



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

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

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

AUTOR: VÉLEZ ORTUÑO, RUBÉN DAVID

**TEMA: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE
GENERACIÓN FOTOVOLTAICA PARA UNA COCINA DE
INDUCCIÓN MAGNÉTICA**

DIRECTOR: ING. LEÓN, PAOLA

CODIRECTOR: MSC. IBARRA, ALEXANDER

SANGOLQUÍ, MARZO 2015

i

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

CERTIFICADO

Ing. Paola León

Ing. Alexander Ibarra MSc.

CERTIFICAN:

Que el trabajo titulado: "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA PARA UNA COCINA DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA", realizado por el Sr. Rubén David Vélez Ortuño, ha sido guiada y revisada periódicamente y cumple con las normas estatutarias por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, en el reglamento de estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Debido a que se trata de un trabajo de investigación recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan al Sr. Rubén David Vélez Ortuño que lo entreguen al Ing. Luis Orozco, en su calidad de coordinador de la carrera.

Sangolquí, Marzo de 2015



Ing. Paola León
DIRECTOR



Ing. Alexander Ibarra MSc.
CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

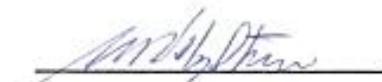
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

RUBÉN DAVID VÉLEZ ORTUÑO

DECLARO QUE:

El proyecto de grado titulado "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA PARA UNA COCINA DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA", ha sido desarrollado con base a investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de página correspondiente, cuyas fuentes se incorporan en bibliografía. Por consecuente este trabajo es de mi autoría.

Sangolquí, Marzo de 2015


Rubén David Vélez Ortuño

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORIZACIÓN

Yo, Rubén David Vélez Ortuño

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución, el proyecto de grado titulado "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA PARA UNA COCINA DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA" cuyo contenido, ideas y criterios es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Marzo de 2015



Rubén David Vélez Ortuño

DEDICATORIA

A Dios, por la salud, por la vida.

A mis padres, Rubén Darío y Carmen Lilian, por su esfuerzo para verme crecer personal y profesionalmente, por sus palabras de aliento y respaldo ante los problemas que se presentaron en este camino, por ser mi guía y enseñarme las virtudes y valores que debo aplicar para conseguir mis metas con honradez y sacrificio.

A mis hermanos, María Paulina y Andrés Santiago, porque me enseñan que la responsabilidad, el sacrificio, la entrega, no es una cuestión de edad, sino una cuestión de actitud.

Rubén David Vélez Ortuño

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme llenado de bendiciones cada momento de mi vida.

A mis Padres y Hermanos por ser mi apoyo incondicional, al estar conmigo en mis logros y disfrutar conmigo la felicidad de ver mis metas cumplidas.

Al Señor Director de Carrera Ing. Luis Orozco por enseñarme valores que complementan mi formación profesional.

A mis Directores de Tesis, Ing. Paola León e Ing. Alexander Ibarra, por su buena predisposición para guiarme en este proceso para culminarlo con éxito.

Al Señor Ing. Diego Arcos, por guiarme en la etapa inicial de este proyecto y ser quien me brindó la oportunidad de desarrollar este tema propuesto por su persona.

Rubén David Vélez Ortuño

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Justificación e Importancia	4
1.4 Alcance del proyecto	5
1.5 Objetivos	6
1.5.1 General	6
1.5.2 Específico.....	6
CAPÍTULO 2	7
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	7
2.1 La energía	7
2.1.1 Energía renovable	7
2.1.2 Energía no renovable	8
2.2 Situación energética en ecuador	8
2.3 Energía solar.....	10
2.3.1 Geometría solar	10
2.3.2 Radiación solar	11
2.3.3 Aprovechamiento de la energía solar.....	12

2.3.4	Medición de la radiación solar	13
2.3.5	Unidades de medida de radiación solar	15
2.4	Conversión de energía solar a eléctrica	16
2.4.1	Efecto fotoeléctrico.....	16
2.4.2	Materiales semiconductores.....	16
2.4.3	Dopaje del silicio	17
2.5	Componentes del sistema de generación fotovoltaico	18
2.5.1	Célula fotovoltaica	18
2.5.2	Módulo Fotovoltaico	21
2.5.3	Convertidores de Potencia	31
2.5.4	Sistemas de Almacenamiento de Energía	50
2.6	Topología de sistemas de generación fotovoltaico	57
2.6.1	Sistemas Aislados	58
2.6.2	Sistemas conectados a la Red.....	58
2.6.3	Sistemas Híbridos	59
2.7	Cocinas	60
2.8	Factores de calidad de potencia	62
2.8.1	Perturbaciones en el Sistema Eléctrico.....	63
CAPITULO 3.....		65
DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA.....		65
3.1	Hipótesis de Partida	65
3.1.1	Análisis de la carga	66
3.1.2	Radiación solar	67
3.2	Sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento	67

3.2.1	Diseño del Arreglo de Módulos Fotovoltaicos	68
3.2.2	Convertidor elevador DC – DC [52 Vdc - 200 Vdc]	72
3.2.3	Diseño del inversor DC-AC [200 Vdc – 120 Vac]	78
3.3	Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento	86
3.3.1	Primer Modelo	87
3.3.2	Segundo Modelo	101
3.4	Técnicas de Control	117
3.4.1	Controladores del Sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento	117
3.4.2	Controladores del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento	128
3.5	Equipos Comerciales	142
CAPITULO 4		145
PRUEBAS Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN		145
4.1	Sistemas de Alimentación para Cocina de Inducción Magnética	145
4.2	Simulación para un Sistema con y sin sistema de almacenamiento energético.	146
4.2.1	Simulación del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento	146
4.2.2	Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento	154
4.3	Eficiencia	176
4.4	Consumo Energético	178
CAPITULO 5		179
ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL		179
5.1	Análisis de costo del generador fotovoltaico con y sin sistema de almacenamiento	179

5.1.1	Sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento	179
5.1.2	Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento	182
5.2	Análisis del impacto ambiental del sistema fotovoltaico con y sin sistema de almacenamiento.....	186
5.2.1	Impacto ambiental del sistema de almacenamiento.....	186
5.3	Análisis del costo de la cocina de inducción magnética	188
5.4	Consumo de energía de la cocina de inducción seleccionada.....	190
5.5	Costos totales de los sistemas fotovoltaicos con y sin sistema de almacenamiento.....	191
5.6	Análisis de la inversión.....	192
5.6.1	Cálculo del tiempo de retorno de inversión.	192
CAPITULO 6		194
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		194
6.1	Conclusiones.....	194
6.2	Recomendaciones.....	197
BIBLIOGRAFÍA.....		198
ANEXO		203

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de las fuentes de energía.....	8
Tabla 2	Secuencia de Conmutación Inversor Monofásico, Puente Completo.	40
Tabla 3	Secuencia de conmutación convertidor unipolar SPWM.....	46
Tabla 4	Consumo de Energía Cocina de Inducción.....	66
Tabla 5	Radiación solar en la ciudad de Quito	69
Tabla 6	Características eléctricas modulo fotovoltaico Isofoton I165	69
Tabla 7	Orden armónico y frecuencia de conmutación.....	85
Tabla 8	Características Eléctricas Batería modelo UCG 150-12 ULTRACELL	89
Tabla 9	Horas de carga del sistema de almacenamiento primer modelo	92
Tabla 10	Dispositivos comerciales sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento.....	143
Tabla 11	Dispositivos comerciales sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento primer y segundo modelo	144
Tabla 12	Dispositivo comercial, etapa de control	144
Tabla 13	Características de tiempo de respuesta convertidor elevador con carga nominal	148
Tabla 14	Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador con variación de radiación solar.....	150
Tabla 15	Variación de Radiación.....	151
Tabla 16	Valores de la Radiación Mínima vs Potencia.....	153
Tabla 17	Características de tiempo de respuesta en convertidor reductor - elevador, etapa carga	156
Tabla 18	Etapa de carga sistema de almacenamiento.....	157
Tabla 19	Etapa de descarga del sistema de almacenamiento	158

Tabla 20	Características de tiempo de respuesta en convertidor reductor - elevador, etapa descarga.....	160
Tabla 21	Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, etapa descarga	161
Tabla 22	Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, segundo modelo	164
Tabla 23	Sistema de almacenamiento segundo modelo	166
Tabla 24	Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, segundo modelo	168
Tabla 25	Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, frente variación de radiación	170
Tabla 26	Variación de voltaje en sistema de almacenamiento.....	171
Tabla 27	Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, frente variación de voltaje	172
Tabla 28	Variación de voltaje en convertidor reductor - elevador.....	172
Tabla 29	Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, frente variación de voltaje	172
Tabla 30	Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, frente variación de radiación	174
Tabla 31	Características de tiempo de respuesta en convertidor reductor-elevador, frente variación de voltaje.....	176
Tabla 32	Eficiencia sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento.....	177
Tabla 33	Eficiencia sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, primer modelo.	177
Tabla 34	Eficiencia sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo.....	178
Tabla 35	Costos de Dispositivos Comerciales	180
Tabla 36	Costo de dispositivos diseñados, Convertidor Elevador DC/DC.....	181
Tabla 37	Costo de dispositivos diseñados, Inversor DC/AC y Filtro.....	181

Tabla 38	Costos de diseño y documentación del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento	181
Tabla 39	Costo de dispositivos comerciales para Primer Modelo	183
Tabla 40	Costo de dispositivos diseñados, Convertidor Elevador DC/DC.....	183
Tabla 41	Costo de dispositivos diseñados, Convertidor Reductor Elevador DC/DC	183
Tabla 42	Costo de dispositivos comerciales para Segundo Modelo	185
Tabla 43	Costo de dispositivos diseñados, Convertidor Elevador DC/DC.....	185
Tabla 44	Costo de dispositivos diseñados, Convertidor Reductor Elevador DC/DC	185
Tabla 45	Costo Cocina de inducción magnética	189
Tabla 46	Modelos de cocina de inducción Indurama	190
Tabla 47	Costos Totales, sistema fotovoltaico sin almacenamiento	191
Tabla 48	Costos totales, sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento primer modelo	191
Tabla 49	Costos totales, sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento segundo modelo	192
Tabla 50	Calculo de Consumo Eléctrico.....	193
Tabla 51	Tiempo de retorno de inversión	193

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Piranómetro	14
Figura 2. Pirheliómetro.....	14
Figura 3. Bandas energéticas en materiales semiconductores.....	17
Figura 4. Estructura de la célula fotovoltaica.	19
Figura 5. Estructura atómica del silicio (a) Estructura Monocristalino, (b) Estructura Policristalino, (c) Estructura Amorfa.....	20
Figura 6. Interconexión de célula, módulo y matriz de módulos	21
Figura 7. Características Eléctricas Módulo Fotovoltaico, Curva I-V y Curva P-V.....	22
Figura 8. Características eléctricas de un módulo ARTESA.....	24
Figura 9. Modelo de Célula Fotoeléctrica	26
Figura 10. Modelo General de la Célula Fotoeléctrica	29
Figura 11. Modelo simplificado de módulo fotoeléctrico	30
Figura 12. Modelo general de módulo fotoeléctrico	30
Figura 13. Símbolo del Convertidor DC-DC.....	31
Figura 14. Clasificación de los convertidores DC-DC	32
Figura 15. Convertidor Elevador	33
Figura 16. Convertidor Elevador con Sw ON	34
Figura 17. Convertidor Elevador con Sw OFF	34
Figura 18. Formas de onda en el convertidor elevador, (a) Voltaje en la bobina. (b) Corriente en la bobina. (c) Corriente en el diodo. (b) Corriente en el inductor.....	36
Figura 19. Convertidor reductor de tensión.....	36
Figura 20. Conversor Reductor cuando Sw está cerrado	37
Figura 21. Conversor Reductor cuando Sw está abierto	38

Figura 22. Esquema general del inversor	39
Figura 23. Inversor monofásico tipo puente completo	40
Figura 24. Secuencia de conmutación inversor monofásico, puente completo	41
Figura 25. Respuesta de inversor monofásico, puente completo	41
Figura 26. Inversor monofásico con filtro LC y carga tipo resistiva	42
Figura 27. Modulación de ancho de pulsos sinusoidales SPWM.....	44
Figura 28. Conmutación Bipolar (a) Señal senoidal y triangular, (b) Salida +VDC y -VDC	45
Figura 29. Convertidor Unipolar SPWM de puente completo.	46
Figura 30. Señal de Voltaje V_a en conmutación Unipolar	47
Figura 31. (a) Señal de Voltaje V_b en conmutación Unipolar, (b) Salida de Control SPWM	47
Figura 32. Tipos de Filtros: a) LC paralelo, b) LC serie, c) LC serie, d) LCC paralelo	49
Figura 33. Relación entre la Capacidad y Número de Ciclos.....	55
Figura 34. Etapas de Carga de una Batería	56
Figura 35. Topología de sistema generación fotovoltaica aislado, (a) sistema aislado sin almacenamiento, (b) sistema aislado con almacenamiento.....	59
Figura 36. Topología de sistemas conectados a la red.....	60
Figura 37. Topología de sistemas Híbridos	60
Figura 38. Calidad de Energía Eléctrica	62
Figura 39. Diagrama de bloques sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento.....	67
Figura 40. Curvas características con variación de Irradiación.....	71
Figura 41. Curvas características con variación de Temperatura. (a) Curva Intensidad-Voltaje (b) Curva Potencia-Voltaje	71
Figura 42. Características eléctricas del arreglo de módulos.	73
Figura 43. Rizado en el inductor del convertidor elevador DC-DC.....	76
Figura 44. Rizado en el capacitor del convertidor elevador DC-DC.....	78

Figura 45. Señales de Modulación. (a) Moduladoras (b) Portadora.....	82
Figura 46. Señales de control de los transistores en inversor	82
Figura 47. Salida del inversor monofásico tipo puente completo sin filtrar (a) Voltaje de Salida (b) Corriente de Salida	83
Figura 48. Contenido armónico (a) Voltaje de Salida (b) Armónicos del Voltaje de Salida	84
Figura 49. Salida del Inversor con Etapa de Filtrado	86
Figura 50. Primer modelo sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento.....	87
Figura 51. Sentido de Descarga del Sistema de Almacenamiento	90
Figura 52. Estado de descarga del sistema de almacenamiento primer modelo	91
Figura 53. Sentido de carga del sistema de almacenamiento primer modelo...	93
Figura 54. Estado de carga del sistema de almacenamiento primer modelo....	94
Figura 55. Rizado en el Inductor L, convertidor elevador primer modelo	96
Figura 56. Rizado en el Capacitor C, elevador primer modelo	97
Figura 57. Rizado en el Inductor L, convertidor reductor elevador, primer modelo	99
Figura 58. Rizado de Corriente en Inductor, convertidor reductor elevador, primer modelo	100
Figura 59. Rizado en el Capacitor C, convertidor reductor elevador, primer modelo	101
Figura 60. Rizado en el Capacitor C, convertidor reductor elevador, primer modelo	102
Figura 61. Sistema Fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo	102
Figura 62. Sentido de descarga del Sistema de Almacenamiento, segundo modelo	104
Figura 63. Sentido de Carga del sistema de almacenamiento, segundo modelo	106

Figura 64. Sentido de entrega de energía del arreglo de paneles a la carga, segundo modelo	106
Figura 65. Rizado en el Inductor L, convertidor elevador uno, segundo modelo	108
Figura 66. Rizado en el Capacitor C, convertidor elevador uno, segundo modelo	109
Figura 67. Rizado en el Inductor L, convertidor elevador dos, segundo modelo	111
Figura 68. Rizado en el Capacitor C, convertidor elevador dos, segundo modelo	112
Figura 69. Salida del convertidor elevador en cascada.	112
Figura 70. Rizado en el Inductor L, convertidor reductor elevador, segundo modelo	115
Figura 71. Rizado de Corriente en Inductor, convertidor reductor elevador, segundo modelo	115
Figura 72. Rizado en el Capacitor C, convertidor reductor elevador, segundo modelo	116
Figura 73. Rizado en el Capacitor, convertidor reductor elevador, segundo modelo	117
Figura 74. Sistema en lazo cerrado del convertidor elevador 52v a 200v, para calcular K_{cr}	122
Figura 75. Diagrama de Bloques Controlador PI y Planta, en convertidor elevador de 52V a 200V.....	125
Figura 76. Voltaje de Referencia y Voltaje Controlado en convertidor elevador 52V a 200 V.....	125
Figura 77. Diagrama de Bloques Controlador PID G(c) y Planta G (p), para inversor 200 VDC a 120 VAc	128
Figura 78. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para inversor 200 VDC a 120 VAc	128

Figura 79. Diagrama de Bloques Controlador PID G(c) y Planta G (p), para un convertidor elevador de 120 VDC a 200VDC.....	130
Figura 80. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para convertidor elevador 120 VDC a 200 VDC, primer modelo	130
Figura 81. Diagrama de Bloques Controlador PI G(c) y Planta G (p), para un convertidor elevador de 12 VDC a 120VDC.....	131
Figura 82. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para convertidor elevador 12 VDC a 120 VDC, primer modelo	132
Figura 83. Diagrama de Bloques Controlador PI G(c) y Planta G (p), para un convertidor reductor de 17 VDC a 12 VDC	136
Figura 84. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para convertidor reductor 17 VDC a 12 VDC, primer modelo	136
Figura 85. Diagrama de Bloques Controlador PID G(c) y Planta G (p), para un convertidor elevador de 120 VDC a 200VDC.....	138
Figura 86. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para convertidor elevador 120 VDC a 200 VDC, primer modelo	138
Figura 87. Diagrama de Bloques Controlador PI G(c) y Planta G (p), para un convertidor elevador de 12 VDC a 120VDC.....	139
Figura 88. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para convertidor elevador 12 VDC a 120 VDC, primer modelo	140
Figura 89. Diagrama de Bloques Controlador PI G(c) y Planta G (p), para un convertidor elevador de 17 VDC a 12 VDC.....	141
Figura 90. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para convertidor elevador 12 VDC a 120 VDC, primer modelo	142
Figura 91. Simulación del Arreglo de Paneles del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento.	147
Figura 92. Simulación del Convertidor Elevador del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento	148
Figura 93. Simulación del Inversor y Filtro del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento	149

Figura 94. Simulación del Convertidor Elevador del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, frente variación de radiación solar...	150
Figura 95. Simulación Variación de Radiación y Potencia en Arreglo de Módulos	152
Figura 96. Simulación del Sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento con variación de radiación.	153
Figura 97. Simulación del Arreglo de Paneles del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, etapa de carga.....	155
Figura 98. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Etapa Reducción, Corriente y Voltaje, etapa de carga.	156
Figura 99. Simulación del Estado de la Batería, SOC (%) y Voltaje, etapa de carga.	157
Figura 100. Simulación del Estado de la Batería, SOC (%) y Voltaje, etapa de descarga.	159
Figura 101. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Etapa Elevación, Corriente y Voltaje, etapa de descarga.	160
Figura 102. Simulación del Convertidor Elevador, Corriente y Voltaje, etapa de descarga.	161
Figura 103. Simulación del Inversor, Corriente y Voltaje, etapa de descarga.	162
Figura 104. Simulación del Arreglo de Paneles del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo	163
Figura 105. Simulación del Convertidor Elevador del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo	164
Figura 106. Simulación del Inversor, Corriente y Voltaje, del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo.	165
Figura 107. Simulación del Estado de la Batería, SOC (%) y Voltaje, del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo.	166

Figura 108. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Etapa Elevación del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo	167
Figura 109. Simulación del Inversor, Corriente y Voltaje, del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo.	168
Figura 110. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Etapa Reducción, frente variación de radiación solar.	169
Figura 111. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Elevación, frente variación de voltaje en sistema de almacenamiento.....	171
Figura 112. Simulación del Convertidor Elevador, frente variación de voltaje	173
Figura 113. Simulación del Convertidor Elevador, frente variación de radiación solar.....	174
Figura 114. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Elevación, frente variación de voltaje en sistema de almacenamiento.....	175
Figura 115. Componentes del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento.....	180
Figura 116. Componentes del primer modelo del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento.	182
Figura 117. Componentes del segundo modelo del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento.	184

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Diseño en Matlab - Simulink del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento.....	204
Anexo 2. Diseño en Matlab - Simulink del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, primer modelo.	212
Anexo 3. Diseño en Matlab - Simulink del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo.	213
Anexo 4. Hoja de datos de dispositivos comerciales.	222

RESUMEN

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

PALABRAS CLAVE:

- **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.**
- **SISTEMAS DE POTENCIA.**
- **COCINA DE INDUCCIÓN.**
- **CONTROL PID.**
- **PANELES FOTOVOLTAICOS.**

ABSTRACT

This project "Design and simulation of a photovoltaic generation system for a magnetic induction cooker" is to design and simulate the elements of the stages that make up a photovoltaic generation system to supply power to a kitchen Magnetics. The document contains procedures developed design of power amplifiers, storage and photovoltaic generation, which form each photovoltaic generation systems, within which were raised: a model for a PV system without storage system, and two models for a photovoltaic system with storage system. The simulation of each of the proposed models developed in the Matlab software - Simulink, the power amplifiers are developed by SimPowerSystems library, the design of controllers are developed by Sisotool library, by developing simulations proceed to verify the correct functioning of the systems under the established parameters. A comparison between the developed models procedure will determine what is the most suitable for the supply of energy for cooking Magnetics system was made. Efficiency analysis, economic and environmental analysis systems designed in this paper, through the development of objectives arise conclusions are also presented.

KEYWORDS:

- **PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**
- **POWER SYSTEMS**
- **INDUCTION COOKER**
- **PID CONTROL**
- **PHOTOVOLTAIC PANELS.**

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El uso de energías renovables para la generación de energía eléctrica es una tendencia que se populariza con el pasar del tiempo. Dejar la dependencia de recursos fósiles es una necesidad para ser consecuentes con el respeto a la naturaleza considerando la contaminación que producen estos recursos en los procesos de extracción, producción y distribución.

El estado Ecuatoriano impulsa el uso de recursos renovables como el agua, el viento y el sol, para la generación eléctrica, es así que varios proyectos hidroeléctricos se están por desarrollar en el país con la visión del cambio de la matriz energética que procura dejar la dependencia de recursos no renovables para la generación de energía. Dentro de los cambios que conlleva la matriz energética está el reemplazo del Gas Licuado de Petróleo por electricidad como fuente de generación de energía en las cocinas de uso doméstico. El Estado apoya proyectos que involucran el uso de energías renovables, de esta manera se plantea la inclusión de un sistema de generación fotovoltaica para una cocina de inducción magnética.

Un sistema de generación fotovoltaica, es un conjunto de dispositivos que trabajan conjuntamente para generar energía eléctrica en función de la radiación

solar que está disponible en determinados horas del día, de este condicionamiento se plantea la inclusión de un sistema de almacenamiento al sistema de generación fotovoltaica para disponer de energía eléctrica para dejar de depender de la situación climatológica.

Al considerar lo mencionado se plantea un sistema de generación fotovoltaica con y sin sistema de almacenamiento de energía para una cocina de inducción magnética.

1.2 ANTECEDENTES

La situación energética del Ecuador se encuentra caracterizada por la dependencia de combustibles fósiles, donde el agotamiento de esta fuente de energía es inevitable. Adicionalmente al tomar en consideración factores como: la contaminación que éstos producen, la destrucción de la naturaleza, el cambio climático, y por otro lado el pico petrolero; los recursos energéticos del país se verían afectados. Por estas razones es necesario establecer una transición energética en la cual el Ecuador se acople a las nuevas tendencias mundiales del uso de Energías Renovables, las cuales ayudarán a prevenir problemas ambientales futuros, como por ejemplo son los residuos radiactivos, la lluvia ácida y la contaminación en general.

El Estado Ecuatoriano mediante la Subsecretaria de Energía Renovable y Eficiencia Energética promueve y propone la implantación de políticas, estrategias, proyectos y acciones tendientes a desarrollar y aplicar planes de energía renovable y el uso eficiente de la misma, en todo el país. (Ecuador 2013)

“La participación de las energías renovables debe incrementarse en la producción nacional. Para el cumplimiento de este objetivo, los proyectos hidroeléctricos del Plan Maestro de Electrificación deben ejecutarse sin dilación; y, adicionalmente, debe impulsarse los proyectos de utilización de otras energías renovables: geotermia, biomasa, eólica y solar”. (Correa 2013a)

El uso de Energías Renovables en Ecuador cambiará la matriz energética mediante el desarrollo de proyectos a largo plazo que reemplazarán progresivamente la dependencia energética de origen fósil. Estos proyectos permitirán el cambio de la Matriz Energética al hacer uso de Energía Renovable como la Solar, la cual permitirá el autoabastecimiento eléctrico, al tener en cuenta que esta alternativa será un sistema seguro, abundante y amigable con el ambiente.

El reemplazo de Cocinas a Gas Licuado de Petróleo (GLP) por Cocina de Inducción Magnética eliminará el uso del GLP como fuente para la generación de energía y en su reemplazo utilizarán electricidad. En el “Plan Nacional para la implementación de Sistemas de Cocción Eficiente” prevista para el año 2016 se menciona que:

“Una de las decisiones a implementar tomando en cuenta la disponibilidad de electricidad futura, es el incremento de la participación de la energía eléctrica en otros usos, como por ejemplo la cocción de alimentos, es así que se ha planteado el Programa el cual busca la incorporación de 3.675.992 cocinas de inducción en un período de 3 años, lo que permitirá contribuir al cambio de la matriz energética del país a través de la reducción de la demanda de GLP en el sector residencial; disminuir el gasto en subsidio al GLP, disminuir las importaciones de GLP, apoyar favorablemente a la Balanza Comercial, estimular la producción nacional de equipos y electrodomésticos de alta eficiencia; y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero que potencian el calentamiento global.” (Correa 2013c)

Finalmente, es importante mencionar el compromiso que tiene el Gobierno con el País respecto al desarrollo de nuevos proyectos para aprovechar los recursos renovables con los que cuenta Ecuador; mediante el uso de tecnologías más limpias en busca del beneficio económico, social y ambiental.

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El proyecto tiene como propósito la integración de una cocina de inducción magnética de 1300 watts, a un sistema de alimentación fotovoltaica que permita independizar la alimentación de la red eléctrica convencional, el cual tiene concordancia con lo estipulado por el Estado Ecuatoriano dentro del “Plan Nacional para el Buen Vivir 2013 – 2017” (PNBV), que menciona como estrategia la necesidad del cambio de la Matriz Energética en el Ecuador para el desarrollo de proyectos que permitan el uso de energía renovable en lugar de uso de energías convencionales de fuentes no renovables de origen fósil como el GLP.(Correa 2013a)

Durante los últimos 6 años, el Gobierno Ecuatoriano trabaja en la búsqueda de alternativas de obtención de energías renovables, como lo menciona el PNBV: “A fin de lograr una sostenibilidad económica y ambiental, la tendencia mundial es aprovechar las fuentes renovables para la generación de electricidad. Por ello, para contrarrestar la creciente presencia de las fuentes no renovables en la generación de electricidad en el país, el Ecuador ha sentado las bases para cubrir la demanda interna de electricidad con producción nacional basada en energías de fuentes renovables.”(Correa 2013b)

Estas bases tienen mira al futuro, ya que las energías no renovables de origen fósil usadas actualmente son contaminantes, demandan altos costos de extracción y producción, y sus fuentes se agotan rápidamente de acuerdo a la proyección del Pico Petrolero de Hubbert: “El pico petrolero se refiere al problema de que la producción de petróleo alcanzaría un máximo no más allá del 2020 y a partir de entonces tendría una tendencia decreciente en producción”(Serrano 2012). Por estas razones se hace necesario el uso de energías renovables susceptibles de ser aprovechadas de los recursos existentes en Ecuador dadas sus condiciones geográficas, como es la energía fotovoltaica cuya producción está basada en el fenómeno físico denominado 'efecto fotovoltaico', que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de

unos dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas. (Izquierdo 2008b)

Por tal razón, es importante iniciar con los estudios de factibilidad para la implementación de un Sistema de Generación Fotovoltaica para Cocinas de Inducción Magnética para cumplir con los objetivos necesarios para el cambio de la Matriz Energética en el Ecuador.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto contempla realizar el diseño y simulación del sistema de generación eléctrica en base a energía solar fotovoltaica, de acuerdo a las necesidades de consumo de una cocina de inducción magnética de 1300 watts. Se diseñará cada una de las etapas de conversión de potencia y lazos de control del sistema de generación (etapas de conversión DC/DC, e inversor DC/AC).

En relación al dimensionamiento del sistema de generación se realizará el estudio para la inclusión de un sistema de almacenamiento de energía, se realizará el diseño del cargador de baterías y su sistema de control. La inclusión del sistema de almacenamiento permitirá realizar la comparativa de los factores de eficiencia de potencia entre un sistema de generación con y sin elementos de almacenamiento de energía. Adicionalmente se realizará un análisis de impacto ambiental de estos elementos de almacenamiento de energía. (Castañer 2002)

Se efectuará la simulación del sistema de generación eléctrica en base a energía solar fotovoltaica con y sin almacenamiento de energía para abastecer la demanda energética de una cocina de inducción magnética con las características definidas anteriormente, para lo cual se utilizará el Software Matlab – Simulink. Se analizará el comportamiento de los factores de eficiencia para los dos sistemas. (Silvestre 2004)

Se analizará los aspectos económicos y ambientales para los sistemas de generación con y sin sistema de almacenamiento de energía, se realizará la

comparación entre los costos de consumo de energía consumida de una cocina de inducción magnética con y sin sistema de almacenamiento de energía.

En base a los objetivos del proyecto y al estudio realizado del dimensionamiento del sistema, simulaciones, resultados y aspectos económicos se plantearán las conclusiones y recomendaciones.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 GENERAL

Realizar el diseño y simulación de un sistema de generación eléctrica solar fotovoltaica con y sin sistema de almacenamiento para una cocina de inducción magnética.

1.5.2 ESPECÍFICO

- Dimensionar el sistema de generación eléctrica fotovoltaica para la cocina de inducción magnética de 1300 watts.
- Diseñar la etapa de conversión de energía DC/DC e inversores de energía DC/AC para un sistema de generación eléctrico fotovoltaico con y sin sistema de almacenamiento de energía.
- Simular el sistema de alimentación eléctrica fotovoltaica con y sin sistema de almacenamiento de energía aplicado a una cocina de inducción magnética.
- Comparar los sistemas de generación de energía fotovoltaica con y sin sistema de almacenamiento de energía.
- Analizar el impacto ambiental del sistema de almacenamiento de energía eléctrica para el sistema de generación fotovoltaica.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 LA ENERGÍA

2.1.1 Energía renovable

La energía renovable es aquella no requiere consume recursos para generar energía, se encuentra en su estado natural en la naturaleza, elementos como el sol, el agua, el viento, son aprovechados para la producción de energía, estas son fuentes inagotables. Se considera a las energías renovables como una alternativa sostenible para la generación de energía en sustitución al uso de recursos fósiles. (Castells 2012)

Las fuentes de energía renovable pueden dividirse en dos categorías: no contaminantes y potencialmente contaminantes. Entre las primeras se puede mencionar:

- El sol: Energía solar (Energía Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica)
- El viento: Energía Eólica
- El Agua: Centrales Hidráulicas
- El calor de la tierra: Energía Geotérmica.

Dentro de la categoría de energía renovable potencialmente contaminante se encuentra la biomasa o materia orgánica, la obtención de energía a partir de este

elemento se realiza mediante la fermentación orgánica para la obtención de bioetanol o biogás.

2.1.2 Energía no renovable

La energía no renovable, es el tipo de energía que se encuentra por cantidades limitadas dentro de la naturaleza, o cuyo ritmo de consumo es superior al de regeneración natural. (Galán 2012)

La energía no renovable compone aquellos elementos que mediante procesos de transformación se puede generar varios tipos de energía, el consumo de estos elementos en el transcurso del tiempo acabaran por agotarse, los elementos como el petróleo, carbón y gas natural, se denominan combustibles fósiles, y forman parte del grupo de la energía no renovable.(Juana 2003) Se presenta en la Tabla 1, la clasificación de las fuentes de energía, de la cual, para el desarrollo de este proyecto será de interés enfatizar en la Energía Solar, en las secciones posteriores se realizara un estudio más detallado.

Tabla 1

Clasificación de las fuentes de energía

No.	Energías Renovables		Energías No Renovables
1	Limpias	Contaminantes	Contaminantes
2	E. eólica		Carbón
3	E. hidráulica	Biomasa	Petróleo
4	E. geotérmica		Gas Natural
5	E. Solar		

Fuente: (Juana 2003)

2.2 SITUACIÓN ENERGÉTICA EN ECUADOR

La generación de energética en Ecuador ha dependido básicamente de combustibles de origen fósiles, el petróleo en su gran mayoría, existe una tendencia decreciente en cuanto a calidad y cantidad de este elemento, por lo

que es necesario la búsqueda de nuevos proyectos para reemplazar y dejar la dependencia de combustibles de tipo fósil. (Calahorrano 2013)

Se presentan nuevos proyectos de generación energética en Ecuador (Cabrera 2012), proyectos que procuran la diversificación de medios de producción de energía, haciendo uso de energías renovables se presentan a continuación:

➤ **Proyectos eólicos:**

- Salinas con 15 MW
- Huaschacha con 50 MW
- Ducal Membrillo con 160 MW

➤ **Centrales hidroeléctricas:**

- Mira con 1 MW generando 8,1 GWh-año
- Chorrillos con 3,96 MW generando 27,75 GWh-año

➤ **Proyectos fotovoltaicos:**

- Fotovoltaico Baltra: 200 KWp – 1MW Baterías
- Fotovoltaico Puerto Ayora: 1 MWp
- Híbrido Isabela: 500 KWp (PV) 1 MW – Dual
- Programa Eurosolar: 91 kW (Comunidades Aisladas)

El MEER ejecuta proyectos de desarrollo sostenible, que buscan la eficiencia energética, presenta los siguientes proyectos que se están desarrollando:

- **Cambio de lámparas de alumbrado público eficientes:** Sustitución de 1 250 luminarias por luminarias de inducción de 80W en la provincia de Galápagos.

- **Cambio de Cocinas de G.L.P. a Cocinas de Inducción:** Reemplazo de las cocinas que generan energía calorífica a partir de G.L.P. por cocinas de inducción electromagnéticas, proceso que conlleva la adecuación de las redes de distribución de energía para consumo residencial.
- **Plan Renova Refrigeradora:** Este proyecto plantea el cambio de refrigeradoras ineficientes por unidades nuevas.

El proyecto que se desarrollara se enmarca dentro de los proyectos de desarrollo sostenible que pretende garantizar la eficiencia energética, y adaptarse al cambio de la matriz energética.

2.3 ENERGÍA SOLAR

2.3.1 Geometría solar

Se plantean definiciones generales respecto a la geometría solar (Perez 2004) :

- **Distancia Tierra-sol:** La tierra gira alrededor del sol en una órbita elíptica, la distancia media del sol y la tierra se ha estimado en 1.468×10^8 km (Unidad Astronómica U. A.).
- **Declinación:** El plano en el que se encuentra la órbita de la Tierra en su movimiento alrededor del sol, se denomina eclíptica.
- **Posición del Sol:** Para el estudio de la posición del sol con respecto al observador terrestre, se suele tomar a la tierra, por convenio, como estacionaria en el centro de una esfera en la que se proyecta la posición del sol. Se denomina cenit al punto de la esfera celeste situada en el eje vertical del observador, y nadir al situado en la posición diametralmente opuesta.

2.3.2 Radiación solar

El sol está conformado con una concentración del 78% de hidrogeno, 20% de helio y la diferencia por otros elementos, el conjunto de elementos producen una reacción nuclear de fusión que genera una pérdida de masa que se transforma en energía, esta se transmite al exterior mediante la denominada radiación solar. (Rufes 2010)

La radiación solar suministra el 99.97% de luz y calor (Henry 1999) que es aprovechado en la tierra para procesos naturales como la fotosíntesis, procesos de transformación de energía, entre otros.

La radiación solar se define como la cantidad de energía proveniente del Sol que recibe una superficie durante un período de tiempo. La intensidad de la radiación solar está determinada por factores como la altura solar, condiciones atmosféricas y altura de la superficie sobre el nivel del mar. (Romero 2009).

Los tipos de radiación solar son de tres tipos:

- **Radiación Solar Directa:** La radiación solar directa es la fracción del flujo solar que llega a la superficie terrestre sin haber sufrido ninguna dispersión.
- **Radiación Solar Difusa:** La radiación solar difusa se define como la fracción de radiación solar que atraviesa la atmosfera terrestre y por causa de un choque entre moléculas y partículas que contiene el aire con los rayos solares, se produce una dispersión. (Seoáñez 2001)
- **Radiación Reflejada:** De la totalidad de radiación solar que llega a la tierra, una porción es reflejada a causas de las propiedades físicas de la superficie sobre cual llega, conocido esto como albedo que se define como el cociente entre la radiación reflejada por el objeto y la radiación total que llega a él. (Campos 1984)

- **Radiación Global y Radiación Total:** La radiación global la suma de las radiaciones directa, difusa y a la radiación total como radiación total a la suma de las radiaciones directa, difusa y reflejada.

De la radiación total que recibe la tierra, se considera a la radiación directa como la más importante para aplicaciones fotovoltaicas dada su característica debido al hecho que no existe dispersión de los rayos solares sobre la superficie con la cual es interceptada.

2.3.3 Aprovechamiento de la energía solar

La energía solar puede ser aprovechada mediante medios tecnológicos de captación y almacenamiento de energía, para aprovechar de diferente manera, se tiene los siguientes medios:

- **Uso Directo:** Denominada Energía Solar Pasiva se basa en captar la energía del sol para almacenarla y distribuirla de forma natural mediante fenómenos naturales, como circulación del aire, sombras, etc.
- **Transformación de Calor:** Denominada Energía Solar Térmica es el aprovechamiento de la radiación de sol para producir calor mediante el uso de colectores o paneles solares térmicos.
- **Transformación en Electricidad:** Denominada Energía Solar fotovoltaica se obtiene mediante la transformación de la radiación solar en electricidad por medio de células fotovoltaicas que integran los módulos solares.

La disponibilidad energética que genera la radiación solar depende de factores determinísticos que influyen desde el momento que los rayos solares entran a la atmosfera hasta llegar a la superficie terrestre. Se mencionan, factores astronómicos que determinan el recorrido de la radiación a través de la atmosfera y el ángulo de incidencia del mismo, factores climáticos que

determinan la cantidad de energía que llega a la tierra debido a atenuaciones producidas por vapor de agua, ozono y nubes (Méndez 2007).

El desarrollo de tecnología y la diversidad de técnicas para el aprovechamiento solar (Romero 2009) hacen que se supere estas dificultades debido a los factores mencionados y gozar de los beneficios de la energía solar al ser una energía renovable, gratuita e inagotable.

2.3.4 Medición de la radiación solar

Los instrumentos de medida de radiación solar sirven para cuantificar la cantidad de energía que llega a una superficie que depende de la ubicación geográfica y la medida de magnitudes solares en intervalos de tiempo específicos. Estas medidas son usadas para calcular parámetros que determinaran la producción energética en centrales fotovoltaicas o termoeléctricas.

Con los datos obtenidos de los instrumentos de medida de radiación solar se determinan en los módulos fotovoltaicos los patrones de rendimiento fotovoltaico, potencia, curvas de características eléctricas, entre otras. Las magnitudes entregadas son analizadas en centros de investigación e industrias de manufactura de células fotovoltaica para la optimización de la energía solar.

Mediante la adecuada selección de un instrumento de medida de radiación solar, se determina la elección correcta de los módulos fotovoltaicos con los cuales se puede garantizar la máxima eficiencia del sistema.

De acuerdo al tipo de radiación a medir se tienen los siguientes instrumentos:

- **Piranómetro:** Es un instrumento de medición de radiación solar global, Figura 1, este sensor mide la radiación directa y difusa sobre una superficie horizontal de 180 grados (Meinel 1982). Este sensor cuenta con 2 placas de metal una de color negro y otro de color blanco, mediante el uso de termopar se mide la temperatura de cada una de las placas, la diferencia entre la placa negra que absorbe más radiación que las blancas,

es proporcional a la radiación recibida, este tipo de Piranómetro basado en la medición por diferencia de temperatura y termopar, se lo conoce como Piranómetro tipo Eply o Moll-Goroczynsky. Debido que el Piranómetro es un instrumento sencillo y no requiere de un sistema de seguimiento solar, ha sido usado ampliamente para obtener datos solares de todo el mundo que abarcan aproximadamente el 90%. (Meinel 1982).



Figura 1. Piranómetro

Fuente: (Gonzalez 2006)

- **Pirheliómetro:** Es un instrumento de medición de radiación solar directa, Figura 2. Este sensor mide la radiación directa y desprecia la radiación difusa proveniente desde otras direcciones. Este instrumento proporciona medidas correctas cuando está enfocado directamente al sol. Para obtener medidas durante todo el periodo de sol en un día este debe disponer de un sistema de seguimiento de solar. Es el menos usado, debido a que es un instrumento que necesita mayor atención en comparación que el pirómetro.



Figura 2. Pirheliómetro

Fuente: (Gonzalez 2006)

- **Heliógrafo:** Es un instrumento que registra el periodo en el cual el sol alumbra. El intervalo de tiempo comprendido entre la salida y la puesta del sol define el máximo de insolación diaria posible para un día y un determinado lugar. Es el más común está conformado por una bola de cristal transparente y una banda de papel sensible a la luz conocido como heliógrafo Campbell-Stocks. Consiste en una esfera de vidrio que concentra la radiación solar de cualquier dirección, sobre un sistema de bandas de papel que deben usarse de acuerdo a la época del año las mismas que tienen inscrito una escala horaria que a medida que transcurre el día deja una huella, con la longitud de la misma se calcula las horas en el cual el sol alumbra (Campos 1984).

2.3.5 Unidades de medida de radiación solar

Las siguientes unidades son usadas para la medida de variables meteorológicas de la radiación solar:

- **Irradiancia Solar (I):** Se denomina Irradiancia solar al flujo de energía por unidad de superficie asociada a la radiación solar. La unidad que se utiliza para cuantificar la Irradiancia se presenta en Ec. 1.

$$I = \frac{kW}{m^2} \quad \text{Ec. 1}$$

- **Exposición (G):** Se denomina exposición a la integral de la Irradiancia solar a lo largo de un determinado espacio de tiempo. La unidad que cuantifica la exposición es presentada en Ec. 2.

$$G = \frac{kWh}{m^2} \quad \text{Ec. 2}$$

2.4 CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR A ELÉCTRICA

2.4.1 Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es la emisión de electrones de un material expuesto a una corriente de fotones: luz visible o ultravioleta. El desprendimiento de electrones se produce en algunos materiales (sólidos, líquidos o gaseosos) cuando el material tiene exceso de electrones o el material es neutro (Delgado 2008).

El exceso de electrones se encuentra comúnmente en un metal o un semiconductor como el silicio, el germanio, el arsénico y el boro, los mismos que son útiles en la industria electrónica para la manufactura de transistores, diodos, celdas fotoeléctricas, circuitos integrados entre otras.

Este material tiene una estructura atómica que contiene electrones libres, los mismos que pueden extraerse mediante el efecto fotoeléctrico y son los responsables de la característica física de conductividad eléctrica (Figueroa 2007). El efecto fotoeléctrico es el fundamento de la conversión de energía solar a energía eléctrica.

2.4.2 Materiales semiconductores

Los materiales semiconductores poseen características intermedias entre los materiales conductores y aislantes, bajo determinadas condiciones permiten la circulación de corriente eléctrica solamente en un sentido. La estructura de bandas energéticas de los electrones de un cristal determina la diferencia de conductividad eléctrica entre los distintos tipos de materiales (Llinares 1997).

Las bandas energéticas de un material están constituidas por banda de valencia y conducción. La banda de valencia está formada por los enlaces entre átomos mediante sus electrones que se encuentran en el último nivel energético. La banda de conducción está formada por los electrones libres responsables de

la conducción eléctrica. Entre estas dos bandas existe una zona llamada banda prohibida presente en los semiconductores, se muestra en Figura 3.

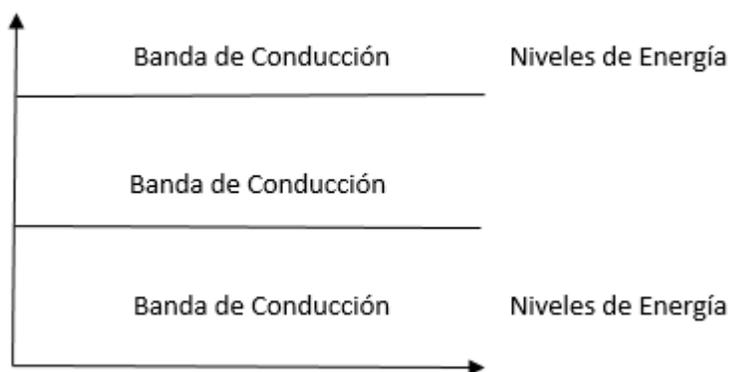


Figura 3. Bandas energéticas en materiales semiconductores

Los semiconductores como el silicio o el germanio, tienen una conductividad eléctrica mucho menor que materiales conductores, pero aumenta rápidamente al elevar la temperatura. Al comparar con los metales, los mismos disminuyen su conductividad por efecto de la temperatura. La conductividad de un material es determinada por la cantidad de electrones libres que pueden moverse con mayor facilidad dentro de un material.

La conductividad de un material semiconductor se puede variar al aplicar métodos como: elevación de temperatura, introducción de impurezas dentro de su estructura cristalina, al incrementar la iluminación incidente sobre el material. A los materiales que han sufrido una alteración atómica mediante la introducción de impurezas dentro de su estructura cristalina se denominan semiconductores extrínsecos, semiconductores como el silicio que pueden ser dopado con boro o fosforo, de esta manera se obtienen los semiconductores tipo n y tipo p.

2.4.3 Dopaje del silicio

El dopado es un proceso que consiste en añadir otra sustancia al cristal de silicio para transformar su característica eléctrica (Schuler 1986) Para realizar el

dopado es necesario introducir en la estructura atómica del silicio otros materiales semiconductores que posean tres o cinco electrones en su última banda de valencia.

De acuerdo al valor de electrones con que se realice el dopaje se tiene:

- **Semiconductor de Silicio “tipo n”:** El silicio tiene en su última capa de valencia cuatro electrones, para realizar un dopaje de tipo N o dador, se debe añadir átomos de un elemento que contenga cinco electrones de valencia, como el Arsénico, al realizar el enlace entre el silicio y el arsénico queda libre un electrón, el mismo que podrá moverse libremente dentro de toda la estructura cristalina.
- **Semiconductor de Silicio “tipo p”:** Para realizar el dopaje de tipo P o aceptor, se debe añadir átomos de un elemento que contenga tres electrones de valencia, como el Galio. Dentro del enlace entre el silicio y el galio, este tomara un electrón del silicio que produce en este un hueco que queda libre dentro de la estructura cristalina.

2.5 COMPONENTES DEL SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO

2.5.1 Célula fotovoltaica

La célula fotovoltaica es un elemento fabricado con materiales semiconductores, que mediante el principio del efecto fotoeléctrico generan tensión eléctrica cuando reciben energía solar. (Hermosa 2011)

La energía que generan por unidad de área está en el rango de 10 mW/cm² a 25 mW/cm² que corresponde a 10% a 25 % de eficiencia. Una célula tiene un área aproximada de 225 cm², con un 15 % de eficiencia y una potencia de 3.37W. (Solanski 2011)

2.5.1.1 Estructura de la célula fotovoltaica.

La estructura de una célula fotovoltaica está formada por una lámina de silicio en la cual se ha realizado el dopado del tipo p y otra del mismo material con dopaje de tipo n, cuando se realiza la unión de estas dos láminas se denomina unión PN. (Valentín 2012)

Para realizar la conexión eléctrica de la célula, se instala placas en las caras de las láminas dopadas con material conductor de aluminio o plata. Para que la luz pueda incidir directamente sobre la lámina de dopaje n, la placa se instala en forma de rejilla Figura 4. (Valentín 2012)

La corriente eléctrica se genera cuando la luz incide sobre la célula, en el nivel atómico los fotones rompen el par electrón-hueco. El campo eléctrico de la unión los separa para evitar que se recombinen, y llevan los electrones a la zona n y los huecos a la zona p. Mediante un conductor externo, se conecta la capa negativa a la positiva, que generan un flujo de electrones de la zona p a la zona n, de esta manera se cumple con el principio de efecto fotoeléctrico. (Méndez 2007)

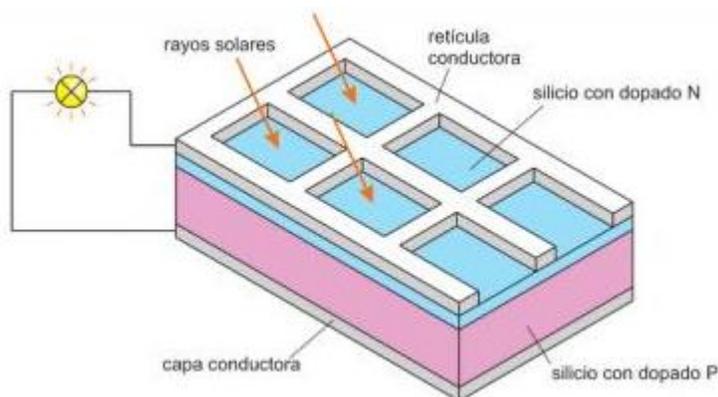


Figura 4. Estructura de la célula fotovoltaica.

Fuente: (Valentín 2012)

2.5.1.2 Tipos de Células Fotovoltaicas

La fabricación de los tipos de células fotovoltaicas está dada en base a la estructura cristalina del estado sólido de un material semiconductor en este caso el Silicio.

Según la estructura atómica del silicio, se denomina monocristalino si la estructura es ordenada sobre una porción completa de un material figura y1a, policristalino cuando existe la unión de pequeñas secciones de microcristales figura y1b, y se denomina amorfo o no cristalino cuando su estructura está dispuesta de manera irregular o en forma aleatoria Figura 5. (Llinares 1997)

La clasificación de los tipos de células fotovoltaicas de silicio (SanMiguel 2011), es la siguiente:

- **Células de Silicio Monocristalino (m-Si):** Su estructura es uniforme, la célula se obtiene de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. El proceso de fabricación es caro y demanda tiempo. El rendimiento de Células de Silicio Monocristalino está en torno al 16%, en laboratorios alcanzan un rendimiento máximo de 24.7%

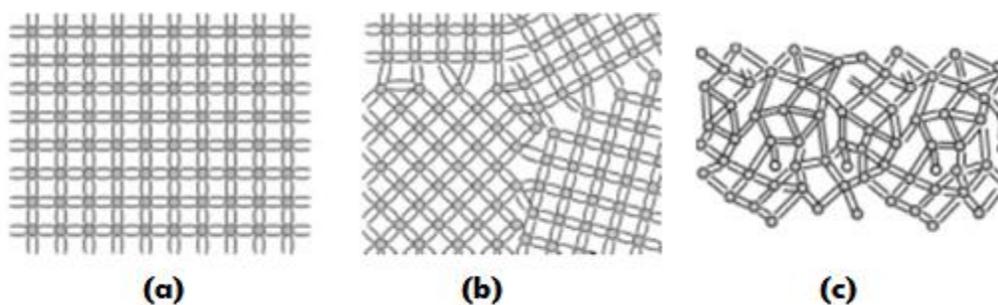


Figura 5. Estructura atómica del silicio (a) Estructura Monocristalina, (b) Estructura Policristalina, (c) Estructura Amorfa

Fuente: (Andreotti 2013)

- **Células de Silicio Policristalino:** Una célula de este tipo se obtiene de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. El rendimiento de Células de Silicio Policristalino está

en torno al 14%, en laboratorios alcanzan un rendimientos máximos de 19.8%.

- **Células de Silicio Amorfo:** Una célula de silicio amorfo se obtiene en base de silicio, pero su estructura no está cristalizada. El rendimiento de Células de Silicio Amorfo está en torno al 13%, en laboratorios alcanzan un rendimientos máximos de 18%.

2.5.2 Módulo Fotovoltaico

El módulo fotovoltaico está formado por la interconexión en serie y/o paralelo de varias células, esto se realiza para poder adaptar a los requerimientos de tensión y corriente de una aplicación determinada. (Pareja 2010)

Las conexiones entre células forman un módulo con una potencia nominal de 3Wp hasta 300 Wp, y las conexiones entre módulos forman una matriz de módulos que entregan una potencia de unos pocos watts hasta cientos de mega watts, Figura 6. (Solanski 2011)

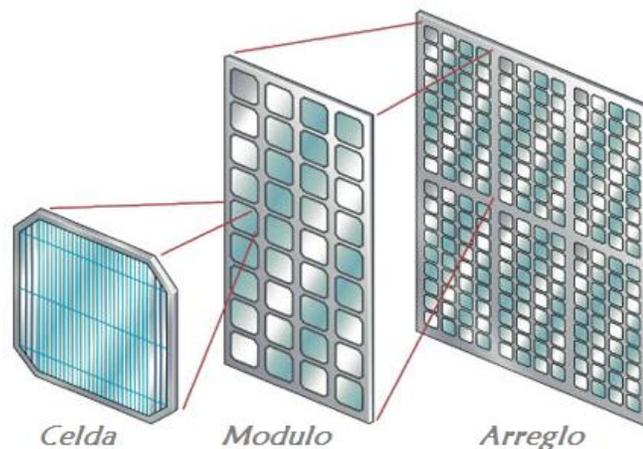


Figura 6. Interconexión de célula, módulo y matriz de módulos

Fuente: (Tigullio 2015)

El módulo fotovoltaico proporciona a las células: resistencia mecánica lo que facilita el transporte e instalación del módulo, protección de condiciones atmosféricas adversas, aislamiento eléctrico que garantiza seguridad a personas y animales que pueden ponerse en contacto directo con el módulo.

En el mercado se encuentra diferentes tipos de módulos, generalmente, módulos de silicio de 36 células que producen una tensión de 12 voltios y módulos de 72 células con una tensión de 24 voltios.

Las células que se utilizan para formar un módulo deben cumplir los mismos parámetros eléctricos para que no existan descompensaciones que limiten el funcionamiento, los ensayos realizados por los fabricantes son necesarios para garantizar la igualdad de parámetros y características eléctricas de las células que formaran parte de un módulo. (Méndez 2007)

2.5.2.1 Características Eléctricas de los Módulos Fotovoltaicos

Las características eléctricas de un módulo (García 1999), están determinadas por las células fotovoltaicas por la cual está formado, estas contienen características eléctricas que son descritas mediante los siguientes parámetros representados en la Figura 7.

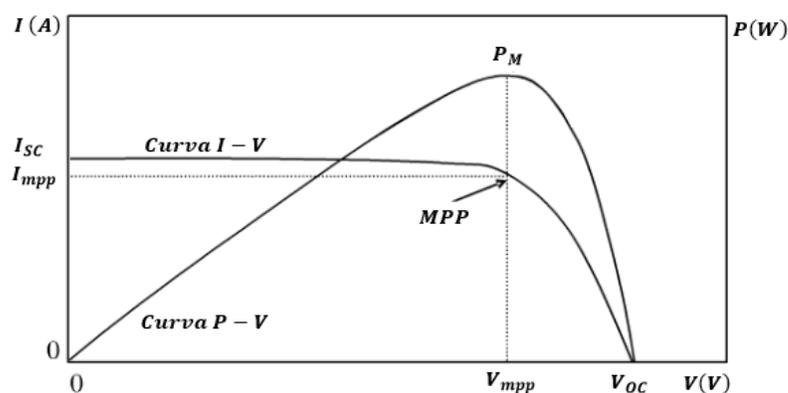


Figura 7. Características Eléctricas Módulo Fotovoltaico, Curva I-V y Curva P-V

- **Corriente de corto circuito I_{SC}** : Es la máxima intensidad de corriente que proporciona el módulo bajo determinadas condiciones de radiación y temperatura, corresponde a la corriente que entrega cuando se conectan un circuito exterior con resistencia nula, se puede medir directamente con un amperímetro conectado a la salida del módulo, tiene valores aproximados a los 3 A.
- **Tensión de circuito abierto V_{OC}** : Es la máxima tensión que se medirá en un módulo cuando no hay paso de corriente entre los bornes del mismo. Suele ser menor a 22v para módulos que van a trabajar a 12v.
- **Potencia Máxima P_M** : Denominada también Potencia Pico, es el valor máximo de potencia que se obtiene de la multiplicación de la corriente y tensión de la salida del módulo, Ec. 3, su valor se mide en Vatios (W). Cuando se trabaja en este punto se obtiene el mayor rendimiento del módulo.

$$P_M = I_{mpp} \times V_{mpp} \quad \text{Ec. 3}$$

- **Tensión Máxima V_{mpp} y Corriente Máxima I_{mpp}** : Tensión y corriente máxima son correspondientes al punto donde la potencia es máxima P_M , la tensión máxima V_{mpp} es aproximadamente el 80% del valor de la tensión de circuito abierto.
- **Factor de Forma FF** : Es la relación entre la potencia máxima y el producto de la corriente de corto circuito y la tensión de circuito abierto, Ec. 4. Sus valores comunes suelen estar entre 0.7 y 0.8, el FF determina la calidad del módulo mientras el valor se aproxime a la unidad, el módulo puede proporcionar mayor potencia.

$$FF = \frac{P_M}{I_{SC} \times V_{OC}} \quad \text{Ec. 4}$$

- **Eficiencia o Rendimiento n** : Es el cociente entre la potencia máxima que el panel puede entregar y la radiación solar P_L , Ec. 5.

$$n = \frac{P_M}{P_L} \quad \text{Ec. 5}$$

- **Condiciones Estándar:** Los valores de I_{SC} , V_{OC} , V_{Pmax} , I_{Pmax} son valores entregados por los fabricantes como se observa en la Figura 8, estos valores eléctricos son calculadas a condiciones estándar de prueba con sus siglas en ingles STC, que son las siguientes:

- Irradiancia $G(CE) = 1 \text{ kW}/\text{m}^2$
- A nivel de mar $AM=1.5$
- Para temperatura de la célula $T_c(CE) = 25^\circ C$

PHOTOVOLTAIC MODULE			
Model	A-140P		
P_{mp}	140 W	V_{oc}	22,30 V
V_{mp}	17,54 V	I_{sc}	8,42 A
I_{mp}	7,98 A	V_{max}	1000 V
ID	6P49-4x9	1002865	
S.N.	P1011210003032		
			
SPECIFICATIONS AT 1000W/m ² 25 °C AM 1.5			
			
<small>IEC 61215: 2005 EN 6120: 2007 CERTIFIED 1000V MPP</small>		<small>CLASS B MPP</small>	

Figura 8. Características eléctricas de un módulo ARTESA

Fuente: (Teknosolar 2015)

2.5.2.2 Circuito Eléctrico Equivalente Célula y Módulo Fotoeléctrico

El módulo fotoeléctrico es un conjunto de células configuradas en serie o en paralelo, sus características de operación varían de acuerdo al cambio de

temperatura y radiación solar incidente, la respuesta del módulo es expresada en las curvas de Intensidad Voltaje y Potencia Voltaje.

Las células son el núcleo de conversión de luz en corriente eléctrica dentro de un módulo fotoeléctrico, el estudio del circuito eléctrico de este dispositivo en primera instancia es importante para entender el comportamiento del conjunto llamado módulo.

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

Para el análisis del modelo de una célula y módulo fotoeléctrico se asumirá lo siguiente:

1. El diodo que representa la juntura p-n es real.
2. Las células fotovoltaicas son idénticas con las mismas características eléctricas.
3. Para el modelo simplificado de célula y módulo fotoeléctrico se asume $R_p = \infty$ y $R_s = 0$.
4. Para el modelo general de célula y módulo fotoeléctrico se asume $R_p = \infty$.

2.5.2.3 Modelo Simplificado de la Célula Fotoeléctrica

El modelo simplificado de la célula fotoeléctrica se determina al considerar que no existe pérdidas de potencia en el proceso de transformación de energía. La variación de potencia entregada por la célula es producida por los cambios de temperatura de trabajo, además de los cambios de radiación solar a la cual es sometida, a través de un análisis de circuitos se determinará las ecuaciones que rigen el modelo al tomar en cuenta los dos factores mencionados.

La Figura 9 muestra el circuito equivalente para un modelo de Célula Fotoeléctrica, este circuito consiste en una fuente de corriente y un diodo conectados en paralelo.

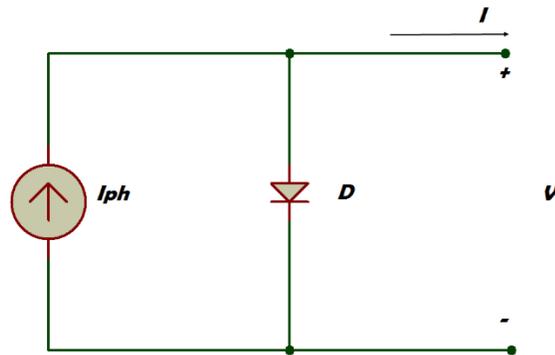


Figura 9. Modelo de Célula Fotoeléctrica

Dentro de la Figura 9, el diodo representa la unión p-n de la célula fotoeléctrica en condiciones de oscuridad, la corriente en este estado es expresada por el modelo matemático de un diodo mediante la ecuación de Schokley que se muestra en la Ec. 6. Cuando la célula fotoeléctrica esta iluminada, a la ecuación de Schokley se suma la corriente fotogenerada por la célula.

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{n V_t}\right) - 1 \right] \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

I_D Es la corriente a través del diodo.

I_0 Corriente de Saturación, normalmente entre 10^{-5} y 10^{-6} A.

V_d Voltaje del diodo.

n Coeficiente de emisión o factor de idealidad

El coeficiente de emisión n depende del material y la construcción física del diodo. Generalmente la construcción de diodos se realiza con materiales semiconductores como germanio y silicio, sienta $n = 1$ para el germanio y $n = 2$

para el silicio, en la práctica los valores n para el silicio esta entre $1.1 \leq n \leq 1.8$ (Rasid 2004).

En la ecuación Ec. 6, el término V_t es conocido como voltaje térmico, cuya ecuación es la siguiente:

$$V_t = \frac{k T}{q} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

- k Constante de Boltzman $1.3805 \times 10^{-23} \text{ [J/K]}$
- T Temperatura absoluta $[K]$
- q Carga del electrón $1.6022 \times 10^{-19} \text{ (Coulomb) [C]}$

Mediante el análisis de la Ley de Corriente de Kirchhoff aplicado a la Figura 9, se tiene Ec. 8 que representa la salida de corriente I del circuito simplificado equivalente a una Célula Fotoeléctrica.

$$I = I_{ph} - I_D \quad \text{Ec. 8}$$

Al reemplazar la ecuación Ec. 6 en Ec. 8.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{n * V_T}\right) - 1 \right] \quad \text{Ec. 9}$$

La corriente I_{ph} generada por la fotocélula, depende de la radiación solar incidente y la temperatura de operación de la misma, expresada en la Ec. 10.

$$I_{ph} = [I_{SC} + K_i * (T_c - T_{ref})] \frac{\beta}{1000} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde

- I_{SC} Corriente de Corto Circuito en $[A]$
- K_i Coeficiente de la Célula en Corto Circuito $[A/C]$
- T_c Temperatura de Operación de la Célula en grados centígrados $[C]$

T_{ref} Temperatura de Referencia de la célula en grados centígrados [C]

β Irradiancia en [W/m^2]

La temperatura de operación del diodo; semiconductor que representa la juntura p-n de la célula, no es constante, esta temperatura depende de dos factores: la temperatura ambiente y la potencia disipada, esta potencia disipada es una potencia que el diodo absorbe de generadores independientes, en este caso la producida por la fotocélula, y la convierte en calor, en consecuencia produce calentamiento dentro del diodo. (Prat 1999)

Al aumentar la temperatura del diodo, sus características se modifican mediante la variación de corriente de saturación inversa y el voltaje térmico, expresada en la Ec. 11 que representa la corriente de saturación para una célula fotovoltaica.

$$I_0 = I_{RS} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 * \exp \left[\left(\frac{q * E_g}{k * A} \right) * \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

E_g Energía de banda prohibida de Silicón [eV]

A Factor ideal del semiconductor

I_{RS} Corriente de Saturación Inversa del Diodo

La corriente de saturación inversa se puede aproximar mediante Ec. 12.

$$I_{RS} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{q * V_{OC}}{k * A * T_c * N_s} \right)} \quad \text{Ec. 12}$$

2.5.2.4 Modelo General de la Célula Fotoeléctrica

Con la eliminación de R_p , se presenta el modelo general de una célula fotovoltaica, este circuito está compuesto por una fuente de fotocorriente, un

diodo y una resistencia en serie, como se muestra en la Figura 10, en el modelo general se considerara $R_p = \infty$.

Mediante el análisis de Ley de Corriente de Kirchhoff se obtiene Ec. 13, que representa las características Intensidad Voltaje de la célula en el modelo general.

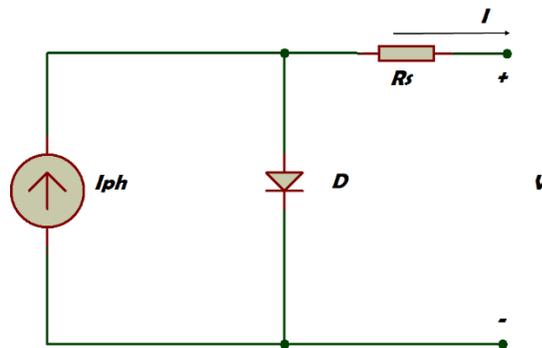


Figura 10. Modelo General de la Célula Fotoeléctrica

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{n * V_T}\right) - 1 \right] \quad \text{Ec. 13}$$

2.5.2.5 Modelo simplificado de módulo fotoeléctrico

El modelo simplificado del módulo fotoeléctrico se presenta en la Figura 11, en este circuito se incluyen determinado número de células configuradas en serie N_s , y en paralelo N_p que conformaran el módulo.

Una configuración en serie permite dimensionar la tensión nominal de trabajo del módulo, mientras que una configuración en paralelo permite obtener la corriente de salida que será requerida por un sistema en concreto. Las características eléctricas se presentan en Ec. 14.

2.5.2.6 Modelo general de módulo fotoeléctrico

El modelo general del módulo, se realiza en relación del modelo general de la célula, el circuito eléctrico equivalente se presenta en la Figura 12, el circuito está formado por n número de células en serie N_s y n número de células en

paralelo N_p , una fotocelda y una resistencia en serie R_s . La ecuación que representa las características de Corriente y Voltaje del módulo se presenta en Ec. 15.

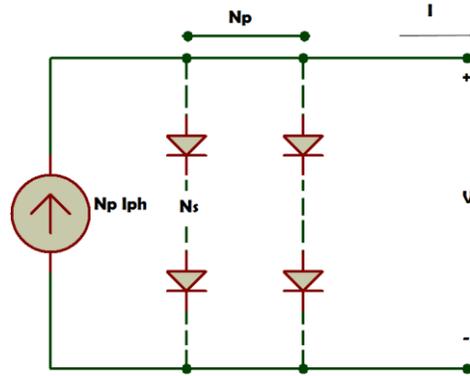


Figura 11. Modelo simplificado de módulo fotoeléctrico

$$I = N_p * I_{ph} - N_p * I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{n * V_T * N_s}\right) - 1 \right] \quad \text{Ec. 14}$$

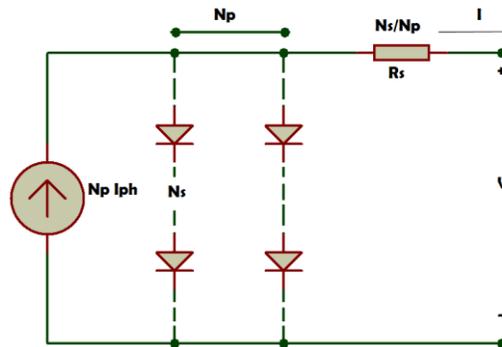


Figura 12. Modelo general de módulo fotoeléctrico

$$I = N_p * I_{ph} - N_p * I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{\frac{N_s}{N_p} + \frac{I R_s}{N_p}} \frac{1}{n * V_T}\right) - 1 \right] \quad \text{Ec. 15}$$

2.5.3 Convertidores de Potencia

2.5.3.1 Convertidores de Potencia DC-DC

Los convertidores DC-DC son sistemas electrónicos de potencia que poseen elementos pasivos como: inductor, capacitor; que cumplen el rol de almacenadores de energía, además de elementos como los transistores y diodos; conjunto de elementos que permiten regular tensión continua mediante conmutación. La conversión DC-DC es la obtención de una tensión continua con características controladas en un nivel de tensión deseado a partir de otro nivel de tensión que generalmente no está controlado.

Los parámetros más importantes de un convertidor DC-DC son la tensión de entrada, tensión de salida, la estabilidad de la salida frente a variaciones de la tensión de entrada y de la corriente de salida, el símbolo generalizado del convertidor DC-DC se muestra en la Figura 13.

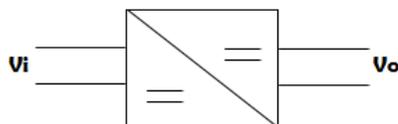


Figura 13. Símbolo del Convertidor DC-DC

La relación existente entre la tensión de entrada V_i y la tensión de salida V_o de la Figura 13, determina el modo de operación en tres formas diferentes que se realiza mediante la conmutación de interruptores en función de la tensión deseada, las acciones que puede realizar un convertidor son:

- Reducir Tensión $V_i \leq V_o$
- Elevar Tensión $V_i \geq V_o$
- Reducir y Elevar Tensión V_o puede ser mayor o menor que V_i

La Clasificación de los convertidores DC-DC es de acuerdo a su funcionamiento: convertidores controlados mediante la relación alto/bajo de impulsos, conocidos como convertidores no resonantes y convertidores controlados mediante la resonancia de elementos capacitivos e inductivos también llamados convertidores por resonancia (Mandado 1995), la clasificación se muestra en la Figura 14.

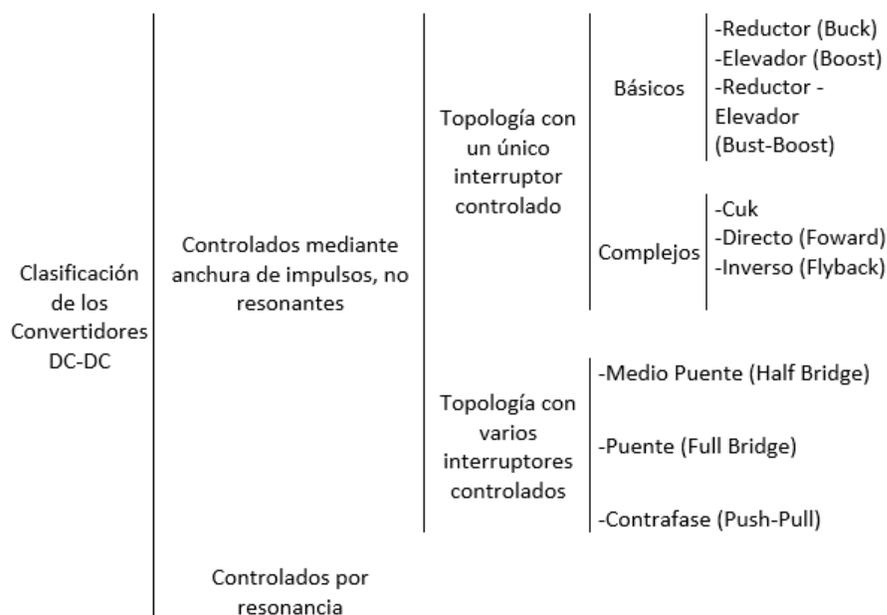


Figura 14. Clasificación de los convertidores DC-DC

Existen diferentes circuitos que pueden realizar la conversión DC-DC, como indica la Figura 14, todos estos circuitos pueden simplificarse al hacer uso del menor número posible de componentes (Inieco 2011), los mismos que trabajan bajo el principio de almacenamiento y transferencia de energía en ciclos de conmutación mediante dos interruptores; un interruptor activo como el transistor y un interruptor pasivo como el diodo, estos elementos forman parte de los convertidores Buck y Boost, razón por la cual se los ha denominado como convertidores básicos, estos convertidores básicos mediante diferentes

configuraciones de sus elementos se puede obtener los distintos convertidores existentes (Pozo 2011).

Como indica la Figura 14, existen diversidad de topologías de convertidores, por este motivo el presente documento se centrara en el estudio del convertidor elevador que servirá para elevar el voltaje que entrega el generador fotovoltaico y el convertidor reductor elevador será el medio de carga y descarga del sistema de almacenamiento.

➤ Convertidor Elevador

Un convertidor elevador es un dispositivo que proporciona a su salida una tensión superior a la tensión de entrada, $V_o > V_i$ (Garcerá 1998). La topología del convertidor elevador se muestra en la Figura 15.

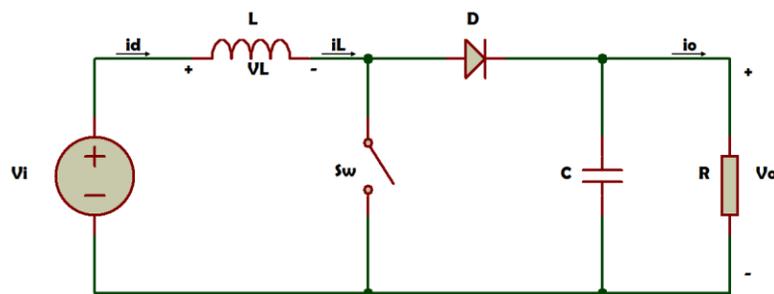


Figura 15. Convertidor Elevador

De acuerdo a la Figura 15, Sw es un transistor electrónico que conmuta a una frecuencia $f = \frac{1}{T}$, se presentan dos estados On y Off. D Es un diodo rápido, que debe poseer buenas características de conmutación. C es un capacitor de valor elevado que garantiza que la tensión de salida se mantenga constante sobre la carga. (Ang 2005)

Para el análisis de este convertidor se considerará que los elementos son ideales, es decir no existe pérdida de potencia en los elementos. Se realizará el análisis en modo de conducción continua, debido a la aplicación que se desarrollará exige un abastecimiento de tensión y corriente constante durante un

periodo de tiempo, en este modo se muestran dos secuencias de funcionamiento del convertidor según el estado del interruptor ON y OFF.

Cuando S_w está en estado ON, como se muestra en la Figura 16, la tensión de los bornes del diodo se polariza en sentido inverso y por lo tanto permanece bloqueado. La tensión en el inductor L es positiva y se carga por medio de la fuente V_i , el capacitor C tiene un valor lo suficientemente elevado como para poder mantener la tensión de salida constante sobre la carga.

Cuando S_w está en estado OFF, como se muestra en la Figura 17, el diodo permite la continuidad de corriente de la inductancia L y la energía almacenada en la bobina se transfiere al condensador C .

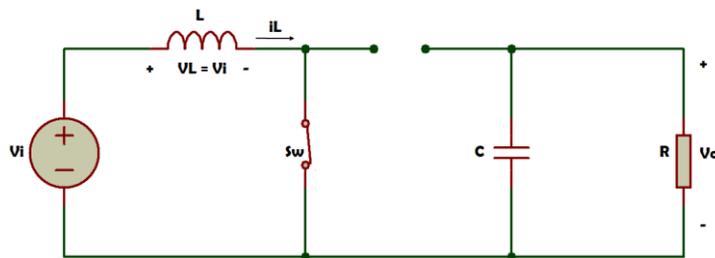


Figura 16. Convertidor Elevador con Sw ON

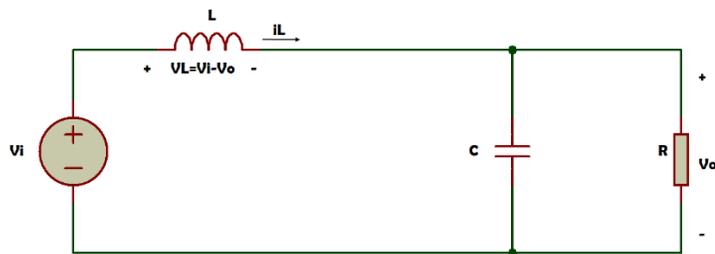


Figura 17. Convertidor Elevador con Sw OFF

El modelo matemático se obtiene al realizar el análisis de los elementos pasivos: bobina, diodo y capacitor, cuando el interruptor se encuentra en su estado On y Off, conmutan a una frecuencia $f = \frac{1}{T}$, la frecuencia debe asegurar el interruptor trabaje en las zonas de corte y saturación.

En la Figura 18 se muestra las formas de onda en la bobina, diodo y capacitor, en la Figura 18 (a) se observa el voltaje en la bobina cuando el interruptor está cerrado y su voltaje es $V_L = V_i$, cuando el interruptor está abierto el voltaje en la bobina es $V_L = V_i - V_o$. En la Figura 18 (b) se observa que la corriente en la bobina varía linealmente cuando el interruptor se encuentra en cada uno de los estados, cerrado y abierto, la corriente obedece su comportamiento a las Ec. 16 y Ec. 17 respectivamente. La corriente en el diodo solamente existe cuando el interruptor está abierto al igual que en el capacitor como se observa en la Figura 18 (c) y (d)

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \frac{V_i D T}{L} \quad \text{Ec. 16}$$

$$(\Delta i_L)_{\text{abierto}} = \frac{(V_i - V_o)(1 - D)T}{L} \quad \text{Ec. 17}$$

Como se observa en la Figura 18 (b), el ritmo de variación de la corriente en la bobina es constante, tanto para el estado abierto como cerrado en el interruptor, la relación de corriente se expresa mediante la suma de la variación de corriente con el interruptor cerrado con la variación de la corriente con el interruptor abierto igualada cero, como se muestra en Ec. 18. Al reemplazar las Ec. 16 y Ec. 17 en Ec. 18 y al simplificar se obtiene Ec. 19, que expresa la relación entre el voltaje de entrada V_i , voltaje de salida V_o y el ciclo de trabajo D , denominada ecuación fundamental del convertidor elevador.

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} + (\Delta i_L)_{\text{abierto}} = 0 \quad \text{Ec. 18}$$

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad \text{Ec. 19}$$

En Ec. 19, el valor del ciclo de trabajo varía entre [0 1], si el interruptor está abierto y $D = 0$, el valor de la tensión de salida es igual a la entrada. Al aumentar el valor de D , el denominador disminuirá y el valor de la tensión de salida será mayor al valor de entrada. Cuando el valor de D se aproxime a la unidad, se hará infinita, pero en un caso práctico los componentes reales producen pérdidas de potencia e impiden que la tensión de salida sea infinita.

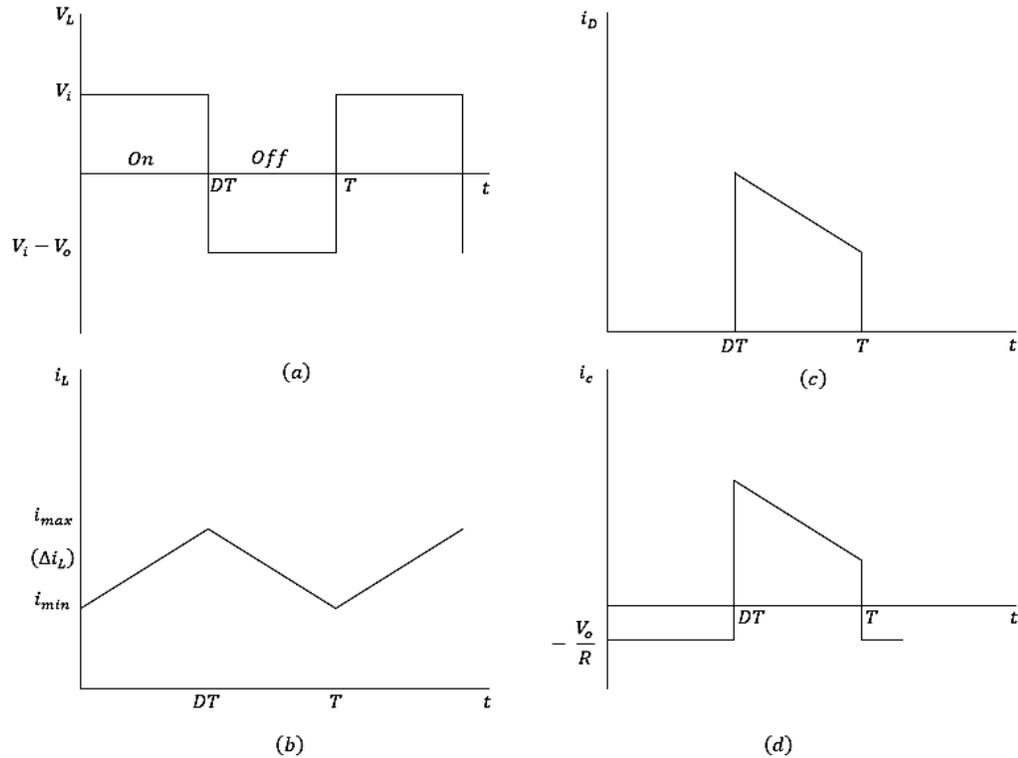


Figura 18. Formas de onda en el convertidor elevador, (a) Voltaje en la bobina. (b) Corriente en la bobina. (c) Corriente en el diodo. (b) Corriente en el inductor.

➤ Convertidor Reductor

Un convertidor reductor de tensión es un convertidor DC-DC de un solo interruptor controlable, que proporciona a su salida una tensión media V_o de valor inferior a la tensión de entrada V_i (Ang 2005), en la Figura 19 se representa el circuito de la topología del convertidor reductor de tensión.

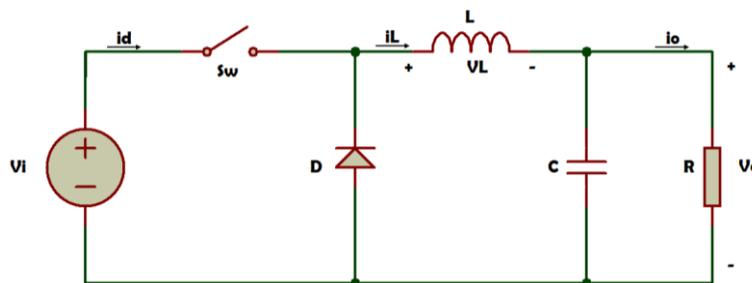


Figura 19. Convertidor reductor de tensión

Para el análisis de este convertidor se considerará que los elementos son ideales, es decir no existe pérdida de potencia en los elementos. Se realizará el análisis en modo de conducción continua, en este modo se muestran dos secuencias de funcionamiento del convertidor según el estado del interruptor ON y OFF.

En conducción continua se presentan dos secuencias de funcionamiento ON y OFF según el estado del interruptor Sw , que tiene una frecuencia de conmutación $f = 1/T$.

Cuando el interruptor Sw se cierra, el diodo D se polariza inversamente, anulando la corriente I_D y se produce un incremento de la corriente I_L a través de la bobina que ayuda a cargar el condensador C , el circuito equivalente es el mostrado en la Figura 20.

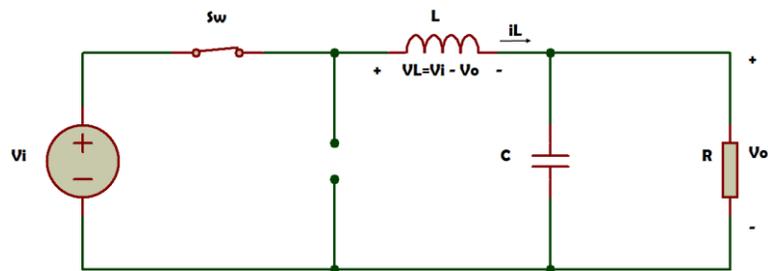


Figura 20. Conversor Reductor cuando Sw está cerrado

La tensión en la bobina se muestra en la ecuación Ec. 21:

$$V_L = V_i - V_o = L * \frac{di_L}{dt} \quad \text{Ec. 20}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad \text{Ec. 21}$$

Cuando el interruptor Sw se abre, el diodo se polariza directamente para dejar pasar la corriente de la bobina, el circuito equivalente es mostrado en la Figura 21.

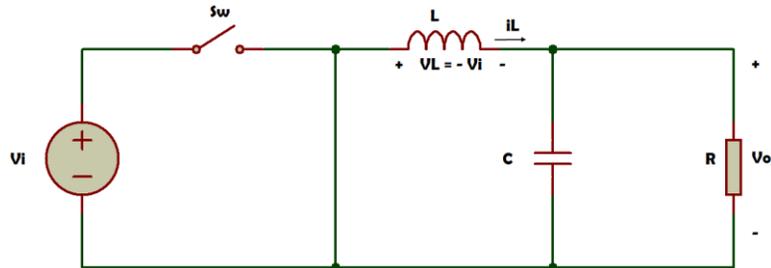


Figura 21. Conversor Reductor cuando Sw está abierto

La corriente en la bobina se muestra en la ecuación Ec. 23:

$$V_L = -V_o = L * \frac{di_L}{dt} \quad \text{Ec. 22}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad \text{Ec. 23}$$

2.5.3.2 Convertidores de potencia DC-AC

Los convertidores DC-AC son circuitos electrónicos formados con dispositivos semiconductores de potencia de alta velocidad (BJT, MOSFET, IGBT), que mediante conmutación generan energía eléctrica de corriente alterna a partir de una fuente de energía de corriente continua, estos circuitos son conocidos comúnmente como inversores. (Hart 2001)

El esquema general del inversor se muestra en la Figura 22, donde V_{dc} es la entrada del inversor de corriente continua que puede ser entregada por un banco de baterías, acumuladores, etapas de conversión DC-DC, etc. V_{ac} es la salida del inversor que entrega corriente alterna de forma cuadrada, con características que pueden ser modificadas en frecuencia y magnitud. La salida ideal del inversor

debe ser de forma senoidal pura, que se logra mediante el control de una técnica de modulación además de la implementación de filtros que eliminan los armónicos contenidos en la salida del inversor.

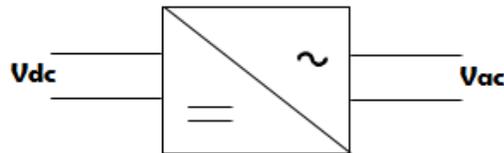


Figura 22. Esquema general del inversor

El estudio de los inversores, etapa de filtrado, y control se analizarán en este apartado, para posteriormente realizar el diseño y simulaciones con los datos que satisfagan las necesidades de la carga.

Los inversores se pueden clasificar de acuerdo a la señal de entrada, señal de salida, etapa de potencia y modo de control:

- **Señal de Entrada:** Alimentados en Tensión, Alimentados en Corriente
- **Señal de Salida:** Monofásicos, Trifásicos
- **Etapas de Potencia:** Medio Puente, Puente Completo
- **Control:** Inversores No Modulados, Inversores Modulados

Se estudiará el inversor monofásico tipo puente completo, debido a las características que presenta de las cuales se aprovechará en la aplicación, donde el inversor entregará corriente alterna monofásica a la carga.

➤ **Inversor monofásicos tipo puente completo**

El inversor monofásico tipo puente completo genera voltaje de tipo alterno cuya salida es una onda de forma cuadrada de una sola fase. Este tipo de inversor por lo general es usado para potencias en el rango de 0,4 a 2 kW (Teodorescu 2011).

En la Figura 23, se muestra la topología del inversor monofásico tipo puente completo, la operación básica del circuito es mediante el control de conmutación los interruptores S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , que son encendidos y apagados en parejas como se muestra en la Tabla 2, hay que tener en cuenta que dos interruptores de la misma rama no tiene que ser encendidos al mismo tiempo por que producirían un cortocircuito en la fuente de DC. De acuerdo a la secuencia mencionada se generan los diferentes circuitos que se muestran en la Figura 24, estos circuitos entregan una tensión de salida V_o de tres tipos ($+V_{DC}$, 0 , $-V_{DC}$), como se observa en la Figura 25.

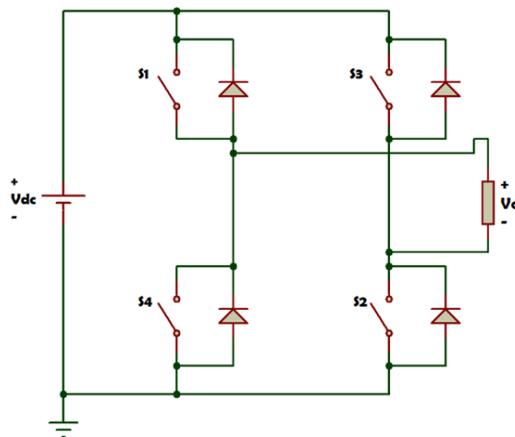


Figura 23. Inversor monofásico tipo puente completo

Tabla 2

Secuencia de Conmutación Inversor Monofásico, Puente Completo.

No.	Interruptores Cerrados	Tensión de salida V_o
1	S_1 y S_2	$+V_{DC}$
2	S_3 y S_4	$-V_{DC}$
3	S_1 y S_3	0
4	S_2 y S_4	0

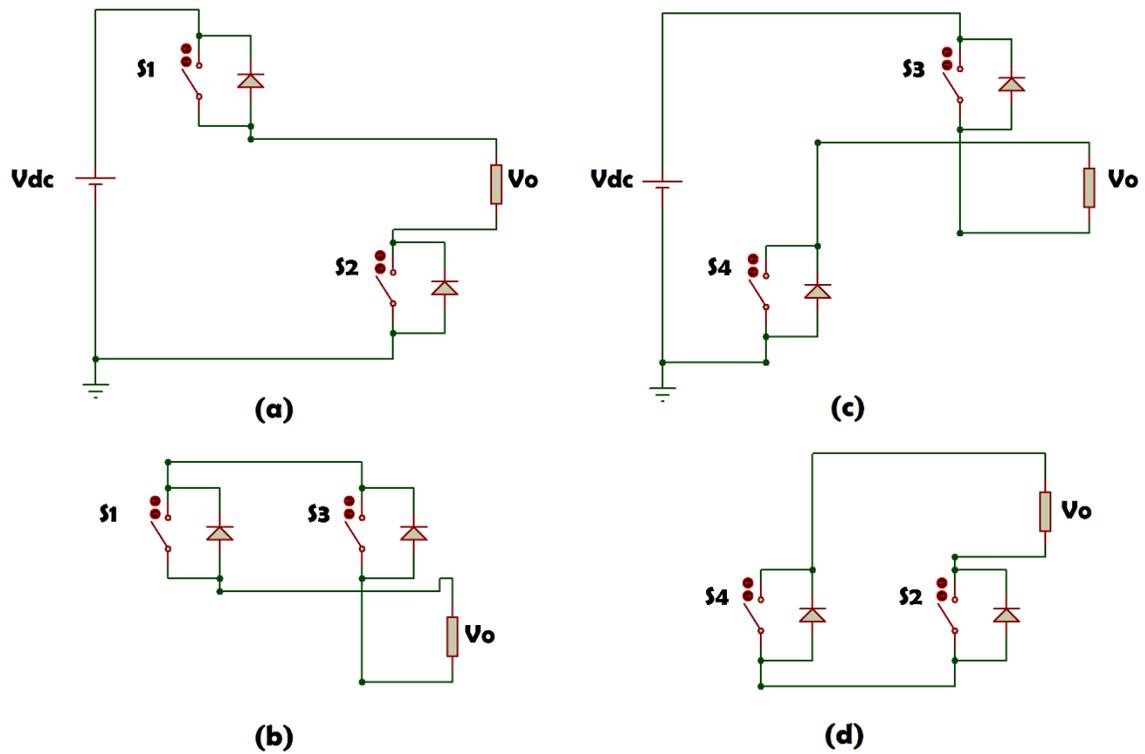


Figura 24. Secuencia de conmutación inversor monofásico, puente completo

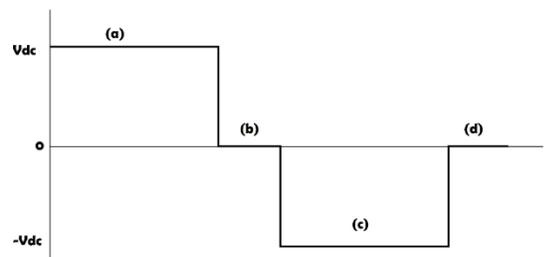


Figura 25. Respuesta de inversor monofásico, puente completo

En el modelo matemático del inversor tipo puente completo se considerará que la salida del circuito de la Figura 23 se encuentra conectado un filtro de segundo orden tipo LC y la carga del inversor será tipo resistiva, como se muestra en la Figura 26.

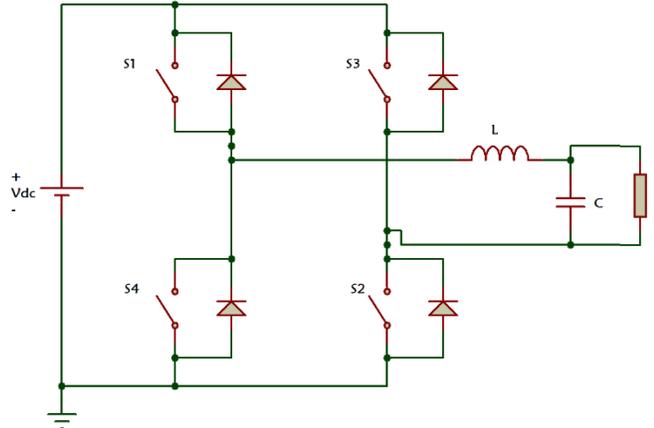


Figura 26. Inversor monofásico con filtro LC y carga tipo resistiva

Para el análisis del modelo matemático, la conmutación de los interruptores de los circuitos de la Figura 26 será como está indicado en la Tabla 2, pero no se considerara los estados de conmutación en los cuales el voltaje de salida sea igual a cero es decir en los pares de interruptores (S1, S3) y (S2, S4). En los estados de conmutación donde el voltaje de salida sea igual a $+V_{DC}$ ó $-V_{DC}$ se aplicará la Ley corriente y tensión de Kirchhoff para determinar las ecuaciones características del inversor.

Cuando los interruptores S1 y S2 se encuentran activados, como se muestra en la Figura 26 (a), al aplicar la Ley de Kirchhoff se obtienen las ecuaciones Ec. 24 y Ec. 25

$$L * \frac{di_L}{dt} = -V_o + V_{DC} \quad \text{Ec. 24}$$

$$C * \frac{dv_C}{dt} = i_L - \frac{v_C}{R} \quad \text{Ec. 25}$$

Cuando los interruptores S3 y S4 se encuentran activados, como se muestra la figura 789 (c), al aplicar la Ley de Kirchhoff se obtienen las ecuaciones Ec. 26 y Ec. 27

$$L * \frac{di_L}{dt} = -V_o - V_{DC} \quad \text{Ec. 26}$$

$$C * \frac{dv_C}{dt} = i_L - \frac{v_C}{R} \quad \text{Ec. 27}$$

➤ **Método de Conmutación de Inversores**

Se presentan dos métodos de conmutación para los interruptores que forman un inversores a fin de formar el voltaje de corriente alterna que pueden ser controlados en magnitud, frecuencia o ambas:

- **Método de conmutación por ondas cuadradas:** Este método controla la frecuencia de salida del inversor, y presentan una desventaja importante frente al otro método de conmutación, este no es capaz de regular la magnitud del voltaje de salida, y dependen directamente del voltaje de entrada de tipo continua.
- **Método de conmutación modulado por ancho de pulsos:** Este método controla la magnitud y frecuencia del voltaje de salida del inversor, de los diferentes métodos PWM, se desarrollará el método llamado PWM senoidal o SPWM.

➤ **Modulación senoidal por ancho de pulsos SPWM:**

La técnica de modulación por ancho de pulsos sinusoidales, genera la señal de control al comparar una señal senoidal con frecuencia deseada y una forma de onda triangular de alta frecuencia, como se observa en la Figura 27, la comparación entre estas dos señales generara un tren de pulsos de ancho específico que serán utilizadas en la conmutación de los interruptores que conforman un inversor. Esta técnica permite controlar la magnitud y la frecuencia de la señal de salida.

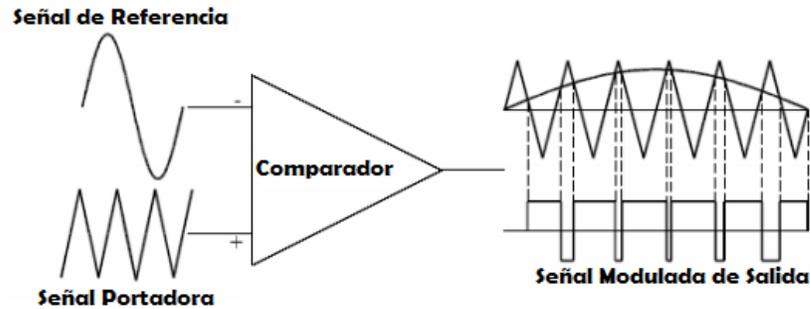


Figura 27. Modulación de ancho de pulsos sinusoidales SPWM

La forma de onda triangular v_{tri} está a una frecuencia de conmutación f_s (frecuencia portadora), lo que establece la frecuencia con que se conmuta los interruptores del inversor. La señal de control $v_{control}$ se usa para modular la relación de trabajo del interruptor y tiene una frecuencia f_1 (frecuencia moduladora) que es la frecuencia fundamental deseada a la salida de voltaje del inversor. (Mohan 2010)

Se considera que el voltaje de salida del inversor no será una onda senoidal perfecta y contendrá componentes de voltaje en frecuencias armónicas de f_1 . La relación entre la amplitud de la señal portadora \hat{v}_{tri} y la amplitud pico de la señal moduladora $\hat{v}_{control}$ se denomina índice de modulación m_a , se muestra en Ec. 28.

$$m_a = \frac{\hat{v}_{control}}{\hat{v}_{tri}} \quad \text{Ec. 28}$$

La relación entre la frecuencia portadora f_s y la frecuencia moduladora f_1 se llama índice de modulación de frecuencia m_f , se muestra en Ec. 29. Idealmente m_f debe ser mayor a 21 y la f_1 múltiplo de f_s . (Rasid 2004)

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad \text{Ec. 29}$$

m_f Determina la distorsión armónica de la señal de salida la cual es una medida de su contenido armónico.

➤ **SPWM con conmutación por voltaje bipolar**

SPWM con conmutación por voltaje bipolar se realiza mediante la conmutación sincronizada de los interruptores para que la salida cambie alternadamente entre mas y menos el valor de fuente de voltaje V_{DC} .

Para que la forma de onda varíe entre los voltajes $+V_{DC}$ y $-V_{DC}$, es necesario que los interruptores conmuten de forma cruzada, $S1$ con $S2$ y $S3$ con $S4$, la señal de mando se enviara a cada una de estas parejas para que realicen la conmutación.

La Figura 28, muestra el principio de modulación bipolar, en la que se realiza la comparación entre la señal de referencia senoidal $v_{control}$ y señal portadora triangular v_{tri} . Cuando el valor de la referencia senoidal es mayor que la portadora triangular, el voltaje de salida es positivo $+V_{DC}$, y cuando la señal de referencia es menor que la señal portadora el voltaje de salida es positivo $-V_{DC}$.

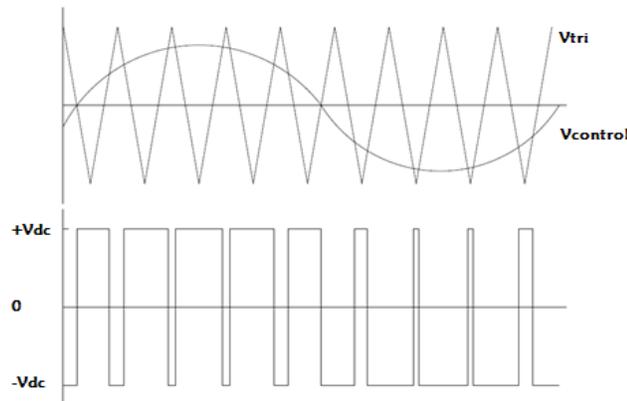


Figura 28. Conmutación Bipolar (a) Señal senoidal y triangular, (b) Salida $+V_{DC}$ y $-V_{DC}$

➤ **SPWM con conmutación por voltaje unipolar**

SPWM con conmutación por voltaje unipolar se realiza mediante la conmutación de los interruptores S_1, S_2, S_3, S_4 controlado como se indica en la tabla 1. Los interruptores no son conmutados simultáneamente y al utilizar una única señal de control, los pares de interruptores S_1, S_4 y S_2, S_3 se controlan de forma independiente para producir un voltaje de salida que cambia en relación a cero. Los interruptores de la Figura 29.

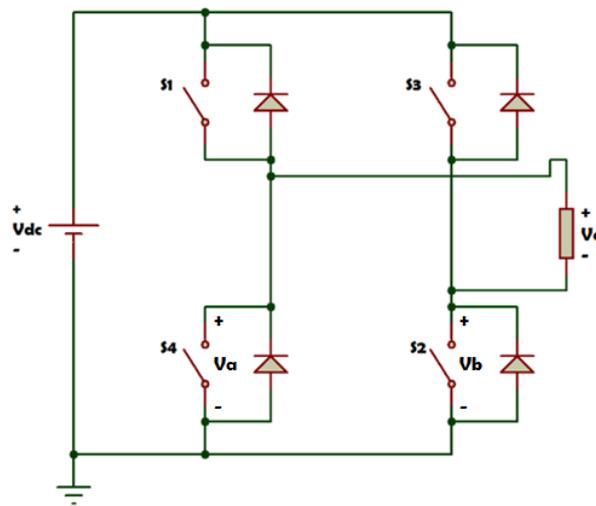


Figura 29. Convertidor Unipolar SPWM de puente completo.

Tabla 3

Secuencia de conmutación convertidor unipolar SPWM

No.	Interruptor	Estado	Respuesta
1	S1	ON	$v_{control} > v_{tri}$
2	S2	ON	$-v_{control} < v_{tri}$
3	S3	ON	$-v_{control} > v_{tri}$
4	S4	ON	$v_{control} < v_{tri}$

Los interruptores S_1, S_4 se controlan mediante la comparación una señal de referencia senoidal $v_{control}$ con una señal triangular v_{tri} , se observa en Figura 30. Mientras que los interruptores S_2, S_3 se controlan mediante la comparación

una señal de referencia senoidal $-v_{control}$ con una señal triangular v_{tri} , se observa en Figura 31 (a). La señal resultante del inversor se muestra en la Figura 31 (b).

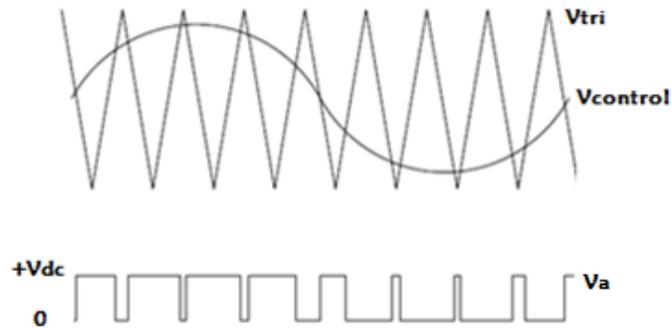


Figura 30. Señal de Voltaje V_a en conmutación Unipolar

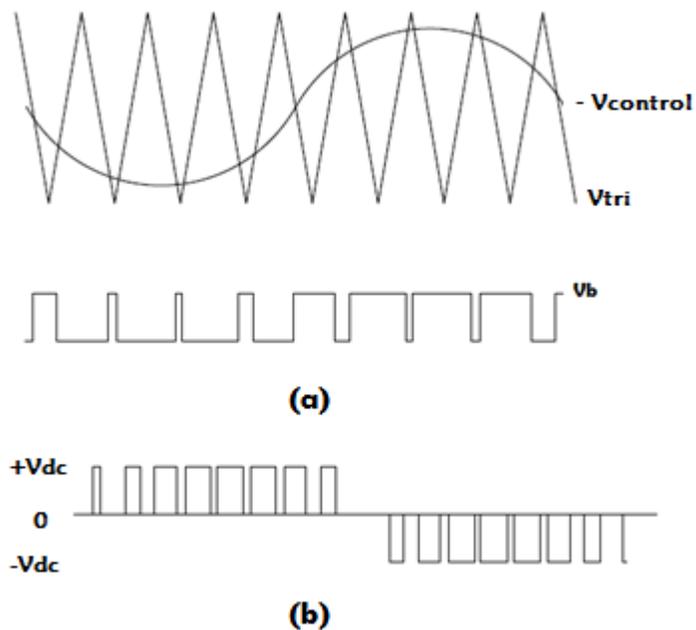


Figura 31. (a) Señal de Voltaje V_b en conmutación Unipolar, (b) Salida de Control SPWM

2.5.3.3 Filtro

Un filtro es un circuito electrónico caracterizado por poseer una entrada y una salida, de manera que en la salida se presente solamente ciertas frecuencias de

la señal de entrada, de esta manera un filtro ideal es aquel cuya fase varia linealmente en función de la frecuencia y su amplitud permanece constante dentro de un determinado rango de frecuencias, que constituyen sus bandas de paso, y eliminan completamente las frecuencias restantes, que constituyen sus bandas de rechazo. (Ulloa 2005)

Los términos de parámetros básicos asociados a los filtros son:

- **Frecuencia de Corte F_C** : Define el límite de la banda de paso, y corresponde a 3 dB de atenuación, los filtros pasa bajo solamente tienen un valor de F_C , expresada en la ecuación 87, donde L y C son los elementos pasivos que conforman el filtro.
- **Factor de Selectividad Q** : Q relaciona la energía que el circuito puede almacenar y la que pierde en un periodo.
- **Banda de paso**: Es el rango de frecuencias que el filtro permite pasar desde la entrada hasta la salida con una atenuación mayor a 3dB.

Según la respuesta en frecuencia, los filtros pueden clasificarse en filtros pasa bajos, pasa altos, pasa banda y elimina banda, en relación a esta clasificación se tienen los distintos tipos como: pasivos, activos, de capacidades conmutadas y digitales.

El filtro del interés para ser acoplado a la salida del inversor será de tipo pasivo pasa bajo. Este tipo de filtro presenta las distintas configuraciones como se muestra en la Figura 32.

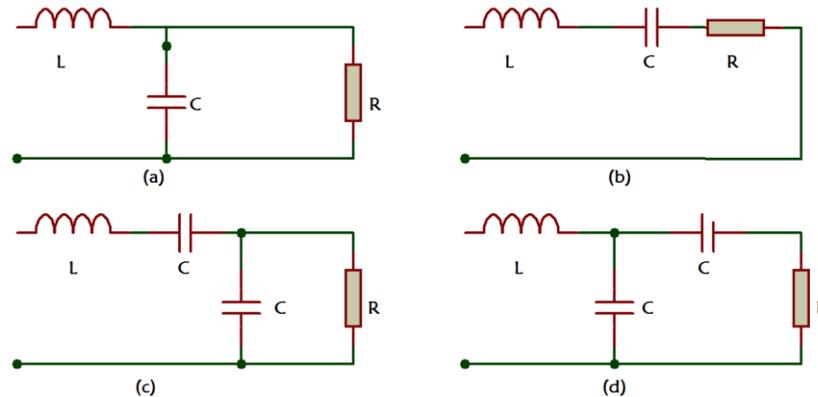


Figura 32. Tipos de Filtros: a) LC paralelo, b) LC serie, c) LC serie, d) LCC paralelo

2.5.3.4 Filtro pasivo pasa bajos LC

Un filtro pasa bajo ideal debe dejar pasar las frecuencias por debajo de F_C para la cual ha sido diseñada y eliminan todas las frecuencias mayores a F_C , la Figura 32 (a) muestra un filtro pasa bajo pasivo LC, este filtro elimina los armónicos de mayor orden de la señal resultante del proceso de modulación, el objetivo de L es suavizar el rizado de la intensidad en la salida mientras que C reducir las variaciones de tensión hacen que la tensión se establezca en valores constantes.

Se plantea el filtro en términos de impedancias, en base de los elementos se plantea la función de transferencia del filtro LC, expresada en la ecuación Ec. 30.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_C \cdot Z_R}{(Z_C \cdot Z_R) + Z_L} \quad \text{Ec. 30}$$

Donde el término $Z_C \cdot Z_R$ puede ser calculado mediante la ecuación Ec. 31

$$Z_C \cdot Z_R = \frac{\frac{1}{j\omega C} \cdot R}{\frac{1}{j\omega C} + R} \quad \text{Ec. 31}$$

$$Z_L = j\omega L \quad \text{Ec. 32}$$

Al reemplazar la ecuación Ec. 31 y Ec. 32 en Ec. 30, se plantea la función de transferencia mostrado en la ecuación Ec. 33.

$$H(s) = \frac{\omega_o^2}{s^2 + s\frac{\omega_o}{Q} + \omega_o} \quad \text{Ec. 33}$$

Donde ω_o es la frecuencia de resonancia expresada en la ecuación Ec. 34 y Q el factor de calidad expresada en la ecuación Ec. 35:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{Ec. 34}$$

$$Q = \frac{R}{\omega_o L} \quad \text{Ec. 35}$$

2.5.4 Sistemas de Almacenamiento de Energía

Los sistemas de almacenamiento de energía, comprenden las técnicas que han sido desarrolladas para conservar la energía en diferentes formas y disponer de la misma cuando sea necesario. El éxito de estos sistemas se debe a su tiempo de respuesta cuando las demandas de energía sean exigentes. (Bermúdez 2000)

Dentro de los sistemas de generación energética mediante medio de energías renovables como la eólica y fotovoltaica, un sistema almacenamiento eléctrico asegura el suministro eléctrico y minimiza las pérdidas de potencia dentro de una aplicación específica, estos sistemas deben cumplir características de eficiencia, minimizar el impacto ambiental, además deben ser económicos.

2.5.4.1 Mecanismos de almacenamiento de Energía

Algunos mecanismos desarrollados para el almacenamiento de energía proveniente de fuentes renovables son las siguientes (EOI 2011) :

- **Almacenamiento hidroeléctrico:** Este mecanismo de almacenamiento emplea el exceso de energía de turbinas aerogeneradores para bombear agua hacia embalses en montañas. Cuando exista falta de energía se libera el agua para reactivar los generadores hidroeléctricos. Este mecanismo tiene una eficiencia del 70 al 85%, dependen de la disponibilidad geográfica.
- **Almacenamiento de aire comprimido:** Este sistema consiste en comprimir aire y bombearlo a grandes cuevas subterráneas. Este aire al ser liberado activa turbinas que recupera la energía. Estos sistemas tienen una eficiencia del 80%. Se debe prever la pérdida de energía debido al calentamiento del gas al momento de ser comprimido.
- **Almacenamiento por baterías:** El almacenamiento en baterías, consiste en el uso del dispositivo llamado batería que es el conjunto de celdas electroquímicas que pueden convertir energía química en energía eléctrica, cada celda está constituida por un electrodo positivo y uno negativo, y una solución electrolítica que permite el flujo de electrones. Estos sistemas tienen un rendimiento del 85%,
- **Almacenamiento en ultra condensadores:** Este sistema de almacenamiento, es una técnica que se encuentra en desarrollo, en el que se considera el uso de tecnología a escala molecular para construir ultra condensadores, o el empleo de bobinas superconductoras para almacenamiento indefinido de corriente, este sistema de almacenamiento tiene costos elevados.

2.5.4.2 Criterios de elección del método de almacenamiento

Para la elección del método de almacenamiento existen dos grupos de factores a considerar: el primer grupo de tipo energético, y un segundo grupo de

tipo económico. En aplicaciones prácticas los criterios de tipo económico son los que en definitiva condicionan la elección del método (Bermúdez 2000).

➤ **Consideraciones Energéticas:** Dentro de los criterios energéticos, se debe tener en cuenta:

- Capacidad de almacenamiento, se determina en términos de tiempo, durante el cual el sistema está totalmente cargado y puede realizar la entrega de energía.
- Rendimiento de recuperación, relaciona la energía transformada en el medio de almacenamiento y la forma original.
- Vida útil del sistema, es expresada en números de ciclos.

➤ **Consideraciones Económicas:** Dentro de los criterios económicos, se debe tener en cuenta:

- El precio kW de los dispositivos almacenadores, tanto en el almacenamiento como en la recuperación.
- El precio por kW del propio dispositivo almacenamiento.

El criterio fundamental a la hora de poner en práctica un sistema de almacenamiento, es que suponga un ahorro económico, de esta manera es preciso encontrar una mediación entre el aspecto económico y energético.

De esta manera se considera el estudio de Almacenamiento por Baterías en este trabajo. Se presentan los conceptos relacionada para aplicaciones de generación fotovoltaica, debido a su uso generalizado en sistemas autónomos.

2.5.4.3 Batería

La batería es un medio de almacenamiento de energía química que puede liberarse como energía eléctrica. En aplicaciones de generación fotovoltaica las baterías almacenan energía durante períodos en los cuales la carga no requiera la energía del generador fotovoltaico; las baterías son el medio de generación eléctrica cuando el generador fotovoltaico no pueda abastecer la demanda de energía.

La batería cumple con dos funciones dentro de un sistema de generación fotovoltaica.

- Estabiliza la tensión del sistema, las variaciones mínimas de que producen los paneles debido a la radiación solar hace que las cargas no pueden ser conectadas directamente a la tensión.
- Las baterías suministran una potencia instantánea durante un tiempo limitado, por ejemplo para arrancar el motor de una refrigeradora. (Fernandez 2010)

➤ **Parámetros de la Batería**

Se definen los parámetros de la batería:

- **Tensión Nominal V_{NBat}** : Las baterías tienen un voltaje nominal que suele ser de 6, 12 o 24 voltios, la combinación de las baterías permite realizar conexiones en serie para aumentar su voltaje, o en paralelo para aumentar la corriente total. La unidad de medida es el voltio.
- **Capacidad Nominal C_{NBat}** : Es la cantidad máxima de energía que puede ser extraída de la batería, se expresa en unidades de Amperio-hora (Ah) o Vatios-hora (Wh). La capacidad para aplicaciones fotovoltaicas viene definida para varios valores de

tiempo de 100 horas o más. La medida Ah muestra cuanto tiempo una batería puede entregar determinada cantidad de corriente, teóricamente si se tiene 100 Ah, significa que una batería entregara 1 amperio por 100 horas o 100 amperios por una hora (Boxwell 2012).

- **Profundidad Máxima de Descarga PD_{max} :** Es el porcentaje de la energía extraída de una batería plenamente cargada en una descarga. Los equipos reguladores limitan la profundidad de descarga y se calibran para permitir descargas superficiales que aceptan descargas del 20% de la capacidad nominal o descargas profundas que acepta descargas del 80% de la capacidad nominal (Pareja 2010), pasar el límite de descarga afecta considerablemente la vida útil de la batería. Para aplicaciones fotovoltaicas se utilizan baterías de descarga profunda.
- **Capacidad Disponible C_{UBat} :** Es la capacidad de la cual realmente se puede disponer de la batería, es igual al producto de la capacidad nominal por la profundidad máxima de descarga expresado en tanto por uno.
- **Eficiencia de Carga:** Es la relación entre la energía que se emplea para cargar la batería y la energía realmente almacenada, en la actualidad la eficiencia de carga de las baterías esta entre 55% y el 80%. (Perez 2007)
- **Sobrecarga:** Cuando la batería llega a su capacidad máxima de carga se presenta sobrecarga, al inyectar energía a la batería en este punto, presenta cambios en las propiedades químicas, produciéndose el fenómeno de gasificación a gaseoso.
- **Vida útil:** La vida útil de una batería se mide en ciclos, se define como el número de veces de carga y descarga (1 ciclo). Las

baterías para sistemas fotovoltaicos deben admitir descargar superficiales diarias y descargas profundas programadas, mientras menos veces se realicen descargas profundas y menor sea la profundidad de descarga más vida útil tendrá la batería. (Perez 2007)

La capacidad de una batería se reduce a medida que sufre ciclos de carga y descarga, cuanto más profunda es la descarga, menos ciclos soporta la batería. En la Figura 33, se muestra la relación existente entre la capacidad y el número de ciclos de una batería. La batería tiene una descarga del 100% cuando a tenido 500 ciclos, si la descarga es del 10% la batería ha sufrido cerca de 3000 ciclos, cerca de los 2800 ciclos ya solo se puede cargar el 80% y a partir de 2900 ciclos, solo el 60%. (Valentín 2012)

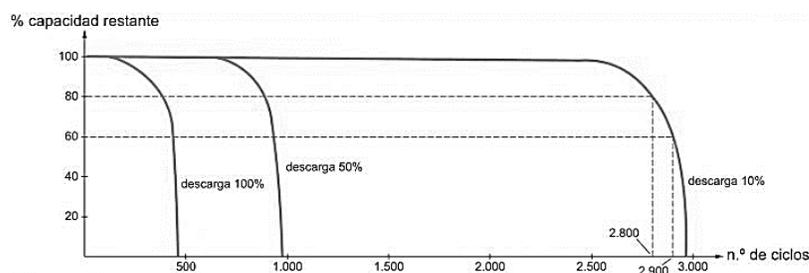


Figura 33. Relación entre la Capacidad y Número de Ciclos

Fuente: (Valentín 2012)

➤ **Curva de carga de una Batería**

En las baterías se llevan a cabo 4 procesos de carga, como se muestra en la Figura 34.

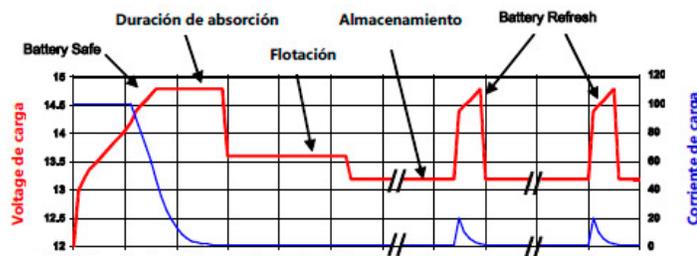


Figura 34. Etapas de Carga de una Batería

Fuente: (Victron 2015)

- **Carga Inicial:** Cuando la batería se encuentra en los límites de descarga profunda, la batería es cargada con toda la corriente proveniente de los módulos, hasta que esta alcance el 80% del valor de carga. (Style 2012)
- **Carga de absorción:** Después de la carga inicial del 80%, el controlador de carga disminuye el valor de la corriente proveniente de los módulos, hasta que las baterías alcancen la carga del 100%.
- **Carga de Flotación:** Una vez que la batería alcanza el 100% de su carga, el controlador de carga deja pasar un valor de corriente pequeña para mantener la batería cargada.
- **Carga de Ecuilibración:** Esta función está disponible en algunos tipos de reguladores para baterías de plomo ácido inundadas de electrolito líquido. El proceso consiste en emparejar la tensión entre las distintas celdas de la batería, además, de someter a la batería a una sobrecarga controlada para evitar la estratificación del ácido y la sulfatación dentro de la batería.

➤ Tipos de Baterías

Existen diferentes tipos de baterías de las cuales se puede escoger la que mejor se adapte a las condiciones del sistema de generación fotovoltaica, cada una de estas tienen un tiempo aproximado de vida entre 2 a 5 años (Style 2012).

- **Baterías de Níquel – Cadmio:** Pueden soportar descargas muy profundas hasta un 90% de su capacidad teórica y soportar temperaturas muy bajas. La vida útil es superior en comparación de baterías de plomo-acido, este tipo de baterías son usadas en aplicaciones específicas debido a su costo.
- **Baterías de Plomo – Acido:** Las baterías más adecuadas para sistemas fotovoltaicos son las de plomo-acido (Armenta 1998), las cuales se encuentran de tres tipos: (Pareja 2010)
 - **Estacionaria Monobloc:** Está formado de un solo bloque, no necesita asociarse con otras baterías del mismo tipo para conseguir 12 voltios. Se utilizan en instalaciones donde la potencia no es muy elevada.
 - **Estacionarias Translucidas:** Son baterías que se encuentran separadas en células, su empaque es transparente por lo que se puede ver el interior. Su tensión está en el orden de 2.2 V, es necesario la conexión en serie de 6 baterías para obtener 12 v.
 - **Estacionarias Herméticas:** Este tipo de batería no requiere mantenimiento de recarga de líquido gelatinoso. En este tipo de baterías se añaden aditivos al electrolito, lo que reduce la tendencia a la corrosión y evita la formación de gases.

2.6 TOPOLOGÍA DE SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO

Las topologías en los sistemas de generación fotovoltaicas dependen del número de elementos que contienen, un sistema cumple con la generación eléctrica a partir de una matriz de paneles solares, sistemas de potencia conversión – inversión y sistema de almacenamiento, estos elementos estarán

dimensionados en función de la carga, la misma que consumirá una potencia fija o variable.

Las topologías estudiadas son sistemas fotovoltaicos aislados, sistemas fotovoltaicos con conexión a la red y sistemas fotovoltaicos híbridos.

2.6.1 Sistemas Aislados

Los sistemas aislados tienen como objetivo satisfacer la demanda de consumo energético de forma parcial o total en locaciones geográficas de difícil acceso o donde no existe red de distribución eléctrica.

El sistema autónomo no tiene conexión a la red de suministro eléctrico local, generalmente está conformado por módulos fotovoltaicos, convertidor , inversor, banco de baterías (Hankins 2010). Mediante el análisis de la carga se realizara el dimensionamiento de la batería para el abastecimiento de energía durante la noche o durante periodos de baja radiación solar.

La fácil movilidad es una característica de los sistemas autónomos, permite el abastecimiento de energía en el lugar que se requiera. La producción energética de esos sistemas es relativamente pequeño, no sobrepasa los pocos kilovatios (Moro 2010).

El tema de investigación se centra en el uso de un sistema de generación fotovoltaico aislado con y sin sistema de almacenamiento de batería, se presentan estas dos topologías, Figura 35, los sistemas se diferencian por la presencia o ausencia de un sistema de almacenamiento.

2.6.2 Sistemas conectados a la Red

Un sistema de generación fotovoltaica conectado a la red, se muestra en la Figura 36, está conformado por un sistema de módulos fotovoltaicos, inversor, contador de energía, transformador, que se encuentran conectados a la línea de distribución de energía eléctrica, la energía que producen está en el rango desde

50 KW hasta sistemas de 60 MW, sistemas de estas características se encuentran instalados en Europa (Stapleton 2012).

El sistema puede ser diseñado para suministrar energía eléctrica a una carga o cargas instaladas en una vivienda, además proveer de energía a la red de suministro eléctrico local. Cuando por situaciones climatológicas u otras causas la producción de energía no pueda abastecer las necesidades energéticas de la vivienda, la red de suministro eléctricas local actuara como abastecedora de la energía faltante, caso contrario cuando la vivienda tenga excedente de energía, el sistema inyectara energía a la red de suministro local.

2.6.3 Sistemas Híbridos

En este tipo de sistemas existe una potencia de respaldo en forma de un grupo generador, que puede ser de tipo Diésel, este sistema se activa al momento de detectar el agotamiento de las baterías. Estos sistemas usan distintas formas de energía renovable combinada, en general la solar con la eólica Figura 37 (Enríquez 2009).

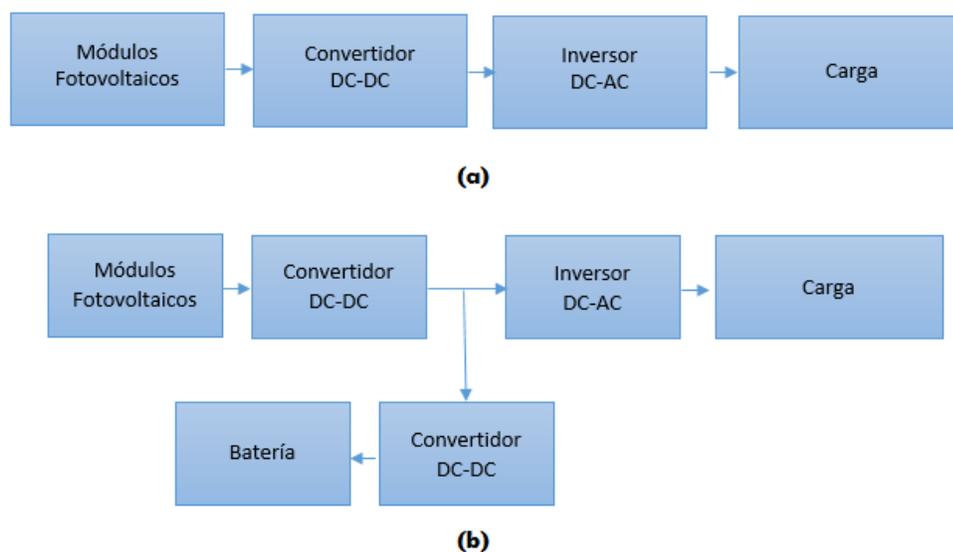


Figura 35. Topología de sistema generación fotovoltaica aislado, (a) sistema aislado sin almacenamiento, (b) sistema aislado con almacenamiento

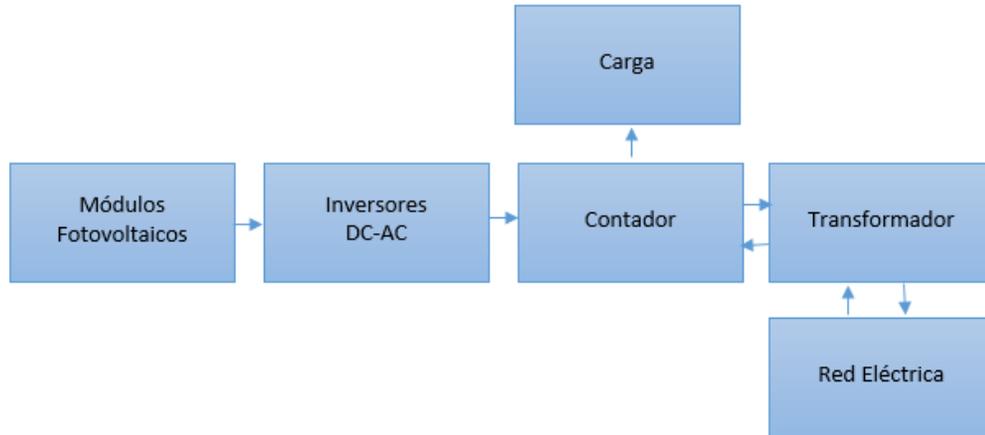


Figura 36. Topología de sistemas conectados a la red

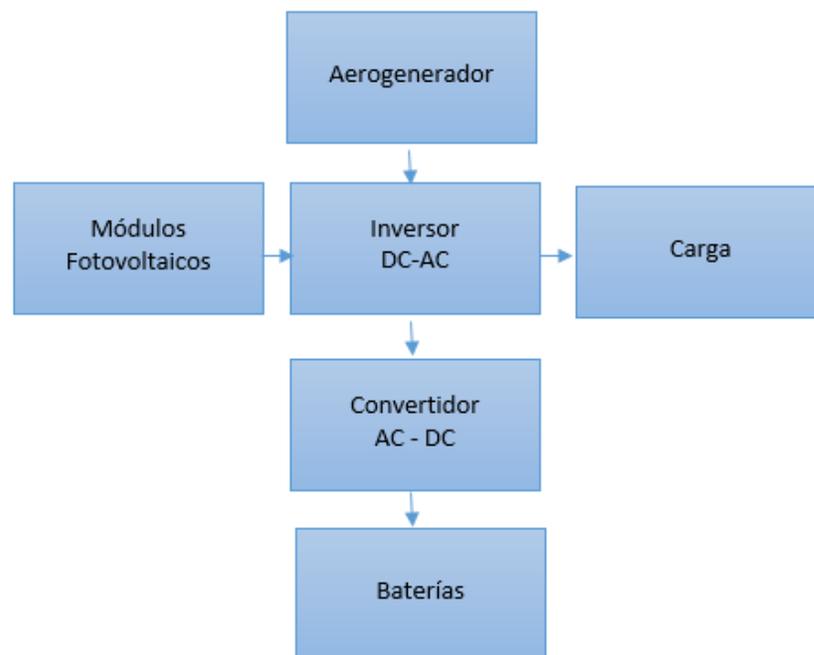


Figura 37. Topología de sistemas Híbridos

2.7 COCINAS

La cocina es el electrodoméstico ya sea eléctrico o de gas, utilizado para la cocción de alimentos. Está constituido, en general, por una serie de hornillas

eléctricos focos de cocción o de quemadores de gas, o por una combinación de ambos, puede o no contener un horno que puede también ser eléctrico o de gas.

A continuación se presentan los diferentes tipos de cocinas:

- **Cocinas a G.L.P:** Es uno de los tipos de cocina moderna populares en los hogares, su funcionamiento es a base de gas licuado de petróleo. Están constituidos por, los fogones que tienen un inyector, los fogones suelen ser de forma redonda y tamaños variados. En este tipo de cocinas los alimentos son cocinados sobre hornillas que están en contacto directo sobre los utensilios en los cuales se cocinara los alimentos.
- **Cocinas Eléctricas:** Este tipo de cocina funciona a base de electricidad, en este tipo de cocina los alimentos se cocinan sobre placas metálicas de hierro fundido que en su interior llevan una resistencia de diferente tamaño y potencia. Una de las principales desventaja que presenta este tipo de cocina, es debido a las placas de las cocinas tardan en calentarse y enfriarse, presenta alto riesgo de quemaduras al no disponer de indicadores de temperatura.
- **Cocinas de Inducción Magnética:** Una cocina de inducción es un tipo de cocina vitrocerámica que calienta directamente el recipiente mediante un campo electromagnético. Estas cocinas utilizan un campo magnético alternante que magnetiza el material ferromagnético del recipiente en un sentido y en otro. Este proceso tiene menos pérdidas de energía, el material se agita magnéticamente, la energía absorbida se desprende en forma de calor, calentando el recipiente. Los recipientes deben contener un material ferromagnética al menos en la base, por lo que los de aluminio, terracota, cerámica, vidrio o cobre no son utilizables con este tipo de cocinas.

2.8 Factores de calidad de potencia

La calidad de energía eléctrica, comprende dos subdivisiones como se muestra en la Figura 38. La calidad de energía eléctrica consiste en las características físicas de la energía suministrada en condiciones normales de operación mediante la variación de la tensión, corriente, y frecuencia dentro del sistema, estas variaciones son ocasionadas por perturbaciones en el sistema eléctrico, que por medio de normas dictadas por un establecimiento regulador pretenden establecer rangos tolerables de operación.

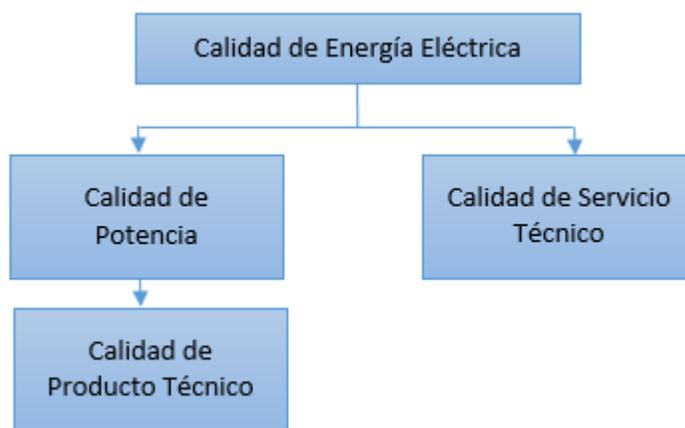


Figura 38. Calidad de Energía Eléctrica

La calidad de producto técnico es conjunto de propiedades básicas relacionadas a la prestación de servicio eléctrico que tienden a maximizar su confiabilidad de interrupciones del servicio de electricidad, en base a índices de frecuencia y duración.

La calidad de potencia eléctrica estudia relacionados a la potencia que se manifiestan en la perturbación que desvían de sus valores ideales a la tensión, corriente y frecuencia, los mismos que ocasionan fallas, interrupción de servicio, mala operación de equipos del usuario, etc.

2.8.1 Perturbaciones en el Sistema Eléctrico

Una perturbación consiste en cualquier variación de los parámetros del sistema de energía eléctrica como, por ejemplo, la variación de la demanda eléctrica o las modificaciones en la topología de la red debido a maniobras o cortocircuitos. (Ramírez 2007)

2.8.1.1 Tipo de Perturbaciones en el sistema Eléctrico

Los tipos de perturbaciones dependen de la magnitud y su tiempo de duración, la combinación de estos determinara la manera en que las cargas son afectadas, se presentan los siguientes tipos de perturbaciones en el sistema eléctrico:

- **Interrupción de Servicio (Blackout):** Es la pérdida completa de la tensión en una o más fases en un tiempo determinado. Las pérdidas completa de energía pueden estar asociadas a fallas en las líneas del sistema, fallas de equipos. El efecto de un Blackout es el apagado completo de equipos.
- **Caídas de Tensión (SAG):** Son variaciones de tensión entre un 10% y 90% de su nivel de operación, que son causadas por condiciones de falla, energización de cargas que requieren altas corrientes de arranque, su duración es igual o menor a un minuto, el efecto más común asociado a los SAG es la parada de equipos.
- **Baja Tensión Permanente (Brownouts):** Es una disminución del nivel de voltaje por debajo del 90% del valor nominal, durante más de un minuto, el funcionamiento de equipos se ve afectado dependiendo del equipo.
- **Sobre Tensión (Swells):** Son incrementos en más del 10% de la tensión rms a la frecuencia del sistema por tiempos desde 0.5 ciclos hasta 1 minuto. Los Swells se presentan en sistemas sin puesta a tierra, donde el cambio súbito en la referencia de la tierra resulta en un incremento de la tensión en las fases sin contacto a tierra. Los daños producidos por los

Swells son más destructivos en comparación de un SAG, la sobre tensión puede destruir o dañar componentes de equipos.

- **Sobretensiones transitorias:** Son perturbaciones de corta duración, en forma sinusoidal de la tensión, que se evidencia por una corta discontinuidad de la forma de onda.
- **Muecas (Notch):** Las muecas son perturbaciones de polaridad opuesta a la forma de onda normal, de duración menores a medio ciclo, este fenómeno es causado frecuentemente por conmutadores electrónicos, no causa problemas mayores, puede causar que equipos, especialmente electrónicos, operen incorrectamente.
- **Armónico:** Los armónicos son una distorsión o deformación recurrente de la forma de onda. Puede ser causada por varios dispositivos sobre todo electrónicos, la distorsión de la forma de onda puede ser también un problema con fuentes de potencia ininterrumpida o UPS, y otros acondicionadores de energía eléctrica basados en inversores. La presencia de distorsión armónica incluyen sobrecalentamiento, y problema operacionales con los equipos alimentados.

CAPITULO 3

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA

En este capítulo se realizará el diseño y simulación de los sistemas de generación eléctrica solar fotovoltaica con y sin sistema de almacenamiento, los sistemas tendrán la capacidad de entregar energía de corriente alterna con características de frecuencia, voltaje y potencia, que abastecerán la demanda para el funcionamiento de la cocina de inducción magnética propuesta. El diseño de los componentes que conformarán cada uno de los dos sistemas se desarrollará a detalle.

3.1 Hipótesis de Partida

Para el diseño y simulación de los dos sistemas se planteará una serie de hipótesis iniciales como base para el cálculo de los sistemas mencionados.

Se considerará lo siguiente:

- La cocina de inducción tendrá una potencia máxima de 1300 watts, alimentada con un voltaje de 120 V y frecuencia de 60 Hz.
- El uso diario de la cocina se limitará a 2 horas 45 minutos al día.
- La ubicación geográfica para la cual se realizará el análisis es para Quito-Ecuador.
- En el diseño del sistema fotovoltaico con y sin sistema de almacenamiento se usará el mismo modelo comercial de modulo fotovoltaico y batería.

- En el sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, se estimará un tiempo de autonomía de 1 día.
- Al considerar que el inversor DC-AC es el dispositivo que transforma energía directa en alterna además de dar las propiedades de magnitud y frecuencia que necesita la carga se realizará un solo diseño que servirá para el sistema fotovoltaico con y sin sistema de almacenamiento.

3.1.1 Análisis de la carga

La cocina de inducción es considerada una carga cíclica debido a la conexión y desconexión que realiza en determinadas horas del día. Mediante el análisis de la carga que será conectada a cada uno de los sistemas se determinará la demanda de energía que tendrán que abastecer estos sistemas en estudio.

Tabla 4
Consumo de Energía Cocina de Inducción

No.	Equipo	Cantidad	Potencia (W)	Subtotal Potencia (W)	Horas-día de uso	Energía (Wh)
1	Cocina de Inducción	1	1300	1300	2.7692	3600
2				Total	Wh/día	3600

De acuerdo a la Tabla 4, la cocina de inducción necesita 3600 Wh durante 2 horas 45 minutos de uso al día, se incluye un aumento del 10% de energía como margen de seguridad, se obtiene una energía total como se muestra en la ecuación Ec. 36:

$$D_{total} = \frac{(3600 * 0.1) + 3600}{1000} = 3.96 \frac{KWh}{dia} \quad \text{Ec. 36}$$

La ecuación Ec. 36, expresada en Ah (amperios-hora), se muestra en la ecuación Ec. 37:

$$Demanda_{Ah} = \frac{D_{total}}{Voltaje_{AC}} = \frac{3960 Wh}{120 V} = 33 Ah \quad \text{Ec. 37}$$

El valor de la demanda expresada en Ah servirá para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento y generador fotovoltaico.

3.1.2 Radiación solar

La radiación solar disponible para la ciudad de Quito expresada en KWh/m²/día es mostrada en la Tabla 5, los datos expuestos fueron obtenidos por estudios realizados por el CONECEL y publicados en el “Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica” (Izquierdo 2008a)

El valor que se debe considerar de radiación solar incidente sobre Quito, es el que presente la peor condición de radiación durante el año, de acuerdo a la Tabla 5, se presentan en los meses de Abril, Mayo y Junio con un valor de 4800 Wh/m²/día, de acuerdo a esta condición se realizará los diseños posteriores.

3.2 Sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

El sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, está formado por los dispositivos, tales como, arreglo de módulos fotovoltaicos, convertidor elevador DC-DC, inversor DC-AC y Filtro, en la Figura 39 se observa el diagrama de bloque se desarrollará.

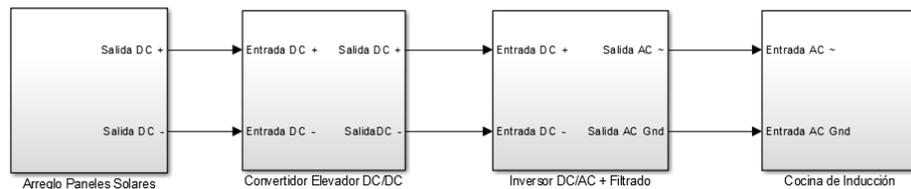


Figura 39 Diagrama de bloques sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

Como se muestra en la Figura 39, el arreglo de módulos fotovoltaicos entregarán la potencia que demanda la carga a todo el sistema, el convertidor elevador DC-DC elevará el voltaje entregado por el arreglo de los módulos y su salida será la entrada al inversor, el inversor más una etapa de filtrado definirá las características de amplitud y frecuencia que necesita la carga.

La particularidad del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, establece que el exceso de energía no será almacenada, de manera que la carga solamente será útil cuando existan las condiciones para que los módulos fotovoltaicos entreguen la energía requerida.

Para realizar las simulaciones de los diferentes componentes del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento se utilizará el software MATLAB-SIMULINK, el sistema en detalle se muestra en el Anexo 1.

3.2.1 Diseño del Arreglo de Módulos Fotovoltaicos

Para el diseño del primer bloque del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, se usará un módulo fotovoltaico como referencia para obtener las curvas características del mismo y analizar el número de módulos necesarios para diseñar el sistema.

Se usará el módulo fotovoltaico de la marca ISOFOTON modelo I 165, cuyas características eléctricas se presentan en la Tabla 6, la hoja técnica del modelo I 165 es mostrada en el ANEXO 4.

De acuerdo a las características de la Tabla 6, un solo modulo tiene la capacidad de entregar una potencia de 165 W bajo condiciones estándar, como se muestra en la ecuación Ec. 38, por lo que es necesario realizar un arreglo de módulos en serie y paralelo para conseguir la potencia que se transmitirá a través de todos los bloques de la Figura 39.

Tabla 5
Radiación solar en la ciudad de Quito

No.	MES	Radiación Global Wh/m ² /día
1	Enero	4950
2	Febrero	4950
3	Marzo	4950
4	Abril	4800
5	Mayo	4800
6	Junio	4800
7	Julio	5100
8	Agosto	5400
9	Septiembre	5400
10	Octubre	5100
11	Noviembre	5250
12	Diciembre	5100

Fuente: (Izquierdo 2008b)

Tabla 6
Características eléctricas modulo fotovoltaico Isofoton I165

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

$$P_{mpp} = I_{mpp} \times V_{mpp} = 165 \text{ W} \quad \text{Ec. 38}$$

En la Figura 40 se muestra las curvas Voltaje-Intensidad y Potencia-Voltaje del modelo I 165 con variación de Irradiación, en la Figura 40 (a) la corriente varía proporcionalmente ante la variación de la irradiación, mientras que el voltaje sufre pequeñas variaciones, en la Figura 40 (b) el cambio del valor de potencia entregado por el módulo varía de igual manera proporcionalmente ante la variación de la irradiación, el voltaje sufre pequeñas variaciones; entonces se puede decir que la variación de irradiación afecta directamente a la corriente que entrega el módulo.

En la Figura 41 se muestra las curvas Voltaje-Intensidad y Potencia-Voltaje del modelo I 165 con variación de Temperatura, en la Figura 41 (a) el voltaje varía en proporción a la variación de la temperatura, mientras que la corriente se mantiene constante, en la Figura 41 (b) el cambio del valor de potencia entregado por el módulo varía de igual manera ante la variación de la temperatura, entonces se puede decir que la variación de temperatura afecta directamente al voltaje que entrega el módulo.

De acuerdo a lo mencionado, para la configuración de los módulos se debe considerar el factor irradiación y temperatura, se realizará un arreglo de módulos en serie y en paralelo para poder aumentar voltaje o corriente, una configuración en serie de módulos elevará la tensión y una configuración en paralelo elevará la corriente.

Se puede obtener el número total de paneles al considerar el factor de irradiación mediante la ecuación Ec. 39:

$$N_{paneles} = \frac{D_{total}}{P_{mpp} \times HSP \times F_g} = \frac{3960}{165 \times 4.8 \times 0.9} = 5.17 \approx 6 \text{ paneles} \quad \text{Ec. 39}$$

Donde P_{mpp} es la potencia máxima del panel, HSP es el factor de horas solares para el peor mes de acuerdo a la Tabla 5 y F_g es el factor de rendimiento del sistema.

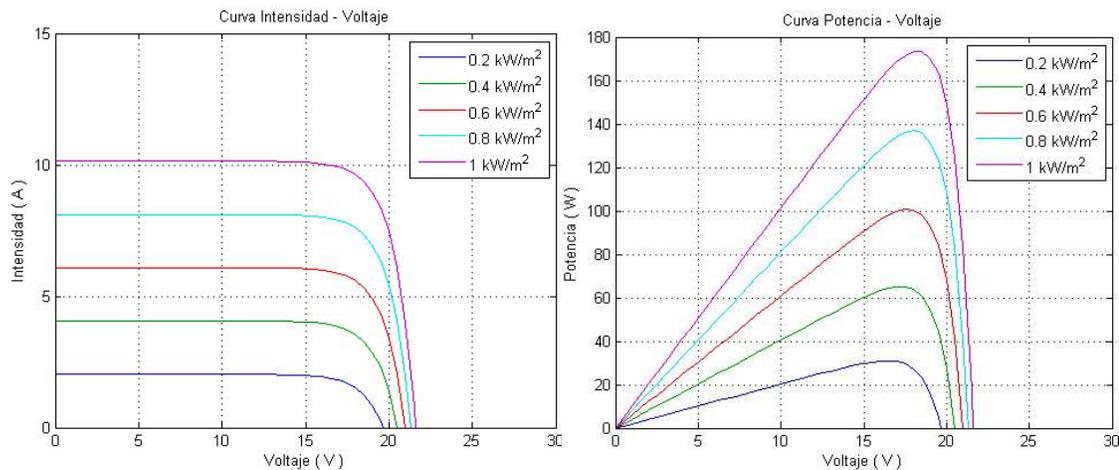


Figura 40. Curvas características con variación de Irradiación.

(a) Curva Intensidad-Voltaje (b) Curva Potencia-Voltaje

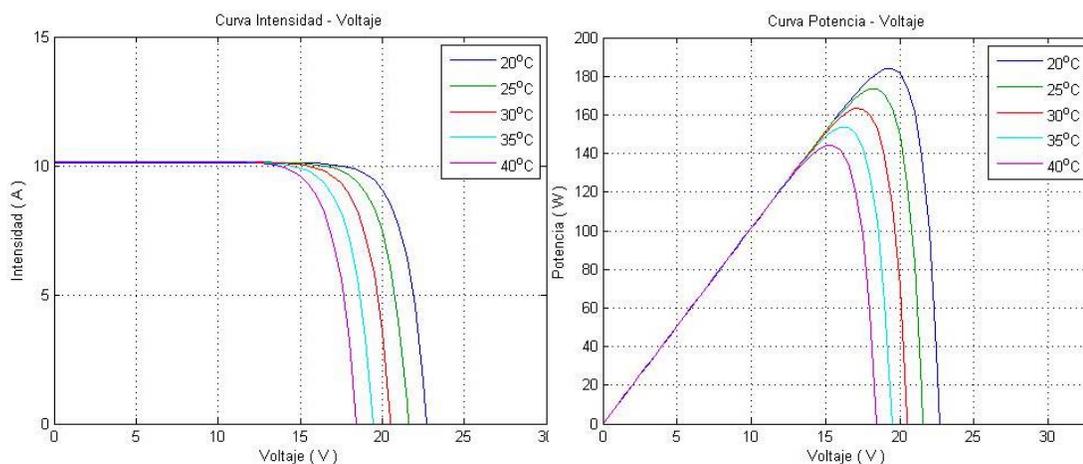


Figura 41. Curvas características con variación de Temperatura. (a) Curva Intensidad-Voltaje (b) Curva Potencia-Voltaje

La potencia total que entrega el arreglo de módulos es 990 W, producen una energía de 4.752 Kwh/m²/día que en comparación a la energía que requiere la carga sería suficiente, pero debido a las características de este sistema que no contiene almacenamiento, la potencia total será entregada por el arreglo de

módulos, en consecuencia se debe rediseñar el arreglo de módulos para que cubran en su totalidad la potencia y consecuentemente la energía será superior.

La configuración del arreglo consta de tres módulos conectados en paralelo, con un valor mostrado en la ecuación Ec. 40, con tres módulos conectados en serie, mostrado en la ecuación Ec. 41, cada uno, con un total de 9 módulos fotovoltaicos que entregan una potencia de 1485 W con una energía de 7.128 Kwh/m2/día, expresada en la ecuación Ec. 42

$$V_{pv} = 3 * 17.4 = 52.2 \approx 52 V \quad \text{Ec. 40}$$

$$I_{pv} = 3 * 9.48 = 28.44 \approx 28 A \quad \text{Ec. 41}$$

$$P_{total} = 52.2 V * 28.44A = 1484.56 \approx 1485 W \quad \text{Ec. 42}$$

En la Figura 42, se observa las características de voltaje y corriente del arreglo de los módulos bajo condiciones estándar. La potencia total entregada por el arreglo fotovoltaico como se observa en la Figura 42 (a), es mayor a la requerida por la carga, esta diferencia asegurará que la carga reciba la potencia necesaria después del consumo de corriente por parte de los convertidores de potencia, y asegura su correcto funcionamiento.

3.2.2 Convertidor elevador DC – DC [52 Vdc - 200 Vdc]

Para el diseño del convertidor de potencia DC-DC se usará la topología mostrada en la Figura 15 correspondiente a un convertidor elevador, además se realizarán las siguientes consideraciones:

- La tensión de entrada del convertidor (V_i) será la tensión entregada por el arreglo de módulos fotovoltaicos (V_{pv}), con un valor de 52 V, como se muestra en la ecuación Ec. 40.

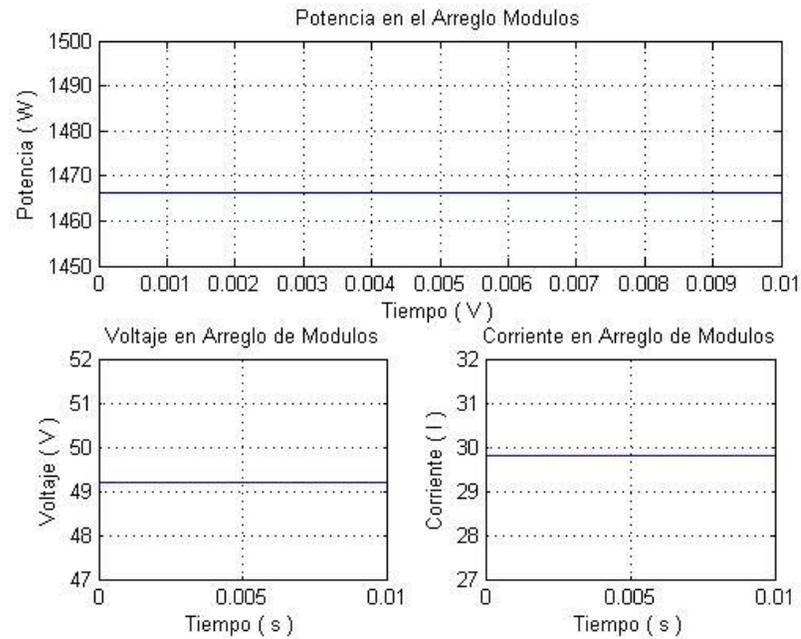


Figura 42. Características eléctricas del arreglo de módulos.

(a) Voltaje (b) Corriente(c) Potencia

- El máximo rizado de corriente pico-pico (Δi_L) permitido en el inductor, será el 10% de la corriente proveniente del arreglo de módulos fotovoltaicos, como se muestra en la ecuación Ec. 43.

$$\Delta i_L < 10\% I_{pv} = 2.8A \quad \text{Ec. 43}$$

- La tensión de salida del convertidor (V_o) alimentará la entrada del inversor. El inversor entregará a su salida una tensión de 120 Vrms necesario para el funcionamiento de la carga, por lo tanto, la tensión de salida del convertidor se encontrará mediante la ecuación Ec. 44, que expresa la relación entre el voltaje pico V_p y voltaje RMS V_{rms} , al considerar el aumento de voltaje con un factor del 20% debido a la caída de voltaje que se produce en el filtro y en la etapa de inversión.

$$V_p = \frac{V_{RMS}}{0.707} = 169.7 V + 20 \% \approx 200 V \quad \text{Ec. 44}$$

- El máximo rizado de tensión pico-pico (ΔV_o) permitido en el capacitor, será el 1% de la tensión de salida, expresada en la ecuación Ec. 45.

$$\Delta V_o < 1\% V_o = 1.7 V \quad \text{Ec. 45}$$

- El ciclo de trabajo se obtiene mediante la ecuación fundamental del convertidor expresada en la Ec. 19, el ciclo de trabajo se muestra en la ecuación Ec. 46.

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} = 0.74 \quad \text{Ec. 46}$$

- La frecuencia de conmutación del interruptor se muestra en la ecuación Ec. 47.

$$f = 20 \text{ KHz} \quad \text{Ec. 47}$$

Dimensionamiento del Inductor

Para determinar el valor de la inductancia se usará la ecuación característica del inductor, como se muestra en la ecuación Ec. 48.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{Ec. 48}$$

La ecuación Ec. 48, puede ser escrita en función de valores promedios, mostrado en ecuación Ec. 49.

$$V_L = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \quad \text{Ec. 49}$$

Donde Δt es el intervalo de tiempo cuando el interruptor se encuentra en estado On, como se observa en la Figura 18, en donde Δt con relación a la corriente en el inductor se obtiene la ecuación Ec. 51, Δi_L es el rizado de la corriente en el inductor.

$$\Delta t = DT \quad \text{Ec. 50}$$

$$\Delta t = \frac{D}{f} \quad \text{Ec. 51}$$

Como se mencionó en las consideraciones de diseño la igualdad de voltajes se expresa mediante la ecuación Ec. 52, cuando el interruptor está en estado On.

$$V_L = V_i = V_{pv} \quad \text{Ec. 52}$$

Al reemplazar la ecuación fundamental del convertidor expresada en la ecuación Ec. 19 en la ecuación Ec. 49, se obtiene la ecuación Ec. 54 que corresponde al valor del inductor.

$$(1 - D)V_o = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \quad \text{Ec. 53}$$

$$L = \frac{D (1 - D) V_o}{\Delta i_L f} \quad \text{Ec. 54}$$

De la ecuación Ec. 54, Δi_L es el rizado pico-pico de la corriente en el inductor, como se muestra en la ecuación Ec. 43, al reemplazar este valor en la ecuación Ec. 54 se obtiene el valor del inductor. Se añade un margen de seguridad del 25% y se encuentra el valor de L:

$$L = 829 \mu H \quad \text{Ec. 55}$$

Se realiza la simulación del convertidor elevador con el valor de L de la ecuación Ec. 55. El rizado pico-pico del inductor L se muestra en la Figura 43, donde Δi_L tiene un valor de 2.12 A, que representa el 7.6% del valor de I_{pv} , se cumple con el requerimiento de diseño $\Delta i_L < 10\% I_{pv}$.

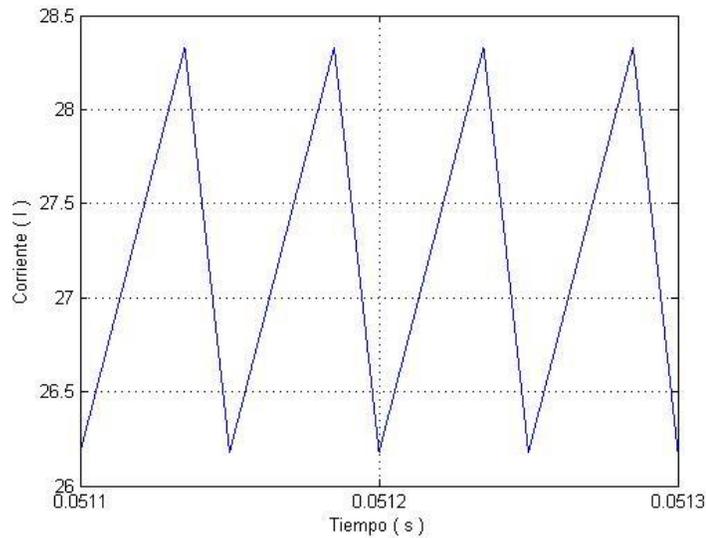


Figura 43. Rizado en el inductor del convertidor elevador DC-DC

Dimensionamiento del Capacitor

Para determinar el valor del capacitor se usará la ecuación de corriente a través del mismo, como se muestra en la ecuación Ec. 56.

$$i_c = C * \frac{dv_o}{dt} \quad \text{Ec. 56}$$

La ecuación Ec. 56, puede ser escrita en función de valores promedios, mostrado en ecuación Ec. 57.

$$i_c = \frac{L \cdot \Delta V_o}{\Delta t} \quad \text{Ec. 57}$$

Donde ΔV_o es el rizado pico-pico de la tensión de salida, Δt es el intervalo de tiempo cuando el interruptor se encuentra en estado On, como se observa en la Figura 18, con relación a la corriente en el capacitor se obtiene la ecuación Ec. 58, al reemplazar la ecuación Ec. 46 en ecuación Ec. 57 se obtiene:

$$i_c \cdot DT = C \cdot \Delta V_o \quad \text{Ec. 58}$$

ΔV_o Se calcula a partir de la forma de onda de la corriente en el condensador, como se muestra en la Figura 18. La variación de carga del condensador puede calcularse al utilizar:

$$|\Delta Q| = \frac{V_o}{R} \cdot DT \quad \text{Ec. 59}$$

ΔV_o se obtiene, la ecuación Ec. 60:

$$\Delta V_o = \frac{V_o \cdot DT}{R \cdot C} = \frac{V_o \cdot D}{R \cdot C \cdot f} \quad \text{Ec. 60}$$

De la ecuación Ec. 60, R puede ser escrita en función de la ley de Ohm, y al despejar C se obtiene la ecuación para el cálculo del capacitor:

$$C = \frac{I_o \cdot D}{\Delta V_o \cdot f} \quad \text{Ec. 61}$$

I_o se calcula mediante la ecuación Ec. 62, al reemplazar los valores en la ecuación Ec. 61, se encuentra el valor de C . Se escoge un valor de capacitor comercial de valor inmediato superior al encontrado.

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = 6.37 \text{ A} \quad \text{Ec. 62}$$

$$C = 200 \mu F \quad \text{Ec. 63}$$

Se realiza la simulación del convertidor elevador con el valor de C de la ecuación Ec. 63. El rizado pico-pico del capacitor C se muestra en la Figura 44, donde ΔV_o tiene un valor de 1.3 V, que representa el 0.76% del valor de V_o , se cumple con el requerimiento de diseño $\Delta V_o < 1\% V_o$.

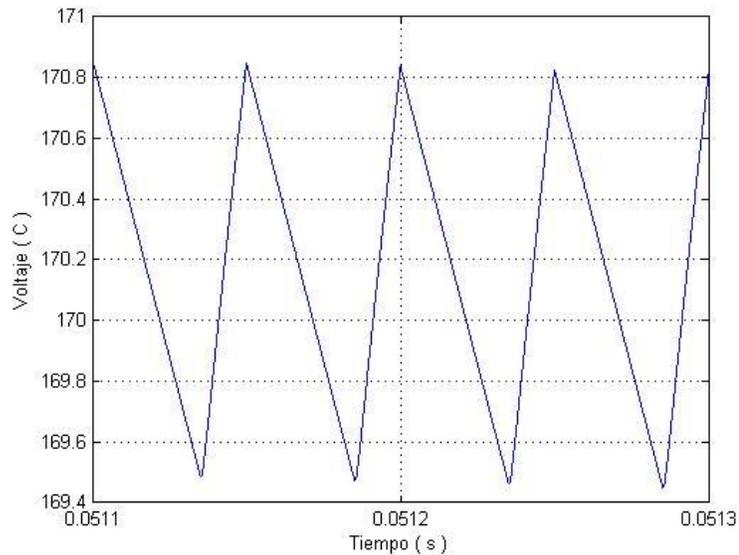


Figura 44. Rizado en el capacitor del convertidor elevador DC-DC

3.2.3 Diseño del inversor DC-AC [200 Vdc – 120 Vac]

Para el diseño del convertidor de potencia DC-AC se usará la topología mostrada en la Figura 23, correspondiente a las etapas de potencia, modulación y filtrado que se desarrollarán a continuación.

Para el diseño se realizarán las siguientes consideraciones:

- La tensión de entrada del inversor (V_{dc}) será la tensión entregada por el convertidor elevador, con un valor de 200 V.
- La tensión de salida del proceso de inversión y filtrado (V_o) será de 120 Vrms.
- La técnica de modulación con la cual se controlará los interruptores del inversor será el método de modulado senoidal por ancho de pulsos SPWM unipolar. Las características de las señales portadora y moduladora se especificarán en la sección Etapa de Modulador.

- En la etapa de filtrado se usará un filtro pasa bajo de tipo LC.

3.2.3.1 Etapa de Modulación

Como se mencionó en el Capítulo 2 un inversor entrega corriente de tipo alterna mediante la conmutación de los interruptores que lo componen, de esta manera la etapa de modulación es la encargada de controlar la conmutación de los interruptores al regular la magnitud y frecuencia del voltaje de salida.

En esta etapa se utilizará el método de modulación SPWM unipolar, este tipo de modulación usa dos señales moduladoras sinusoidales $v_{control}$, $-v_{control}$ con una señal portadora triangular v_{tri} , al comparar las señales se produce la señal de control que manejará la conmutación de los interruptores.

- **Señal sinusoidal:** Las señales sinusoidales serán las encargadas de transmitir la información de frecuencia y amplitud, según los requerimientos para el funcionamiento de la carga, se establecerá una frecuencia moduladora $f_1 = 60Hz$ y la amplitud pico de la señal de control $\hat{v}_{control} = 200 V_p$.

La señal de control $v_{control}$ se obtiene mediante la siguiente ecuación Ec. 64, mientras que $-v_{control}$ es complementaria de la señal expresada en la ecuación en mención.

$$V(t) = \hat{v}_{control} \cdot \text{sen}(w \cdot t + \beta) \quad \text{Ec. 64}$$

Donde β representa el desplazamiento angular que en este caso particular es cero, w es el desplazamiento de velocidad angular expresada en ecuación Ec. 65.

$$w = 2\pi f \quad \text{Ec. 65}$$

Por lo tanto la ecuación que expresa la señal de control y su señal complementaria queda definida en la ecuación Ec. 66 y Ec. 67

$$V(t) = 200 \text{ sen}(2. \pi. 60. t) \quad \text{Ec. 66}$$

$$V(t) = -200 \text{ sen}(2. \pi. 60. t) \quad \text{Ec. 67}$$

➤ **Señal Triangular:** La señal triangular está definida por:

Frecuencia Portadora f_s : es la frecuencia con que conmutarán los interruptores del inversor. Esta frecuencia se selecciona de manera que sea menor de 6Khz o mayor a 20 KHz por la relativa facilidad de filtrar voltajes armónicos a altas frecuencias, en aplicaciones donde se requiere una frecuencia moduladora de 50 o 60 Hz.

El valor de f_s está relacionada con la selección del índice de modulación de frecuencia mostrada en la ecuación Ec. 28, donde m_f en inversores monofásicos con modulación SPWM unipolar debe ser entero par (Mohan 2010).

Al considerar lo expuesto anteriormente se escoge un índice de modulación de frecuencia de 60, al reemplazar los valores seleccionados en la ecuación Ec. 28 se obtiene:

$$f_s = m_f \cdot f_1 = 3600 \text{ Hz} \leq 6 \text{ KHz} \quad \text{Ec. 68}$$

Donde la frecuencia de forma de onda triangular varía con la frecuencia deseada del inversor.

Amplitud portadora \hat{v}_{tri} : El valor de \hat{v}_{tri} representa la amplitud máxima de la portadora y mediante la ecuación Ec. 29 se establece la relación con el índice de modulación de amplitud y la amplitud de la señal moduladora.

De acuerdo al valor que tome m_a se puede definir el modo de operación de SPWM: lineal y no lineal.

El modo no lineal establece la condición de sobremodulación donde $\hat{v}_{control} > \hat{v}_{tri}$. Para el diseño se usará el modo lineal que indica que el pico de la señal moduladora es menor o igual al pico de la señal portadora ($\hat{v}_{control} \leq \hat{v}_{tri}$), en consecuencia la relación de modulación de amplitud es menor a uno por que la relación entre el valor instantáneo de la moduladora y el valor medio de la señal modulada (denominada la ganancia PWM), se aproxima a la unidad.(Zhou 2002)

Al considerar lo expuesto anteriormente, se busca conseguir que $m_a < 1$ para evitar sobremodulación. De acuerdo a la ecuación Ec. 29, la amplitud de la señal moduladora está definida por la señal senoidal como se indicó en el diseño de la misma, la amplitud de la señal portadora será el voltaje de salida del convertidor de potencia DC-DC con una ganancia del 20% que se muestra en la ecuación Ec. 70, al reemplazar los valores en la ecuación 26 se obtiene:

$$V_p = V_p + 20\% = 240 \text{ V} \quad \text{Ec. 69}$$

$$m_a = \frac{200}{240} = 0.83 \quad \text{Ec. 70}$$

Las señales moduladoras y portadora con sus características de amplitud y frecuencia se muestran en la Figura 45.

3.2.3.2 Etapa de potencia

Para la etapa de potencia se usara la topología de un inversor monofásico tipo puente completo como se muestra en la Figura 23, el cual contiene 4 dispositivos semiconductores de potencia, los mismos que serán controlados mediante las señales de control que se obtuvieron en la etapa de modulación, mostradas en la Figura 45.

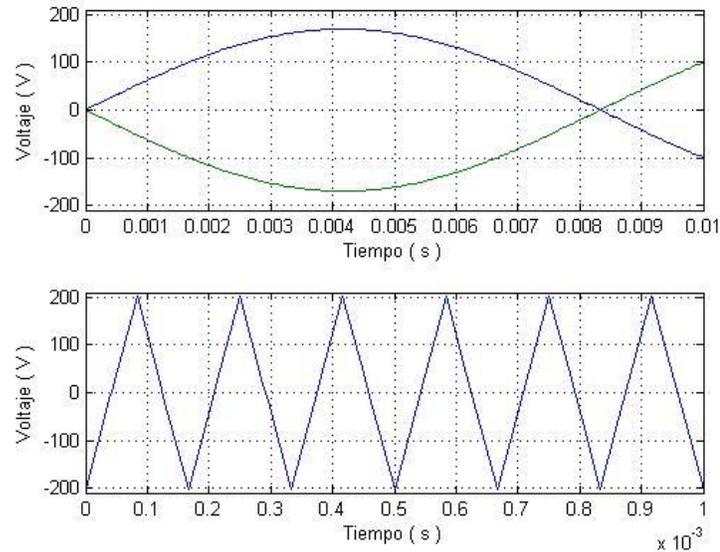


Figura 45. Señales de Modulación. (a) Moduladoras (b) Portadora

Como se mencionó en el Capítulo 2, los pares de interruptores ($S1, S4$) y ($S2, S3$) se controlan de forma independiente para producir un voltaje de salida que cambia en relación a cero, las señales de control se muestran en la Figura 46, de esta manera se produce la señal de salida del inversor con características en frecuencia y amplitud específicas. La salida del inversor sin etapa de filtrado se muestra en la Figura 47.

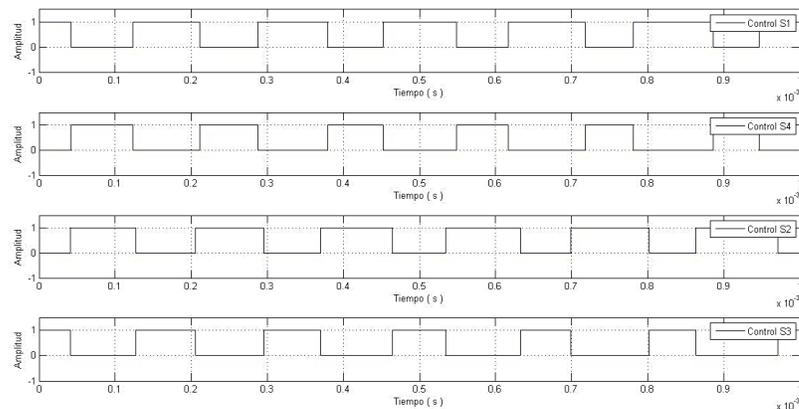
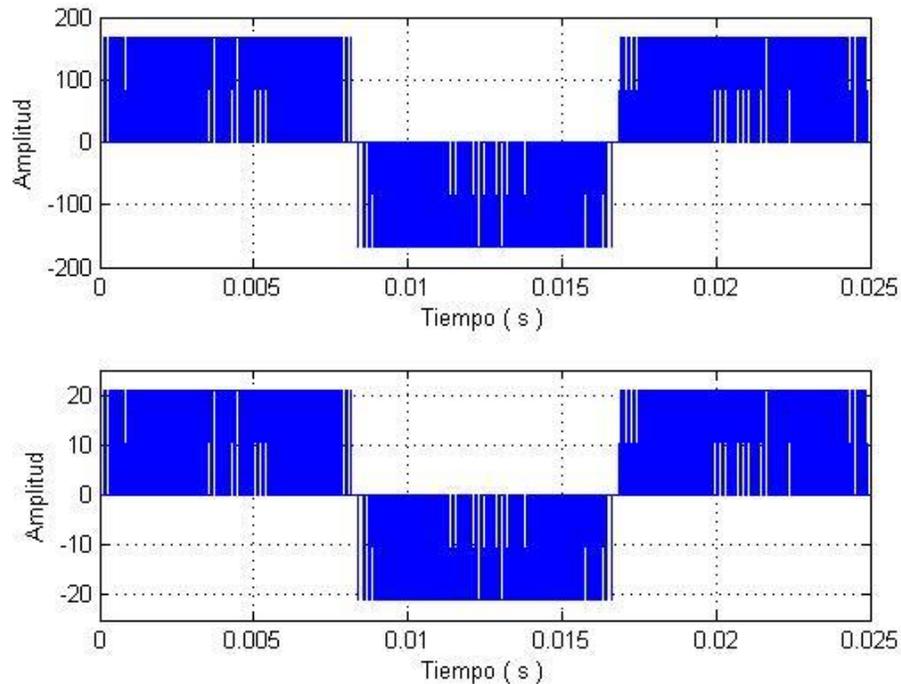


Figura 46. Señales de control de los transistores en inversor



**Figura 47. Salida del inversor monofásico tipo puente completo sin filtrar
(a) Voltaje de Salida (b) Corriente de Salida**

3.2.3.3 Etapa de filtrado

La etapa de filtrado se acoplará a la salida del inversor, como se muestra en la Figura 26, para eliminar los armónicos que contiene la señal de salida sin filtrar y obtener una señal sinusoidal lo más pura con una frecuencia fundamental de 60 Hz.

El filtro que se diseñara es un filtro pasivo pasabajo LC, entre las características del filtro pasa bajo, se encuentra que no introduce atenuación a frecuencias por debajo de F_c , pero eliminan por completo todas las frecuencias que se encuentren arriba de la frecuencia de corte.

Para el diseño se realizarán las siguientes consideraciones:

- La tensión de salida será $V_o = 120 V_{rms}$

- La frecuencia fundamental será igual a 60 Hz.
- La potencia de salida será 1300 W.

Para el cálculo de los elementos pasivos del filtro, se analizará los armónicos dominantes en la forma de onda de salida de voltaje del inversor, se muestra en la Figura 48, los armónicos aparecen como bandas laterales centradas alrededor de la frecuencia de conmutación y sus múltiplos, con estos valores se determinará la frecuencia de corte del filtro.

El orden armónico para SPWM unipolar se encuentra mediante la ecuación Ec. 71:

$$h = j(2m_f) \pm k \quad \text{Ec. 71}$$

Donde h es el orden armónico que corresponde a la banda lateral número k de j veces la relación de modulación la frecuencia m_f . Para valores impares de j , los armónicos existen solamente para valores pares de k . Para valores pares de j , los armónicos existen solamente para valores impares de k .

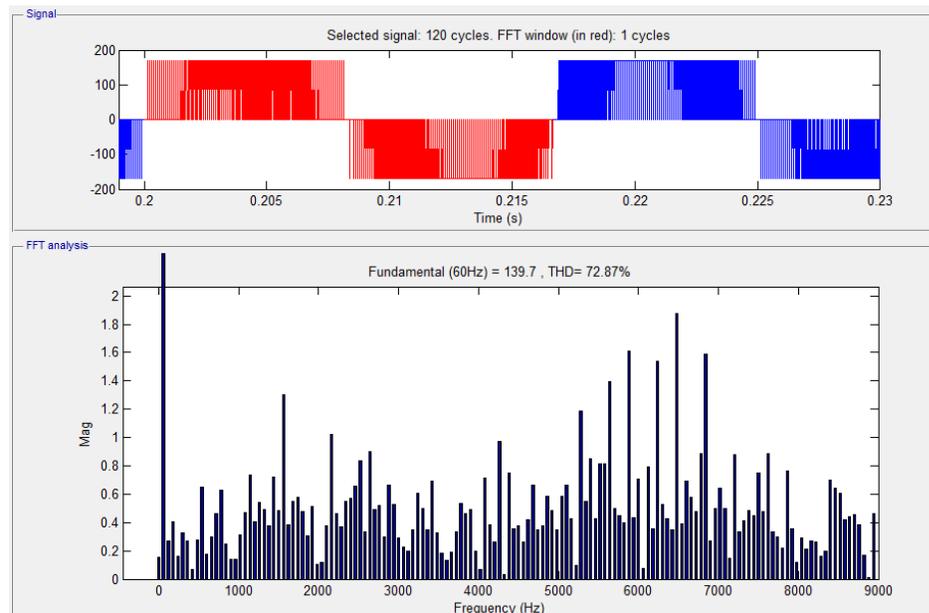


Figura 48. Contenido armónico (a) Voltaje de Salida (b) Armónicos del Voltaje de Salida

En modulación SPWM unipolar los armónicos existen como bandas laterales alrededor de $2m_f$ y los múltiplos de $2m_f$, mediante “Powergui FFT Analysis Tool” se obtiene los valores de los armónicos, y se selecciona los armónicos dominantes con su respectiva frecuencia para determinar F_c .

De los resultados obtenidos en la Tabla 7, se aprecia que el primer armónico significativo es de orden 26 con una frecuencia de 1560 Hz, los posteriores armónicos están lo suficientemente alejados de la frecuencia fundamental como para ser objeto de atención al momento de diseñar el filtro. De esta manera la frecuencia de corte debe estar dentro $60 \text{ Hz} \leq F_c \leq 1560 \text{ Hz}$, se escoge $F_c = 1 \text{ KHz}$ para no afectar la frecuencia fundamental y eliminar todos los armónicos que contengan las frecuencias superiores a F_c , al reemplazar el valor en la ecuación Ec. 72, se obtiene la ecuación Ec. 73 .

Tabla 7

Orden armónico y frecuencia de conmutación

No.	Orden Armónico	Frecuencia de Conmutación (Hz)
1	Fundamental	60
2	26	1560
3	36	2160
4	88	5260
5	94	5640
6	98	5880
7	104	6240
8	108	6480
9	114	6840

$$F_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{Ec. 72}$$

$$LC = \frac{1}{(2.\pi.F_c)^2} = \frac{1}{(2.\pi.1000)^2} = 2.53 \times 10^{-8} \quad \text{Ec. 73}$$

e escoge el valor de un capacitor comercial que sea capaz de soportar 250 V de tensión que se aplica a los interruptores del inversor, se elige $C = 10 \mu F$, y se reemplaza en la ecuación Ec. 74 y se despeja el valor de L

$$L = \frac{2.53 \times 10^{-8}}{10^{-6}} = 2.53 \text{ mH} \approx 3 \text{ mH } e \quad \text{Ec. 74}$$

En la Figura 49 se muestra la señal de voltaje y corriente de salida del inversor con etapa de filtrado, se observa que las señales son de tipo sinusoidal con una frecuencia de 60 Hz y una amplitud de 170 pico.

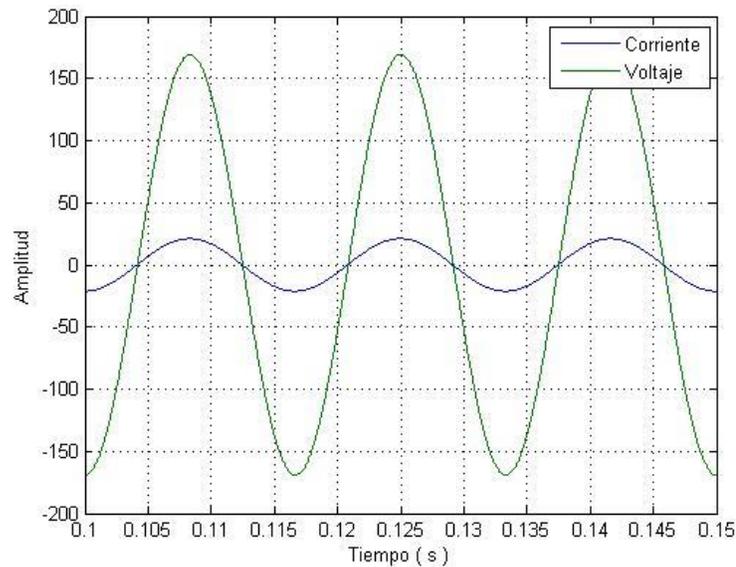


Figura 49. Salida del Inversor con Etapa de Filtrado

3.3 Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento

Para el análisis de sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento se analizarán dos modelos:

- Primer modelo: se considerará que el arreglo de módulos entregue la energía generada en el sistema de almacenamiento compuesto por baterías y la carga haga uso de esta energía únicamente.
- Segundo modelo: se considerará que tanto el arreglo de módulos como el sistema de almacenamiento entregarán la energía requerida por la carga bajo condiciones que se especificarán en el desarrollo de este modelo.

3.3.1 Primer Modelo

El sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento en el primer modelo está configurado por los dispositivos, tales como, arreglo de módulos fotovoltaicos, convertidor elevador DC-DC, convertidor reductor elevador DC-DC, inversor DC-AC, sistema de almacenamiento, en la Figura 50 se observa el diagrama de bloque que se desarrollará.

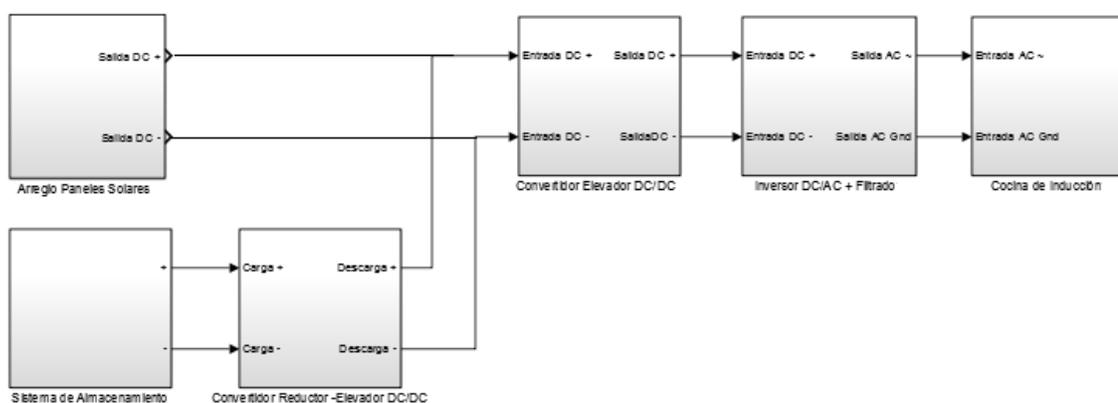


Figura 50. Primer modelo sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento.

Como se muestra en la Figura 50, el arreglo de módulos fotovoltaicos entregarán energía al convertidor reductor elevador DC-DC que reducirá el voltaje hasta el voltaje nominal del sistema de almacenamiento, este sistema estará conformado por baterías que almacenarán energía, y entregarán la energía necesaria para la carga a través de las etapas de elevación, inversión y filtrado, de esta manera quedará definida las características de amplitud y frecuencia que necesita la carga.

Se realiza el diseño de los dispositivos que componen el primer modelo mostrado en la Figura 50, en el cual se establece que el arreglo de módulos entregará la energía únicamente a la batería donde esta se almacenará (proceso de carga), para posteriormente esta energía ser entregada a la carga (proceso

de descarga), de esta manera se analiza la energía necesaria que debe entregar el arreglo de módulos para cargar las baterías, se asume que las baterías entregarán la demanda total de energía que requiere la carga con un tiempo de autonomía de 1 día.

Para realizar las simulaciones de los diferentes componentes del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, primer modelo, se utilizará el software MATLAB-SIMULINK, el sistema en detalle se muestra en el Anexo 2.

3.3.1.1 Diseño del sistema de almacenamiento

Para el diseño del sistema de almacenamiento, se usará una batería comercial como referencia para obtener las características técnicas y determinar el número de baterías necesarios para diseñar el sistema.

Se usará la batería de la marca ULTRACELL modelo UCG 150-12, cuyas características eléctricas se presentan en la Tabla 8, la hoja técnica de la batería seleccionada es mostrada en el ANEXO 4.

De acuerdo a las características mostradas en la Tabla 8, la capacidad de la batería varía de acuerdo a la corriente consumida por la carga en un período de tiempo, por lo que es necesario calcular la corriente que consumirá la carga. De acuerdo a los datos mencionados en la hipótesis de partida se calcula la corriente consumida por la carga, mediante la ecuación Ec. 75.

$$I = \frac{P[w]}{V [v] \times \text{Cos}\phi} = \frac{1300}{120 \times \text{Cos}(60)} = 21.6 A \quad \text{Ec. 75}$$

El valor de la corriente de la ecuación Ec. 75 se usará para relacionar con la capacidad que tendrá la batería cuando entrega esta corriente, de acuerdo a la Tabla 8, la batería tiene una capacidad de $C_{bat} = 131.6 Ah$ cuando se consume 26.3 A por el periodo de 5 horas.

Tabla 8

Características Eléctricas Batería modelo UCG 150-12 ULTRACELL

	Nominal Voltage	12V
	Nominal Capacity (10HR)	150AH
Terminal Type	Standard Terminal	F10
	Optional Terminal	F11
Container Material	Standard Option	ABS
	Flame Retardant Option (FR)	ABS (UL94:VO)
Rated Capacity	160.8 AH/8.04A	(20hr,1.80V/cell, 25°C / 77°F)
	150.0 AH/15.0A	(10hr,1.80V/cell, 25°C / 77°F)
	131.6 AH/26.3A	(5hr,1.75V/cell, 25°C / 77°F)
	119.3 AH/39.8A	(3hr,1.75V/cell, 25°C / 77°F)
	96.9 AH/96.9A	(1hr,1.60V/cell, 25°C / 77°F)
Max Discharge Current	1500A (5s)	
Internal Resistance	Approx 2.5mΩ	
Discharge Characteristics	Operating Temp. Range	Discharge: -20 ~ 55°C (-4 ~ 131°F)
		Charge: 0 ~ 40°C (32 ~ 104°F)
		Storage: -20 ~ 50°C (-4 ~ 122°F)
	Nominal Operating Temp. Range	25 ± 3°C (77 ± 5°F)
	Cycle Use	Initial Charging Current less than 45.0A. Voltage 14.4V ~ 15.0V at 25°C (77°F) Temp. Coefficient -30mV/°C
	Standby Use	No limit on Initial Charging Current Voltage 13.5V ~ 13.8V at 25°C (77°F) Temp. Coefficient -20mV/°C
Capacity affected by Temperature	40°C (104°F)	103%
	25°C (77°F)	100%
	0°C (32°F)	86%
Design Floating Life at 20°C	15 Years	
Self Discharge	Ultracell batteries may be stored for up to 6 months at 25°C(77°F) and then a refresh charge is required. For higher temperatures the time interval will be shorter.	

Fuente: (Ultracell 2013)

Con la capacidad C_{bat} se realiza el dimensionamiento para el proceso la carga y descarga de la batería. En este apartado se diseñará la etapa de descarga del sistema de almacenamiento, al calcular la capacidad necesaria que debe tener el sistema con una autonomía de 1 día, en la Figura 51 se observa el sentido en el cual la batería entregará la energía a la carga. La etapa de carga se analizará en el diseño del arreglo de módulos fotovoltaicos para el primer modelo.

El cálculo del número de baterías se realiza mediante el análisis de la carga con una demanda de $3.96 \frac{KWh}{dia}$, el sistema de almacenamiento tiene que ser capaz de abastecer durante 1 día esta cantidad de energía, mediante la ecuación Ec. 76 se calcula la capacidad que necesitará la cocina de inducción para su funcionamiento

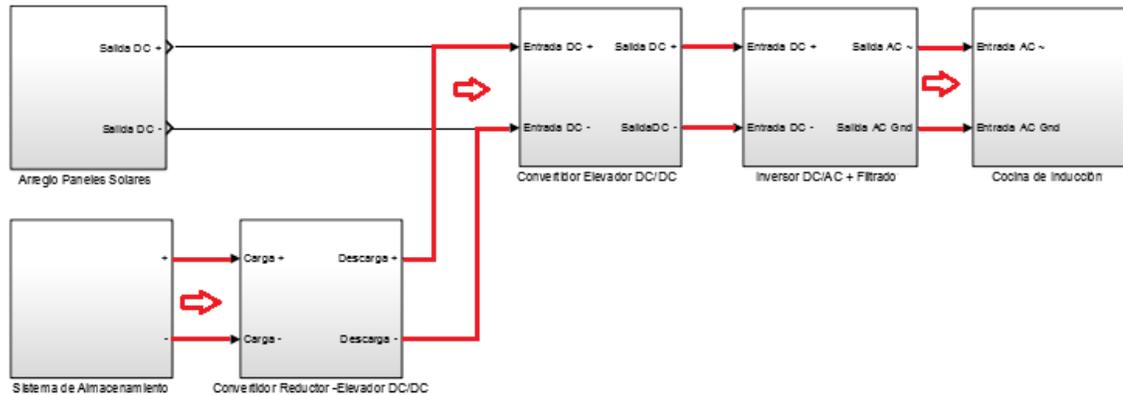


Figura 51. Sentido de Descarga del Sistema de Almacenamiento

$$C_{bat} = \frac{D_{total} \times Aut}{V_{bat} \times DOD} = \frac{3960 [Wh] \times 1}{12 [V] \times 0.7} = 471.4 \approx 472 Ah \quad \text{Ec. 76}$$

Donde C es la capacidad de la batería expresada en [Ah], D_{total} es la demanda de energía de la carga expresada en [Wh], Aut es el tiempo de autonomía de la batería en días, V_{bat} es el voltaje nominal de la batería y DOD es el porcentaje máximo de descarga de la batería.

Para calcular el número total de baterías que necesita el sistema de almacenamiento se relaciona, la capacidad que demanda la carga con la capacidad de una batería, expresada en la ecuación Ec. 77.

$$\text{NúmeroBaterías} = \frac{C_{bat}}{C_{carga}} = \frac{472 [Ah]}{131.6 [Ah]} = 3.58 \approx 4 \text{ baterías} \quad \text{Ec. 77}$$

La configuración del sistema de almacenamiento será 4 baterías en paralelo con una capacidad $C = 472 Ah$, voltaje nominal $V_{bat} = 12 V$ que abastecerá durante 20 horas continuas al consumir una corriente de $I_{bat} = 26.3 A$, como se observa en la Figura 52, el sistema de almacenamiento tiene un porcentaje de descarga total después de 22 horas.

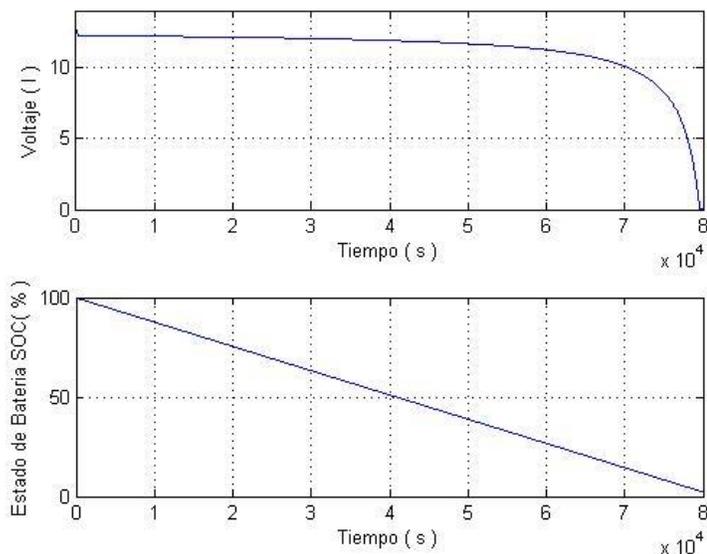


Figura 52. Estado de descarga del sistema de almacenamiento primer modelo

3.3.1.2 Diseño del arreglo de módulos fotovoltaicos

El arreglo de módulos fotovoltaicos entregará la energía producida para cargar el sistema de almacenamiento, para el diseño se hará uso del voltaje nominal del arreglo de módulos y para la corriente se diseñará una configuración en paralelo; esta corriente determinará el tiempo de carga del sistema de acumulación.

Se usará el módulo fotovoltaico de la marca ISOFOTON modelo I 165, cuyas características eléctricas se presentan en la

Tabla 6, con una potencia total en condiciones estándar de 165 W.

Como se analizó en el sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, se puede obtener el número total de paneles al considerar el factor de irradiación mediante la ecuación Ec. 78.

$$N_{\text{paneles}} = \frac{C_{\text{total}}}{P_{\text{mpp}} \times HSP \times F_g} = \frac{3960}{165 \times 4.8 \times 0.9} = 5.17 \approx 6 \text{ paneles} \quad \text{Ec. 78}$$

La potencia total que entrega el arreglo en paralelo de 6 módulos es 990 W, con un voltaje nominal de 17.4 V y una corriente de 56.88 A. Con la corriente del arreglo de módulos se calcula el tiempo de carga del sistema cuando se encuentra descargado completamente, mediante la ecuación Ec. 79.

$$\text{Horas}_{\text{carga}} = \frac{472 \text{ [Ah]}}{56.88 \text{ [A]}} = 8.29 \text{ horas} \quad \text{Ec. 79}$$

Se necesitan 6 paneles para cargar el sistema de almacenamiento en 8.29 horas, se analiza el tiempo de carga con diferente número de paneles configurados en paralelo mostrado en la Tabla 9, para determinar el número de paneles que mediante el criterio costo beneficio, sea la mejor opción para el sistema en esta configuración.

Tabla 9

Horas de carga del sistema de almacenamiento primer modelo

No.	Numero Paneles (Configuración Paralelo)	Corriente Nominal del Panel I 165 [A]	Corriente Nominal del Arreglo de Paneles [A]	Horas de Carga Del Sistema de Almacenamiento [h]
1	6	9.48	56.88	8.29
2	5	9.48	47.4	9.95
3	4	9.48	37.92	12.44
4	3	9.48	28.44	16.59
5	2	9.48	18.96	24.89
6	1	9.48	9.48	49.78

El tiempo de carga tiene que ser el 10% de la capacidad nominal del sistema de almacenamiento, esto garantiza la vida útil de la batería, entonces se define un arreglo de 4 paneles configurados en paralelo que entrega una corriente

nominal de 37.92 A que representa el 8% de la capacidad nominal del sistema de almacenamiento, en la Figura 53 se observa el sentido en el cual el arreglo de módulos entregará la energía al sistema de almacenamiento.

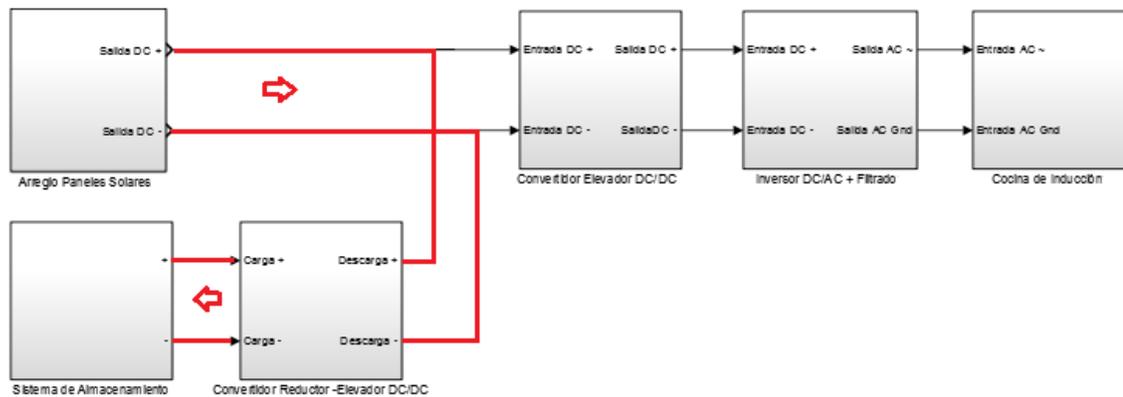


Figura 53. Sentido de carga del sistema de almacenamiento primer modelo

La configuración del arreglo de módulos será 4 paneles conectados en paralelo con un voltaje nominal $V_{pv} = 17 V$, corriente $I_{pv} = 38 A$ que cargarán al sistema de almacenamiento en un periodo de 12.44 horas. Como se observa en la Figura 54, el sistema de almacenamiento tiene un porcentaje de carga total después de 12.88 horas.

3.3.1.3 Diseño del Convertidor de potencia DC – DC

Para el diseño de los convertidores de potencia DC-DC se usará la topología mostrada en la Figura 15. El procedimiento de diseño será similar al realizado en el diseño y simulación del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, por lo que se obviará el procedimiento en el desarrollo de los siguientes convertidores.

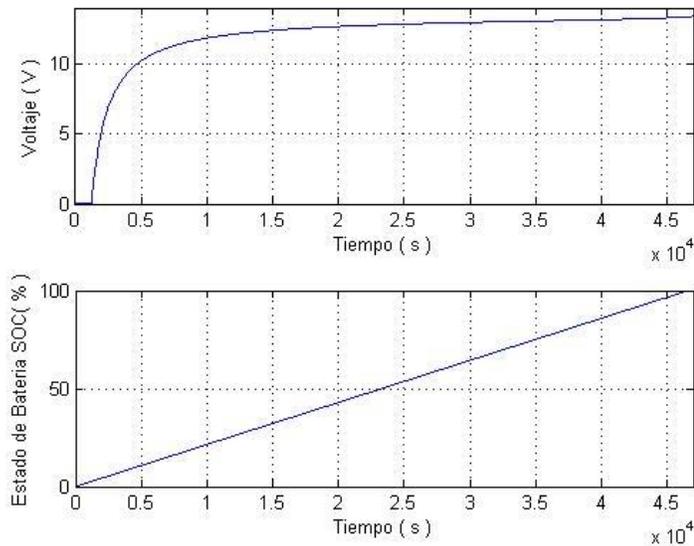


Figura 54. Estado de carga del sistema de almacenamiento primer modelo

➤ **Convertidor elevador DC – DC [120 Vdc - 200 Vdc]**

El convertidor elevador recibirá el voltaje proveniente del convertidor reductor elevador, para el diseño de este convertidor se realizarán las siguientes consideraciones:

- La tensión de entrada del convertidor (V_i) será la tensión entregada por el convertidor reductor elevador, con un valor de 120 v.
- La potencia máxima del convertidor será 2000 Watts, según la ecuación de potencia $P = I \times V$, la corriente es $I = 16.6 A$, pero de acuerdo a la Ec. 75, la corriente que requiere la carga es 21.6 A, corriente de interés para el diseño.
- El máximo rizado de corriente pico-pico (Δi_L) permitido en el inductor, será el 10% de la corriente máxima que requiere la carga, como se muestra en la ecuación Ec. 80.

$$\Delta i_L < 10\% I_{pv} = 2.1A$$

Ec. 80

- La tensión de salida del convertidor (V_o) alimentará la entrada de la etapa de inversión, el voltaje de salida será de 200 v.
- El máximo rizado de tensión pico-pico (ΔV_o) permitido en el capacitor, será el 0.5% de V_o :

$$\Delta V_o < 0.5\% V_o = 1 V \quad \text{Ec. 81}$$

- El ciclo de trabajo se obtiene mediante la ecuación fundamental, como se muestra en la ecuación Ec. 82.

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} = 0.4 \quad \text{Ec. 82}$$

- La frecuencia de conmutación del interruptor se muestra en la ecuación Ec. 83.

$$f = 20 \text{ KHz} \quad \text{Ec. 83}$$

Dimensionamiento del Inductor

Para determinar el valor de la inductancia se usará la ecuación Ec. 84 se añade un margen de seguridad del 25% y se encuentra el valor de L:

$$L = \frac{D (1 - D) V_o}{\Delta i_L f} \quad \text{Ec. 84}$$

$$L = 722 + 25\% = 900 \mu H \quad \text{Ec. 85}$$

Se realiza la simulación del convertidor elevador con el valor de L de la ecuación Ec. 85. El rizado pico-pico del inductor L se muestra en la Figura 55, donde Δi_L tiene un valor de 0.09 A, que representa el 0.4% del valor de I_{pv} , se cumple con el requerimiento de diseño $\Delta i_L < 10\% I_{pv}$.

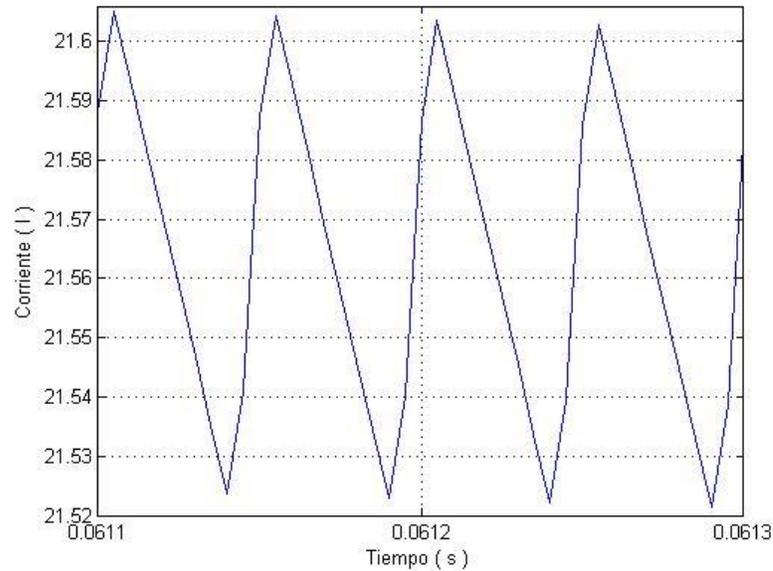


Figura 55. Rizado en el Inductor L, convertidor elevador primer modelo

Dimensionamiento del Capacitor

Para determinar el valor del capacitor se usará la ecuación Ec. 86, se añade un margen de seguridad del 25% y se encuentra el valor de C:

$$C = \frac{I_o \cdot D}{\Delta V_o \cdot f} \quad \text{Ec. 86}$$

$$C = 820 + 25\% = 1000 \mu F \quad \text{Ec. 87}$$

Se realiza la simulación del convertidor elevador con el valor de C de la ecuación Ec. 87. El rizado pico-pico del capacitor C se muestra en la Figura 56, donde ΔV_o tiene un valor de 0.7 V, que representa el 0.35% del valor de V_o , se cumple con el requerimiento de diseño $\Delta V_o < 1\% V_o$.

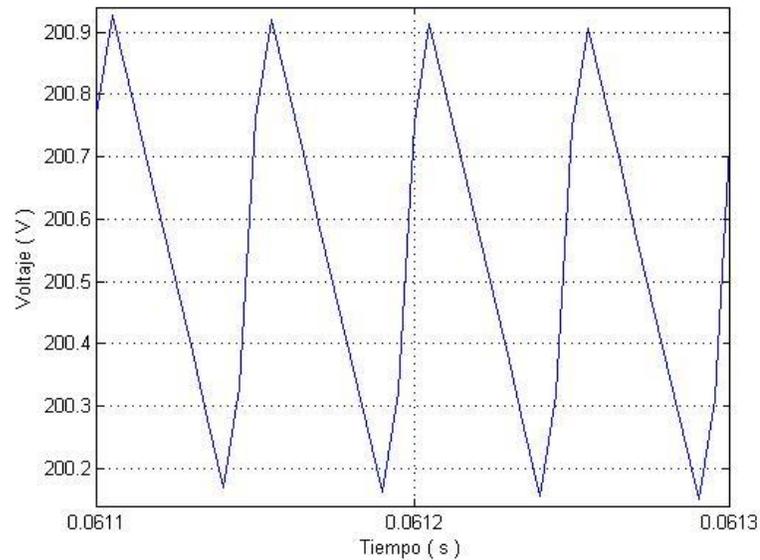


Figura 56. Rizado en el Capacitor C, elevador primer modelo

➤ **Convertidor reductor elevador DC – DC**

Para el diseño del convertidor reductor elevador DC-DC se usará la topología que combina un convertidor reductor con un convertidor elevador. La etapa de reducción de tensión se usará para cargar el sistema de almacenamiento, como se observa en la Figura 53, y la etapa de elevación de tensión se usará para enviar corriente a través de la etapa de elevación, filtrado y carga, correspondiente a la etapa de descarga, como se observa en la Figura 51.

Para el diseño del convertidor reductor elevador se realizan las siguientes consideraciones:

- La tensión de entrada al convertidor desde el arreglo de paneles es de 17 v y la tensión de salida del convertidor es de 120 v.
- El máximo rizado de corriente pico-pico (Δi_L) permitido en el inductor, será el 10% de la corriente proveniente del sistema de acumulación, como se muestra en la ecuación Ec. 88.

$$\Delta i_L < 10\% I_{bat} = 2.63A \quad \text{Ec. 88}$$

- El máximo rizado de tensión pico-pico (ΔV_o) permitido en el capacitor, será el 2% de V_o :

$$\Delta V_o < 2\% V_o = 2.4 V \quad \text{Ec. 89}$$

- El ciclo de trabajo para la etapa de elevación de tensión está definido por la ecuación fundamental del convertidor elevador, como se muestra en la ecuación Ec. 90.

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} = 0.75 \quad \text{Ec. 90}$$

- El ciclo de trabajo para la etapa de reducción de tensión está definido por la ecuación fundamental del convertidor reductor, como se muestra en la ecuación Ec. 91.

$$D = \frac{V_o}{V_i} = 0.7 \quad \text{Ec. 91}$$

- La frecuencia de conmutación de los interruptores se muestra en la ecuación Ec. 92.

$$f = 20 \text{ KHz} \quad \text{Ec. 92}$$

Dimensionamiento del Inductor

Para determinar el valor de la inductancia se usarán las ecuaciones características del inductor de cada tipo de convertidor, se usará el valor de inductor de mayor valor que trabaje en régimen continuo, este inductor es compartido tanto para elevar como reducir tensión.

En la ecuación Ec. 93 y Ec. 94 se muestra las ecuaciones correspondientes al convertidor elevador y reductor respectivamente, al valor calculado se añade un margen de seguridad del 25% y se encuentra el valor de L:

$$L_{elevator} = \frac{D(1-D)V_o}{\Delta i_L f} \quad \text{Ec. 93}$$

$$L_{reductor} = \frac{V_o}{\Delta i_L f} \quad \text{Ec. 94}$$

$$L = 290 \mu H \quad \text{Ec. 95}$$

Se realiza la simulación con los valores obtenidos para la etapa de carga, de acuerdo a la Figura 53, en la cual se observa que la corriente producida por el arreglo de módulos es de 38 A, como se observa en la Figura 57.

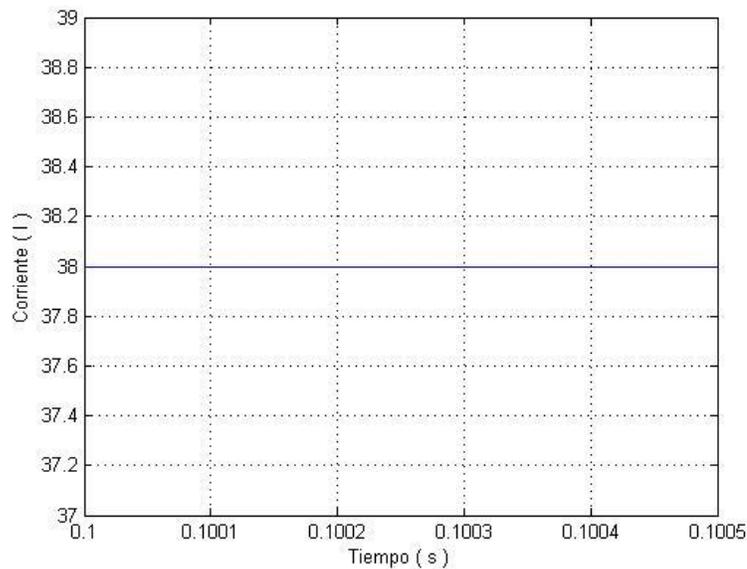


Figura 57. Rizado en el Inductor L, convertidor reductor elevador, primer modelo

En la etapa de descarga de acuerdo a la Figura 58, con los datos calculados se observa que el rizado pico-pico del inductor L, Δi_L tiene un valor de 0.3 A, que representa el 1.14% del valor de I_{pv} , se cumple con el requerimiento de diseño $\Delta i_L < 10\% I_{bat}$.

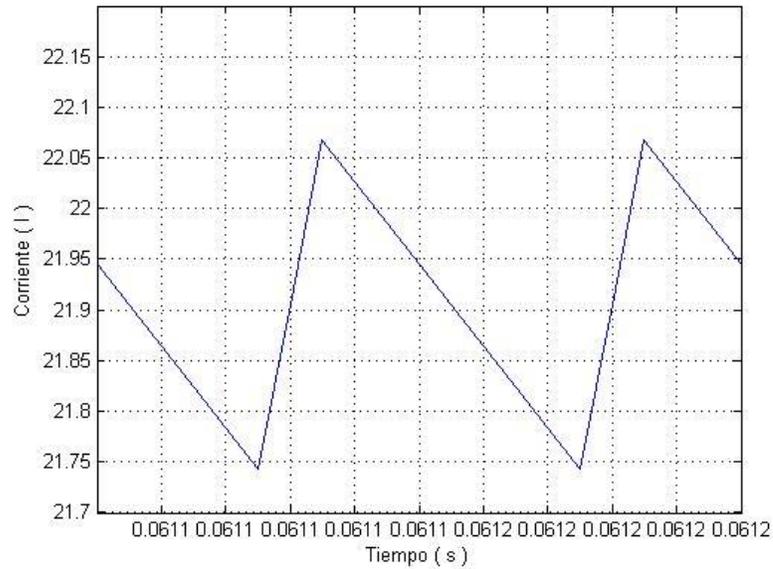


Figura 58. Rizado de Corriente en Inductor, convertidor reductor elevador, primer modelo

Dimensionamiento del Capacitor

Para determinar el valor del capacitor se usará la ecuación Ec. 96, se añade un margen de seguridad del 25% y se encuentra el valor de C:

$$C = \frac{I_o \cdot D}{\Delta V_o \cdot f} \quad \text{Ec. 96}$$

$$C = 405 + 25\% = 500 \mu F \quad \text{Ec. 97}$$

Se realiza la simulación con los valores obtenidos para la etapa de carga, en la cual se observa que el voltaje de entrada al sistema de almacenamiento, como se observa en la Figura 59.

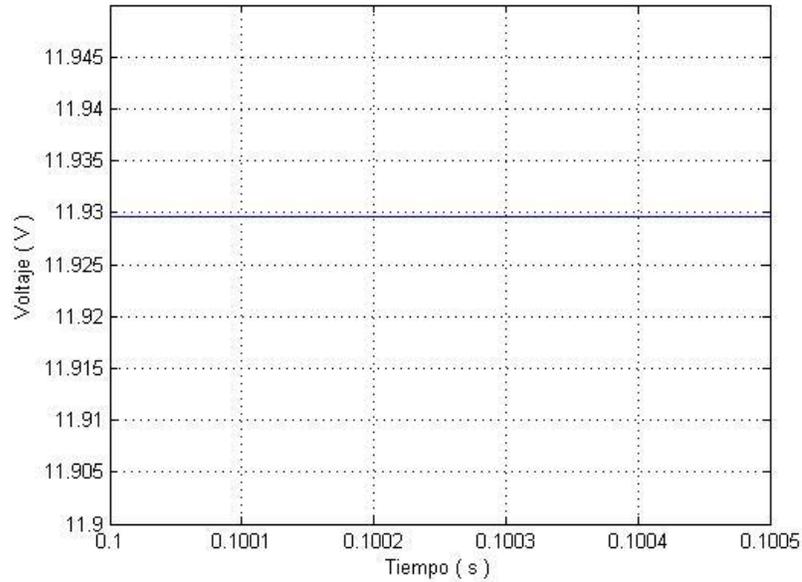


Figura 59. Rizado en el Capacitor C, convertidor reductor elevador, primer modelo

Se realiza la simulación para la etapa de descarga, de acuerdo a la Figura 52, El rizado pico-pico del capacitor C se muestra en la Figura 60, donde ΔV_o tiene un valor de 1.76 V, que representa el 1.74% del valor de V_o , se cumple con el requerimiento de diseño $\Delta V_o < 2\% V_o$.

3.3.2 Segundo Modelo

El sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento en el segundo modelo está configurado por los dispositivos, tales como, arreglo de módulos fotovoltaicos, convertidor elevador DC-DC, convertidor reductor elevador DC-DC, inversor DC-AC y sistema de almacenamiento. En este modelo se añade la definición de Enlace DC es el lugar donde el voltaje de salida del convertidor elevador puede ser enviado al convertidor reductor-elevador o al inversor. En la Figura 61 se observa el diagrama de bloque que se desarrollará.

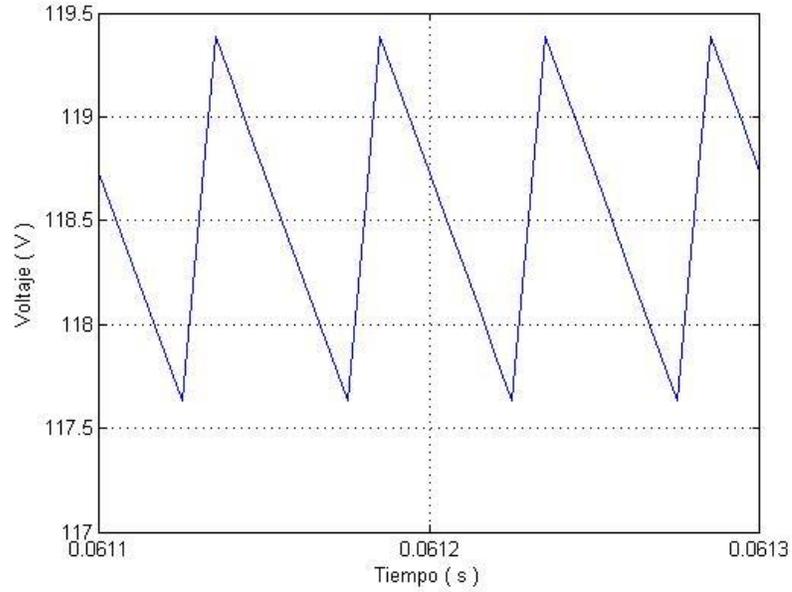


Figura 60. Rizado en el Capacitor C, convertidor reductor elevador, primer modelo

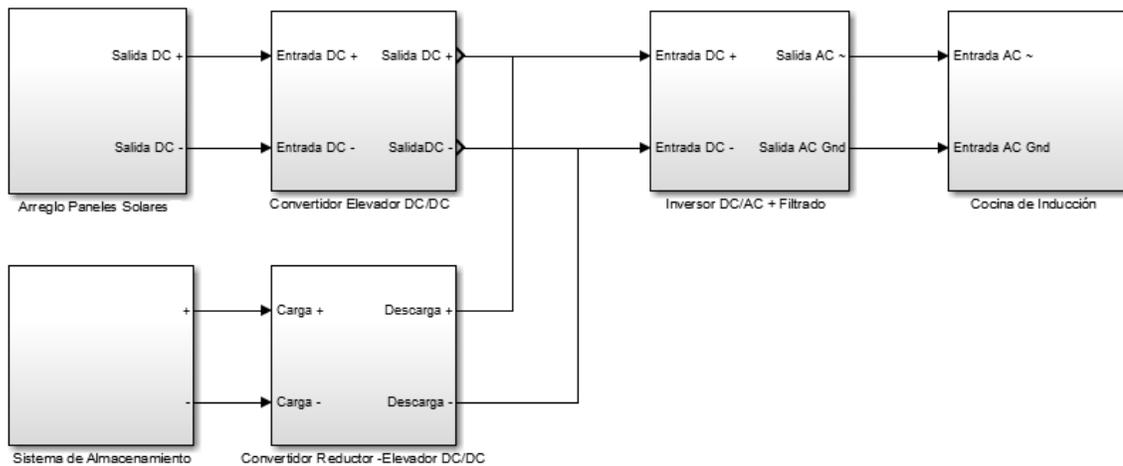


Figura 61. Sistema Fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo

Como se muestra en la Figura 61, el arreglo de módulos fotovoltaicos entregará energía al convertidor elevador DC-DC que elevará el voltaje y se

conectara con el Enlace DC. El convertidor reductor-elevador será bidireccional, este dispositivo el que se encargará de cargar y descargar el sistema de almacenamiento conectado directamente al Enlace DC.

Se realiza el diseño de los dispositivos que componen el segundo modelo mostrado en la Figura 61, el criterio de diseño establece que tanto el arreglo de módulos como el sistema de almacenamiento estarán en la capacidad de entregar la energía necesaria para el correcto funcionamiento de la carga, de esta manera se analizará la cantidad de módulos fotovoltaico y el sistema de almacenamiento, que en conjunto con los dispositivos inversores y conversores conformen el sistema de generación en estudio.

Para realizar las simulaciones de los diferentes componentes del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo se utilizará el software MATLAB-SIMULINK, el sistema en detalle se muestra en el

3.3.2.1 Diseño del sistema de almacenamiento

Para el diseño del sistema de almacenamiento, se usará la batería comercial ULTRACELL modelo UCG 150-12. Si la carga consume 21.6 A como se muestra en la ecuación Ec. 75 y la batería escogida tiene una capacidad $C_{bat} = 131.6 Ah$ cuando se consume 26.3 A por el periodo de 5 horas de acuerdo a la Tabla 8, entonces una batería está en la capacidad de suministrar la corriente necesaria para el sistema por el tiempo mencionado, por lo que se debe dimensionar el sistema de abastecimiento para un periodo de autonomía de 1 día.

El sistema de almacenamiento debe abastecer la energía de $3.96 \frac{KWh}{dia}$ como se muestra en la ecuación Ec. 36, durante 1 día, se calcula la capacidad total del sistema de almacenamiento mediante la ecuación Ec. 98.

$$C_{bat} = \frac{D_{total} \times Aut}{V_{bat} \times DOD} = \frac{3960 [Wh] \times 1}{12 [V] \times 0.7} = 471.4 \approx 472 Ah \quad \text{Ec. 98}$$

Para calcular el número total de baterías que necesita el sistema de almacenamiento se relaciona la capacidad que demanda la carga con la capacidad de una batería, expresada en la ecuación Ec. 99.

$$\text{NúmeroBaterias} = \frac{C_{bat}}{C_{carga}} = \frac{472 [Ah]}{131.6 [Ah]} = 3.58 \approx 4 \text{ baterias} \quad \text{Ec. 99}$$

La configuración del sistema de almacenamiento será 4 baterías en paralelo con una capacidad $C = 472 Ah$, voltaje nominal $V_{bat} = 12 V$ que abastecerá durante 20 horas continuas al consumir una corriente de $I_{bat} = 26.3 A$, es decir el sistema de almacenamiento será similar al primer modelo, y su curva de descarga se puede observar en la Figura 52. En la Figura 62 se observa el sentido en el cual el sistema de almacenamiento entregará la energía a la carga.

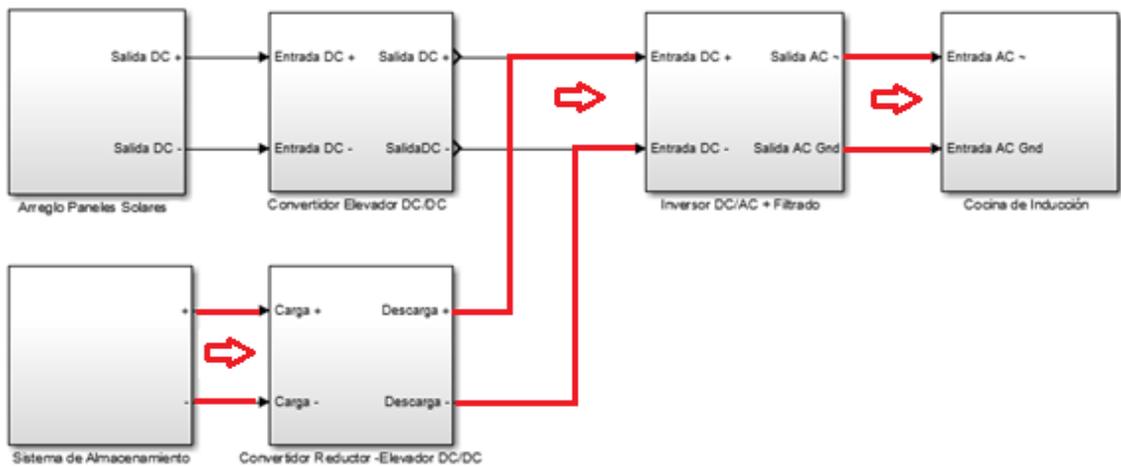


Figura 62. Sentido de descarga del Sistema de Almacenamiento, segundo modelo

3.3.2.2 Diseño del arreglo de módulos fotovoltaicos

Para el diseño se usará el módulo fotovoltaico de la marca ISOFOTON modelo I 165, cuyas características eléctricas se presentan en la

Tabla 6, con una potencia total en condiciones estándar de 165 W. Se calcula la cantidad total de paneles, se obtiene 6 paneles que proporcionan una energía diaria de $4752 \frac{KWh}{dia}$ superior en un 20% a la energía que requiere la carga.

El arreglo de módulos se configurará en paralelo, esta configuración eleva la corriente y mantiene el voltaje nominal de cada panel, de esta manera el arreglo de módulos fotovoltaicos tiene un voltaje nominal 17 V y una corriente de 57 A. Esta corriente servirá para cargar el sistema de almacenamiento durante 8.29 horas, como se muestra en la ecuación Ec. 100. En la Figura 63 se observa el sentido en el cual el arreglo de módulos entregará la energía al sistema de almacenamiento. Además el arreglo de paneles también servirá para abastecer de energía a la carga cuando las condiciones climatológicas permitan generar la energía suficiente, en la Figura 64 se observa el sentido en el cual el arreglo de módulos entregará la energía a la carga.

$$Horas_{carga} = \frac{472 [Ah]}{57 [A]} = 8.29 \text{ horas} \quad \text{Ec. 100}$$

La configuración del arreglo de módulos será 6 paneles conectados en paralelo con un voltaje nominal $V_{pv} = 17 V$, corriente $I_{pv} = 57 V$.

3.3.2.3 Diseño del Convertidor de potencia DC – DC

Para el diseño de los convertidores de potencia DC-DC se usará la topología de dos convertidores elevadores en cascada. El procedimiento de diseño será similar al realizado en el diseño y simulación del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, por lo que se obviará el procedimiento en el desarrollo de los siguientes convertidores, se diseñarán dos convertidores que luego serán conectados en cascada.

➤ **Convertidor elevador DC – DC [17 Vdc - 80 Vdc]**

El convertidor elevador recibirá el voltaje proveniente del arreglo de módulos, para el diseño de este convertidor se realizarán las siguientes consideraciones:

- La tensión de entrada del convertidor (V_i) será la tensión entregada por el arreglo de módulos fotovoltaicos (V_{pv}), con un valor de 17 V.

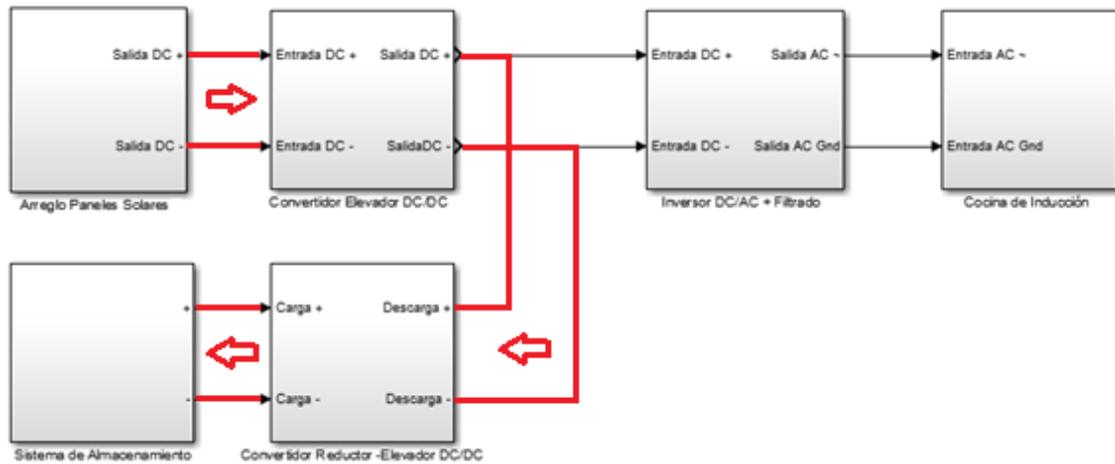


Figura 63. Sentido de Carga del sistema de almacenamiento, segundo modelo

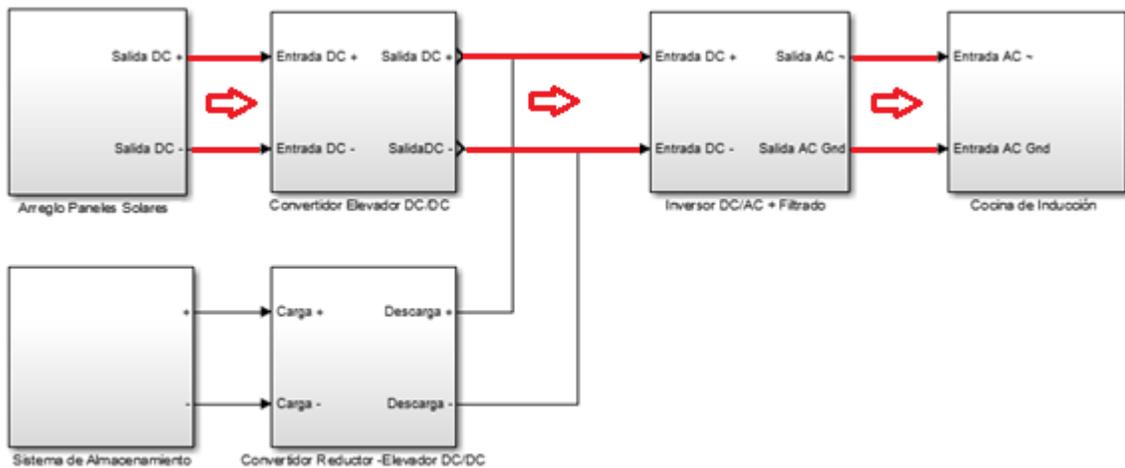


Figura 64. Sentido de entrega de energía del arreglo de paneles a la carga, segundo modelo

- El máximo rizado de corriente pico-pico (Δi_L) permitido en el inductor, será el 10% de la corriente proveniente del arreglo de módulos fotovoltaicos, como se muestra en la ecuación Ec. 99.

$$\Delta i_L < 5\% I_{pv} = 2.8A \quad \text{Ec. 101}$$

- La tensión de salida del convertidor (V_o) alimentará en cascada al siguiente convertidor elevador, y su salida será 80 v.
- El máximo rizado de tensión pico-pico (ΔV_o) permitido en el capacitor, será el 2.5% de la tensión de salida mostrada en la ecuación Ec. 102.

$$\Delta V_o < 2.5\% V_o = 2V \quad \text{Ec. 102}$$

- El ciclo de trabajo se obtiene mediante la ecuación fundamental del convertidor elevador, como se muestra en la ecuación Ec. 103.

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} = 0.78 \quad \text{Ec. 103}$$

- La frecuencia de conmutación del interruptor se muestra en la ecuación Ec. 104.

$$f = 20 \text{ KHz} \quad \text{Ec. 104}$$

Dimensionamiento del Inductor

Para determinar el valor de la inductancia se usará la ecuación Ec. 105, se añade un margen de seguridad del 25% y se encuentra el valor de L:

$$L = \frac{D(1-D)V_o}{\Delta i_L f} \quad \text{Ec. 105}$$

$$L = 240\mu F + 25\% = 300 \mu H \quad \text{Ec. 106}$$

Se realiza la simulación del convertidor elevador con el valor de L de la ecuación Ec. 106. El rizado pico-pico del inductor L se muestra en la Figura 65,

donde Δi_L tiene un valor de 0.4 A, que representa el 1.4% del valor de I_{pv} , se cumple con el requerimiento de diseño $\Delta i_L < 10\% I_{pv}$.

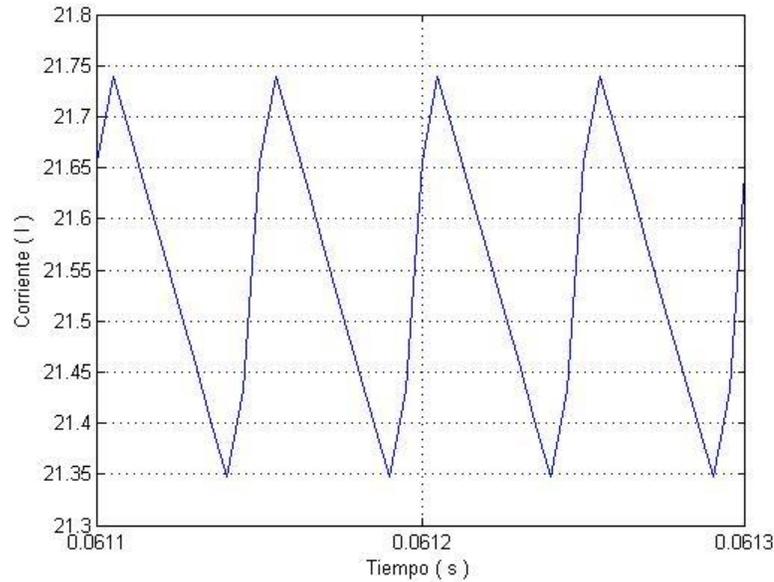


Figura 65. Rizado en el Inductor L, convertidor elevador uno, segundo modelo

Dimensionamiento del Capacitor

Para determinar el valor del capacitor se usará la ecuación Ec. 107, se añade un margen de seguridad del 25% y se encuentra el valor de C:

$$C = \frac{I_o \cdot D}{\Delta V_o \cdot f} \quad \text{Ec. 107}$$

$$C = 416 \mu F + 25\% = 520 \mu F \quad \text{Ec. 108}$$

Se realiza la simulación del convertidor elevador con el valor de C de la ecuación Ec. 108. El rizado pico-pico del capacitor C se muestra en la Figura 66, donde ΔV_o tiene un valor de 1.46V, que representa el 73% del valor de V_o , se cumple con el requerimiento de diseño $\Delta V_o < 2.5\% V_o$.

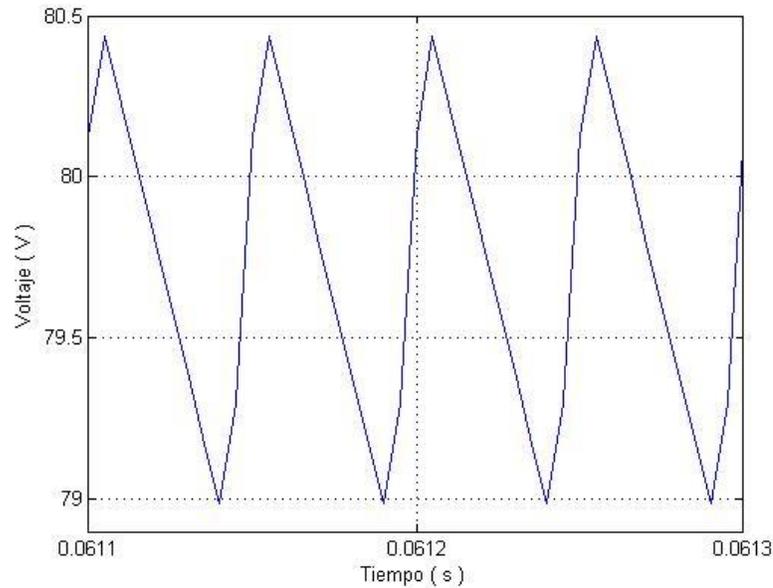


Figura 66. Rizado en el Capacitor C, convertidor elevador uno, segundo modelo

➤ **Convertidor elevador DC – DC [80 Vdc - 200 Vdc]**

El convertidor elevador recibirá el voltaje proveniente del arreglo de módulos, para el diseño de este convertidor se realizarán las siguientes consideraciones:

- La tensión de entrada del convertidor será la tensión entregada por el primer convertidor diseñado con un valor de 80 V.
- El máximo rizado de corriente pico-pico (Δi_L) permitido en el inductor, será el 10% de la corriente proveniente primer convertidor elevador, como se muestra en la ecuación Ec. 109.

$$\Delta i_L < 5\% I_{pv} = 2.8A \quad \text{Ec. 109}$$

- La tensión de salida del convertidor (V_o) alimentará en cascada al siguiente convertidor elevador, y su salida será 200 v.
- El máximo rizado de tensión pico-pico (ΔV_o) permitido en el capacitor, será el 1% de la tensión de salida, expresada en la ecuación Ec. 110.

$$\Delta V_o < 1\% V_o = 2 V \quad \text{Ec. 110}$$

- El ciclo de trabajo se obtiene mediante la ecuación fundamental del convertidor elevador, como se muestra en la ecuación Ec. 111.

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} = 0.6 \quad \text{Ec. 111}$$

- La frecuencia de conmutación del interruptor se muestra en la ecuación Ec. 112.

$$f = 20 \text{ Khz} \quad \text{Ec. 112}$$

Dimensionamiento del Inductor

Para determinar el valor de la inductancia se usará la ecuación Ec. 113, se añade un margen de seguridad del 25% y se encuentra el valor de L:

$$L = \frac{D (1 - D) V_o}{\Delta i_L f} \quad \text{Ec. 113}$$

$$L = 875 \mu F + 25\% = 1090 \mu H \quad \text{Ec. 114}$$

Se realiza la simulación del convertidor elevador con el valor de L de la ecuación Ec. 114. El rizado pico-pico del inductor L se muestra en la Figura 67, donde Δi_L tiene un valor de 0.14 A, que representa el 0.64% del valor de I_{pv} , se cumple con el requerimiento de diseño $\Delta i_L < 10\% I_{pv}$.

Dimensionamiento del Capacitor

Para determinar el valor del capacitor se usará la ecuación Ec. 115, se añade un margen de seguridad del 25% y se encuentra el valor de C:

$$C = \frac{I_o \cdot D}{\Delta V_o \cdot f} \quad \text{Ec. 115}$$

$$C = 317 \mu F + 25\% = 400 \mu F \quad \text{Ec. 116}$$

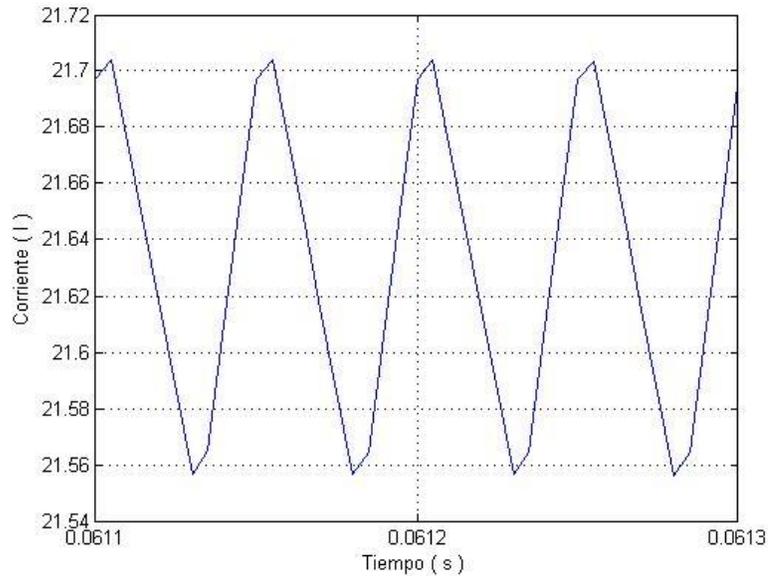


Figura 67. Rizado en el Inductor L, convertidor elevador dos, segundo modelo

Se realiza la simulación del convertidor elevador con el valor de C de la ecuación Ec. 116. El rizado pico-pico del capacitor C se muestra en la Figura 68, donde ΔV_o tiene un valor de 0.6 V, que representa el 0.3% del valor de V_o , se cumple con el requerimiento de diseño $\Delta V_o < 1\% V_o$.

Después de verificar que el diseño de los dos convertidores elevadores cumpla con los requerimientos, se procede a realizar una conexión en cascada, se obtiene las siguientes graficas correspondientes al voltaje y corriente de salida, mostrada en la Figura 69.

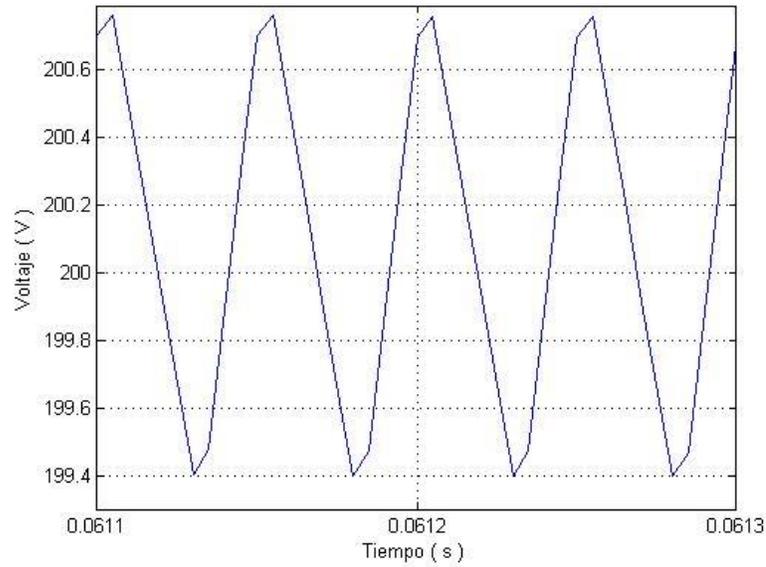


Figura 68. Rizado en el Capacitor C, convertidor elevador dos, segundo modelo

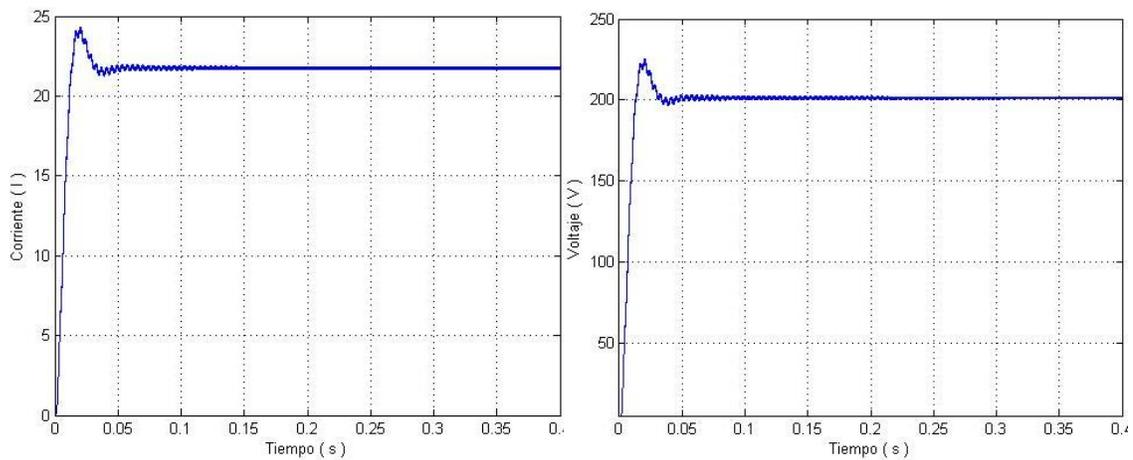


Figura 69. Salida del convertidor elevador en cascada.

3.3.2.4 Diseño del convertidor reductor elevador DC – DC

Para el diseño del convertidor reductor elevador DC-DC se usará la topología similar al diseñado en el primer modelo.

Para el diseño del convertidor reductor elevador se realizan las siguientes consideraciones:

- La etapa reductora tendrá una entrada de 200 v desde el convertidor elevador y la salida será 12 v hacia el sistema de acumulación. La salida de la etapa elevadora será de 200 v hacia el inversor DC-AC y entrada será 12 v desde el sistema de acumulación.
- El máximo rizado de corriente pico-pico (Δi_L) permitido en el inductor, será el 10% de la corriente proveniente del sistema de acumulación, como se muestra en la ecuación Ec. 117

$$\Delta i_L < 10\% I_{bat} = 2.63A \quad \text{Ec. 117}$$

- El máximo rizado de tensión pico-pico (ΔV_o) permitido en el capacitor, será el 1% de V_o :

$$\Delta V_o < 1\% V_o = 2.4 V \quad \text{Ec. 118}$$

- El ciclo de trabajo para la etapa de elevación de tensión está definido por la ecuación fundamental del convertidor elevador, como se muestra en la ecuación Ec. 119.

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} = 0.94 \quad \text{Ec. 119}$$

- El ciclo de trabajo para la etapa de reducción de tensión está definido por la ecuación fundamental del convertidor reductor, como se muestra en la ecuación Ec. 120.

$$D = \frac{V_o}{V_i} = 0.06 \quad \text{Ec. 120}$$

- La frecuencia de conmutación de los interruptores se muestra en la ecuación Ec. 121.

$$f = 6 \text{ Khz} \quad \text{Ec. 121}$$

Dimensionamiento del Inductor

Para determinar el valor de la inductancia se usarán las ecuaciones características del inductor de cada tipo de convertidor, se usará el valor de inductor de mayor valor que trabaje en régimen continuo, este inductor es compartido tanto para elevar como reducir tensión.

En la ecuación Ec. 122 y Ec. 123 se muestra las ecuaciones correspondientes al convertidor elevador y reductor respectivamente, al valor calculado se añade un margen de seguridad del 25% y se encuentra el valor de L expresado en la ecuación Ec. 124.

$$L_{elevador} = \frac{D(1-D)V_o}{\Delta i_L f} \quad \text{Ec. 122}$$

$$L_{reductor} = \frac{V_o}{\Delta i_L f} \quad \text{Ec. 123}$$

$$L = 325 \mu H \quad \text{Ec. 124}$$

Se realiza la simulación con los valores obtenidos para la etapa de carga, de acuerdo a la Figura 63, en la cual se observa que la corriente producida por el arreglo de módulos es enviada a la etapa de elevación de voltaje y posterior al reductor elevador al entregar una corriente de 57 A, como se observa en la Figura 70.

En la etapa de descarga de acuerdo a la Figura 62, con los datos calculados se observa que el rizado pico-pico del inductor L, Δi_L tiene un valor de 0.2 A, que representa el 1.14% del valor de I_{pv} , se cumple con el requerimiento de diseño $\Delta i_L < 10\% I_{bat}$.

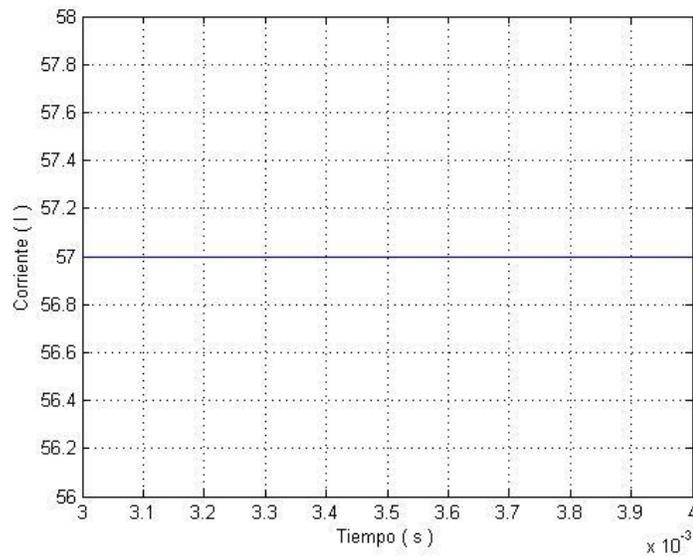


Figura 70. Rizado en el Inductor L, convertidor reductor elevador, segundo modelo

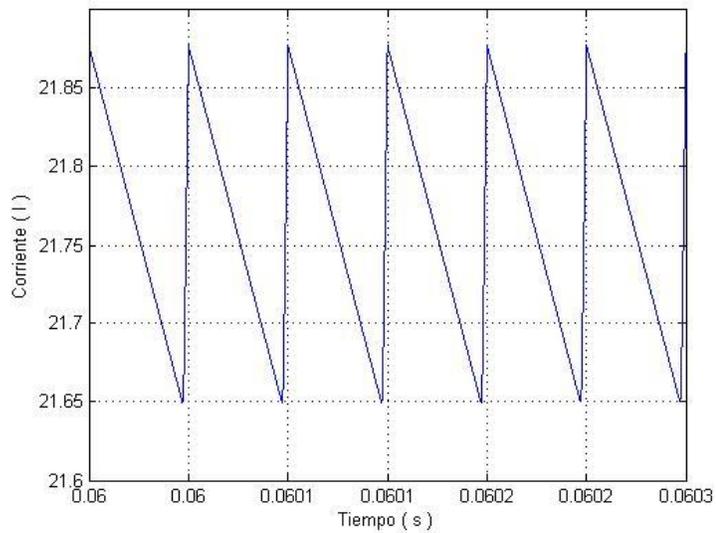


Figura 71. Rizado de Corriente en Inductor, convertidor reductor elevador, segundo modelo

Dimensionamiento del Capacitor

Para determinar el valor del capacitor se usará la ecuación Ec. 125, se añade un margen de seguridad del 25% y se encuentra el valor de C:

$$C = \frac{I_o \cdot D}{\Delta V_o \cdot f} \quad \text{Ec. 125}$$

$$C = 507 + 25\% = 650 \mu F \quad \text{Ec. 126}$$

Se realiza la simulación con los valores obtenidos para la etapa de carga, de acuerdo a la Figura 63, en la cual se observa que el voltaje de entrada al sistema de acumulación, como se observa en la Figura 72.

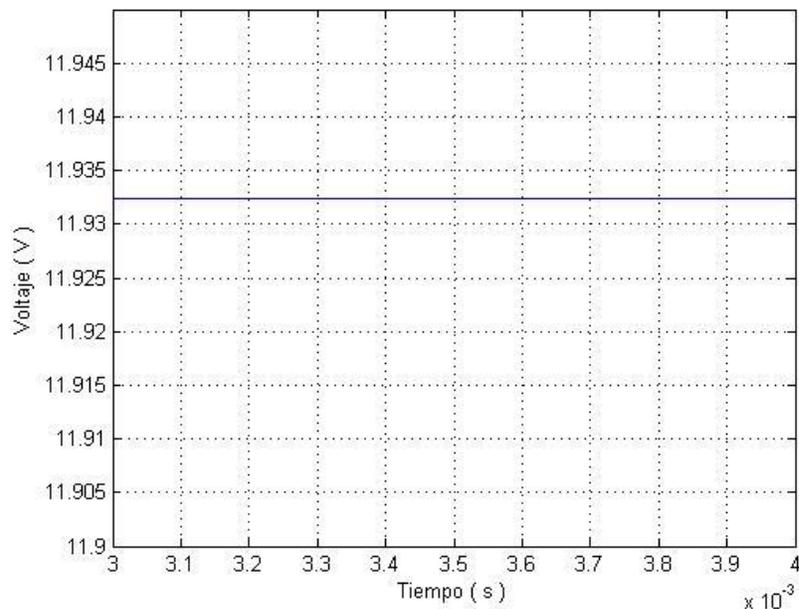


Figura 72. Rizado en el Capacitor C, convertidor reductor elevador, segundo modelo

Se realiza la simulación para la etapa de descarga, de acuerdo a la Figura 62, El rizado pico-pico del capacitor C se muestra en la Figura 73, donde ΔV_o tiene un valor de 2.03 V, que representa el 0.84% del valor de V_o , se cumple con el requerimiento de diseño $\Delta V_o < 1\% V_o$.

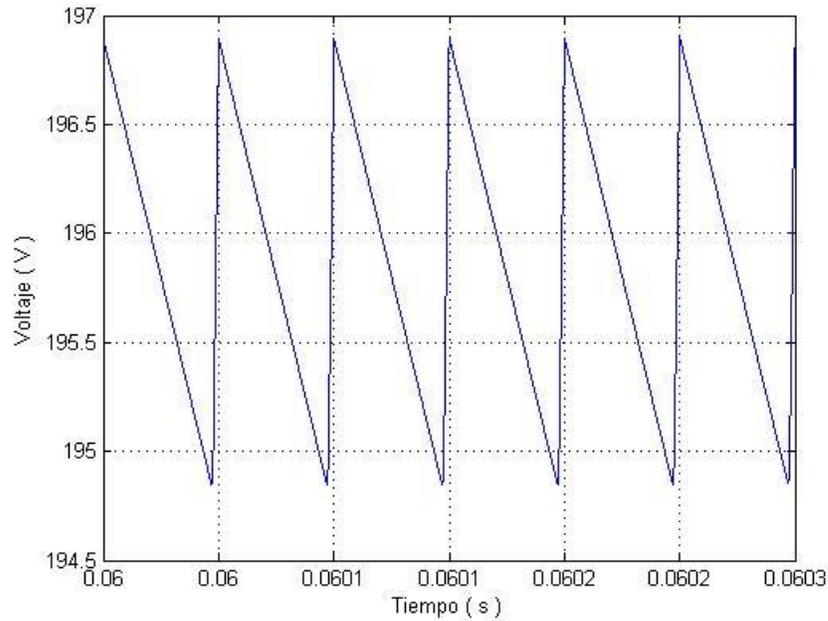


Figura 73. Rizado en el Capacitor, convertidor reductor elevador, segundo modelo

3.4 Técnicas de Control

En los sistemas de generación eléctrica solar fotovoltaica con y sin sistema de almacenamiento, el arreglo de módulos fotovoltaicos son los encargados de proporcionar la energía tanto para cargar el sistema de almacenamiento como para abastecer directamente a la carga, las variaciones de irradiación y temperatura producen perturbaciones que afectan el desempeño óptimo al momento de generar energía, al ser necesario la integración de controladores que garanticen la estabilidad en cada uno de los sistema.

3.4.1 Controladores del Sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

A continuación se diseñará los controladores del sistema fotovoltaicos sin sistema de almacenamiento, para las etapas de potencia del convertidor elevador

DC/DC e inversor DC/AC y filtro, el diseño del controlador de este último dispositivo servirá para los modelos del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, por lo que se diseñará una sola vez.

3.4.1.1 Diseño del Controlador del Convertidor de potencia DC – DC

De acuerdo al diagrama de bloques de la configuración del sistema de generación fotovoltaica sin sistema de almacenamiento, Figura 39. El convertidor DC-DC está conectado en serie con el subsistema de arreglo de paneles, este subsistema entregará el voltaje y la corriente al convertidor, cuyos máximos valores se expresa en Ec. 40Ec. 41. La variación de voltaje y corriente se debe principalmente por dos factores: la temperatura y la Irradiancia. La variación de temperatura a la que trabaja el módulo afecta directamente al voltaje de salida y la variación de irradiación afecta directamente a la corriente de salida del subsistema, al considerar estos dos factores es necesario controlar una de las dos variables, de esta manera el controlador se orientará a controlar el voltaje de salida del convertidor, ante una entrada que varía en voltaje proveniente del arreglo de paneles.

En esta sección se plantea el modelo matemático del convertidor DC-DC mediante el análisis en estado estático y dinámico, de cuyo resultado se obtendrá la función de transferencia de la planta convertidor DC-DC. Además este análisis servirá para calcular las funciones de transferencia de los modelos en el sistema de generación fotovoltaica con sistema de almacenamiento.

➤ Análisis en estado estático:

Cuando el interruptor está cerrado $S_w = 1$, como se muestra en la Figura 16, al aplicar la Ley de tensión de Kirchhoff en la malla que incluye la fuente V_i , la bobina L y el interruptor S_w cerrado, se obtiene la ecuación Ec. 128, y en la malla que incluye el capacitor C y la carga R se obtiene la ecuación Ec. 130.

$$V_L = V_i = \text{constante} = L * \frac{di_L}{dt} \quad \text{Ec. 127}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad \text{Ec. 128}$$

$$i_c = -i_o = C * \frac{dv_o}{dt} \quad \text{Ec. 129}$$

$$\frac{dv_o}{dt} = - \frac{V_o}{C * R} \quad \text{Ec. 130}$$

Cuando el interruptor está abierto $Sw = 0$, como se muestra en la Figura 17 , al aplicar la Ley de tensión de Kirchoff en la malla que incluye la fuente V_i , la bobina L y el capacitor C se obtienen la ecuación Ec. 132 , y en la malla que incluye el capacitor C y la carga R se obtiene la ecuación Ec. 134.

$$V_L = V_i - V_o = L * \frac{di_L}{dt} \quad \text{Ec. 131}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad \text{Ec. 132}$$

$$i_c = i_L - i_o = C * \frac{dv_o}{dt} \quad \text{Ec. 133}$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{CR} \quad \text{Ec. 134}$$

➤ **Análisis en estado dinámico:**

El comportamiento dinámico del convertidor elevador se expresa mediante espacio de estados, la topología del convertidor elevador contiene un solo interruptor, de esta manera el comportamiento dinámico será definido mediante las ecuaciones de acuerdo al estado del interruptor:

Cuando $Sw = 1$

$$\dot{x} = A_{ON}x + B_{ON} \quad \text{Ec. 135}$$

Cuando $Sw = 0$

$$\dot{x} = A_{OFF}x + B_{OFF} \quad \text{Ec. 136}$$

De la ecuación Ec. 135 y Ec. 136, x es el vector de las variables de estado que para el análisis serán la intensidad en la bobina i_L y la tensión en el capacitor V_C , A_{ON} y A_{OFF} son matrices de dimensión $n \times n$, B_{ON} y B_{OFF} son matrices de dimensión $n \times 1$, llamadas matrices de transición.

La salida V_o se puede expresar mediante variables de estado mediante las siguientes ecuaciones:

Cuando $Sw = 1$

$$V_o = C_{ON}x \quad \text{Ec. 137}$$

Cuando $Sw = 0$

$$V_o = C_{OFF}x \quad \text{Ec. 138}$$

Las ecuaciones anteriores se pueden aproximar mediante un modelo promediado en el espacio de estados, cuando el periodo de conmutación es constante, este modelo promediado permite encontrar un modelo continuo que aproxime el progreso de las variables en cada uno de los intervalos de conmutación, la ecuación Ec. 139 expresa el modelo promediado :

$$\dot{x} = [A_{ON}d + A_{OFF}(1 - d)]x + [B_{ON}d + B_{OFF}(1 - d)] \quad \text{Ec. 139}$$

Donde la ecuación se puede expresar de manera resumida como:

$$\dot{x} = Ax + B \quad \text{Ec. 140}$$

Donde:

$$A = A_{ON}d + A_{OFF}(1 - d) \quad \text{Ec. 141}$$

$$B = B_{ON}d + B_{OFF}(1 - d) \quad \text{Ec. 142}$$

La salida V_o se puede expresar mediante el modelo promediado mostrado en la siguiente ecuación:

$$V_o = Cx \quad \text{Ec. 143}$$

Donde:

$$C = C_{ON}d + C_{OFF}(1 - d) \quad \text{Ec. 144}$$

Para hallar la función de transferencia se relacionará la señal de salida con la señal de entrada, esta relación se calculará mediante las ecuaciones obtenidas tanto en el análisis en estado estacionario como en el estado dinámico, se plantearán las matrices de transición para el convertidor elevador para los dos estados del interruptor:

Cuando $Sw = 1$

$$\dot{x} = A_{ON} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + B_{ON}[V_{in}] \quad \text{Ec. 145}$$

$$A_{ON} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad B_{ON} = \begin{bmatrix} 1 \\ L \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 146}$$

$$V_o = C_{ON} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 147}$$

$$C_{ON} = [0 \quad 1] \quad \text{Ec. 148}$$

Cuando $Sw = 0$

$$\dot{x} = A_{OFF} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + B_{OFF}[V_{in}] \quad \text{Ec. 149}$$

$$A_{OFF} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad B_{OFF} = \begin{bmatrix} 1 \\ L \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 150}$$

$$V_o = C_{OFF} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 151}$$

$$C_{OFF} = [0 \quad 1] \quad \text{Ec. 152}$$

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

$$\frac{V_o}{V_i} = -CA^{-1}B \quad \text{Ec. 153}$$

$$\dot{x} = [sI - A]^{-1}[(A_{ON} - A_{OFF})x + (B_{ON} - B_{OFF})d(s)] \quad \text{Ec. 154}$$

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{d(s)} = C[sI - A]^{-1}[(A_{ON} - A_{OFF})x + (B_{ON} - B_{OFF})V_{in}] + (C_{ON} - C_{OFF})x \quad \text{Ec. 155}$$

La función de transferencia del convertidor elevador queda definida mediante Ec. 156, al evaluar la ecuación con los valores obtenidos en la etapa de diseño se obtiene la función de transferencia como se muestra en Ec. 157.

$$G(s) = \frac{V_o}{1-D} \frac{1 - \frac{Ls}{(1-D)^2 x R}}{\frac{LC s^2}{(1-D)^2} + \frac{Ls}{(1-D)^2 x R} + 1} \quad \text{Ec. 156}$$

$$G_p(s) = \frac{-0.07974 s + 200}{6.13 \times 10^{-6} s^2 + 0.0003987 s + 1} \quad \text{Ec. 157}$$

Usando la función de transferencia de Ec. 157, mediante el segundo método de Ziegler-Nichols para la sintonización de controladores PID (Ogata 2010), se calcula la ganancia crítica K_{cr} , como se muestra en la Figura 74.



Figura 74. Sistema en lazo cerrado del convertidor elevador 52v a 200v, para calcular K_{cr}

Al resolver el diagrama de bloques de la Figura 74, mediante las ecuaciones Ec. 158 y Ec. 159.

$$H(s) = \frac{\frac{-0.07974 Kcr s + 200Kcr}{6.13x10^{-6}s^2 + 0.0003987 s + 1}}{1 + \frac{-0.07974 Kcr s + 200 Kcr}{6.13x10^{-6}s^2 + 0.0003987 s + 1}} \quad \text{Ec. 158}$$

$$H(s) = \frac{-0.07974 Kcr s + 200Kcr}{6.13x10^{-6}s^2 + (0.0003987 - 0.07974 Kcr) s + (200 Kcr + 1)} \quad \text{Ec. 159}$$

De Ec. 159 se obtiene la ecuación característica, a la cual se aplica en criterio de Ruth- Hurwitz (Ogata 2010), que se describe a continuación:

s^2	$6.13x10^{-6}$	$(200 Kcr + 1)$
s^1	$(0.0003987 - 0.07974 Kcr)$	0
s^0	$\frac{[(0.0003987 - 0.07974 Kcr)x(200 Kcr + 1)]}{(0.0003987 - 0.07974 Kcr)}$	

Para obtener Kcr :

$$Kcr > -\frac{1}{200} \quad \text{Ec. 160}$$

Con la ganancia $Kcr = 1$, la ecuación característica se muestra en Ec. 162

$$6.13x10^{-6} s^2 + (0.0003987 - 0.07974 (1)) s + (200(1) + 1) \quad \text{Ec. 161}$$

$$6.13x10^{-6} s^2 - 0.0793 s + 201 = 0 \quad \text{Ec. 162}$$

En Ec. 162, s se reemplaza por jw y se obtiene las raíces de la ecuación característica, el resultado se muestra en Ec. 163 y Ec. 164.

$$w = 9476.2 \quad \text{Ec. 163}$$

$$w = 3460.2 \quad \text{Ec. 164}$$

Se obtiene el periodo de oscilación sostenida y al reemplazar los valores obtenidos de w , en Ec. 165.

$$T_{cr} = \frac{2\pi}{w} \quad \text{Ec. 165}$$

$$T_{cr1} = 6.63 \times 10^{-4} \quad \text{Ec. 166}$$

$$T_{cr2} = 1.81 \times 10^{-3} \quad \text{Ec. 167}$$

Se determinan los valores de k_p y T_i

$$k_p = 0.6 \times K_{cr} = 3.97 \times 10^{-4} \quad \text{Ec. 168}$$

$$T_i = 0.5 \times T_{cr1} = 3.31 \times 10^{-4} \quad \text{Ec. 169}$$

La ecuación Ec. 170 , representa la función de transferencia del controlador PI, en la que se reemplaza los valores calculados de Ec. 169 y Ec. 168, y se obtiene la función de transferencia final del controlador mostrada en Ec. 171.

$$G_c(s) = \frac{K_p \cdot s + \frac{K_p}{T_i}}{s} \quad \text{Ec. 170}$$

$$G_c(s) = \frac{3.97 \times 10^{-4} s + 1.199}{s} \quad \text{Ec. 171}$$

Se realiza la simulación del diagrama de bloque de la Figura 75, y se observa que el voltaje de salida V_{out} , sigue al voltaje de referencia V_{in} como se muestra en Figura 76, se comprueba el funcionamiento del controlador.

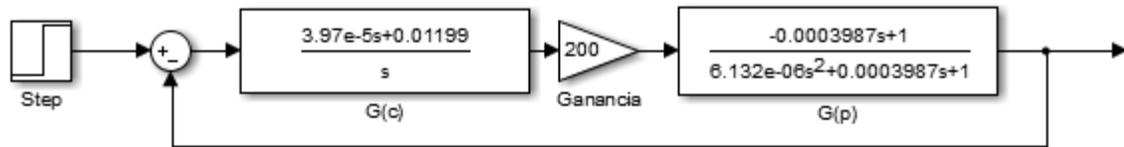


Figura 75. Diagrama de Bloques Controlador PI y Planta, en convertidor elevador de 52V a 200V.

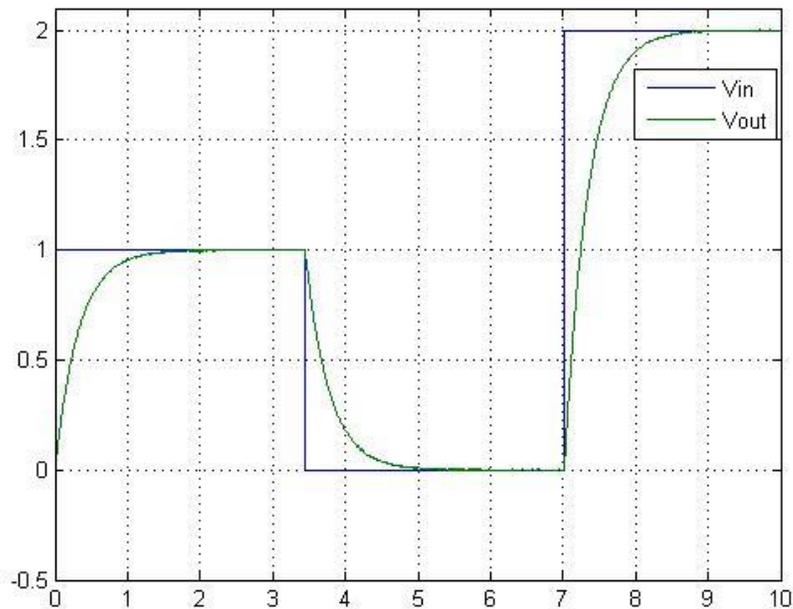


Figura 76. Voltaje de Referencia y Voltaje Controlado en convertidor elevador 52V a 200 V

3.4.1.2 Diseño del controlador del inversor DC-AC [200 Vdc – 120 Vac]

La fuente de energía que alimentará el inversor DC-AC es el convertidor elevador y la carga que estará conectada al inversor es la cocina de inducción que consumirá un nivel de corriente fija, el diagrama se muestra en Figura 39. De acuerdo a lo mencionado no existirán variaciones de corriente, al ser necesario controlar el voltaje en un nivel de 120 V_{rms} .

En esta sección se realiza el análisis del circuito correspondiente al inversor de la Figura 26, relación con inversor con filtro, cuyo resultado se obtendrá la

función de transferencia de la planta inversor, este análisis servirá para calcular la función de transferencia del controlador. Se usará el diseño y controlador del inversor para los dos modelos expuestos para el sistema de generación fotovoltaica con sistema de almacenamiento.

Análisis del circuito del inversor y etapa de filtrado se realiza mediante el análisis voltaje de Kirchhoff Ec. 172, aplicando Laplace Ec. 173

$$V_{in} = V_{R_L} + V_L + V_O \quad \text{Ec. 172}$$

$$V_{in}(s) = I_L(s) \times R_L + I_L(s) \times sL + V_O \quad \text{Ec. 173}$$

El análisis corriente de Kirchhoff Ec. 174, aplicando Laplace Ec. 175

$$I_L = I_C + I_O \quad \text{Ec. 174}$$

$$I_L(s) = sC \times V_O(s) + \frac{V_O(s)}{R} \quad \text{Ec. 175}$$

$$I_L(s) = V_O(s) \times \left(sC + \frac{1}{R} \right) \quad \text{Ec. 176}$$

Se reemplaza la ecuación Ec. 176 en Ec. 173.

$$V_{in}(s) = V_O(s) \times \left(sC + \frac{1}{R} \right) \times sL + V_O(s) + V_O(s) \times \left(sC + \frac{1}{R} \right) \times R_L \quad \text{Ec. 177}$$

$$V_{in}(s) = V_O(s) \times \left[\left(sC + \frac{1}{R} \right) \times sL + 1 + \left(sC + \frac{1}{R} \right) \times R_L \right] \quad \text{Ec. 178}$$

$$V_{in}(s) = V_O(s) \times \left[s^2 CL + \frac{sL}{R} + 1 + sCR_L + \frac{R_L}{R} \right] \quad \text{Ec. 179}$$

$$V_{in}(s) = V_O(s) \times \left[\frac{s^2 RCL + s(LRCR_L) + R + R_L}{R} \right] \quad \text{Ec. 180}$$

La relación que expresa el voltaje de salida V_{in} con voltaje de entrada V_{DC} , se muestra en Ec. 181. Donde m es el ancho de los pulsos con los que se controlan los interruptores del inversor.

$$V_{in}(s) = m(s) \times V_{DC} \quad \text{Ec. 181}$$

Se reemplaza la ecuación Ec. 180 en Ec. 181.

$$m(s) \times V_{DC} = V_O(s) \times \left[\frac{s^2 RCL + s(LRCR_L) + R + R_L}{R} \right] \quad \text{Ec. 182}$$

La función de transferencia del inversor que relaciona el voltaje de salida con la variación de pulsos que controlan los interruptores del inversor se muestra en Ec. 183. Al reemplazar los valores obtenidos en la etapa de diseño del inversor se obtiene la función de transferencia de la planta inversor $G_p(s)$, que se muestra en Ec. 184.

$$\frac{V_O(s)}{m(s)} = \frac{V_{DC} \times R}{s^2 RCL + s(LRCR_L) + R + R_L} \quad \text{Ec. 183}$$

$$G_p(s) = \frac{120}{2.80 \times 10^{-8} s^2 + 1.80 \times 10^{-5} s + 1.07} \quad \text{Ec. 184}$$

La sintonización del controlador se realiza mediante el segundo método de Ziegler-Nichols para controladores PID (Ogata 2010), se calculará la ganancia crítica K_{cr} , de la función de transferencia del inversor, expresada en la ecuación Ec. 184, el procedimiento de cálculo para la función de transferencia del controlador es similar al realizado para el convertidor elevador. La función de transferencia del controlador se muestra en Ec. 185.

$$G_c(s) = \frac{3.285 s^2 + 2.475 \times 10^4 s + 1.644 \times 10^7}{s^2 + 1.786 \times 10^5 s} \quad \text{Ec. 185}$$

El diagrama de bloques representa un sistema en lazo cerrado de la planta del inversor $G_p(s)$, en serie con el controlador PID $G_c(s)$, con realimentación unitaria, excitado mediante una fuente sinusoidal, como se observa en Figura 77.

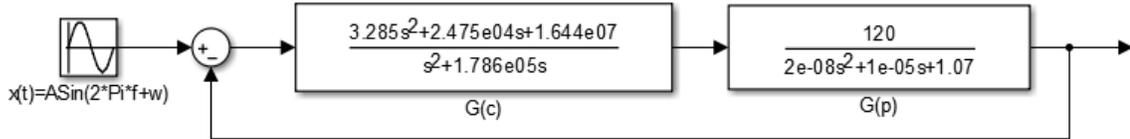


Figura 77. Diagrama de Bloques Controlador PID G(c) y Planta G (p), para inversor 200 VDC a 120 VAc

Se realiza la simulación del diagrama de bloque de la Figura 77, se observa que el voltaje de salida V_{out} , sigue al voltaje de referencia V_{ref} como se muestra en Figura 78, se comprueba el funcionamiento del controlador.

3.4.2 Controladores del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento

A continuación se diseñará los controladores del sistema fotovoltaicos con sistema de almacenamiento para los dos modelos propuestos, para la etapa de potencia como el convertidor elevador DC/DC y convertidor reductor elevador DC/DC.

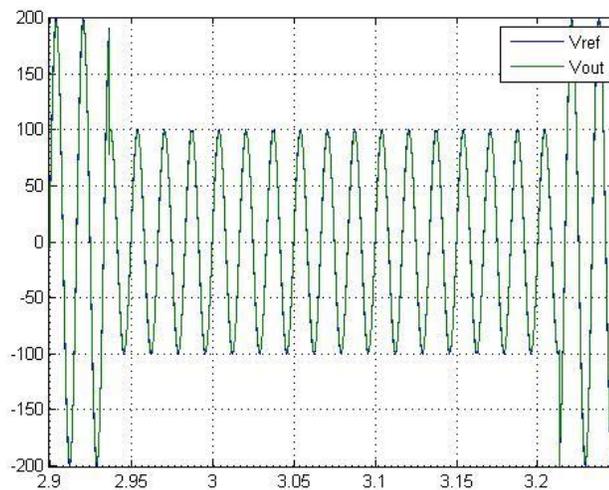


Figura 78. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para inversor 200 VDC a 120 VAc

3.4.2.1 Primer Modelo

➤ Diseño del Controlador del Convertidor de potencia DC – DC

El controlador del convertidor elevador del primer modelo, será el encargado de regular el voltaje proveniente del convertidor reductor elevador, como se muestra en Figura 50, el procedimiento de cálculo de la planta $Gp(s)$ y su respectivo controlador $Gc(s)$ será similar al calculado en el sistema de generación fotovoltaica sin sistema de almacenamiento.

La función de transferencia del convertidor elevador está definido por Ec. 156, al reemplazar los valores obtenidos en la etapa de diseño se obtiene la función de transferencia en lazo abierto, como se muestra en Ec. 186

$$Gp(s) = \frac{-0.01625 s + 200}{2.5 \times 10^{-6} s^2 + 8.127 \times 10^{-5} s + 1} \quad \text{Ec. 186}$$

La sintonización del controlador se realiza mediante el segundo método de Ziegler-Nichols para controladores PID (Ogata 2010). El procedimiento de cálculo para la función de transferencia del controlador es similar al realizado en los convertidores anteriores. La función de transferencia del controlador se muestra en Ec. 187.

$$Gc(s) = \frac{1.717s^2 + 912.6 s + 1.067 \times 10^5}{s^2 + 3.94 \times 10^4 s} \quad \text{Ec. 187}$$

El diagrama de bloques representa un sistema en lazo cerrado de la planta del convertidor elevador $Gp(s)$, en serie con el controlador PID $Gc(s)$, con realimentación unitaria, excitado mediante una fuente tipo escalón, como se observa en Figura 79.

Se realiza la simulación del diagrama de bloque de la Figura 79, se observa que el voltaje de salida V_{out} , sigue al voltaje de referencia V_{ref} como se muestra en Figura 80, se comprueba el funcionamiento del controlador.

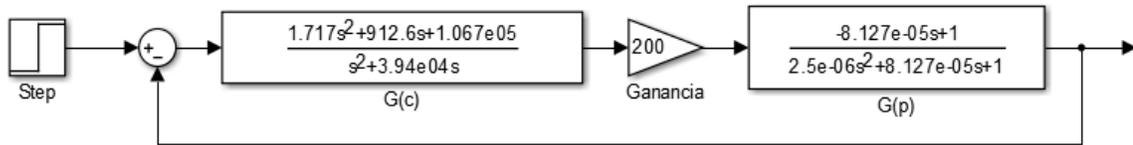


Figura 79. Diagrama de Bloques Controlador PID $G(c)$ y Planta $G(p)$, para un convertidor elevador de 120 VDC a 200VDC

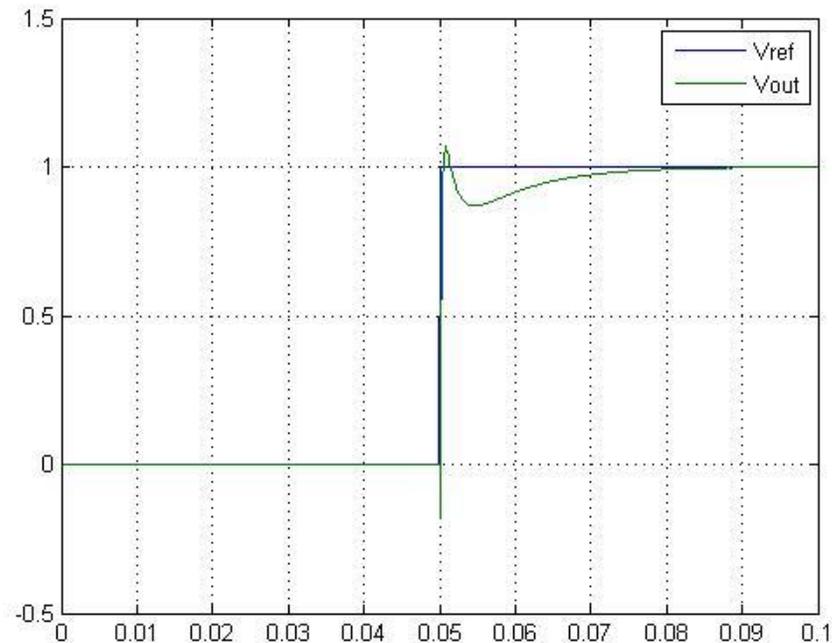


Figura 80. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para convertidor elevador 120 VDC a 200 VDC, primer modelo

➤ Diseño del Controlador del Convertidor Reductor Elevador

El convertidor reductor elevador es un convertidor bidireccional, el cual recibe el voltaje y corriente proveniente del arreglo de módulos. Mediante la etapa de reducción se produce la carga del sistema de almacenamiento y por la etapa de elevación se produce la descarga del sistema de almacenamiento, como se observa en la Figura 50. El control de este convertidor se realiza para la etapa de reducción y elevación de voltaje.

➤ Etapa Elevación de Voltaje

El controlador del convertidor elevador será el encargado de controlar el nivel de voltaje que será entregada a la etapa de elevación como se observa en la Figura 50, el procedimiento de cálculo de la planta $G_p(s)$ y su respectivo controlador $G_c(s)$ se presentan en esta sección mediante procedimientos antes empleados para el cálculo de los mismos.

La función de transferencia del convertidor elevador está definido por Ec. 156, al reemplazar los valores obtenidos en la etapa de diseño se obtiene la función de transferencia en lazo abierto, como se muestra en Ec. 188.

$$G(s) = \frac{-0.1131 s + 120}{1.45 \times 10^{-5} s^2 + 0.0009428 s + 1} \quad \text{Ec. 188}$$

La sintonización del controlador se realiza mediante el segundo método de Ziegler-Nichols para controladores PID (Ogata 2010). Se sigue el procedimiento de cálculo similar al realizado en los convertidores anteriores. La función de transferencia del controlador se muestra en Ec. 189.

$$G(p) = \frac{0.0005315 s + 0.03928}{s} \quad \text{Ec. 189}$$

El diagrama de bloques representa un sistema en lazo cerrado de la planta del convertidor elevador $G_p(s)$, en serie con el controlador PID $G_c(s)$, con realimentación unitaria, excitado mediante una fuente tipo escalón, como se observa en Figura 81.

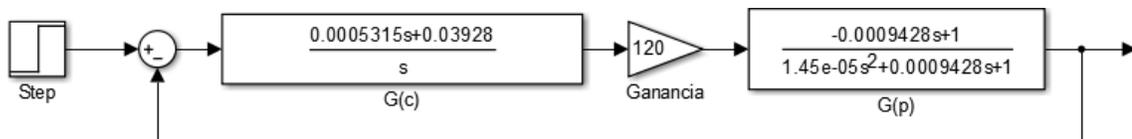


Figura 81. Diagrama de Bloques Controlador PI $G(c)$ y Planta $G(p)$, para un convertidor elevador de 12 VDC a 120VDC

Se realiza la simulación del diagrama de bloque de la Figura 81, se observa que el voltaje de salida V_{out} , sigue al voltaje de referencia V_{ref} como se muestra en Figura 82, se comprueba el funcionamiento del controlador.

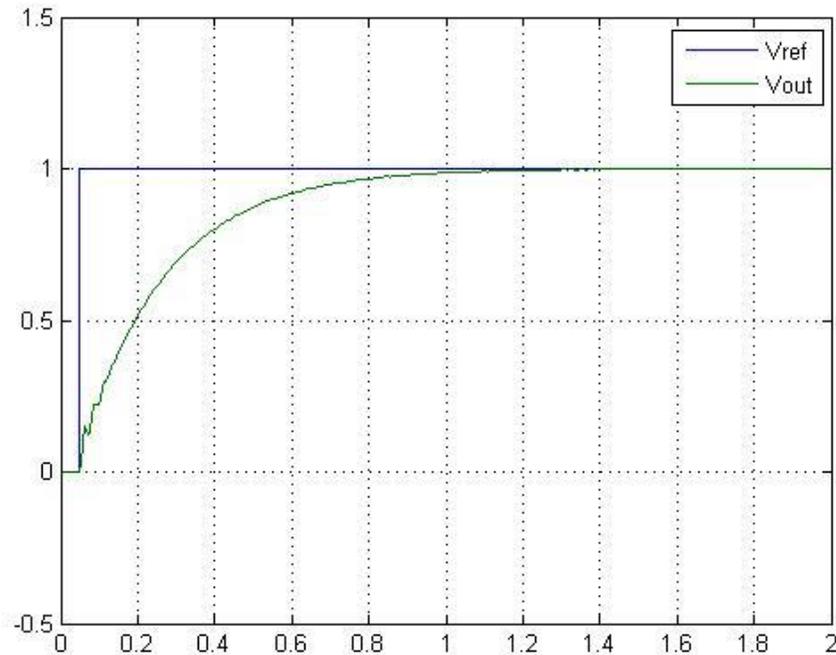


Figura 82. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para convertidor elevador 12 VDC a 120 VDC, primer modelo

➤ Etapa Reducción de Voltaje

El controlador del convertidor reductor será el encargado de controlar el nivel de voltaje que será entregada al sistema de almacenamiento, como se observa en la Figura 50. El análisis del circuito se realizó en el Capítulo 2, a continuación se presenta el análisis en estado estático y dinámico, para despejar la función de transferencia mediante las ecuaciones de estado.

➤ **Análisis en estado estático:**

Cuando el interruptor está cerrado $S_w = 1$, como se muestra en la Figura 20, al aplicar la Ley de tensión de Kirchhoff en el circuito de la figura, se determina las ecuaciones Ec. 190 y Ec. 191 para el voltaje y corriente respectivamente para el estado del convertidor en análisis.

$$V_L = V_i - V_o = L * \frac{di_L}{dt} \quad \text{Ec. 190}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad \text{Ec. 191}$$

Cuando el interruptor está abierto $S_w = 0$, como se muestra en la Figura 21, al aplicar la Ley de tensión de Kirchhoff en el circuito de la figura, se determina las ecuaciones Ec. 192 y Ec. 193 para el voltaje y corriente respectivamente para el estado del convertidor en análisis.

$$V_L = -V_o = L * \frac{di_L}{dt} \quad \text{Ec. 192}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad \text{Ec. 193}$$

➤ **Análisis en estado dinámico:**

El comportamiento dinámico del convertidor reductor se expresa mediante espacio de estados, la topología del convertidor reductor contiene un solo interruptor, de esta manera el comportamiento dinámico será definido mediante las ecuaciones de acuerdo al estado del interruptor.

Cuando $S_w = 1$

$$\dot{x} = A_{ON}x + B_{ON} \quad \text{Ec. 194}$$

Cuando $S_w = 0$

$$\dot{x} = A_{OFF}x + B_{OFF} \quad \text{Ec. 195}$$

La salida V_o se puede expresar mediante variables de estado mediante las siguientes ecuaciones:

Cuando $S_w = 1$

$$V_o = C_{ON}x \quad \text{Ec. 196}$$

Cuando $S_w = 0$

$$V_o = C_{OFF}x \quad \text{Ec. 197}$$

Las ecuaciones anteriores se pueden aproximar mediante un modelo promediado en el espacio de estados, cuando el periodo de conmutación es constante, este modelo promediado permite encontrar un modelo continuo que aproxime el progreso de las variables en cada uno de los intervalos de conmutación, la ecuación Ec. 198 expresa el modelo promediado :

$$\dot{x} = [A_{ON}d + A_{OFF}(1 - d)]x + [B_{ON}d + B_{OFF}(1 - d)] \quad \text{Ec. 198}$$

La salida V_o se puede expresar mediante el modelo promediado mostrado en la siguiente ecuación Ec. 199:

$$C = C_{ON}d + C_{OFF}(1 - d) \quad \text{Ec. 199}$$

Para hallar la función de transferencia se relacionará la señal de salida con la señal de entrada, esta relación se calculará mediante las ecuaciones obtenidas tanto en el análisis en estado estacionario como en el estado dinámico, se plantearán las matrices de transición para el convertidor reductor, en el caso de este convertidor las ecuaciones de estado son iguales tanto para $S_w=1$ y $S_w=0$.

$$\dot{x} = A_{ON} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + B_{ON}[V_{in}] \quad \text{Ec. 200}$$

$$A_{ON} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad B_{ON} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 201}$$

$$V_o = C_{ON} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 202}$$

$$C_{ON} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{R} \quad 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 203}$$

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

$$\frac{V_o}{V_i} = -CA^{-1}B \quad \text{Ec. 204}$$

$$\dot{x} = [sI - A]^{-1}[(A_{ON} - A_{OFF})x + (B_{ON} - B_{OFF})d(s)] \quad \text{Ec. 205}$$

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{d(s)} = C[sI - A]^{-1}[(A_{ON} - A_{OFF})x + (B_{ON} - B_{OFF})V_{in}] + (C_{ON} - C_{OFF})x \quad \text{Ec. 206}$$

La función de transferencia del convertidor reductor queda definida mediante la ecuación *Ec. 207*, al evaluar la ecuación con los valores obtenidos en la etapa de diseño se obtiene la función de transferencia como se muestra en *Ec. 208*.

$$\frac{V_{out}(s)}{D(s)} = \frac{\frac{1}{LC}}{\left[s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC} \right]} \quad \text{Ec. 207}$$

$$G_p(s) = \frac{6.897 \times 10^6}{s^2 + 406.57s + 6.897 \times 10^6} \quad \text{Ec. 208}$$

La sintonización del controlador se realiza mediante el segundo método de Ziegler-Nichols para controladores PID (Ogata 2010). Se sigue el procedimiento de cálculo similar al realizado en los convertidores anteriores. La función de transferencia del controlador se muestra en *Ec. 209*.

$$G_c(s) = \frac{47.58}{s} \quad \text{Ec. 209}$$

El diagrama de bloques representa un sistema en lazo cerrado de la planta del convertidor elevador $G_p(s)$, en serie con el controlador PI $G_c(s)$, con

realimentación unitaria, excitado mediante una fuente tipo escalón, como se observa en Figura 83.

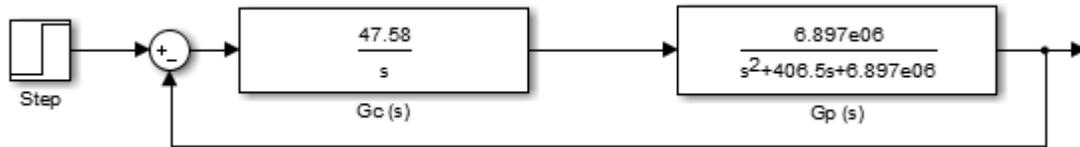


Figura 83. Diagrama de Bloques Controlador PI $G_c(s)$ y Planta $G_p(s)$, para un convertidor reductor de 17 VDC a 12 VDC

Se realiza la simulación del diagrama de bloque de la Figura 83, se observa que el voltaje de salida V_{out} , sigue al voltaje de referencia V_{ref} como se muestra en Figura 84, se comprueba el funcionamiento del controlador.

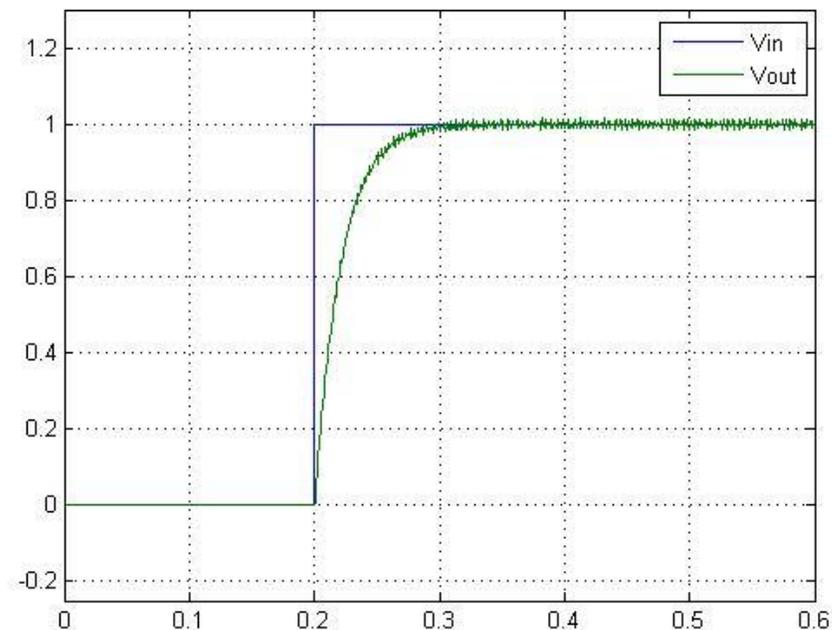


Figura 84. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para convertidor reductor 17 VDC a 12 VDC, primer modelo

3.4.2.2 Segundo Modelo

➤ Diseño del Controlador del Convertidor de potencia DC – DC

El convertidor elevador DC-DC de acuerdo a la topología presentada en la Figura 61, es el convertidor que se conecta con dos dispositivos de acuerdo a su funcionamiento tanto con el inversor y como con el convertidor reductor elevador, la salida de mencionado convertidor debe tener una salida de voltaje constante y estable.

Este convertidor está conformado por dos etapas, como se muestra en la etapa de diseño. La primera etapa eleva el voltaje de 17v a 80v, la segunda etapa eleva el voltaje de 80v a 200v. En este apartado se calcula la planta $G_p(s)$ y su respectivo controlador $G_c(s)$.

La función de transferencia del convertidor elevador está definido por Ec. 156, al reemplazar los valores obtenidos en la etapa de diseño se obtiene la función de transferencia en lazo abierto, como se muestra en Ec. 210.

$$G_p(s) = \frac{-0.108 s + 80}{3.455 \times 10^{-6} s^2 + 0.00135 s + 1} \quad \text{Ec. 210}$$

La sintonización del controlador se realiza mediante el segundo método de Ziegler-Nichols para controladores PID (Ogata 2010). La función de transferencia del controlador se muestra en Ec. 211.

$$G_c(s) = \frac{0.001622 s + 0.2456}{s} \quad \text{Ec. 211}$$

El diagrama de bloques representa un sistema en lazo cerrado de la planta del convertidor elevador $G_p(s)$, en serie con el controlador PI $G_c(s)$, con realimentación unitaria, excitado mediante una fuente tipo escalón, como se observa en Figura 85.

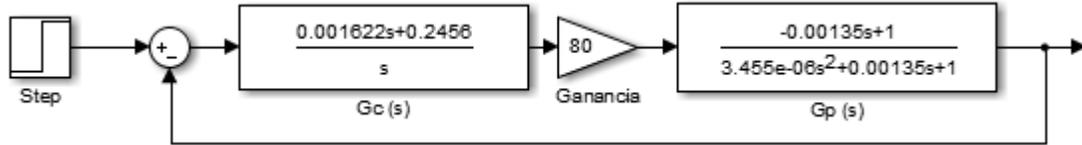


Figura 85. Diagrama de Bloques Controlador PID $G_c(s)$ y Planta $G_p(s)$, para un convertidor elevador de 120 VDC a 200VDC

Se realiza la simulación del diagrama de bloque de la Figura 85, se observa que el voltaje de salida V_{out} , sigue al voltaje de referencia V_{ref} como se muestra en Figura 86, se comprueba el funcionamiento del controlador.

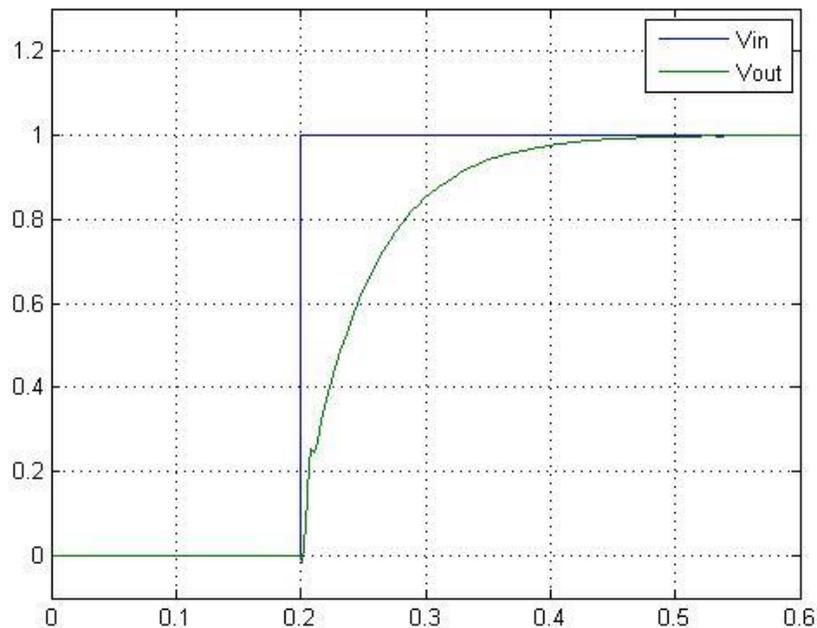


Figura 86. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para convertidor elevador 120 VDC a 200 VDC, primer modelo

➤ Diseño del Controlador del Convertidor Reductor Elevador

Se realiza el diseño de los controladores del convertidor reductor elevador, para las etapas de elevación de voltaje y reducción de voltaje.

➤ Etapa Elevación de Voltaje

La función de transferencia del convertidor elevador está definido por Ec. 156, al reemplazar los valores obtenidos en la etapa de diseño se obtiene la función de transferencia en lazo abierto, como se muestra en Ec. 212.

$$Gp(s) = \frac{-1.929 s + 200}{2.924 \times 10^{-5} s^2 + 0.009143 s + 1} \quad \text{Ec. 212}$$

La sintonización del controlador se realiza mediante el segundo método de Ziegler-Nichols para controladores PID (Ogata 2010). La función de transferencia del controlador se muestra en Ec. 213.

$$Gc(s) = \frac{0.002 s + 0.1041}{s} \quad \text{Ec. 213}$$

El diagrama de bloques representa un sistema en lazo cerrado de la planta del convertidor elevador $Gp(s)$, en serie con el controlador PI $Gc(s)$, con realimentación unitaria, excitado mediante una fuente tipo escalón, como se observa en Figura 87.

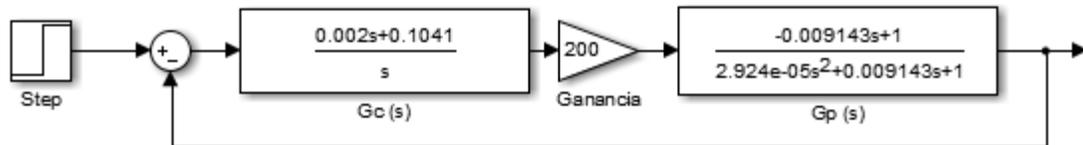


Figura 87. Diagrama de Bloques Controlador PI $G(c)$ y Planta $G(p)$, para un convertidor elevador de 12 VDC a 120VDC

Se realiza la simulación del diagrama de bloque de la Figura 87, se observa que el voltaje de salida V_{out} , sigue al voltaje de referencia V_{ref} como se muestra en Figura 88, se comprueba el funcionamiento del controlador.

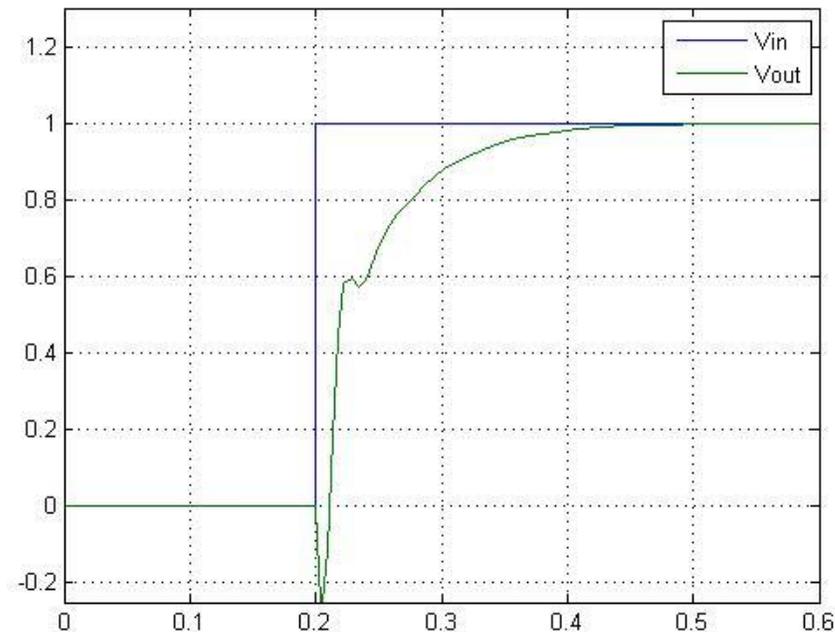


Figura 88. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para convertidor elevador 12 VDC a 120 VDC, primer modelo

➤ Etapa Reducción de Voltaje

El controlador del convertidor reductor será el encargado de controlar el nivel de voltaje que será entregada al sistema de almacenamiento, como se observa en la Figura 61. El análisis del circuito se realizó en el Capítulo 2, de lo cual se determina que la ecuación fundamental del convertidor reductor, que relaciona voltaje de entrada y salida con el ciclo de trabajo, como se observa en la ecuación Ec. 214, expresada en función de Laplace.

$$V_{out}(s) = V_{in}(s) \times D(s) \quad \text{Ec. 214}$$

La función de transferencia del convertidor reductor que relaciona el voltaje de salida con el ciclo de trabajo se muestra en la ecuación Ec. 214. Al reemplazar los valores obtenidos en la etapa de diseño del inversor se obtiene la función de transferencia de la planta inversor $G_p(s)$, que se muestra en Ec. 217.

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s) \times D(s)} = \frac{1}{LCx \left[s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC} \right]} \quad \text{Ec. 215}$$

$$\frac{V_{out}(s)}{D(s)} = \frac{\frac{V_{in}}{LC}}{\left[s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC} \right]} \quad \text{Ec. 216}$$

$$G_p(s) = \frac{4.734 \times 10^6}{s^2 + 312.7s + 4.734 \times 10^6} \quad \text{Ec. 217}$$

La sintonización del controlador se realiza mediante el segundo método de Ziegler-Nichols para controladores PID (Ogata 2010). Se sigue el procedimiento de cálculo similar al realizado en los convertidores anteriores. La función de transferencia del controlador se muestra en Ec. 218

$$G_c(s) = \frac{40.09}{s} \quad \text{Ec. 218}$$

El diagrama de bloques representa un sistema en lazo cerrado de la planta del convertidor elevador $G_p(s)$, en serie con el controlador PID $G_c(s)$, con realimentación unitaria, excitado mediante una fuente tipo escalón, como se observa en Figura 89.

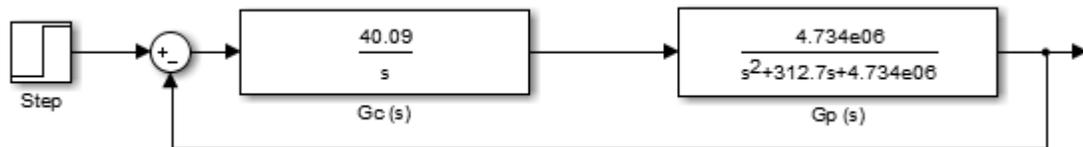


Figura 89. Diagrama de Bloques Controlador PI $G(c)$ y Planta $G(p)$, para un convertidor elevador de 17 VDC a 12 VDC

Se realiza la simulación del diagrama de bloque de la Figura 89, se observa que el voltaje de salida V_{out} , sigue al voltaje de referencia V_{ref} como se muestra en Figura 90, se comprueba el funcionamiento del controlador.

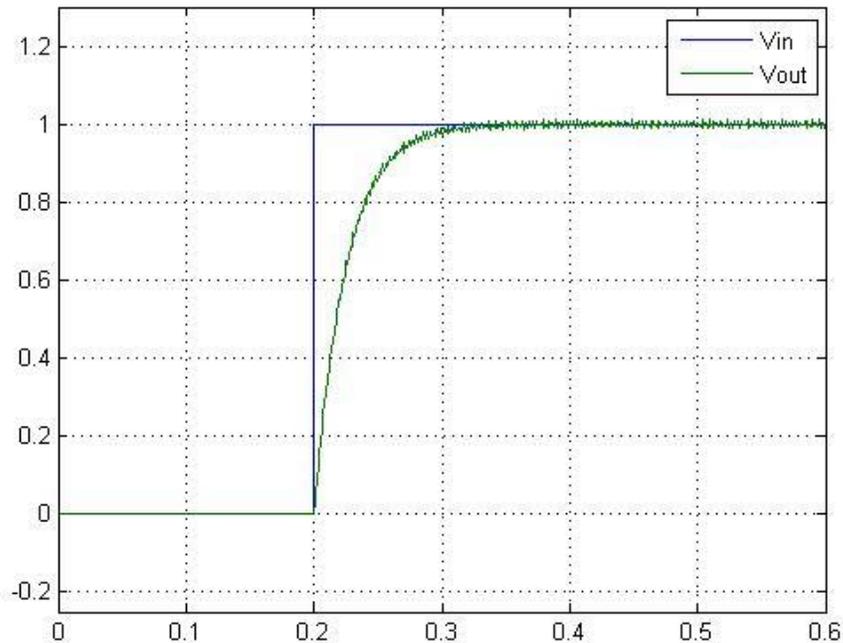


Figura 90. Voltaje de referencia y Voltaje de Salida para convertidor elevador 12 VDC a 120 VDC, primer modelo

3.5 Equipos Comerciales

Los sistemas fotovoltaicos con y sin sistema de almacenamiento están formados por dispositivos como paneles fotovoltaicos, convertidor elevador DC-DC, inversor DC-AC, baterías, como se ha descrito a detalle en la sección de diseño.

De acuerdo al alcance de este proyecto se propone el diseño de las etapas de potencia (convertidores e inversores) y etapas de control de los mismos, los mismos que en conjunto con el arreglo de paneles y sistema de almacenamiento forman los sistemas fotovoltaicos. Mediante las simulaciones desarrolladas en el capítulo siguiente se demostrará el funcionamiento de los mismos, en esta sección se presenta una alternativa a los dispositivos de potencia diseñados, estos pueden ser reemplazados con dispositivos comerciales de acuerdo a las

características de potencia que se detallan en la sección de cada dispositivo de cada sistema fotovoltaico.

El panel fotovoltaico y la batería fueron dispositivos comunes para los sistemas diseñados, las especificaciones eléctricas se presentan en el Anexo 4, ahora se incluye dispositivos comerciales para las etapas de potencia cuyas especificaciones se presentan en el Anexo mencionado en este apartado.

En la Tabla 10 y Tabla 11, se muestran los dispositivos comerciales que conforman cada sistema con la marca y modelo respectivo. Para el sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento se presenta el diseño del convertidor elevador de acuerdo a la sección 3.2.2, dispositivo que no se detalla en la Tabla 10, debido a que el inversor realiza el proceso de conversión e inversión directa del voltaje, no siendo necesario la inclusión de este dispositivo, esta consideración se la realiza también en el sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento.

Tabla 10

Dispositivos comerciales sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

No.	Dispositivo	Marca y Modelo
1	Panel Fotovoltaico	Isofoton I165
2	Inversor	PowerStar W7

Para los sistemas fotovoltaicos con sistemas de almacenamiento, para el primer y segundo modelo, se presentan los dispositivos comerciales. En general para los sistemas fotovoltaicos con sistema de almacenamiento se presenta en la sección □ y 3.3.2.4 el diseño del dispositivo convertidor reductor-elevador, el mismo que realiza el proceso de carga y descarga del sistema de almacenamiento, comercialmente a este se lo conoce como controlador de carga,

la marca y modelo de este dispositivo se presenta en la Tabla 11, además de los dispositivos que conforman el sistema.

Tabla 11

Dispositivos comerciales sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento primer y segundo modelo

No.	Dispositivo	Marca y Modelo
1	Panel Fotovoltaico	Isofoton I165
3	Inversor	PowerStar W7
4	Batería	Ultracell UCG 150-12
5	Controlador de Carga	Pro Star PS-30

Los dispositivos comerciales como el inversor y controlador de carga, mencionados en la Tabla 10 y Tabla 11, contienen su propio controlador, que tienen una interfaz programable por el usuario, no es necesario incorporar un sistema de control adicional. Caso contrario sucede cuando se desee implementar los sistemas de potencia diseñados en este proyecto, como convertidor elevador, convertidor reductor-elevador e inversor, necesariamente deben tener un sistema de control, debido a la variación de voltaje y al modo de funcionamiento de los sistemas de potencia, se propone el uso de un Controlador Lógico Programable (PLC), como sistema de control, el mismo que contendrá entradas y salidas analógicas, y mediante la programación interna de los lazos de control, se podrá controlar los sistemas fotovoltaicos con y sin sistema de almacenamiento, en la Tabla 12 se presenta un PLC, que cumpla con los requerimientos de software y hardware para los sistemas fotovoltaicos.

Tabla 12

Dispositivo comercial, etapa de control

No.	Dispositivo	Marca y Modelo
1	Controlador Lógico Programable	Siemens SIMATIC S7-300
2	Módulo de Entradas Analógicas	SM 331; AI 8 x 14 Bit HS

CAPITULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En este capítulo se muestran las simulaciones desarrolladas en MATLAB-SIMULINK, del diseño de los dispositivos desarrollados en el Capítulo 3, en cada uno de los modelos propuestos para el sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento y para los dos modelos del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, a los cuales se conecta una carga única, la cocina de inducción, el resultado de las simulaciones de los sistemas planteados se presentan a continuación.

4.1 Sistemas de Alimentación para Cocina de Inducción Magnética

La cocina de inducción usada como referencia para el diseño de los sistemas fotovoltaicos, puede ser alimentada mediante el uso de uno de los dos medios:

- **Red Eléctrica:** La cocina de inducción tiene una potencia máxima de 1300 watts, alimentada con un voltaje monofásico de 120 V y frecuencia de 60 Hz.
- **Fotovoltaica:** Una alternativa de energización para la cocina, es el uso de energía producida en un generador fotovoltaico, el mismo que debe cumplir con las especificaciones necesarias para el funcionamiento adecuado de la cocina, descrito en el sistema de alimentación por la red

eléctrica. Bajo esta consideración se realiza las simulaciones que se muestran en la siguiente sección.

4.2 Simulación para un Sistema con y sin sistema de almacenamiento energético.

En la etapa de diseño se ha planteado, un modelo para el sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, se presenta en Figura 39 y dos modelos para el sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, se presenta en Figura 50 y Figura 61 respectivamente.

Se presentará la simulación de cada uno de los sistemas mencionados frente a las siguientes:

- Carga Nominal.
- Variación de radiación solar.

4.2.1 Simulación del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

Se desarrolla la simulación del sistema que se muestra en la Figura 39. De acuerdo a la topología diseñada, la cocina de inducción solo funcionará cuando el generador fotovoltaico genere energía. A continuación se presenta las simulaciones de cada uno de los dispositivos que conforman el mencionado sistema, bajo las condiciones de carga nominal y variación de radiación solar.

4.2.1.1 Simulación para carga nominal

En las siguientes figuras se muestra los resultados de la simulación del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento. En la Figura 91 se muestran el resultado de la simulación para el arreglo de paneles, el voltaje V_{max} , corriente

I_{\max} y potencia P_{\max} , se observa en la figura que los valores mostrados de voltaje, corriente y potencia se mantienen estables bajo condiciones estándar.

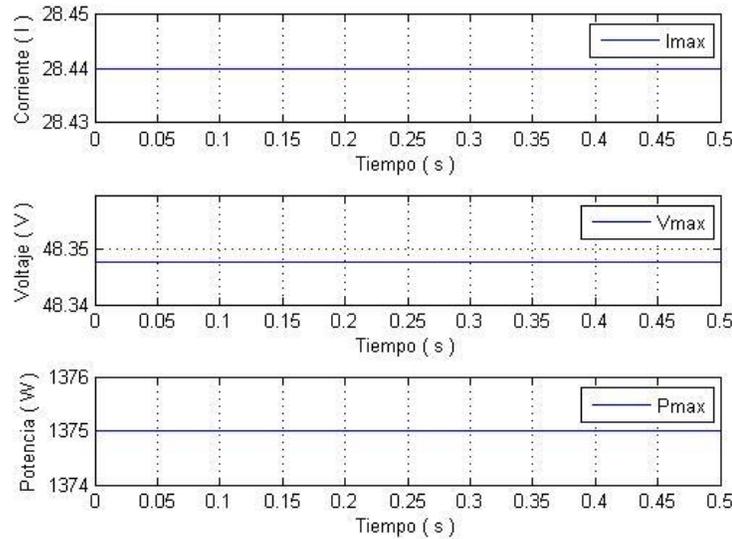


Figura 91. Simulación del Arreglo de Paneles del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento.

En la Figura 92, se muestra la simulación del convertidor elevador, en Figura 92 (a) se muestra la corriente de salida del convertidor elevador y la corriente de entrada que genera el arreglo de paneles, en la Figura 92 (b) se muestra el voltaje de salida del convertidor elevador y el voltaje de salida que genera el arreglo de paneles, en la figura se observa que en $t=0.35$ s, el convertidor alcanza el valor de 200V, voltaje que será entregado al inversor.

En la Figura 93, se muestra la simulación del inversor, en la figura se observa que en $t=0.4$ s el inversor genera un voltaje de salida con una componente sinusoidal con características de frecuencia 60 Hz y amplitud de $117.96 V_{\text{rms}}$, los tiempos de respuesta del convertidor se muestran en la Tabla 13, se observa que existe un tiempo de estabilización del sistema después de 50 ms.

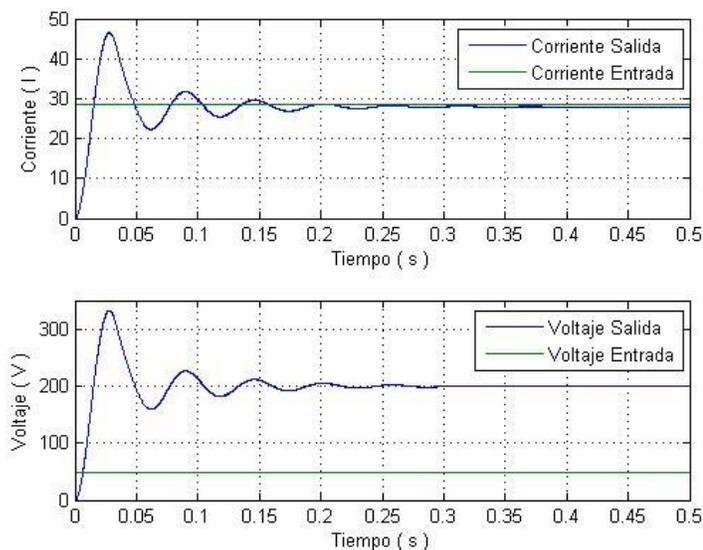


Figura 92. Simulación del Convertidor Elevador del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

Tabla 13

Características de tiempo de respuesta convertidor elevador con carga nominal

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

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

4.2.1.2 Simulación con variación de radiación solar

Para la simulación del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento frente a la emulación de variación radiación solar, se propone una variación en la radiación solar aleatoria como se observa en la Figura 94, la cual incidente sobre el arreglo de módulos, esta variación de radiación afecta directamente sobre el voltaje generado por el arreglo de módulos.

En la Figura 94 (a) se muestra la variación de radiación, los valores de tiempo vs radiación se presentan en la Tabla 15, en la Figura 94 (b) se puede observar que frente a las diversas variaciones de radiación el controlador estabiliza la señal de voltaje de salida hasta llegar a un valor estable de 200V. En la Tabla 14 se presentan las respuestas del convertidor elevador, las tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta cuando existe perturbación a través de la variación de radiación.

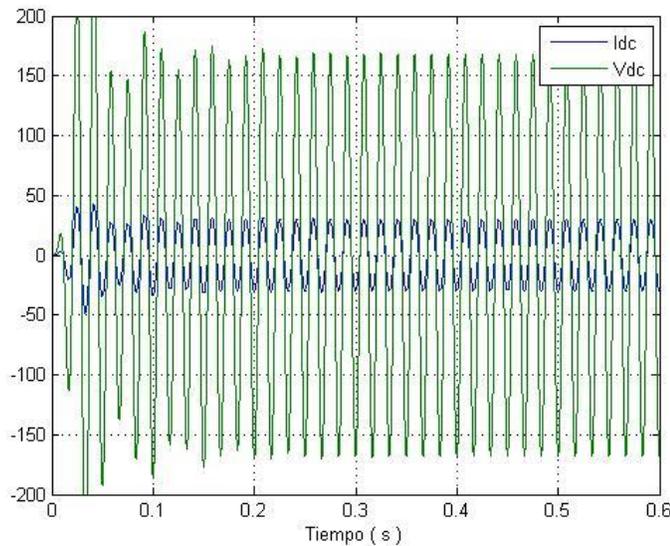


Figura 93. Simulación del Inversor y Filtro del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

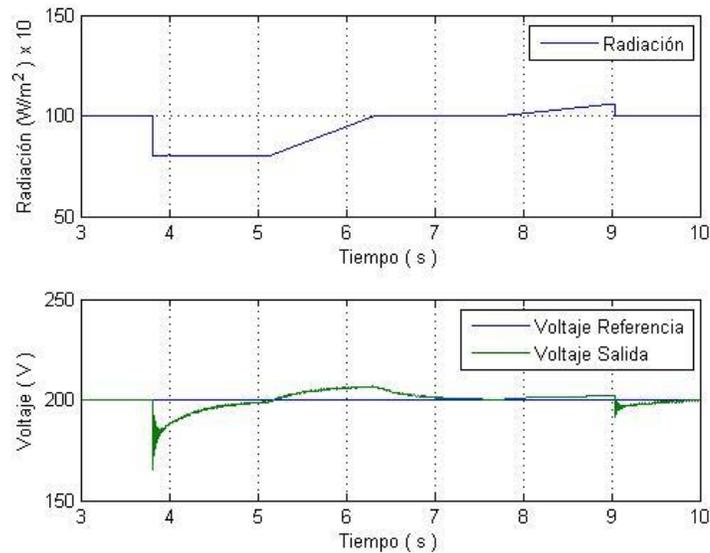


Figura 94. Simulación del Convertidor Elevador del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, frente variación de radiación solar.

Tabla 14

Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador con variación de radiación solar

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

Se plantea una nueva variación de radiación con el objetivo de encontrar el valor de radiación vs el valor de la potencia generada por el arreglo de módulos, con esto se determina la funcionalidad del sistema, se observa en la Figura 95, los valores mínimos de radiación para los cuales el sistema es funcional se presenta en la Tabla 16.

En la Tabla 16 se observa que los valores máximos de potencia generada por el arreglo de paneles es 1375 W cuando la radiación alcanza valores de 1000 W/m², se observa en la Figura 95 para $0.4 \leq t \leq 0.53$, en este caso los valores de radiación se mantienen en un rango entre $971 \leq G \leq 1000$.

Tabla 15
Variación de Radiación

No.	Tiempo (s)	Radiación (W/m ²)
1	0	0
2	0.0100	0
3	0.0100	1000
4	3.81	1000
5	3.81	800
6	4	800.5
7	5.1300	800
8	6.3300	1000
9	7.7600	1000
10	9.0400	1060
11	9.0400	1000
12	10	1000

Si el valor de radiación $G \leq 972$, se observa en la Figura 95 para $0.54 \leq t \leq 0.99$, la potencia cae por debajo del requerimiento de la carga 1299 W, el sistema deja de ser funcional, hasta cuando los valores de radiación estén entre el rango

mencionado, y la potencia generada por el arreglo de paneles sea la óptima para el funcionamiento de la carga, se observa en la Figura 95 para $1 \leq t \leq 1.3$.

En la Figura 96 se muestra la simulación del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento. En la Figura 96 (a) se presenta la corriente del arreglo de módulos I_{max} , la corriente del convertidor elevador I_{dc} y la corriente del inversor I_{ac} . En la Figura 96 (b) se presenta el voltaje del arreglo de módulos V_{max} , el voltaje del convertidor elevador V_{dc} y el voltaje del inversor V_{ac} .

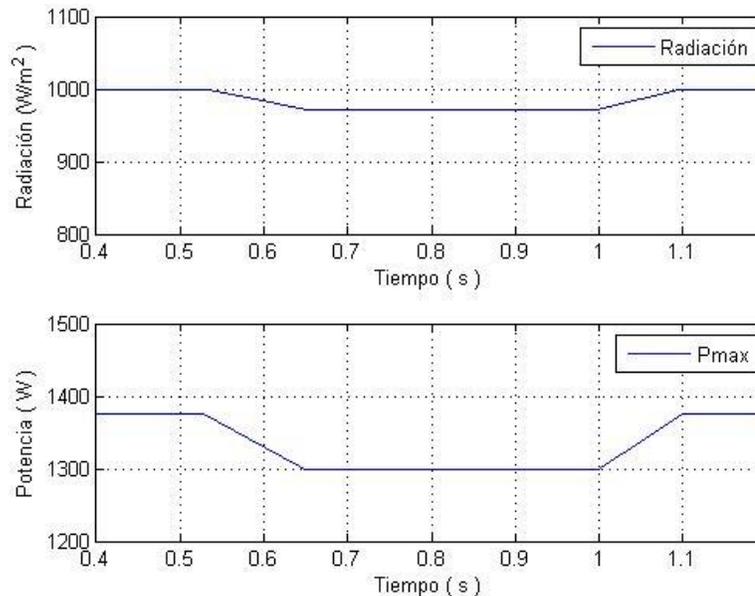


Figura 95. Simulación Variación de Radiación y Potencia en Arreglo de Módulos

En la Figura 96 (a) se observa que la producción de corriente I_{max} e I_{dc} y el consumo de corriente I_{ac} es estable para $0.4 \leq t \leq 0.53$, la carga está conectada, el sistema es funcional. Para $0.54 \leq t \leq 0.99$ la radiación decae y la potencia I_{max} , no es la necesaria para abastecer a la carga, esta se desconecta del sistema, el sistema deja de ser funcional.

Tabla 16

Valores de la Radiación Mínima vs Potencia

No.	Tiempo (s)	Radiación (W/m^2)	Potencia (W)
1	0	1000	1375
2	0.53	1000	1375
3	0.650	972	1300
4	1	972	1299
5	1.10	1000	1375
6	1.2	1000	1375

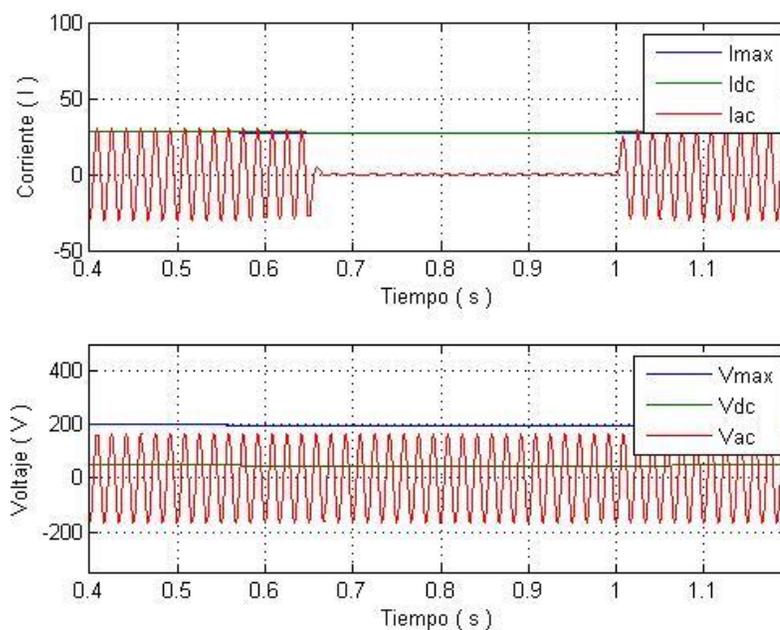


Figura 96. Simulación del Sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento con variación de radiación.

4.2.2 Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento

Se desarrolla la simulación de los dos modelos de los sistemas fotovoltaicos con sistema de almacenamiento, de acuerdo a las características propias que presenta cada uno de los sistemas.

A continuación se presenta las simulaciones de los dos modelos con los respectivos dispositivos que lo conforman, bajo las condiciones de carga nominal y variación de radiación solar.

4.2.2.1 Simulación para carga nominal

El criterio de diseño del primer modelo establece que el arreglo de módulos entregará la energía únicamente al sistema de almacenamiento donde esta se almacenará (proceso de carga), para posteriormente esta energía será entregada a la carga (proceso de descarga).

➤ Primer modelo

A continuación se presentan las simulaciones para el proceso de carga y descarga del sistema de almacenamiento.

➤ Etapa de carga

En esta etapa el arreglo de paneles se encarga de generar la energía para transferir esta al sistema de almacenamiento, en la Figura 53, se puede observar el sentido que fluye la energía.

En las siguientes figuras se muestra los resultados de la simulación del primer modelo para la etapa de carga. En la Figura 97 se presenta el voltaje V_{\max} , corriente I_{\max} y potencia P_{\max} del arreglo de paneles bajo condiciones estándar, idealmente si estas condiciones se mantienen estables los valores de los parámetros mencionados no van a variar y el tiempo de carga de las baterías sería $\text{Hora}_{\text{carga}} = 12.44$ horas, como se mencionó en la etapa de diseño.

En la Figura 98, se muestra la simulación del convertidor reductor-elevador, en la Figura 98 (a) se muestra la corriente de salida del convertidor en la etapa de reducción y la corriente de entrada que genera el arreglo de paneles, en la Figura 98 (b) se muestra el voltaje de salida del convertidor en la etapa de reducción y el voltaje de entrada que genera el arreglo de paneles, en la figura se observa que en $t=0.035$ s, el convertidor reductor-elevador alcanza el valor de 12V, con una corriente de 37.63 A, de acuerdo a las características de respuesta en el tiempo como se observa en la Tabla 17, para el convertidor reductor elevador en el proceso de carga.

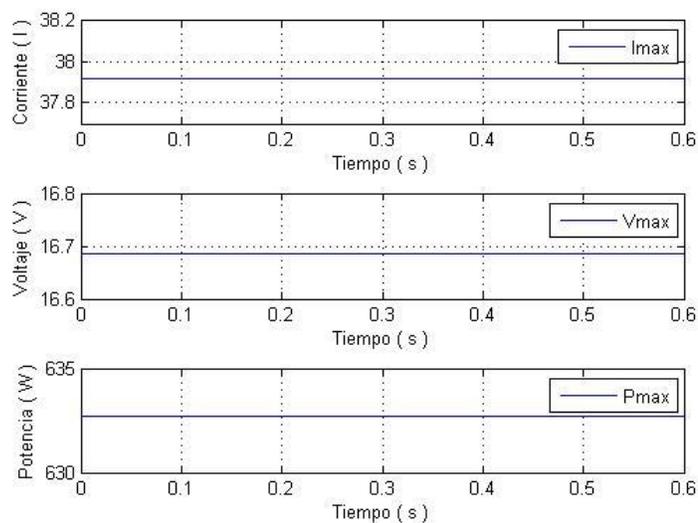


Figura 97. Simulación del Arreglo de Paneles del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, etapa de carga.

En la Figura 99, se muestra la simulación del sistema de almacenamiento en el proceso de carga, en la Figura 99 (a) se muestra el SOC expresado en porcentaje, en la Figura 99 (b) se muestra el voltaje del sistema de almacenamiento.

Para efectos de simulación se considera que el sistema de almacenamiento se encuentra en 69.9% de su capacidad nominal, y durante 1 segundo se encuentra en proceso de carga, los valores obtenidos se expresan en la Tabla 18. De acuerdo a los datos obtenidos de la Tabla 18, el sistema de almacenamiento se carga 0.002% a razón de 0.1 s transcurrido, para alcanzar una carga total del 100% el sistema necesita 44784 s equivalente a 12 horas.

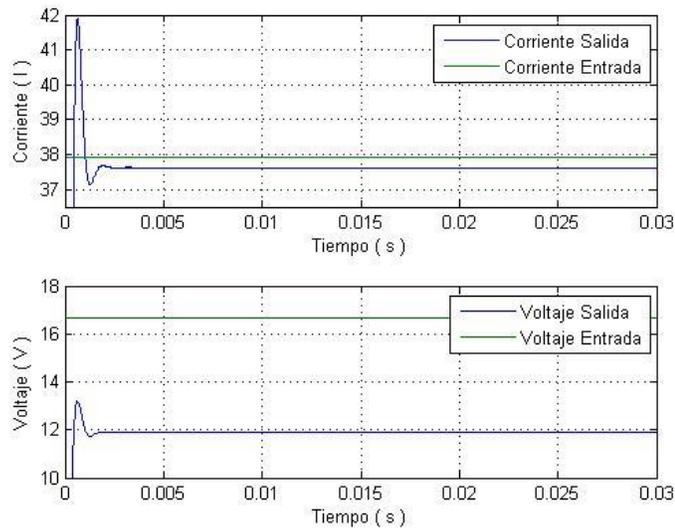


Figura 98. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Etapa Reducción, Corriente y Voltaje, etapa de carga.

Tabla 17

Características de tiempo de respuesta en convertidor reductor - elevador, etapa carga

No.	Característica	Tiempo de respuesta (s)	
		Voltaje	Corriente
1	Respuesta de Pico	0.00066	0.0006552
2	Tiempo de Estabilización	0.0018	0.002259
3	Tiempo de Subida	0.0004	0.0004309
4	Estado Estable	0.00248	0.002489

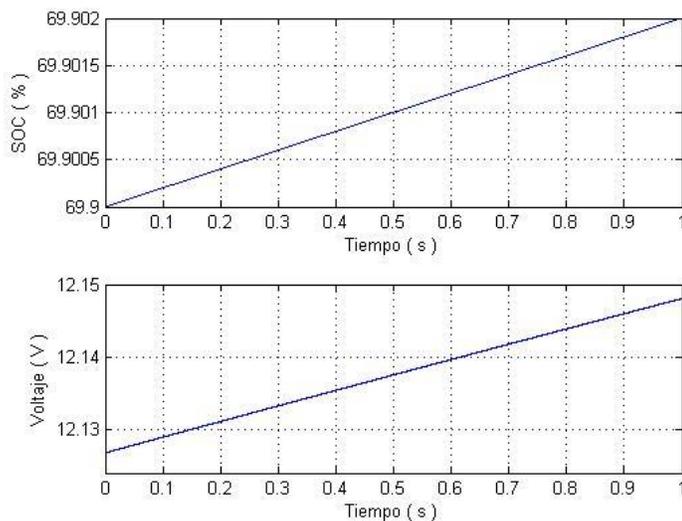


Figura 99. Simulación del Estado de la Batería, SOC (%) y Voltaje, etapa de carga.

Tabla 18

Etapa de carga sistema de almacenamiento

No.	Tiempo (s)	SOC (%)	Voltaje (V)
1	0	69.9	12.1268
2	0.1	69.9002	12.129
3	0.2	69.9004	12.1311
4	0.3	69.9006	12.1333
5	0.4	69.9008	12.135
6	0.5	69.901	12.1375
7	0.6	69.9012	12.1396
8	0.7	69.9014	12.1418
9	0.8	69.9016	12.1438
10	0.9	69.9018	12.146

➤ **Etapas de descarga**

En la etapa de descarga el sistema de almacenamiento se encarga de entregar la energía a través de las etapas de conversión reductor-elevadora, convertidor elevador y etapa de inversión más filtrado a la carga, en la Figura 51, se puede observar el sentido que fluye la energía.

En la Figura 100, se muestra la simulación del sistema de almacenamiento en el proceso de descarga, en la Figura 100 (a) se muestra el SOC expresado en porcentaje, en la Figura 100 (b) se muestra el voltaje del sistema de almacenamiento.

Para efectos de simulación se considera que el sistema de almacenamiento se encuentra en 70% de su capacidad nominal, y durante 0.5 segundo se encuentra en proceso de descarga, los valores obtenidos de la simulación se expresan en la Tabla 19.

De acuerdo a los datos obtenidos de la Tabla 19, el sistema de almacenamiento se descarga 0.0015% a razón de 0.1 s transcurridos, el sistema tendrá una descarga parcial del 20% en 70666s equivalente a 19.6 horas.

Tabla 19

Etapas de descarga del sistema de almacenamiento

No.	Tiempo (s)	SOC (%)	Voltaje (V)
1	0	70	12.12
2	0.1	69.9983	12.047
3	0.2	69.9968	12.0468
4	0.3	69.9954	12.0455
5	0.4	69.994	12.0428
6	0.5	69.9925	12.0402

En la Figura 101, se muestra la simulación del convertidor reductor-elevador, en Figura 101 (a) se muestra la corriente de salida del convertidor en la etapa de elevación y la corriente de entrada que genera el sistema de almacenamiento, en la Figura 101 (b) se muestra el voltaje de salida del convertidor en la etapa de elevación y el voltaje de entrada que genera el sistema de almacenamiento, en la figura se observa que en $t=0.2$ s, el convertidor reductor-elevador alcanza el valor de 120.2V, con una corriente de 21.8 A. En la Tabla 20 se presentan las respuestas del convertidor reductor - elevador, etapa elevación, corriente y voltaje, etapa de descarga, las tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para la etapa de descarga.

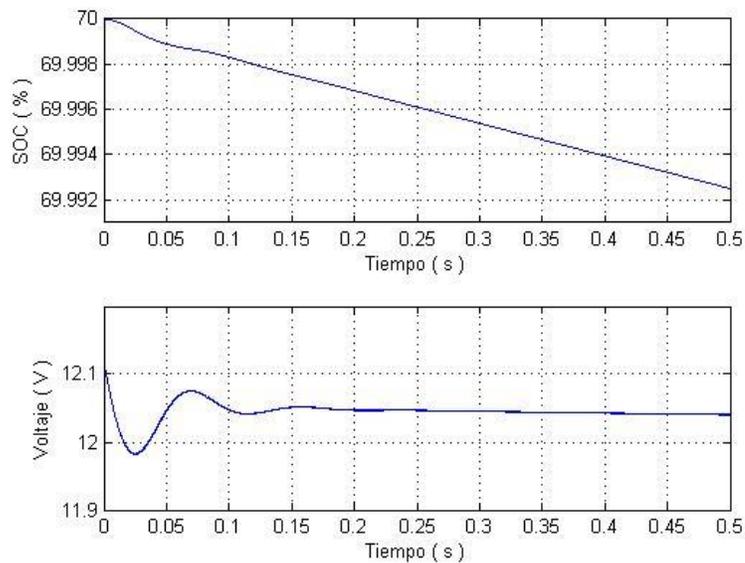


Figura 100. Simulación del Estado de la Batería, SOC (%) y Voltaje, etapa de descarga.

En la Figura 102, se muestra la simulación del convertidor elevador, en la Figura 102 (a) se muestra la corriente de salida del convertidor elevador y la corriente de entrada que genera el convertidor reductor-elevador, en la Figura

102 (b) se muestra el voltaje de salida del convertidor elevador y el voltaje de entrada que genera el convertidor reductor-elevador, en la figura se observa que en $t=0.2$ s, el convertidor alcanza el valor de 200V, voltaje que será entregado al inversor. En la Tabla 21 se presentan las respuestas del convertidor elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para la etapa de descarga.

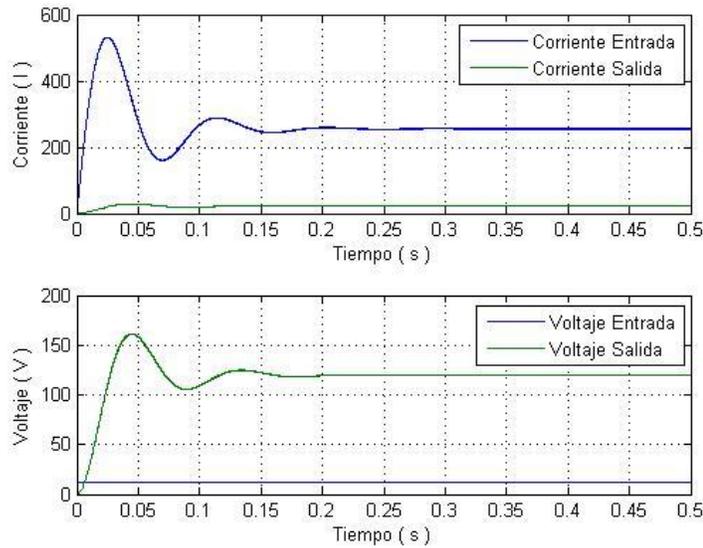


Figura 101. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Etapa Elevación, Corriente y Voltaje, etapa de descarga.

Tabla 20

Características de tiempo de respuesta en convertidor reductor - elevador, etapa descarga

No.	Característica	Tiempo de respuesta (s)	
		Voltaje	Corriente
1	Respuesta de Pico	0.04235	0.0248
2	Tiempo de Estabilización	0.1871	0.2286
3	Tiempo de Subida	0.02185	0.005529
4	Estado Estable	0.2298	0.3519

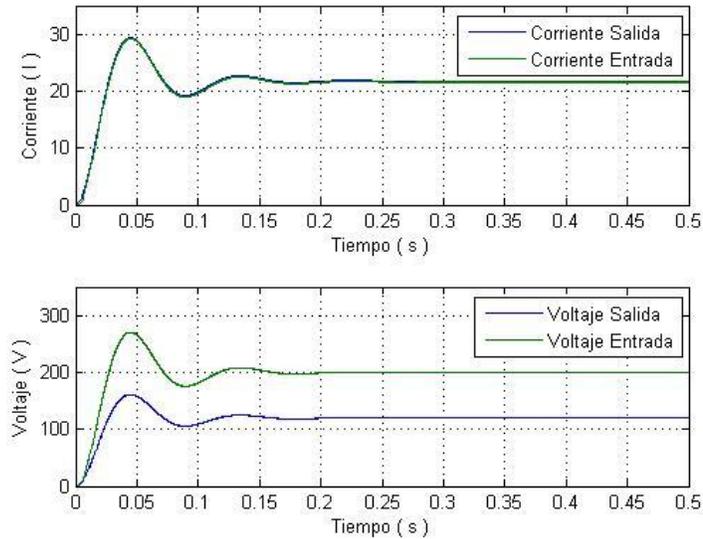


Figura 102. Simulación del Convertidor Elevador, Corriente y Voltaje, etapa de descarga.

Tabla 21

Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, etapa de descarga

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

En la Figura 103, se muestra la simulación del inversor, en la figura se observa que en $t=0.15$ s el inversor genera un voltaje de salida con una componente sinusoidal con características de frecuencia 60 Hz y amplitud de $119.55 V_{\text{rms}}$.

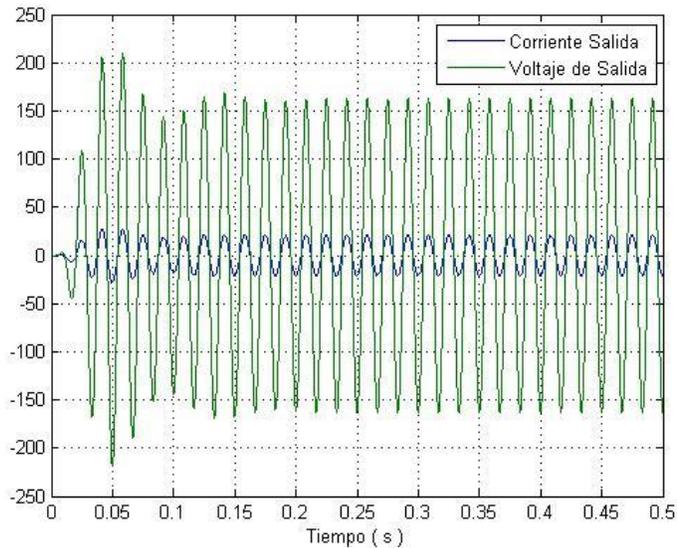


Figura 103. Simulación del Inversor, Corriente y Voltaje, etapa de descarga.

➤ **Segundo Modelo**

El criterio de diseño del segundo modelo establece que tanto el arreglo de módulos como el sistema de almacenamiento estarán en la capacidad de entregar la energía necesaria para el correcto funcionamiento de la carga.

A continuación se presentan las simulaciones del segundo modelo cuando al sistema se conecta una carga para las condiciones de energización de carga nominal mediante arreglo de módulos y sistema de almacenamiento.

➤ **Energización de carga nominal mediante arreglo de módulos.**

En las siguientes figuras se muestra los resultados de la simulación cuando la carga es energizada mediante el arreglo de módulos. En la Figura 104 se presenta voltaje V_{max} , corriente I_{max} y potencia P_{max} del arreglo de paneles bajo condiciones estándar.

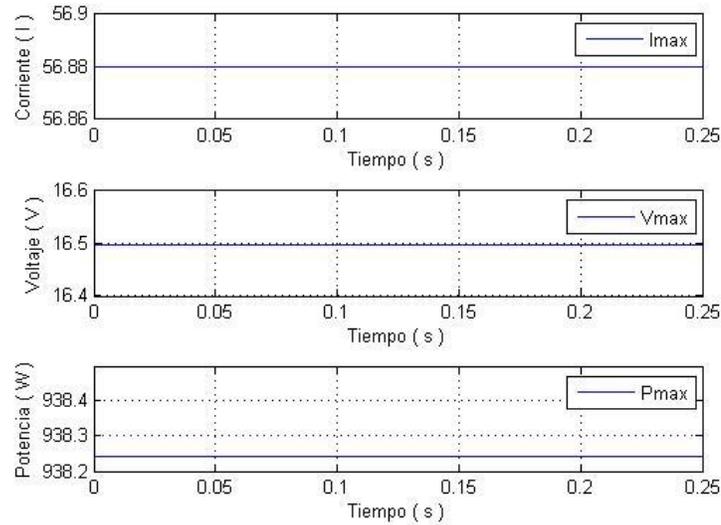


Figura 104. Simulación del Arreglo de Paneles del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo

En la Figura 105, se muestra la simulación del convertidor elevador, en Figura 105 (a) se muestra la corriente de salida del convertidor elevador y la corriente de entrada que genera el arreglo de paneles, en la Figura 105 (b) se muestra el voltaje de salida del convertidor elevador y el voltaje de entrada que genera el arreglo de paneles, en la figura se observa que en $t=0.1$ s, el convertidor alcanza el valor de 200.4V, voltaje que será entregado al inversor. En la Tabla 22 se presentan las respuestas del convertidor elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para el segundo modelo.

En la Figura 106, se muestra la simulación del inversor, en la figura se observa que en $t=0.05$ s el inversor genera un voltaje de salida con una componente sinusoidal con características de frecuencia 60 Hz y amplitud de $120.47 V_{\text{rms}}$.

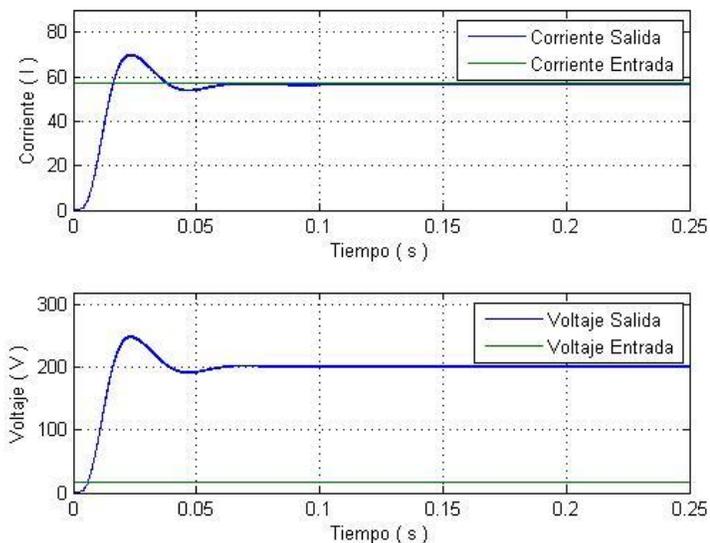


Figura 105. Simulación del Convertidor Elevador del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo

Tabla 22

Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, segundo modelo

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

➤ **Energización de carga nominal mediante sistema de almacenamiento.**

En las siguientes figuras se muestra los resultados de la simulación cuando la carga es energizada mediante el sistema de almacenamiento. En la Figura 107, se muestra la simulación del sistema de almacenamiento, en la Figura 107

(a) se muestra el SOC expresado en porcentaje, en la Figura 107 (b) se muestra el voltaje del sistema de almacenamiento.

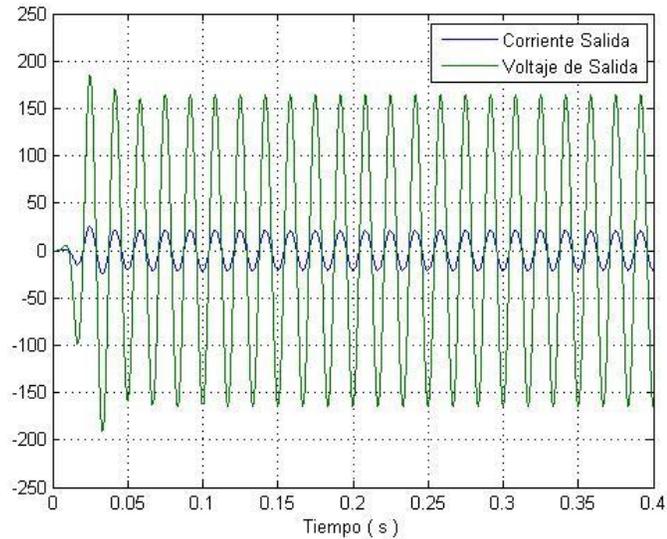


Figura 106. Simulación del Inversor, Corriente y Voltaje, del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo.

Se considera que el dimensionamiento del sistema de almacenamiento es igual al primer modelo del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, se procede a realizar la misma prueba en la simulación. El sistema de almacenamiento se encuentra al 70% de su capacidad nominal, y durante 0.5 segundo se encuentra en proceso de descarga, los valores obtenidos de la simulación se expresan en la Tabla 23.

De acuerdo a los datos obtenidos de la Tabla 23, el sistema de almacenamiento se descarga 0.0066% a razón de 0.1 s transcurridos, el sistema tendrá una descarga parcial del 20% en 71696s equivalente a 19.91 horas.

Tabla 23

Sistema de almacenamiento segundo modelo

No.	Tiempo (s)	SOC (%)	Voltaje (V)
1	0	70	12.11
2	0.1	69.9992	12.078
3	0.2	69.9986	12.092
4	0.3	69.998	12.09
5	0.4	69.9975	12.0885
6	0.5	69.9969	12.087

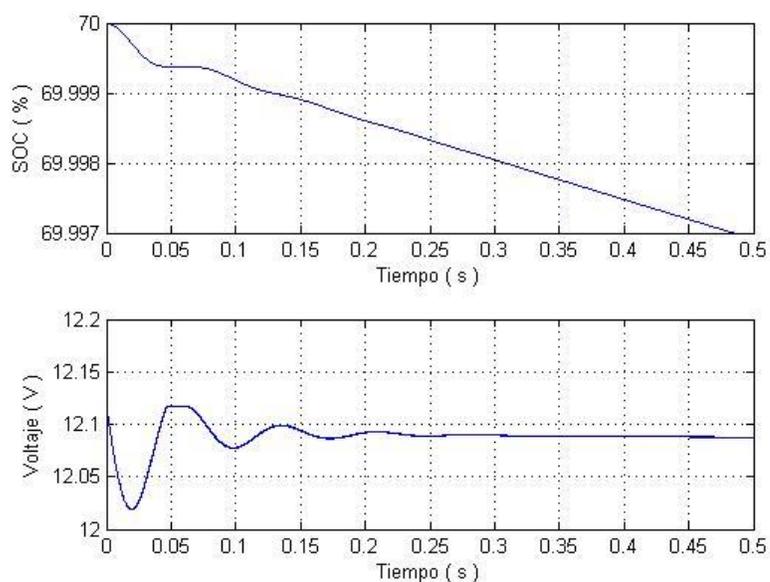


Figura 107. Simulación del Estado de la Batería, SOC (%) y Voltaje, del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo.

En la Figura 108, se muestra la simulación del convertidor reductor-elevador, en Figura 108 (a) se muestra la corriente de salida del convertidor en la etapa de

elevación y la corriente de entrada que genera el sistema de almacenamiento, en la Figura 108 (b) se muestra el voltaje de salida del convertidor en la etapa de elevación y el voltaje de entrada que genera el sistema de almacenamiento, en la figura se observa que en $t=0.35$ s, el convertidor reductor-elevador alcanza el valor de 200.2V. En la Tabla 24 se presentan las respuestas del convertidor reductor - elevador, las tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para el segundo modelo.

En la Figura 109, se muestra la simulación del inversor, en la figura se observa que en $t=0.042$ s el inversor genera un voltaje de salida con una componente sinusoidal con características de frecuencia 60 Hz y amplitud de $119.48 V_{rms}$.

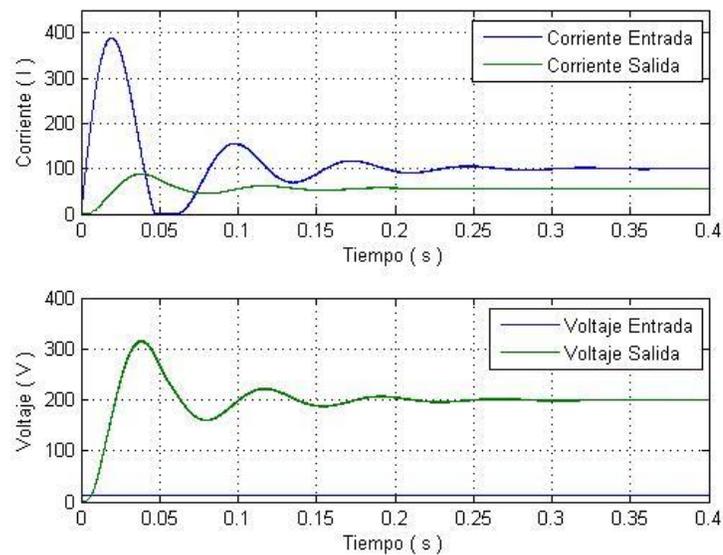


Figura 108. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Etapa Elevación del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo

Tabla 24

Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, segundo modelo

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

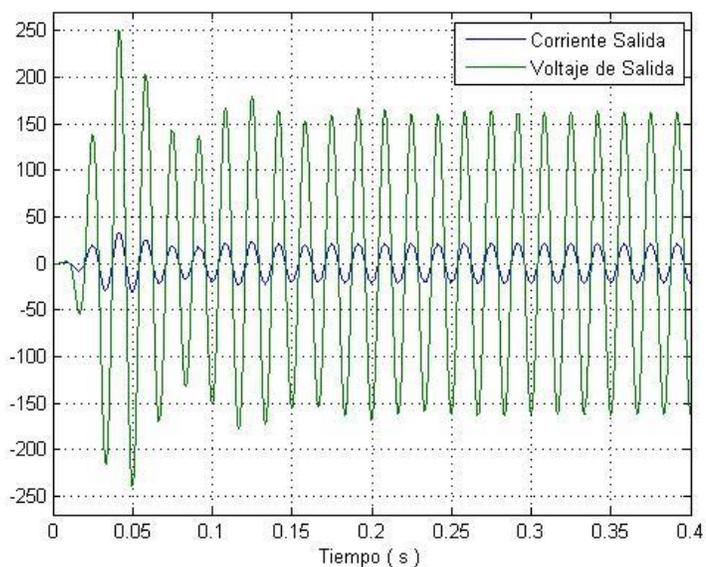


Figura 109. Simulación del Inversor, Corriente y Voltaje, del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo.

4.2.2.2 Simulación con variación de parámetros

Las simulaciones que se presentan a continuación corresponden a los dos modelos desarrollados para el sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, cada uno de ellos presenta sus propias características de funcionamiento frente a variaciones de parámetros que se muestran a continuación.

➤ Primer Modelo

Los parámetros que se varían en el primer modelo es la radiación incidente sobre el arreglo de módulos, y variación en niveles de voltaje en el sistema de almacenamiento.

➤ Etapa de Carga

Se realiza la simulación para las condiciones de variación de radiación expuestas en la Tabla 15. En la Figura 110 (a) se muestra la variación de radiación, en la Figura 110 (b) se puede observar que frente a las diversas variaciones de radiación el controlador estabiliza la señal de voltaje de salida hasta llegar a un valor promedio de 12.10V. En la Tabla 25 se presentan las respuestas del convertidor reductor - elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para variación de radiación solar.

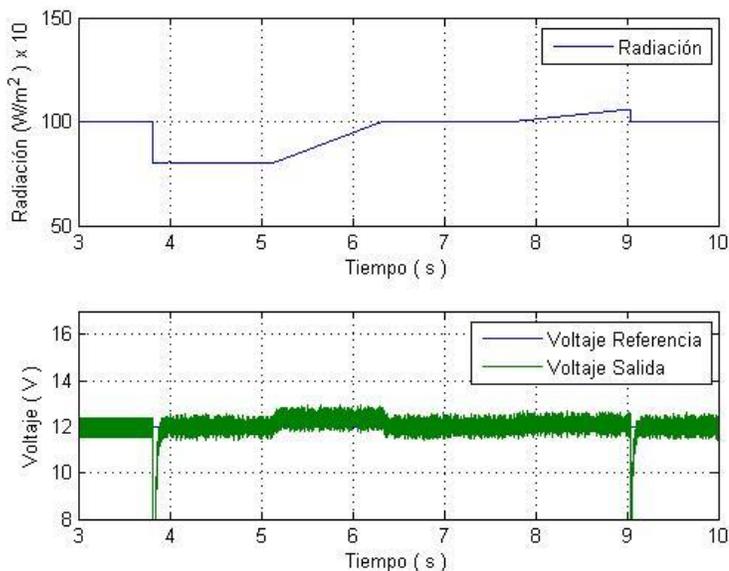


Figura 110. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Etapa Reducción, frente variación de radiación solar.

Tabla 25

Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, frente variación de radiación

No.	Característica	Tiempo de respuesta (s)
1	Respuesta de Pico	0.0012
2	Tiempo de Estabilización	0.0183
3	Tiempo de Subida	0.00422
4	Estado Estable	0.03

➤ **Etapas de Descarga**

Se realiza la simulación para las condiciones de variación de voltaje proveniente del sistema de almacenamiento expuestas en la Tabla 26 . En la Figura 111(a) se muestra la variación de voltaje, en la Figura 111 (b) se puede observar que frente a la variaciones de voltaje el controlador estabiliza la señal de voltaje de salida hasta llegar a un valor promedio de 120.04V. En la Tabla 27 se presentan las respuestas del convertidor reductor - elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para variación de voltaje.

Se realiza la simulación para las condiciones de variación de voltaje proveniente del convertidor reductor - elevador expuesto en la Tabla 28. En la Figura 112 (a) se muestra la variación de voltaje, en la Figura 112 (b) se puede observar que frente a la variaciones de voltaje el controlador estabiliza la señal de voltaje de salida hasta llegar a un valor promedio de 200.06V. En la Tabla 29 se presentan las respuestas del convertidor reductor elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para variación de voltaje.

Tabla 26

Variación de voltaje en sistema de almacenamiento

No.	Tiempo (s)	Voltaje (V)
1	0	12.165
2	3	12.16
3	5	11.9
4	7	12.16
5	9	12.16

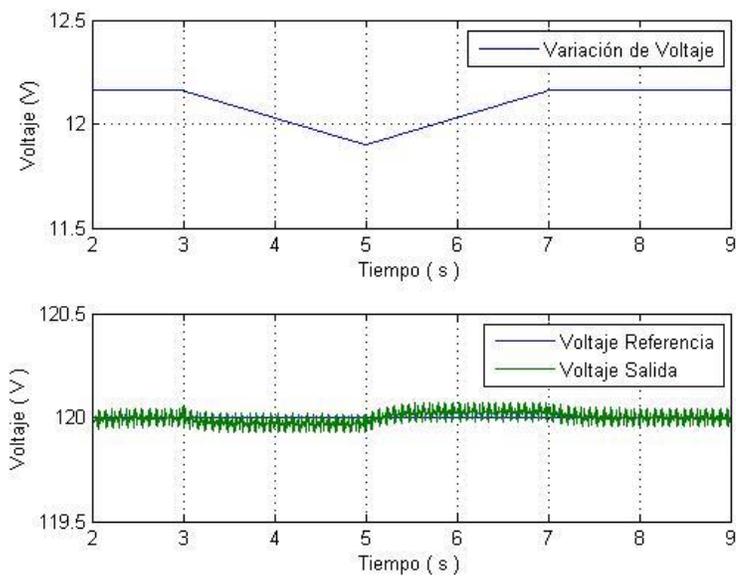


Figura 111. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Elevación, frente variación de voltaje en sistema de almacenamiento.

Tabla 27

Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, frente variación de voltaje

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

Tabla 28

Variación de voltaje en convertidor reductor - elevador

No.	Tiempo (s)	Voltaje (V)
1	2	119
2	3	118
3	4	120
4	7	119.95
5	7.38	119.15
6	7.77	119.2
7	9	119.95

Tabla 29

Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, frente variación de voltaje

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

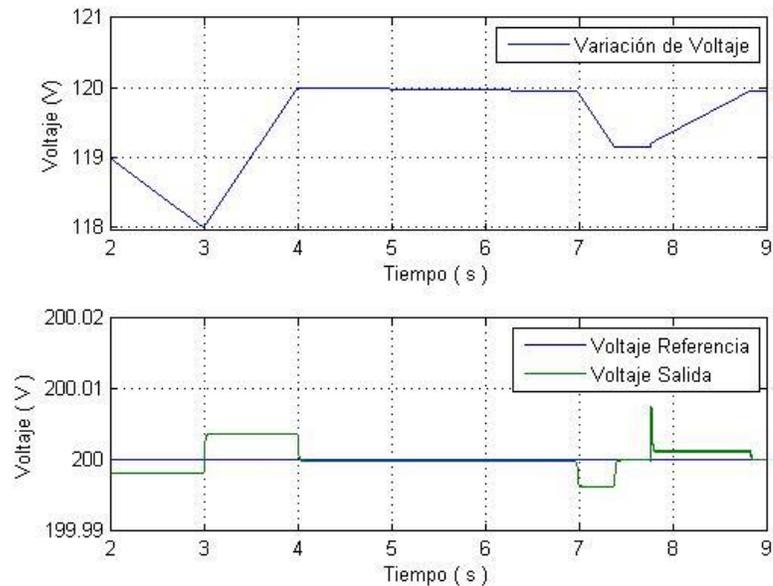


Figura 112. Simulación del Convertidor Elevador, frente variación de voltaje

➤ **Segundo Modelo**

Los parámetros que se varían en el segundo modelo es la radiación incidente sobre el arreglo de módulos, y variación en niveles de voltaje en el sistema de almacenamiento.

➤ **Energización de carga nominal mediante arreglo de módulos.**

El primer tipo de energización es por arreglo de módulos, en el cual no interviene la energía generada por el sistema de almacenamiento, al tener como una variable a ser controlada el nivel de voltaje en las etapas de conversión producido por la variación de radiación.

Se realiza la simulación para las condiciones de variación de radiación expuestas en la Tabla 15. En la Figura 113 (a) se muestra la variación de radiación, en la Figura 113 (b) se puede observar que frente a las diversas variaciones de radiación el controlador estabiliza la señal de voltaje de salida hasta llegar a un valor de 200V. En la Tabla 30 se presentan las respuestas del

convertidor elevador, las tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para variación de radiación solar.

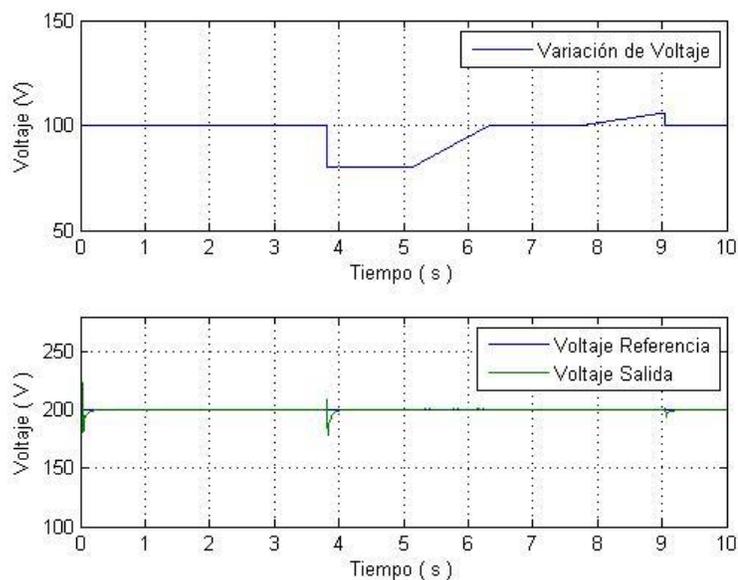


Figura 113. Simulación del Convertidor Elevador, frente variación de radiación solar

Tabla 30

Características de tiempo de respuesta en convertidor elevador, frente variación de radiación

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

➤ **Energización de carga nominal mediante sistema de almacenamiento**

El segundo tipo de energización es por el sistema de almacenamiento, en el cual no interviene la energía generada por el arreglo de módulos, al tener como variable a ser controlada el nivel de voltaje en las etapas de conversión producida por la caída de voltaje en el sistema de almacenamiento.

Se realiza la simulación para las condiciones de variación de voltaje proveniente del sistema de almacenamiento expuestas en la Tabla 26 . En la Figura 114 (a) se muestra la variación de voltaje, en la Figura 114 (b) se puede observar que frente a la variaciones de voltaje el controlador estabiliza la señal de voltaje de salida hasta llegar a un valor promedio de 200.04V. En la Tabla 31 se presentan las respuestas del convertidor reductor - elevador, los tiempos expuestos representan al tiempo de respuesta para variación de voltaje.

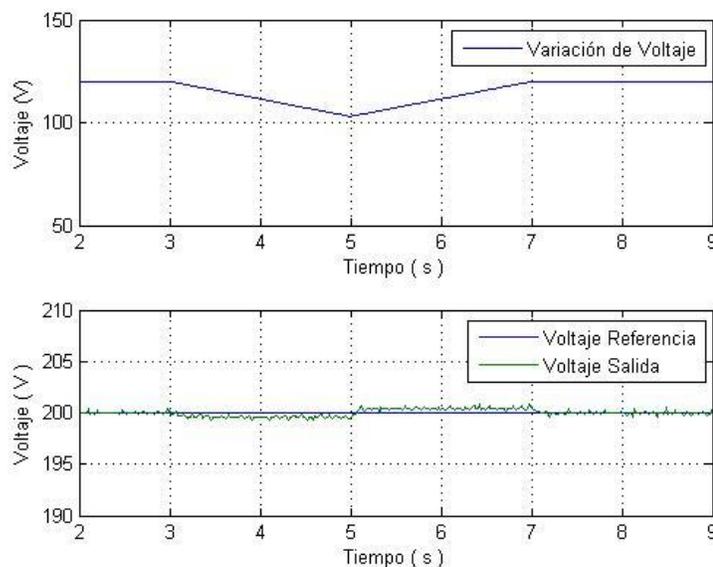


Figura 114. Simulación del Convertidor Reductor - Elevador, Elevación, frente variación de voltaje en sistema de almacenamiento.

Tabla 31

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

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

4.3 Eficiencia

La eficiencia de los dispositivos que conforman cada uno de los sistemas diseñados se calcula a partir del principio de máximo rendimiento, para un circuito sin pérdidas se puede encontrar la eficiencia, mediante las ecuaciones Ec. 219 y Ec. 220.

$$P_{in} = P_{out} \quad \text{Ec. 219}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \text{Ec. 220}$$

A continuación se detalla la eficiencia de cada uno de los sistemas diseñados:

- **Sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento:** En la Tabla 32 se muestra los dispositivos que conforman el sistema, cada uno con sus valores de eficiencia. Este sistema tiene una eficiencia del 89.44 %.
- **Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, primer modelo:** En la
- Tabla 33 se muestra los dispositivos que conforman el sistema, cada uno con sus valores de eficiencia. Este sistema tiene una eficiencia del 85.53%.

- **Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo:** En la Tabla 34 se muestra los dispositivos que conforman el sistema, cada uno con sus valores de eficiencia. Este sistema tiene una eficiencia del 86.66%.

Tabla 32

Eficiencia sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

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

Tabla 33

Eficiencia sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, primer modelo.

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

Tabla 34

Eficiencia sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo.

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

4.4 Consumo Energético

La cocina seleccionada para el desarrollo del proyecto, consume una potencia de 1300 Watts. Su uso es de 2 horas con 45 minutos, en este periodo la energía consumida es de 3600 Wh, si se considera un margen de uso adicional del 10%, el consumo de energía será de 3.96 Kwh.

CAPITULO 5

ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL

En este capítulo se realizará el análisis económico de los equipos que conforman los sistemas fotovoltaicos con y sin sistema de almacenamiento. Además se realizará un análisis del impacto ambiental del sistema fotovoltaico con y sin almacenamiento, análisis de cocinas de inducción y consumo de energía.

5.1 Análisis de costo del generador fotovoltaico con y sin sistema de almacenamiento

El detalle de los costos de los equipos, tiempo de diseño y documentación se presentan en esta sección para los sistemas fotovoltaicos con y sin sistema de almacenamiento.

5.1.1 Sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

Los dispositivos que conforman este sistema son: arreglo de paneles solares, convertidor elevador DC/DC, inversor DC/AC más filtro y cocina de inducción, como se muestra en Figura 115, se detallará a continuación los costos de los equipos indicados.

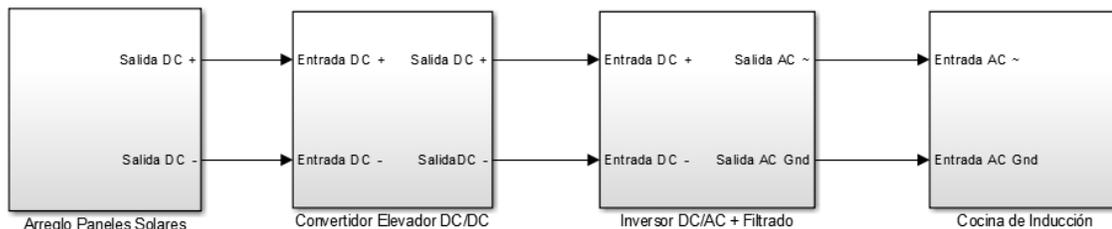


Figura 115. Componentes del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

Como se mencionó en la etapa de diseño en el Capítulo 2 se usó para el diseño de los sistemas fotovoltaicos, dispositivos como el arreglo de paneles solares, cocina de inducción y baterías, de marcas comerciales como referencia. En el diseño de este sistema, para el arreglo de paneles solares se usó paneles de la marca y modelo ISOFOTON I165 y la cocina es de la marca Kalley 110V 1300Wtts, 1 foco de cocción.

Los precios de los equipos para el arreglo de paneles solares y cocina de inducción son los precios que se ofertan en el mercado, mostrados en Tabla 35. Mientras que los precios para los dispositivos como Convertidor DC/DC e Inversor DC/AC y Filtro, son referenciales debido el caso de no encontrar los elementos con los valores indicados en la etapa de diseño, se deberá fabricar. Los precios para los dispositivos diseñados son referenciales, se muestran en Tabla 36 y Tabla 37.

Tabla 35

Costos de Dispositivos Comerciales

No.	Cantidad	Descripción	Costo (USD)	
			Costo Unitario	Costo Total
1	9	Panel Monocristalino Isofoton 165Wp/12V	\$ 240,00	\$ 2.160,00
2	1	Cocina de inducción magnética 1300wtts, 110v, 60 Hz, 1 hornilla.	\$198,00	\$ 198,00
3		Valor Total (\$):		\$ 2.358,00

Tabla 36

Costo de dispositivos diseñados, Convertidor Elevador DC/DC

No.	Cantidad	Descripción	Costo (USD)	
			Costo Unitario	Costo Total
1	1	Bobina 829 uF	\$1,19	\$1,19
2	1	Capacitor electrolítico 220 uF a 200 V	\$ 19,00	\$ 19,00
3	1	Diodo IN4007	\$ 0,15	\$ 0,15
4	1	MOSFET 2SK3707 20A/100 V	\$ 0,58	\$ 0,58
5		Valor Total (\$):		20,92

Tabla 37

Costo de dispositivos diseñados, Inversor DC/AC y Filtro

No.	Cantidad	Descripción	Costo (USD)	
			Costo Unitario	Costo Total
1	2	IGBT FII 30-06D medio puente, 30 A / 600V	\$ 9,60	\$ 19,20
2	1	Capacitor electrolítico 10 uF	\$ 0,25	\$0,25
3	1	Bobina 3 mH	\$1,36	\$1,36
4	1	Resistencia 0.1 Ω	\$0.02	\$0.02
5		Valor Total (\$):		\$ 20,83

Se presenta los costos de diseño y documentación, este costo será igual para cada uno de los sistemas diseñados y para cada modelo existente, se muestra en la Tabla 38.

Tabla 38

Costos de diseño y documentación del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento

No.	Número de Horas	Descripción	Costo (USD)	
			Costo Unitario	Costo Total
1	240	Diseño y Documentación del Sistema Fotovoltaico sin sistema de almacenamiento.	\$ 6,00	\$ 1.440,00
2		Valor Total (\$):		\$ 1.440,00

5.1.2 Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento

5.1.2.1 Primer Modelo

Los dispositivos que conforman este sistema son: arreglo de paneles solares, convertidor elevador DC/DC, inversor DC/AC más filtro, convertidor reductor-elevador DC/DC, sistema de almacenamiento y cocina de inducción, como se muestra en Figura 116.

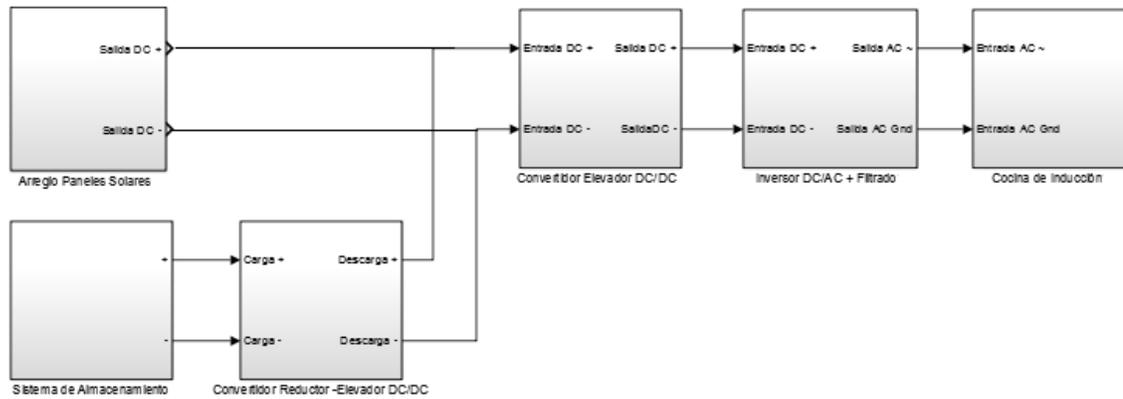


Figura 116. Componentes del primer modelo del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento.

Los costos de los equipos comerciales como panel fotovoltaico, cocina de inducción y batería, se muestra en la Tabla 39. De igual que en el sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, se presenta costos referenciales para convertidor elevador DC/DC y convertidor reductor- elevador DC/DC, en

Tabla 40 y Tabla 41, respectivamente. El costo del inversor DC/AC y filtro es igual al costo del sistema fotovoltaico sin almacenamiento como se muestra en Tabla 37, adicionalmente se suma el valor del diseño y documentación mostrado en Tabla 38, para obtener el valor total del sistema en análisis.

Tabla 39**Costo de dispositivos comerciales para Primer Modelo**

No.	Cantidad	Descripción	Costo (USD)	
			Costo Unitario	Costo Total
1	4	Panel Monocristalino Isofoton 165Wp/12V	\$ 240,00	\$ 960,00
2	1	Cocina de inducción magnética 1300watts, 110v, 60 Hz, 1 hornilla.	\$198,00	\$ 198,00
3	4	Batería ULTRACELL modelo UCG 150-12, Tipo: Ciclo Profundo, libre de mantenimiento	\$ 410,00	\$ 1.640,00
4		Valor Total (\$):		\$ 2.798,00

Tabla 40**Costo de dispositivos diseñados, Convertidor Elevador DC/DC**

No.	Cantidad	Descripción	Costo (USD)	
			Costo Unitario	Costo Total
1	1	Bobina 900 uF	\$1,19	\$1,19
2	1	Capacitor electrolítico 1000 uF a 50 V	\$ 12,00	\$ 12,00
3	1	Diodo IN4007	\$ 0,15	\$ 0,15
4	1	MOSFET 2SK3707 20 A / 100 V	\$ 0.58	\$ 0,58
5		Valor Total (\$):		\$ 13,92

Tabla 41**Costo de dispositivos diseñados, Convertidor Reductor Elevador DC/DC**

No.	Cantidad	Descripción	Costo (USD)	
			Costo Unitario	Costo Total
1	2	Bobina 290 uF	\$2,59	\$5,18
2	2	Capacitor electrolítico 500 uF a 50 V	\$ 6,00	\$ 12,00
3	2	Diodo IN4007	\$ 0,15	\$ 0,30
4	2	MOSFET 2SK3707 20 A / 100 V	\$ 0.58	\$ 1,16
5		Valor Total (\$):		\$ 18,64

5.1.2.2 Segundo Modelo

Los dispositivos que conforman este sistema son: arreglo de paneles solares, convertidor elevador DC/DC, inversor DC/AC más filtro, convertidor reductor-elevador DC/DC, sistema de almacenamiento y cocina de inducción, como se muestra en Figura 117.

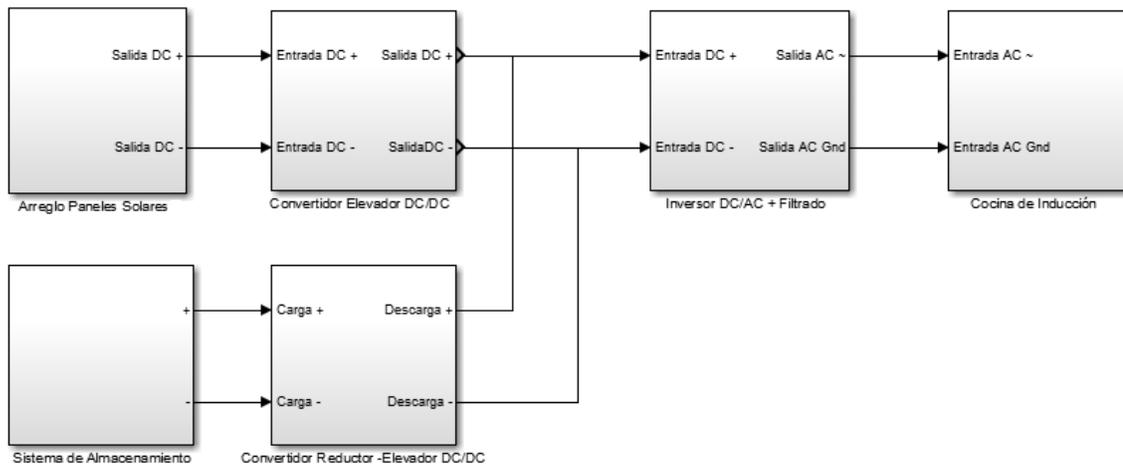


Figura 117. Componentes del segundo modelo del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento.

Los costos de los equipos comerciales como panel fotovoltaico, cocina de inducción y batería, se muestra en la Tabla 42. Se presenta costos referenciales para convertidor elevador DC/DC y convertidor reductor- elevador DC/DC, en Tabla 43 y Tabla 44, respectivamente. El costo del inversor DC/AC y filtro es igual al valor mencionado en la Tabla 37, adicionalmente se suma el valor del diseño y documentación mostrado en la Tabla 38, para obtener el valor total del sistema en análisis.

Tabla 42

Costo de dispositivos comerciales para Segundo Modelo

No.	Cantidad	Descripción	Costo (USD)	
			Costo Unitario	Costo Total
1	6	Panel Monocristalino Isofoton 165Wp/12V	\$ 240,00	\$ 1.440,00
2	1	Cocina de inducción magnética 1300watts, 110v	\$198,00	\$ 198,00
3	4	Batería ULTRACELL modelo UCG 150-12	\$ 410,00	\$ 1.640,00
4		Valor Total (\$):		\$ 3.278,00

Tabla 43

Costo de dispositivos diseñados, Convertidor Elevador DC/DC

No.	Cantidad	Descripción	Costo (USD)	
			Costo Unitario	Costo Total
1	2	Bobina 300 uF, Bobina 1090 uF	\$2,59	\$5,18
2	2	Capacitor electrolítico 520 uF a 50 V	\$ 6,00	\$ 12,00
3	1	Capacitor electrolítico 400 uF a 50 V	\$ 6,00	\$ 6,00
4	2	Diodo IN4007	\$ 0,15	\$ 0,15
5	2	MOSFET 2SK3707 20 A / 100 V	\$ 0.58	\$ 0,58
6		Valor Total (\$):		\$ 16,51

Tabla 44

Costo de dispositivos diseñados, Convertidor Reductor Elevador DC/DC

No.	Cantidad	Descripción	Costo (USD)	
			Costo Unitario	Costo Total
1	2	Bobina 290 uF	\$2,59	\$5,18
2	2	Capacitor electrolítico 500 uF a 50 V	\$ 6,00	\$ 12,00
3	2	Diodo IN4007	\$ 0,15	\$ 0,30
4	2	MOSFET 2SK3707 20 A / 100 V	\$ 0.58	\$ 1,16
5		Valor Total (\$):		\$ 18,64

5.2 Análisis del impacto ambiental del sistema fotovoltaico con y sin sistema de almacenamiento.

En forma general se puede mencionar los efectos en el ambiente de los sistemas desarrollados sobre los factores ambientales como clima, suelo, agua, flora y fauna, etc. A continuación se mencionan algunos factores ambientales (Republica Salvador 2012) En los cuales los sistemas fotovoltaicos tienen inferencia:

- **Clima:** Emisión de CO₂ nulas, debido a que la generación eléctrica se produce mediante la transformación de luz en electricidad por medio de paneles fotovoltaicos son emisión de ningún tipo de contaminante debido a combustión.
- **Suelo:** Erosión nula, contaminación de suelo nula, debido a que la generación eléctrica no demanda de desplazamientos de tierra, tampoco tiene incidencias sobre las características físico y químicas del suelo.
- **Flora y Fauna:** Destrucción de vegetación nula, los sistemas de generación eléctrica fotovoltaica no requieren de tendidos eléctricos, se da el beneficio a la conservación de flora y fauna.
- **Ruido:** Ruido nulo, un sistema de generación fotovoltaica en comparación a sistemas de generación eléctrica en base a combustión que usan motores, es totalmente silencioso.
- **Geología:** No se producen alteraciones topológicas, estructurales y topográficas del terreno, para la fabricación de las células fotovoltaicas.

5.2.1 Impacto ambiental del sistema de almacenamiento

Como se mencionó en el Capítulo 2, en el mercado existen diferentes tipos de baterías para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos, entre las más usadas están las baterías de plomo-ácido y níquel-cadmio. Las baterías de níquel-

cadmio presentan características excepcionales pero no son recomendables para sistemas fotovoltaicos por su elevado costo, en contra parte las baterías de plomo-acido son las baterías usadas ya que se adaptan a cualquier corriente de carga con costos menores a las de níquel-cadmio. (Méndez 2007) Razón por la cual se tomó como referencia a las baterías de plomo-ácido, para el diseño de los sistemas fotovoltaicos propuestos.

En los sistemas de generación fotovoltaica la obtención de energía eléctrica se realiza a través de la transformación de energía solar en energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos en conjunto con sistemas de potencia y control, y de acuerdo a las topologías desarrolladas en este documento, se presenta la inclusión de un sistema de almacenamiento basados en baterías de plomo-acido.

El sistema de almacenamiento está compuesto de baterías recargables, su vida útil depende del número de ciclos y de la profundidad de descarga, la reacción química que se produce durante su uso es reversible en comparación a las baterías no recargables. Este sistema presenta una vida útil de 4 a 5 años, por lo que es necesario renovar el sistema de almacenamiento terminado este período, es preciso realizar el análisis ambiental que representa el uso de este tipo de baterías.

La contaminación ambiental son las condiciones que alteran las condiciones naturales del mismo, o que afecten a la salud e higiene pública. Específicamente en el tema del sistema de almacenamiento, el principal problema de contaminación surge en el tratamiento inadecuado que se da a las baterías después de su vida útil, un tratamiento inadecuado significa la contaminación del suelo, agua, aire.

Se realiza una comparación de los efectos que tienen sobre el medio ambiente de los elementos químicos de las baterías más usadas en la implementación de sistemas fotovoltaicos (plomo-ácido y níquel-cadmio), para determinar cuál es el más nocivo para el medio ambiente y salud humana.

Se presenta los efectos nocivos que conlleva la manipulación posterior a la vida útil de las baterías de plomo-acido.

- **Efectos nocivos para la salud:** Contacto con la piel, puede producir enrojecimiento. Inhalación, puede producir quemazón, tos, dificultad respiratoria. Ingestión, puede producir quemaduras de boca, garganta y estómago.
- **Efectos nocivos para el medio ambiente:** Derrame en agua, puede causar acidificación en ecosistemas acuáticos. Toxicidad de contaminantes como los sulfuros y metales, por medio de la disolución.

Se presenta los efectos nocivos que conlleva la manipulación posterior a la vida útil de las baterías de níquel-cadmio.

- **Efectos nocivos para la salud:** Fallos en el sistema reproductivo, posibilidad de infertilidad. Daño al sistema nervioso central, sistema inmune. Desordenes psicológicos. Posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer.
- **Efectos nocivos para el medio ambiente:** El derrame de los componentes de este tipo de batería, afecta principalmente al suelo, produciendo un daño en cadena, para flora y fauna que se desarrolle dentro del medio contaminado. Cuando los niveles de contaminación son elevados puede amenazar a todo el ecosistema del suelo.

5.3 Análisis del costo de la cocina de inducción magnética

El modelo de la cocina de inducción magnética que se usó para realizar el diseño de los sistemas fotovoltaicos con y sin sistema de almacenamiento, es una cocina de la marca Kalley 1300wtts, 110V, 60 Hz, 1 foco de cocción, el precio de esta unidad en el mercado se muestra en la Tabla 45.

Tabla 45**Costo Cocina de inducción magnética**

No.	Cantidad	Descripción	Costo (USD)	
			Costo Unitario	Costo Total
1	1	Cocina de inducción magnética 1300watts, 110v, 60 Hz, 1 hornilla.	\$198,00	\$ 198,00
2		Valor Total (\$):		\$ 198,00

La cocina fue seleccionada de acuerdo al proyecto piloto de cocinas de inducción que fue implementado desde el año 2010 en las parroquias del cantón Tulcán, donde por medio del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) entregaron 3433 kits que incluyen de 2 cocinas de inducción vitrocerámica, dos ollas de 5,5 y 3,5 litros y una sartén de 1,7 litros de teflón. (MEER 2013b)

Al considerar que el proyecto desarrollado fue aceptado por el Honorable Consejo de Carrera en el mes febrero del 2014, y para la fecha el Gobierno todavía no emitía la normativa para la venta de cocinas de inducción, razón por la cual se seleccionó una cocina de inducción que funciona con 110v, con características similares en potencia a las entregadas en las parroquias del cantón Tulcán.

En Agosto del 2014 el Ministerio de Industrias y Productividad (Mipro), por medio del comunicado emitido por el Ministro de Industrias, Ramiro González, se presentó a las empresas que fueron calificadas para ofrecer una variedad de modelos de cocinas de inducción al público, entre estas Indurama, Ecasa, etc.(Mipro 2013)

La empresa Indurama ofrece modelos de cocinas de inducción desde 2 a 4 focos de cocción, que pueden ser adquiridas al acceder al Programa de Cocinas de Inducción que promueve el MEER desde su página web (MEER 2013a). Las ofertas de cocinas están en el rango de precios desde \$ 156,00 para una cocina de 2 focos de cocción hasta \$ 676,00 para una cocina de 4 focos de cocción y

horno, el modelo escogido puede ser financiado a través de la Empresa Eléctrica local con un plazo hasta 3 años con pagos mensuales.

Algunos modelos de cocinas de inducción disponibles para el público que ofrece la empresa Indurama, son modelos como: PRAGA 24 pulg., ei2pve, ei4pvi60 (INDURAMA 2014). En la Tabla 46 se presenta un cuadro comparativo de las características más importantes entre estos modelos, en la sección de ANEXOS 4 presentan a detalle las características de estos modelos.

5.4 Consumo de energía de la cocina de inducción seleccionada

En la sección 3.1.1 del Capítulo 3, se presentó un análisis de la demanda energética para el consumo por 3 horas de uso diaria de la cocina de inducción, se observa en la Tabla 4. En la ecuación Ec. 36 se muestra que la demanda diaria es de 3.96 Kwh/día. Para calcular el consumo de energía consumida durante un mes se multiplica la demanda calculada en Ec. 36 por 30 días del mes, con un resultado mostrado en Ec. 221.

$$\text{Demanda mensual} = 3.96 \frac{\text{Kwh}}{\text{día}} * 30 \text{ días} = 118.8 \frac{\text{Kwh}}{\text{mes}} \quad \text{Ec. 221}$$

Tabla 46

Modelos de cocina de inducción Indurama

No.	Modelo	Numero de Focos	Inductores	Horno	Potencia	Voltaje
1	ei2pve	2	1: 145mm. 1400w 2: 160mm. 1400w	No	3500W 4000W	200V 240V
	ei4pvi6	4	1: 145mm. 1100w 2: 160mm. 1400w 3: 170mm. 1850w 4: 190mm. 1400w	No	6400W 7200W	200V 240V
2						
3	PRAGA	4	1: 30cm. 1200w 2: 30cm. 1200w 3: 30cm. 1200w 4: 30cm. 1200w	Si	6400W 7200W	200V 240V

5.5 Costos totales de los sistemas fotovoltaicos con y sin sistema de almacenamiento.

Se presenta los costos totales de los dispositivos usados en el diseño de los sistemas fotovoltaicos con y sin sistema de almacenamiento. Para el sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento se presentan en la Tabla 47. Los costos de los dispositivos para el sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento para el primer modelo se presentan en la Tabla 48, y para el segundo modelo se presenta en la Tabla 49.

Tabla 47

Costos Totales, sistema fotovoltaico sin almacenamiento

No.	Descripción del Costo	Costo
1	Dispositivos de Marcas Comerciales	\$ 2.358,00
2	Dispositivos Diseñados	\$ 41,75
3	Diseño y Documentación	\$ 1.440,00
4	Valor Total (\$):	\$ 3.839,75

Tabla 48

Costos totales, sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento primer modelo

No.	Descripción del Costo	Costo
1	Dispositivos de Marcas Comerciales	\$ 2.798,00
2	Dispositivos Diseñados	\$ 53,39
3	Diseño y Documentación	\$ 1.440,00
4	Valor Total (\$):	\$ 4.291,39

Tabla 49

Costos totales, sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento segundo modelo

No.	Descripción del Costo	Costo
1	Dispositivos de Marcas Comerciales	\$ 3.278,00
2	Dispositivos Diseñados	\$ 55,98
3	Diseño y Documentación	\$ 1.440,00
4	Valor Total (\$):	\$ 4.773,98

5.6 Análisis de la inversión

Para realizar el análisis de la inversión económica que supone la futura implementación de los sistemas fotovoltaicos diseñados en este proyecto, se realiza los cálculos de la energía consumida, posterior se relaciona el costo total de los sistemas diseñados con la energía consumida, los valores en dólares de los sistemas son mostrados en Tabla 47, Tabla 48 y Tabla 49.

5.6.1 Cálculo del tiempo de retorno de inversión.

Para el cálculo del tiempo de retorno de inversión se considera el cálculo de la energía consumida por la cocina de inducción, mostrada en la ecuación Ec. 222 por el periodo de un mes, además se muestra el costo en dólares del precio actual del Kwh en la ecuación Ec. 223.

$$\text{Demanda mensual} = 3.96 \frac{\text{Kwh}}{\text{día}} * 30 \text{ días} = 118.8 \frac{\text{Kwh}}{\text{mes}} \quad \text{Ec. 222}$$

$$\text{Precio actual Kwh} = \$ 0.08493 \quad \text{Ec. 223}$$

Se calcula el precio mensual de acuerdo al consumo de energía, en base a la facturación de servicio eléctrico y alumbrado público de la Empresa Eléctrica Quito S. A E.E.Q, se muestra en la Tabla 50.

Tabla 50**Calculo de Consumo Eléctrico**

No.	Descripción	Consumo	Unidad	Valores
1	Energía	118.8	Kwh	\$ 10.08
2	Comercialización			\$ 0.70
3	Servicios Alumbrado Publico			\$0.80
4	Impuesto Bombero			\$0.89
5	Tasa recolección basura			\$2.20
6	Total			\$14.76

El valor de la factura por el consumo de 118.8 Kwh/mes es de \$14.76, anualmente el valor de la factura será \$176.04, lo que supone que el retorno del capital invertido se presenta en la Tabla 51.

Tabla 51**Tiempo de retorno de inversión**

No.	Tipo de Sistema	Inversión	Años de retorno
1	Sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento	\$ 3.839,75	21
2	Sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, primer modelo	\$ 4.291,39	24
3	Sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento, segundo modelo	\$ 4.773,98	27

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se diseñó dos topologías de sistemas fotovoltaicos sin conexión a la red, los cuales difieren entre sí en la inclusión de un sistema de almacenamiento de energía.
- Se realizó el dimensionamiento de los dispositivos que contiene cada uno de los sistemas fotovoltaicos con y sin sistema de almacenamiento, específicamente para que abastecieran la demanda de energía que consume la cocina de inducción propuesta en el desarrollo del proyecto.
- El diseño realizado referente a los sistemas fotovoltaicos con y sin sistema de almacenamiento, para las etapas de potencia que componen dispositivos como Convertidor Elevador DC/DC, Inversor DC/AC y Filtro y Convertidor Reductor-Elevador DC/DC, satisfacen los parámetros de diseño propuestos, comprobados mediante simulaciones.
- Mediante el desarrollo de los modelos matemáticos de las etapas de potencia de a cada uno de los sistemas fotovoltaicos realizados, se diseñó

los controladores de voltaje, los mismos que presentan buen desempeño frente a perturbaciones que se aplicaron en las simulaciones, los controladores estabilizaron al sistema frente a cambios de voltaje producido por el arreglo de paneles fotovoltaicos.

- El sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento presenta limitantes para la generación de energía, porque depende exclusivamente del arreglo de paneles para la generación eléctrica en comparación de los sistemas fotovoltaicos que contienen un sistema de almacenamiento de energía, por lo que se concluye que este sistema es el menos rentable de todos los sistemas presentados.
- La integración de un sistema de almacenamiento basado en baterías al sistema fotovoltaico representa un beneficio al momento de requerir energía a cualquier momento, aun cuando el arreglo de paneles fotovoltaicos no produzcan energía.
- La principal diferencia que se evidencia en costos entre los dos modelos del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, es la inclusión de más baterías, de acuerdo a la batería escogida como referencia la adición de una batería a cualquiera de estos dos modelos incrementa el valor entre un 12% y 15% del valor total de los dispositivos comerciales.
- Los resultados obtenidos mediante simulaciones, demuestran que el sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento tiene una eficiencia del 89.44 %, este es el sistema más eficiente en comparación a los dos modelos del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, dentro de estos el segundo modelo presenta una eficiencia del 86.66%. A pesar que el segundo modelo presenta menor eficiencia frente al sistema sin almacenamiento, este modelo representa ser más útil en el caso práctico de realizar una implementación por la disponibilidad de radiación solar a cualquier momento del día.

- Mediante los resultados obtenidos de las simulaciones desarrolladas, se puede determinar el comportamiento de los sistemas fotovoltaicos diseñados, a partir de variaciones de radiación solar y perturbaciones presentadas en las diferentes etapas que conforman cada uno de los sistemas.
- Los sistemas fotovoltaicos diseñados son una alternativa para la generación de energía eléctrica para el uso de la cocina de inducción, mediante el aprovechamiento de energía renovable, por lo que no alteran el medio ambiente como el clima, suelo, flora, fauna, ruido.
- El tiempo de recuperación de la posible inversión que se realice para la implementación de un sistema fotovoltaico como el propuesto en este proyecto, esta sobre los 20 años de acuerdo al análisis realizado, al tener en cuenta que los sistemas fotovoltaicos tienen una vida útil de 35 a 40 años.
- Se puede decir que esta alternativa de generación de energía, aprovechando la energía solar, podría ser implementada por personas que tengan conciencia ambiental, deseen colaborar con el cuidado del medio ambiente y tengan la capacidad económica para realizar la implementación, puesto que una inversión de este tipo no estaría al alcance de grupos de recursos económicos limitados.
- La batería de plomo-acido, que se escogió como referencia para el sistema de almacenamiento, cumple los criterios de capacidad de almacenamiento, rendimiento de recuperación y vida útil, de acuerdo al criterio de costo-beneficio.
- Los sistemas de almacenamiento de energía en base a baterías de plomo-acido, no presentan efectos nocivos al ambiente puesto que al terminar su vida útil son sujetos a un debido tratamiento de desechos, en comparación de sistemas de almacenamiento con baterías de níquel-cadmio.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda la implementación del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento en su segundo modelo, debido a que representa la mejor opción considerando el costo-beneficio que ofrece este sistema.
- Los valores obtenidos en el diseño de las etapas de potencia de cada sistema fotovoltaico, son valores teóricos, se recomienda usar valores de componentes aproximados a los calculados en este trabajo para la implementación del sistema sugerido.
- La etapa de inversión DC-AC diseñada en este proyecto corresponde para un sistema monofásico, se recomienda el diseño de un inversor bifásico para la adaptación de una cocina de inducción que ofertan las casas comerciales en Ecuador y que se encuentren dentro de la potencia que genera el sistema fotovoltaico.
- En trabajos futuros mediante la implementación del sistema sugerido, se puede realizar la medición de parámetros de calidad de energía AC, los cuales brindaran información para posibles cambios en el diseño de los dispositivos que ayuden a mejorar el rendimiento del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- Andreotti, Ignacio. 2013. "PLAN SOLAR SAN JUAN- Fabricación de Paneles Solares." <http://ingenieroandreotti.blogspot.com/2013/01/plan-solar-san-juan-fabricacion-de.html>.
- Ang, Simon. 2005. *Power-Switching Converters, Second Edition*. EEUU: CRC Press.
- Armenta, Carl. 1998. *Improving Photovoltaic System Sizing by Using Electrolyte Circulation in the Lead-Acid Batteries*.
- Bermúdez, Vicente. 2000. *Tecnología Energética*. Valencia, España: Camino de Vera.
- Boxwell, Michael. 2012. *Solar Electricity Handbook: A Simple, Practical Guide to Solar Energy : How to Design and Install Photovoltaic Solar Electric Systems*. United Kingdom: Greanstream Publishing.
- Cabrera, Isabel. 2012. "Situación Energética En El Ecuador. Análisis Técnico Y Económico Para El Uso Eficiente de La Energía." Universidad de Cuenca.
- Calahorrano, Miguel. 2013. *La Situación Del Sector Eléctrico Ecuatoriano Y Las Energías Renovables*. Quito, Ecuador.
- Campos, Daniel. 1984. *Procesos Del Ciclo Hidrológico*. San Luis de Potosi, Mexico: Editorial Universitaria Potosina.
- Castañer, L. 2002. *Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice*. Wiley, Chichester.
- Castells, Xavier. 2012. *Energis Renovables*. ed. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España.
- Correa, Rafael. 2013a. "Plan Nacional Para El Buen Vivir 2009 – 2013, Estrategias Para El Buen Vivir, Estrategia 7, Cambio de La Matriz Energética." <http://plan.senplades.gob.ec/estrategia7>.
- . 2013b. "Plan Nacional Para El Buen Vivir 2013 – 2017." <http://www.buenvivir.gob.ec>.

- . 2013c. “Plan Nacional Para La Implementación de Sistemas de Cocción Eficiente.” <http://www.energia.gob.ec/eficiencia-energetica-sector-residencial/>.
- Delgado, Jaime. 2008. *Fisicanova, Una Aproximación a La Realidad*. Bucaramanga, Colombia: Editorial Fisicanova.
- Ecuador. 2013. “Subsecretaría de Energía Renovable Y Eficiencia Energética.” <Http://www.energia.gob.ec/subsecretaria-de-energia-renovable-y-eficiencia-energetica/>.
- Enríquez, Gilberto. 2009. *Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica*. Mexico.
- EOI, Fundación. 2011. *Monográfico Green Jobs. Marco Normativo Y Competencial de La Economía Verde En España 2010*. Madrid, España: Creative Commons.
- Fernandez, Manuel. 2010. *Energía Solar: Electricidad Fotovoltaica*. Madrid, España: Liberfactory.
- Figuroa, Jorge. 2007. *Física Moderna Edición Revisada*. Mexico: Prentice-Hall.
- Galán, Maribel. 2012. *Termotecnia*. ed. Marcombo S.A. España.
- Garcerá, Gabriel. 1998. *Convertidores Conmutados: Circuitos de Potencia Y Control*. Valencia, España: Camino de Vera.
- García, Marianela. 1999. *Energía Solar Fotovoltaica Y Cooperación Al Desarrollo*. Madrid, España: IEPALA Editorial.
- Gonzalez, Antoni. 2006. *Tecnología Energetica Y Medio Ambiente I*. Catalunya, España: Graficas Rey.
- Hankins, Mark. 2010. *Stand-Alone Solar Electric Systems: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*. Washington: Earthscan.
- Hart, Daniel. 2001. *Electronica de Potencia*. Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
- Henry, Glynn. 1999. *Ingeniería Ambiental*. Monterrey, Mexico: Pearson Educación, S.A.

- Hermosa, Antonio. 2011. *Electrónica Aplicada*. España: Marcombo, S.A.
- INDURAMA. 2014. "Modelos Cocinas Inducción."
<http://www.indurama.com/induccion/Productos/Ver-Producto/productid/132>.
- Inieco, Group. 2011. *Electrotecnia*. España: Publicaciones Vertice S.L.
- Izquierdo. 2008a. "Atlas Solar Del Ecuador Con Fines de Generacion Electrica."
: 51. http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf.
- Izquierdo, Fenando. 2008b. "Consejo Nacional de Electrificación, "Atlas Solar Del Ecuador Con Fines de Generacion Electrica."
http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf: 6.
- Juana, Jose. 2003. *Energías Renovables Para El Desarrollo*. ed. Paraninfo.
- Llinares, Jaime. 1997. *Electromagnetismo Y Semiconductores*. Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia.
- Mandado, Enrique. 1995. *Instrumentación Electrónica*. Barcelona, España: Marcombo, S.A.
- MEER. 2013a. "Programa de Cocina de Inducción."
<http://www.ecuadorcambia.com/>.
- . 2013b. "Proyecto Piloto de Cocinas de Inducción."
<http://www.energia.gob.ec/eficiencia-energetica-sector-residencial/>.
- Meinel, Aden. 1982. *Aplicaciones de La Energía Solar*. Barcelona, España: Editorial Reverte S.A.
- Méndez, Javier. 2007. *Energía Solar Fotovoltaica*. Second Edi. Madrid, España: FC Editorial.
- Mipro. 2013. "Comunicado B138." <http://www.industrias.gob.ec/b138-programa-de-cocinas-de-induccion-permitira-crear-nuevas-empresas/>.
- Mohan, Ned. 2010. *Electrónica de Potencia, Convertidores, Aplicaciones Y Diseño*. 3rd ed. Monterrey, Mexico: Mc Graw Hill.
- Moro, Miguel. 2010. *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, S.A.

- Ogata, Katsuhiko. 2010. *Ingeniería de Control Moderna*. 5ta ed. ed. Pearson Educacion. España.
- Pareja, Miguel. 2010. *Energía Solar Fotovoltaica: Calculo de Una Instalacion Aislada*. Second Edi. Barcelona, España: Marcombo, S.A.
- Perez. 2004. "Ganancias Solares Sobre Soluciones Constructivas Horizontales Con Geometría Compleja." Universidad de Almeria.
- Perez, Maria. 2007. "Aplicaciones de La Energía Solar Al Tratamiento Térmico de Suelos de Invernadero". Universidad de Cordoba.
- Pozo, Ana. 2011. *Convertidores Conmutados de Potencia. Test de Autoevaluación*. Barcelona, España: Marcombo, S.A.
- Prat, Lluís. 1999. *Circuitos Y Dispositivos Electrónicos: Fundamentos de Electrónica*. Catalunya, España: Universidad Politecnica de Catalunya.
- Ramírez, Ignacio. 2007. *Problemas Resueltos de Sistemas de Energía Eléctrica*. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Rasid, Muhammad H. 2004. *Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos Y Aplicaciones*. Third Edit. Mexico: Pearson Educación.
- Republica Salvador. 2012. "Impacto Ambiental Energía Solar Fotovoltaica." <http://www.mem.gob.ni/index.php?s=1&idp=852&idt=1>.
- Romero, Marcelo. 2009. *Energía Solar Termica*. Barcelona, España: Planeta DeAgostini y Formacion, S.L.
- Rufes, Pedro. 2010. *Energía Solar Térmica: Técnicas Para Su Aprovechamiento*. Barcelona, España: Marcombo, S.A.
- SanMiguel, Pablo. 2011. *Electrotencia 2Batch*. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Schuler, Charles. 1986. *Electrónica, Principios Y Aplicaciones*. Sevilla, España: Editorial Reverte S.A.
- Seoáñez, Mariano. 2001. *Tratado de Gestión Del Medio Ambiente Urbano*. Mexico: Mundi-Prensa.
- Serrano, Rafael. 2012. "Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental, 'Hacia Una Matriz Energética Diversificada En Ecuador.'"

http://www.ceda.org.ec/descargas/publicaciones/matriz_energetica_ecuador.pdf. 42.

Silvestre, S. 2004. *Photovoltaic Systems Modelling Using Matlab and Simulink*. Paris, France.

Solanski, ChetanSingh. 2011. *Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications*. Second Edi. India: Prentice-Hall.

Stapleton, Geoff. 2012. *Grid-Connected Solar Electric Systems: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*. New York: Earthscan.

Style, Oliver. 2012. *Energía Solar Autónoma*, Oliver Style. EEUU: Paperback.

Teknosolar. 2015. "Características Eléctricas de Un modulo Fotovoltaico."
<http://www.teknosolar.com/blog/caracteristicas-electricas/>.

Teodorescu, Remus. 2011. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. New Delhi, India.

Tigullio, J. 2015. "Modulo Fotovoltaico."
http://www.geopower.it/219__Moduli_fotovoltaici.

Ulloa, Raul. 2005. *Filtros (Aproximación Y Síntesis)*. Mexico: Universidad Iberoamericana.

Ultracell. 2013. "Batería 12V 150Ah Ultracell UCG 150-12 AGM Ciclo Profundo."
<http://www.digishop.cl/index.php?a=851>.

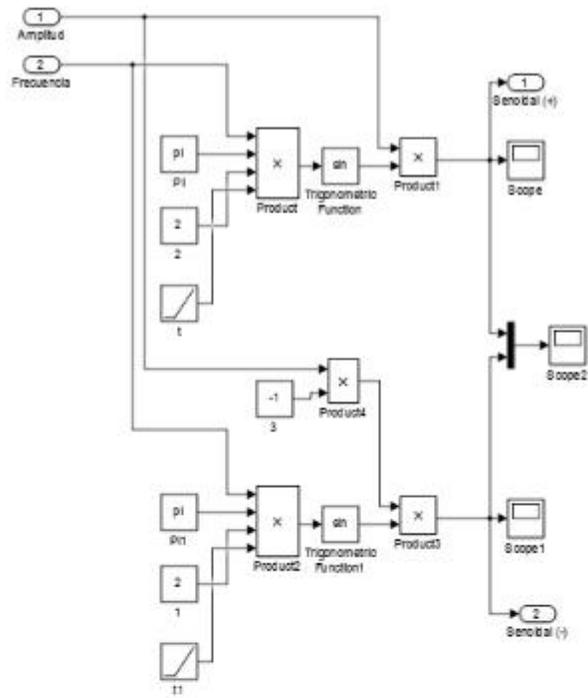
Valentín, Jose. 2012. *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. San Sebastian, España: Donostierra.

Victron. 2015. "Victron Gel 12v/60ah | Batería Gel Ciclo Profundo."
<http://solaronline.es/tienda/es/gel/229-victron-gel-12v-60ah-bateria-gel-ciclo-profundo.html>.

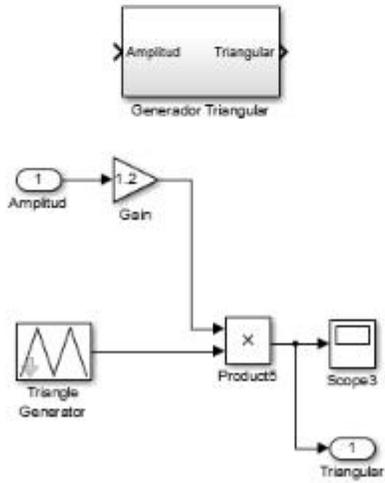
Zhou, K. 2002. "Relationship between Space-Vector Modulation and Tree-Phase Carried-Based PWM: A Comprehensive Analys." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 49.

ANEXO

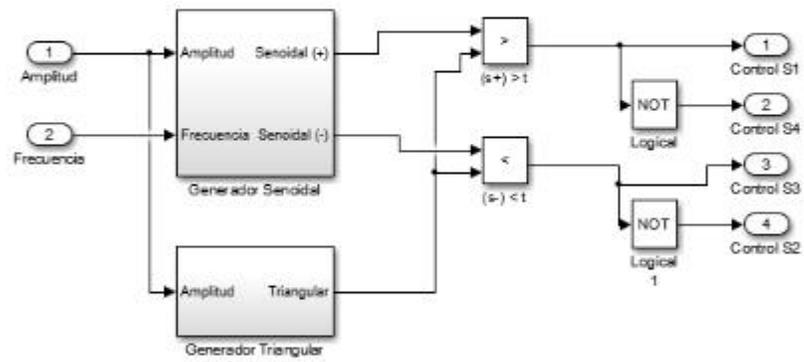
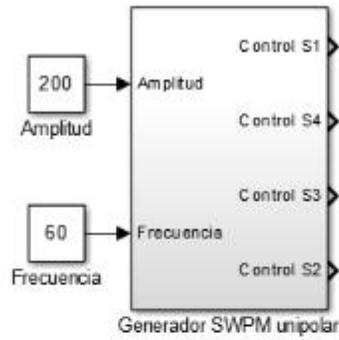
Anexo 1. Diseño en Matlab - Simulink del sistema fotovoltaico sin sistema de almacenamiento.



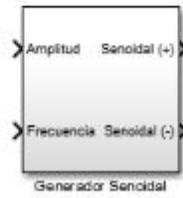
Generador Señal Triangular



Generador SPWM unipolar

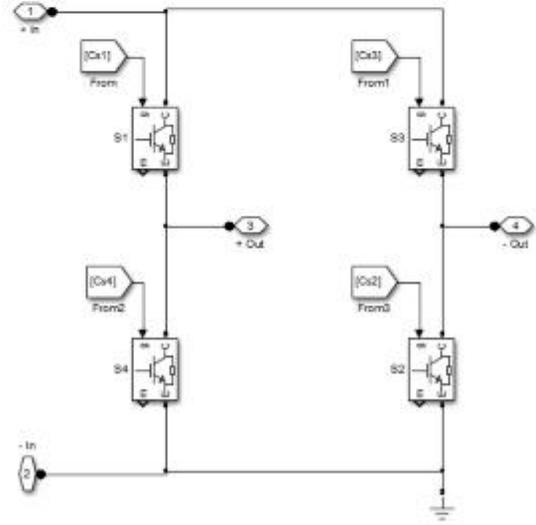
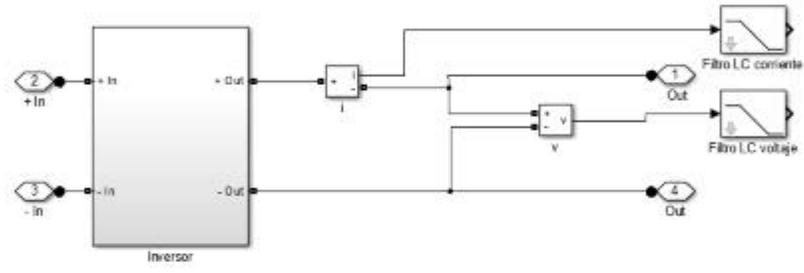
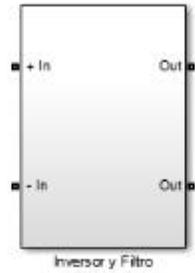


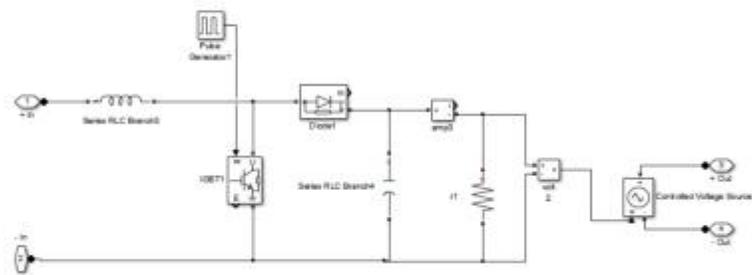
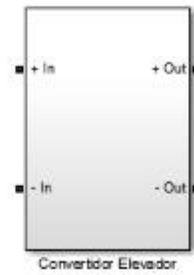
Generador Señal Sinusoidal

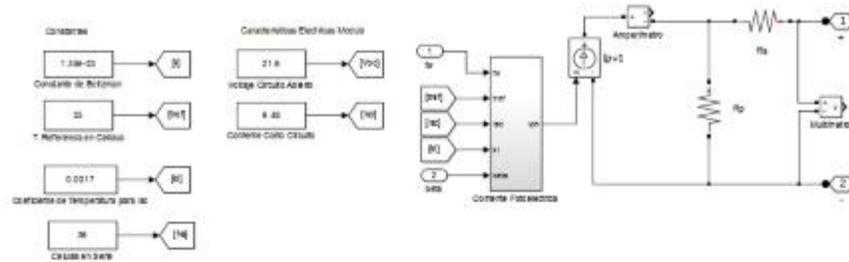


Inversor y Filtro

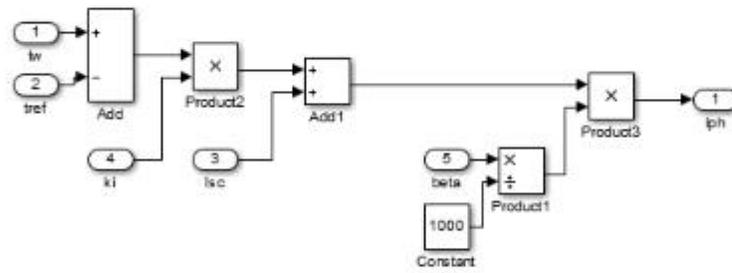
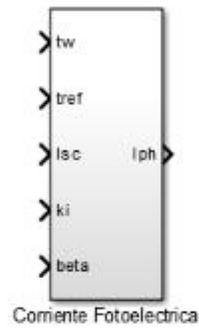
Diagrama de Bloque



Convertidor Elevador



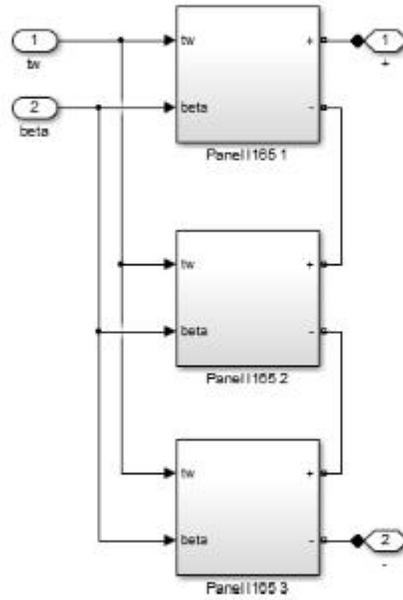
Corriente Fotoeléctrica



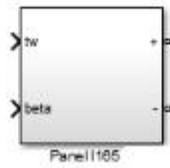


Conexión Paralelo 1

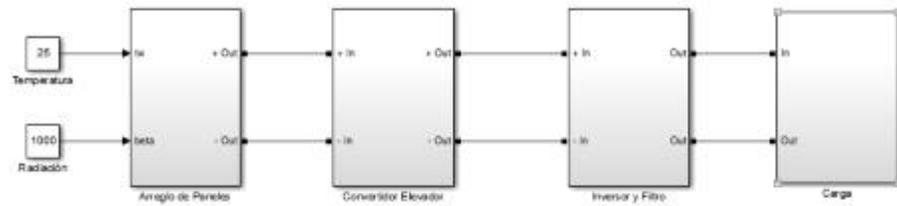
Conexión en serie



Modelo panel Fotovoltaico Isofoton I165



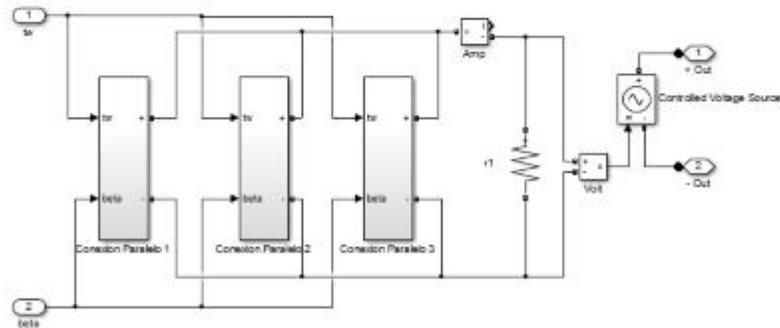
SISTEMA FOTOVOLTAICO SIN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO



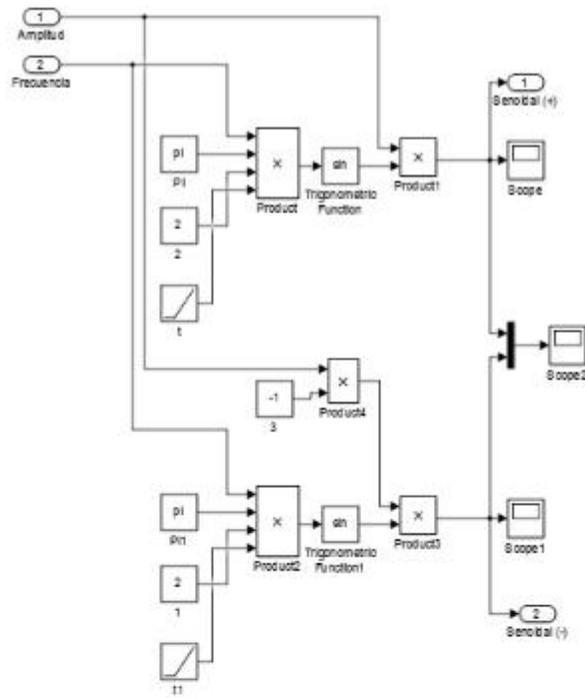
Arreglo de Paneles



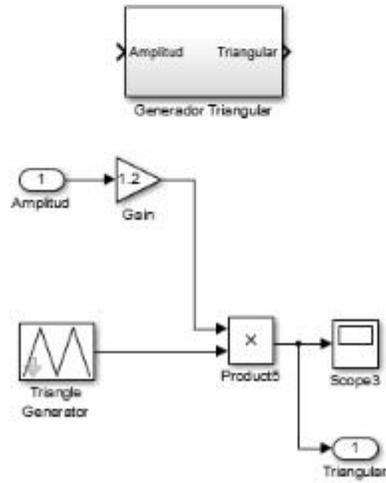
Conexión en Paralelo



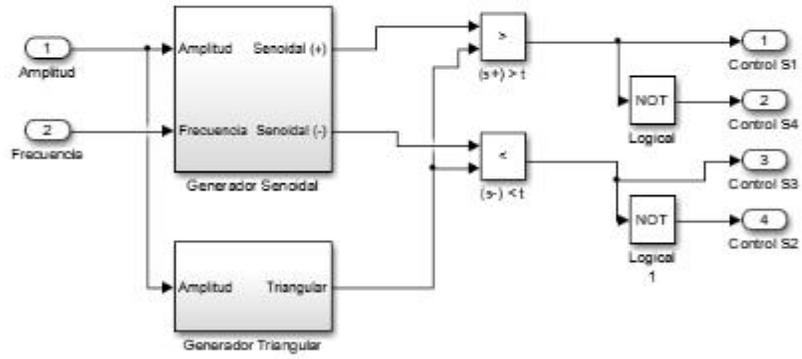
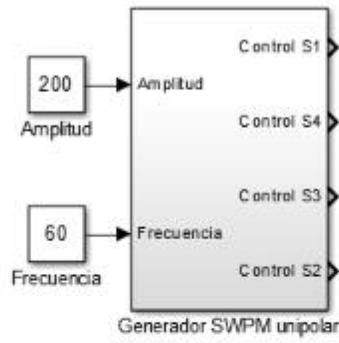
Anexo 2. Diseño en Matlab - Simulink del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, primer modelo.



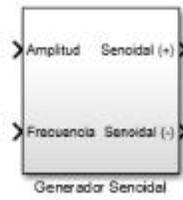
Generador Señal Triangular



Generador SPWM unipolar

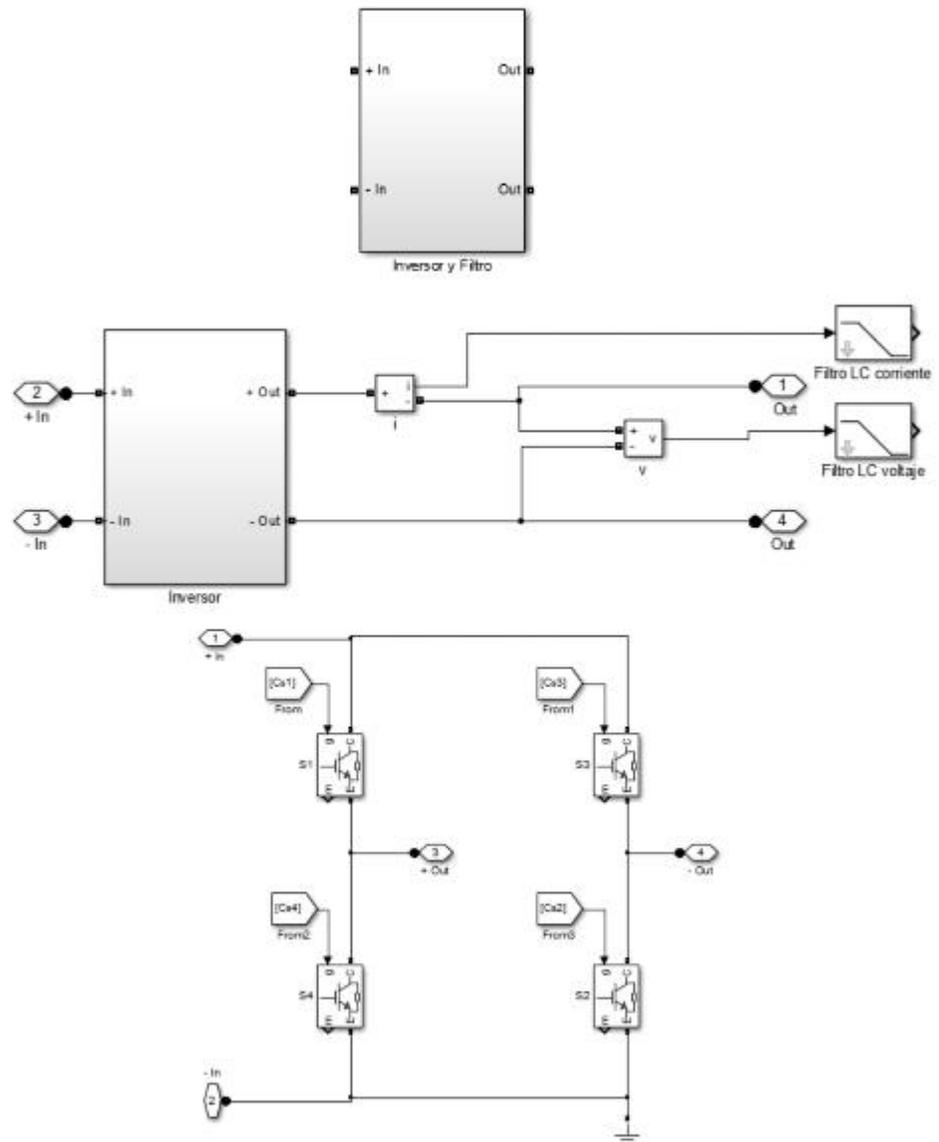


Generador Señal Sinusoidal

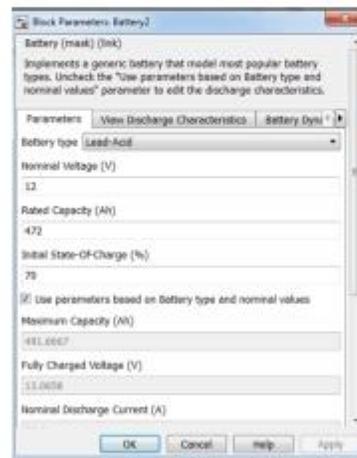
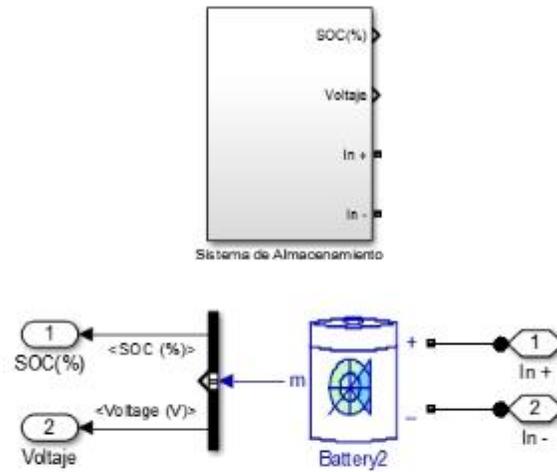


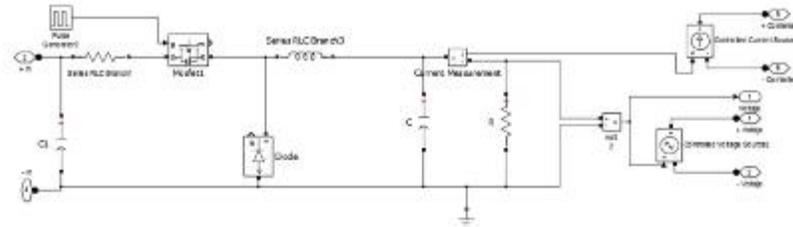
Inversor y Filtro

Diagrama de Bloque

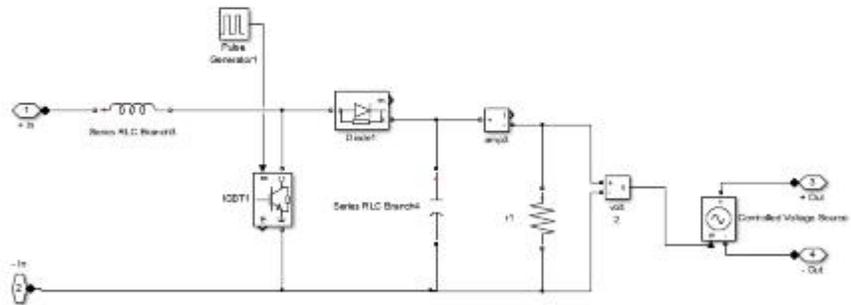
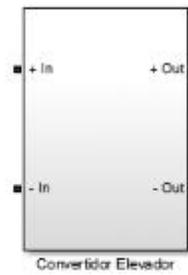


Sistema de Almacenamiento

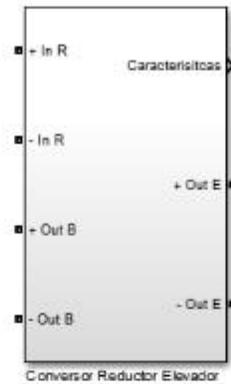




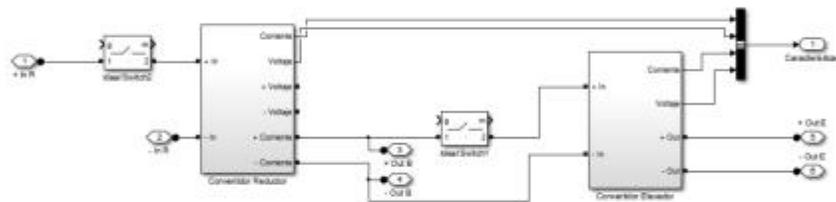
Convertidor Elevador



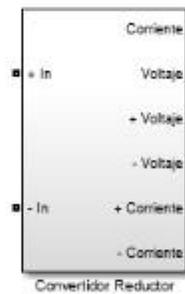
Conversor Reductor – Elevador



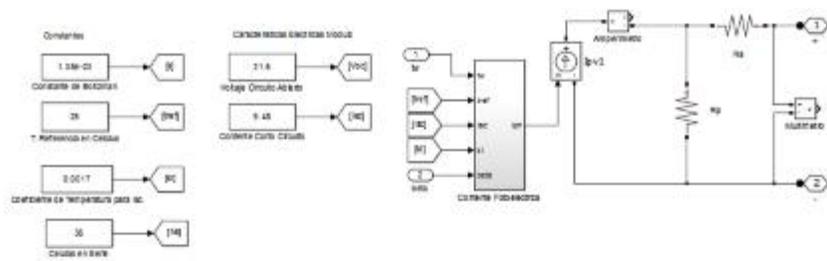
Conversor Reductor Elevador



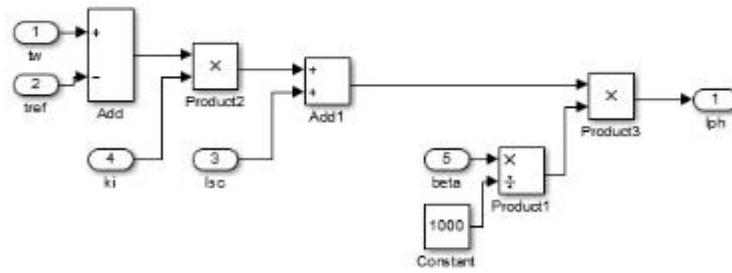
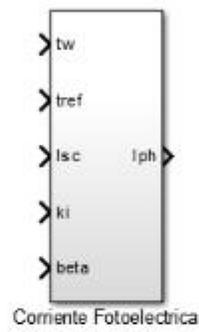
Convertidor Reductor



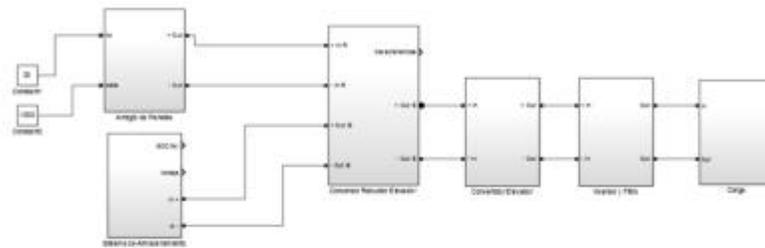
Convertidor Reductor



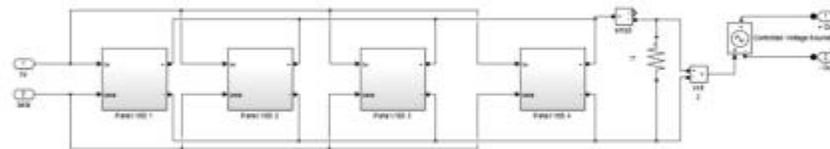
Corriente Fotoeléctrica



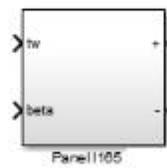
SISTEMA FOTOVOLTAICO CON SISTEMA DE ALMACENAMIENTO, PRIMER MODELO



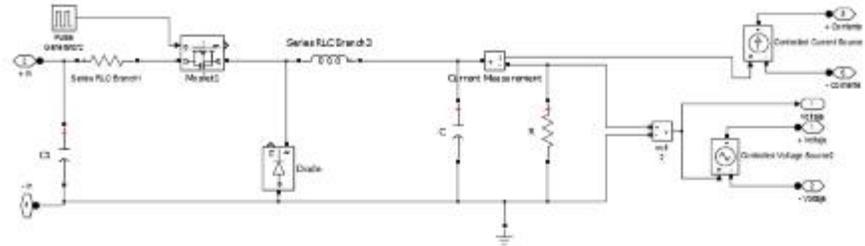
Arreglo de Paneles



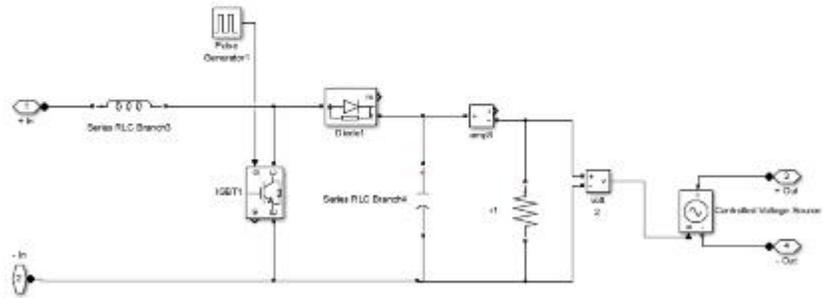
Modelo panel Fotovoltaico Isofoton I165



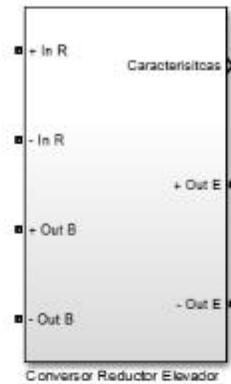
Anexo 3. Diseño en Matlab - Simulink del sistema fotovoltaico con sistema de almacenamiento, segundo modelo.



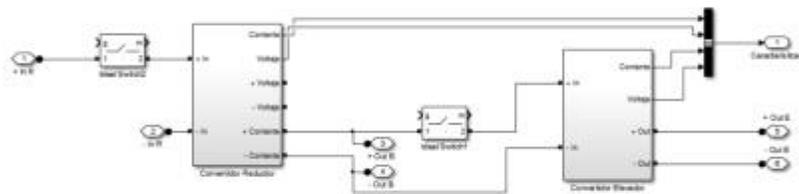
Convertidor Elevador



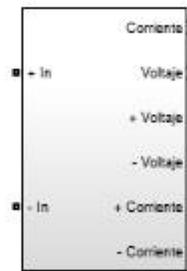
Conversor Reductor – Elevador



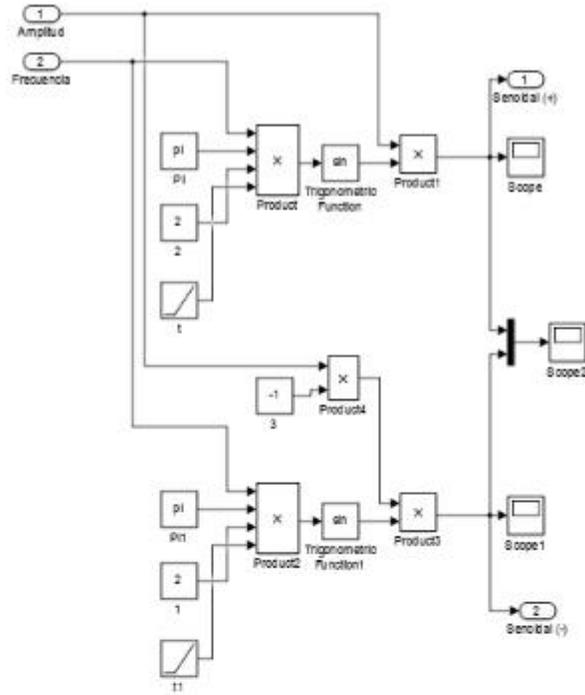
Conversor Reductor Elevador



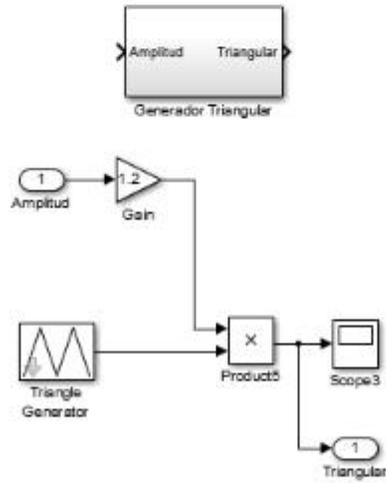
Convertidor Reductor



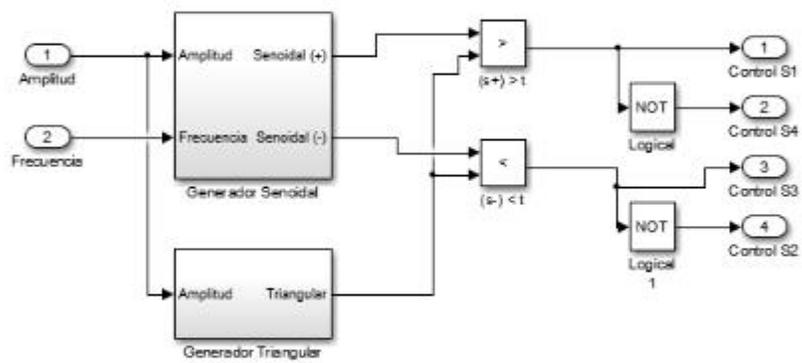
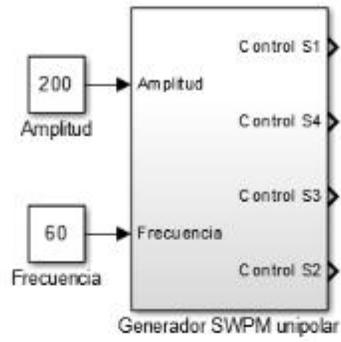
Convertidor Reductor



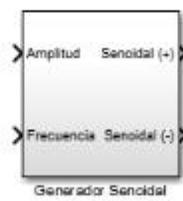
Generador Señal Triangular



Generador SPWM unipolar

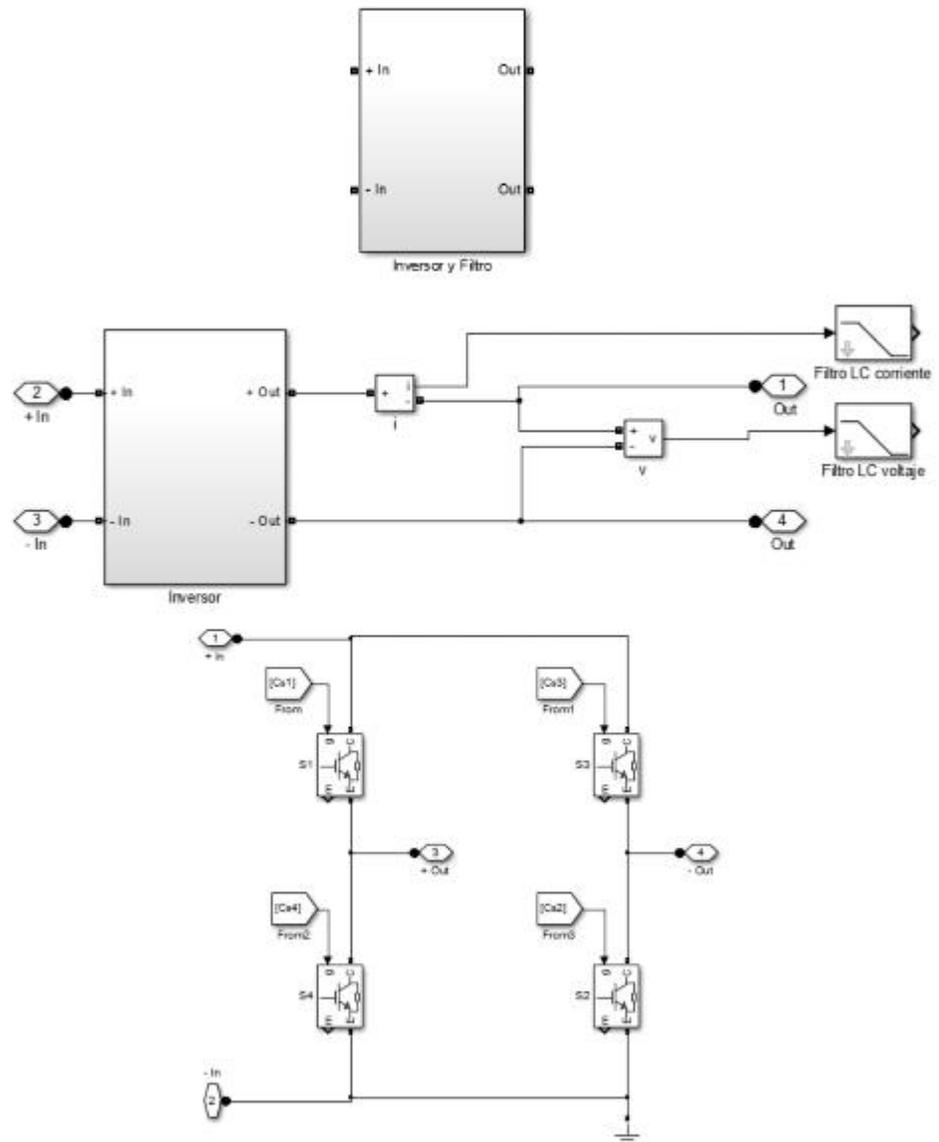


Generador Señal Sinusoidal

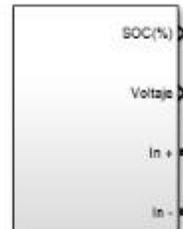


Inversor y Filtro

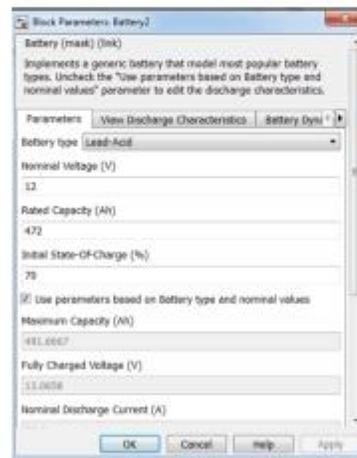
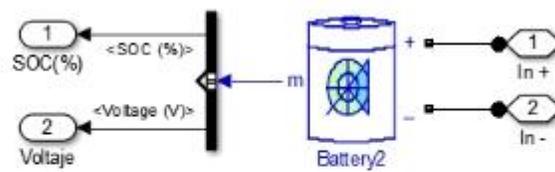
Diagrama de Bloque



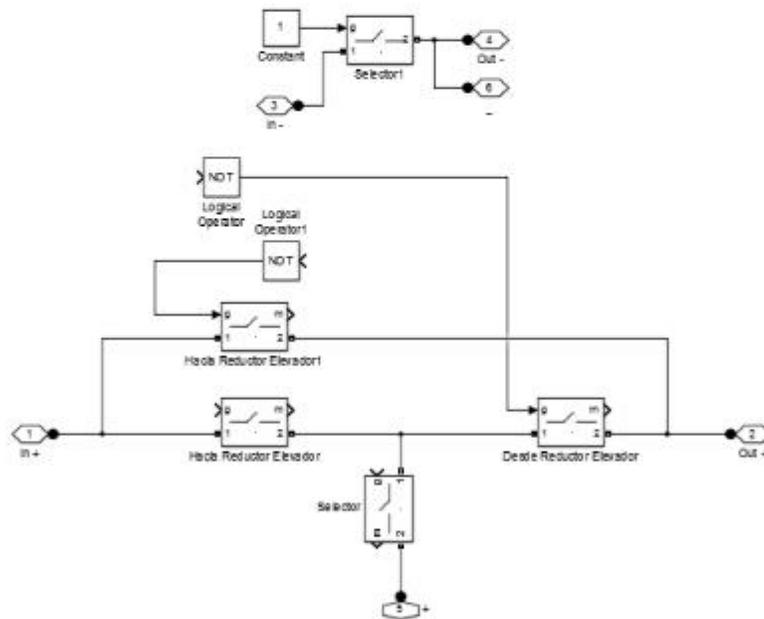
Sistema de Almacenamiento



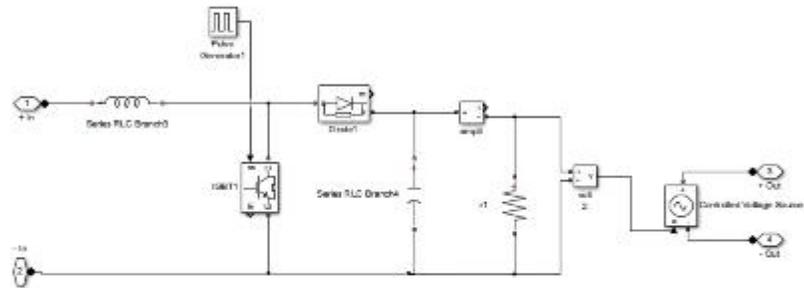
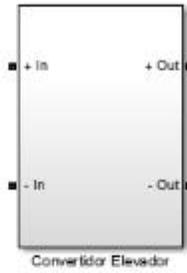
Sistema de Almacenamiento



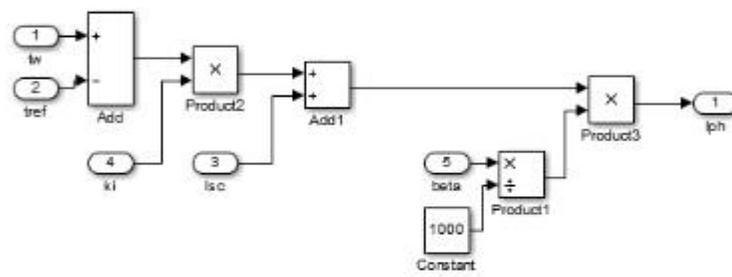
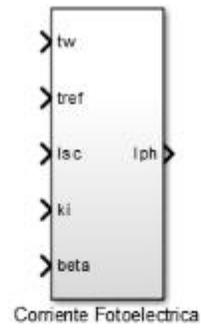
Enlace DC



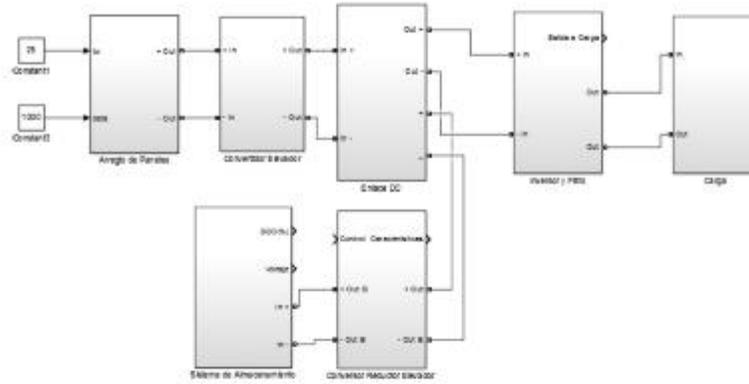
Convertidor Elevador



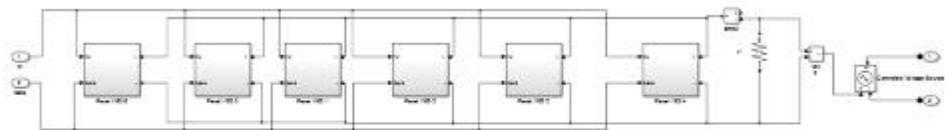
Corriente Fotoeléctrica



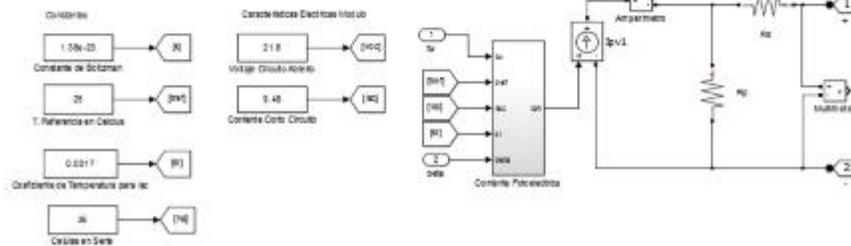
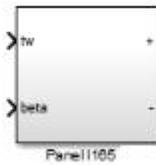
SISTEMA FOTOVOLTAICO CON SISTEMA DE ALMACENAMIENTO, SEGUNDO MODELO



Arreglo de Paneles



Modelo panel Fotovoltaico Isofoton I165



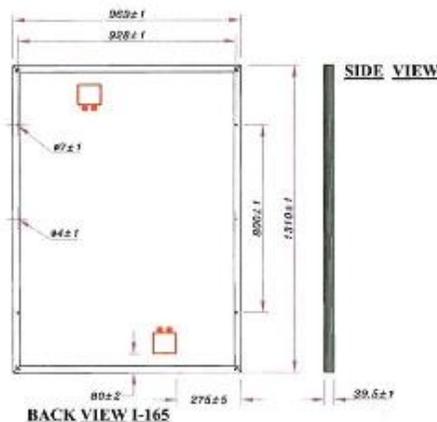
Anexo 4. Hoja de datos de dispositivos comerciales.



I-165 Pv Module

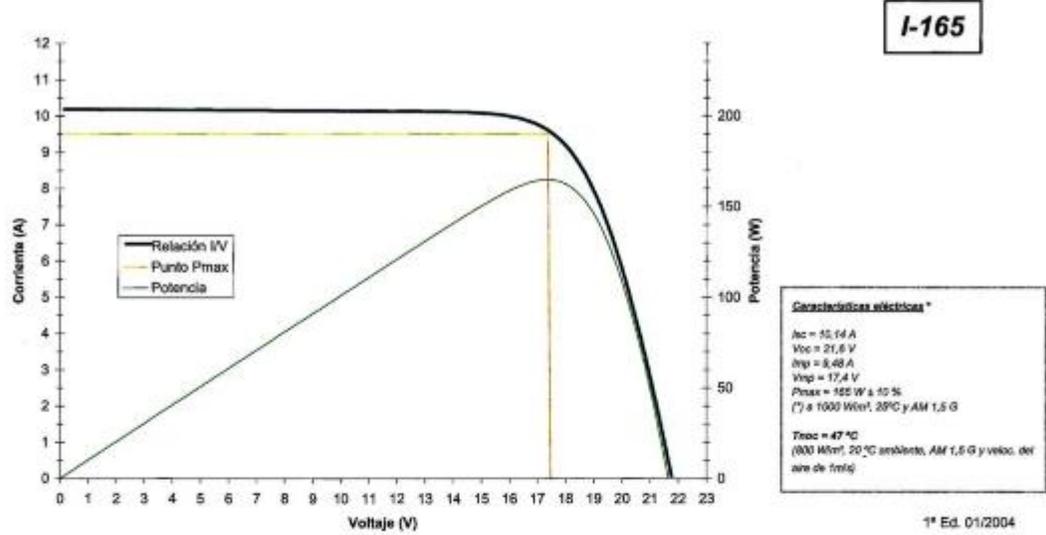
CHARACTERISTICS	
PHYSICAL	
Dimensions	1310 x 969 x 39,5 mm
Weight	16,5 kg
Number of cells in series	36
Number of cells in parallel	3
NOCT (800W/m ² , 20°C, AM 1.5, 1m/s)	47 °C
ELECTRICAL (1000 W/m², 25 °C cell, AM 1.5)	
Nominal Voltage (V _n)	12 V
Maximum Power (P _{max})	165 W _a ± 10 %
Short-circuit current (I _{sc})	10,14 A
Open circuit voltage (V _{oc})	21,6 V
Maximum power current (I _{max})	9,48 A
Maximum power voltage (V _{mpv})	17,4 V
CONSTRUCTIVE	
Cells	Single-crystal Si, textured and antireflectivity layered
Contacts	Redundant contacts on each cell for circuit reliability
Laminate	EVA (ethylene vinyl acetate)
Front face	Tempered glass with improved light transmission
Back face	Tough multi-layered backsheet Tedlar
Frame	Anodised aluminium
Connection boxes	2 x IP 65 with built-in bypass diodes
Grounding connection	Yes
Certifications	IEC 61215 and Class II by TÜV certificate
Cable Section	4-10 mm ²
Connection box	Pression screw with possibility of soldering/optional multi-contact

P/EZ 01/2014

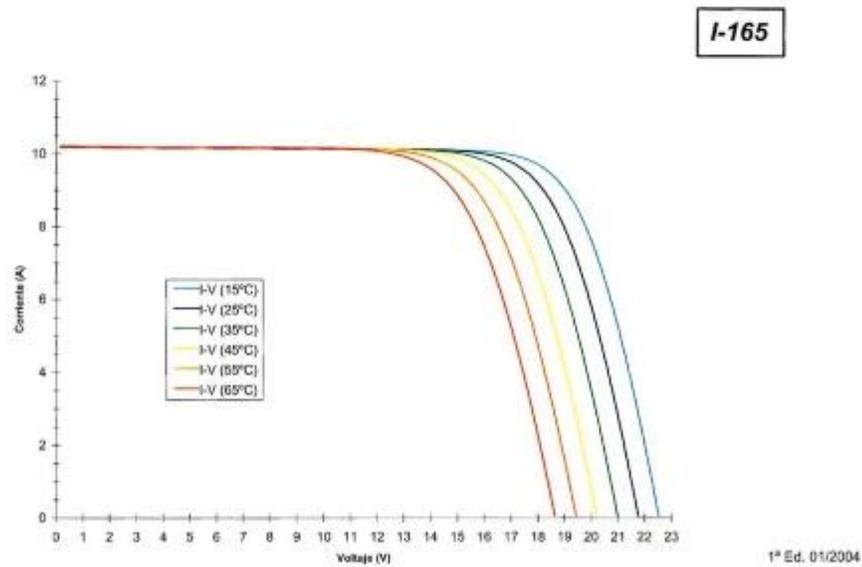


	HOME OFFICE 543 Northeast "E" Street Grants Pass, OR 97526 800 GO SOLAR www.energyoutfitters.com	CANADA British Columbia 604 596 2228 gord@energyoutfitters.com	NEW JERSEY 218 Little Falls Road, #7 & 8 Cedar Grove, NJ 07009 973 239 1815 davidw@energyoutfitters.com
--	--	--	--

Relación I-V en condiciones estándar de medida



Relación I-V en función de la Tª



UCG 150-12

12V 150AH

Deep Cycle Gel

Ultracell[®]

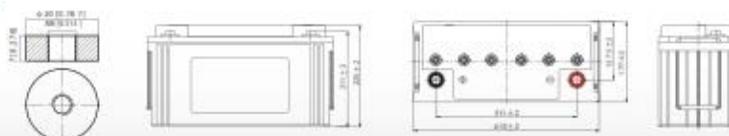
"Quality in Every Language"

UCG150-12**Physical Specification**

Part Number:	UCG150-12
Length:	485 ± 2 mm (19.09 inches)
Width:	170 ± 2 mm (6.69 inches)
Container Height:	240 ± 2 mm (9.45 inches)
Total Height (with terminal):	240 ± 2 mm (9.45 inches)
Approx Weight:	Approx 44 kg

Specifications

	Nominal Voltage	12V
	Nominal Capacity (10HR)	150AH
Terminal Type	Standard Terminal	F10
	Optional Terminal	F11
Container Material	Standard Option	ABS
	Flame Retardant Option (FR)	ABS (UL94 V0)
Rated Capacity	100.0 AH/0.04A	(20hr, 1.80V/cell, 25°C / 77°F)
	150.0 AH/15.0A	(10hr, 1.80V/cell, 25°C / 77°F)
	131.6 AH/26.3A	(5hr, 1.75V/cell, 25°C / 77°F)
	119.3 AH/39.6A	(3hr, 1.75V/cell, 25°C / 77°F)
	96.9 AH/56.5A	(1hr, 1.60V/cell, 25°C / 77°F)
Max Discharge Current	1500A (5s)	
Internal Resistance	Approx 2.5mΩ	
Discharge Characteristics	Operating Temp. Range	Discharge: -20 ~ 50°C (-4 ~ 131°F)
		Charge: 0 ~ 40°C (32 ~ 104°F)
		Storage: -20 ~ 50°C (-4 ~ 122°F)
	Nominal Operating Temp. Range	25 ± 3°C (77 ± 5°F)
	Cycle Use	Initial Charging Current less than 45.0A. Voltage 14.4V ~ 15.0V at 25°C (77°F) Temp. Coefficient -30mV/°C
	Standby Use	No limit on Initial Charging Current Voltage 13.0V ~ 13.8V at 25°C (77°F) Temp. Coefficient -20mV/°C
Capacity affected by Temperature	40°C (104°F)	103%
	25°C (77°F)	100%
	0°C (32°F)	86%
Design Floating Life at 20°C	15 Years	
Self Discharge	Ultracell batteries may be stored for up to 6 months at 25°C (77°F) and then a refresh charge is required. For higher temperatures the time interval will be shorter.	

Dimensions**F11 Terminal**

1 | Ultracell (UK) Ltd | Vestry Business Park | Vestry Road | Liverpool | L30 1NY | United Kingdom
Tel: +44 (0) 151 523 2777 Fax: +44 (0) 151 523 0855 Email: info@ultracell.co.uk

www.ultracell.co.uk

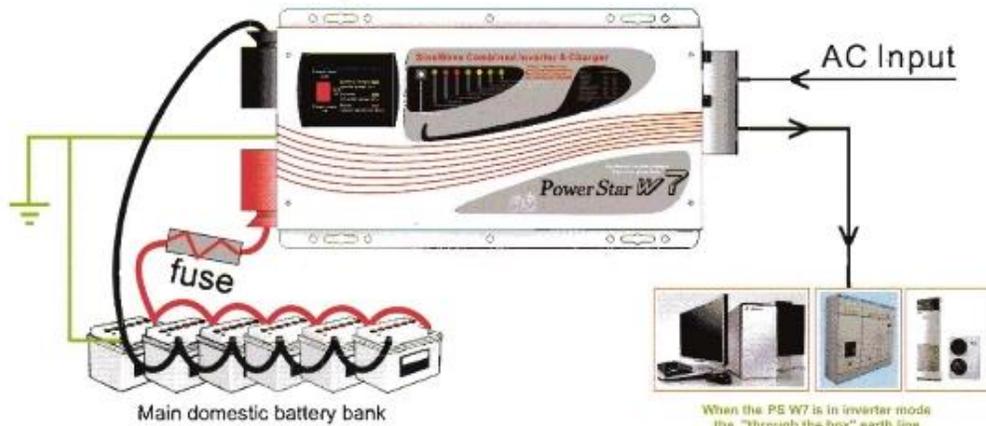
ALL DATA IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE



Combined inverter & charger

Basic wiring for the Power Star W7 Series

Warning: High voltage, do not open unless qualified to do so; Please read instructions before working on this product.

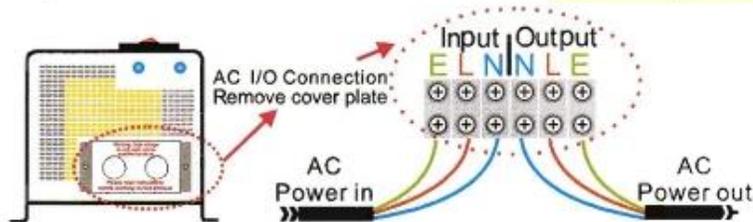
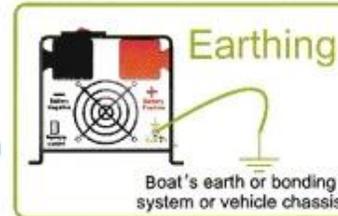


When the PS W7 is in inverter mode the "through the box" earth line is automatically disconnected from the input earth and joined to the output neutral, complying with the natural earth inverter requirements. If you wish to maintain a through earth simply connect the input earth to the output earth.

WHAT CABLE TO USE in mm²:

A charger or inverter	cable run distance 0 - 1.5m	cable run distance 1.5 - 4.0m
125-180 A	50 mm ²	70 mm ²
180-330 A	70 mm ²	90 mm ²

Please note that if there is a problem obtaining for example 90 mm² cable, use 2* 50 mm² or 3* 35 mm². One cable is always best but, cable is simply copper and all you require is the copper, so it does not matter if it is one cable or 10 cables as long as the square area adds up. Performance of any product can be improved by thicker cable and shorter runs, so if in doubt round up and keep the length as short as possible.



Check list

- 1) Ensure that the inverter has the correct DC voltage for your boat or vehicle system, i.e. 12v or 24v/48v.
- 2) Fit as close to the batteries as possible, the shorter the DC cables the better. Voltage drop on long cables will effect the unit's performance.
- 3) Do not reverse the cables! Connect the red cable to the positive terminal and the black cable to the negative terminal of the battery. In the event of reverse polarity the unit could be totally destroyed.
- 4) Always use the inverter in an environment which is well ventilated, not exposed to direct sunlight or a heat source, away from water, moisture, oil or grease, away from any highly inflammable substance, out of reach from children.
- 5) The output voltage of this unit must never be on your AC system at the same time as any other AC source such as the 230V external mains line or a generator. All external power must go through the PS W7.
- 6) Always switch on the PS W7 first, before plugging in any appliance.
- 7) Under new electrical legislation only professional electricians should install this product.

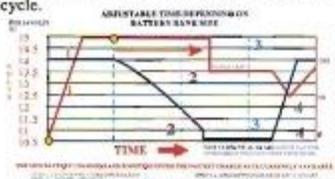
Ensure the fitting instructions are fully understood before fitting this product.

Installation

- 1) Position the unit as close to the main battery bank as possible
- 2) Position in a cool, dry & well ventilated space
- 3) Orientation of the unit is not critical.
- 4) Either purchase the standard cable set from Dealer which is about 1.5 metres, or if using your own cable, use the cable size chart provided on the installation drawing to ensure you have thick enough cable for the DC leads. In the event of not being able to get the size requested (it can be hard to get thick cable) then simply add multiple length of thinner cable, i.e. if you cannot get 90mm² cable then use 3* 35mm² cable, at the end of the day its just copper we need.
- 5) Fit a fuse suitable for the job, again look at the installation drawing. We have a full range of high current fuses in the GANLR range of gold fuse products, ranging from 100-500 Amps on the DC side
- 6) Connect the cables from the batteries to the fuse then to the unit, this way if there is a fault at the unit the fuse is already in place and this will be safe. In the event of a isolation switch being used, please ensure the rating of the switch can handle the power of the unit.
- 7) Ensure the unit is switched off during installation.
- 8) On the AC side ensure the shore power (all external AC sources) are totally disconnected, connect the output from the inverter to suitable Residual Current Breaker (R.C.B. for earth protection) and current over load trips. Fuse the AC input side depending on through power requirements, the max through power is 30Amps, so fuse at 40A (allowing also for charger consumption) if you intend to use the full through power for standard 13-16 amps throughput then a 20A fuse would be appropriate.
- 9) We recommend Multi core tri rated AC cable, if used on a boat or vehicle, as this is much safer where vibration is likely. Only use single solid household AC cable if the product is being used as a power source for a house or platform free of vibration.
- 10) Before attempting to switch on the unit, please ensure you have selected the correct battery type on the small battery type selector switch on the front of the main box, rotate the switch to your battery type. The Progressive charge control software will automatically adjust for battery bank size and state

Charge Stage Transition Definitions

- **Boost CC Stage:** If AC input is applied, the charger will run at full current in CC mode until the charger reaches the boost voltage.
- **Software timer** will measure the time from AC start until the battery charger reaches 0.3V below the boost voltage, then take this time as T_1 , and $T_2 \times 10 = T_1$.
- **Boost CV Stage:** Start a T_1 timer; the charger will keep the boost voltage in Boost CV mode until the T_1 timer has run out. Then drop the voltage down to the float voltage. The timer has a minimum time of 1 hour and a maximum time of 12 hours.
- **Float Stage:** In float mode, the voltage will stay at the float voltage.
- If the AC is reconnected or the battery voltage drops below 12Vdc/24Vdc, the charger will reset the cycle above.
- If the charge maintains the float state for 10 days, the charger will reset the cycle.



The battery type and charge voltage recommendations are set out above For 24V unit x the above by 2. Some battery types may look confusing such as gel usa and gel euro, AGM usa and AGM euro. If you find this confusion then join the club, we have had the different voltage curves supplied to us by different companies from the U.S.A. and Europe for what we seem the same product, however it's not our call, we simply supply the options, if in doubt call your battery supplier and ask which charge voltage they want you to use for their battery type, and select the closest to it. If totally confused then use the lower voltage setting until you have had a higher voltage setting confirmed to you by whoever supplied the batteries to you.

The de-sulphation cycle on switch position 8 is marked in red because this is a very dangerous setting if you do not know what your are doing. Before even attempting to use this cycle you must clearly understand what it does and when and how you would use it.

What causes sulphation? This can be occur with infrequent use of the batteries, or if the batteries have been left discharged so low that they will not accept a charge. This cycle is a very high voltage charge cycle designed to try to break down the sulphate 'crust' that is preventing the plates taking a charge and thus allow the plates to clean up and so accept charge once again.

How to use this function. (only suitable for open lead acid batteries)

- 1) Ensure the battery bank is totally isolated from anything else on the boat or vehicle; the high voltage applied by this setting could destroy all your electronics and other electrical equipment still connected (because all these instructions are in red, this is a very expensive mistake).
- 2) Make sure the battery compartment is very well ventilated and battery caps are removed.
- 3) Switch the battery type selector switch to the correct position, then switch the AC power on.
- 4) Because this is such a dangerous setting there is a 4 hr time out period build into the software, however on a very large battery bank this may not be enough and the unit may need to be switched off and on again to do another cycle.

What to expect on this cycle.

I would recommend you monitor the voltage of the sulphated battery bank. When you switch on the cycle the voltage should shoot up to the full 15.5 volts very fast (within minutes) this is because the batteries cannot accept the charge (assuming they are sulphated). However, over a period of 1-2 hrs the voltage should start to drop (as the plates start to clean and the batteries start to take a charge) the voltage could drop way down to about 12.5 volts then start to rise. This shows the batteries are now taking a charge and starting to fill up. In this case it would be safe to switch the unit off and select your normal charging curve and hopefully this will bring your batteries back from the dead. You may need to repeat the process a few times. Please note this is a professional guess tool, which most times helps, but its not magic, so expect the worst and hope for the best. Never leave a system unattended when on this mode. If the battery temperature reaches above 50 deg c (ie. if the batteries are almost too hot to touch) then stop the process).

Install remote control.

Isolate the unit before attempting this so there are no high voltages. The local control panel on the front of the unit can also be used as a remote control, reveal the screws holding the panel onto the main box, carefully remove the panel and disconnect it from the connection socket behind the unit.

Fill the hole on the main unit using the blank replica of the remote control unit.

Using the remote cable supplied then re-connect the panel to the unit

Operation and what to expect

- 1) After the unit is installed, using the panel on the front of the unit, and with the shore power (120/230V AC) still disconnected, switch the unit on. The leds will cycle through there test routine, then the unit should go into inverter mode and 120/230V should be produced on the output AC terminals (provided the batteries are over 11 volts).
- 2) If the above is ok, then connect the shore power to feed 120/230V into the PS W7, after a short while, the inverter should go off line, and feed the shore power through the inverter. Changeover is about 20 milli secs (so fast that you should not be able to notice it) and the battery charger should come on-line and go through it's charge sequence ending, after 1-10 hrs, with float voltage.

Common faults:

There are numerous faults which the unit can detect and transmit the fault to you by the use of L.e.d.s and alarms on the unit itself. The remote control gives a little help but the real fault finding can only take place at the unit. Please see the fault finding chart over the page for full information.

General specification

Input Wave form:
 Nominal voltage:
 Low voltage trip:
 Low voltage re engage:
 High voltage trip:
 High voltage re engage:
 Max input AC voltage:
 Nominal input frequency:
 Low freq trip:
 High freq trip:
 Output wave form:
 Overload protection:
 Short circuit protection:
 Transfer switch rating:
 Efficiency on line transfer mode:
 Line transfer time:
 Bypass without battery connected:
 Max bypass current:
 Bypass over load current:
Inverter specification / output
 Output wave form:
 Output continuous power watts:
 Output continuous power VA:
 Power factor:
 Nominal output voltage rms:
 Output voltage regulation:
 Output frequency:
 Nominal efficiency:
 Surge ratings:
 Short circuit protection:
Inverter specification / input
 Nominal input voltage:
 Minimum start voltage:
 Low battery alarm:
 Low battery trip:
 High voltage alarm:
 Power saver:
 Power saver:

Charger mode specification

Input voltage range:
 Output voltage:
 Charge current:
 Battery initial voltage for start up:
 Over charge protection shutdown:
 Charge curves (4 stage constant current) battery types
 4 step digital controlled progressive charge
Battery type:
 Gel U.S.A
 A.G.M. 1
 A.G.M. 2
 Sealed lead acid
 Gel euro
 Open lead acid
 Calcium
 De-sulphation
 Remote control / RS232 / USB
 Size: in mm
 Weight:

Power star

Sine wave (Utility or Generator)
 120VAC 230VAC
 90v ± 4% 184v/154v ± 4%
 100v ± 4% 194v/164v ± 4%
 140v ± 4% 253v ± 4%
 135v ± 4% 243v ± 4%
 150VAC 270VAC
 50Hz or 60Hz (Auto detect)
 47 Hz for 50 Hz, 57Hz for 60Hz
 55 Hz for 50 Hz, 65 Hz for 60Hz
 (Bypass mode) same as input
Circuit breaker
 30 amp or 40 amp
Circuit breaker
 30 amp or 40 amp
 35 amp or 45 amp. Alarm
 Pure sine wave or quasi sine wave
 1000 2000 3000 4000 5000 6000
 1000 2000 3000 4000 5000 6000
 0.9-1.0
 120/230VAC
 +/- 10% rms
 50Hz ± 0.3Hz or 60Hz ± 0.3Hz
 >88%
 3000 6000 9000 12000 15000 18000
 Yes, fault after 10 secs
 12v 24v 48v
 10v 20v 40v
 10.5v 21v 42v
 10v 20v 40v
 16v 32v 64v
 Below 25 watts when enabled
 Same switched on/off on remote

95-127VAC 194-243VAC/164-243VAC(W)
 Dependent on battery type
 35A / 70A
 0-15.7v for 12v(*2 for 24v, *4 for 48v)
 15.7v for 12v(*2 for 24v, *4 for 48v)
Fast V Float V (*2 for 24v; *4 for 48v)

14.0	13.7
14.1	13.4
14.6	13.7
14.4	13.6
14.4	13.8
14.8	13.3
15.1	13.6

 15.5 for 4 hrs
 Yes, Optional
 1900/2000/3000 Model:442*218*179mm*
 4000/5000/6000 Model:598*218*179mm*
 1000 2000 3000 4000 5000 6000
 18kg 20kg 22kg 35kg 38kg 40kg

Ordering Information

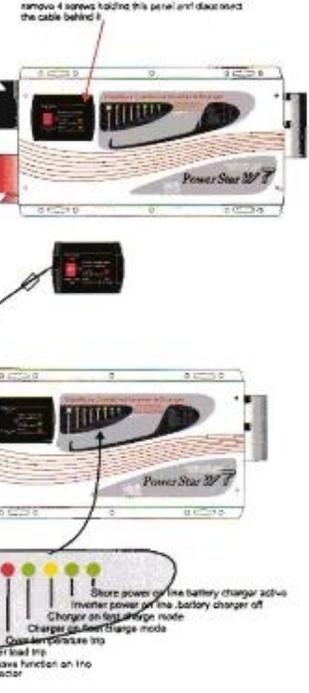
Typical part number > PSWT - 8 - 00 - 12 - 6 66

1 Basic Series
 PSWT = Combined Inverter & Charger
 2 Waveform
 S = Pure Sine Wave Q = Quasi Sine Wave
 3 Power Rating
 10 = 1000W 20 = 2000W 30 = 3000W
 40 = 4000W 50 = 5000W 60 = 6000W
 4 Battery Voltage
 12 = 12VDC 24 = 24VDC 48 = 48VDC
 5 AC Voltage
 E = 230VAC NC = 120VAC
 6 Suffix
 00 = Standard model 91 = Custom model

AC input current specification

Input C	SW Status
1A	SW, ON
2A	SW+SW, ON
3A	SW+SW+SW, ON

Remote control installation



Indication & fault finding chart

Status	Function	L.E.D.s on main unit				L.E.D.s on remote	
		Green	Red	Yellow	Blue	audible alarm	Green
Charge Function	Constant current charge	on	on	on	on	on	on
	Constant voltage charge	flash	on	on	on	on	on
	Float	on	on	on	on	on	on
Inverter mode	Standby	on	on	on	on	on	on
	Inverter on	on	on	on	on	on	on
Alarms	Power saver on	on	on	on	on	on	on
	Battery low voltage	on	on	on	on	on	on
	Battery high voltage	on	on	on	on	on	on
	Over load (inverter mode)	on	on	on	on	on	on
	Over temp (inverter mode)	on	on	on	on	on	on
Fault Mode	Over temp (line mode)	on	on	on	on	on	on
	Over charge	on	on	on	on	on	on
	Fan lock	on	on	on	on	on	on
	Battery high voltage	on	on	on	on	on	on
Inverter mode	Inverter mode overload	on	on	on	on	on	on
	Over temperature	on	on	on	on	on	on
	Back voltage	on	on	on	on	on	on



El controlador solar **ProStar** de Morningstar es el líder mundial en controladores solares de mediano rango, ya sea para aplicaciones profesionales como para el consumidor en general. Esta segunda generación de controladores ProStar ofrece:

- Adiciona nuevas prestaciones y protecciones usando tecnología altamente avanzada
- Proporciona mayor vida útil a la batería y mejora el rendimiento del sistema
- Define nuevos estándares de confiabilidad y genera diagnósticos automáticos

Prestaciones Estándar:

- Versiones disponibles: 15 o 30 amperios
12 / 24 o 48 volts
positivo o negativo a tierra
- Vida útil de 15 años (estimado)
- Carga de baterías mediante PWM (sin derivación)
- Selección del tipo de batería: gel, sellada o con líquido
- Controles y medidas muy precisas
- Puente para eliminar el ruido de telecomunicaciones
- Paralelo para hasta 300 amp
- Compensación de temperatura

- Tropicalización: revestimiento de protección, fijadores de acero inoxidable y disipador de calor de aluminio anodizado
- No es necesario conmutación ni medición en la pierna aterrada
- Componentes de estado sólido, 100%
- Caídas de tensión muy pequeñas
- Desconexión por baja tensión (LVD — Low Voltage Disconnect) con compensación de corriente
- Indicación de status y fallas de batería a través de LED
- Capaz de suportar sobrecargas hasta del 25%
- Terminales remotos con sensores de tensión de batería

Protecciones Electrónicas

- Cortocircuito — paneles solares y carga
- Sobrecarga — paneles solares y carga
- Polaridad invertida
- Corriente invertida por la noche
- Desconexión por alta tensión
- Desconexión por alta temperatura
- Protección contra relámpagos y sobre tensión o transitorios
- Cargas protegidas contra picos de tensión
- Restablecimiento automático de todas las protecciones

PROSTAR™ ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Prestaciones Opcionales del ProStar:

- Medidor digital
 - Visor de tensión y voltaje de alta precisión
 - Bajo consumo propio (1 mA)
 - Incluye botón de desconexión manual
 - Muestra 5 funciones de protección y de condiciones de desconexión
 - El auto-diagnóstico (auto-test) provee una prueba completa del ProStar:
 - Muestra 9 diferentes parámetros de estado del controlador, incluyendo la temperatura
 - Muestra las fallas detectadas
- Positivo a Tierra
- Sensor remoto de temperatura

Carga de la batería optimizada:

El ProStar tiene 4 etapas de carga de batería, para proporcionar una mayor capacidad y tiempo de vida útil a la batería.



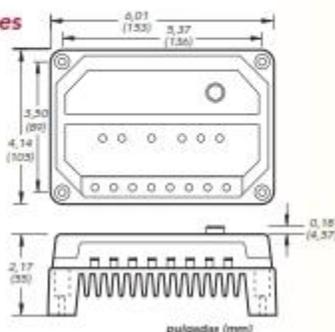
Especificaciones Mecánicas:

Peso:

0,34 kg

Calibre del cable:

6 AWG
(16 mm²)



GARANTÍA: Cinco años de garantía. Contáctese con Morningstar o con un distribuidor autorizado para obtener los términos completos de la garantía.

DISTRIBUIDOR AUTORIZADO DE MORNINGSTAR:

Versiones del ProStar:

	PS-15	PS-30	PS15M-48V
Corriente nominal del panel solar	15A	30A	15A
Corriente nominal de carga	15A	30A	15A
Tensión del sistema	12/24V	12/24V	48V
Opciones:			
Medidor digital	si	si	estándar
Tierra positiva	no	si	si
Sensor remoto de temperatura	si	si	si

Puntos de Ajuste de La Batería*

	Gel	Sellada	Con liquido
Tensión de regulación	14,0	14,15	14,4
Flotante	13,7	13,7	13,7
Ecualización	n/a	14,35	14,9/15,1
Desconexión de la carga	11,4	11,4	11,4
Reconexión de la carga	12,6	12,6	12,6

Observación: los valores están especificados para 12V.

Use 2X para 24V e 4X para 48V.

Especificaciones Eléctricas:

	12V	24V	48V
Compensación de temperatura (mV/°C)*	-30mV	-60mV	-120mV
Precisión	40mV	60mV	80mV
Minima temperatura de operación	8V	8V	15V
Autoconsumo	22mA	25mA	28mA
Coefficiente de corriente LVD**	-20mV	-40mV	-80mV
Algoritmo de carga	PWM, tensión constante		
Temperatura de operación	-40°C a +60°C		
Visor digital:			
Temperatura de funcionamiento	-30°C a +85°C		
Precisión de la tensión	0,5%		
Precisión de corriente	2,0%		
Autoconsumo	1 mA		

* Referencia 25°C

** por ampere de carga



1098 Washington Crossing Road
Washington Crossing, PA 18977 USA
Tel: 215-321-4457 Fax: 215-321-4458
E-mail: info@morningstarcorp.com
Website: www.morningstarcorp.com

PRINTED IN USA 2115-81-001



DISEÑO COMPACTO CON TODAS LAS PRESTACIONES

Praga 24 pulg.

Placa de inducción de 4 focos

- Seguridad y eficiencia
- Responsabilidad ambiental
- Grill eléctrico
- Booster grande

Características



Seguridad y eficiencia

Esta tecnología ofrece en cada foco inductor sensores para cuidar tu electrodoméstico y preservar tu seguridad. Reconoce automáticamente la olla y si se quedó encendido y sobrepasa los 220 C, el artefacto se apagará.



Responsabilidad ambiental

La pérdida de energía bajo este sistema es muy baja, lo que permite que el tiempo se reduzca notablemente al momento de cocinar, y si cocinas en menos tiempo, menos electricidad estarás pagando.



Grill eléctrico

Disfruta de un sabor inigualable en tus comidas favoritas, hamburguesas y gratinadas. ¡Sensacional!



Booster grande

Consigue la máxima potencia en apenas unos segundos. Acelera el calentamiento y reduce el tiempo de cocción.

Especificaciones

INFORMACIÓN GENERAL

- Touch control con 10 niveles de potencia
- Placa vidrio cerámica de fácil limpieza
- Temporizador/ Apagado automático
- Sensor inteligente de recipientes
- Sensor bloqueo de sobrecalentamiento
- Bloqueo para niños
- Máxima eficiencia energética
- Cuerpo de acero inoxidable
- Tapa vidrio templado templado con perfil
- Función Booster en 4 inductores

POTENCIA

- 940W - 2200W
- 200-240v
- 1400W

INDUCTORES

- 1: 30cm, 1200w 2: 30cm, 1200w 3: 30cm, 1500w 4: 30cm, 1200w

DIMENSIONES (MM)

- Ancho:600/Prof:985/Alto:940

HORNO Y ZONA INFERIOR

- Grill eléctrico
- Doble vidrio templado en el horno
- Vidrio reflectivo en el horno
- Control exacto de temperatura
- Luz en el horno
- Calienta platos



ALTO DESEMPEÑO PARA ESPACIOS
REDUCIDOS

ei2pve

Placa de inducción de 2 focos

- Booster
- Regatones en la parte inferior
- Seguridad y eficiencia
- Responsabilidad ambiental

Características



Booster

Conquista la máxima potencia en apenas unos segundos. Acelera el calentamiento y reduce el tiempo de cocción.



Regatones en la parte inferior

Nuestro producto cuenta con regatones en la parte inferior de tal manera que lo puedes colocar sobre el mesón o empotrarlo.



Seguridad y eficiencia

Esta tecnología ofrece en cada foco inductor sensores para cuidar tu electrodoméstica y preservar tu seguridad. Reconoce automáticamente la olla y si se quedó encendida y sobrepasa los 220 °C el artefacto se apagará.



Responsabilidad ambiental

La pérdida de energía bajo este sistema es muy baja, lo que permite que el tiempo se reduzca notablemente al momento de cocinar, y si cocinas en menos tiempo, menos electricidad estás pagando.

Especificaciones

INFORMACIÓN GENERAL

- Touch control con 10 niveles de potencia
- Placa vitro cerámica de fácil limpieza
- Función Booster en 1 inductor
- Temporizador/ Apagado automático
- Sensor inteligente de recipientes
- Sensor bloque de sobrecalentamiento
- Bloqueo para niños
- Máxima eficiencia energética
- Regatones estabilizadores

POTENCIA

- 3500W- 4000W
- 200-240v

INDUCTORES

- 1: 14cm. 1400w 2: 160cm. 1400w

DIMENSIONES (MM)

- Ancho:310/Prof:320/Alt:60

DIMENSIONES PARA EMPOTRAR (MM)

- Ancho:280/Prof:490



POTENCIA Y ECONOMIA

ei4pvi60

Placa de inducción de 4 focos

- Booster
- Regatones en la parte inferior
- Seguridad y eficiencia
- Responsabilidad ambiental

Características



Booster

Conseguir la máxima potencia en apenas unos segundos. Acelera el calentamiento y reduce el tiempo de cocción.



Regatones en la parte inferior

Nuestro producto cuenta con regatones en la parte inferior de tal manera que lo puedes colocar sobre el mesón o empotrarlo.



Seguridad y eficiencia

Esta tecnología ofrece en cada foco inductor sensores para cuidar tu electrodoméstico y preservar tu seguridad. Reconoce automáticamente la olla y si se quedó encendida y sin reposa los 220 C el artefacto se apagará.



Responsabilidad ambiental

La pérdida de energía bajo este sistema es muy baja, lo que permite que el tiempo se reduzca notablemente al momento de cocinar, y si cocinas en menos tiempo, menos electricidad estarás pagando.

Especificaciones

INFORMACIÓN GENERAL

- Touch control con 10 niveles de potencia
- Placa vidrio cerámica de fácil limpieza
- Temporizador/ Apagado automático
- Sensor inteligente de recipientes
- Sensor bloqueo de sobrecalentamiento
- Bloques para niños
- Máxima eficiencia energética
- Regatones estabilizadores

- Función booster en 2 inductores

POTENCIA

- 600W - 7200W
- 200-240v

INDUCTORES

- 1: 143mm, 1100w 2: 160mm, 1400w 3: 170mm, 1850w 4: 190mm, 1400w

DIMENSIONES (MM)

- Ancho 590/Prof 520/Alto 60

DIMENSIONES PARA EMPOTRAR (MM)

- Ancho 560/Prof 490

AC Line Filters

SS Coils, SS11VL High Frequency TypeElectronic Components
KEMET
CHARGED!**Overview**

The KEMET SS Coils, SS11VL Type AC line filters are offered in a wide variety of sizes and specifications.

Applications

- Consumer Electronics
- Common mode choke

Benefits

- Wide variety of sizes and specifications
- Super low profile: 20.5 mm maximum
- Inductances up to 82 mH
- Rated Currents up to 3 A
- DC Resistances as low as 0.06 Ω

**Part Number System**

SS	11	VL-	R	03	550
Series	Core Size (mm)	Core Orientation	Core Type	Rated Current (A)	Minimum Inductance (mH)
SS	11 = 11.0	VL = Vertical	Blank = Standard R = High permeability	0x = 0.x A (e.g., 03 = 0.3 A) xx = x.x A (e.g., 13 = 1.3 A)	xx0 = xx mH (e.g., 550 = 55 mH) 0xx = x.x mH (e.g., 024 = 2.4 mH)

AC Line Filters

SC Coils, SC-J Terminal Base Type
 Electronic Components
KEMET
 CHARGED!
Overview

The KEMET SC Coils, SC-J Terminal Base Type AC line filters are offered in a wide variety of sizes and specifications.

Applications

- Consumer Electronics
- Common mode choke

Benefits

- Wide variety of sizes and specifications
- Inductances up to 8 mH
- Rated Currents up to 18 A
- DC Resistances as low as 7 mΩ

**Part Number System**

SC-	10-	20	J
Series	Rated Current (A)	Minimum Inductance (mH)	Terminal Base Type
SC-	0x = x A (e.g., 02 = 2 A) x0 = x0 A (e.g., 10 = 10 A) xx = xx A (e.g., 15 = 15 A) Note: Code 05 can equal 5 A as well as 4 A	x0 = x mH (e.g., 20 = 2 mH) xx = x.x mH (e.g., 15 = 1.5 mH) 0x = 0.x mH (e.g., 05 = 0.5 mH)	J

AC Line Filters

SSR21HS Series Wide Range Impedance TypeElectronic Components
KEMET
CHARGED!**Overview**

The KEMET SSR21HS Series AC line filters are compact, low profile, and lightweight.

Applications

- Audio-visual equipment
- Office automation equipment
- Digital appliances
- Power supply devices
- Common mode choke

Benefits

- High degree of characterization as a result of using industry's highest standard, high permeability core.
- Optimized design for compact size, low profile, and lightweight
- Non-split bobbin design for strong high frequency characteristics and broad bandwidth
- Inductances up to 135 mH
- Rated Currents up to 2.0 A
- DC Resistances as low as 0.1 Ω

**Part Number System**

SSR21HS-	05	490
Series	Rated Current AC (A)	Minimum Inductance (mH)
SSR21HS-	0x = 0.x A (e.g., 05 = 0.5 A) x0 = x.0 A (e.g., 10 = 1.0 A)	xxx0 = xxx mH (e.g., 1350 = 135 mH) xx0 = xx mH (e.g., 930 = 93 mH) xxx = xx.x mH (e.g., 245 = 24.5 mH) 0xx = x.x mH (e.g., 095 = 9.5 mH)

FECHA DE ENTREGA

El proyecto fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE desde:

Sangolquí: _____

ELABORADO POR:

Rubén David Vélez Ortuño

CI: 1721984829

AUTORIDADES:

Ing. Luis Orozco, MSc.

DIRECTOR DE LA CARRERA INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL