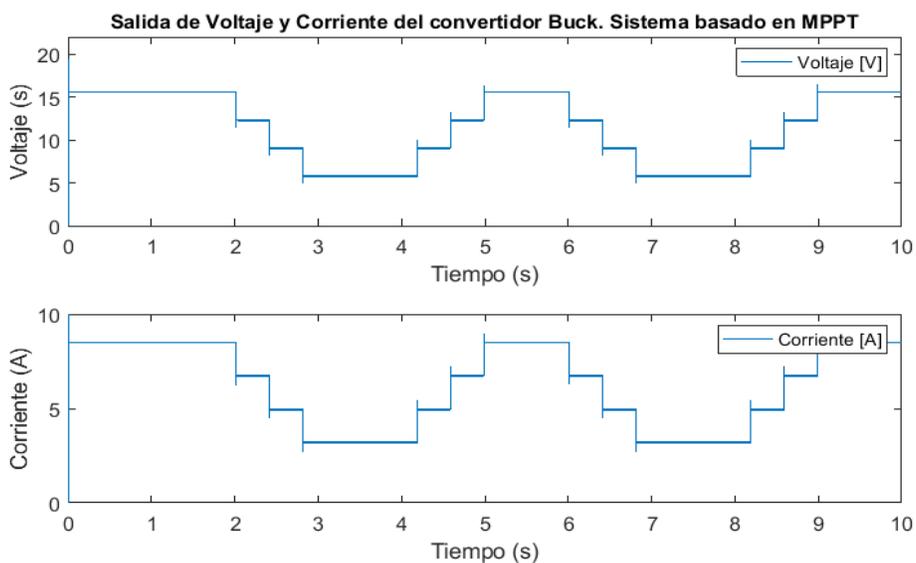
En la Figura 78, se muestra una variación de irradiación solar que se entrega en el módulo PV del sistema de alimentación, para un lapso de 10 segundos.



**Figura 78.** Irradiación solar en el sistema fotovoltaico

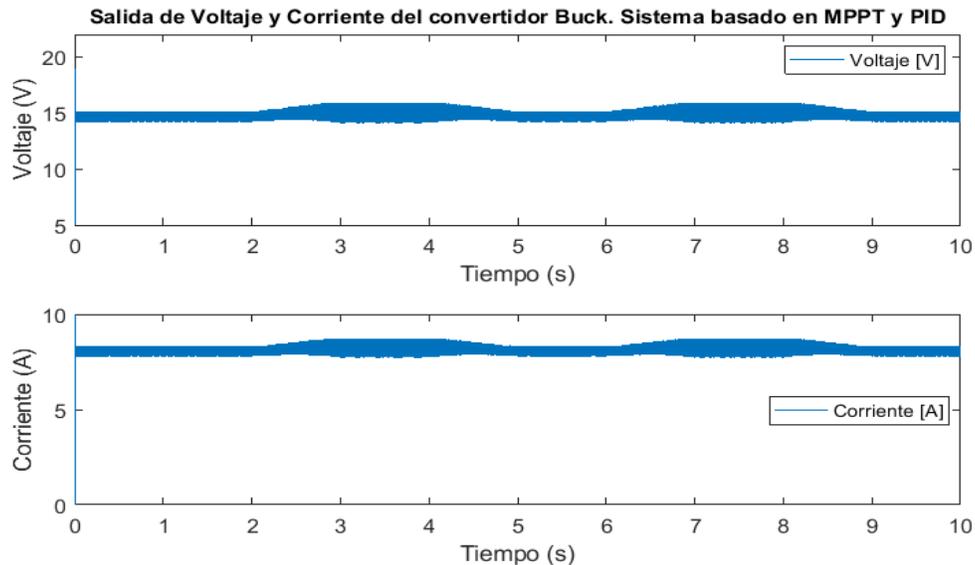
Para el generador fotovoltaico regulado con MPPT P&O, de acuerdo a la irradiación, el voltaje y la corriente de salida en el convertidor DC-DC reductor, se muestra en la Figura 79.

Aquí se observa que ante las variaciones de irradiación solar, el algoritmo MPPT P&O realiza el seguimiento de potencia, y por ende de voltaje y corriente que el módulo fotovoltaico (PV) obtiene y transfiere a la salida del convertidor DC-DC reductor. Esto indica que se extrae al máximo la energía disponible en el módulo PV de acuerdo a la irradiación que se disponga.



**Figura 79.** Voltaje y corriente del sistema basado en MPPT P&O

Por otro lado, para el generador fotovoltaico que utiliza la técnica MPPT P&O y un controlador PID digital, el voltaje y la corriente de salida en el convertidor DC-DC reductor, se muestran en la Figura 80.



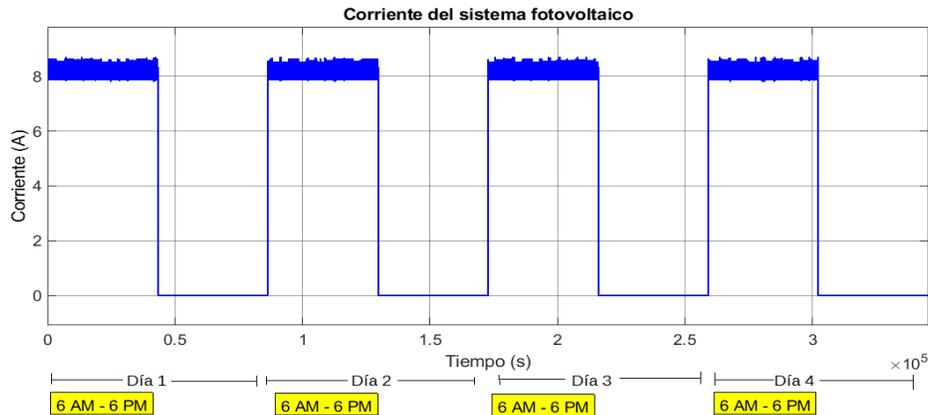
**Figura 80.** Voltaje y corriente del sistema basado en PID y MPPT P&O

En este caso el generador fotovoltaico, presenta mayor eficiencia en el manejo de la potencia, puesto que en la salida del convertidor DC-DC, el controlador PID trata de mantener la salida de tensión alrededor de 14.4 (V) que se necesita para cargar el sistema de baterías.

En las siguientes pruebas se simula completamente el sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica para el radar de velocidad, es decir se simula el generador fotovoltaico que utiliza la técnica MPPT P&O y el controlador PID digital junto con el sistema autónomo de almacenamiento de energía. La simulación se presenta para un lapso de 96 horas (4 días), donde se debe tomar en cuenta que en el horario nocturno no existe energía que provenga por parte del generador fotovoltaico.

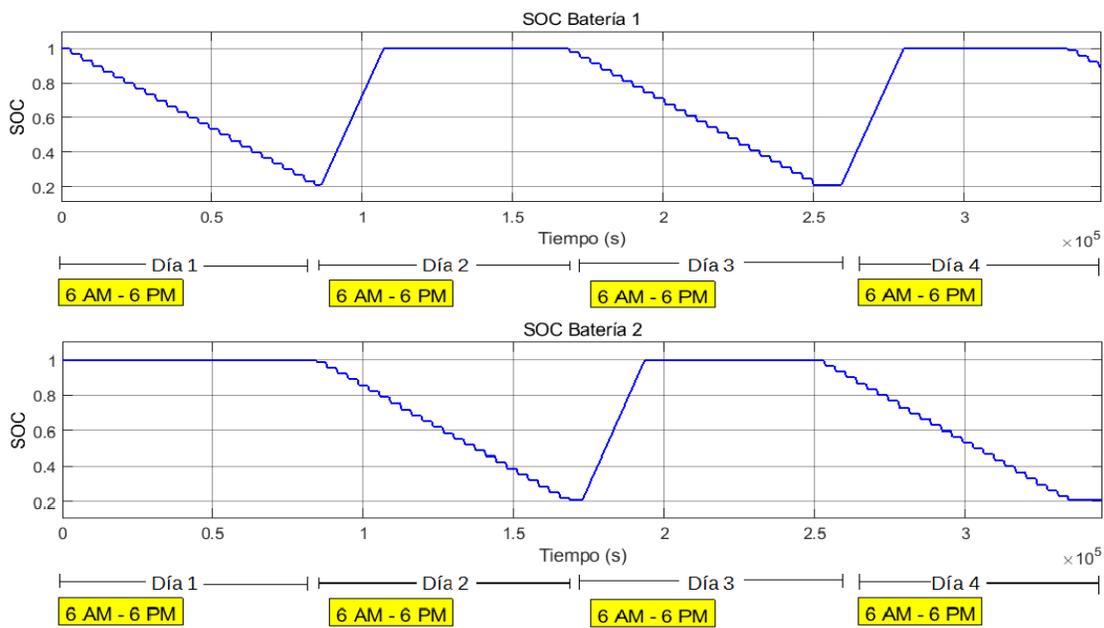
### 4.3 Pruebas y resultados del sistema de alimentación completo

La Figura 81 presenta la corriente provista por el sistema fotovoltaico, los espacios donde no hay corriente simulan la noche donde no existe energía solar alguna que se disponga para el generador fotovoltaico.



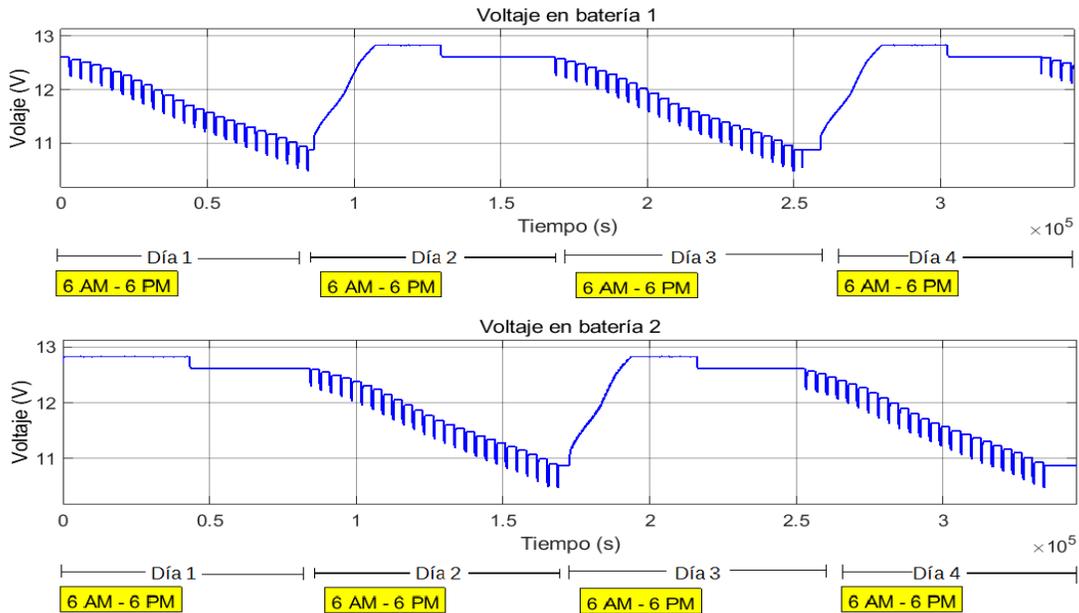
**Figura 81.** Corriente provista por el sistema PV durante 96 horas

La variación SOC en cada una de las baterías del sistema de almacenamiento, se muestra en la Figura 82, que es medida para el algoritmo de control para realizar la conmutación de las baterías.



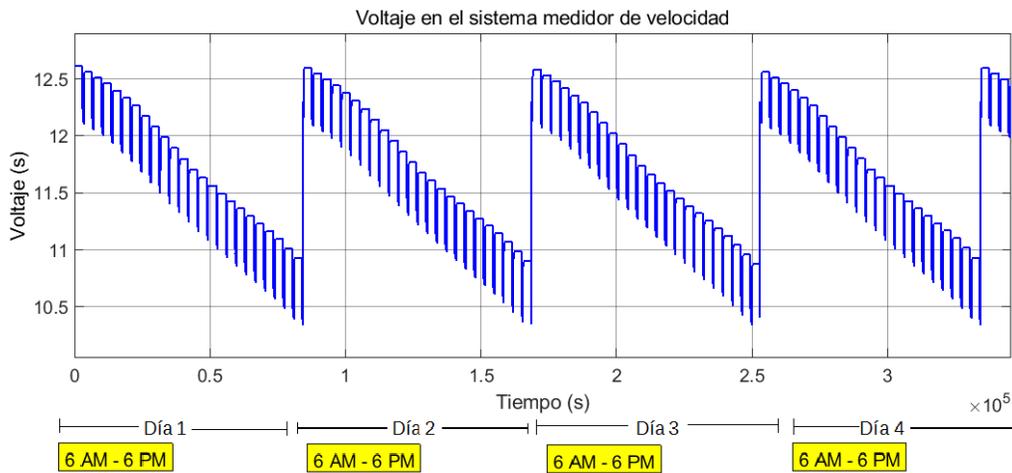
**Figura 82.** Variación SOC en las baterías del sistema de almacenamiento

En la Figura 83, se muestra la variación de tensión en cada una de las baterías debido a la disminución y aumento del SOC en cada una.



**Figura 83.** Variación de voltaje en las baterías del sistema de almacenamiento

Además en la Figura 84, se muestra que el nivel de voltaje requerido para el radar de velocidad vehicular está dentro del rango 11 (V) a 12 (V), voltaje suficiente para que los equipos que conforman el radar de velocidad, funcionen sin ningún problema.



**Figura 84.** Voltaje provisto para el medidor de velocidad vehicular

Por último se puede indicar una estimación del costo total del proyecto en la tabla 18, donde están los costos de cada uno de los componentes que pueden incurrir en el desarrollo real de un radar de velocidad vehicular alimentado por un sistema de alimentación basado en energía fotovoltaica como el que se planteó en la presente tesis.

**Tabla 18**

*Costos del medidor de velocidad y sistema de alimentación*

DISPOSITIVO	PRECIO U. (\$)	CANTIDAD	PRECIO T. (\$)
<b>MEDIDOR DE VELOCIDAD</b>			
Radar OEM IcomSpeed	455	1	455
Tarjeta Odroid X-U4	89,95	1	89,95
Web Cam Genius 312	24	1	24
GSM/GPRS SIM 900	35	1	35
µcontrolador pic18f23k22	7	1	7
Leds	0,05	200	10
Montaje mecánico	55	1	55
<b>SISTEMA DE ALIMENTACIÓN</b>			
Panel Solar SHS150-36P	150	1	150
Batería Litio 12V@80Ah	220	2	440
Tarjeta STM32 F4	45	1	45
Bobina	1	2	2
Transistor	1	2	2
Capacitor	1	1	1
Diodo	1	1	1
Resistor de potencia	1,2	1	1,2
<b>TOTAL</b>			1318,15 (\$)

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

#### 5.1 Conclusiones

El algoritmo MPPT P&O es una técnica que hace el seguimiento de potencia del módulo PV para tratar de extraer su potencia al máximo, por medio de la lectura de su corriente y voltaje en cada instante de tiempo. Si se tiene una variación de irradiación solar, la salida de voltaje del módulo PV no siempre será la misma, por lo que fue necesario la implementación de un controlador PID que regule la tensión de salida del convertidor DC-DC reductor.

El generador fotovoltaico que utiliza en conjunto la técnica MPPT P&O y el controlador PID, aprovecha con mayor eficiencia la cantidad de energía que se extrae del módulo PV, esto debido a la tarea del algoritmo MPPT P&O que extrae la energía al máximo del módulo PV y también al controlador PID que trata de regular en lo posible la tensión de salida del convertidor DC-DC reductor a un valor alrededor de 14.4 (V), el cual es el voltaje requerido para cargar las baterías del sistema de almacenamiento.

El modelo eléctrico de la batería es una herramienta útil en la medición SOC de cada batería dentro del sistema almacenamiento, que en consecuencia también ha servido para la administración autónoma de energía realizada a través del algoritmo de control tipo On/Off que realiza la conmutación de las baterías.

El modelo eléctrico de la celda de litio es útil para la conformación del modelo de una batería completa, puesto que se realiza la simulación, estimación y pronóstico del consumo de energía cuando la batería se conecta hacia alguna carga, que en este caso es el radar de velocidad, de tal

forma que se puede diseñar y simular un arreglo de baterías para el suministro correcto de energía hacia el radar de velocidad en el transcurso del tiempo.

El sistema autónomo de almacenamiento de energía proporciona la potencia suficiente y necesaria hacia el medidor de velocidad, puesto que el nivel de voltaje y corriente requeridas por los componentes del medidor están siempre entre los rangos que la carga necesita, por lo tanto el algoritmo de control de las baterías, puede funcionar con cualquier otro tipo y arreglo de dos baterías que busquen automatizar su almacenamiento de energía eléctrica.

## **5.2 Trabajos futuros**

Implementación física de un medidor de velocidad vehicular de algún tipo de tecnología y adjuntar un sistema de alimentación fotovoltaico como el que se propuso en la presente tesis.

Diseñar un sistema de alimentación fotovoltaica con un tipo de controlador diferente como MPC, Redes neuronales o Lógica Difusa, para observar el rendimiento que pueden presentarse unos con otros.

## REFERENCIAS

- ¿qué es raspberry pi y para qué sirve? (2013). retrieved march 25, 2018, from <http://www.abc.es/tecnologia/informatica-hardware/20130716/abci-raspberry-como-201307151936.html>
- adises. (2017). retrieved august 7, 2018, from <http://rma.adises.mx/detalle.php?producto=540>
- agd intelligent traffic systems. (2016). 331 in-sign radar. retrieved august 6, 2018, from [https://www.agd-systems.com/agd\\_product/sign-radar-traffic-detector-331/](https://www.agd-systems.com/agd_product/sign-radar-traffic-detector-331/)
- alsayid, b. (2012). modeling and simulation of photovoltaic cell / module / array with two-diode model. *international journal of computer technology and electronics engineering (ijctee)*, (ijctee), 6. retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/modeling-and-simulation-of-photovoltaic-cell-%2f-%2f-alsayid/6dd0b67328ba52374fe163002a16c0f4ff25052e?tab=abstract>
- arcos-aviles, d., pascual, j., guinjoan, f., marroyo, l., sanchis, p., & marietta, m. p. (2017). low complexity energy management strategy for grid profile smoothing of a residential grid-connected microgrid using generation and demand forecasting. *applied energy*, 205(may), 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.123>
- arcos, d., urbina, m., & sotomayor, d. (2012). controlador en modo deslizante para sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica. *maskay*, 2(1), 1. <https://doi.org/10.24133/maskay.v2i1.141>
- augusto, p., paulino, b., & mauricio, j. m. (2015). *modelado , control y simulación de generación fotovoltaica y almacenamiento con baterías. universidad de sevilla* (2015th ed.). sevilla.

retrieved

[http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70639/fichero/tfm\\_pedro\\_betancourt.pdf](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70639/fichero/tfm_pedro_betancourt.pdf)

autosolar. (2015). shs 150w 12v. retrieved august 7, 2018, from <https://autosolar.es/panel-solar-12-voltios/panel-solar-150w-12v-policristalino-atersa-shs>

autosolar. (2017). diferencias entre monocristalino y policristalino. retrieved april 9, 2018, from <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/diferencias-entre-silicio-monocristalino-y-multicristalino-o-policristalino>

calculationsolar. (2014). retrieved august 8, 2018, from <http://calculationsolar.com/blog/>

cañadas betancourt, p. a., & haro figueroa, g. m. (2011, october 10). *prototipo de un sistema de adquisición de imágenes de vehículos, detección y reconocimiento automático de los caracteres de la placa en tiempo real por medio de visión artificial, aplicado al control vehicular*. quito/epn/2011. retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4259>

carlo gavazzi. (2009). sensores detectores de un lazo o doble lazo inductivo. retrieved march 15, 2018, from [https://www.gavazzionline.com/pdf/ldp\\_esp.pdf](https://www.gavazzionline.com/pdf/ldp_esp.pdf)

chávez, d. (2015). *sistema electrónico de control y monitoreo vehicular a distancia mediante tecnología inalámbrica*. universidad técnica de ambato. retrieved from [http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/15104/1/tesis\\_t1067ec.pdf](http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/15104/1/tesis_t1067ec.pdf)

chávez guerrero, m. a. (2013, july 8). *proyecto de factibilidad para uso de paneles solares en generación fotovoltaica de electricidad en el complejo habitacional “san antonio” de riobamba*. escuela superior politécnica de chimborazo. retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/2478>

chen, m., & rincon-mora, g. a. (2006). accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i–v performance. *ieee transactions on energy conversion*, 21(2), 504–511. <https://doi.org/10.1109/tec.2006.874229>

erickson, r., & dragan, m. (2006). *fundamentals of (university)*. new york, boston, dordrecht, london, moscow: kluwer academic publishers. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511781797>

estación de monitoreo gsm sim900. (2016). retrieved august 7, 2018, from <https://ecuduino.wordpress.com/estacion-de-monitoreo-gsm/>

fuel portilla, j. s. (2009). *diseño y construcción de un prototipo que permita detectar vehículos que exceden el límite de velocidad permitido utilizando sensores a base de lazos inductivos*. quito/epn/ 2009. retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1264>

gaëtan masson, marie .latour, manoël rekinger, ioannis-thomas theologitis, m. p. (n.d.). global market outlook for photovoltaics 2013 -2017. *benjamin fontaine, marie latour, 10*(craig winneker), 60. retrieved from <http://www.fotovoltaiica.com/fv-look.pdf>

genius eye 312 specs. (2016). retrieved august 7, 2018, from <https://www.cnet.com/products/genius-eye-312-web-camera-series/specs/>

guaña larco, v. a., & onofa sánchez, e. r. (2016, october 12). *diseño de un sistema automático de monitoreo de exceso de velocidad para la policía nacional en la ciudad de quito, utilizando tecnología inalámbrica e implementación de un prototipo de prueba*. quito, 2016. retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16769>

guasch murillo, d., & silvestre berges, s. (2003, november 8). *modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos. tdx (tesis doctorals en xarxa)*. universitat politècnica de catalunya. retrieved

from <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/94355>

hart, d. w. (2001). *electronica de potencia (daniel w. hart).pdf*. (p. hall, ed.) (pearson ed). madrid: universidad carlos iii de madrid.

hua, c., lin, j., & shen, c. (1998). implementation of a dsp-controlled photovoltaic system with peak power tracking. *ieee transactions on industrial electronics*, 45(1). retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.475.4611&rep=rep1&type=pdf>

huidobro, j. m. (2016). radares para el control del tráfico. *cedro*, 13. retrieved from [http://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/039001.pdf](http://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/039001.pdf)

huria, t., ceraolo, m., gazzarri, j., & jackey, r. (2012). high fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells. in *2012 ieee international electric vehicle conference* (pp. 1–8). ieee. <https://doi.org/10.1109/ievc.2012.6183271>

icoms detections. (2018). icoms detections - oem radar. retrieved august 6, 2018, from [http://www.icomsdetections.com/common/pages.php?s\\_id=16\\_107](http://www.icomsdetections.com/common/pages.php?s_id=16_107)

inamhi. (2013). irradiación solar global. retrieved april 9, 2018, from <http://energia.org.ec/cie/wp-content/uploads/2017/09/atlassolar.pdf>

intel. (2015). up board - intel atom x5-z8350. retrieved august 6, 2018, from <https://www.aaeon.com/en/p/up-board-computer-board-for-professional-makers>

j. bollinger and a. wesley. (1988). *computer control of machines and processes* (addison-we).

jackey, r., saginaw, m., sanghvi, p., gazzarri, j., huria, t., & ceraolo, m. (2013). battery model

- parameter estimation using a layered technique: an example using a lithium iron phosphate cell. in sae international (ed.) (p. 14). mathworks, università di pisa. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1547>
- jossen, a., garche, j., & sauer, d. u. (2004). operation conditions of batteries in pv applications. *solar energy*, 76(6), 759–769. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.013>
- juan ingol valdivieso. (2015). ¿por qué los radares no han disminuido los accidentes de tránsito? retrieved march 15, 2018, from <http://motorbit.com/porque-radares-velocidad-no-reducen-accidentes-transito/?pais=>
- katsuhiko ogata. (2010). *ingeniería de control moderna*. (miguel martín-romo & esther martín, eds.). madrid: pearson education s.a. retrieved from [www.freelibros.org](http://www.freelibros.org)
- la hora. (2015). fotorradares entran a pruebas de funcionamiento. retrieved november 27, 2017, from <https://lahora.com.ec/noticia/1101883322/fotorradares-entran-a-pruebas-de-funcionamiento->
- lamigueiro, o. p. (n.d.). *radiación solar - energía solar fotovoltaica*. retrieved from <http://oscarperpinan.github.io>
- m. olmo r. nave. (2000). radar de la policía. retrieved march 15, 2018, from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/sound/radar.html>
- manríquez, s. p. (2013). *análisis técnico-económico para la implementación de microrredes eléctricas en chile*. (o. c. espinoza, ed.) (universidad). santiago de chile: repositorio de universidad de chile. retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/115612/cf->

pribnow\_sm.pdf?sequence=1&isallowed=y

michael, r., & fonseca, w. (2012). *análisis del comportamiento de módulos fotovoltaicos. diagnóstico, modelado matemático de curvas i-v y p-v, y construcción de prototipo trazador de curvas i-v* (energías r). instituto politécnico de braganca. retrieved from [https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/8236/1/randy willians fonseca.pdf](https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/8236/1/randy%20willians%20fonseca.pdf)

miguel alonso abella. (2002). *sistemas fotovoltaicos*. ciemat. retrieved from [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf)

motoycasco. (2015). radares de tráfico. retrieved november 27, 2017, from <https://motoycasco.com/radares-traffic>

odroid. (2017). odroid-xu4. retrieved august 6, 2018, from [https://www.hardkernel.com/main/products/prdt\\_info.php](https://www.hardkernel.com/main/products/prdt_info.php)

pic18f23k22 - microcontrollers and processors. (2018). retrieved august 8, 2018, from <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/pic18f23k22#additional-features>

picuino. (2017). 6.2. controlador pid — picuino. retrieved august 27, 2018, from <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>

radarsign. (2017). radar medidor de velocidad de energía solar - radarsign. retrieved november 27, 2017, from <https://www.radarsign.com/es/radar-medidor-de-velocidad-de-energia-solar/>

reliion. (2018). reliion-rb80. retrieved august 7, 2018, from <https://reliionbattery.com/products/lithium/rb80>

rosero prado, m. f. (2015). *desarrollo de un sistema para reconocimiento de vehículos que circulan*

- exceso de velocidad dentro del campus espe-sangolquí mediante la captura y procedimiento de imágenes en base a sistema embebido odriod u3.* universidad de las fuerzas armadas espe. carrera de ingeniería en electrónica y telecomunicaciones. retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/10992>
- salameh, z. m., casacca, m. a., & lynch, w. a. (1992). a mathematical model for lead-acid batteries. *ieee transactions on energy conversion*, 7(1), 93–98. <https://doi.org/10.1109/60.124547>
- sanz morales, d., & konstantin kostov, ds. a. (2010). *maximum power point tracking (mppt) algorithms for photovoltaic applications.* aalto university. retrieved from [http://www.academia.edu/5418438/maximum\\_power\\_point\\_tracking\\_algorithms\\_for\\_photovoltaic\\_applications\\_thesis\\_submitted\\_for\\_examination\\_for](http://www.academia.edu/5418438/maximum_power_point_tracking_algorithms_for_photovoltaic_applications_thesis_submitted_for_examination_for)
- satheesh krishnamurthy. (2015). aplicaciones de sistemas fotovoltaicos. *open educational resources*, (helioslab project 2015). retrieved from [http://www.labri.fr/perso/billaud/helios2/resources/es10/chapter\\_10\\_es.pdf](http://www.labri.fr/perso/billaud/helios2/resources/es10/chapter_10_es.pdf)
- senplades. (2017). buen vivir 2017-2021. in *educational research* (vol. 1, p. 150). secretaría nacional de planificación y desarrollo, senplades. retrieved from <http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/07/plan-nacional-para-el-buen-vivir-2017-2021.pdf>
- simec. (n.d.). sistema completo para detección de infracciones. retrieved march 25, 2018, from [http://www.simec.es/archivos/fps\\_sistema\\_stare-zr-n4\\_v1.3.pdf](http://www.simec.es/archivos/fps_sistema_stare-zr-n4_v1.3.pdf)
- skolnik, m. i. (1981). *introduction to radar systems.* (mcgraw-hil, ed.) (segunda ed). bogotá, mexico, london, parís, tokyo. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.031>

smartmicro. (n.d.). ummr automotive sensor type 42. retrieved august 6, 2018, from

<http://www.smartmicro.de/automotive-radar/products/new-3dhd-technology/#c1194>

stalker stationary speed sensor ii. (2018). retrieved march 25, 2018, from

<http://www.stalkerradar.com/oem/stationary-ii.html>

textos científicos. (2015). celdas solares. retrieved august 7, 2018, from

<https://www.textoscientificos.com/energia/celulas>

wester, g. w., & middlebrook, r. d. (1973). low-frequency characterization of switched dc-dc converters. *ieee transactions on aerospace and electronic systems*, *aes-9*(3), 376–385.

<https://doi.org/10.1109/taes.1973.309723>

wilhelm, i., & teske, s. (2011). solar photovoltaic electricity empowering the world. *solar generation* 6, 1040, 100. retrieved from

<http://www.greenpeace.org/international/global/international/publications/climate/2011/final-solargeneration-vi-full-report-lr.pdf>

yao, l. w., aziz, j. a., kong, p. y., & idris, n. r. n. (2013). modeling of lithium-ion battery using matlab/simulink. in *iecon 2013 - 39th annual conference of the ieee industrial electronics society* (pp. 1729–1734). vienna, austria: ieee.

<https://doi.org/10.1109/iecon.2013.6699393>