

**DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL EN MATLAB PARA EL
ANÁLISIS ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

**WILLIAM MARTÍNEZ ORTIZ
NELSON REINALDO SANTAMARÍA FORERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2012

**DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL EN MATLAB PARA EL
ANÁLISIS ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

**WILLIAM MARTÍNEZ ORTIZ
NELSON REINALDO SANTAMARIA FORERO**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de
Ingeniero electricista**

**Director
MSc. GERMÁN ALFONSO OSMA PINTO
Codirector
Dr. GABRIEL ORDOÑEZ PLATA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2012**

A Dios por darme la fuerza, los medios, el entendimiento y la capacidad para lograr esta meta; a mis padres que con su cariño, consejos y apoyo incondicional han contribuido con todos mis logros, a mis hermanos que siempre me han brindado su apoyo y sé que cuento con ellos en todo momento, y a mis amigos que me han acompañado y me han brindado su amistad desinteresadamente, aconsejándome, motivándome y guiándome.

WILLIAM MARTÍNEZ ORTIZ

Aclarando que este triunfo se lo debo a demasiadas personas, y que por lo tanto esta dedicatoria tendría una extensión más amplia que la de este libro, quisiera puntualizar en una persona; mi tía Mery Patricia Forero Muñoz, porque este logro no es mío, es de ella.

NELSON SANTAMARIA FORERO

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	26
1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	28
1.1. COMPONENTES DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	28
1.1.1. Paneles fotovoltaicos	28
1.1.2. Baterías.....	32
1.1.3. Regulador.....	33
1.1.4. Inversor	36
1.2. CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	36
1.3. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN.....	40
1.4. ESTRUCTURA DEL REPORTE DE INVESTIGACIÓN	41
1.5. REFERENCIAS	42
2. MODELADO MATEMÁTICO DE COMPONENTES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO	43
2.1. PANEL FOTOVOLTAICO	43
2.1.1. Efecto de la irradiación en la célula fotovoltaica.....	46

2.1.2.	Efecto de la temperatura en la célula fotovoltaica	48
2.2.	BATERÍA	49
2.2.1.	Régimen de carga	52
2.2.2.	Régimen de descarga	53
2.3.	REGULADOR	54
2.3.1.	Control MPPT	55
2.3.2.	Control de tensión de salida	57
2.3.3.	Límites de trabajo para el regulador	57
2.4.	INVERSOR	58
2.4.1.	Inversor para sistemas fotovoltaicos <i>Grid-Tied</i>	60
2.4.2.	Inversor para sistemas fotovoltaicos <i>Stand Alone</i>	60
2.4.3.	Potencia reactiva en el inversor	61
2.5.	CONVERTIDOR DC/DC	62
2.6.	DIODOS DE BLOQUEO	63
2.7.	PROTECCIONES CONTRA SOBRE CORRIENTE	64
2.8.	CARGA	64

2.9.	CONDUCTORES.....	65
2.10.	RED DE ALIMENTACIÓN DE AC	67
2.11.	REFERENCIAS	67
3.	PROGRAMACIÓN DE COMPONENTES EN SIMULINK.....	69
3.1.	GUIDE-MATLAB.....	69
3.2.	PROGRAMACIÓN DE CADA UNO DE LOS DISPOSITIVOS.....	70
3.2.1.	Panel fotovoltaico	70
3.2.2.	Ejemplo de aplicación del bloque del panel fotovoltaico	73
3.2.3.	Batería.....	80
3.2.4.	Ejemplo de aplicación del bloque de la batería	82
3.2.5.	Regulador.....	87
3.2.6.	Ejemplo de aplicación del bloque del regulador	88
3.2.7.	Inversor	95
3.2.8.	Ejemplo de aplicación para el inversor.....	97
3.2.9.	Convertidor DC/DC	99
3.2.10.	Carga	101
3.2.11.	Conductores protecciones y diodos de bloqueo.....	102

3.2.12. Red de alimentación.....	104
3.3. REFERENCIAS	105
4. RESULTADOS DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL.....	106
4.1. CONSTRUCCIÓN DE ESQUEMAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS 106	
4.1.1. Sistema flotante.....	106
4.1.2. Sistema autónomo	108
4.2. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL A TRAVÉS DE SIMULACIONES DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO A IMPLEMENTAR EN EL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA II	112
4.3. REFERENCIAS	118
5. DISEÑO DE UN MANUAL DE USUARIO.....	119
5.1. INSTRUCCIONES GENERALES	119
5.2. GENERALIDADES DE SIMULINK.....	120
5.3. GENERALIDADES SOBRE LA HERRAMIENTA ESTABLECIDA.....	122
5.3.1. Pasos para realizar una simulación.....	124
5.4. ANÁLISIS POR TIPO DE SISTEMA.....	130
5.4.1. Sistema flotante.....	130

5.4.2.	Sistema con regulador y batería	132
5.4.3.	Sistema <i>stand alone</i>	139
5.4.4.	SISTEMA <i>GRID TIED</i>	143
5.5.	REFERENCIAS	146
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	147
6.1.	RESULTADOS	147
6.2.	CONCLUSIONES	148
6.3.	RECOMENDACIONES.....	149
6.4.	REFERENCIAS	150
	BIBLIOGRAFIA	152

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Precio de paneles fotovoltaicos según tecnología [3]</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 2. Características técnicas de los paneles solares [1].....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 3. Tipos de baterías [1].</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 4. Tabla comparativa de las configuraciones de sistemas fotovoltaicos.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 5. Objetivos específicos y alcances.</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 6. Nomenclatura utilizada en el modelo del panel fotovoltaico.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 7. Nomenclatura para el modelo matemático de la batería.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 8. Zonas de trabajo de una batería.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 9. Nomenclatura para el modelo matemático del regulador.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 10. Límites de operación del SOC de una batería.</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 11. Escenarios de operación del regulador.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 12. Variables para la red de alimentación.</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 13. utilización de los bloques de ganancia.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 14. Análisis energético del sistema fotovoltaico diseñado para la E3T [1].</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 15. Análisis energético del sistema fotovoltaico para la E3T simulado en la herramienta computacional.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 16. Soporte técnico sobre funciones de SIMULINK.</i>	<i>126</i>

<i>Tabla 17. Parámetros de edición de la interfaz del panel fotovoltaico.</i>	132
<i>Tabla 18. Parámetros de edición de la interfaz de la Carga DC.</i>	134
<i>Tabla 19. Parámetros de edición de la interfaz de la batería.</i>	136
<i>Tabla 20. Parámetros de edición de la interfaz del regulador.</i>	137
<i>Tabla 21. Parámetros de edición de la interfaz del convertidor DC/DC.</i>	138
<i>Tabla 22. Parámetros de edición de la interfaz de la carga AC.</i>	140
<i>Tabla 23. Parámetros de edición de la interfaz del Inversor.</i>	142
<i>Tabla 24. Parámetros de edición de la interfaz de los conductores.</i>	146
<i>Tabla 25. Parámetros eléctricos para el panel fotovoltaico TE 2000 190W.</i>	171
<i>Tabla 26. Modelos comerciales de baterías.</i>	177
<i>Tabla 27. Modelos comerciales de reguladores.</i>	178
<i>Tabla 28. Modelos comerciales de inversores.</i>	179

LISTA DE FIGURAS

	pág.
<i>Figura 1. Funcionamiento de un panel fotovoltaico [6].</i>	30
<i>Figura 2. Control de carga con resistencia disipadora [1].</i>	34
<i>Figura 3. Control de carga con MOSFET [1].</i>	34
<i>Figura 4. Control de carga en serie [1].</i>	35
<i>Figura 5. Sistema directamente conectado a la carga [1].</i>	37
<i>Figura 6. Sistema de simple acumulación [1].</i>	37
<i>Figura 7. Sistema con batería y regulador [1].</i>	38
<i>Figura 8. Sistema de alimentación de carga AC y DC con almacenamiento de energía [1].</i>	38
<i>Figura 9. Sistema conectado a la red [1].</i>	39
<i>Figura 10. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica [1].</i>	43
<i>Figura 11. Característica V-I de una célula fotovoltaico.</i>	46
<i>Figura 12. Características I-V en un panel fotovoltaico Atersa de 85 W para diferentes irradiaciones [1].</i>	47
<i>Figura 13. Curva I-V de una célula fotovoltaica Atersa de 85 W a diferentes temperaturas ambiente [1].</i>	49
<i>Figura 14. Zonas de operación de la batería [13].</i>	51
<i>Figura 15. Esquema básico de un regulador.</i>	55

<i>Figura 16. Punto de potencia máximo para el control MPPT [11].</i>	55
<i>Figura 17. Circuito equivalente para el balance de potencia en un inversor [1].</i>	59
<i>Figura 18. Tensión y Corriente en un inversor.</i>	61
<i>Figura 19. Diodos de bloqueo [12].</i>	63
<i>Figura 20. Ley de Ohm [1].</i>	64
<i>Figura 21. Circuito equivalente para el modelado de pérdidas resistivas.</i>	65
<i>Figura 22. Flujo de datos entre SIMULINK y GUIDE.</i>	70
<i>Figura 23. Esquema de parámetros y variables para el panel fotovoltaico.</i>	71
<i>Figura 24. Icono del bloque creado del panel fotovoltaico.</i>	71
<i>Figura 25. Diagrama de secuencia-procedencia para el panel fotovoltaico.</i>	72
<i>Figura 26. Circuito de prueba del funcionamiento del panel solar.</i>	73
<i>Figura 27. Comportamiento diario de la irradiación y temperatura.</i>	74
<i>Figura 28. Variables de salida.</i>	75
<i>Figura 29. Curvas de potencia y energía.</i>	75
<i>Figura 30. Curva de I-V a diferentes irradiaciones obtenidas por el bloque.</i>	76
<i>Figura 31. Curvas de I-V a diferentes temperaturas y a 1kW/m^2 obtenidas por el bloque.</i>	77
<i>Figura 32. Conexiones serie y paralelo.</i>	77
<i>Figura 33. Conexiones de paneles en paralelo con la herramienta computacional.</i>	78

<i>Figura 34. Conexiones de paneles en serie con la herramienta computacional.</i>	79
<i>Figura 35. Curvas tensión y potencia.....</i>	79
<i>Figura 36. Curvas de corriente y potencia.</i>	80
<i>Figura 37. Esquema de parámetros y variables para la batería.....</i>	81
<i>Figura 38. Icono del bloque creado de la batería.....</i>	81
<i>Figura 39. Diagrama de secuencia-procedencia para la batería.</i>	82
<i>Figura 40. Carga y descarga de batería.</i>	83
<i>Figura 41. Carga de batería.....</i>	83
<i>Figura 42. Descarga de la batería.....</i>	84
<i>Figura 43. Carga y descarga de batería.</i>	85
<i>Figura 44. Estados de cargas de batería a diferentes temperaturas.</i>	86
<i>Figura 45. Tensiones en bornes de batería a diferentes temperaturas.....</i>	86
<i>Figura 46. Esquema de parámetros y variables para el regulador.....</i>	87
<i>Figura 47. Icono del bloque creado del regulador.....</i>	87
<i>Figura 48. Diagrama de secuencia-procedencia para el regulador.....</i>	88
<i>Figura 49. Conexión de un sistema fotovoltaico sencillo con regulador.....</i>	89
<i>Figura 50. Tensión en el panel, regulador y en la batería.....</i>	90
<i>Figura 51. Potencia generada por el panel fotovoltaico.</i>	90
<i>Figura 52. Estado de carga y corriente en la batería.</i>	91

<i>Figura 53. Estado de carga y de la batería.</i>	92
<i>Figura 54. Tensiones en el panel, batería y regulador.</i>	93
<i>Figura 55. Estado de carga y corriente de batería.</i>	93
<i>Figura 56. Tensión del panel y estado de carga de la batería.</i>	94
<i>Figura 57. Corriente y tensión de la batería.</i>	95
<i>Figura 58. Esquema de parámetros y variables para el inversor.</i>	95
<i>Figura 59. Diagrama de secuencia-procedencia para el inversor.</i>	96
<i>Figura 60. Icono del bloque creado del inversor.</i>	96
<i>Figura 61. Circuito de conexión para probar el desempeño del inversor.</i>	97
<i>Figura 62. Corriente DC necesaria para alimentar carga monofásica.</i>	98
<i>Figura 63. Corriente DC necesaria para alimentar carga trifásica.</i>	98
<i>Figura 64. Eficiencia del inversor con tensión DC de 370 V.</i>	99
<i>Figura 65. Esquema de parámetros y variables para el convertidor DC/DC.</i>	100
<i>Figura 66. Icono del bloque creado del convertidor DC/DC.</i>	100
<i>Figura 67. Diagrama de secuencia-procedencia para el convertidor DC/DC.</i>	100
<i>Figura 68. Esquema de parámetros y variables para la carga.</i>	101
<i>Figura 69. Diagrama de secuencia-procedencia para la carga.</i>	102
<i>Figura 70. Icono de los bloques creados de la carga.</i>	102
<i>Figura 71. Esquema de parámetros y variables para los conductores.</i>	103

<i>Figura 72. Icono del bloque creado de los conductores.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 73. Diagrama de secuencia-procedencia para los conductores.</i>	<i>104</i>
<i>Figura 74. Esquema eléctrico de un sistema flotante [2].</i>	<i>107</i>
<i>Figura 75. Punto de operación para el sistema flotante [2].</i>	<i>107</i>
<i>Figura 76. Montaje en SIMULINK de un sistema flotante.</i>	<i>107</i>
<i>Figura 77. Sistema autónomo.</i>	<i>108</i>
<i>Figura 78. Corrientes en el sistema.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 79. Corriente en la carga y tensión del sistema.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 80. Potencia y energía del panel.</i>	<i>110</i>
<i>Figura 81. Potencia de la batería y de la carga.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 82. Flujo de energía en la batería y energía consumida por la carga.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 83. Configuración base del sistema diseñado [1].</i>	<i>112</i>
<i>Figura 84. Conexión del sistema en la herramienta diseñada.</i>	<i>113</i>
<i>Figura 85. Irradiación en Bucaramanga con seguimiento solar.</i>	<i>114</i>
<i>Figura 86. Medidas de temperatura promedio en Bucaramanga.</i>	<i>114</i>
<i>Figura 87. Corriente y tensión en los paneles.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 88. Tensión en el inversor y regulación de tensión entre los paneles y el inversor.</i>	<i>115</i>
<i>Figura 89. Potencia entregada a la red.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 90. Estructura básica de SIMULINK.</i>	<i>121</i>

<i>Figura 91. Componentes básicos de una simulación en SIMULINK.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 92. Librería para el análisis de sistemas fotovoltaicos.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 93. Pasos para iniciar una simulación.</i>	<i>124</i>
<i>Figura 94. Diseñando una simulación de sistemas fotovoltaicos.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 95. Pasos para construir un diagrama de bloques.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 96. Simulación de un sistema autónomo.</i>	<i>129</i>
<i>Figura 97. Esquema eléctrico del sistema autónomo.</i>	<i>130</i>
<i>Figura 98. Sistema flotante.</i>	<i>131</i>
<i>Figura 99. Interfaz de usuario para el panel fotovoltaico.</i>	<i>131</i>
<i>Figura 100. Sistema con regulador y batería.</i>	<i>133</i>
<i>Figura 101. Interfaz de usuario para la carga de DC.</i>	<i>134</i>
<i>Figura 102. Interfaz de usuario para el bloque de la batería.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 103. Interfaz de usuario para el bloque del regulador.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 104. Interfaz de usuario para el bloque convertidor DC/DC.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 105. Montaje en SIMULINK de un sistema Stand Alone.</i>	<i>139</i>
<i>Figura 106. Interfaz de usuario para el bloque de la Carga AC.</i>	<i>140</i>
<i>Figura 107. Interfaz de usuario para el bloque del Inversor.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 108. Configuración de los puertos del inversor para sistemas Stand Alone.</i>	<i>143</i>

<i>Figura 109. Montaje en SIMULINK de un sistema Grid Tied.</i>	143
<i>Figura 110. Selección de la opción Grid Tied.</i>	144
<i>Figura 111. Bloque Inversor para sistemas Grid Tied.</i>	144
<i>Figura 112. Interfaz de usuario del bloque conductores.</i>	145
<i>Figura 113. Montaje en SIMULINK del sistema autónomo con pérdidas.</i>	155
<i>Figura 114. Tensión del panel y corriente en la carga.</i>	156
<i>Figura 115. Tensión en el sistema y caída de tensión por efecto de los conductores.</i>	156
<i>Figura 116. Pérdidas de potencia en los conductores.</i>	157
<i>Figura 117. Pérdidas de energía en el conductor.</i>	157
<i>Figura 118. Esquema eléctrico de un sistema con regulador y batería [2].</i>	158
<i>Figura 119. Punto de operación de un sistema con regulador y batería [2].</i>	158
<i>Figura 120. Montaje en SIMULINK del sistema con regulador y batería.</i>	159
<i>Figura 121. Potencia consumida e Irradiación.</i>	160
<i>Figura 122. Corriente y tensión en los paneles.</i>	160
<i>Figura 123. Potencia generada y energía entregada por el panel.</i>	161
<i>Figura 124. Corriente y tensión en la batería.</i>	162
<i>Figura 125. Flujo de potencia y energía acumulada en la batería.</i>	162
<i>Figura 126. Estado de carga en la batería.</i>	163

<i>Figura 127. Potencia en la salida del regulador y energía consumida por la carga.</i>	163
<i>Figura 128. Montaje eléctrico de un sistema Stand Alone.</i>	164
<i>Figura 129. Montaje en SIMULINK de un sistema Stand Alone.</i>	165
<i>Figura 130. Conexión en SIMULINK del sistema stand alone.</i>	166
<i>Figura 131. Curvas de irradiación y temperatura.</i>	166
<i>Figura 132. Curvas de generación y demanda.</i>	167
<i>Figura 133. Potencia desaprovechada y estado de carga de la batería.</i>	167
<i>Figura 134. Potencia y energía acumulada en la batería.</i>	168
<i>Figura 135. Montaje eléctrico de un sistema Grid Tied [2].</i>	169
<i>Figura 136. Montaje en SIMULINK de un sistema Grid Tied.</i>	170
<i>Figura 137. Interface panel fotovoltaico</i>	172
<i>Figura 138. Base de datos de paneles fotovoltaicos.</i>	172
<i>Figura 139. Herramienta de edición de paneles fotovoltaicos.</i>	173
<i>Figura 140. Cuadro de dialogo, botón “agregar”</i>	173
<i>Figura 141. Herramienta de edición de paneles fotovoltaicos.</i>	174
<i>Figura 142. Herramienta de edición de paneles fotovoltaicos.</i>	174
<i>Figura 143. Herramienta de edición de paneles fotovoltaicos.</i>	175
<i>Figura 144. Herramienta de edición de paneles fotovoltaicos.</i>	176
<i>Figura 145. Herramienta de edición de paneles fotovoltaicos.</i>	176

<i>Figura 146. Error que hace necesario el uso de los compiladores</i>	<i>181</i>
<i>Figura 147. Pagina web para la descarga de Visual Basic 2008 Express</i>	<i>182</i>
<i>Figura 148. Descarga en línea de Visual Basic 2008 Express</i>	<i>183</i>
<i>Figura 149. Instalación de Visual Basic 2008 Express</i>	<i>183</i>
<i>Figura 150. Imagen Virtual de SDK</i>	<i>184</i>
<i>Figura 151. Carpeta de instalación de SDK.....</i>	<i>185</i>
<i>Figura 152. Archivos temporales para la instalación de SDK</i>	<i>185</i>
<i>Figura 153. Programa de instalación de SDK.....</i>	<i>186</i>
<i>Figura 154. Selección de compiladores en MATLAB.....</i>	<i>187</i>
<i>Figura 155. Finalización de la instalación</i>	<i>187</i>

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. CONSTRUCCIÓN DE ESQUEMAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	155
ANEXO B. INSTRUCCIONES PARA AGREGAR MODELOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS A LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL.....	171
ANEXO C. DATOS TÉCNICOS DE MODELOS COMERCIALES DE BATERÍAS, REGULADORES E INVERSORES.....	177
ANEXO D. COMPILADORES PARA WINDOWS 7.....	181

TITULO: DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL EN MATLAB PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.*

Nelson Reinaldo Santamaria Forero, William Martínez Ortiz**

Palabras clave: Sistemas Fotovoltaicos, Matlab, Simulink, simulación, modelos matemáticos, herramienta computacional.

RESUMEN

En este trabajo de grado se desarrolla una herramienta computacional en MATLAB/SIMULINK, para la simulación de sistemas fotovoltaicos, dada la escasa disposición de información y material didáctico sobre estos sistemas en la escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones (E³T), esta herramienta consiste en una librería de SIMULINK, la cual permite simular el comportamiento eléctrico de los equipos o dispositivos más relevantes en sistemas fotovoltaicos, esta librería sirve como material de apoyo para el estudio de generación fotovoltaica, por parte de los estudiantes de la E³T, además de ser útil como herramienta piloto para estudios posteriores en este campo. Para el desarrollo de esta herramienta, fue necesaria la recopilación de los modelos matemáticos más sencillos, que describen el comportamiento de los equipos o dispositivos que contempla esta herramienta, seguidamente se implementan estos modelos en nueve (9) bloques de SIMULINK, apoyados por interfaces de usuario diseñadas en GUIDE de MATLAB, y realizar posteriormente simulaciones y análisis de resultados en diferentes configuraciones existentes y en el sistema fotovoltaico a implementar en la E³T, finalmente se diseña un manual de usuario, con lo cual se facilita el manejo de esta librería. Para concluir este trabajo se encontró que la alta capacidad de cálculo de SIMULINK, fue decisiva para la solución de complejas configuraciones fotovoltaicas, más comunes en la práctica.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Director: MSc. Germán Alfonso Osma Pinto, Co-director: Dr. Gabriel Ordoñez Plata

TITULO: DESIGN OF A COMPUTATIONAL TOOL IN MATLAB FOR ENERGETIC ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS.

Nelson Reinaldo Santamaria Forero, William Martínez Ortiz**

Keywords: Photovoltaic systems, Matlab, Simulink, simulation, mathematical models, computational tool.

ABSTRACT

In this paper grade is developed a computational tool in MATLAB/SIMULINK, for photovoltaic systems simulation, given the limited availability of information and teaching material about this systems in the college of Electrical, Electronic Engineering and Telecommunications (E³T), this tool is a library from SIMULINK, which allows simulate the electrical behavior of equipments or devices most relevant in photovoltaic systems, this library is used as support material for photovoltaic generation study, by E³T students, also it is useful as prototype tool for later studies in this field. For the develop of this tool, it was necessary to collect more simple mathematical models, that describes the behavior of equipments or devices that this tool provides, then implemented this models in nine (9) SIMULINK blocks, supported by user interfaces designed in GUIDE of MATLAB, and later make simulations and results analysis in different existing configurations and the photovoltaic system to implement in E³T, finally it designs a manual, thereby facilitates the handling of this library. In conclusion, it was found that high calculating capacity of SIMULINK; was decisive for complex photovoltaic system configurations that are more common in practice.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Director: MSc. Germán Alfonso Osma Pinto, Co-director: Dr. Gabriel Ordoñez Plata

INTRODUCCIÓN

El análisis energético de un sistema de generación y de sus cargas asociadas tiene por objeto determinar cómo, dónde y cuánta energía se genera y se consume en un periodo determinado, para establecer el comportamiento de sus componentes; y en consecuencia, propender por la gestión de la operación.

Con el fin de facilitar dicho análisis en sistemas fotovoltaicos a los estudiantes de pregrado de la Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones E3T de la Universidad Industrial de Santander, se ha desarrollado una herramienta computacional en MATLAB, con la cual, se podrá comprender de manera más profunda el funcionamiento básico de los dispositivos propios de una instalación fotovoltaica, a partir de la interconexión de bloques en SIMULINK, según la configuración de interés.

La propuesta plantea la posibilidad de analizar diferentes configuraciones fotovoltaicas, según la interconexión de bloques en SIMULINK. Se consideraron componentes tales como panel fotovoltaico, batería, regulador, inversor, conductores, convertidor DC/DC y carga, los cuales describen su comportamiento a partir de la implementación de modelos matemáticos. De esta manera, se podrán estudiar variables eléctricas como corriente, tensión, potencia, energía y eficiencia.

Como entorno de trabajo, se desarrolló un conjunto de interfaces de usuario creadas en GUIDE (entorno de programación visual de MATLAB), donde será posible la edición de parámetros característicos de cada bloque para el ajuste de su comportamiento, según configuración y necesidades requeridas por el usuario.

Este libro describe y documenta el trabajo realizado para la construcción de la herramienta computacional establecida. Inicialmente, se presentan generalidades de los sistemas fotovoltaicos, mostrando principalmente componentes y configuraciones, con el fin de contextualizar al lector en este tipo de sistemas;

seguidamente, se exponen los modelos matemáticos del comportamiento de cada uno de los dispositivos seleccionados, y se describe de forma breve su programación; asimismo, se documentan los resultados obtenidos de cada dispositivo y configuración simulados.

Con el fin de comprobar la fiabilidad de la herramienta computacional, se realizó la simulación del sistema fotovoltaico propuesto en el proyecto de pregrado “Diseño de un sistema de generación eléctrica fotovoltaica y de una red eléctrica en corriente continua de baja tensión para el posible nuevo Edificio Eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander” [4], Finalmente, se muestra un manual de usuario, a fin de facilitar el uso de la herramienta computacional.

1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

La generación fotovoltaica tiene como objetivo transformar la irradiación¹ solar, en energía eléctrica. Esta conversión de energía se realiza a partir de paneles fotovoltaicos; la energía generada puede ser consumida de forma inmediata o almacenada en baterías, y/o acondicionada según la necesidad, ya sea por tensión o formas de onda, para lo cual, se deben implementar dispositivos como reguladores, convertidores DC/DC, inversores, entre otros. Generalmente, estos sistemas son utilizados en zonas aisladas de la red de distribución eléctrica; aunque, también pueden integrarse a ésta [1], [2].

1.1. COMPONENTES DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de dispositivos que interactúan entre sí para generar, almacenar y/o acondicionar la energía eléctrica que se produce, a partir del aprovechamiento de la irradiación solar; por lo tanto, para entender en detalle el funcionamiento de un sistema fotovoltaico es necesario estudiar las características y el funcionamiento de cada uno de estos dispositivos, como paneles fotovoltaicos, baterías, reguladores, convertidores DC/DC, inversores, etc.

1.1.1. Paneles fotovoltaicos

Son dispositivos capaces de producir una diferencia de potencial, debido a la presencia de irradiación solar, están compuestos por celdas fotovoltaicas. Existen cuatro tipos de éstas, las cuales se presentan en la Tabla 1, según su eficiencia [3]. El precio actual de los paneles fotovoltaicos, oscila entre 3,5 USD/W y 5,0 USD/W, dependiendo de la tecnología (eficiencia).

¹La radiación solar es el flujo de energía emitida por el sol en forma de ondas electromagnéticas, y su propagación sobre una superficie se conoce como irradiación, esta última determina la cantidad la energía por unidad de tiempo y área, su unidad es el W/m^2 [1]

Tabla 1. Precio de paneles fotovoltaicos según tecnología [3]

	TECNOLOGÍA	EFICIENCIA (%)	PRECIO (USD/W)
PELICULA DELGADA ²	Silicio amorfo	6%-7%	3,5-4,2
	Seleniuro de Indio y Cobre CIS	10%-11%	4-4,4
OBLEA CRISTALINA ²	Policristalino ³	12%-14%	3,8-4,3
	Monocristalino ³	13%-15%	3,7-4,6

El auge en los últimos años de esta tecnología se puede constatar en la oferta mundial de paneles solares. Hoy día, existe una gran variedad de marcas como: SUNPOWER, KYOCERA, SANYO, SUNTECH, EVERGREEN, TRINA SOLAR, POWER UP, SOLARWORLD, SOLARTEC.

Sus modelos pueden ir desde 20 W hasta 315 W y se pueden clasificar según su potencia, en *off-grid* y en *on-grid*. Los tipos *on-grid* están diseñados para sistemas fotovoltaicos conectados a la red, y en general tratan de mantener valores de corriente determinados sin importar su potencia, su conexión típica es tipo serie y a altas tensiones. Los *off-grid* son asociados a sistemas de alimentación en DC y con almacenamiento de energía, por lo que su tensión de operación es especial sin importar su potencia, y se conectan en paralelo [4].

² Las células solares entran dentro de la categoría de materiales gruesos, si se fabrican a partir de barras cortadas en rodajas u obleas, otros materiales se configuran como películas delgadas depositadas sobre un sustrato adecuado.

³ Las células monocristalinas se producen a partir de lingotes de un único cristal, mientras que las células policristalinas están compuestas por varios bloques cristalinos.

Funcionamiento

Un módulo fotovoltaico consiste en la unión de dos materiales semiconductores de silicio, uno tipo N con exceso de electrones y otro tipo P con exceso de huecos (análogo a un diodo). Cuando incide la luz solar sobre un módulo, los fotones que chocan contra la capa tipo N, desprenden electrones de ésta, los cuales viajan a través de la capa tipo P [5].

Si esta unión se conecta a través de un circuito cerrado, comenzará a circular parte del flujo de electrones desprendidos de la capa tipo N por este circuito, el resto de los electrones llegan a los huecos de la capa tipo P, en donde se produce el fenómeno de recombinación; la Figura 1 ilustra este funcionamiento [5].

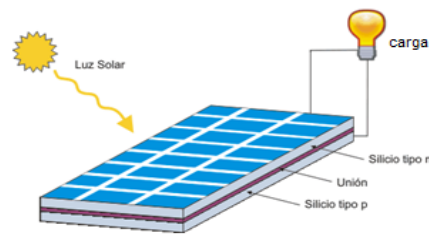


Figura 1. Funcionamiento de un panel fotovoltaico [6].

Características técnicas

En la Tabla 2 se presentan características técnicas a tener en cuenta para el proceso de selección de un panel fotovoltaico.

Tabla 2. Características técnicas de los paneles solares [1].

CARACTERÍSTICAS	DEFINICIÓN	CONDICIONES
Potencia máxima	Es la máxima potencia que puede entregar el panel fotovoltaico	Estándares (STC ⁴) de irradiación y temperatura, normalizadas a 1 000

⁴ STC Standard Test Conditions

		W/m ² y 25°C, respectivamente.
Tensión de circuito abierto	Es la tensión que aparece en bornes del panel fotovoltaico cuando se encuentra en vacío. Depende de sus características de fabricación, de la temperatura y de la irradiación. Con este parámetro se determina la máxima tensión del sistema.	Cuando se encuentra en vacío y a STC ⁴ .
Corriente de corto circuito	Es la corriente que alcanza el panel fotovoltaico, y con base en la cual, se realiza el diseño de protecciones y conductores. Depende de la irradiación presente en el panel fotovoltaico, y en menor grado de la temperatura.	A tensión nula en bornes y a STC
Tensión de máxima potencia	Es la tensión a la cual se da la máxima potencia en el panel fotovoltaico	Estándares (STC) de irradiación y temperatura, normalizadas a 1 000 W/m ² y 25°C, respectivamente.
Corriente de máxima potencia	Es la corriente a la cual se da la máxima potencia en el panel fotovoltaico	Estándares (STC) de irradiación y temperatura, normalizadas a 1 000 W/m ² y 25°C, respectivamente.
Temperatura máxima de operación	Es la máxima temperatura a la cual se garantiza el funcionamiento adecuado del panel.	Especificada por el fabricante

Para un diseño correcto de instalaciones fotovoltaicas, también se deben considerar otras características técnicas como: área de los paneles, peso, área de los soportes, resistencia mecánica, etc.

1.1.2. Baterías

Son dispositivos que permiten el almacenamiento de energía, a partir de dos o más electrodos. Se pueden clasificar según funcionalidad y composición, tal como se menciona en la Tabla 3. Su tensión nominal puede ser 6 V, 12 V u otro múltiplo consecutivo de ellos; su unidad básica de construcción es la celda electroquímica, de 2V. Tienen una gran capacidad de corriente que las hacen ideales para los motores de arranque [1].

Tabla 3. Tipos de baterías [1].

Clasificación		Características
Según su funcionalidad	Baterías de arranque	Utilizadas para el arranque del motor de vehículos, por su capacidad de suministro de altas corrientes. Preparadas para ceder mucha intensidad en poco tiempo. Bajo costo. Sólo descargas superficiales.
	Baterías de tracción	Utilizadas para alimentar motores eléctricos instalados en montacargas, carretillas, vehículos eléctricos, entre otros. Preparadas para cargas y descargas profundas y rápidas. Alto costo en mantenimiento.
	Baterías estacionarias	Permanecen largos periodos de tiempo totalmente cargadas sin entregar energía, resisten descargas profundas y esporádicas. Utilizadas en sistemas de alumbrado de emergencia.
Según su composición del electrolito	Batería plomo-acido con liquido aireado	El electrolito se encuentra en estado líquido y es accesible al usuario para así realizar el mantenimiento pertinente. Los tapones del recipiente contenedor suelen ser de tipo recombinante para minimizar la pérdida de agua y evitar la emisión de H ₂ .
	Batería de electrolito inmovilizado	El electrolito se absorbe utilizando fibra de vidrio microporosa o fibra polimérica; esta fibra rellena el espacio entre placas. No requieren mantenimiento, no desprenden gases, no se derraman, pero no tienen buen funcionamiento ante descargas profundas.
	Batería plomo-acido gelatinosa	Este es un tipo de batería plomo-ácido, en el cual el electrolito no es líquido, sino gelatinoso; esto representa una ventaja debido a que no existen riesgos de derrame de líquidos, esta batería es muy utilizada en sistemas fotovoltaicos portátiles, instalaciones marinas, entre otras.
	Batería níquel-	Esta batería es muy poco utilizada debido a su alto costo, el cual

	cadmio	puede ser de aproximadamente 8 veces el costo de la batería de plomo-ácido; sin embargo, posee una vida útil mucho más extensa y requiere de muy poco mantenimiento, por lo cual esta batería representa una gran ventaja a largo plazo.
	<i>Poquetplate</i>	Esta batería posee unas placas de acero inoxidable, las cuales poseen unas depresiones donde se coloca el material activo, es muy resistente ante sobrecargas y sobredescargas excesivas. Posee una alta eficiencia a baja temperatura y no posee problemas de sulfatación.

1.1.3. Regulador

También es necesaria la presencia de un elemento como el regulador cuando hay participación de baterías en el sistema, como por ejemplo, en un sistema autónomo. Es el encargado de sensar el nivel de energía almacenada en la batería, y realizar acciones como evitar la sobrecarga de la batería cuando el nivel de almacenamiento es máximo y la descarga crítica cuando el nivel de almacenamiento es mínimo, y permitir que la batería entregue energía a la carga cuando esté en capacidad de hacerlo.

A continuación se describen los tipos de reguladores más conocidos.

Control de carga con resistencia disipadora (*dummy load*)

Fue de los primeros controles de carga; era de tipo paralelo y ejercía un control rudimentario. Cuando la tensión de la batería alcanzaba un valor considerado como de almacenamiento inadecuado, la corriente de los paneles era desviada a un circuito en paralelo (resistencia), a fin de disipar la energía eléctrica generada en forma de calor [1].

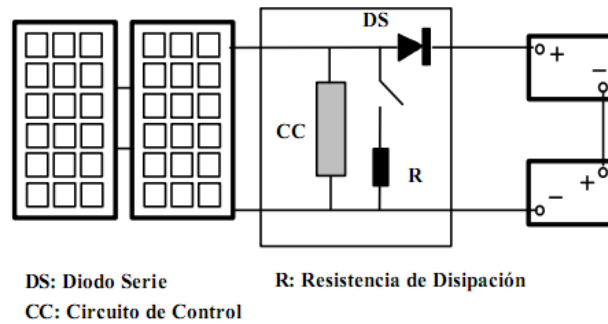


Figura 2. Control de carga con resistencia disipadora [1].

Control de carga con MOSFET

Es un sistema de desviación paralelo más elaborado, que reemplazó al antes concebido. Consta de un circuito de control que actúa sobre un semiconductor (MOS-FET), el cual posee una resistencia interna muy baja y soporta altas corrientes. Estas dos características permiten establecer un efectivo cortocircuito de salida, minimizando la disipación por calor dentro del semiconductor [1].

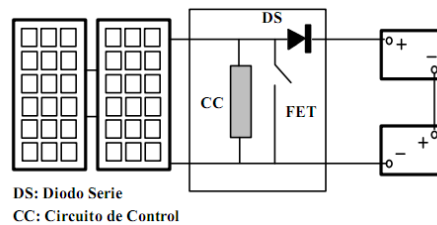
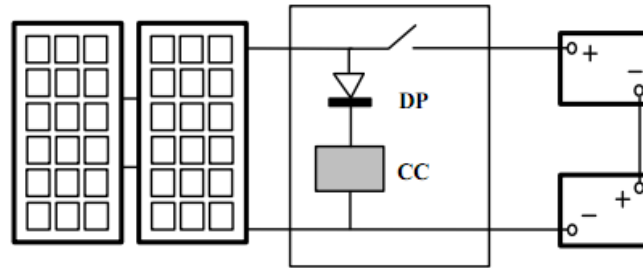


Figura 3. Control de carga con MOSFET [1].

Este control de carga tiene una desventaja: el banco de baterías debe ser aislado del cortocircuito. Un diodo en serie cumple con esta función (DS en Figura 3). Esto provoca una disminución en la tensión de la carga; así como, una pérdida de energía (disipación de calor dentro del diodo). Para disminuir ambos valores se utilizan diodos del tipo *Schottky*. Este tipo de componente tiene una juntura formada por un semiconductor y un metal [1].

Control de carga en serie

El control serie elimina la necesidad de un diodo en serie, ya que la apertura del interruptor aísla al banco de baterías de los circuitos que le preceden [1].



DP: Diodo de Protección CC: Circuito de Control

Figura 4. Control de carga en serie [1].

Existen diferentes criterios de diseño para los controles en serie, dependiendo de la postura del fabricante referente al control óptimo de la corriente de carga. Sin embargo, en todos ellos existen dos características comunes: a) alternan periodos activos de cargas con períodos de inactividad; b) la acción del circuito de control depende del estado de carga del banco de baterías. Durante el periodo activo, algunos modelos usan una tensión de carga de valor constante; mientras que en otros, este valor está limitado por la diferencia de tensión entre paneles fotovoltaicos y baterías [1].

Tensión máxima de trabajo de los reguladores

El número de paneles fotovoltaicos conectados en serie y su tensión de circuito abierto, determinan la máxima tensión de trabajo del control de carga. Es común que el fabricante provea un margen de seguridad para la unidad, diseñándolos para soportar tensiones por encima del valor nominal del sistema. Las dos tensiones más comunes son 12 V y 24 V. Por pedido, pueden obtenerse unidades que trabajan a mayores tensiones (múltiplos de 12) [1].

1.1.4. Inversor

El inversor es un dispositivo encargado de convertir la corriente continua, suministrada por el grupo de paneles fotovoltaicos, en corriente alterna. Permite alimentar cargas de corriente alterna o inyectar energía a la red eléctrica, previa sincronización con ésta.

Inversores de conmutación natural (*grid-tied*)

También conocidos como inversores conmutados por la red. Su aplicación se da en sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Debido a los altos niveles de tensión y corriente, se desarrollan con transistores de tipo IGBT [1].

Inversores de conmutación forzada o autoconmutados

Se utilizan en sistemas fotovoltaicos aislados. Suministran corriente alterna a partir de conmutación forzada, que se refiere a la apertura y cierre forzado por el sistema de control. Pueden ser de salida escalonada (onda cuadrada) o de modulación por anchura de pulsos (PWM), y de salidas prácticamente sinusoidales, y de bajo nivel de distorsión armónica [1].

1.2. CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Los sistemas fotovoltaicos poseen distintas configuraciones dependiendo de las necesidades energéticas, disponibilidad de tecnológica, etc. [1].

De conexión directa a una carga (flotante)

Es el sistema más simple (Figura 5), donde el generador fotovoltaico se conecta directamente a la carga, normalmente un motor de corriente continua, para el bombeo de agua. Al no existir baterías ni componentes electrónicos, no se puede mantener una operación constante. Por su sencillez, es el sistema más barato y fácil de instalar, aunque su tensión de suministro es variable y podría ser frecuente

el inconveniente de no cumplir las exigencias de potencia cuando la irradiación sea insuficiente [6].

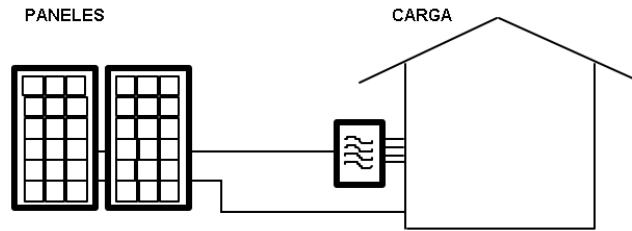


Figura 5. Sistema directamente conectado a la carga [1].

Sistema de simple acumulación

Se puede utilizar un módulo fotovoltaico para reponer la auto-descarga de una batería que se utilice para el arranque de un motor o para sistemas de electrificación rural de pequeña potencia. La conexión de los dispositivos se realiza en paralelo como se muestra en la Figura 6, por lo cual la carga demanda la energía necesaria y la que sobra o falta de los paneles es gestionada por la batería.

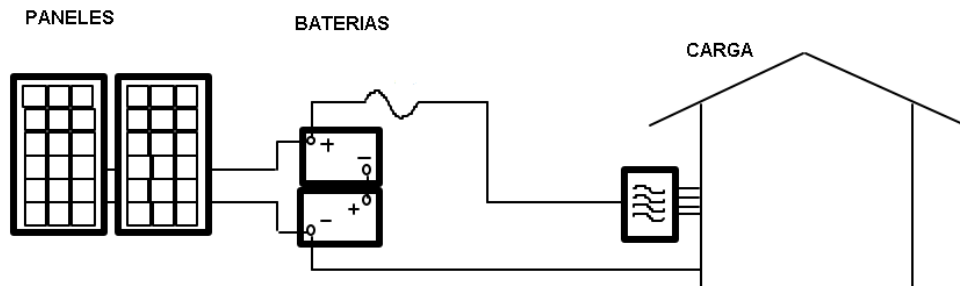


Figura 6. Sistema de simple acumulación [1].

Sistema fotovoltaico, batería y regulador

Es la configuración donde se conecta el generador fotovoltaico a una batería a través de un regulador, para que ésta no se sobrecargue o sobre descargue. En la Figura 7 se muestra su conexión.

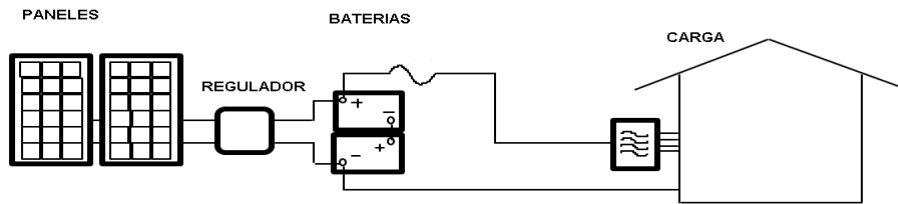


Figura 7. Sistema con batería y regulador [1].

Sistema de alimentación de carga AC y DC con almacenamiento de energía

Si se requieren alimentar cargas en corriente alterna, se podrá adicionar un inversor. La potencia generada en el sistema fotovoltaico podrá ser acondicionada en corriente alterna siempre y cuando la carga así lo demande, o podrán alimentarse simultáneamente cargas de corriente continua y de corriente alterna. En caso que el sistema no esté en capacidad de suplir la carga, el regulador desconectará la carga del sistema protegiendo todos los dispositivos [1].

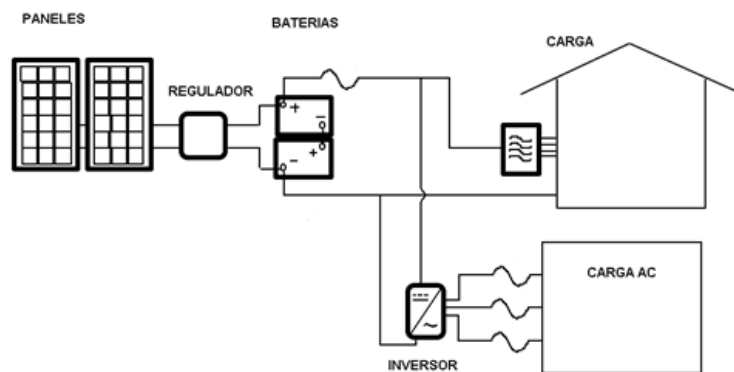


Figura 8. Sistema de alimentación de carga AC y DC con almacenamiento de energía [1].

Sistema conectado a la red

Es una instalación fotovoltaica que dispone de una conexión a la red de distribución eléctrica, esto se debe hacer a partir un inversor tipo *grid-tied*. El sistema fotovoltaico entregará la potencia restante a la red. En la Figura 9 se muestra la conexión.

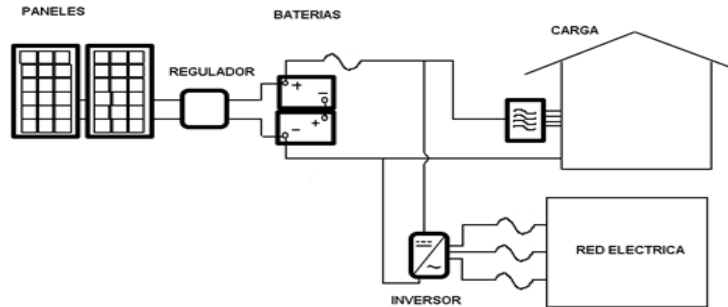


Figura 9. Sistema conectado a la red [1].

En la Tabla 4 se comparan los diferentes tipos de sistemas presentando las ventajas y desventajas de cada uno.

Tabla 4. Tabla comparativa de las configuraciones de sistemas fotovoltaicos.

CONFIGURACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Directamente conectados a una carga (flotante)	Económico, sencillo y practico de instalar	Su operación no es constante, no tiene la capacidad para abastecer una carga constante
Sistema de simple acumulación	Se puede entregar energía aun cuando no hay suficiente irradiación.	Solo alimenta cargas de corriente continua, no existe un control de energía en el sistema
Sistema fotovoltaico, batería y regulador	Hay control en el manejo de la energía del sistema y es más confiable que los anteriores	Es más costoso que los dos anteriores

Sistema de alimentación de carga AC y DC con almacenamiento de energía	Alta confiabilidad en el suministros de energía, capacidad para alimentar cargas de corriente alterna y continua, hay control en el manejo de la energía del sistema	Son costosos por ser más completos que los demás
Sistema conectado a la red	Alta confiabilidad en el suministro de energía, se puede aprovechar la mayor cantidad de energía que se genera	Si no se protege adecuadamente puede haber efecto tipo isla o <i>islanding</i> ⁵

1.3. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

Se desarrollará una herramienta computacional en MATLAB para el análisis y simulación de sistemas fotovoltaicos, como apoyo a la formación de los estudiantes de ingeniería eléctrica de la Universidad Industrial de Santander.

La herramienta se basa en la creación de librerías en SIMULINK con las especificaciones eléctricas de cada uno de sus dispositivos, los cuales podrán ser ajustables a las necesidades del usuario, desde una interfaz en GUIDE.

La herramienta se estableció en SIMULINK y GUIDE de MATLAB, debido a su robustez en el análisis de sistemas eléctricos, la existencia de licencias de uso y a la afinidad con los estudiantes de la E3T.

A continuación se mencionan los objetivos específicos establecidos, asociados al objetivo general, con su respectivo alcance.

⁵ El efecto *islanding* ocurre cuando la red de distribución local reanuda el servicio después de algún corte en la misma, esto provoca que la red y el sistema fotovoltaico queden fuera de sincronismo; lo cual puede tener consecuencias destructivas para los equipos presentes.

Tabla 5. Objetivos específicos y alcances.

Objetivos específicos	Alcances
1. Determinar los modelos matemáticos de los componentes constitutivos de sistemas fotovoltaicos.	Se desarrollará una librería en SIMULINK que contiene los elementos que conforman un sistema fotovoltaico, en donde se precisará el respectivo modelo matemático de cada elemento y estará contenida la información, de varias marcas presentes en el mercado. Se seleccionarán los elementos más importantes, que intervienen en el diseño de un sistema fotovoltaico. Estos elementos son: Paneles fotovoltaicos, diodos, baterías, reguladores, protecciones, inversores, conductores y puntos de conexión.
2. Crear un entorno gráfico para el análisis energético de sistemas fotovoltaicos a partir de la programación de los modelos definidos.	En cada uno de los bloques se podrá desplegar una ventana de ajuste de parámetros de cada elemento del sistema. Esto se implementará con la herramienta GUIDE de MATLAB, creando así un entorno con el usuario, en donde se podrán editar los parámetros principales de cada elemento y visualizar su respectivo modelo matemático.
3. Validar la herramienta computacional a partir de los resultados mostrados en trabajos publicados sobre sistemas fotovoltaicos.	Se obtendrá los parámetros de salida tales como tensión, corriente, potencia, entre otros en la simulación del sistema fotovoltaico a implementar en el edificio de Ingeniería Eléctrica II, con los trabajos anteriormente realizados por la universidad, para verificar que el programa este acorde con la realidad.
4. Construir un manual de usuario de la herramienta computacional establecida.	Mediante el manual de usuario se tendrá una guía para la utilización y aplicación correcta de esta herramienta, se hará una descripción, acerca de la edición de los principales parámetros de cada bloque, con lo cual se aprovechará al máximo este recurso.

1.4. ESTRUCTURA DEL REPORTE DE INVESTIGACIÓN

Este reporte consta de seis (6) capítulos, empezando con la presentación de los sistemas fotovoltaicos (capítulo 1), los modelos matemáticos comportamentales de cada componente (capítulo 2), y su programación (capítulo 3).

Posteriormente, se valida la herramienta a partir del análisis de diferentes configuraciones (capítulo 4) y se establece un manual del usuario, a fin de facilitar el uso de la herramienta establecida (capítulo 5); por último, se presentan resultados, conclusiones y recomendaciones (capítulo 6).

1.5. REFERENCIAS

- [1] H. L. Gasquet, “Conversion de la Luz Solar en Energía Eléctrica”, Manual Teórico y Practico sobre los Sistemas Fotovoltaicos, Solartronic S.A., Cuernavaca, Morelos, México, Octubre, 2004.
- [2] W. Hulshorst, “Manual Práctico Energía Fotovoltaica”, Leonardo Energy, Universidad Politécnica de Madrid, 2002.
- [3] J Wiles, “Photovoltaic Power Systems and the National Electrical Code”, Southwest Development Institute, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, December, 1996.
- [4] Y. Lizarazú, L. Torres “DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA Y UNA RED ELÉCTRICA EN CORRIENTE CONTINUA DE BAJA TENSIÓN PARA EL POSIBLE NUEVO EDIFICIO ELÉCTRICA II DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER”, Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga , 2010.
- [5] R. Messenger, “Photovoltaic Systems Engineering” Second Edition, Ed. CRC PRESS, U.S., 2004.
- [6] Funcionamiento panel solar. <http://tskan.com/funcionamiento-panel-solar/>. Consultado el 6 de Octubre del 2011

2. MODELADO MATEMÁTICO DE COMPONENTES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

En este capítulo se presentan modelos matemáticos de los componentes más representativos de un sistema fotovoltaico, como lo son: paneles fotovoltaicos, baterías, reguladores, inversores, convertidores DC/DC, implementados de una forma sencilla y amigable al esquema de trabajo de SIMULINK.

2.1. PANEL FOTOVOLTAICO

El panel fotovoltaico es el elemento encargado de convertir la energía solar en energía eléctrica; está conformado por células conectadas en serie y en paralelo, capaces de producir una diferencia de potencial en presencia de irradiación solar. Es por esto, que el modelo matemático del panel solar se basa en el comportamiento de una sola célula, representada por el circuito equivalente de la Figura 10 y cuya nomenclatura se presenta en la Tabla 6.

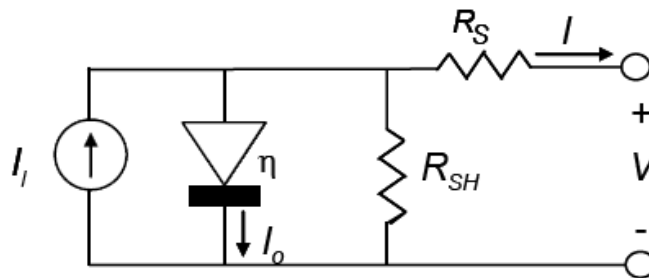


Figura 10. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica [1]

Tabla 6. Nomenclatura utilizada en el modelo del panel fotovoltaico.

Parámetro	Descripción
G: Irradiación sobre la célula.	Es la cantidad de potencia lumínica por unidad de área que incide sobre el panel fotovoltaico, esta se da en W/m^2 o en kW/m^2
G_0 : Irradiación estándar	Irradiación a STC (<i>Standard Test Conditions</i>) la cual es de $1kW/m^2$
I_{SC} : Corriente de corto circuito	Corriente presente en el panel fotovoltaico cuando la tensión es igual a cero.
$I_{SC25^{\circ}C}$: Corriente de corto circuito a temperatura estándar	Corriente de corto circuito a una temperatura ambiente de $25^{\circ}C$
$\frac{\Delta I}{\Delta T}$: Coeficiente de variación de corriente por temperatura	Variación de la corriente de corto circuito a razón del cambio de temperatura de operación dada en $A/^{\circ}C$.
I_l : Corriente foto generada	Corriente que se produce al incidir la luz sobre el panel fotovoltaico
I_S : Corriente de saturación	Corriente de saturación necesaria para caracterizar el diodo de la Figura 10.
η : Coeficiente de emisión del diodo	Coeficiente necesario para caracterizar el diodo de la Figura 10
K: Constante de Boltzman	Constante necesaria para caracterizar el diodo de la Figura 10, cuyo valor es de $1,38*10^{-23} J/K$
q : Carga del electrón	Constante necesaria para caracterizar el diodo de la Figura 10, cuyo valor es de $1,602*10^{-19} Coulombs$
R_S : Resistencia en serie de una célula	Resistencia que representa la caída interna de tensión en los contactos de la célula dada en Ω .
R_{SH} : Resistencia de pérdidas en paralelo.	Resistencia que representa fugas de corriente en la célula dada en Ω .
$\theta_{AMBIENTE}$: Temperatura ambiente	Temperatura ambiente en $^{\circ}C$ a la que se encuentra expuesta la célula fotovoltaica.
θ_{CELULA} : Temperatura de operación de la célula	Temperatura de operación de la célula en $^{\circ}C$
NOCT: Temperatura nominal de operación	Temperatura de operación en la célula a $20^{\circ}C$ temperatura ambiente y $800 W/m^2$
V_{OC} : Tensión de circuito abierto	Tensión presente en el panel fotovoltaico cuando la corriente

	es igual a cero.
$V_{OC25^{\circ}C}$: Tensión de circuito abierto a temperatura estándar.	Tensión de circuito abierto a una temperatura ambiente de 25°C
$\frac{\Delta V}{\Delta T}$: Coeficiente de variación de tensión por temperatura.	Variación de la tensión de circuito abierto a razón del cambio de temperatura de operación dada en V/°C.

El comportamiento de la célula se modela a partir del circuito equivalente. La expresión (2.1) muestra la corriente generada por la célula fotovoltaica, y se obtiene al aplicar la ley de corrientes de Kirchoff en el circuito de la Figura 10 [1], [5]:

$$I = I_l - I_0 - \frac{V+R_S I}{R_{SH}} \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.2) se determina la corriente de “oscuridad”, la cual se debe a la recombinación de los electrones en la juntura PN de la célula fotovoltaica, y cuyo valor se determina a partir del modelo matemático del diodo real [8], [9].

$$I_0 = I_S \left(e^{\frac{V+R_S I}{\eta V_t}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Donde:

$$V_t = \frac{\eta * K * T}{q} \quad (2.3)$$

La ecuación (2.4), obtenida a partir de (2.1) y (2.2), representa la corriente entregada por el panel fotovoltaico en función de su tensión en bornes; su comportamiento se bosqueja en la Figura 11.

$$I = I_l - I_S \left(e^{\frac{V+R_S I}{\eta V_t}} - 1 \right) - \frac{V+R_S I}{R_{SH}} \quad (2.4)$$

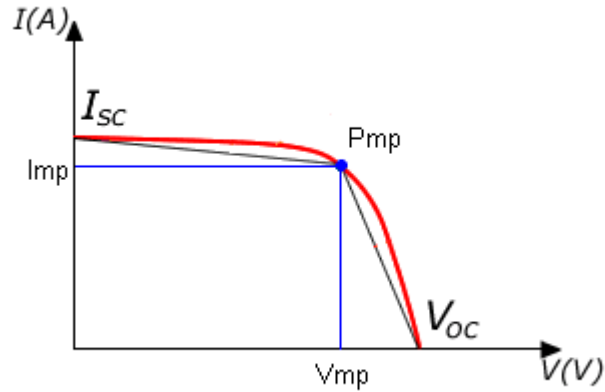


Figura 11. Característica V-I de una célula fotovoltaica.

2.1.1. Efecto de la irradiación en la célula fotovoltaica

Según la ecuación (2.4), en condiciones de corriente cero ($I = 0$) se puede obtener una expresión para la tensión de circuito abierto (V_{oc}), despreciando el efecto de las resistencias:

$$V_{oc} = \frac{\eta KT}{q} \ln \left(\frac{I_l}{I_s} + 1 \right) \quad (2.5)$$

También se puede encontrar la expresión para la corriente de cortocircuito, para la condición de tensión cero ($V=0$), despreciando el efecto de las resistencias.

$$I_{sc} = I_l \quad (2.6)$$

Según [3], la corriente foto generada depende de manera lineal de la irradiación G [W/m^2].

$$I_l(G) = \left(\frac{G}{G_0}\right) * I_{SC} \quad (2.7)$$

Con base en las expresiones (2.5) y (2.7), se establece que la tensión de circuito abierto depende logarítmicamente de la irradiación.

$$V_{oc} = \frac{\eta KT}{q} \ln \left(\frac{G * I_{SC}}{G_0 * I_s} + 1\right) \quad (2.8)$$

En la Figura 12 se puede ver que la corriente de cortocircuito varía de forma considerable ante variaciones de irradiación, caso menos apreciable a la tensión de circuito abierto. Esto se explica dado que la corriente de cortocircuito tiene un comportamiento lineal en función de la irradiación, y un comportamiento logarítmico para la tensión de circuito abierto, con lo cual la potencia entregada por las células se ve directamente afectada por la irradiación a la que están expuestas [2], [3], [4].

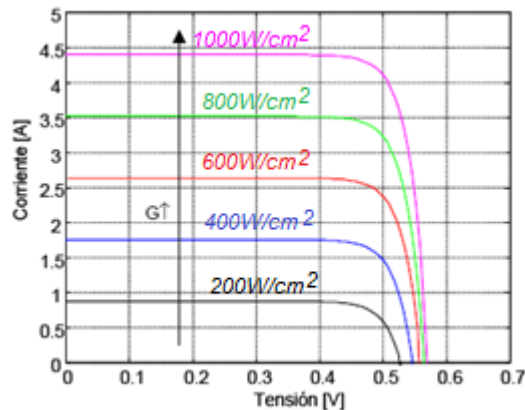


Figura 12. Características I-V en un panel fotovoltaico Atersa de 85 W para diferentes irradiaciones [1].

2.1.2. Efecto de la temperatura en la célula fotovoltaica

El efecto de la temperatura en la célula fotovoltaica se ve reflejado en la característica I-V, pues esta curva varía según la temperatura de operación de la célula, esto se debe a que existen coeficientes de variación de tensión de circuito abierto y corriente de corto circuito. El cálculo de la tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito se presenta a partir de las ecuaciones (2.9) y (2.10), respectivamente [2].

$$V_{OC} = V_{OC25^{\circ}C} - (\theta_{CELULA} - 25^{\circ}C) * \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.9)$$

$$I_{SC} = I_{SC25^{\circ}C} + (\theta_{CELULA} - 25^{\circ}C) * \frac{\Delta I}{\Delta T} \quad (2.10)$$

Según (2.9) y (2.10), es posible estimar la curva I-V de una célula fotovoltaica a una temperatura de operación determinada, a partir de su característica I-V a 25 °C de operación. Esta temperatura de operación de la célula está dada a partir de la ecuación (2.11)

$$\theta_{CELULA} = \theta_{AMBIENTE} + \frac{NOCT-20}{800} * G \quad (2.11)$$

En la ecuación (2.11) el parámetro NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*), es la temperatura de operación de la célula a condiciones de 20 °C de temperatura ambiente y 800 W/m² de irradiación. Este dato es suministrado por los fabricantes de paneles solares.

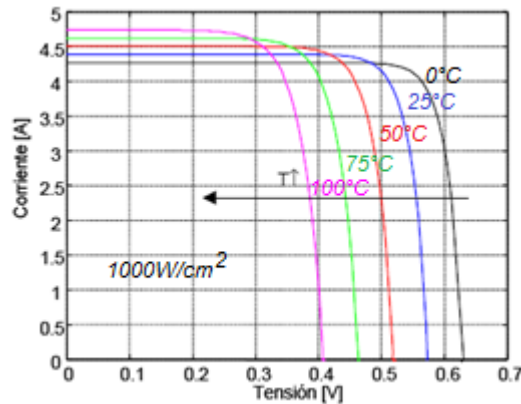


Figura 13. Curva I-V de una célula fotovoltaica Atersa de 85 W a diferentes temperaturas ambiente [1].

En la Figura 13 se observa que al aumentar la temperatura de operación, la tensión de la célula disminuye considerablemente, y aunque la corriente aumenta un poco, no basta para compensar el efecto sobre la tensión, esto contribuye a la disminución de la potencia entregada por el panel fotovoltaico.

2.2. BATERÍA

La batería es el elemento encargado de almacenar la energía generada en sistemas fotovoltaicos, a fin de suministrarla en horas de la noche, o en situaciones de interrupción del servicio de la red pública, si se requiere.

En el planteamiento matemático de la batería se utilizó el modelo de J.B. Copetti [6], [7], debido a su capacidad de mostrar la tensión en bornes y el estado de carga en función del tiempo, a partir solamente de parámetros conocidos, los cuales son suministrados por el fabricante [7], [10].

Tabla 7. Nomenclatura para el modelo matemático de la batería.

Nomenclatura para el modelo matemático de la batería	
$I(t)$:	Corriente en la batería [A]
ΔT :	Diferencia de temperatura entre la batería y el medio ambiente [°C]
$V_{BATERIA}$:	Tensión en una celda de la batería [V]
$C_{NOMINAL}$:	Capacidad de almacenamiento nominal de la batería [Ah]
$I_{NOMINAL}$:	Corriente nominal de la batería [A]
$t_{NOMINAL}$:	Régimen nominal de carga y descarga de la batería [h]
Δt :	Diferencia de tiempo en el cual la batería adquiere determinada cantidad de carga [h]
$Q(t)$:	Carga instantánea de la batería [Ah]
$C(t)$:	Capacidad de almacenamiento de la batería en función del tiempo [Ah]
SOC_2 :	Estado de carga actual
SOC_1 :	Estado de carga anterior
$\eta_c(t)$:	Eficiencia durante la carga
t_g :	Tiempo en el cual la tensión de carga alcanza la tensión de gaseo [h]
$V_g(t)$:	Tensión de gaseo [V]
$V_{ec}(t)$:	Tensión de fin de carga [V]
$\tau(t)$:	Constante de tiempo para sobrecarga [h]

Este modelo caracteriza el comportamiento de baterías formadas por celdas de 2V, a partir de su capacidad nominal en amperios-hora [Ah], y de su régimen de descarga en horas [h], calculando la tensión de salida de una celda en función de la intensidad de corriente que entra o sale, de la diferencia de temperatura entre la batería y el medio ambiente, y de su estado de carga en un instante anterior [5].

$$V_{BATERIA} = f(I_{BATERIA}, \Delta T, SOC) \quad (2.12)$$

Para modelar el funcionamiento de la batería es importante tener en cuenta sus zonas de trabajo especificadas en la Figura 14 y en la Tabla 7, las cuales se

determinan por el valor de la corriente y la tensión presentes en ésta. Para delimitar estas zonas se calculará la tensión de gaseo V_g [1], que es la tensión a la cual el electrolito se empieza a gasificar; también se calculará la tensión de final de carga V_{ec} , la cual es la máxima tensión que alcanza una celda de la batería por encima de su tensión nominal V_n . Una vez delimitadas estas zonas de trabajo, se hará el estudio por separado para las condiciones de carga y descarga [5].

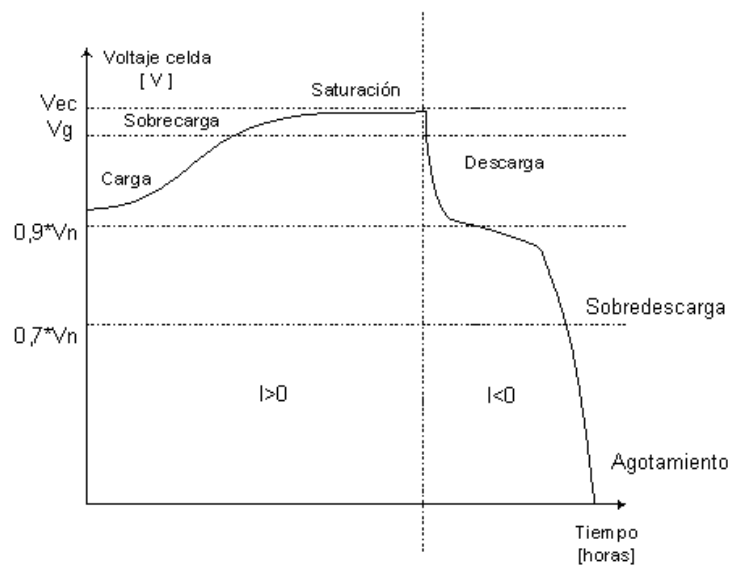


Figura 14. Zonas de operación de la batería [13].

Tabla 8. Zonas de trabajo de una batería.

ZONA DE TRABAJO/RÉGIMEN	CORRIENTE	TENSIÓN
CARGA	$I > 0$	$V_{bat} < V_g$
SOBRECARGA		$V_g < V_{bat} < V_{ec}$
SATURACIÓN		$V_{bat} = V_{ec}$
DESCARGA	$I < 0$	$V_{bat} > 0,9V_n$
SOBRE DESCARGA		$0,7V_n < V_{bat} < 0,9V_n$
AGOTAMIENTO		$V_{bat} < 0,7V_n$

2.2.1. Régimen de carga

El modelo matemático para el estado de carga de la batería, se debe aplicar por convención cuando el valor instantáneo de la corriente que entra a la batería, toma un valor positivo, y el estado actual de carga en la batería aumenta; éste depende de la relación entre la cantidad de carga instantánea y la cantidad de carga almacenada [6], [10].

$$Q(t) = I(t) * \Delta t \quad (2.13)$$

$$C(t) = \frac{1,67 * C_{NOMINAL}}{1 + 0,67 * \left(\frac{|I(t)|}{I_{NOMINAL}}\right)^{0,9}} * (1 + 0,005 * \Delta T) \quad (2.14)$$

$$I_{NOMINAL} = \frac{C_{NOMINAL}}{t_{NOMINAL}} \quad (2.15)$$

$$SOC_2 = SOC_1 + \frac{Q(t)}{C(T)} \quad (2.16)$$

Según [1], la tensión en zona de carga para una celda de 2V se define como:

$$V_c(t) = (2 + 0,16 * SOC(t)) + \frac{I(t)}{C_{NOMINAL}} * \left(\frac{6}{1 + I(t)^{0,86}} + \frac{0,48}{(1 - SOC(t))^{1,2}} + 0,036 \right) * (1 - 0,025 * \Delta T) \quad (2.17)$$

$$\eta_c(t) = 1 - e^{\frac{20,73}{I(t)} * (SOC(t) - 1) + 0,55} \quad (2.18)$$

La zona de sobrecarga empieza cuando se alcanza la tensión de gaseo, esta zona se define como:

$$V_{SC}(t) = V_g + (V_{ec} - V_g) * \left(1 - e^{\frac{t_g - t}{\tau(t)}} \right) \quad (2.19)$$

$$\tau(t) = \frac{17,3}{1+852*\left(\frac{I(t)}{C_{NOMINAL}}\right)^{1,67}} \quad (2.20)$$

La tensión de gaseo es la tensión a la cual el electrolito comienza a gasificarse y se obtiene a partir de la expresión (2.21).

$$V_g(t) = \left(2,24 + 1,97 * \ln\left(\frac{I(t)}{C_{NOMINAL}}\right)\right) * (1 - 0,007 * \Delta T) \quad (2.21)$$

La tensión de final de carga se define como la máxima tensión que alcanza una celda de la batería y se obtiene a partir de la expresión (2.22).

$$V_{ec}(t) = \left(2,45 + 2,011 * \ln\left(\frac{I(t)}{C_{NOMINAL}}\right)\right) * (1 - 0,002 * \Delta T) \quad (2.22)$$

2.2.2. Régimen de descarga

Este régimen se aplica por convención cuando el valor de la corriente que entra a la batería toma un valor negativo, y el estado de carga comienza a disminuir.

En este régimen se modela la descarga, sobredescarga y agotamiento por medio de una sola ecuación y se asume una eficiencia de descarga de 100% [7], [10].

$$V_d(t) = \left(2,085 - 0,12 * (1 - SOC(t))\right) - \frac{|I(t)|}{C_{NOMINAL}} * \left(\frac{4}{1+|I(r)|^{1,3}} + \frac{0,27}{SOC(t)^{1,5}} + 0,02\right) * (1 - 0,007 * \Delta T) \quad (2.23)$$

2.3. REGULADOR

A partir del estudio del estado de carga de la batería, se ve la necesidad de garantizar que ésta se encuentre operando en zonas de trabajo adecuadas, para proteger la vida útil, tanto del dispositivo como del sistema en general.

Tabla 9. Nomenclatura para el modelo matemático del regulador.

Nomenclatura para el modelo matemático del regulador
I_{dcdc1} : Corriente de salida en el convertidor DC/DC para el control MPPT [A]
V_p : Tensión en el panel fotovoltaico [V]
I_p : Corriente en el panel fotovoltaico [A]
V_{bat} : Tensión en la batería [V]
I_{dcdc2} : Corriente de entrada en el convertidor DC/DC para regulación de tensión [A]
I_{carga} : Corriente en la carga[A]
V_{carga} : Tensión en la carga[V]

Esta protección consiste en evaluar constantemente el estado de carga de la batería para desconectarla del sistema cuando salga de los límites permisibles para carga y descarga. De esta manera, el regulador desconecta la batería cuando se encuentra sobrecargada y hay potencia disponible en los paneles fotovoltaicos o desconecta la carga cuando la batería está descargada y no hay potencia disponible en los paneles [1], [5].

Además, de proteger la batería el regulador, también cumple otras dos funciones para optimizar el desempeño de un sistema fotovoltaico; la primera, es garantizar en cualquier condición de trabajo una tensión constante en la carga, y la segunda, es extraer la máxima potencia posible del grupo de paneles fotovoltaicos; esto se conoce comercialmente como la función MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Estas funciones se logran por medio de dos convertidores DC/DC incorporados en el regulador.

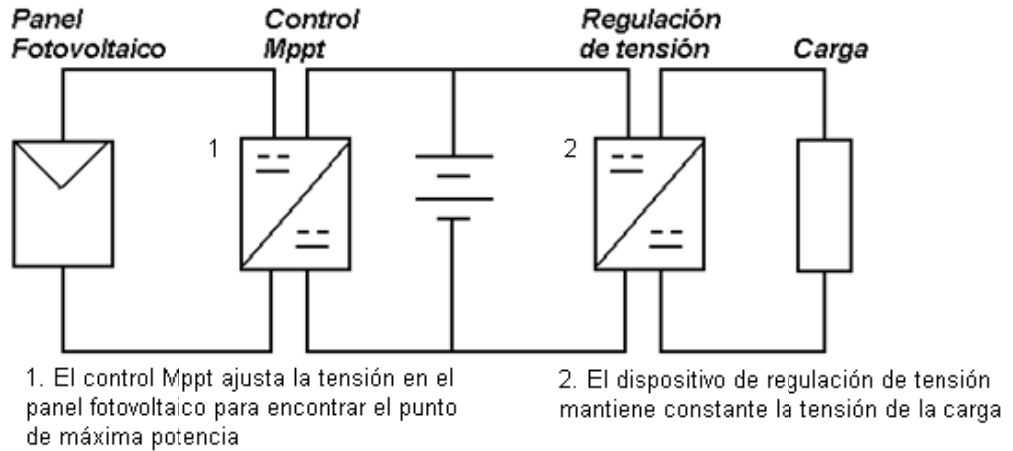


Figura 15. Esquema básico de un regulador.

2.3.1. Control MPPT

El esquema de la Figura 15 consta de un convertidor DC/DC entre el panel fotovoltaico y la batería, esta es la etapa de control MPPT, encargada de gestionar el punto de trabajo en la curva I-V del panel fotovoltaico, con el fin de obtener de este la máxima potencia.

Un algoritmo de control incorporado al regulador, evalúa constantemente la tensión y la corriente del panel fotovoltaico, para encontrar el punto de máxima potencia en la curva I-V mostrada en la Figura 16.

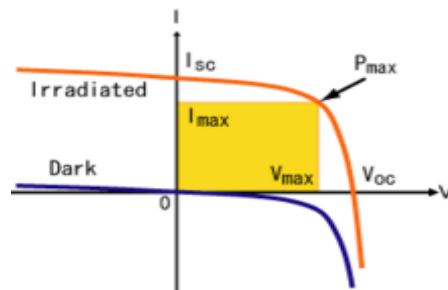


Figura 16. Punto de potencia máximo para el control MPPT [11].

Una vez encontrado este punto de máxima potencia, el regulador obliga a que la tensión en el panel fotovoltaico, sea igual a la tensión de máxima potencia V_{mp} del panel fotovoltaico (Ver Capitulo 1 Tabla 2) para extraer de éste la máxima potencia en todo momento. El convertidor DC/DC transforma la tensión del panel fotovoltaico a una tensión de trabajo adecuada para la batería. Dado que en el convertidor DC/DC se lleva a cabo un proceso de transformación de potencia, éste debe ajustar la corriente que va desde su salida hasta la batería, según la ecuación (2.24).

$$I_{dcdc1} = \frac{V_p * I_p}{V_{bat}} \quad (2.24)$$

Donde,

I_{dcdc1} : Corriente en la salida del convertidor DC/DC para el control MPPT

V_p : Tensión en el panel fotovoltaico

I_p : Corriente en el panel fotovoltaico

V_{bat} : Tensión en la batería

La ecuación (2.24) indica que la potencia en la entrada del convertidor DC/DC debe ser igual a su potencia de salida.

Sin embargo, existe un escenario en el cual la batería está completamente cargada, y aun así la potencia generada por los paneles fotovoltaicos es mayor que la potencia demandada por la carga. En este caso, el control MPPT buscará la tensión y la corriente en los paneles fotovoltaicos que generen sólo la potencia suficiente para suministrar la demanda existente.

2.3.2. Control de tensión de salida

Debido a que el regulador debe garantizar una tensión constante en la carga, y la tensión en la batería y los paneles fotovoltaicos es variable, se debe implementar un convertidor DC/DC para ajustar la tensión en la carga.

$$I_{dc2} = \frac{V_{carga} * I_{carga}}{V_{bat}} \quad (2.25)$$

Donde,

I_{dc2} : Corriente en la entrada del convertidor DC/DC para el control de tensión

V_{carga} : Tensión en la carga (Salida del regulador)

I_{carga} : Corriente en la carga

V_{bat} : Tensión en la batería

En la Figura 15, el convertidor DC/DC encargado de mantener constante la tensión de la salida del regulador, está conectado entre la batería y la carga, para lograr esta tensión constante el regulador debe ajustar la corriente en la entrada del convertidor DC/DC a la ecuación (2.25), la cual indica que de igual manera que en el caso del control MPPT la potencia de entrada del convertidor DC/DC debe ser igual a su potencia de salida.

2.3.3. Límites de trabajo para el regulador

El modelo teórico tomará como parámetros de entrada los límites de estado de carga en los cuales deberá operar la batería, estos límites son descritos en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Límites de operación del SOC de una batería.

Parámetro	Descripción	Valor típico
SOCM: Estado de carga máximo	Estado de carga por encima del cual la batería deja de cargarse.	95%
SOCmd: Estado de carga mínimo de desconexión de carga	Estado de carga por debajo del cual se desconecta la carga del sistema.	50%
SOCmc: Estado de carga mínimo de re conexión de carga	Estado de carga que debe alcanzar la batería para la re conexión de la carga.	70%

Con base a estos límites en el estado de carga, el regulador debe administrar el flujo de potencia en el sistema fotovoltaico.

Tabla 11. Escenarios de operación del regulador.

Condición	Estado del sistema
$SOC > SOCM$	$P_{bat} = 0; P_{generada} = P_{carga}$
$SOC < SOC_{cmd}$	$P_{bat} = P_{generada}; P_{carga} = 0$

2.4. INVERSOR

El inversor tiene la capacidad de suministrar energía eléctrica de corriente alterna a partir de un flujo de corriente continua, y así permitir la atención de cargas de corriente alterna. El inversor deberá entregar una tensión eficaz constante en corriente alterna cuando en su entrada tenga una tensión de alimentación en corriente continua, la cual se puede modelar como una fuente dependiente de corriente I_c a su entrada y su salida como una fuente controlada de tensión V_c [1], [5].

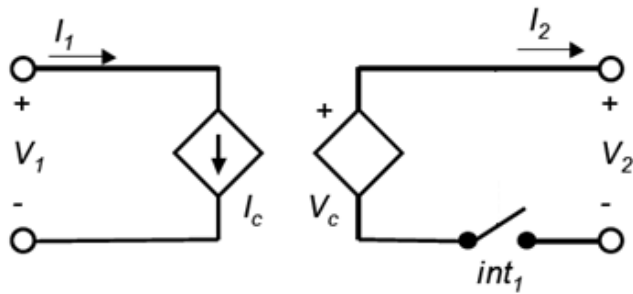


Figura 17. Circuito equivalente para el balance de potencia en un inversor [1].

Donde,

V_1 : Tensión DC de entrada [V]

I_1 : Corriente DC en el inversor [A]

I_c : Corriente DC en la fuente dependiente de la entrada del inversor [A]

V_c : Tensión RMS en la fuente dependiente de la salida del inversor [V]

int_1 : Interruptor de desconexión a la red

I_2 : Corriente RMS de salida [A]

V_2 : Tensión RMS de salida [V]

Para comprender el funcionamiento del inversor, se parte de la ley de conservación de la energía, donde la potencia de salida deberá ser igual a la suma de potencia de entrada y las pérdidas de potencia en el proceso de conversión; ello está representado en el circuito equivalente por I_1 y modelado por I_c . Este consumo de energía eléctrica del inversor introduce una eficiencia η ; en las ecuaciones (2.26) y (2.27) se tiene en cuenta el efecto de esta eficiencia [10].

$$V_c = cte = V_{ac} \quad (2.26)$$

$$I_c = \frac{V_2 \cdot I_2}{\eta \cdot V_1} \quad (2.27)$$

La eficiencia es la relación existente entre la potencia de salida y la potencia de entrada en el inversor, en [10] se propone que la eficiencia de un inversor es una función no lineal y se puede modelar como un polinomio de grado dos descrito en las ecuaciones (2.28) y (2.29), donde se buscarán los coeficientes que mejor se aproximen a una curva obtenida a partir pruebas experimentales o datos suministrados por el fabricante [3], [10].

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = f_p(P_2) \quad (2.28)$$

$$\eta = \frac{P_{AC}}{P_{AC} + (K_0 \cdot V_{DC} + K_1 \cdot V_{DC} \cdot P_{AC} + K_2 \cdot V_{DC} \cdot P_{AC}^2)} \quad (2.29)$$

Donde,

P_{AC} : Potencia de salida en corriente alterna

V_{DC} : Tensión de corriente continua

K_0, K_1, K_2 : Coeficientes del polinomio característico

2.4.1. Inversor para sistemas fotovoltaicos *Grid-Tied*

Cuando se desea interconectar el sistema de generación fotovoltaica a una red de distribución, se hace imprescindible el uso de inversores *grid tied*, los cuales tienen la capacidad de sincronizarse en tensión y frecuencia. Con esto se tienen la propiedad de permitir un flujo bidireccional de energía, ya sea del sistema fotovoltaico a la red o de la red al sistema fotovoltaico [1].

2.4.2. Inversor para sistemas fotovoltaicos *Stand Alone*

Cuando el sistema fotovoltaico se encuentra aislado, se utiliza un inversor tipo *Pure*, el cual produce a la salida una onda sinusoidal con muy bajo contenido de armónicos, esto es un aspecto fundamental para el correcto funcionamiento de las cargas [1].

2.4.3. Potencia reactiva en el inversor

Cuando se alimentan cargas de AC con factor de potencia menor a la unidad, ya sea por demanda de potencia reactiva o por una alta distorsión armónica, surgen problemas en su correcta operación, además de la disminución en el rendimiento de los inversores. Debido a esto, es necesario hacer una corrección del factor de potencia por medio de condensadores y/o filtros; sin embargo, actualmente, existen en el mercado inversores que pueden mejorar su factor de potencia, inclusive algunos con la capacidad de inyectar potencia reactiva a la red para controlar tensiones [10].

El modelo matemático para el inversor de este trabajo, tiene en cuenta el factor de potencia en las cargas, por medio del desfase entre la corriente y la tensión en la salida del inversor, a través de señales complejas implementadas en SIMULINK; la Figura 18 muestra el planteamiento de estas señales, para dicho modelo matemático.

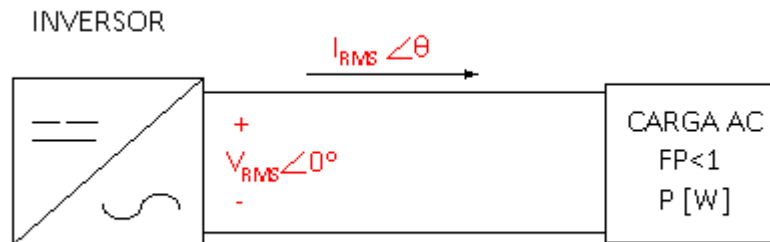


Figura 18. Tensión y Corriente en un inversor.

Observación: El inversor de la Figura 18, de la herramienta computacional, no está en capacidad de entregar potencia reactiva, sin embargo es necesario conocer el desfase entre la corriente y la tensión del inversor, para calcular la potencia activa,

para este caso el usuario deberá realizar compensación de reactivos, al ser aplicados en la práctica.

$$I_{RMS} = \frac{P}{\sqrt{3} * V_{RMS} * FP} \quad (2.30)$$

$$I_{RMS} = \frac{P}{V_{RMS} * FP} \quad (2.31)$$

$$\theta = -\cos^{-1} FP \quad (2.32)$$

En las ecuaciones (2.30) y (2.31) se calcula el valor rms de la corriente en una carga de AC trifásica y monofásica respectivamente, valor que se tomará como corriente de salida del inversor para su modelo matemático, teniendo en cuenta su desfase con respecto a la tensión de salida, definido por el ángulo θ en grados sexagesimales y expresado en la ecuación (2.32). Estas señales de corriente de AC en el inversor son de carácter complejo; por lo tanto, el usuario debe tener esto en cuenta al modelar una carga de AC en SIMULINK, ya que algunos bloques no son compatibles con señales complejas.

2.5. CONVERTIDOR DC/DC

En algunas aplicaciones de sistemas fotovoltaicos en corriente continua, la potencia no es generada a la tensión requerida para su consumo, por lo cual, es necesario utilizar un convertidor DC/DC, para adecuar estas tensiones.

El modelo del convertidor DC/DC planteado en [1] y [5] es análogo al modelo matemático del inversor, y se utilizará con el propósito de elevar o reducir tensiones, se planteará una ecuación de balance de potencia, manteniendo una tensión constante a la salida del convertidor [1], [5].

$$V_{SALIDA} = Cte \quad (2.33)$$

$$I_{SALIDA} = f(V_{SALIDA}, Carga) \quad (2.34)$$

$$V_{ENTRADA} = f(Paneles, Carga, Bateria) \quad (2.35)$$

$$I_{ENTRADA} = \frac{V_{SALIDA} * I_{SALIDA}}{\eta * V_{ENTRADA}} \quad (2.36)$$

Se asumirá una eficiencia caracterizada por una curva similar a la del inversor, la cual será aplicada en la ecuación de balance de potencia para cualquier potencia de salida.

2.6. DIODOS DE BLOQUEO

En un sistema fotovoltaico, los diodos de bloqueo evitan que el panel consuma potencia de las baterías [4]. Este efecto también se produce en conexiones de varias series de módulos fotovoltaicos, en las cuales ciertas series pueden consumir potencia debido a su exposición temporal a sombras.

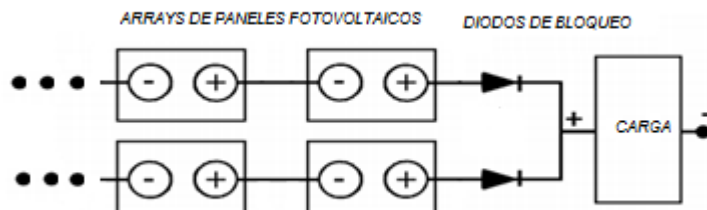


Figura 19. Diodos de bloqueo [12].

Para el diodo de bloqueo, se utilizará el modelo de diodo ideal, el cual bloquea el flujo de corriente cuando ésta cambia de sentido [4].

2.7. PROTECCIONES CONTRA SOBRE CORRIENTE

Las protecciones en los sistemas fotovoltaicos, como para cualquier instalación eléctrica son parte fundamental. Estos sistemas trabajan con protecciones de sobre tensión y de sobre corriente, pero dentro de la herramienta computacional sólo se aplicarán al modelo de los conductores. Estas protecciones de sobre corriente trabajarán como fusibles de características ideales, que actúan de forma instantánea cuando la corriente supera los valores definidos por el usuario.

2.8. CARGA

Para la instalación fotovoltaica, como para cualquier instalación eléctrica, la carga tiende a ser el elemento de mayor importancia, ya que la finalidad de todas estas instalaciones es abastecerla de energía. Sin embargo, el modelo de la carga es uno de los más sencillos, pues se modela con una simple ley de Ohm o la ley de Watt; la carga puede ser conectada en corriente continua o corriente alterna, y ser especificada con valores de potencia activa y un factor de potencia [1].

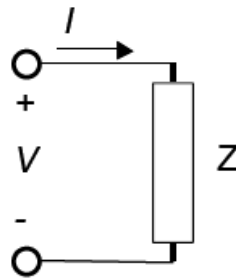


Figura 20. Ley de Ohm [1].

Ley de Ohm:

$$I \angle -\theta = \frac{V \angle 0^\circ}{Z} \quad (2.37)$$

Ley de Watt:

$$(I \cos \theta)^* = \frac{S}{V \cos \theta} \quad (2.38)$$

Cuando se tienen cargas en corriente alterna con un factor de potencia diferente de 1, el inversor deberá desfazar la corriente de la tensión, a un ángulo que corresponda a este factor de potencia [14].

2.9. CONDUCTORES

El modelado de los conductores es fundamental para el análisis energético de un sistema fotovoltaico, pues con éste se pueden modelar la mayoría de las pérdidas de potencia, además de las caídas de tensión que deben tenerse en cuenta para cumplir con las normatividades existentes en la región de interés [4].

El modelado de los conductores se hará por medio de la resistencia correspondiente a cada calibre y por su coeficiente de aumento de resistencia por temperatura, además de aplicarse las leyes básicas de los circuitos (leyes de Ohm y Kirchoff) [3].

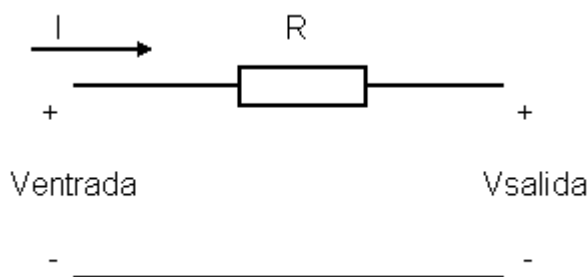


Figura 21. Circuito equivalente para el modelado de pérdidas resistivas.

Para tener en cuenta el efecto de la temperatura sobre los conductores, se utilizará un coeficiente de variación resistiva por temperatura [1], [3].

$$R_{T^{\circ}C} = R_{25^{\circ}C} + (T - 25^{\circ}C) * \alpha \quad (2.39)$$

Donde,

$R_{T^{\circ}C}$: Resistencia del conductor a una temperatura determinada [Ω].

$R_{25^{\circ}C}$: Resistencia del conductor a 25°C [Ω]

T : Temperatura del conductor [°C]

α : Coeficiente de variación resistiva por efecto de la temperatura [$\Omega/^{\circ}C$]

Para representar la caída de tensión por efecto de los conductores se utilizarán las leyes de circuitos en la Figura 21, en la ecuación (2.40) se presenta el caso de corriente alterna y para el caso de corriente continua se presenta la ecuación (2.41).

$$V_{SALIDA} = V_{ENTRADA} \angle 0^{\circ} - (I \angle -\cos^{-1} FP) * R \quad (2.40)$$

$$V_{SALIDA} = V_{ENTRADA} - I * R \quad (2.41)$$

Donde,

V_{SALIDA} : Tensión RMS de salida en la red equivalente [V]

$V_{ENTRADA}$: Tensión RMS de entrada en la red equivalente [V]

I : Corriente RMS en el conductor [A]

R : Resistencia del conductor [Ω]

FP : Factor de potencia de la carga a alimentar (Para cargas de AC)

2.10. RED DE ALIMENTACIÓN DE AC

En la mayoría de sistemas fotovoltaicos, se requiere una conexión a la red de distribución local, con el fin de obtener mayor confiabilidad en el suministro de energía, en caso de que el sistema fotovoltaico quede fuera de servicio.

El equivalente de la red se modela como una fuente ideal de tensión, con lo cual se garantizará el suministro de potencia continuo hacia la carga [1].

2.11. REFERENCIAS

- [1] D. Guasch, "Modelado y Análisis de Sistemas Fotovoltaicos", Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, Abril, 2004.
- [2] D. Soto, "Aumento del Rendimiento en un Vehículo Eléctrico, Utilizando Celdas Fotovoltaicas" Tesis de Grado, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, 2002.
- [3] R. Messenger, "Photovoltaic Systems Engineering" Second Edition, Ed. CRC PRESS, U.S., 2004
- [4] H. L. Gasquet, "Conversion de la Luz Solar en Energía Eléctrica", Manual Teórico y Practico sobre los Sistemas Fotovoltaicos, Solartronic S.A., Cuernavaca, Morelos, México, Octubre, 2004.
- [5] D. Hansen, P. Sorensen, "L. Hansen, H Bindner, Model for a Stand Alone PV System", Riso National Laboratory, December, 2000.
- [6] R. Michael, "A Lead-Acid Battery Model for Hybrid System Modelling", CANMET Energy Diversification Research Laboratory, Natural Resources Canada, March, 2001.
- [7] O. Gergaud, G. Robin, B. Multon, H. Ben Ahmed, "Energy Modeling Of A Lead-Acid Battery Within Hybrid Wind / Photovoltaic Systems" , SATIE - Brittany Branch, ENS de Cachan - Ker Lann Campus, France.
- [8] M. Canseco "Sistema De Propulsión De Un Vehículo Híbrido Eléctrico" Tesis Maestral, Centro Nacional De Investigación Y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, Noviembre, 2004.
- [9] J. Lagunas "Control Supervisorio Difuso Para un Sistema Híbrido de Generación Eléctrica" Tesis Maestral, Centro Nacional De Investigación Y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, Octubre, 2004.

- [10] Taller Internacional Sobre Generación Distribuida Con Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red, "Caracterización de Inversores de CC/CA para Conexión a la Red".
- [11] R. Cullen, "What is Maximun Power Point Tracking (MPPT), and How Does it Work?" Blue Sky Energy Inc.
- [12] Diodos de bloqueo.<http://saecsaenergiasolar.com/fotovoltaico/introduccion>. Consultado el 1 de octubre del 2011
- [13] H. Fernández I. Martínez "Modelado y Simulación De Una Batería De Plomo Acido Mediante Fuentes De Voltaje-Corriente y Bloques Aritméticos".
- [14] Reactive Energy Compensation. <http://www.enertron.net/en/products/wind/reactive-compensation>. Consultado el 17 de Noviembre del 2011

3. PROGRAMACIÓN DE COMPONENTES EN SIMULINK

En este capítulo se presenta la programación de los modelos matemáticos de los dispositivos expuestos en el capítulo 2. Se especifican los parámetros necesarios en GUIDE para el funcionamiento de cada dispositivo, y las variables de entrada y salida de cada bloque en el entorno de SIMULINK.

Cada modelo de bloque se valida a partir de ejemplos, con el fin de brindar un mayor grado de comprensión del funcionamiento de la herramienta.

3.1. GUIDE-MATLAB

GUIDE es un entorno de programación visual que ofrece MATLAB, para realizar y ejecutar programas de simulación de forma simple; sus características básicas son similares a Visual Basic o Visual C++ [2], [3].

Una interfaz en GUIDE consta de dos archivos, uno con extensión **.m**, el cual contiene las sentencias u órdenes correspondientes al funcionamiento de la interfaz, y otro con extensión **.fig**, el cual contiene toda la información sobre cada uno de los objetos que conforman dicha interfaz, los cuales funcionan por medio de subrutinas *callback*, contenidas en el archivo de extensión **.m**.

Al iniciar la operación de la interfaz gráfica GUIDE, se crea una estructura llamada *handles*, que contiene la información de todos los elementos que la conforman, y a su vez, permite almacenar las variables que se van utilizar en su simulación.

También es necesario el uso de una sentencia u orden, para guardar datos de la aplicación, *guidata*. Esta función guarda el contenido y las propiedades de los elementos en la estructura de datos de la aplicación [2], [3].

3.2. PROGRAMACIÓN DE CADA UNO DE LOS DISPOSITIVOS

La programación de cada dispositivo consiste en diversas funciones implementadas en SIMULINK y GUIDE de MATLAB. Las interfaces de usuario realizadas en GUIDE recogen los parámetros introducidos por el usuario, y los almacenan en cada bloque; mientras que, las funciones de SIMULINK procesan de manera rápida las señales de entrada (variables que deben ser evaluadas cada instante de tiempo) y los parámetros de cada dispositivo.

La Figura 22 presenta el esquema básico de flujo de datos de cada uno de los dispositivos que conforman un sistema fotovoltaico.

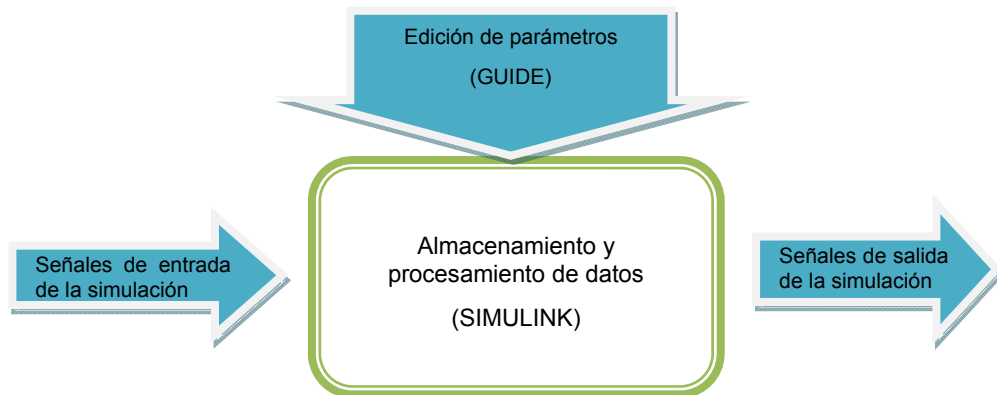


Figura 22. Flujo de datos entre SIMULINK y GUIDE.

3.2.1. Panel fotovoltaico

En la programación del panel fotovoltaico se especifican los parámetros característicos (tensiones, corrientes, potencia, temperatura de operación, irradiación, etc.) de cada módulo a través de una interfaz gráfica. Según la Figura 22, las señales de entrada en la simulación son irradiación (G), temperatura (T) y tensión en el panel (V), para ser procesadas según el modelo matemático del panel fotovoltaico descrito en la sección 2.1, y así obtener como señal de salida la corriente en el panel (I).

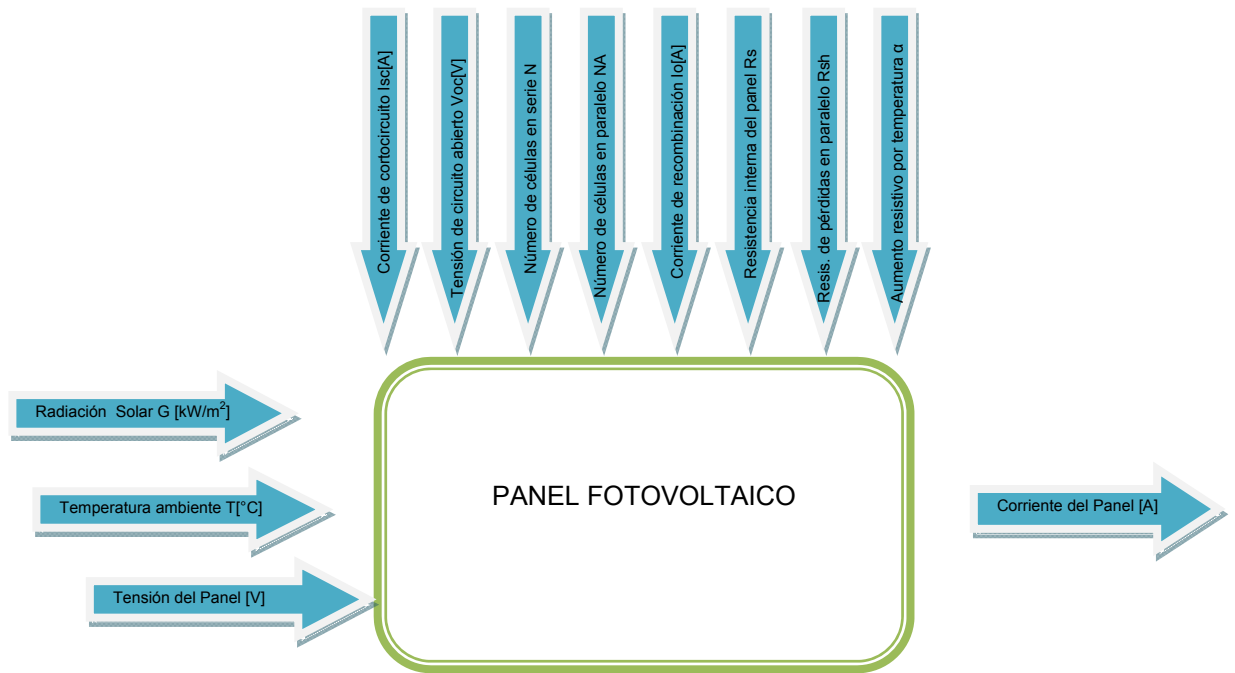


Figura 23. Esquema de parámetros y variables para el panel fotovoltaico.

Dado que en el modelo matemático del panel fotovoltaico, también es posible obtener la tensión (V) a partir de irradiación (G), temperatura (T) y corriente (I), el bloque de panel tiene la posibilidad de intercambiar la configuración de los puertos de corriente y tensión, en caso de que la configuración del diagrama de bloques o la disponibilidad de los datos así lo requieran.

En la Figura 24 se muestra el icono que representa el bloque del panel fotovoltaico creado dentro de la librería de SIMULINK, que hace parte de la herramienta computacional.

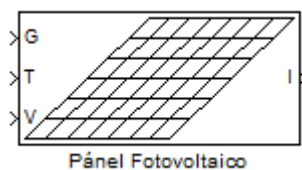


Figura 24. Icono del bloque creado del panel fotovoltaico.

En la Figura 25 se muestra un diagrama que describe la secuencia simplificada de interacción y manejo de información entre el usuario, la interfaz de GUIDE y el entorno de SIMULINK.

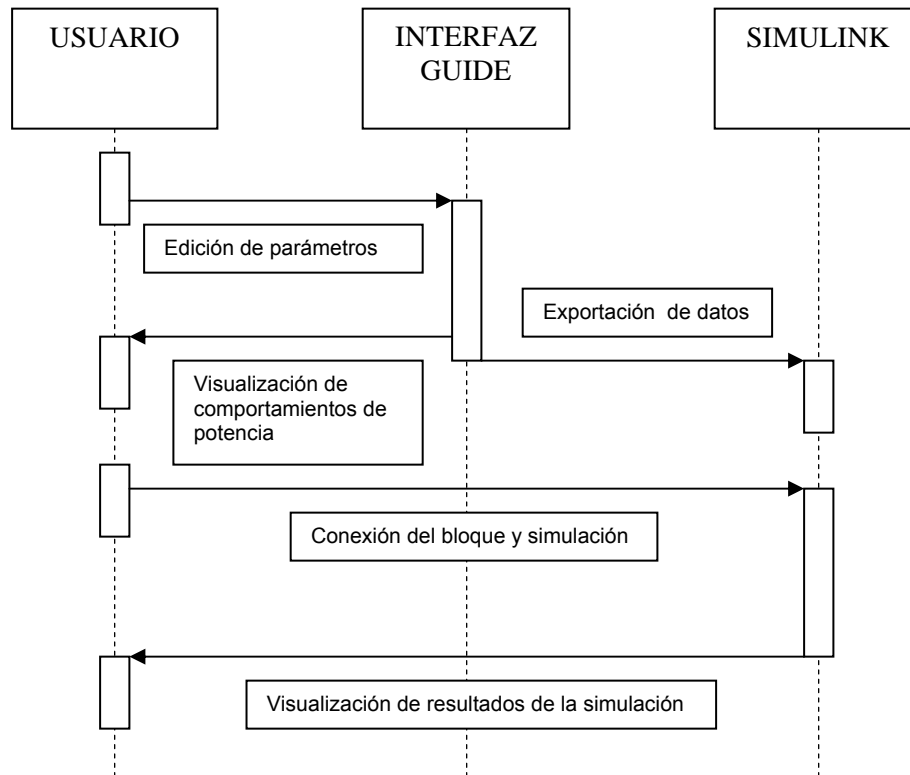


Figura 25. Diagrama de secuencia-procedencia para el panel fotovoltaico.

La interfaz del panel fotovoltaico cuenta con una base de datos de 53 modelos que caracterizan el comportamiento de paneles comerciales de las marcas más conocidas, con el fin de tener mayor semejanza entre las simulaciones y la realidad; además, se da la opción de agregar más modelos de estos paneles fotovoltaicos comerciales, ver Anexo B.

3.2.2. Ejemplo de aplicación del bloque del panel fotovoltaico

Las pruebas del panel fotovoltaico se representan partiendo de ejemplos de fácil comprensión. En esta prueba interactúan, el panel y una resistencia de 10Ω , la cual es representada por un bloque de ganancia. Para los datos de entrada, se toman curvas que asemejan la irradiación y temperatura de la ciudad de Bucaramanga.

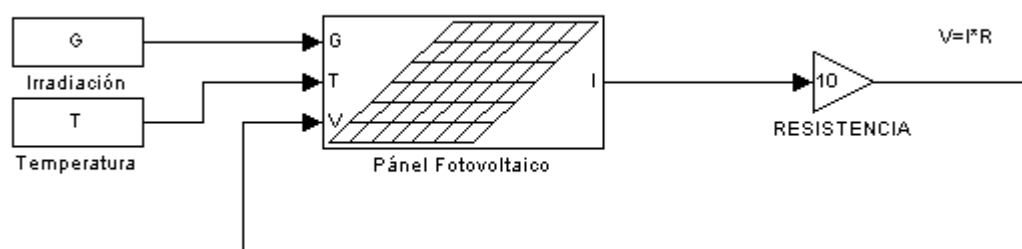
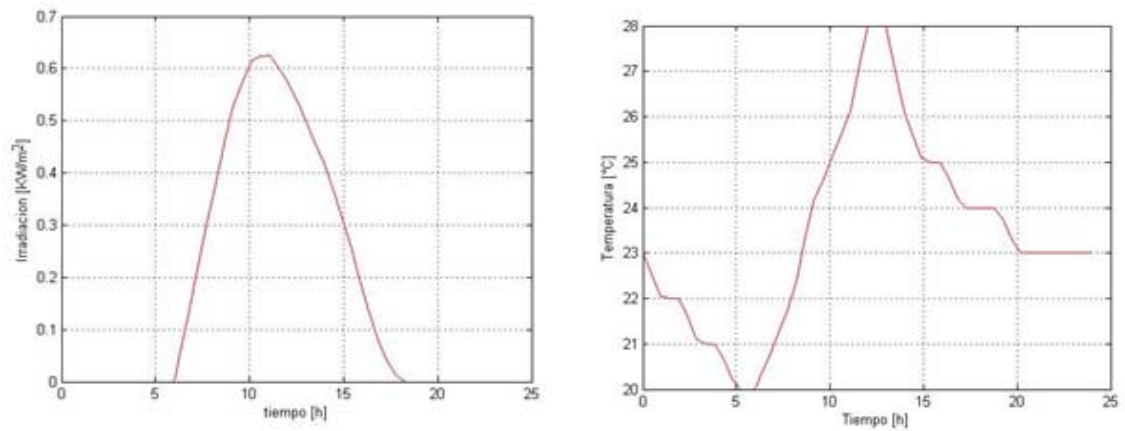


Figura 26. Circuito de prueba del funcionamiento del panel solar.

El panel fotovoltaico utilizado para la prueba es el SunPower 315WHT U de 96 células, tensión de circuito abierto de 64,68 V y corriente de cortocircuito de 6,14 A.

En la Figura 27 se muestran las curvas del comportamiento diario de la irradiación y temperatura (para un día cualquiera) tomadas en la ciudad de Bucaramanga y que serán las variables de entrada al sistema.



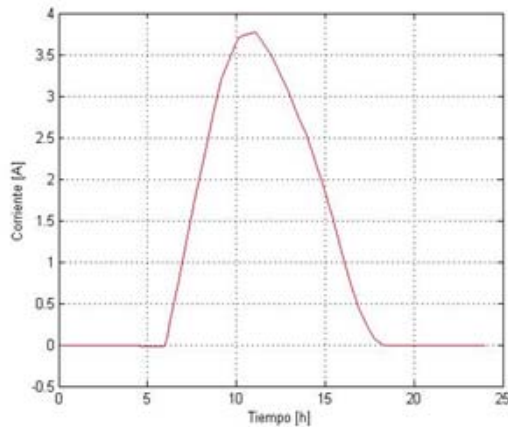
a) *Energía de irradiación*

b) *Curva de temperatura*

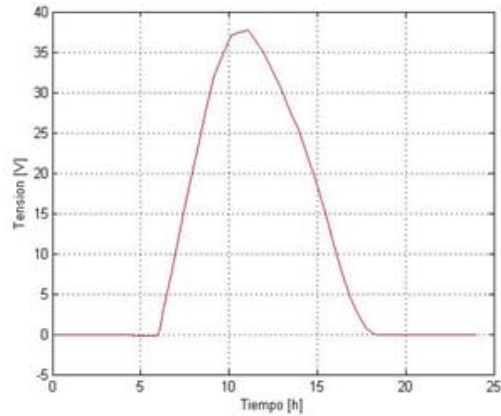
Figura 27. Comportamiento diario de la irradiación y temperatura.

Para esta simulación se analizan variables como: corriente, tensión, potencia, y energía entregada a la carga. La corriente del panel fotovoltaico es una variable de salida del bloque, que al ser afectada por el valor de resistencia que se le asigna al circuito, se obtiene la tensión que retroalimenta el bloque. A partir del producto de tensión y corriente se obtiene la potencia que se consume, y la energía se obtiene al integrar la potencia en función del tiempo.

En la Figura 28 se observan los resultados obtenidos de la simulación; se puede ver en la parte a) la curva de corriente, la cual toma un comportamiento similar a la curva de la irradiación, debido a que la corriente de trabajo del panel es directamente proporcional a la irradiación; por otro lado, en la parte b) se observa que el comportamiento de la tensión es similar a la corriente, lo cual se da por la carga resistiva.



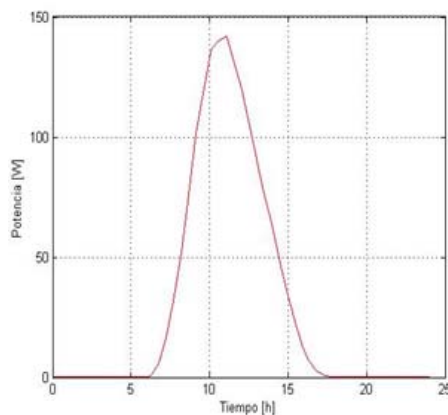
a) Curva de corriente



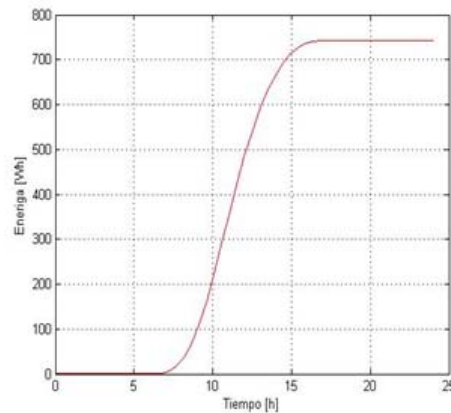
b) Curva de tensión

Figura 28. Variables de salida.

En la Figura 29 se encuentran las curvas de potencia y de energía; en cuanto a la curva de potencia, su forma es similar a la curva de irradiación, (comportamiento esperado); La curva de energía muestra su comportamiento integrador. Esta energía aprovechada a lo largo del día de trabajo depende de la resistencia conectada al panel fotovoltaico; por lo cual, la eficiencia del proceso de conversión, depende del punto de operación impuesto por la carga resistiva, siendo aproximadamente 17 %.



a) Curva de potencia



b) Curva de energía

Figura 29. Curvas de potencia y energía.

El nivel de irradiación que incide en el panel fotovoltaico afecta la corriente que se obtiene y la tensión con que trabaja el panel fotovoltaico dejando como resultado características I-V que son proporcionales a la irradiación existente, lo cual es un resultado esperado. Este efecto se puede observar en la Figura 30, gráfica de corriente versus tensión a diferentes irradiaciones.

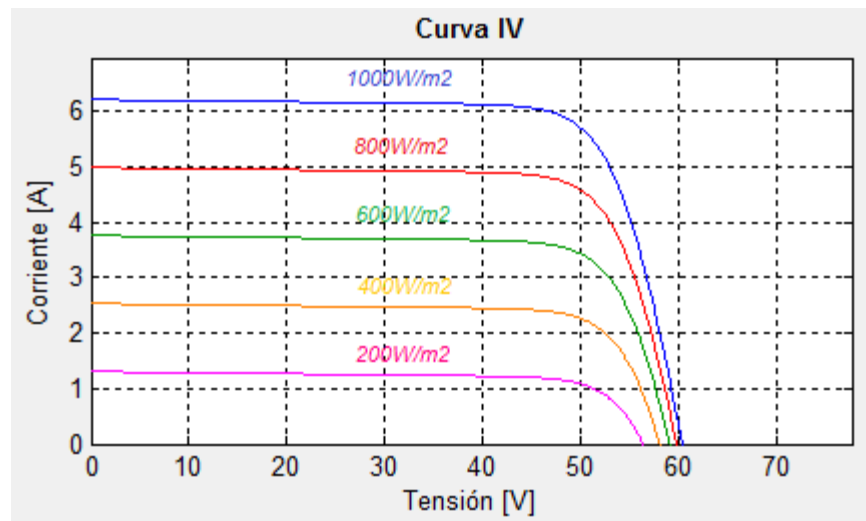


Figura 30. Curva de I-V a diferentes irradiaciones obtenidas por el bloque.

La temperatura también tiene consecuencias en el funcionamiento de los paneles; si se considera una temperatura de operación de normal 25°C, cuando ésta aumenta, la tensión de circuito abierto disminuye significativamente, y de forma similar la potencia generada. En la Figura 31 se muestra tres curvas I-V, indicando estas diferencias en condiciones de 1kW/m² con temperaturas de operación de 25°C, 50°C, y 75°C.

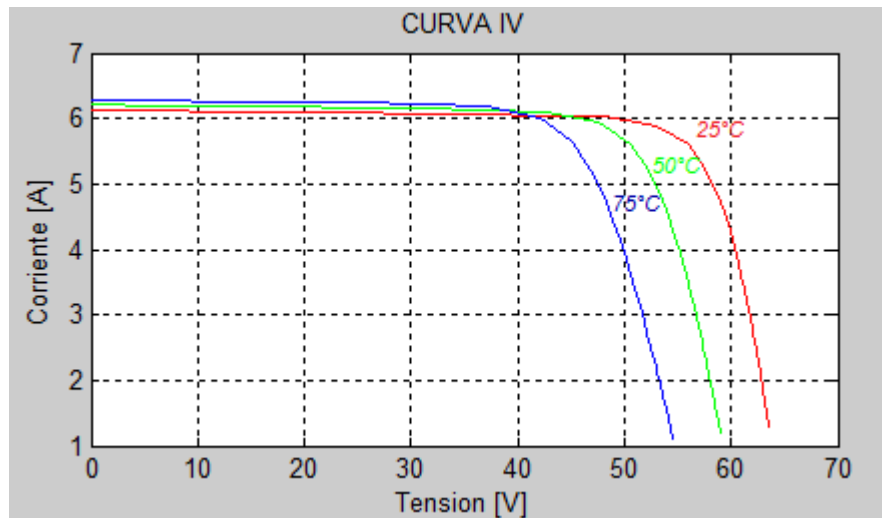


Figura 31. Curvas de I-V a diferentes temperaturas y a 1 kW/m^2 obtenidas por el bloque.

En el bloque se adecuó la opción para conectar paneles fotovoltaicos en serie y en paralelo; en estas conexiones, al aumentar el número de paneles, la potencia que se entrega también aumenta, dado que la corriente aumenta en relación al número de paneles en paralelo y la tensión aumenta en relación al número de paneles en serie. En la Figura 32 se muestra la conexión de los paneles fotovoltaicos en serie y en paralelo.

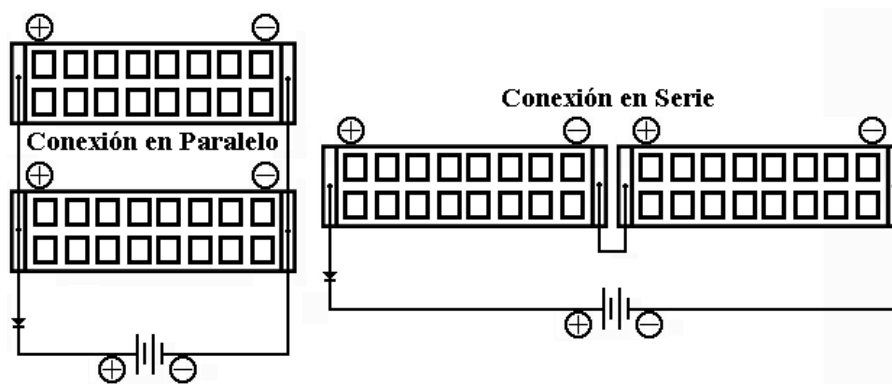


Figura 32. Conexiones serie y paralelo.

En la Figura 33 se muestra la forma de conectar los bloques de los paneles fotovoltaicos en paralelo con la herramienta computacional, donde su tensión es igual y la corriente de ellos se suma.

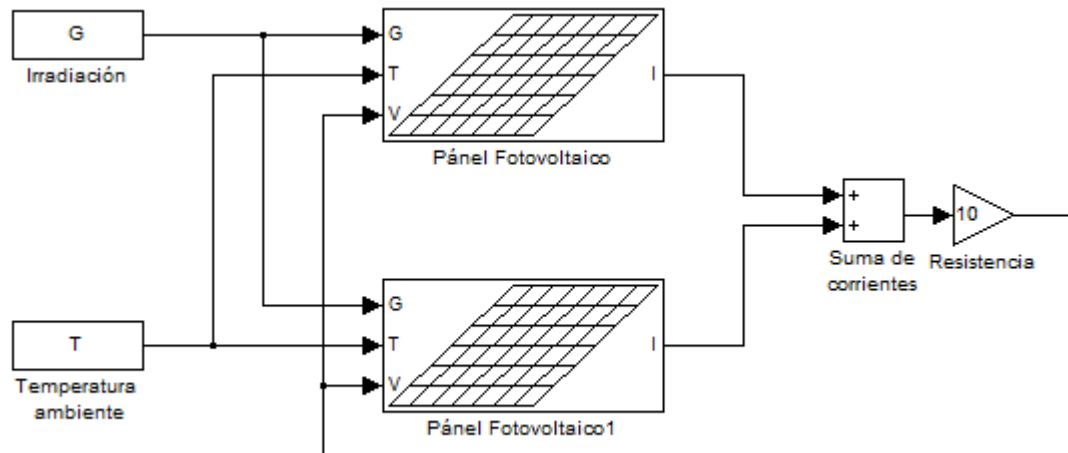


Figura 33. Conexiones de paneles en paralelo con la herramienta computacional.

Para la conexión en serie de los bloques del panel fotovoltaico es necesario cambiar los puertos de entrada y de salida de tensión y de corriente. Para este caso se deben sumar las tensiones y dejar las corrientes iguales; por otra parte, ya no se conectará una resistencia, si no que se conectará una admitancia, para obtener el valor de corriente y éste retroalimente a los paneles fotovoltaicos; así como, se muestra en la Figura 34.

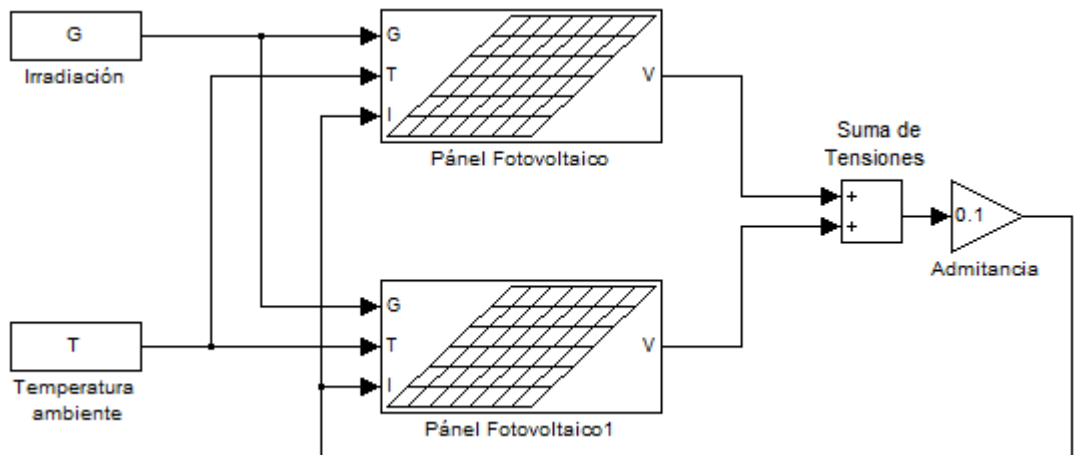
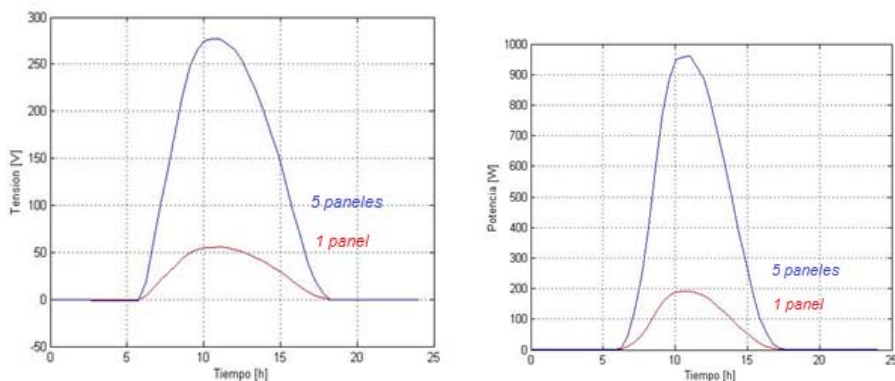


Figura 34. Conexiones de paneles en serie con la herramienta computacional.

Cabe destacar que, en la interfaz del panel fotovoltaico se encuentra la opción de conectar los paneles fotovoltaicos en serie y en paralelo, sin necesidad de hacer las anteriores conexiones.

En las siguientes gráficas se podrá comparar la potencia que entrega y la tensión de trabajo para 1 y 5 paneles en serie, para un valor de resistencia de 16Ω , que garantiza su trabajo en un rango de potencia máxima. Para la conexión de los 5 paneles en serie, es necesario aumentar la resistencia en 5 veces. Para estos casos, la corriente tendrá el mismo comportamiento a lo largo del tiempo.



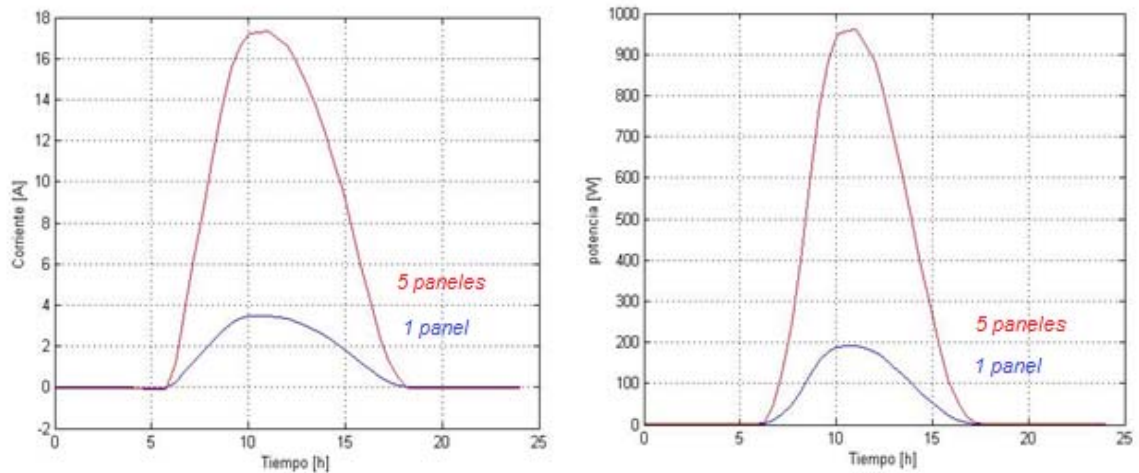
a) Curvas de tensión

b) Curvas de potencia

Figura 35. Curvas tensión y potencia.

Se observa que tanto en las tensiones como en las potencias, los valores para 5 paneles son 5 veces mayores que para uno, siendo este resultado lógico y esperado.

En las Figura 35 se muestra la diferencia existe entre 1 y 5 paneles en paralelo; para ello, se analiza la potencia y la corriente entregadas.



a) Curva de corriente

b) Curva de potencia

Figura 36. Curvas de corriente y potencia.

Al igual que los paneles fotovoltaicos en serie, la potencia entregada en este caso es la misma; la diferencia con los arreglos es que esta potencia se consigue con el aumento de la corriente y no de la tensión, como en el caso anterior.

3.2.3. Batería

La sencillez del modelo de J.B. Copetti [4]-[6] para la batería facilita la programación del bloque, debido a que requiere pocos parámetros para caracterizar su comportamiento. Su programación se hace con base en su

capacidad nominal en A-h, régimen de descarga en h, temperatura de trabajo y tensión nominal en voltios.

En la Figura 37 se indican los puertos presentes en el bloque batería y sus respectivas señales de trabajo.

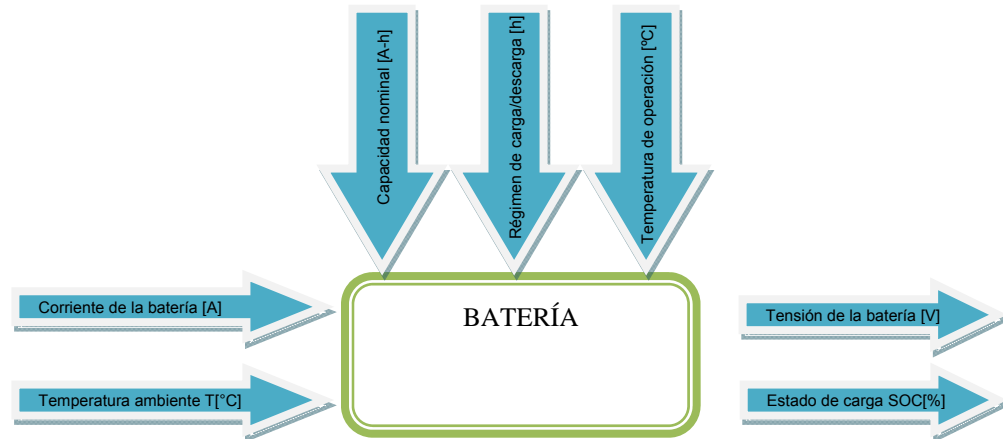


Figura 37. Esquema de parámetros y variables para la batería.

En la Figura 38 se muestra el icono que representa el bloque de la batería, y la Figura 39 muestra el diagrama secuencia procedencia necesario para comprender el funcionamiento de este bloque.

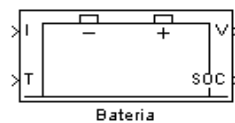


Figura 38. Icono del bloque creado de la batería.

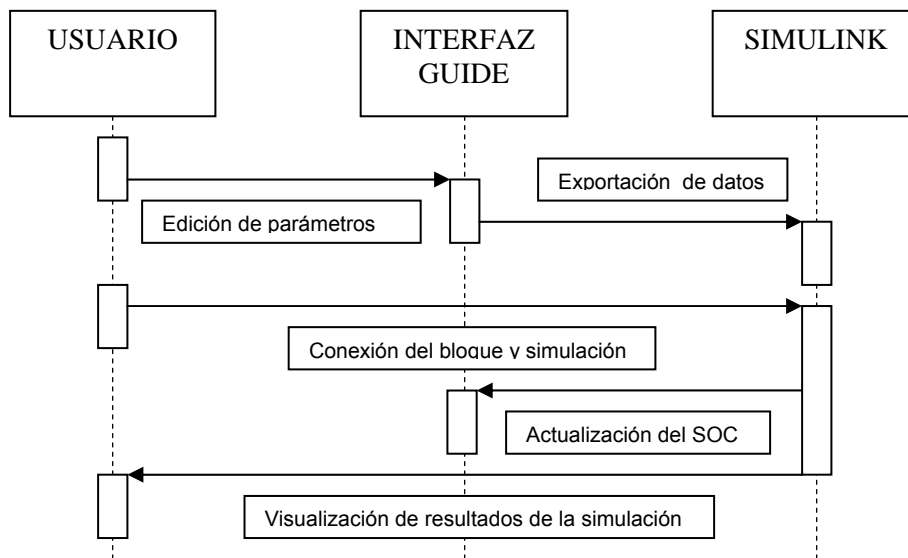


Figura 39. Diagrama de secuencia-procedencia para la batería.

Aunque en la interfaz de la batería no se programaron modelos de baterías comerciales, se da la posibilidad de elegir valores de tensión normalizados para el trabajo de este dispositivo; además, se puede especificar la cantidad de baterías en serie y/o en paralelo que el usuario necesite, para ello puede revisar el Anexo C.

3.2.4. Ejemplo de aplicación del bloque de la batería

En la prueba del bloque de la batería se verifican las zonas de trabajo en las que se debe encontrar según las condiciones del circuito, al visualizar el estado de carga de la batería y la tensión de salida de la misma, para lo cual se empieza cargando un banco de baterías con capacidad de 500 Ah y un régimen de descarga de 20 h; hasta que se encuentre sobre-cargada, luego se presenta el análisis de descarga utilizando la misma corriente constante, pero con un valor negativo que hace que la batería quede en ésta zona de trabajo.

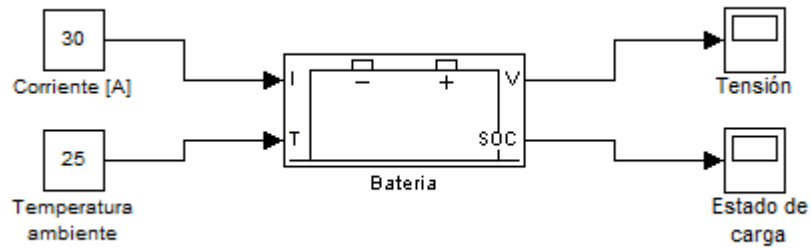
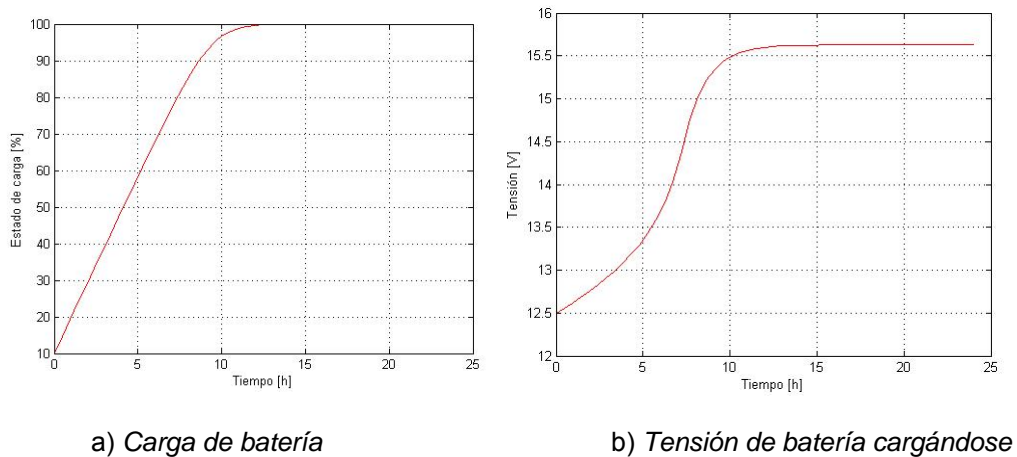


Figura 40. Carga y descarga de batería.

En la Figura 41 se muestra los resultados del estado de carga y tensión de la batería, se observa que la batería se carga completamente, desde un estado inicial de carga bajo hasta un estado de carga máximo. En este proceso, la curva de estado de carga de la batería inicialmente tiene un comportamiento lineal, esto se da porque la corriente que se alimenta la batería tiene un valor constante; cuando la batería llega a su punto máximo de carga, ésta se satura. En cuanto a la tensión, se observa que al igual que la curva de estado de carga, también aumenta a medida que la batería se carga y tiene un límite máximo cuando la batería pasa a un estado de sobrecarga y finalmente a saturación.



a) Carga de batería

b) Tensión de batería cargándose

Figura 41. Carga de batería.

En las figuras 42a) y 42b), la batería se encuentra en un estado de descarga, donde se visualizan las gráficas de estado de carga y tensión de la batería a través del tiempo. Para esta prueba se ingresa a la batería una corriente negativa de forma constante. Se observa en la gráfica de estado de carga, un comportamiento lineal descendente hasta que la batería llega a su estado de carga mínimo, estado de carga que se conoce como estado de agotamiento; en cuanto a la tensión, inicialmente, se reduce de forma suave hasta determinado punto donde comienza una reducción abrupta hasta su tensión mínima.

El estado de carga mínimo de la batería en el que puede llegar a encontrarse es de un 5% como se observa en la Figura 42 a), sin embargo, no es un punto de trabajo óptimo para el funcionamiento de la misma, ya que una batería normalmente trabaja hasta un estado de carga mínimo de 30%; sin embargo, esto lo garantiza el regulador. Esta prueba se realiza sin regulador, y por ello, el estado de carga de la batería llega hasta ese punto.

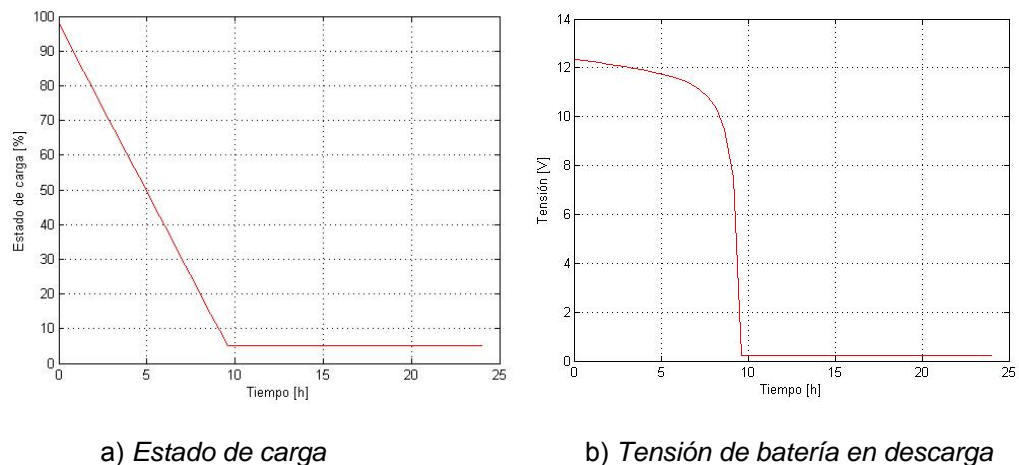


Figura 42. Descarga de la batería.

Otra prueba realizada, consiste en caracterizar un comportamiento completo de una batería, donde la batería en algunos momentos trabaja con corrientes positivas y en otros con corriente negativa, las cuales describen los estados de carga y descarga de la batería, respectivamente. Para esto, se ingresa una señal

de corriente cualquiera que contengan las condiciones de corriente positiva y negativa, y una señal del comportamiento de la temperatura según las condiciones de Bucaramanga; a partir de estas señales de entrada, se obtienen las curvas de tensión y estado de carga de la batería.

Como se puede apreciar en la Figura 43, la tensión en la batería presenta un comportamiento similar al de la corriente; esto es coherente dado que el modelo de Copetti plantea, que a una corriente de carga (positiva) la tensión en bornes debe estar por encima de la tensión nominal, y a una corriente de descarga (negativa), la tensión debe disminuir por debajo de la tensión nominal; adicionalmente, se puede observar que el SOC aumenta cuando la batería está cargándose (corriente positiva), disminuye cuando la batería está descargándose (corriente negativa) y se mantiene constante cuando la corriente es cero.

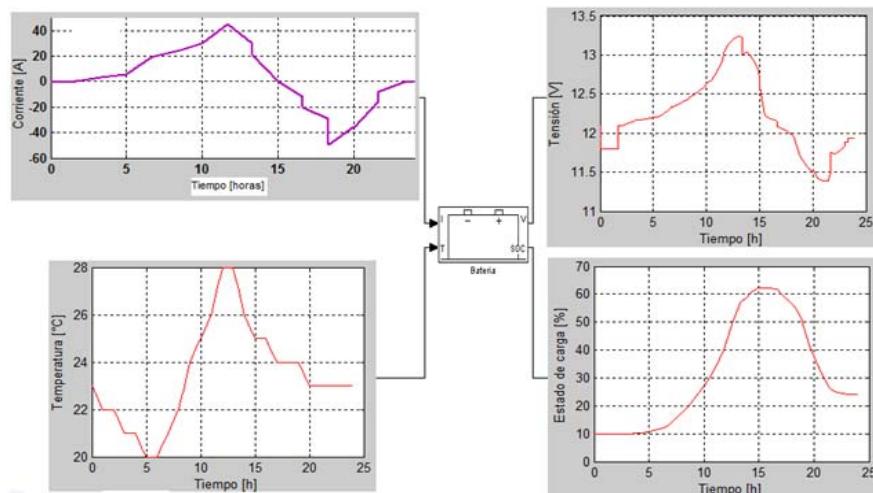


Figura 43. Carga y descarga de batería.

Para la batería, al igual que para el panel fotovoltaico, también hay un efecto de la temperatura en su funcionamiento, dado que al aumentar la temperatura, la curva de tensión se reduce en niveles de tensión, pero su duración aumenta en

pequeñas proporciones. Para demostrar este caso, se realizaron simulaciones a distintas temperaturas de operación con una misma señal de corriente, la cual tiene un valor de 40 A en un lapso de 12 horas, y de -40 A las 12 horas siguientes, estas temperaturas serán de 10°C, 25°C, 40°C, 60°C, 80°C y 100°C, obteniéndose; así, los resultados de las figuras 44 y 45.

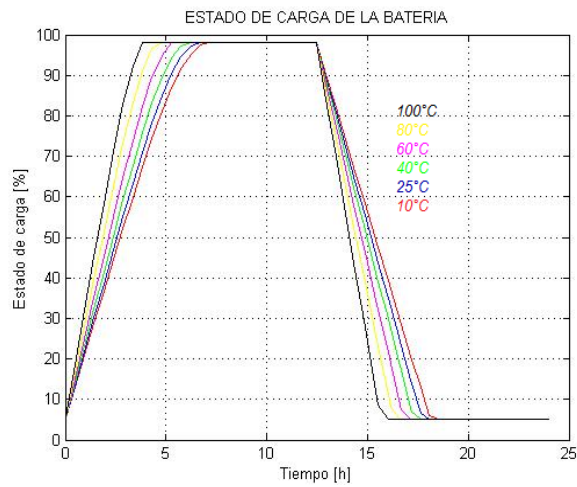


Figura 44. Estados de cargas de batería a diferentes temperaturas.

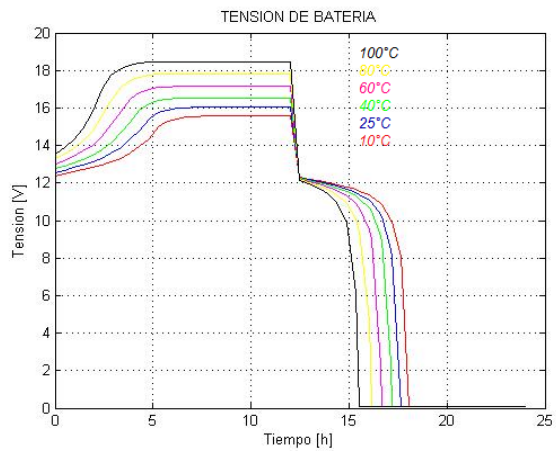


Figura 45. Tensiones en bornes de batería a diferentes temperaturas.

3.2.5. Regulador

El regulador ajusta tensión y potencia de cada dispositivo del sistema, de acuerdo a las condiciones de generación y demanda dadas en cada instante; su modelo teórico es sencillo y simplemente requiere como parámetros de entrada los límites de estado de carga presentados en la sección 2.3.

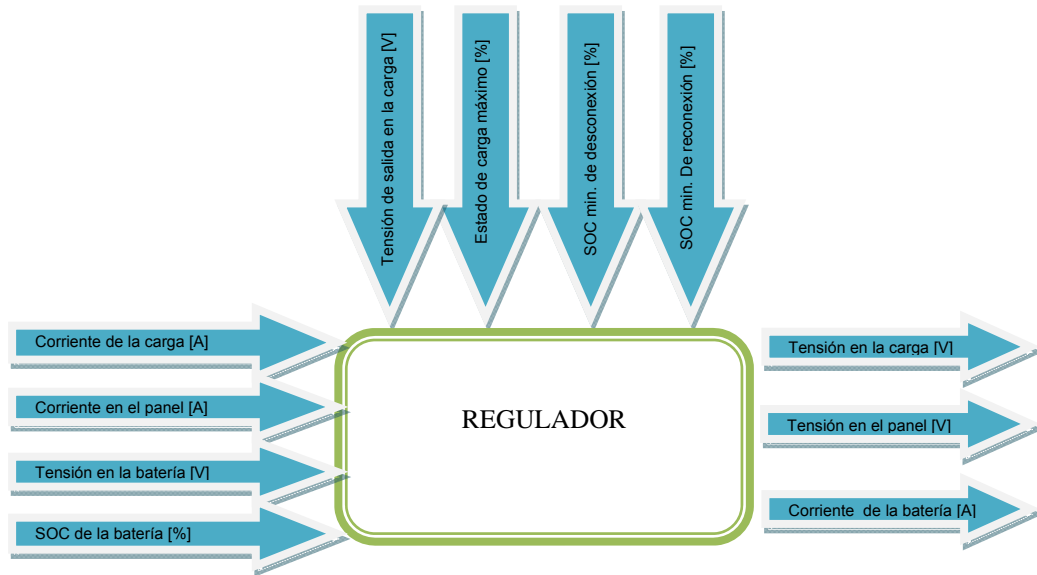


Figura 46. Esquema de parámetros y variables para el regulador.

En la Figura 47 se muestra el icono que representa el bloque del regulador creado dentro de la librería de SIMULINK, que hace parte de la herramienta computacional.

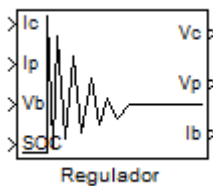


Figura 47. Icono del bloque creado del regulador.

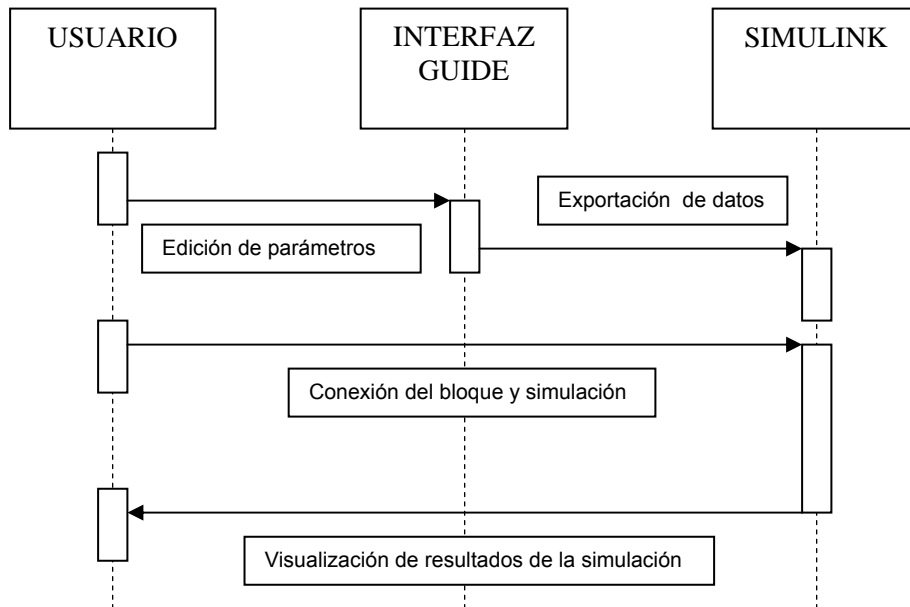


Figura 48. Diagrama de secuencia-procedencia para el regulador.

El regulador en su interfaz tiene la opción de escoger su eficiencia y valor de tensión de trabajo, además de los límites de estado de carga de la batería que permiten protegerla dentro del sistema.

3.2.6. Ejemplo de aplicación del bloque del regulador

Para la prueba del bloque del regulador se realizaron pruebas en diferentes condiciones de trabajo, donde se puede observar el funcionamiento de este elemento para los diferentes casos. Como se mencionó en la sección 2.3, la salida del regulador en cuanto a tensión será una salida constante, debido a un convertidor DC/DC que este bloque tiene incorporado internamente.

En el primer caso, el sistema opera en un punto de máxima irradiación; y adicionalmente, el banco de baterías está completamente cargado. En este caso el regulador debe gestionar la potencia generada por los paneles, para que éstos

entreguen solamente la potencia requerida por la carga, ya que las baterías no pueden acumular más energía.

En esta conexión de la Figura 49 se encuentra un panel solar marca SunPower 315WHT, con entradas de irradiación y temperaturas cercanos a los medidos en la ciudad de Bucaramanga, conectado a una batería con capacidad de 500 Ah y régimen de descarga de 20 horas, con una tensión nominal de 24 V; se conecta una constante que representa la resistencia o carga del sistema.

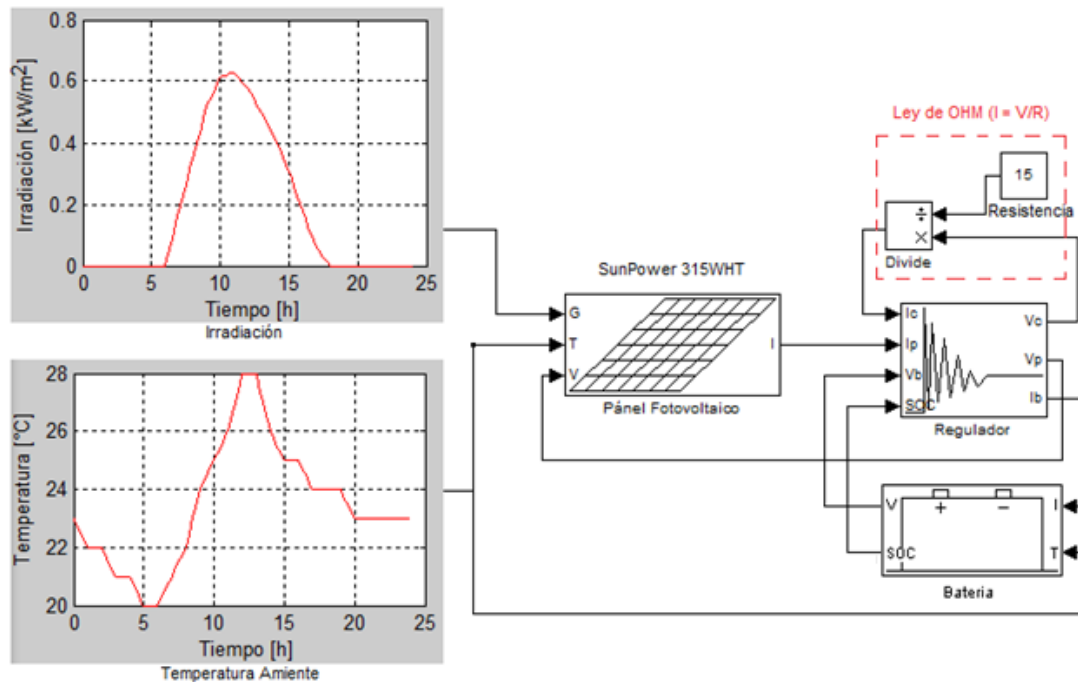
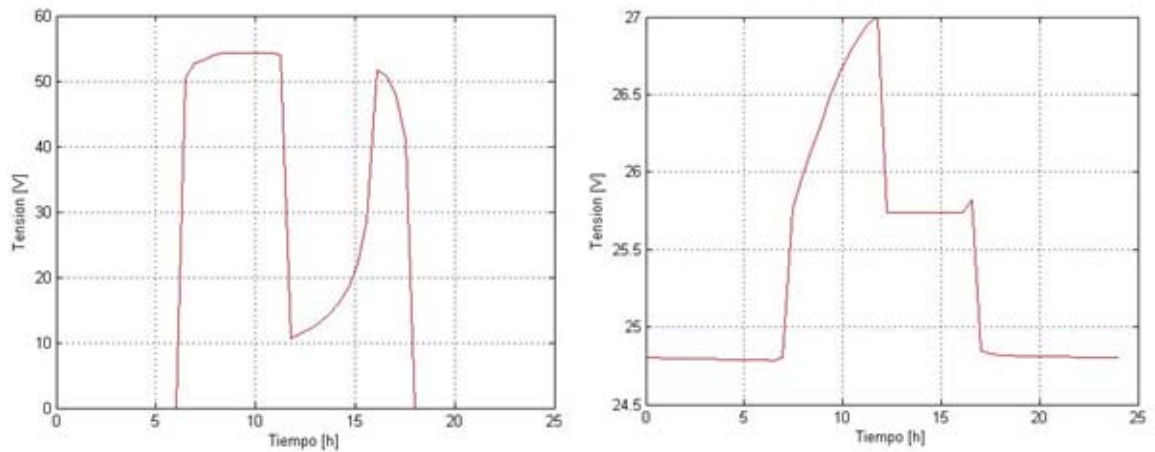


Figura 49. Conexión de un sistema fotovoltaico sencillo con regulador.

En esta simulación se puede ver que en un lapso aproximado entre la hora 12 y la hora 17, la batería queda eléctricamente por fuera del circuito y el panel adecúa su potencia de generación de acuerdo a la carga conectada (ver Figura 50).



a) Tensión en el panel b) Tensión de alimentación del regulador y de la batería

Figura 50. Tensión en el panel, regulador y en la batería.

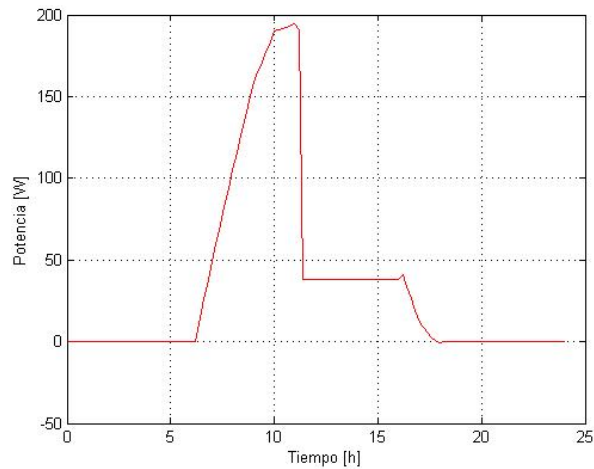
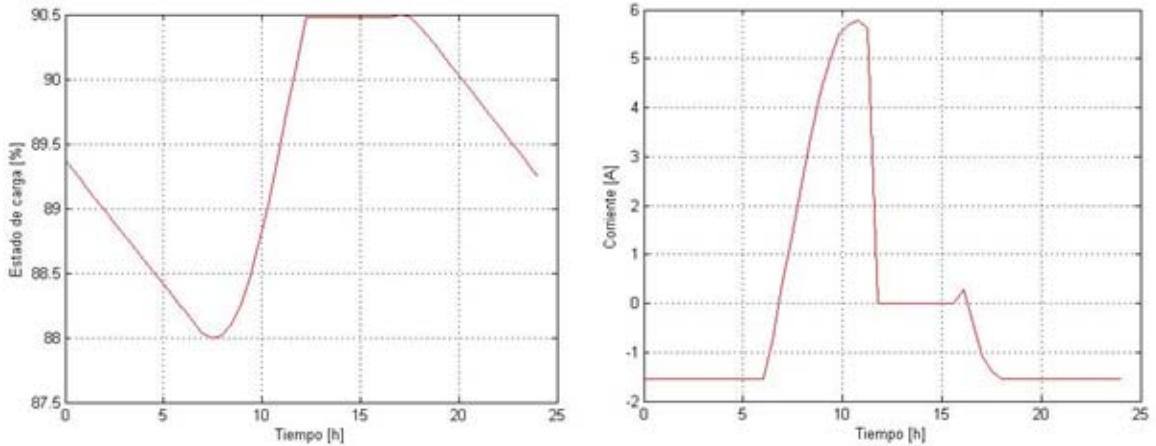


Figura 51. Potencia generada por el panel fotovoltaico.

El estado de carga de la batería mostrado en la Figura 52a) se mantiene constante entre las horas 12 y 17, debido a que la batería deja de entregar o recibir carga del sistema, este comportamiento también se ve en la corriente de la batería de la Figura 52b), la cual toma un valor de cero en este intervalo de tiempo; la tensión de la batería sigue un comportamiento similar a la corriente en ella según la Figura 50b), y la tensión del panel fotovoltaico de la Figura 50a) es la tensión de máxima

potencia, cuando la batería está inactiva dentro del circuito, se puede apreciar un valle en la gráfica de esta tensión, esto es porque la tensión se adecúa a tal punto que se entrega la potencia demandada por la carga cuando la batería es aislada.

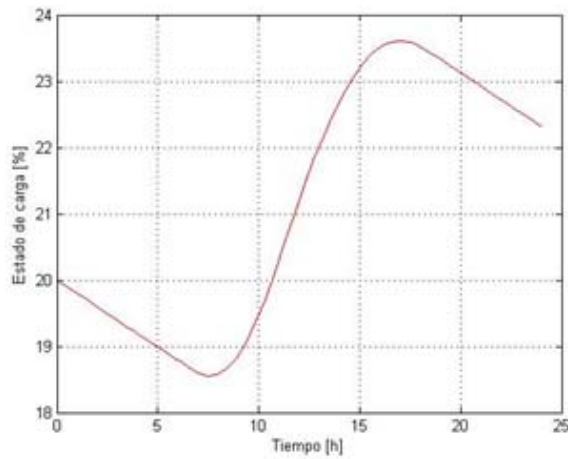


a) Estado de carga de la batería

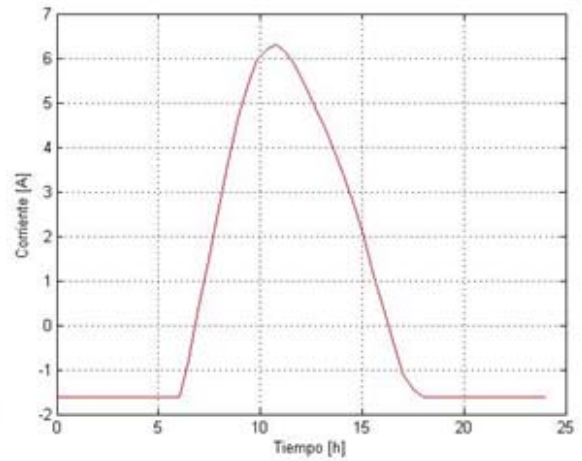
b) Corriente en la batería

Figura 52. Estado de carga y corriente en la batería.

En el segundo caso, la carga a suplir es de menor capacidad que la generación del panel; y además, la batería no se encuentra totalmente cargada, el panel deberá trabajar en el punto de máxima potencia, suplir la carga y cargar la batería, la Figura 52 muestra el estado de carga y corriente de la batería para este escenario.



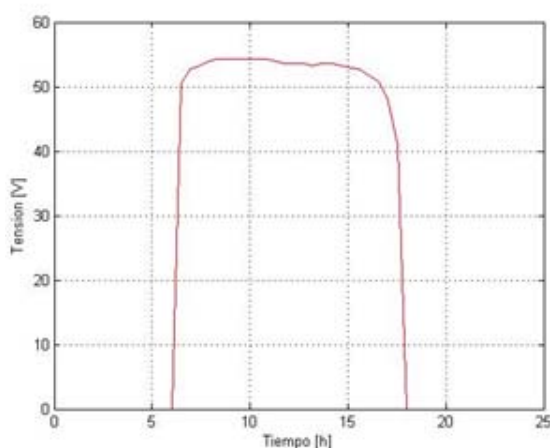
a) Estado de carga de la batería



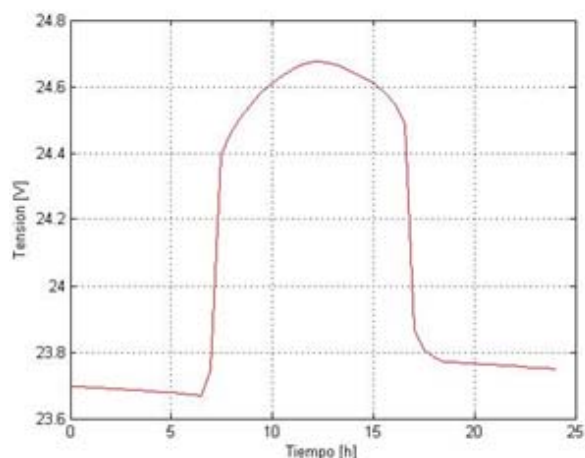
b) Corriente de la batería

Figura 53. Estado de carga y de la batería.

En la Figura 53 en el estado de carga se observa que la batería se descarga y se carga según la radiación del día, pero finalmente aumenta su estado de carga; y en cuanto a la gráfica de corriente de la batería, se observa que hay tiempos en que la corriente toma valores negativos, los cuales indican que la batería entrega energía a la carga; para la gráfica de tensión del panel fotovoltaico se puede observar que toma valores cuasi constantes en las horas que hay presencia de irradiación, esto se da porque el panel se encuentra trabajando en su punto de máxima potencia.



a) Tensión del panel

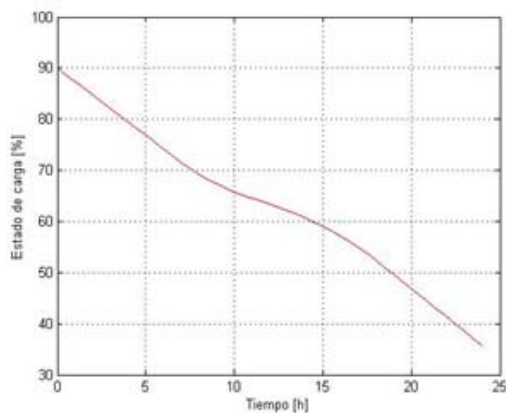


b) Tensión de alimentación del regulador y de la batería

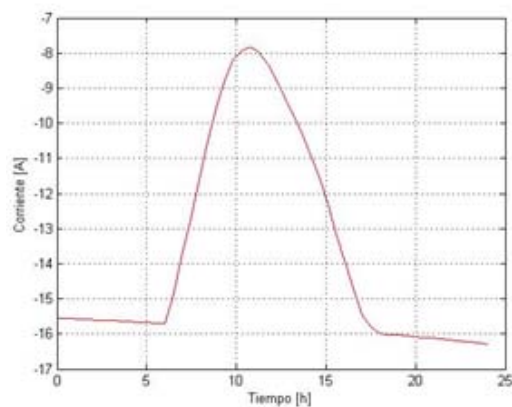
Figura 54. Tensiones en el panel, batería y regulador.

En el tercer caso, la demanda de potencia es significativamente mayor que la potencia que pueden generar los paneles fotovoltaicos, la batería deberá suplir el resto de carga que no puede ser suministrada por éstos.

En la Figura 55 se ve como disminuye el estado de carga de la batería y la corriente tiene valores negativos en todo momento, debido a que la potencia del panel no es suficiente para asistir por completo la demanda de energía.



a) Estado de carga de la batería

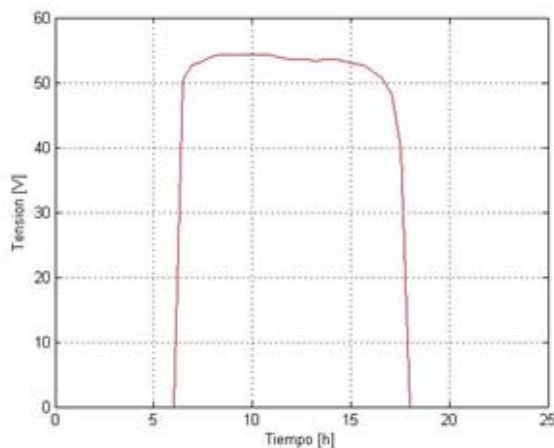


b) Corriente de batería

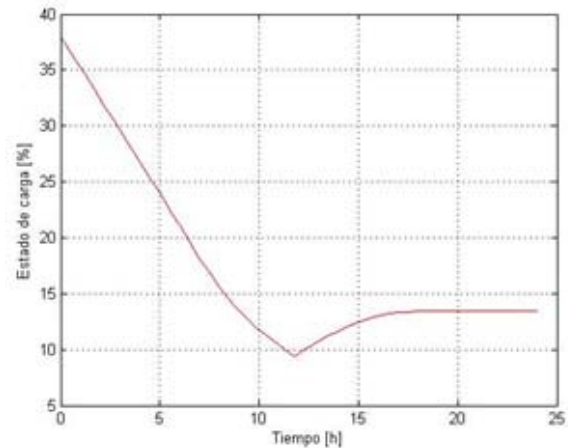
Figura 55. Estado de carga y corriente de batería.

El último caso a analizar se da cuando la potencia demandada es mayor que la generada y la batería no tiene la suficiente carga para asumir todo el tiempo esta diferencia de potencia.

En estas gráficas se puede ver como la batería se descarga hasta que el regulador desconecta la carga porque el sistema no está en la capacidad de asumirla, esto sucede en un tiempo aproximado de 12 horas, el cambio se aprecia no sólo en la curva del estado de carga de la batería como se ve en la Figura 56 b); también se aprecia en la curva de corriente y de tensión de la batería en la Figura 57, pues la corriente, al desconectarse la carga, toma valores positivos, ya que toda la generación de los paneles fotovoltaicos la asume la batería para cargarse; la tensión se incrementa automáticamente dado que la batería pasa de un estado de descarga a un estado de carga; la tensión del panel de la Figura 56 a) se encuentra en el punto donde este entrega su máxima potencia.

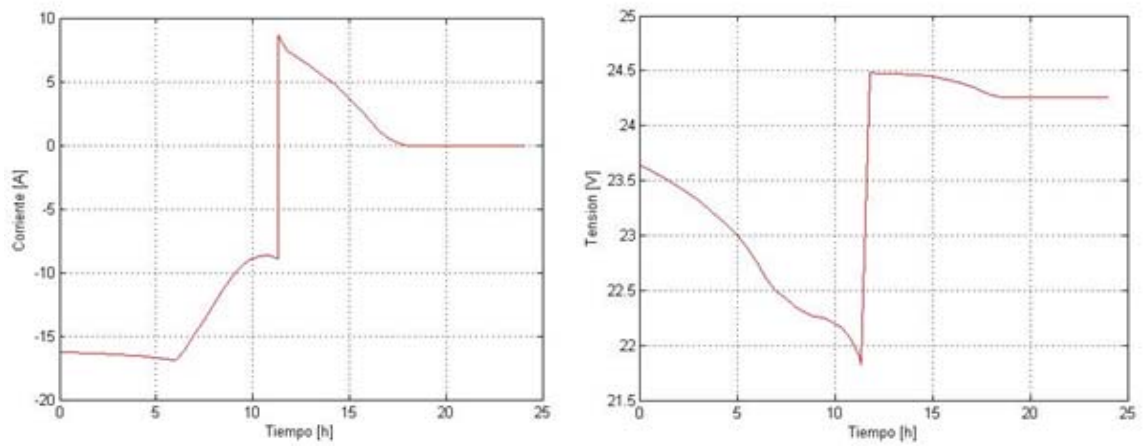


a) Tensión del panel



b) Estado de carga de la batería

Figura 56. Tensión del panel y estado de carga de la batería.



a) Corriente de la batería

b) Tensión de la batería

Figura 57. Corriente y tensión de la batería.

3.2.7. Inversor

La programación del inversor consiste en un bloque que mantenga el balance de potencia en este dispositivo, teniendo en cuenta parámetros como su eficiencia y tensión de salida, los cuales son introducidos por el usuario.

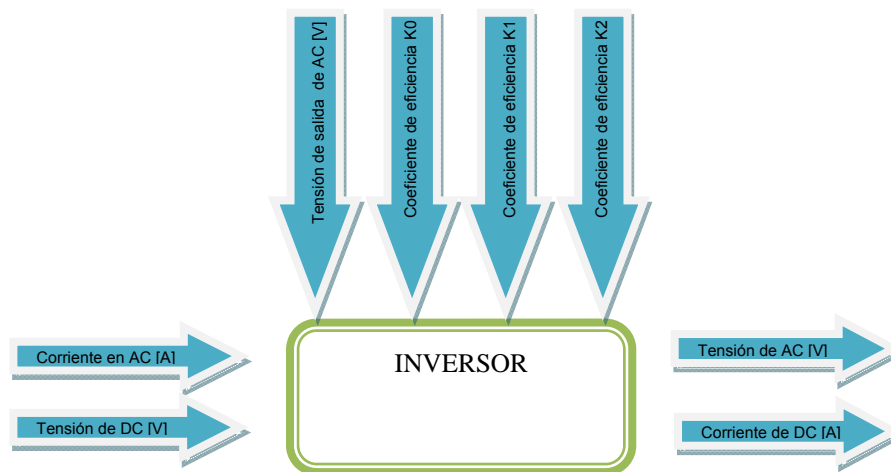


Figura 58. Esquema de parámetros y variables para el inversor.

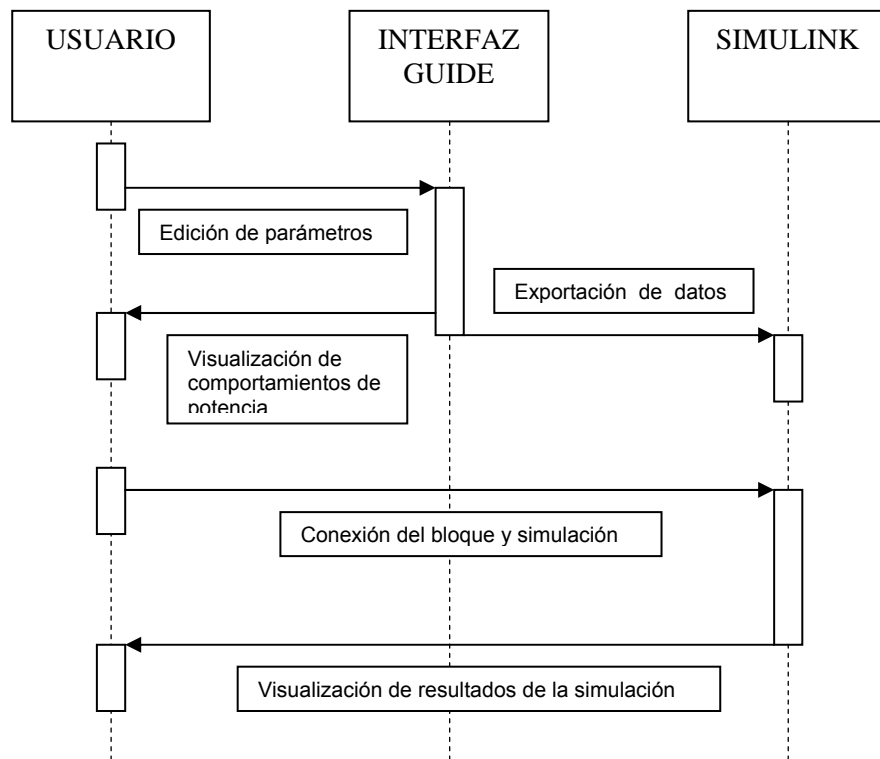


Figura 59. Diagrama de secuencia-procedencia para el inversor.

Dentro de la interfaz del inversor se da la opción de escoger los coeficientes que permiten caracterizar su curva de eficiencia a partir de la fórmula que se puede visualizar en la interfaz del bloque, además se debe especifica el tipo de salida ya sea monofásica o trifásica y la configuración que es *Stand alone* o *Grid Tied*.

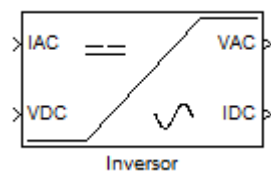


Figura 60. Icono del bloque creado del inversor.

3.2.8. Ejemplo de aplicación para el inversor

Para la prueba del inversor se revisó su comportamiento en cuanto al tipo de salida, ya sea trifásica o monofásica, pues la potencia en cada tipo de salida es diferente según las leyes básicas de los circuitos eléctricos. Para ello se conecta un sistema que incluya panel fotovoltaico, batería, regulador, inversor, y carga, la cual se representa con una constante que dividirá la tensión (resistencia).

Se analizarán dos casos; en el primero el inversor tiene una salida monofásica y en el segundo tiene una salida trifásica, el parámetro eléctrico que se analiza para ambos casos es la corriente de entrada al inversor o corriente DC, el esquema correspondiente a esta prueba es el de la Figura 61.

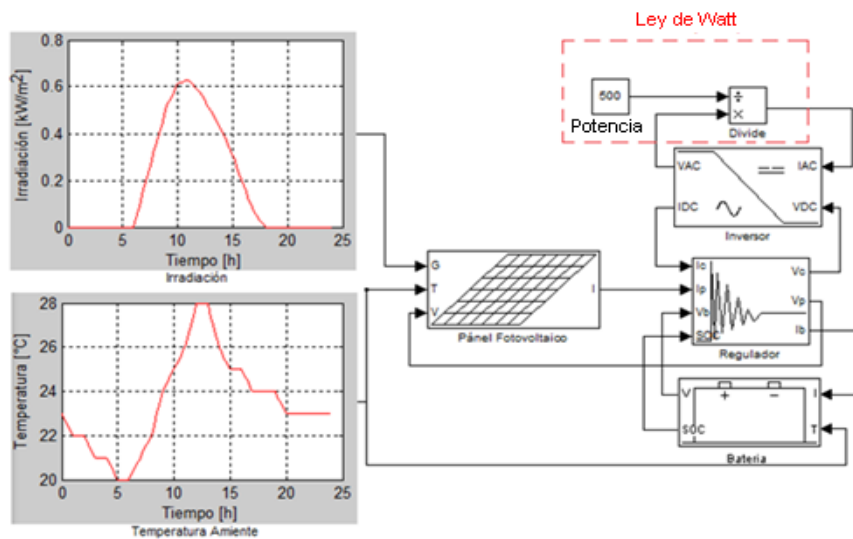


Figura 61. Circuito de conexión para probar el desempeño del inversor.

En las figuras 62 y 63 se aprecia la diferencia de corrientes para cada caso, debido a que el tipo de salida trifásica demanda una mayor corriente de continua, esto se puede explicar a partir de las ecuaciones de balance de potencia 3.1 y 3.2 para el caso monofásico y trifásico respectivamente.

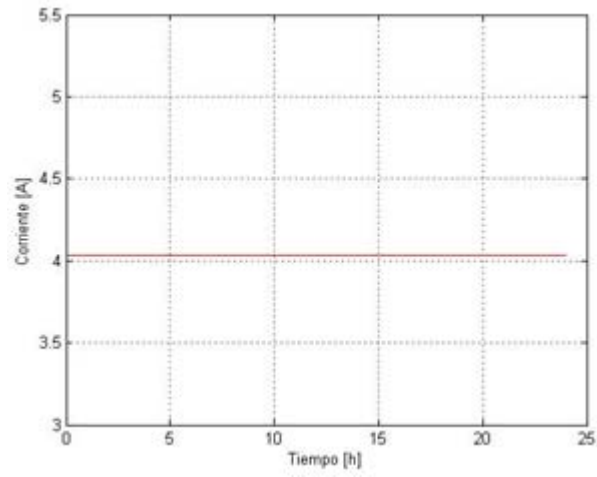


Figura 62. Corriente DC necesaria para alimentar carga monofásica.

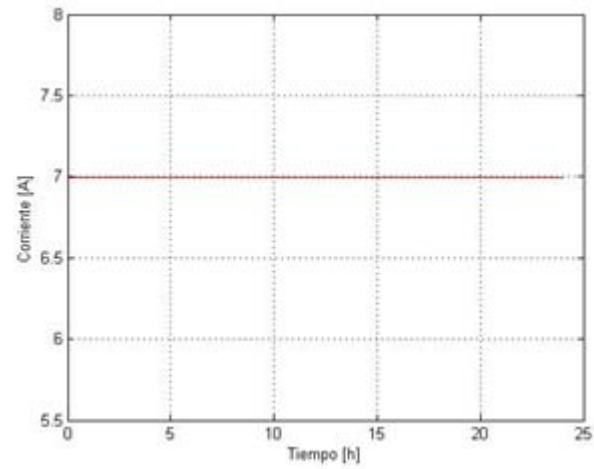


Figura 63. Corriente DC necesaria para alimentar carga trifásica.

$$V_{DC} * I_{DC} * \eta = V_{AC} * I_{AC} \Rightarrow I_{AC} = \frac{V_{DC} * I_{DC} * \eta}{V_{AC}} \quad (3.1)$$

$$V_{DC} * I_{DC} * \eta = \sqrt{3} * V_{AC} * I_{AC} \Rightarrow I_{AC} = \frac{V_{DC} * I_{DC} * \eta}{\sqrt{3} * V_{AC}} \quad (3.2)$$

Adicionalmente, se analiza la curva de eficiencia del inversor, aunque cambia según los coeficientes que el usuario escoja y de la tensión DC con que este trabaje.

En la curva de la Figura 64 se aprecia como la eficiencia disminuye al aumentar la potencia; sin embargo, se mantiene por encima del 90%, por lo cual se concluye que se trata de un inversor con buenas características eléctricas.

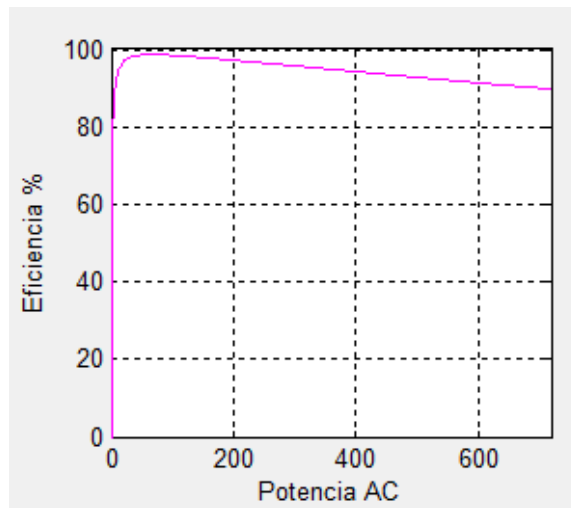


Figura 64. Eficiencia del inversor con tensión DC de 370 V.

3.2.9. Convertidor DC/DC

La programación del convertidor DC/DC se realiza de manera análoga al caso del inversor, conservando la relación entre potencia de entrada y salida.

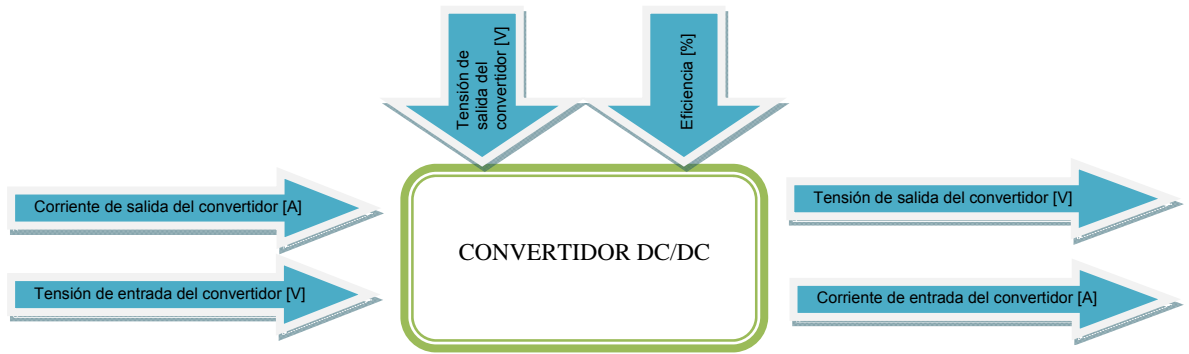


Figura 65. Esquema de parámetros y variables para el convertidor DC/DC.

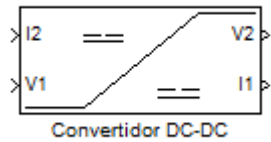


Figura 66. Icono del bloque creado del convertidor DC/DC.

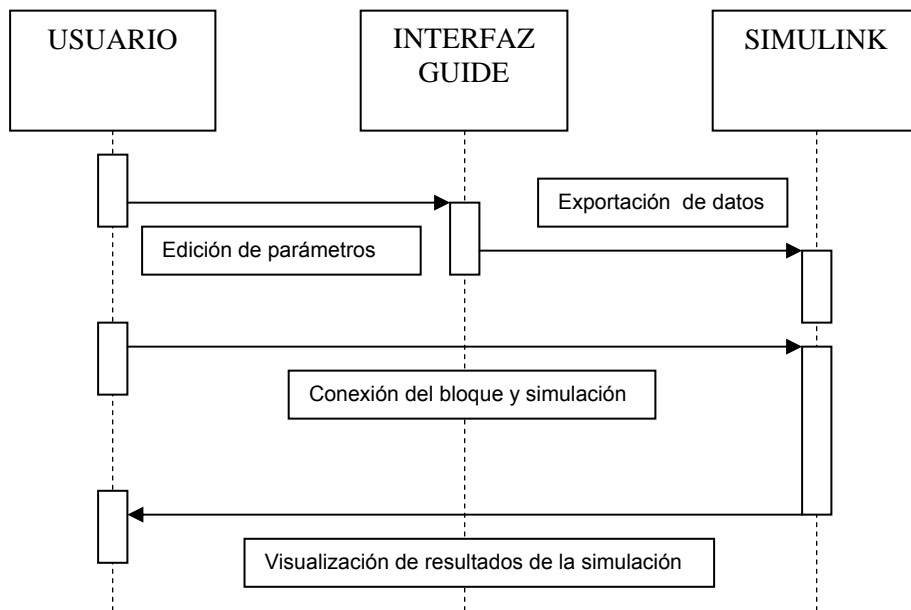


Figura 67. Diagrama de secuencia-procedencia para el convertidor DC/DC.

Para la interfaz del convertidor DC/DC se deben especificar las tensiones de salida, la tensión mínima de entrada y la curva de eficiencia con que trabaja.

3.2.10. Carga

Como se muestra en las figuras 68 y 69, en el bloque correspondiente a la carga, se debe especificar como parámetro característico su curva de demanda en Watts ya sea para un bloque de carga DC o AC de la Figura 70, en este último caso se debe suministrar su factor de potencia. En la interfaz de la carga se encuentra la opción de modificar esta curva de demanda a las exigencias del usuario.

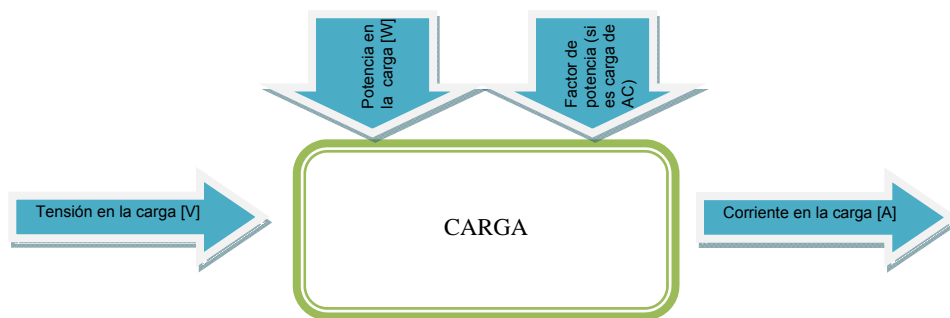


Figura 68. Esquema de parámetros y variables para la carga.

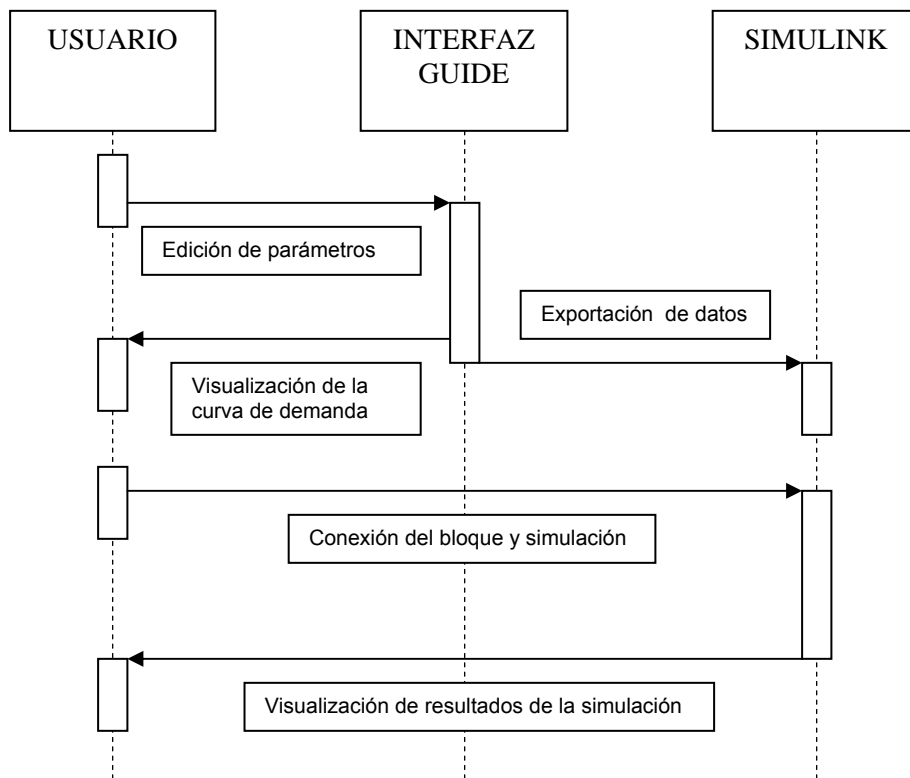


Figura 69. Diagrama de secuencia-procedencia para la carga.

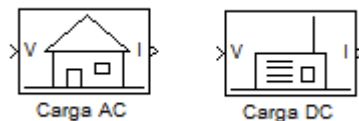


Figura 70. Icono de los bloques creados de la carga.

3.2.11. Conductores protecciones y diodos de bloqueo

Los conductores y dispositivos de protección del sistema se programa en un sólo bloque, por comodidad en las conexiones de los diagramas.

Para el bloque de conductores, se debe especificar si los conductores a utilizar son para caso trifásico o caso monofásico; además, se debe ingresar la longitud del tramo de conductores, la resistencia en Ω/km , la temperatura de operación,

asimismo la opción de adición de diodos de bloqueo y protecciones de sobre corriente.

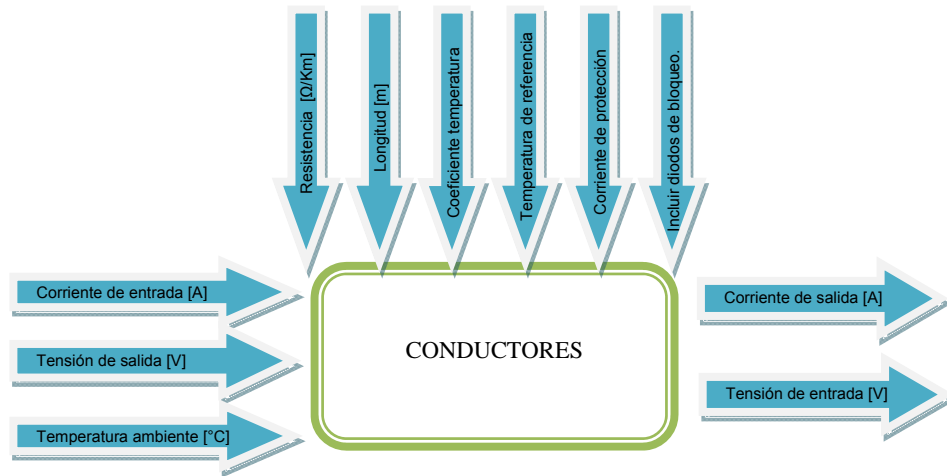


Figura 71. Esquema de parámetros y variables para los conductores.

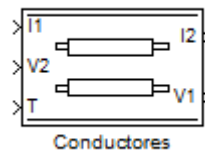


Figura 72. Icono del bloque creado de los conductores.

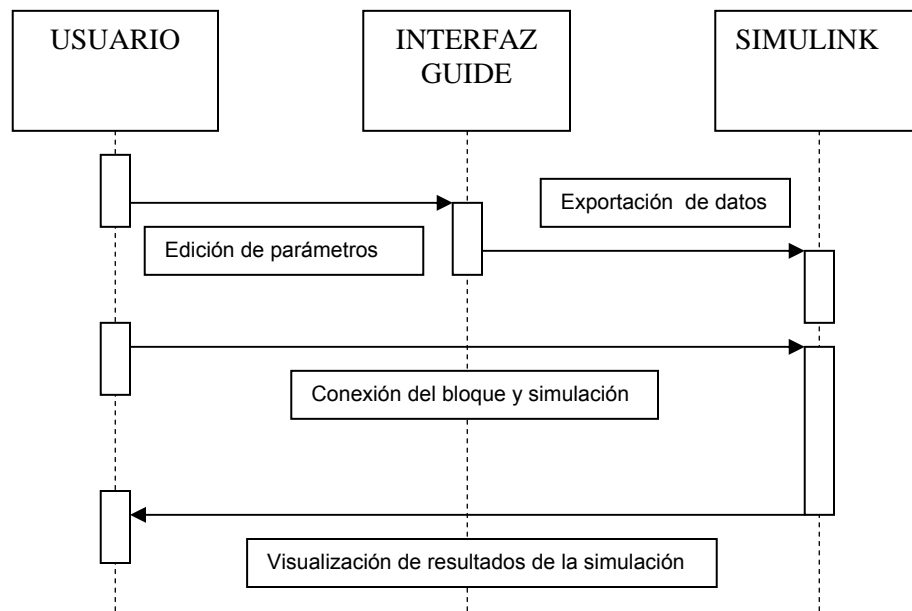


Figura 73. Diagrama de secuencia-procedencia para los conductores.

3.2.12. Red de alimentación

Debido a que la red de alimentación consiste en una fuente de tensión ideal, se implementa esta función con un bloque 'Constant' de la librería 'Sources' de SIMULINK.

Variables para el bloque de la red de alimentación

Tabla 12. Variables para la red de alimentación.

Variables	Tipo	Unidad
V: Tensión de la red	Entrada	V
I: Corriente entregada a la red (Esta variable es opcional en la simulación)	Salida	A

3.3. REFERENCIAS

- [1] D. Guasch, "Modelado y Análisis de Sistemas Fotovoltaicos", Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, Abril, 2004.
- [2] D. Barragan, "Manual de Interfaz Grafica de Usuario en MATLAB", Universidad Técnica Particular de Loja.
- [3] G. Fernandez, "Creación de Interfaces Gráficas de Usuario (GUI) con MATLAB", Salamanca, Septiembre, 2007.
- [4] Weidong Cai, Dagan Feng, Fulton R., "A fast algorithm for estimating FDG model parameters in dynamic PET with an optimized image sampling schedule and corrections for cerebral blood volume and partial volume", engineering in Medicine and Biology Society, 1998. Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE, Volume: 2, 1998, pp767-770 vol.2.
- [5] Hummel, S.F., Kimelman D., Schonberg E, Tennenhouse M, Zernik D, "*Using program visualization for tuning parallel-loop scheduling*", IEEE Concurrency [see also IEEE parallel & Distributed Technology], Volume: 5 Issue: 1 ,Jan.-March1997, pp. 26-40.
- [6] Bgovic M.,Ropp M., Rohatgi A, Durand s, Rosenthal A, "*Monitoring and data acquisition for a large roof-mounted photovoltaic array*", Southeastcon '97. Engineering new New Century., Proceedings. IEEE, 1997, pp. 298-300.

4. RESULTADOS DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

Para comprobar la confiabilidad de los resultados a obtenerse con esta herramienta, se realizaron pruebas para mostrar la interacción entre los dispositivos creados en SIMULINK, según la conexión característica de cada configuración analizada, lo que permite evaluar la calidad de su comportamiento. En este capítulo se realiza la simulación de las configuraciones de sistemas fotovoltaicos más sencillas y se finaliza simulando el sistema fotovoltaico a implementar en la E3T [1].

4.1. CONSTRUCCIÓN DE ESQUEMAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

En esta sección se hace una breve explicación de los sistemas fotovoltaicos más básicos como lo son el sistema flotante y autónomo; se describen sus características y su construcción, con el fin de analizarlos a partir de su montaje virtual con la ayuda de la herramienta creada. Las configuraciones más complejas se analizan detalladamente en el anexo A.

4.1.1. Sistema flotante

Este tipo de sistemas es sencillo, como se aprecia en la Figura 74, consiste en la conexión entre un panel fotovoltaico y una carga, la cual debe ser caracterizada por una impedancia, pues no se garantiza que el panel fotovoltaico pueda suministrar la potencia eléctrica deseada por el usuario. Aunque en la práctica no es común implementar este tipo de sistemas, comprender su funcionamiento es fundamental para el estudio de configuraciones fotovoltaicas más avanzadas.

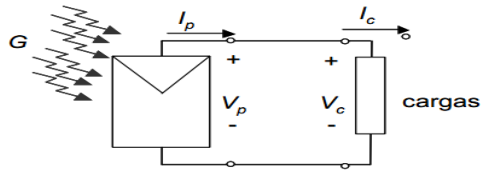


Figura 74. Esquema eléctrico de un sistema flotante [2].

Como se puede ver en la curva I-V del panel en la Figura 75, el punto de trabajo se puede situar en cualquier punto a lo largo de ésta, ya que depende de la impedancia de la carga, de la irradiación y de la temperatura.

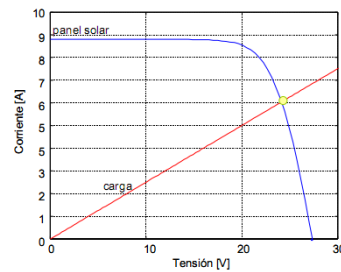


Figura 75. Punto de operación para el sistema flotante [2].

Para simular este tipo de sistema se realiza una conexión de realimentación entre panel fotovoltaico y carga, como se muestra en la Figura 76; la prueba del sistema flotante es similar a la prueba realizada para el panel fotovoltaico, mostrada en la sección 3.2.2.

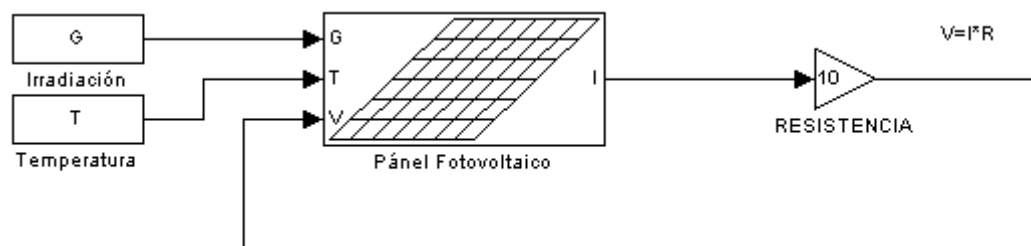


Figura 76. Montaje en SIMULINK de un sistema flotante.

4.1.2. Sistema autónomo

El sistema autónomo es la conexión de un sistema fotovoltaico básico, está compuesto por panel fotovoltaico, batería y carga.

Para efectos de las simulaciones de la Figura 77, el panel utilizado es un Kyocera KD225GX LPU con tensión de circuito abierto de 36,9 V, corriente de cortocircuito de 8,18 A y de 60 células, (estos valores se dan en condiciones de 1000 W/m^2 y 25°C); la batería trabaja a una tensión de 24 V y la carga será de 60 W; las entradas de irradiación y temperaturas serán las mismas curvas características que se utilizaron en la prueba de los dispositivos, mostradas en la Figura 78.

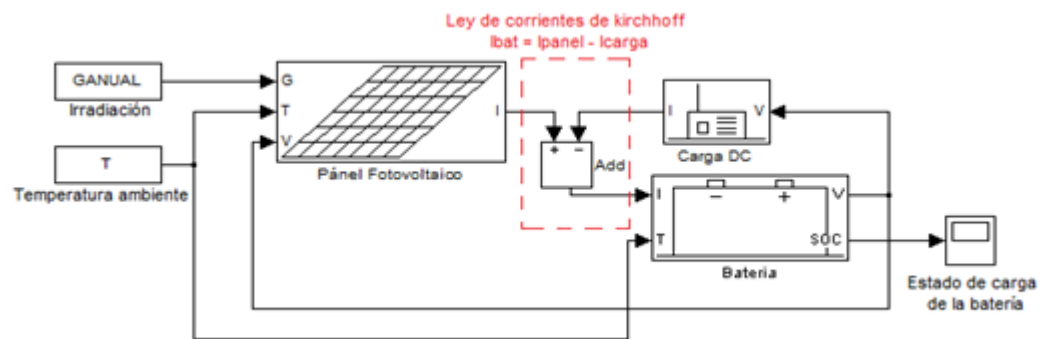
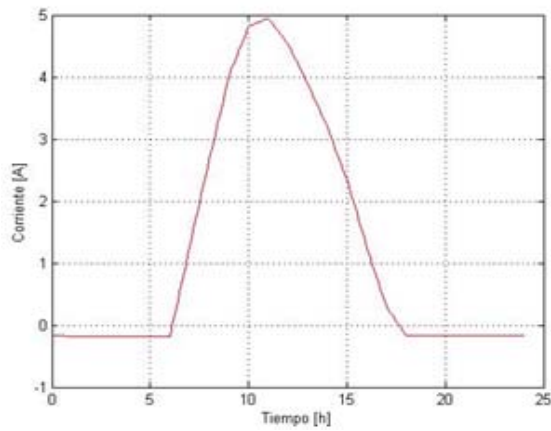
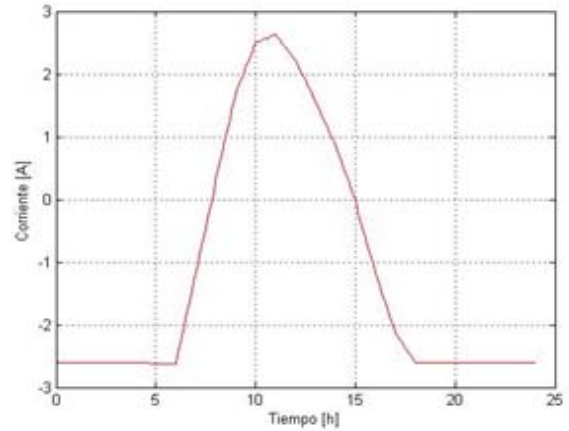


Figura 77. Sistema autónomo.

A continuación se presenta el comportamiento gráfico de tensión y corriente en cada elemento.



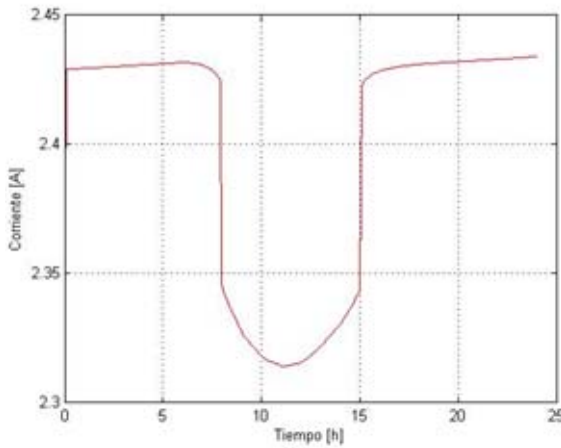
a) Corriente del panel



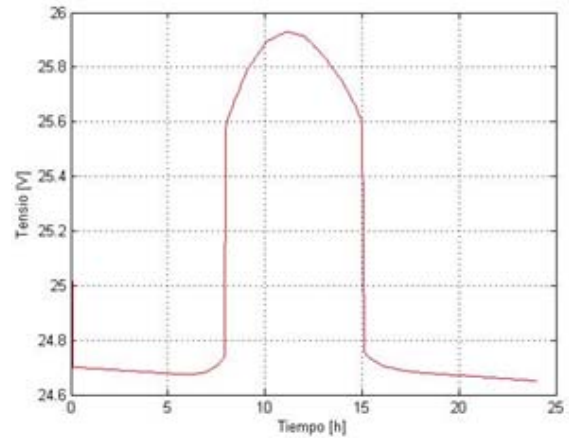
b) Corriente en la batería

Figura 78. Corrientes en el sistema.

Según la Figura 79, la carga presenta una corriente variable en el tiempo, debido a la incapacidad de la batería de mantener una tensión constante, lo cual solo es posible con un dispositivo regulador.



a) Corriente en la carga

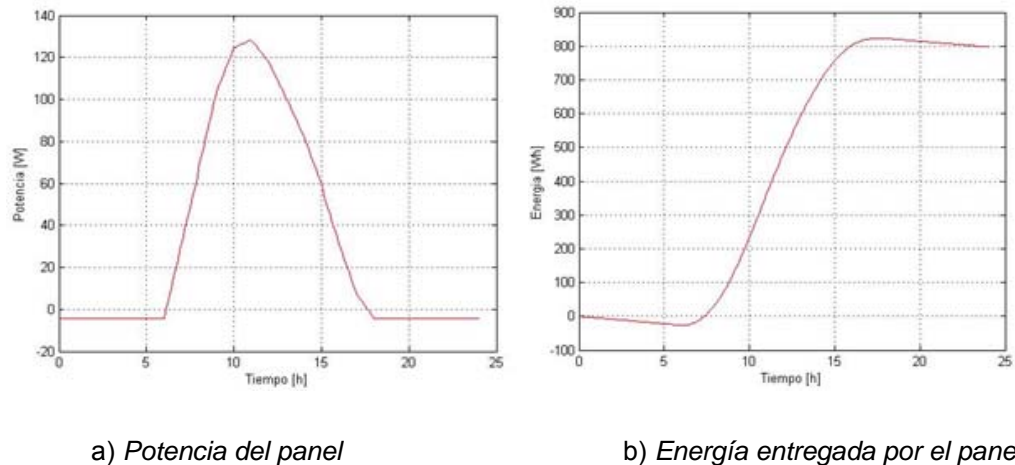


b) Tensión en el sistema

Figura 79. Corriente en la carga y tensión del sistema.

La tensión de la carga y la batería es la misma por su conexión en paralelo, pero no es constante, como en casos anteriores, la corriente del panel fotovoltaico sigue el comportamiento de la irradiación que recibe; mientras, la corriente de la batería tiene un comportamiento similar pero con magnitudes negativas, debido al proceso de carga y descarga.

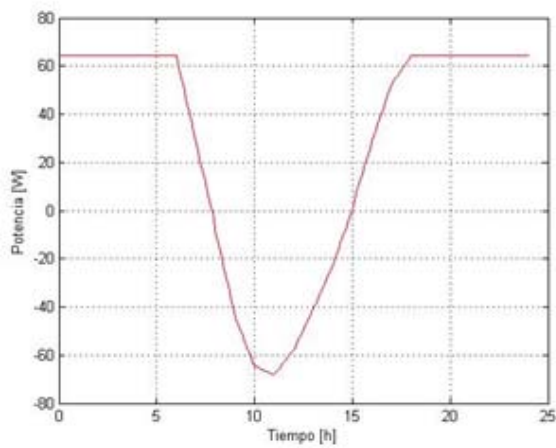
El comportamiento de la potencia y energía generadas por el panel fotovoltaico se muestra en la Figura 80. De forma similar se hace en la Figura 81 con la potencia de la batería y de la carga. Los valores de energía negativa ilustrados en la Figura 80b) en horas de irradiación cero (12m - 6am y 18pm - 12m), son causados por el consumo de potencia por parte de los paneles fotovoltaicos; esto es evitable a partir del uso de diodos de bloqueo.



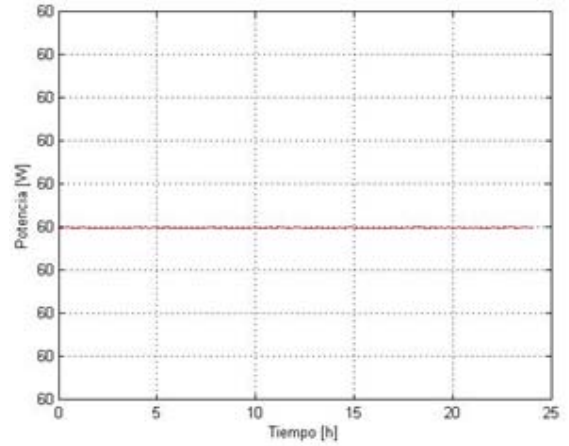
a) Potencia del panel

b) Energía entregada por el panel

Figura 80. Potencia y energía del panel.

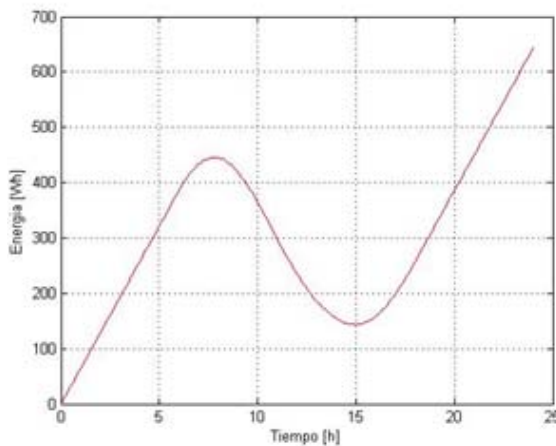


a) Potencia de la batería

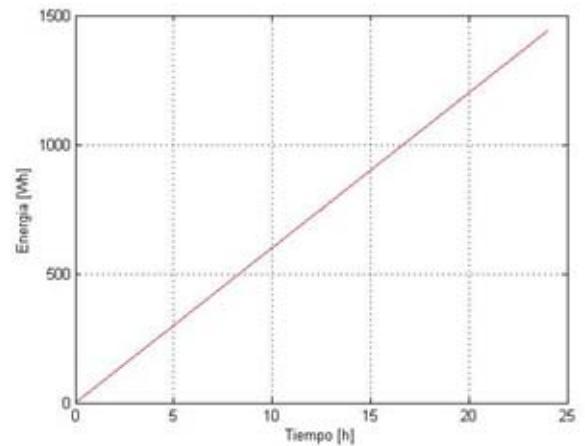


b) Potencia de la carga

Figura 81. Potencia de la batería y de la carga.



a) Flujo de energía en la batería



b) Energía consumida por la carga

Figura 82. Flujo de energía en la batería y energía consumida por la carga.

La curva de potencia de la batería es inversa a la curva del panel fotovoltaico, ya que entrega la potencia necesaria cuando el panel no está en capacidad de hacerlo. En la curva de energía de la batería se ve la fluctuación de energía del

proceso de entrega y almacenamiento; también se observa el comportamiento del consumo de potencia de la carga, y se obtiene un comportamiento lineal.

4.2. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL A TRAVÉS DE SIMULACIONES DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO A IMPLEMENTAR EN EL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA II

En esta parte se analiza el sistema fotovoltaico que se diseñó para la Escuela E3T de la Universidad Industrial de Santander realizado en [1], se hace la simulación (Figura 84) del subsistema fotovoltaico conectado a la red de la Figura 83.

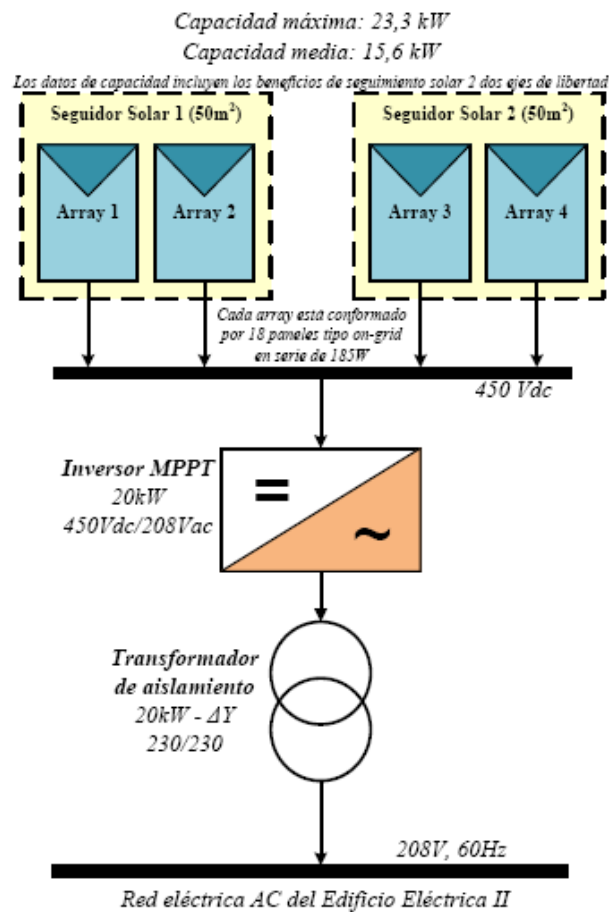


Figura 83. Configuración base del sistema diseñado [1].

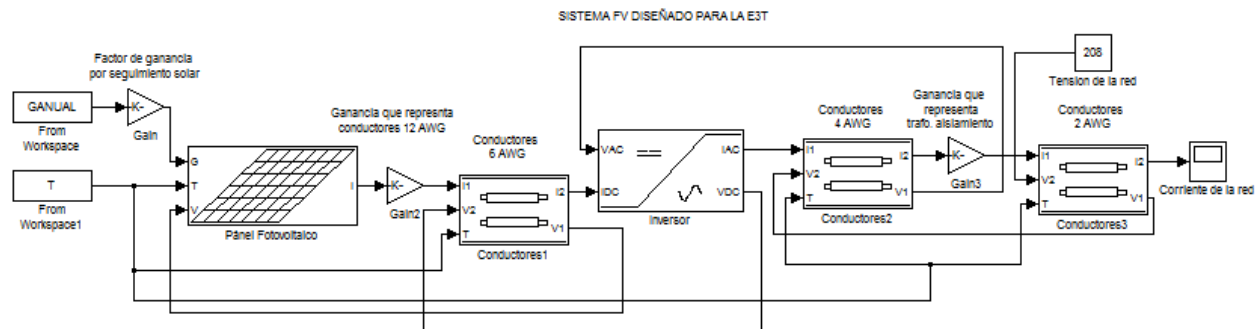


Figura 84. Conexión del sistema en la herramienta diseñada.

Las variables de entrada de irradiación y temperatura son características de la ciudad de Bucaramanga (figuras 85 y 86); se tomaron en el año 2008.

Para esta simulación fue necesario el uso de algunos bloques de ganancia, que representarán algunos elementos que no se diseñaron dentro de la herramienta computacional, como lo son el transformador de aislamiento y los conductores # 12 AWG, los cuales van desde cada uno de los paneles hasta el tablero de conexión DC, pues dentro del bloque de los paneles solares se asume una conexión entre sí. En la Tabla 13 se especifica la utilización de cada uno de estos bloques de ganancia.

Tabla 13. Utilización de los bloques de ganancia.

BLOQUES DE GANANCIA			
BLOQUE	Conexión in	Conexión out	Representación
Gain	Entrada de irradiación	Bloque del panel fotovoltaico	Factor de seguimiento solar
Gain2	Bloque del panel fotovoltaico	Bloque de conductores # 6 AWG	Conductores # 12 AWG
Gain3	Bloque de conductores # 4 AWG	Bloque de conductores # 2 AWG	Transformador de aislamiento

Los paneles fotovoltaicos utilizados son modelo Kyocera KD185GX LPU para la instalación fotovoltaica.

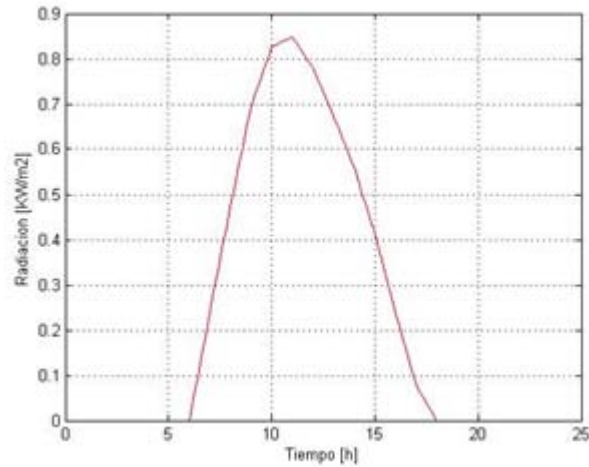


Figura 85. Irradiación en Bucaramanga con seguimiento solar.

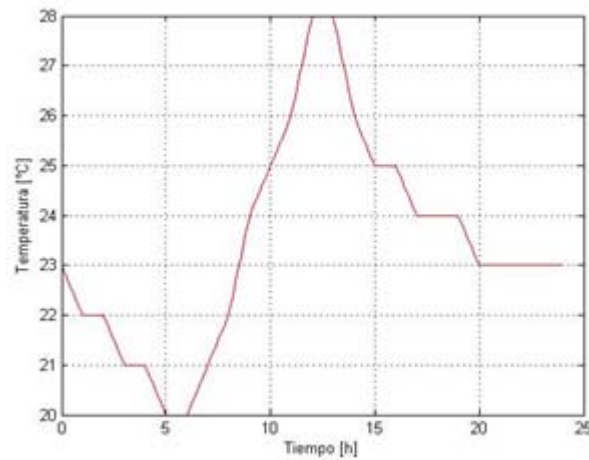
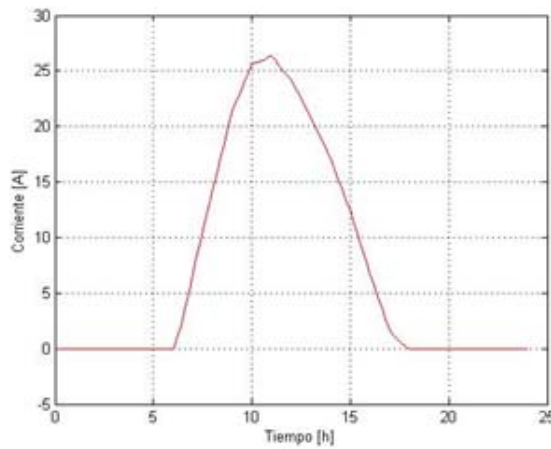


Figura 86. Medidas de temperatura promedio en Bucaramanga.

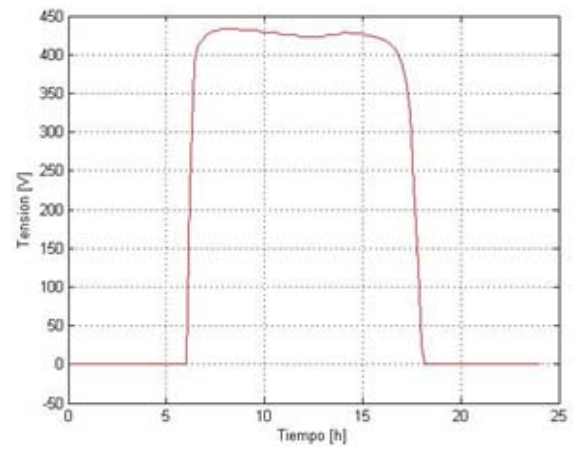
Como primera medida se analizan las variables eléctricas para un día normal de trabajo.

En la Figura 87 se observa el comportamiento normal de corriente y tensión de los paneles solares; también, la caída de tensión de los conductores que van del panel al inversor (Figura 88). La caída de tensión aumenta a medida que aumenta

la corriente que pasa por los conductores; por esta razón, la caída de tensión no es constante y la mayor pérdida se presenta a la hora 12, en la cual hay la mayor irradiación en el día.

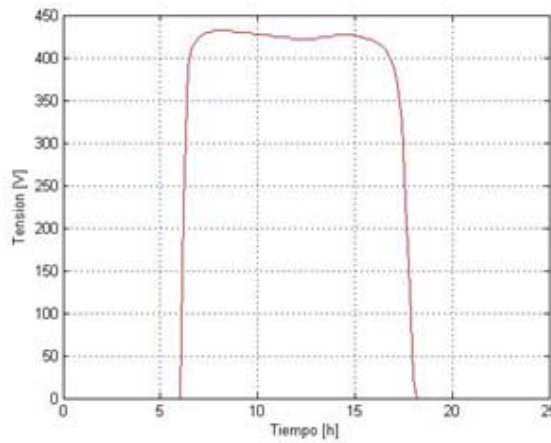


a) Corriente en los paneles

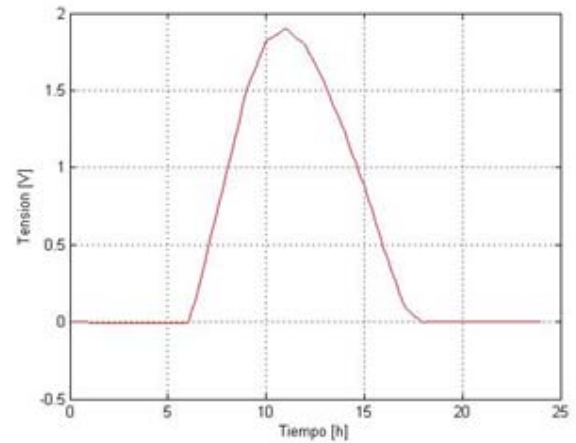


b) Tensión de los paneles

Figura 87. Corriente y tensión en los paneles.



a) Tensión en el inversor



b) Regulación de tensión entre los paneles y el inversor

Figura 88. Tensión en el inversor y regulación de tensión entre los paneles y el inversor.

La tensión de salida del sistema es impuesta por la red de corriente alterna. La corriente y potencia que entrega el sistema fotovoltaico a esta red en un día normal de trabajo se observa en la Figura 89.

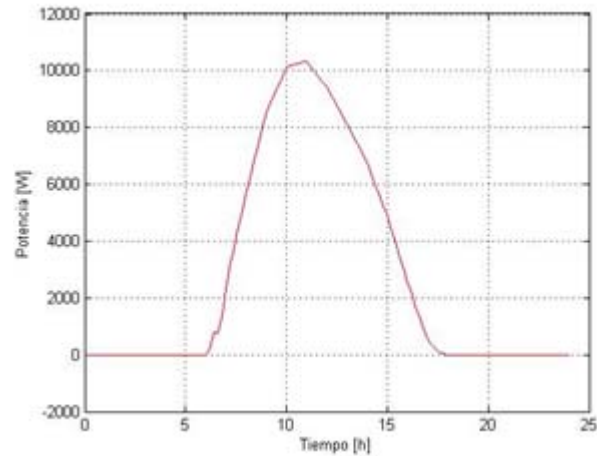


Figura 89. Potencia entregada a la red.

Por último, se hace el análisis energético del sistema conectado a la red para un año y se compara con el realizado en el proyecto de diseño del sistema fotovoltaico para la E3T.

En la Tabla 14 se muestran los cálculos de un análisis energético de un año de trabajo realizado en el proyecto de diseño del sistema fotovoltaico para la E3T [1].

Tabla 14. Análisis energético del sistema fotovoltaico diseñado para la E3T [1].

SISTEMA FOTOVOLTAICO DISEÑADO				
COMPONENTE	Ein(KWh)	Eout(KWh)	η (%)	Perdidas(KWh)
Paneles solares	173 408,6	26 791,4	15,5	146 617,2
Conductor #12	26 791,4	26 730,5	99,8	60,9
Conductor #6	26 730,5	26 670,0	99,8	60,5
Inversor	26 670,0	25 336,5	95,0	1 333,5
Conductores #4	25 336,5	25 316,4	99,9	20,1
Trafo. Aislamiento	25 316,4	24 559,8	97,0	756,6
Conductores #2	24 559,8	24 422,9	99,4	136,9
Sistema	173 408,6	24 422,6	14,1	148 985,7

En la Tabla 15 se muestran los resultados de un análisis energético de un año de trabajo tomados de la simulación del subsistema fotovoltaico a implementar en el Edificio de Energía Eléctrica II; también se observa en esta tabla un porcentaje de error, que es la proximidad entre los datos de eficiencia de la simulación y los suministrados por el proyecto de diseño del sistema fotovoltaico para la E3T.

Tabla 15. Análisis energético del sistema fotovoltaico para la E3T simulado en la herramienta computacional.

RESULTADOS OBTENIDOS DE LA HERRAMIENTA					ERROR (%)
COMPONENTE	Ein(KWh)	Eout(KWh)	η (%)	Perdidas(KWh)	EFICIENCIA
Paneles solares	173 411,5	27 521,0	15,9	145 890,5	2,722
Conductor #12	27 521,0	27 459,0	99,8	62,1	0,002
Conductor #6	27 459,0	27 367,7	99,7	91,3	0,106
Inversor	27 367,7	25 999,0	95,0	1 368,8	0,001
Conductores #4	25 999,0	25 988,0	100,0	11,0	0,037
Trafo. Aislamiento	25 988,0	25 206,9	97,0	781,1	0,018

Conductores #2	25 206,9	25 144,9	99,8	62,1	0,313
Sistema	173 411,5	25 144,9	14,5	148 266,7	2,955

4.3. REFERENCIAS

- [1] Y. Lizarazú, L. Torres “DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA Y UNA RED ELÉCTRICA EN CORRIENTE CONTINUA DE BAJA TENSIÓN PARA EL POSIBLE NUEVO EDIFICIO ELÉCTRICA II DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER”, Trabajo de Grado dirigido por Johann F. Petit Suárez y Co-dirigido por Germán A. Osma Pinto, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga , 2010.
- [2] D. Guasch, “Modelado y Análisis de Sistemas Fotovoltaicos”, Tesis Doctoral dirigida por Santiago Silvestre Bergéz, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, Abril, 2004.

5. DISEÑO DE UN MANUAL DE USUARIO

Esta herramienta computacional se diseñó con el objetivo de facilitar a los estudiantes de la E3T la comprensión del comportamiento de dispositivos propios de un sistema fotovoltaico, a partir de la simulación de algunas configuraciones, y la visualización de señales eléctricas del sistema en diferentes puntos.

Con el fin de permitir el adiestramiento de estudiantes en el uso de la herramienta establecida, se ha creado un manual de usuario, el cual se presenta en este capítulo.

En la primera sección se expone de forma breve los componentes de SIMULINK y su utilización; luego, se presentan generalidades de la herramienta computacional y los pasos que debe seguir para su utilización; se muestra un ejemplo detallado sobre la construcción de un diagrama de bloques aplicado a un sistema fotovoltaico. Para finalizar, se muestran diferentes configuraciones de sistemas fotovoltaicos, con el objetivo de ilustrar la utilidad de cada bloque y de su interfaz de usuario.

5.1. INSTRUCCIONES GENERALES

Antes de realizar cualquier simulación es necesario que el usuario realice un previo análisis de potencia en el sistema a trabajar, pues un desbalance significativo de potencia puede causar errores de operación en la herramienta establecida; adicionalmente, es preciso que el usuario tenga conocimientos en sistemas fotovoltaicos y en los aspectos básicos sobre el manejo de MATLAB y SIMULINK.

Para la utilización de esta herramienta computacional es necesario tener instalado MATLAB 2008 u otra versión más reciente; además, se debe asegurar que dicha

versión contenga las herramientas GUIDE y SIMULINK. Solamente bajo estas condiciones se garantiza el funcionamiento de esta herramienta computacional.

Algunos bloques de la herramienta computacional incorporan archivos de extensión **.mex**, los cuales son funciones implementadas en SIMULINK como bloques, aunque son programadas con lenguaje de MATLAB; en algunas configuraciones de software como Windows 7 y Vista, estas funciones no son compiladas correctamente; por lo cual, el usuario deberá consultar la guía adjunta a la herramienta computacional en formato **.pdf** “COMPILADORES PARA WINDOWS 7” o el Anexo D de este documento.

5.2. GENERALIDADES DE SIMULINK

La herramienta computacional interactúa con el usuario por medio de SIMULINK, con el apoyo de algunas funciones de MATLAB y GUIDE; por lo tanto, el usuario debe tener capacidades en el manejo de MATLAB y SIMULINK; sin embargo, a continuación se dan algunos conceptos, descripciones y terminologías para su comprensión.

SIMULINK es un entorno gráfico de MATLAB utilizado para el análisis de cualquier tipo de sistema, algunos de estos son: sistemas de control, procesamiento digital de imágenes y video, sistemas mecánicos, etc. En este trabajo ya se ha mostrado la aplicación de este entorno gráfico SIMULINK para sistemas fotovoltaicos; y en este capítulo se ilustra el manejo de la herramienta computacional SIMULINK FV [2].

SIMULINK está compuesto por varias librerías que contienen los bloques que conforman un determinado sistema; estos sistemas son conocidos en el lenguaje de SIMULINK como modelos; a continuación en la figuras 90 y 91 se ilustra el concepto de librería, modelo y bloque.

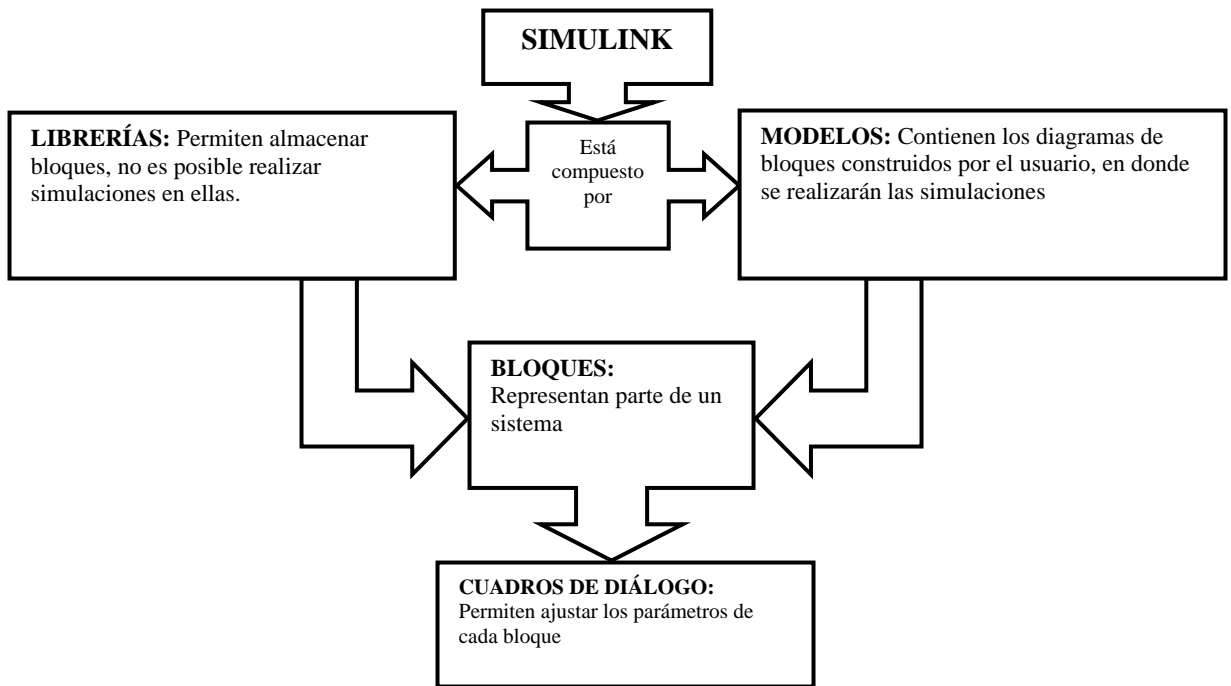


Figura 90. Estructura básica de SIMULINK.

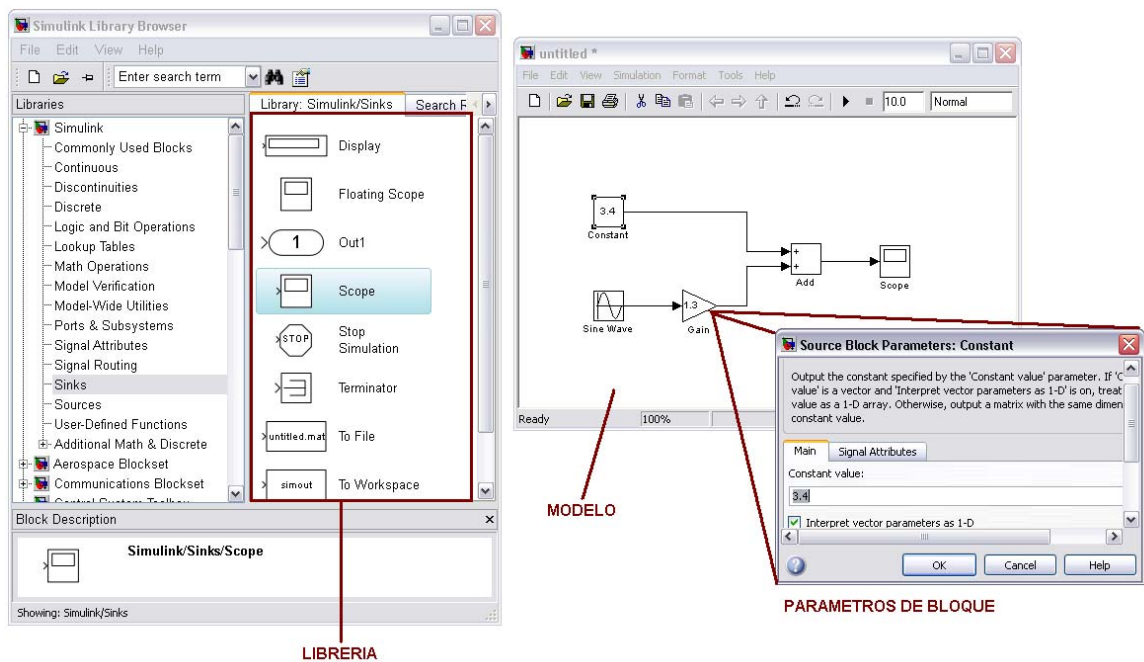


Figura 91. Componentes básicos de una simulación en SIMULINK.

Como se puede ver en la Figura 91, las librerías suministran diferentes bloques a un modelo creado por el usuario, en donde serán interconectados con el fin de simular el comportamiento de un sistema real. Cada bloque representa una parte del sistema a simular, su función es recibir señales de entrada, aplicar sobre éstas un determinado proceso y suministrar unos productos o señales de salida, las cuales pueden ser procesados por otro bloque.

5.3. GENERALIDADES SOBRE LA HERRAMIENTA ESTABLECIDA

En la sección anterior, se dio una breve descripción acerca de la estructura de trabajo de SIMULINK, en donde a partir de una librería se crea una gran variedad de sistemas. La herramienta computacional SIMULINK FV consiste en una librería que contiene los bloques representativos de un sistema fotovoltaico, en los cuales cada parámetro eléctrico es procesado como una señal; cada bloque fue creado a partir de funciones en SIMULINK, ya sean subsistemas o archivos **.MEX**; estos últimos, son bloques de SIMULINK que poseen una programación interna con lenguaje de MATLAB, la cual es diseñada por el usuario; esta librería SIMULINK FV se muestra en la Figura 92.

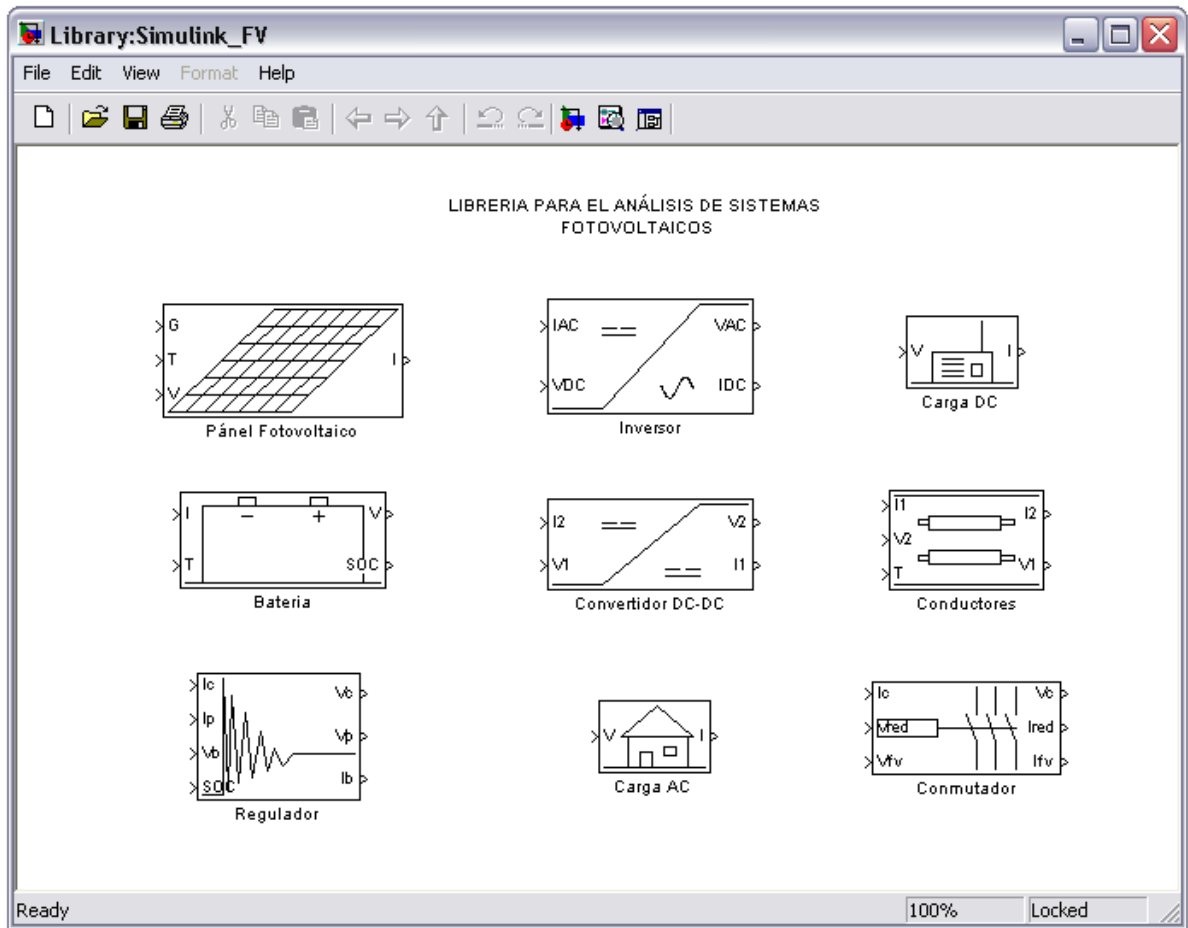


Figura 92. Librería para el análisis de sistemas fotovoltaicos.

La Figura 92 contiene los bloques que serán utilizados para realizar simulaciones de sistemas fotovoltaicos; sin embargo, estos bloques deben ser llevados a un modelo, para configurar sus parámetros característicos y así realizar una simulación correcta. A continuación se muestra los pasos para iniciar una simulación; se recomienda que el usuario principiante en MATLAB y SIMULINK consulte material de apoyo del entorno de trabajo.

5.3.1. Pasos para realizar una simulación

Esta herramienta computacional tiene adjunta una carpeta llamada 'SIMULINK FV', en donde están los archivos de las funciones que necesita cada bloque de la librería de la Figura 92 para procesar señales. A continuación se citan los pasos para iniciar una simulación por primera vez.

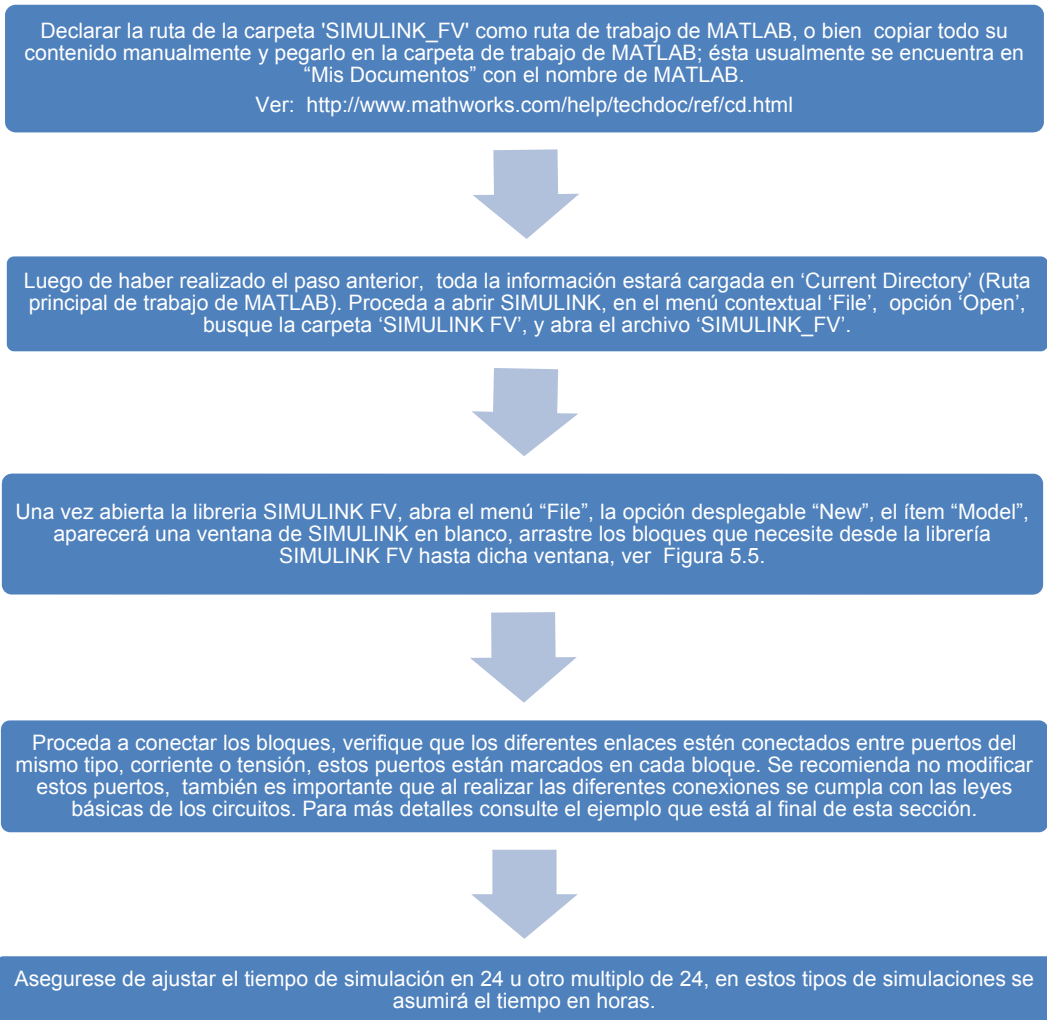


Figura 93. Pasos para iniciar una simulación.

Para ver los resultados de las diferentes simulaciones, revise los capítulos 3, 4 y el Anexo A de este libro.

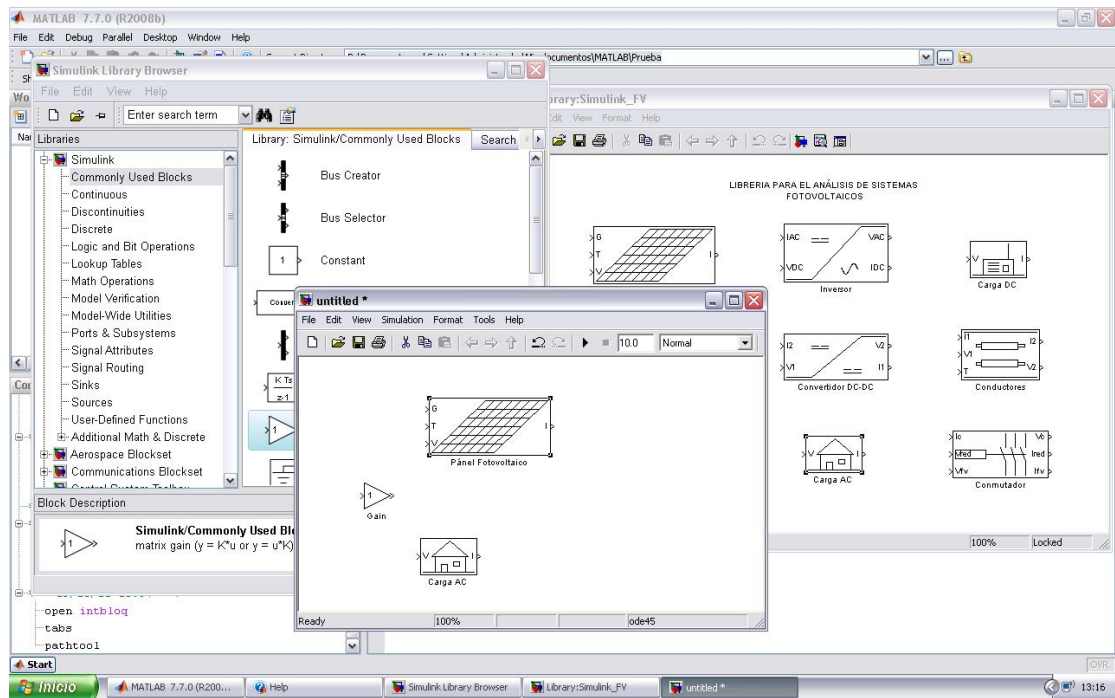


Figura 94. Diseñando una simulación de sistemas fotovoltaicos.

Los bloques de la librería SIMULINK FV pueden trabajar conjuntamente con otros bloques de SIMULINK, tales como ganancias, constantes, sumadores, osciloscopios, *displays*, etc. y de igual manera deben ser interconectados.

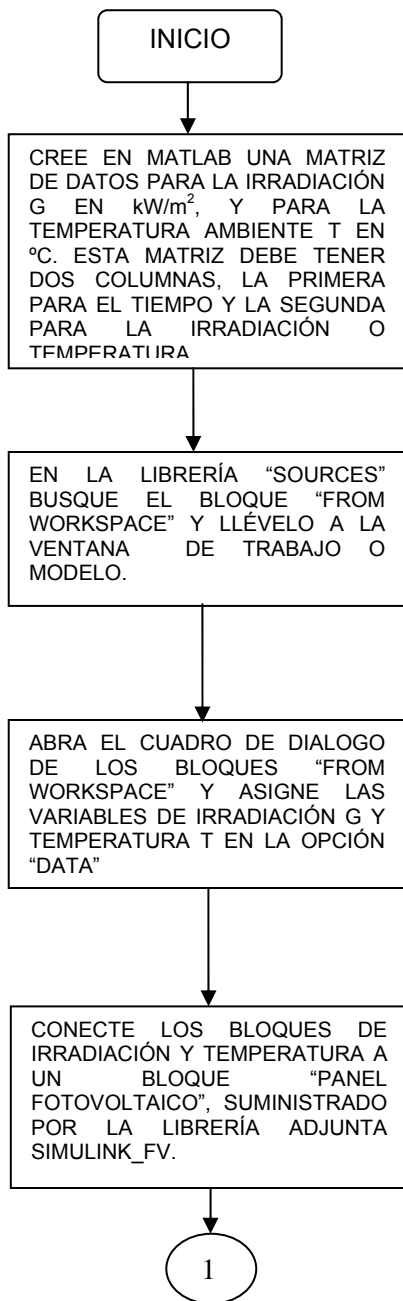
La mayoría de las señales de trabajo serán tensiones y corrientes; sin embargo, algunos bloques requieren otras señales externas como irradiación y temperatura, las cuales deben ser introducidas manualmente por el usuario a partir de un vector de datos. A continuación se presentan algunos bloques con los cuales se puede realizar esta tarea.

Tabla 16. Soporte técnico sobre funciones de SIMULINK.

BLOQUE	LIBRERÍA	ENLACE
Fuente constante	SIMULINK/Commonly Used Blocks/Constant	http://www.mathworks.com/help/toolbox/SIMULINK/sref/constant.html
Señal del workspace	SIMULINK/Sources/From Workspace	http://www.mathworks.com/help/toolbox/SIMULINK/sref/fromworkspace.html
Señal desde un archivo .mat	SIMULINK/Sources/From File	http://www.mathworks.com/help/toolbox/SIMULINK/sref/fromfile.html
Repetir secuencia Interpolada	SIMULINK/Sources/Repeating Sequence Interpolated	http://www.mathworks.com/help/toolbox/simulink/sref/repeatingsequenceinterpolated.html

Para ilustrar lo anterior, se presenta un ejemplo de un sistema autónomo (Ver sección 1.3), para el cual se necesita un panel fotovoltaico, una batería, y una carga en DC, y se desea conocer el estado de carga de la batería a lo largo de un día.

La Figura 95 presenta los pasos para construir un diagrama de bloques para un sistema fotovoltaico autónomo; sin embargo, estos pasos se aplican a cualquier tipo de sistemas.



The screenshots illustrate the following steps:

- Command Window:** Shows the MATLAB command `G=[0,0;1,0;2,0;3,0;4,0;5,0;6,0,1;7,0,3;8,0,5;9,0,6;10,0,8;11,0,9;12,1;13,1;14,0,8;15,0,5;16,0,4;17,0,3;18,0;19,0;20,0;21,0;22,0;23,0]` and the resulting matrix `G =` with two columns: the first column contains values from 0 to 23, and the second column contains 0s for the first 17 rows and 1s for the last 6 rows.
- Library Browser:** Shows the 'Sources' block being selected from the 'From Workspace' category.
- Block Parameters Dialog:** Shows the 'Data' field set to 'T' and 'Sample time' set to '0'. The 'Interpolate data' and 'Enable zero-crossing detection' options are checked.
- Block Diagram:** Shows the 'From Workspace' block and 'From Workspace 1' block connected to the 'PANEL FOTOVOLTAICO' block. The 'From Workspace' block is connected to the 'G' input, and 'From Workspace 1' is connected to the 'T' input.

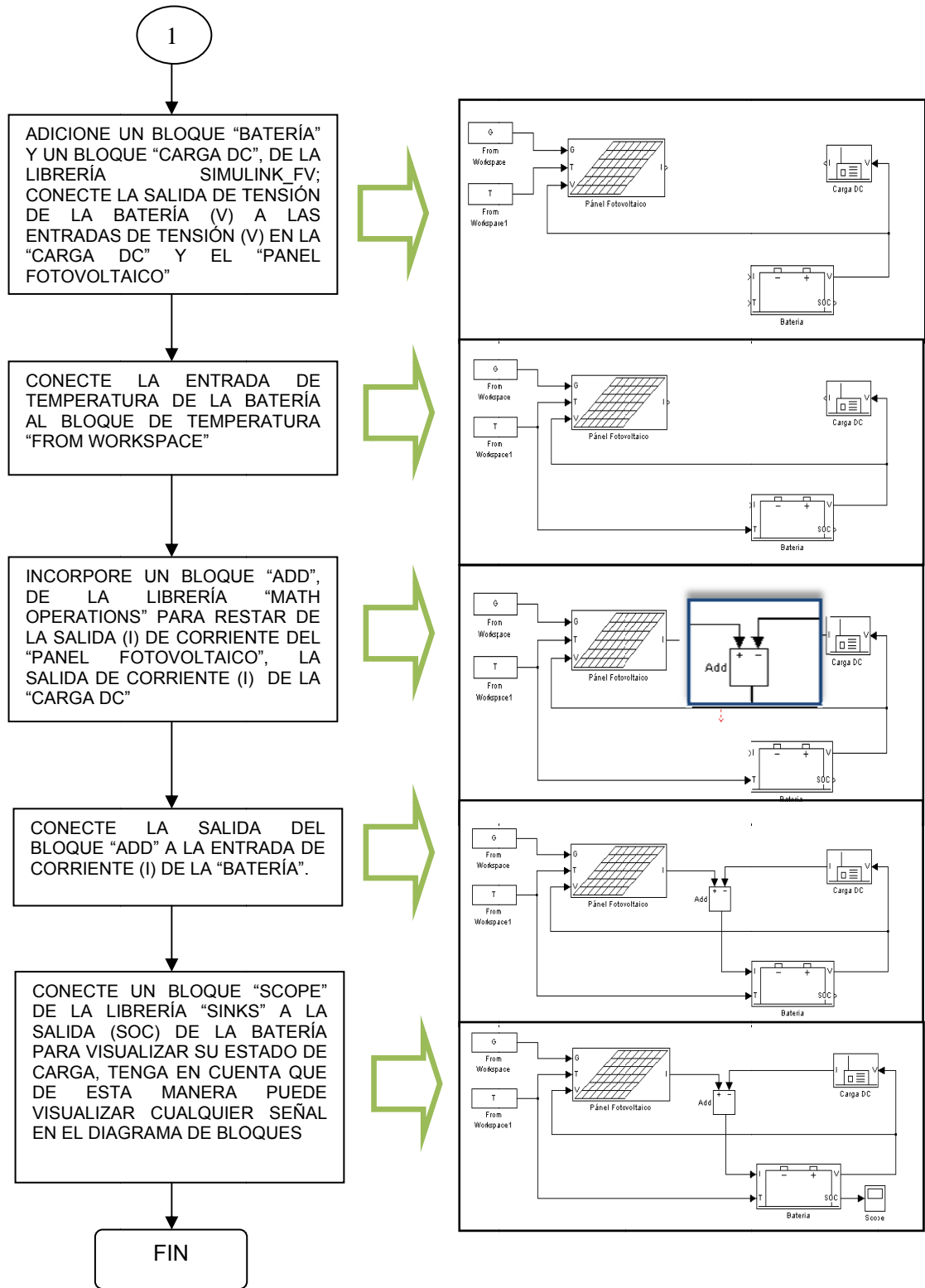


Figura 95. Pasos para construir un diagrama de bloques.

Después de seguir estos pasos, el diagrama de bloques debe verse como el de la Figura 96, el cual está listo para ejecutar la simulación.

El esquema de bloques correspondiente a la Figura 96 ilustra la conexión de un sistema fotovoltaico autónomo, en el cual se debe verificar que el flujo de señales corresponda con su esquema eléctrico.

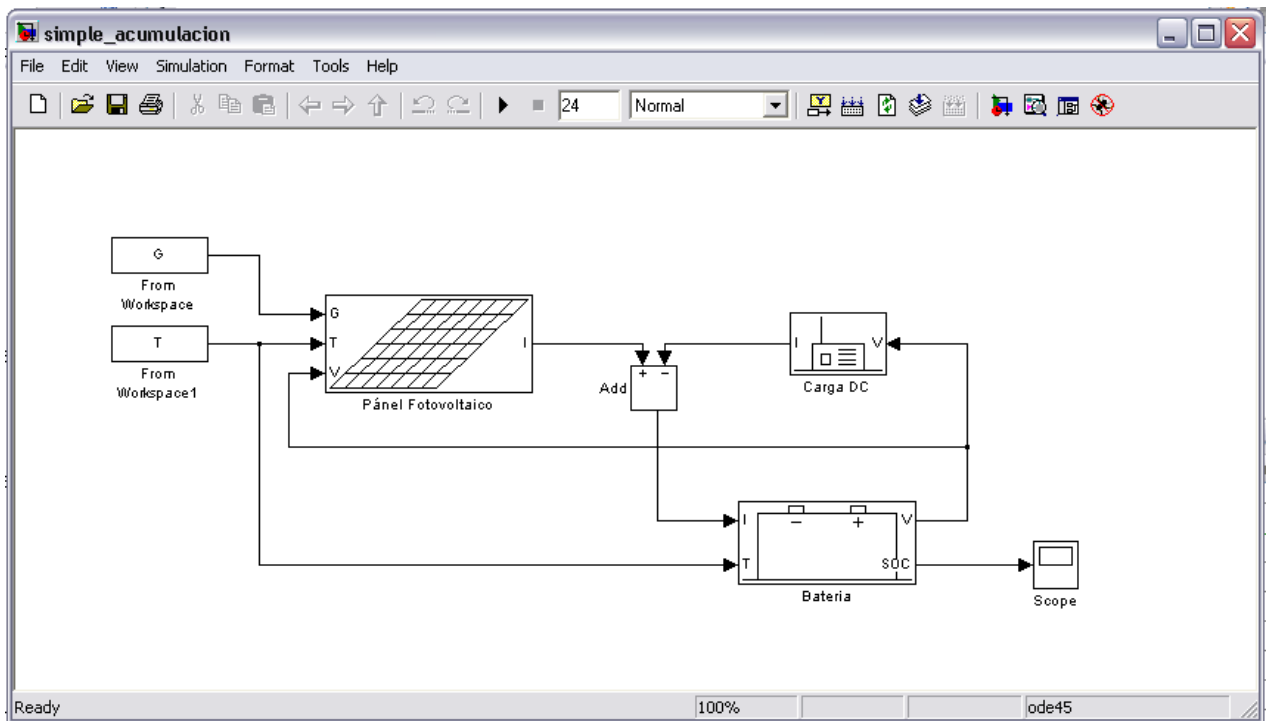


Figura 96. Simulación de un sistema autónomo.

Antes de realizar cualquier conexión entre bloques, es importante tener en cuenta su esquema eléctrico correspondiente, como se puede ver en la Figura 97. La tensión de la batería, obliga a que su tensión, la tensión del panel y la tensión de la carga, sean iguales, debido a que existe una conexión en paralelo entre estos dispositivos; por lo cual, la tensión de la batería es una salida que va al panel y a la carga DC, en donde las tensiones de estos últimos bloques figuran como puertos de entrada.

Seguidamente, la corriente de la batería aparece como un puerto de entrada, al cual llega la diferencia entre la corriente del panel y la corriente de la carga cumpliendo con la ley de corrientes de Kirchoff, en el nodo superior de la Figura 97.

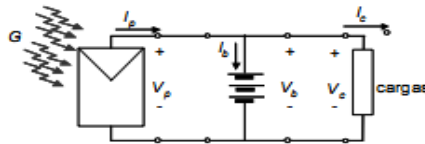


Figura 97. Esquema eléctrico del sistema autónomo.

5.4. ANÁLISIS POR TIPO DE SISTEMA

En esta sección se exponen diferentes configuraciones de sistemas fotovoltaicos, y la forma de conectarlos en SIMULINK; además, se presenta una descripción de cada uno de los bloques que conforman la librería SIMULINK FV.

5.4.1. Sistema flotante

Para el montaje del sistema flotante se conecta el panel a una ganancia de forma realimentada, la cual simula una carga constante, caracterizada por una resistencia en [Ω].

En la Figura 98 se observa a la salida de la ganancia, la tensión al multiplicar la señal de corriente por el valor de la ganancia, lo cual simula una resistencia constante, cumpliendo con la ley de Ohm. Esta señal de tensión se conecta a la entrada del panel quedando realimentado el sistema.

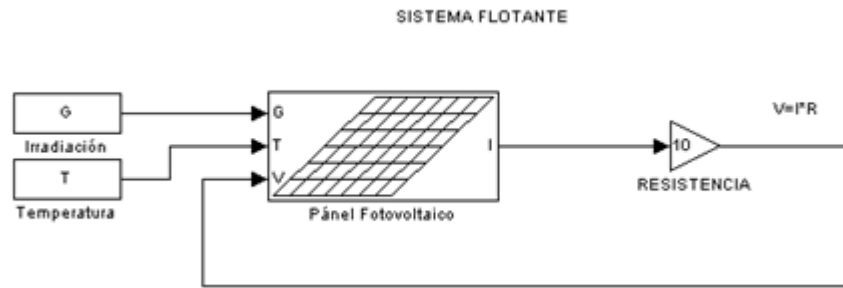


Figura 98. Sistema flotante.

Luego de realizada la conexión del sistema, se procede a abrir el bloque “*Panel fotovoltaico*”, haciendo doble clic sobre éste, o seleccionándolo y presionando la tecla *enter*, para visualizar la interfaz gráfica de la Figura 99.

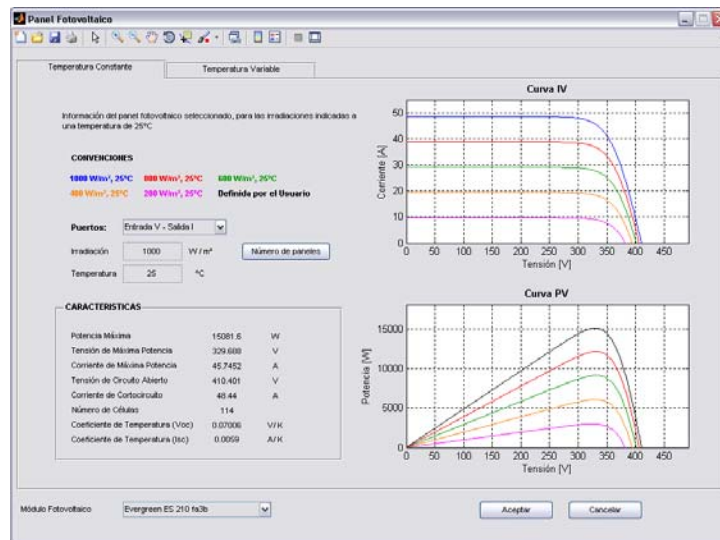


Figura 99. Interfaz de usuario para el panel fotovoltaico.

La ventana mostrada en la Figura 99 contiene los parámetros de las marcas de paneles fotovoltaicos más comunes en el mercado como SUNPOWER, KYOCERA, SOLAR WORLD, EVERGREEN, etc., así como, sus curvas a

diferentes irradiaciones y temperaturas. La Tabla 17 muestra en detalle las herramientas de edición de la interfaz del panel fotovoltaico.

Tabla 17. Parámetros de edición de la interfaz del panel fotovoltaico.

Elementos de la Interfaz	Tipo de Elemento	Descripción	Opciones
Puertos	Menú desplegable	Selecciona la configuración de los puertos del bloque, con lo cual el usuario puede determinar si desea obtener la corriente en el panel a partir de una señal de tensión u obtener la tensión en el panel a partir de una señal de corriente.	Entrada V – Salida I
			Entrada I – Salida V
Irradiación	Celda de valor numérico	Valor de irradiación en W/m^2 , para visualizar el comportamiento I-V y PV del módulo fotovoltaico seleccionado. Este parámetro no tiene efecto en la simulación.	—
Temperatura	Celda de valor numérico	Valor de temperatura en $^{\circ}C$ para visualizar el comportamiento I-V y PV del módulo fotovoltaico seleccionado. Este parámetro no tiene efecto en la simulación.	—
Número de Paneles	Botón	Despliega un cuadro de dialogo en el cual el usuario puede definir el número de paneles fotovoltaicos.	Número de paneles en serie.
			Numero de arreglos en paralelo
Módulo Fotovoltaico	Menú desplegable	Permite seleccionar una opción de una lista de paneles fotovoltaicos comerciales.	64 modelos de paneles solares.

5.4.2. Sistema con regulador y batería

La configuración de este sistema (Figura 100) tiene una mayor complejidad que la anterior. La implementación del bloque regulador facilita su conexión en

SIMULINK, ya que es el componente central del sistema; y por lo tanto, debe tener conexión con la mayoría de los bloques presentes.

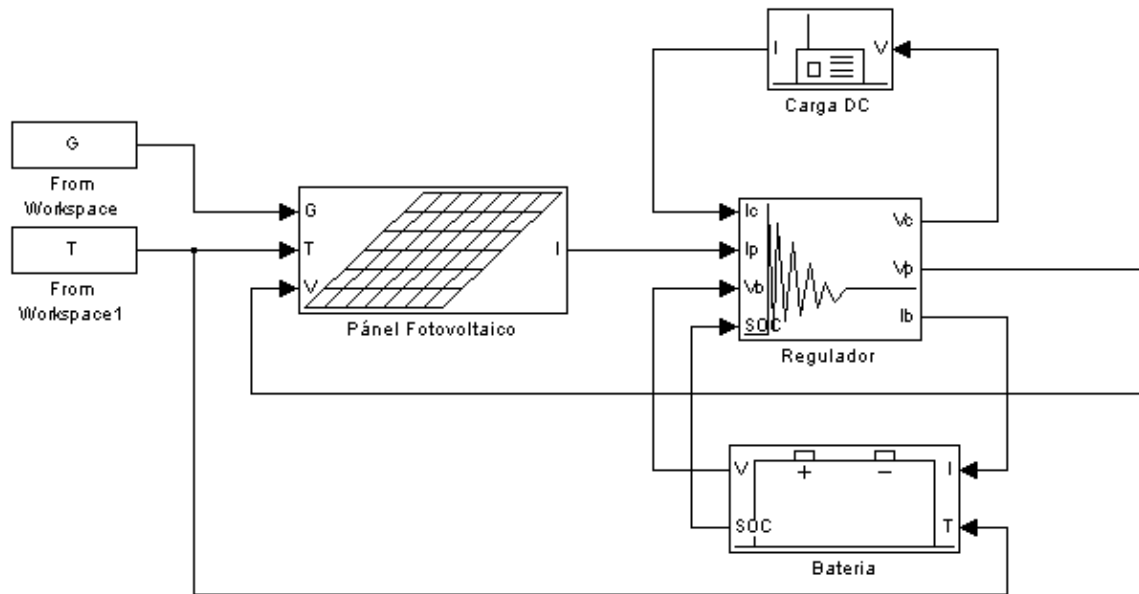


Figura 100. Sistema con regulador y batería.

El regulador recibe cada una de las variables de salida de los demás bloques, las cuales son procesadas en éste, para mantener el punto de trabajo óptimo de la batería y el panel fotovoltaico; además, es importante la conexión de la señal SOC desde la batería hasta el regulador, ya que con base en esta señal el regulador determina el régimen de trabajo del sistema.

La edición de parámetros del panel fotovoltaico se hace de igual manera que en el sistema flotante; adicionalmente, se deben ajustar las condiciones iniciales en la batería, el regulador, y la carga.

La forma de visualizar las interfaces de los otros bloques es similar al caso del panel fotovoltaico; en este caso se tendrán que editar los parámetros de cada bloque uno por uno. A continuación se describen las interfaces correspondientes.

La Figura 101 muestra la interfaz de usuario correspondiente al bloque de la carga DC, que contiene las herramientas para editar la curva de demanda diaria en Watts, ya sea manualmente o desde un archivo externo en Excel. Para más detalles sobre esta interfaz ver la Tabla 18

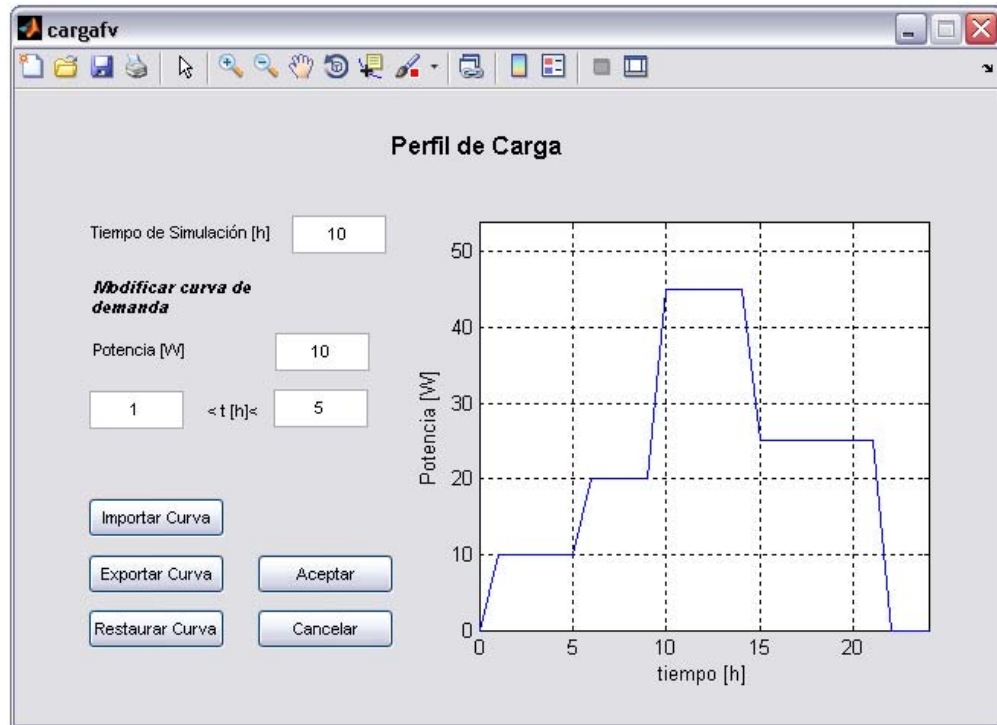


Figura 101. Interfaz de usuario para la carga de DC.

Tabla 18. Parámetros de edición de la interfaz de la Carga DC.

Elementos de la Interfaz	Tipo de Elemento	Descripción
Tiempo de simulación	Celda de valor numérico	Ajusta el tiempo de simulación.
Potencia	Celda de valor numérico	Ajusta el valor de potencia en Watts de la curva entre un tiempo mínimo y un tiempo máximo especificado por el usuario.
Tiempo mínimo	Celda de valor	Tiempo mínimo para el cual la casilla "Potencia", tendrá

	numérico	efecto sobre la curva.
Tiempo máximo	Celda de valor numérico	Tiempo máximo para el cual la casilla "Potencia", tendrá efecto sobre la curva.
Importar curva	Botón	Permite especificar una curva de potencia desde un archivo de Excel.
Exportar curva	Botón	Permite guardar los datos de la curva de potencia actual en un archivo de Excel.
Restaurar curva	Botón	Borra la curva de potencia actual y coloca la curva programada por defecto en la interfaz.

En la interfaz de la Figura 102, se especifican los parámetros nominales de una o varias baterías, tales como capacidad nominal, régimen de operación, tensión nominal y temperatura de operación, además se requiere ajustar el estado de carga inicial del bloque, este parámetro será modificado por SIMULINK al ejecutar la simulación, según el SOC que valla adquiriendo la batería; en la Tabla 18, se muestran los parámetros de edición de ésta interfaz.

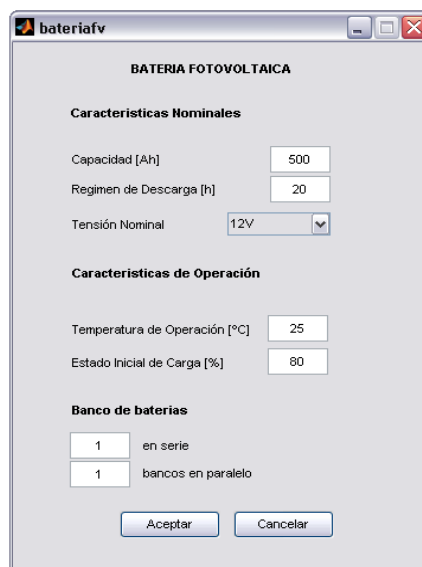


Figura 102. Interfaz de usuario para el bloque de la batería.

Tabla 19. Parámetros de edición de la interfaz de la batería.

Elementos de la Interfaz	Tipo de Elemento	Descripción	Opciones
Capacidad	Celda de valor numérico	Ajusta el valor de la capacidad de carga de la batería en A-h.	—
Régimen de descarga	Celda de valor numérico	Ajusta el tiempo en horas al cual la batería se descarga completamente.	—
Tensión nominal	Menú desplegable	Selecciona la tensión nominal de salida de la batería	12 V
			24 V
			48 V
Temperatura de operación	Celda de valor numérico	Temperatura en °C a la cual se encuentra la batería con respecto a la temperatura ambiente.	—
Estado inicial de carga	Celda de valor numérico	Estado de carga en % con el cual la batería iniciará la simulación.	—
Baterías en serie	Celda de valor numérico	Ajusta el número de baterías en serie.	—
Bancos en paralelo	Celda de valor numérico	Ajusta el número de bancos en paralelo, cada banco contiene n baterías en serie, donde n está determinada en la casilla “en Serie”.	—

Para ajustar los parámetros del regulador, se utiliza la interfaz de la Figura 103 en la cual se pueden especificar los límites para el estado de carga entre los cuales la batería o el banco de baterías pueden operar, también se puede modificar la tensión que habrá en la carga y la eficiencia del regulador.

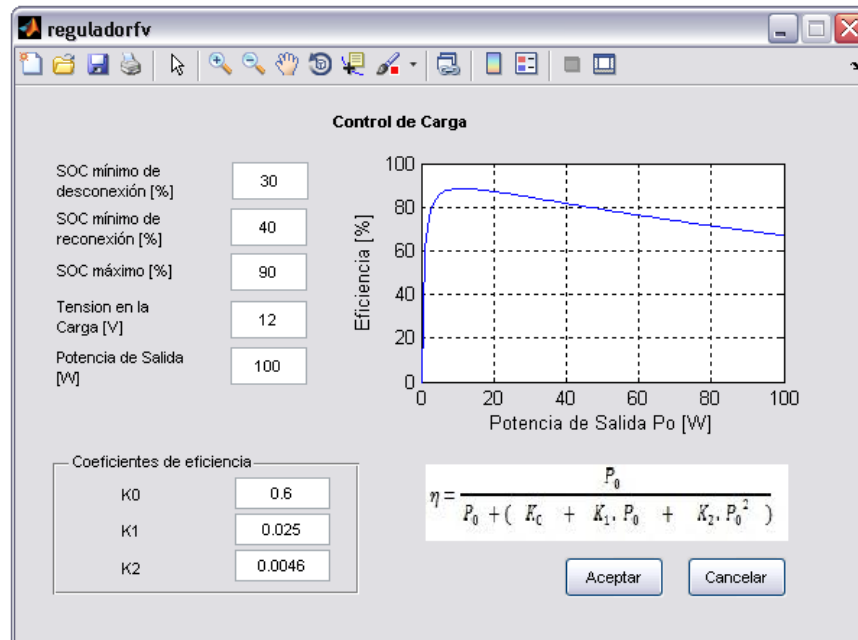


Figura 103. Interfaz de usuario para el bloque del regulador.

Tabla 20. Parámetros de edición de la interfaz del regulador.

Elementos de la Interfaz	Tipo de Elemento	Descripción
SOC mínimo de desconexión	Celda de valor numérico	Ajusta el valor mínimo del estado de carga de la batería en % por debajo del cual esta será desconectada.
SOC mínimo de re conexión	Celda de valor numérico	Ajusta el valor mínimo del estado de carga de la batería en % por encima del cual esta será reconectada.
SOC máximo	Celda de valor numérico	Estado de carga de la batería en % por encima del cual esta dejara de ser cargada.
Tensión en la carga	Celda de valor numérico	Ajusta la tensión de salida desde regulador hacia la carga.
Coefficientes de eficiencia	Celdas de valor numérico	Ajusta los coeficientes necesarios para el modelado de la curva de eficiencia.

Adicionalmente, es posible incorporar un bloque convertidor DC/DC en caso de que se deseen calcular las pérdidas de potencia por causa de este dispositivo; su

interfaz es la mostrada en la Figura 104 y los parámetros a editar se muestran en la Tabla 20.

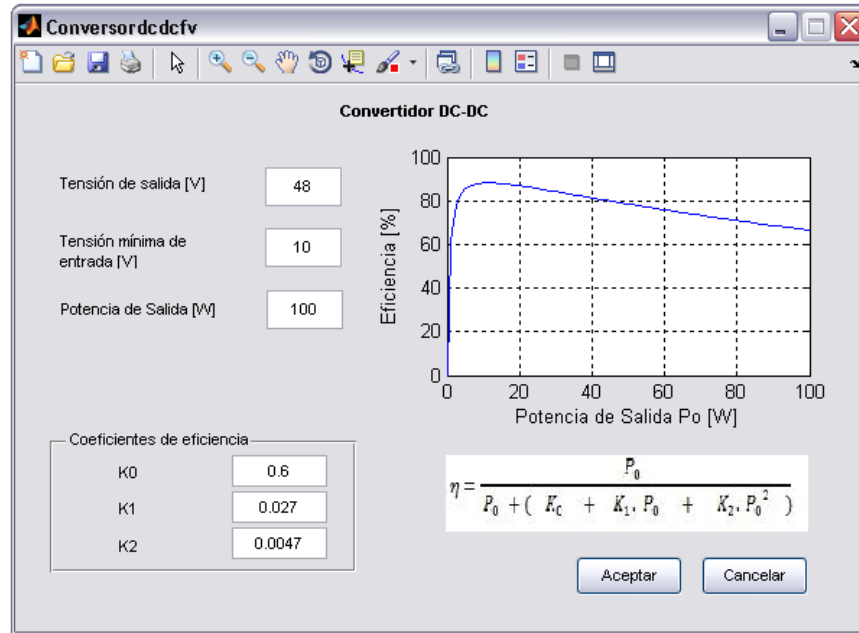


Figura 104. Interfaz de usuario para el bloque convertidor DC/DC.

Tabla 21. Parámetros de edición de la interfaz del convertidor DC/DC.

Elementos de la Interfaz	Tipo de Elemento	Descripción	Opciones
Tensión de salida	Celda de valor numérico	Tensión de salida del convertidor DC/DC.	—
Potencia de salida	Celda de valor numérico	Potencia de salida del convertidor DC/DC este valor se utiliza para visualizar la curva de eficiencia, este valor no tiene efecto en la simulación.	—
Tensión mínima de entrada	Celda de valor numérico	Tensión mínima en la entrada del convertidor DC/DC, para la cual este puede operar. Para tensiones por debajo de este valor, el convertidor DC/DC se desconecta automáticamente	—

Coeficientes de eficiencia	Celdas de valor numérico	Ajusta los coeficientes necesarios para el modelado de la curva de eficiencia.	k0
			k1
			k2

5.4.3. Sistema *stand alone*

El sistema *Stand Alone* (Figura 105) es similar al sistema con regulador y batería con la diferencia que éste incorpora un inversor y una conexión a la red. Debido a esto, sólo se muestra el manejo del bloque inversor, para la edición de datos de los demás bloques (vea la sección anterior).

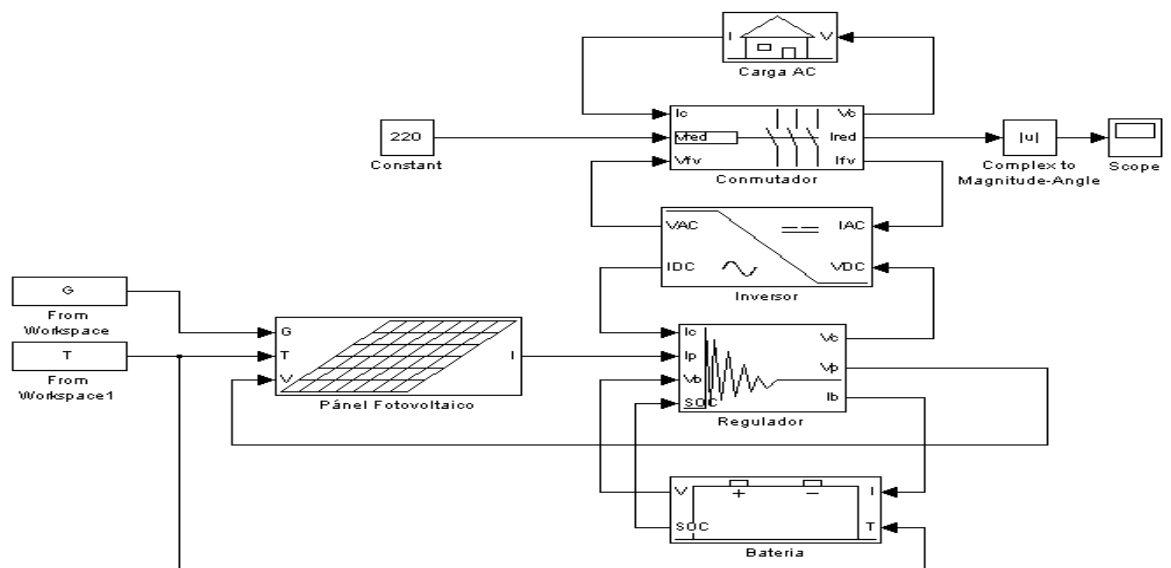


Figura 105. Montaje en SIMULINK de un sistema *Stand Alone*.

En el montaje de la Figura 105 aparecen tres nuevos bloques, éstos son importantes para caracterizar la parte de AC del sistema. El primero es un bloque de carga en AC, cuyo manejo de datos es similar al del bloque carga DC descrito en la sección 5.3.2, con la diferencia de la posibilidad de especificar el factor de

potencia de la carga, su interfaz gráfica es la mostrada en la Figura 106 y sus parámetros en la Tabla 22.

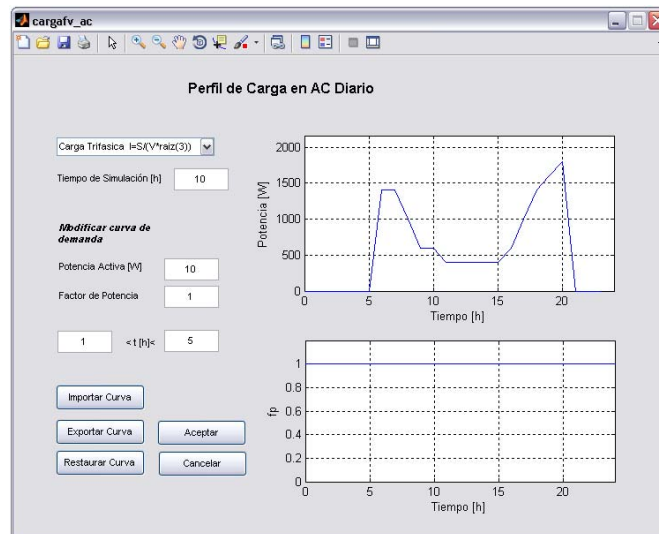


Figura 106. Interfaz de usuario para el bloque de la Carga AC.

Tabla 22. Parámetros de edición de la interfaz de la carga AC.

Elementos de la Interfaz	Tipo de Elemento	Descripción	Opciones
Tipo de Carga	Menú desplegable	Especifica si la carga es trifásica o monofásica.	Trifásica $I = \frac{P}{FP * V_{LINEA} * \sqrt{3}}$
			Monofásica $I = \frac{P}{FP * V}$
Tiempo de Simulación	Celda de valor numérico	Ajusta el tiempo de simulación.	—
Potencia	Celda de valor numérico	Ajusta el valor de potencia en Watts de la curva entre un tiempo mínimo y un tiempo máximo especificado por el usuario.	—
Factor de Potencia	Celda de valor numérico	Ajusta el valor del factor de potencia de la curva entre un tiempo mínimo y un tiempo máximo especificado por el usuario.	—

Tiempo Mínimo	Celda de valor numérico	Tiempo mínimo para el cual la casilla "Potencia" tendrá efecto sobre la curva.	—
Tiempo Máximo	Celda de valor numérico	Tiempo máximo para el cual la casilla "Potencia" tendrá efecto sobre la curva.	—
Importar Curva	Botón	Permite especificar una curva de potencia desde un archivo de Excel.	—
Exportar Curva	Botón	Permite guardar los datos de la curva de potencia actual en un archivo de Excel.	—
Restaurar Curva	Botón	Borra la curva de potencia actual y coloca la curva programada por defecto en la interfaz.	—

El segundo bloque es un conmutador el cual desconecta el sistema fotovoltaico cuando no tiene capacidad suficiente para alimentar a la carga, en este caso la carga será alimentada por la red de baja tensión, este bloque no posee interfaz; por lo tanto, conmutará la red con el sistema fotovoltaico de manera automática.

El tercer bloque es el inversor, el cual se estudia en esta sección y en la siguiente debido a su característica para funcionar en sistemas *Stand Alone* y *Grid Tied*. En la Figura 107, se presenta la interfaz grafica y en la Tabla 23, los parámetros a editar.

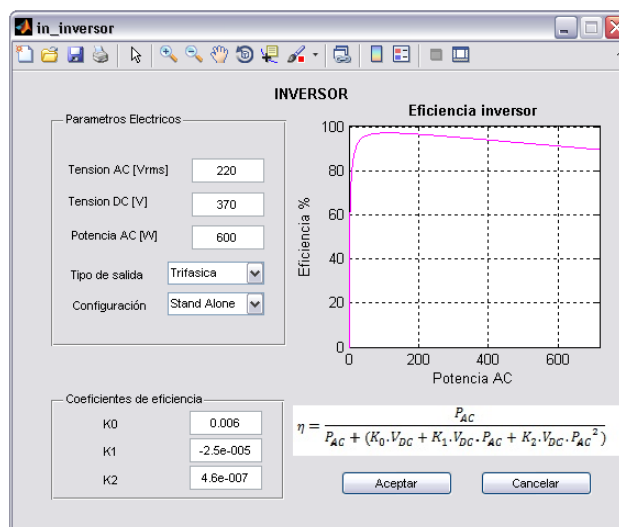


Figura 107. Interfaz de usuario para el bloque del Inversor.

Tabla 23. Parámetros de edición de la interfaz del Inversor.

Elementos de la Interfaz	Tipo de Elemento	Descripción	Opciones
Tensión AC	Celda de valor numérico	Tensión eficaz de salida. Si el inversor es de salida trifásica esta tensión se interpretará como tensión de línea.	—
Tensión DC	Celda de valor numérico	Tensión de DC del inversor, este valor se utiliza para simular la curva de eficiencia, este valor no tiene efecto en la simulación.	—
Potencia de AC	Celda de valor numérico	Potencia de salida del inversor, este valor se utiliza para visualizar la curva de eficiencia, este valor no tiene efecto en la simulación.	—
Tipo de Salida	Menú desplegable	Selecciona el tipo de salida del inversor	Salida trifásica
			Salida monofásica
Configuración	Menú desplegable	Especifica el tipo de inversor según la configuración del sistema fotovoltaico.	<i>Stand Alone</i>
			<i>Grid Tied (MPPT)</i>
Coeficientes de eficiencia	Celdas de valor numérico	Ajusta los coeficientes necesarios para el modelado de la curva de eficiencia.	k0
			k1
			k2

En este bloque es necesario especificar la tensión eficaz de salida en AC, el tipo de inversor (trifásico o monofásico) y el tipo de configuración del sistema fotovoltaico (*Stand Alone* o *Grid Tied*); además, se pueden ajustar los coeficientes k0, k1 y k2 con los cuales se modela la curva de eficiencia del inversor. Debido a que la tensión en DC y la potencia de salida en AC varían a lo largo de la simulación, estos parámetros son implementados en la interfaz de la Figura 107, solamente para visualizar la curva de eficiencia del inversor, y no intervienen en el comportamiento del inversor durante la simulación.

Como se puede ver en Figura 107, mientras la opción “Configuración” de la interfaz de usuario del inversor esté en “*Stand Alone*”, el bloque instantáneamente mantendrá la siguiente configuración en los puertos de entrada y salida.

El bloque de la Figura 108, tiene como salida la tensión en AC, esto se debe a que en un sistema *Stand Alone*, el inversor es quien determina la tensión de la carga en AC, la segunda topología del inversor es estudiada en la siguiente sección, ya que esta es necesaria para la conexión en sistemas *Grid Tied*.

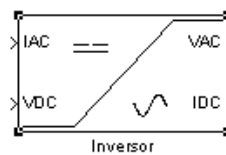


Figura 108. Configuración de los puertos del inversor para sistemas *Stand Alone*.

5.4.4. SISTEMA GRID TIED

Este sistema es uno de los más sencillos de implementar debido a que sólo incorpora el panel fotovoltaico, un inversor, una conexión a la red (la cual es simulada a partir de un bloque “*Constant*” de la librería “*Sources*” de SIMULINK), y la carga a alimentar como se muestra en la Figura 109.

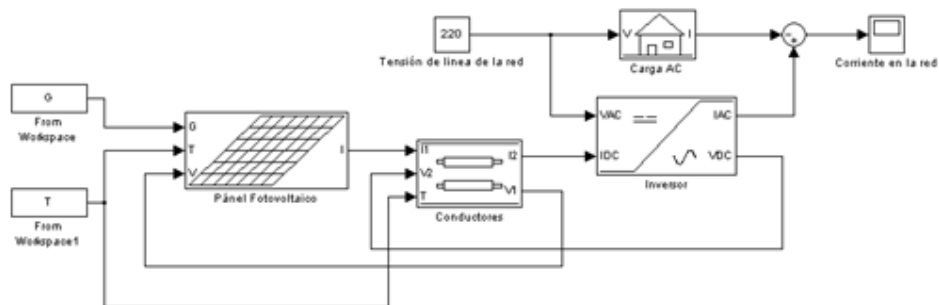


Figura 109. Montaje en SIMULINK de un sistema *Grid Tied*.

En este diagrama aparece un bloque aritmético de suma y resta de la librería “*Math Operations*” de SIMULINK, el cual calcula la diferencia entre la corriente suministrada por el sistema fotovoltaico y la corriente consumida por la carga, dando como resultado la corriente consumida por la red en caso de que está de un valor positivo, o suministrada por la red si está adquiere un valor negativo.

Para lograr esta conexión es necesario colocar la opción “Configuración” del sistema fotovoltaico en “*Grid Tied*”, como se muestra en la Figura 110.

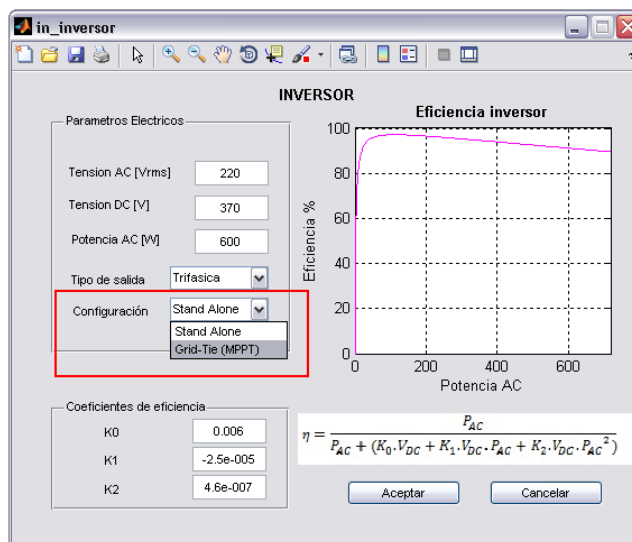


Figura 110. Selección de la opción Grid Tied.

Después de realizar este sencillo ajuste, la topología en los puertos del bloque inversor será como la mostrada en la Figura 111.

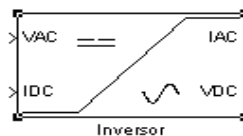


Figura 111. Bloque Inversor para sistemas Grid Tied.

En contraste con los puertos de la Figura 108, en el bloque inversor de la Figura 111 la tensión en AC es una entrada, esto se debe a que esta tensión es determinada externamente por la red y la tensión en DC es una salida con lo cual se hará el control MPPT para garantizar que el panel se mantenga en el punto de máxima potencia.

Adicionalmente, se incorpora en el esquema de la Figura 109, el bloque Conductores, el cual es necesario si se desea conocer la caída de tensión o pérdidas de potencia en un tramo de conductores; además, incorpora diodos de bloqueo y fusibles de sobre corriente para los paneles fotovoltaicos, su interfaz de usuario es la mostrada en la Figura 112.

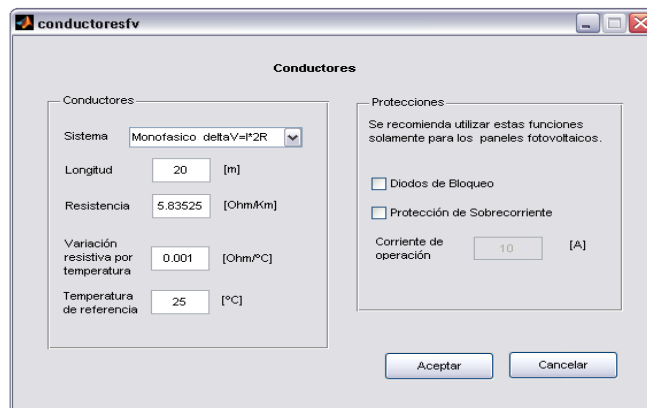


Figura 112. Interfaz de usuario del bloque conductores.

La interfaz de los conductores se divide en dos partes, la primera (lado derecho de la figura) contiene la información del tramo de conductores y la segunda (lado izquierdo de la figura) contiene las opciones en donde se especifica si se desean incorporar diodos y/o protecciones de sobre corriente en la simulación; en la Tabla 24 se presentan los parámetros que se editaran dentro de la interfaz.

Tabla 24. Parámetros de edición de la interfaz de los conductores.

Elementos de la Interfaz	Tipo de Elemento	Descripción	Opciones
Tipo de sistema	Menú desplegable	Selecciona si el tramo de conductores corresponde a un sistema trifásico o monofásico.	Trifásico $I = \frac{P}{FP * V_{LINEA} * \sqrt{3}}$
			Monofásico $I = \frac{P}{FP * V}$
Longitud	Celda de valor numérico	Longitud en metros del tramo de conductores	—
Resistencia	Celda de valor numérico	Resistencia en Ω/km de cada conductor.	—
Variación resistiva por temperatura	Celda de valor numérico	Coefficiente en $\Omega/^{\circ}\text{C}$, que determina el aumento de resistencia en los conductores por cada $^{\circ}\text{C}$ por encima de la temperatura de referencia.	—
Temperatura de referencia	Celda de valor numérico	Especifica la temperatura de referencia para la variación de la resistencia.	—
Diodos de bloqueo	Caja de chequeo	Especifica si se desean o no incluir diodos de bloqueo para los paneles fotovoltaicos en la simulación.	—
Protecciones de Sobre corriente	Caja de chequeo	Especifica si se desean o no incluir fusibles para los paneles fotovoltaicos en la simulación.	—

5.5. REFERENCIAS

- [1] <http://www.mathworks.com>. Consultado en Junio del 2011
- [2] D. O. Barragán, "Manual de Interfaz Gráfico de Usuario en Matlab", Escuela de electrónica y telecomunicaciones, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones asociados al trabajo de grado desarrollado.

6.1. RESULTADOS

La herramienta computacional establecida permitirá a estudiantes de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones - E3T, el estudio de componentes y configuraciones de sistemas fotovoltaicos, a partir de simulaciones del comportamiento eléctrico en MATLAB, por medio de una librería en SIMULINK, donde se ha asignado un bloque para cada dispositivo seleccionado característico de estos sistemas; además, dispone de interfaces de usuario en GUIDE, con el fin de caracterizar el funcionamiento de instalaciones fotovoltaicas con equipos comerciales.

Se seleccionaron modelos matemáticos para caracterizar el comportamiento energético de dispositivos de un sistema fotovoltaico, tales como paneles fotovoltaicos [1], [2] y [3], baterías [1] y [4], reguladores [5] e inversores [6].

Se simuló y documentó el comportamiento de dispositivos pertenecientes a sistemas fotovoltaicos, a partir de los bloques creados para la herramienta computacional, con el fin de suministrar un análisis de los resultados obtenidos en potencia y energía; además, se ha contrastado el sistema fotovoltaico a implementarse en la infraestructura de la E3T con los resultados de diseño originales; ello a fin de facilitar al lector la comprensión de su funcionamiento y brindar una verificación inicial sobre su confiabilidad.

Se estableció un manual de usuario para el uso correcto de la herramienta computacional, partiendo de especificaciones generales como el uso en GUIDE y SIMULINK, y otras especificaciones que exponen su interconexión. Este manual de usuario facilita la correcta comprensión de la herramienta computacional, ya que presenta diagramas amigables al lector ayudando al aprendizaje de conceptos, así como, a su adiestramiento en los pasos para su manejo.

6.2. CONCLUSIONES

La herramienta computacional de este trabajo se diseñó con el fin de proporcionar un apoyo pedagógico a los estudiantes de la E3T, interesados en el análisis de configuraciones de sistemas fotovoltaicos; de esta manera, se agilizará el desarrollo de estudios posteriores en este campo.

El modelado matemático de dispositivos permite caracterizar el comportamiento de una instalación fotovoltaica; editando sus parámetros de fabricación a partir de interfaces de usuario en GUIDE, se puede realizar el modelado de su funcionamiento con equipos comerciales en diferentes condiciones de operación y ambiente.

Con base en el estudio de los modelos matemáticos de los dispositivos, se aprecia que el comportamiento energético de las instalaciones fotovoltaicas es influenciado por la temperatura ambiente; por lo tanto, es un factor que requiere ser considerado por ingenieros electricista en las etapas de diseño y operación.

Además de los modelos matemáticos propios de cada dispositivo, es necesario tener en cuenta el funcionamiento de cada configuración fotovoltaica, como por

ejemplo, flujos de potencia, ya que cada configuración requiere un análisis energético particular.

La alta capacidad de cálculo de MATLAB y SIMULINK, es favorable para la simulación de sistemas fotovoltaicos, dado que para la solución de los modelos matemáticos se requiere de una gran cantidad de iteraciones. Este es el caso del modelo matemático para el panel fotovoltaico y la batería.

El planteamiento de cada bloque de la herramienta computacional a partir de cajas negras⁶ es necesario para facilitar la programación individual en SIMULINK, esto agiliza la interconexión entre ellos, como se aprecia en el capítulo 3.

La implementación de un manual de usuario facilita la correcta comprensión y uso de una herramienta computacional, ya que expone aspectos fundamentales para su manejo.

6.3. RECOMENDACIONES

Para el correcto uso de la herramienta computacional, es necesario que el usuario conozca aspectos básicos sobre sistemas fotovoltaicos y sus configuraciones, lo cual permitirá fortalecer su comprensión a partir del uso de esta herramienta.

Inicialmente, se recomienda realizar un análisis preliminar sobre el flujo de potencia del sistema fotovoltaico, previa montaje virtual para su simulación en SIMULINK, debido a que esta herramienta es un piloto, y a que una administración

⁶ Una caja negra es un elemento estudiado desde el punto de vista de las entradas que recibe y las salidas o respuestas que produce.

inadecuada de carga en el sistema podría causar resultados inesperados en la herramienta computacional, circunstancia en la cual, no sería confiable su desempeño. Además, es pertinente establecer un rango esperado de los valores obtenidos, para tener una idea más clara los resultados.

Se recomienda que el usuario que desee desarrollar simulaciones con esta herramienta computacional, realice una lectura intensa del capítulo 5, el cual contiene las indicaciones básicas que se deben tener para el manejo de esta herramienta.

Adicionalmente, se recomienda que el usuario revise las simulaciones realizadas en este trabajo, con el objetivo de profundizar en el manejo de la herramienta computacional.

Se recomienda realizar, en un trabajo posterior, un análisis detallado sobre los modelos matemáticos del inversor, regulador y convertidor DC/DC, desde un punto de vista de electrónica de potencia.

6.4. REFERENCIAS

- [1] D. Guasch, “Modelado y Análisis de Sistemas Fotovoltaicos”, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, Abril, 2004.
- [2] D. Soto, “Aumento del Rendimiento en un Vehículo Eléctrico, Utilizando Celdas Fotovoltaicas” Tesis de Grado, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, 2002.
- [3] R. Messenger, “Photovoltaic Systems Engineering” Second Edition, Ed. CRC PRESS, U.S., 2004
- [4] H. Fernández I. Martínez “Modelado y Simulación De Una Batería De Plomo Acido Mediante Fuentes De Voltaje-Corriente y Bloques Aritméticos”.

- [5] R. Cullen, "What is Maximun Power Point Tracking (MPPT), and How Does it Work?" Blue Sky Energy Inc.
- [6] Taller Internacional Sobre Generación Distribuida Con Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red, "Caracterización de Inversores de CC/CA para Conexión a la Red".

BIBLIOGRAFIA

- [7] Bgovic M., Ropp M., Rohatgi A, Durand s, Rosenthal A, “*Monitoring and data acquisition for a large roof-mounted photovoltaic array*”, Southeastcon '97. Engineering new New Century., Proceedings. IEEE, 1997, pp. 298-300.
- [8] D. Barragan, “Manual de Interfaz Grafica de Usuario en MATLAB”, Universidad Técnica Particular de Loja.
- [9] D. Guasch, “Modelado y Análisis de Sistemas Fotovoltaicos”, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, Abril, 2004.
- [10] D. Hansen, P. Sorensen, “L. Hansen, H Bindner, Model for a Stand Alone PV System”, Riso National Laboratory, December, 2000.
- [11] D. Soto, “Aumento del Rendimiento en un Vehículo Eléctrico, Utilizando Celdas Fotovoltaicas” Tesis de Grado, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, 2002.
- [12] G. Fernandez, “Creación de Interfaces Gráficas de Usuario (GUI) con MATLAB”, Salamanca, Septiembre, 2007.
- [13] H. Fernández I. Martínez “Modelado y Simulación De Una Batería De Plomo Acido Mediante Fuentes De Voltaje-Corriente y Bloques Aritméticos”.
- [14] H. L. Gasquet, “Conversion de la Luz Solar en Energía Eléctrica”, Manual Teórico y Práctico sobre los Sistemas Fotovoltaicos, Solartronic S.A., Cuernavaca, Morelos, México, Octubre, 2004.
- [15] Hummel, S.F., Kimelman D., Schonberg E, Tennenhouse M, Zernik D, “*Using program visualization for tuning parallel-loop scheduling*”, IEEE Concurrency [see also IEEE parallel & Distributed Technology], Volume: 5 Issue: 1 ,Jan.-March1997, pp. 26-40.
- [16] J Wiles, “Photovoltaic Power Systems and the National Electrical Code”, Southwest Development Institute, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, December, 1996.
- [17] J. Lagunas “Control Supervisorio Difuso Para un Sistema Hibrido de Generación Eléctrica” Tesis Maestral, Centro Nacional De Investigación Y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, Octubre, 2004.

- [18] M. Canseco "Sistema De Propulsión De Un Vehículo Híbrido Eléctrico" Tesis Maestral, Centro Nacional De Investigación Y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, Noviembre, 2004.
- [19] O. Gergaud, G. Robin, B. Multon, H. Ben Ahmed, "Energy Modeling Of A Lead-Acid Battery Within Hybrid Wind / Photovoltaic Systems" , SATIE - Brittany Branch, ENS de Cachan - Ker Lann Campus, France.
- [20] R. Cullen, "What is Maximun Power Point Tracking (MPPT), and How Does it Work?" Blue Sky Energy Inc.
- [21] R. Messenger, "Photovoltaic Systems Engineering" Second Edition, Ed. CRC PRESS, U.S., 2004.
- [22] R. Michael, "A Lead-Acid Battery Model for Hybrid System Modelling", CANMET Energy Diversification Research Laboratory, Natural Resources Canada, March, 2001.
- [23] Taller Internacional Sobre Generación Distribuida Con Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red, "Caracterización de Inversores de CC/CA para Conexión a la Red".
- [24] W. Hulshorst, "Manual Práctico Energía Fotovoltaica", Leonardo Energy, Universidad Politécnica de Madrid, 2002.
- [25] Weidong Cai, Dagan Feng, Fulton R., "A fast algorithm for estimating FDG model parameters in dynamic PET with an optimized image sampling schedule and corrections for cerebral blood volume and partial volume", engineering in Medicine and Biology Society, 1998. Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE, Volume: 2, 1998, pp767-770 vol.2.
- [26] Y. Lizarazú, L. Torres "Diseño De Un Sistema De Generación Eléctrica Fotovoltaica Y Una Red Eléctrica En Corriente Continua De Baja Tensión Para El Posible Nuevo Edificio Eléctrica II De La Universidad Industrial De Santander", Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga , 2010.
- [27] Diodos de bloqueo. <http://saecsaenergiasolar.com/fotovoltaico/introduccion>. Consultado el 1 de octubre del 2011
- [28] Funcionamiento panel solar. <http://tskan.com/funcionamiento-panel-solar/>. Consultado el 6 de Octubre del 2011
- [29] <http://www.mathworks.com>. Consultado en Junio del 2011

[30] Reactive Energy Compensation. <http://www.enertron.net/en/products/wind/reactive-compensation>. Consultado el 17 de Noviembre del 2011

ANEXO A.

CONSTRUCCIÓN DE ESQUEMAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Sistema autónomo con pérdidas

Este sistema se diferencia del anterior por la consideración de conductores y las respectivas pérdidas por conducción, esto se simula con la inclusión de un (“conductores”) bloque conductores entre el panel y la batería, que representa el efecto de la caída de tensión. Las características de los dispositivos son las mismas del sistema anterior; los conductores tendrán una resistencia de un alambre calibre 12 AWG, y 20 metros de longitud; en la Figura 113 se observa la conexión.

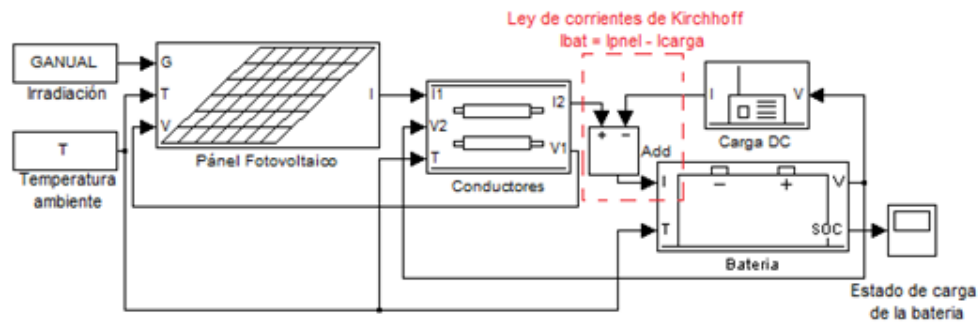
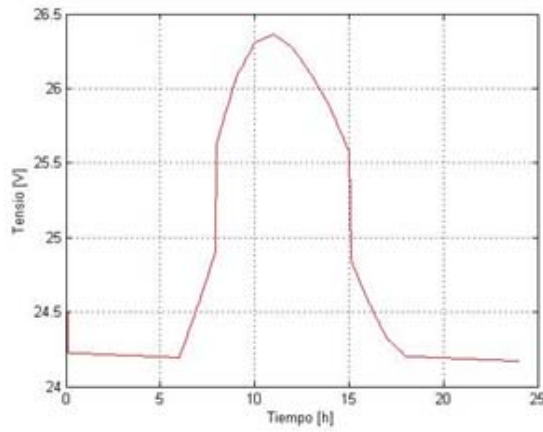
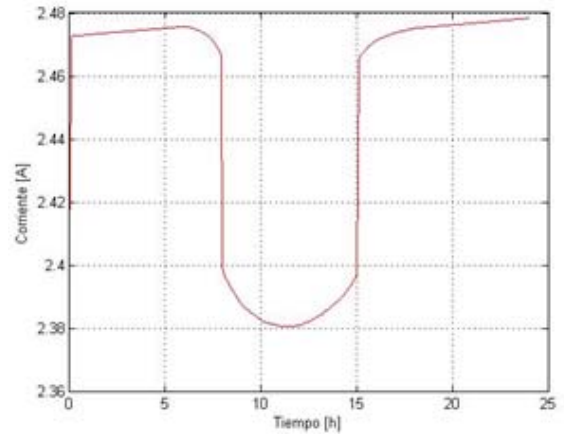


Figura 113. Montaje en SIMULINK del sistema autónomo con pérdidas.

En las figuras 114 y 115 se puede observar diferencias en las tensiones del panel y la batería, se aprecia en la Figura 115 b) que la caída de tensión del sistema no es constante, esto se debe a la corriente que pasa por los conductores; en cuanto mayor sea la corriente, mayor será la caída de tensión en los conductores.

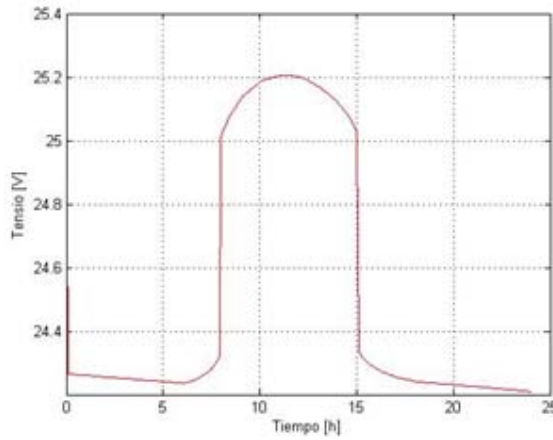


a) Tensión del panel

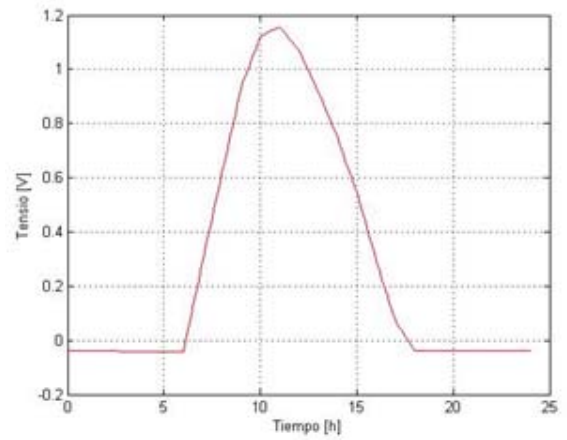


b) Corriente en la carga

Figura 114. Tensión del panel y corriente en la carga.



a) Tensión en el sistema



b) Caída de tensión por efecto de los conductores

Figura 115. Tensión en el sistema y caída de tensión por efecto de los conductores.

En las figuras 116 y 117 se muestran las pérdidas de potencia y energía en los conductores a lo largo de un día normal de trabajo.

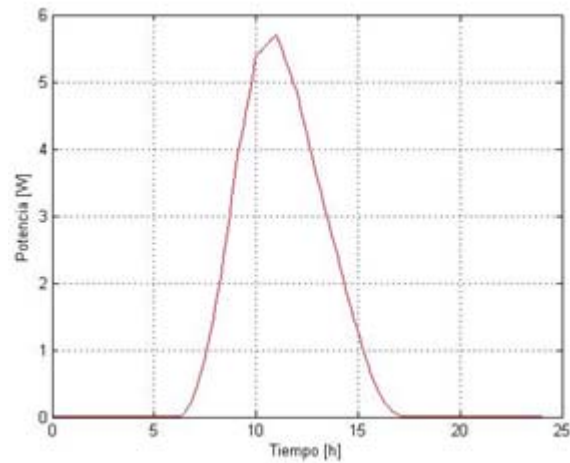


Figura 116. Pérdidas de potencia en los conductores.

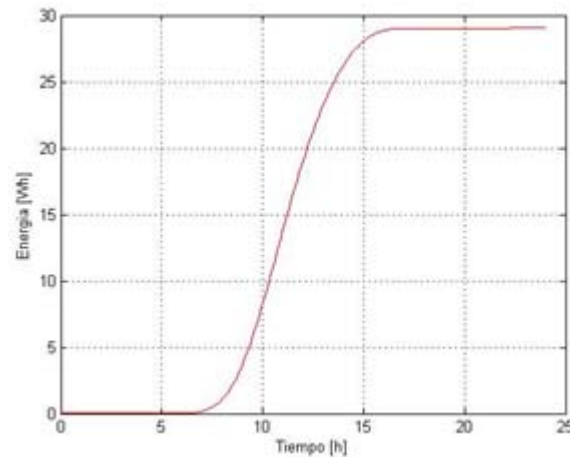


Figura 117. Pérdidas de energía en el conductor.

Sistema con batería y regulador

Este tipo de sistemas fotovoltaicos es común en la práctica, debido a la capacidad de almacenamiento de energía para su uso posterior; por ejemplo, en horas de la noche o días nublados.

Su funcionamiento se basa en la monitorización constante del estado de carga de la batería y el control de las tensiones de los dispositivos conectados, a fin de

encontrar el punto óptimo de trabajo, a partir de un regulador con tecnología MPPT (trabaja en el punto de máxima potencia posible).

El regulador detendrá el proceso de carga de la batería a medida que su carga sea total; así mismo, desconectará la carga del sistema en caso de la batería esté descargada, y no haya suficiente generación por parte de los paneles fotovoltaicos.

Otra ventaja de este sistema, es la estabilidad de la tensión de trabajo, aspecto favorable para la carga; caso contrario, a lo sucedido en sistema flotante; en la Figura 118, se presenta el esquema eléctrico del sistema y en la Figura 119, su punto de operación.

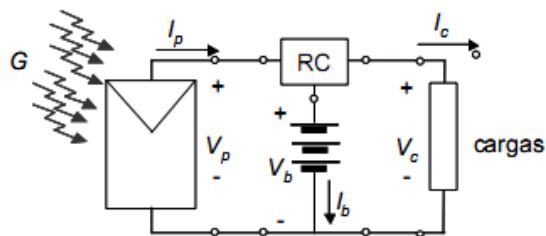


Figura 118. Esquema eléctrico de un sistema con regulador y batería [2].

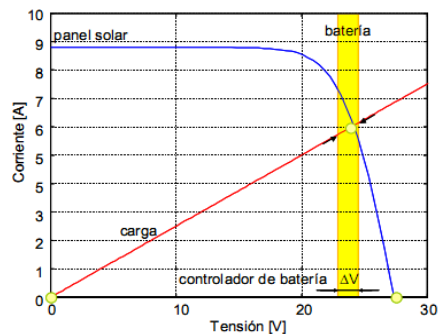


Figura 119. Punto de operación de un sistema con regulador y batería [2].

El rango de trabajo de la tensión de la batería depende de la precisión y de la confiabilidad del regulador; por efectos de simplificación, se consideró constante la

tensión en la carga; la tensión del panel fotovoltaico depende de la energía requerida por la carga y el flujo de carga de la batería.

Los ejemplos para probar este sistema son similares a los utilizados en el caso del regulador; sin embargo, se utilizó una carga variable, y se simuló en un escenario de cuatro días; los parámetros analizados son el estado de carga de la batería y su tensión. Para este sistema se utilizaron dos paneles Sanyo de 240 W conectados en serie, una batería de capacidad de almacenamiento $C_{10} = 550$ A-h y tensión de 12 V, un regulador de salida a 12V, y un convertidor DC-DC de 12 V a 48 V como se observa en la Figura 120.

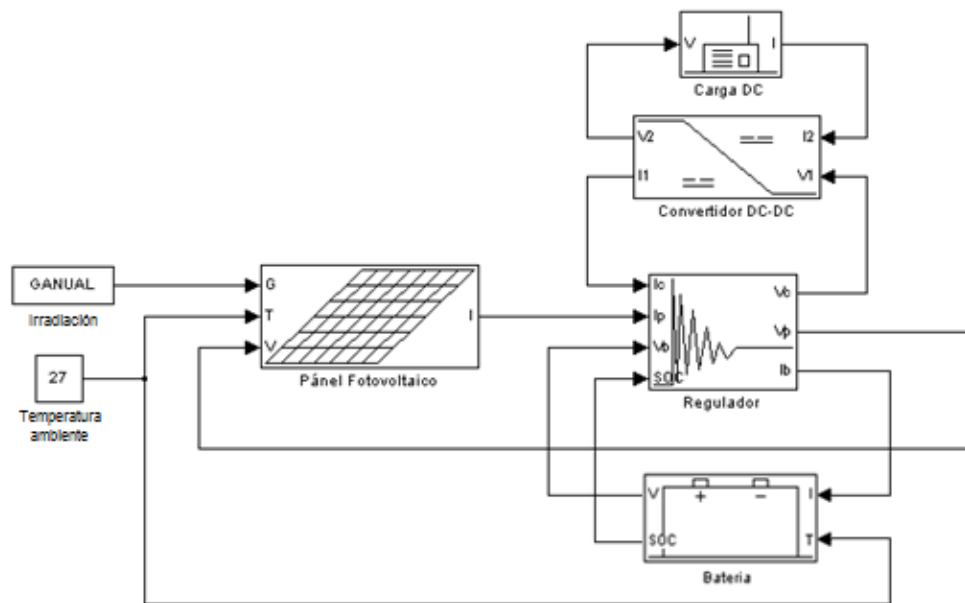
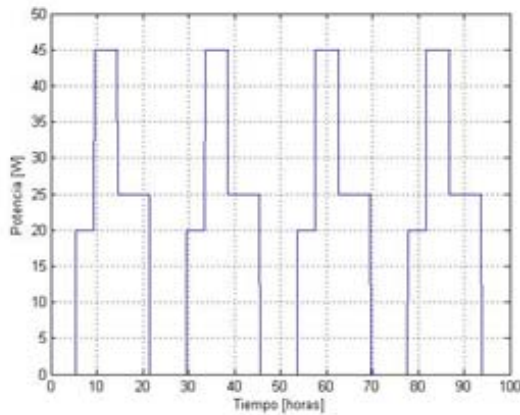
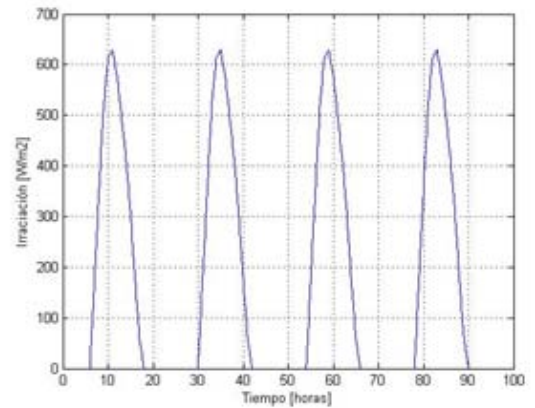


Figura 120. Montaje en SIMULINK del sistema con regulador y batería.

Las entradas del sistema son la curva de demanda y la irradiación (Figura 121) para cuatro días a una temperatura ambiente de 27°C. Además, se inicia la simulación con la batería en un estado de carga del 70% y se obtienen los resultados mostrados en la Figura 122.

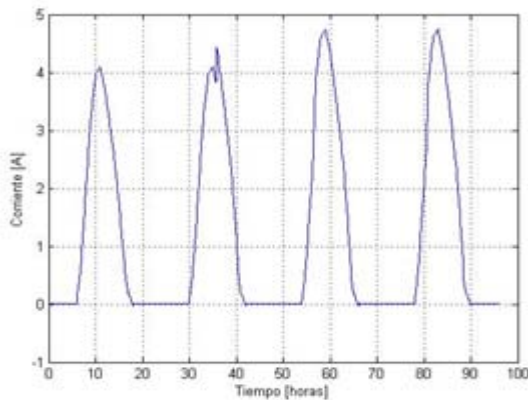


a) Potencia consumida

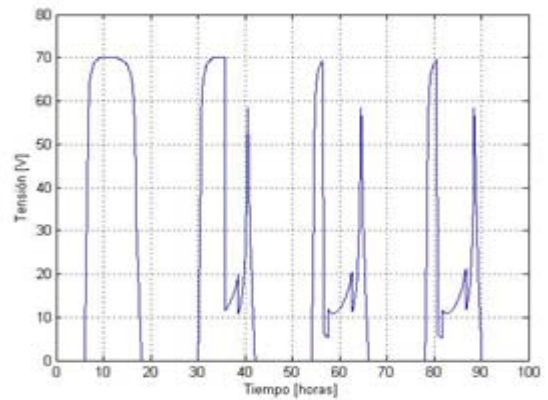


b) Irradiación

Figura 121. Potencia consumida e Irradiación.



a) Corriente en los paneles



b) Tensión en los paneles

Figura 122. Corriente y tensión en los paneles.

Como se puede apreciar en la Figura 123 a), la potencia generada por los dos paneles es mayor a la potencia consumida por la carga, esto conlleva a que en el segundo día la batería esté completamente cargada; por lo que, el regulador se ajusta a la potencia entregada por el panel, para que alimentase exclusivamente a la carga. Este fenómeno se refleja en las gráficas de corriente y potencia del

panel, en las cuales la curva pasará de tener un comportamiento similar al de la irradiación, a tener un comportamiento similar al de la carga.

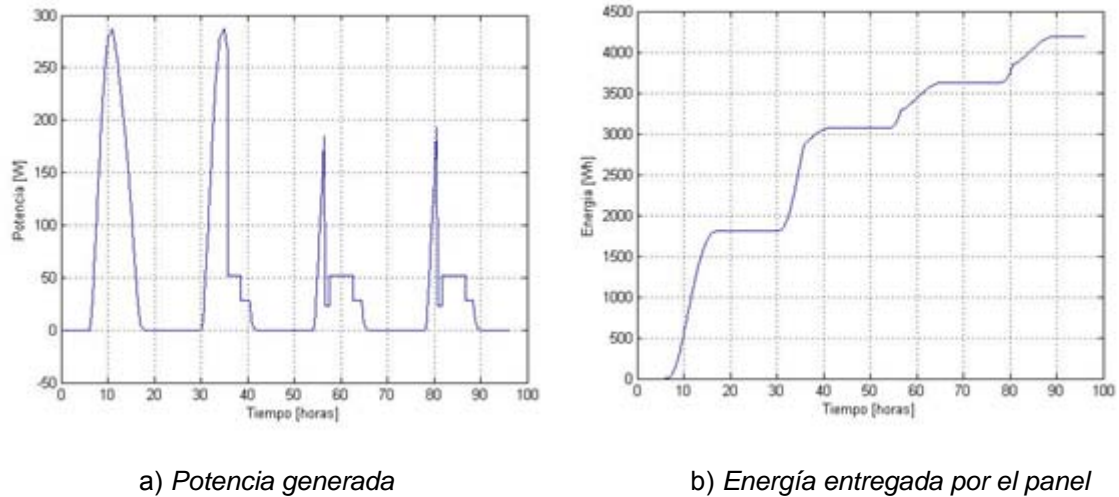
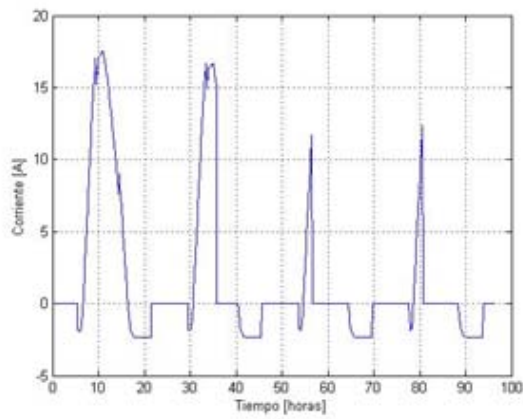
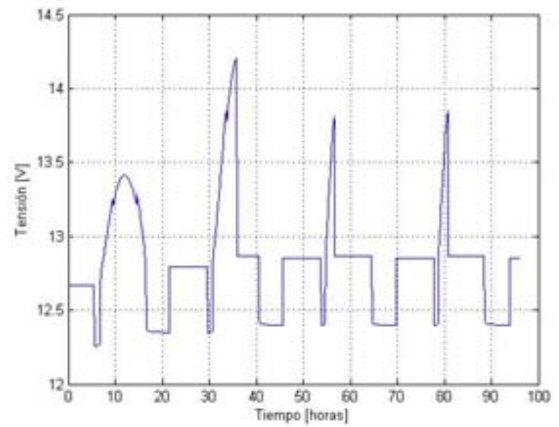


Figura 123. Potencia generada y energía entregada por el panel.

En la Figura 124a) se aprecia como la corriente de la batería toma un valor negativo en horas de la noche, esto se debe a la ausencia de irradiación; por lo tanto, éstas suministran potencia a la carga. A partir de esa corriente y la tensión de la batería (Figura 124 b) se obtiene el flujo de potencia y energía de la Figura 125, también el estado de carga de la batería Figura 126.

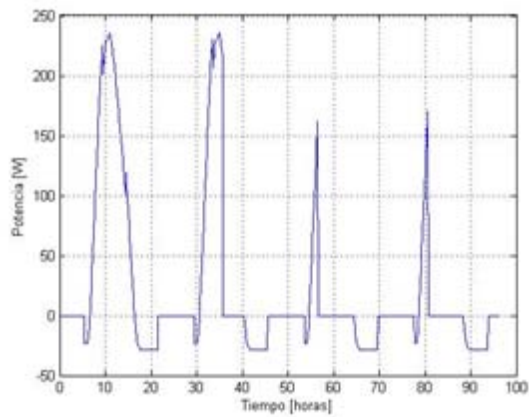


a) Corriente en la batería

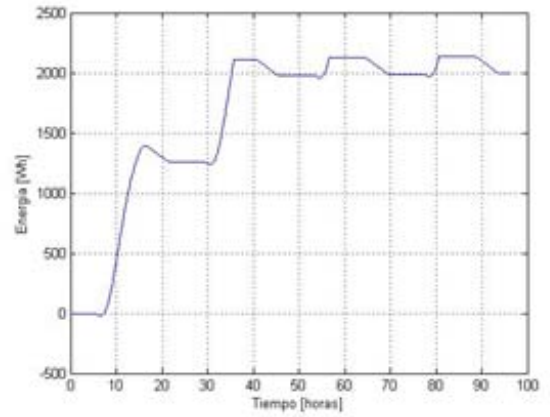


b) Tensión en la batería

Figura 124. Corriente y tensión en la batería.



a) Flujo de potencia en la batería



b) Energía acumulada por la batería

Figura 125. Flujo de potencia y energía acumulada en la batería.

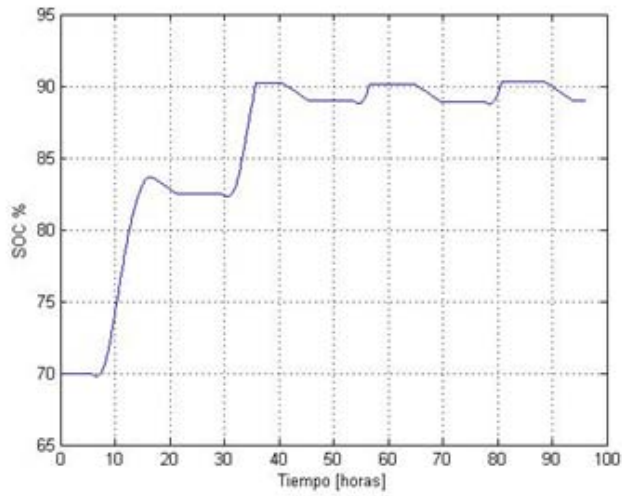
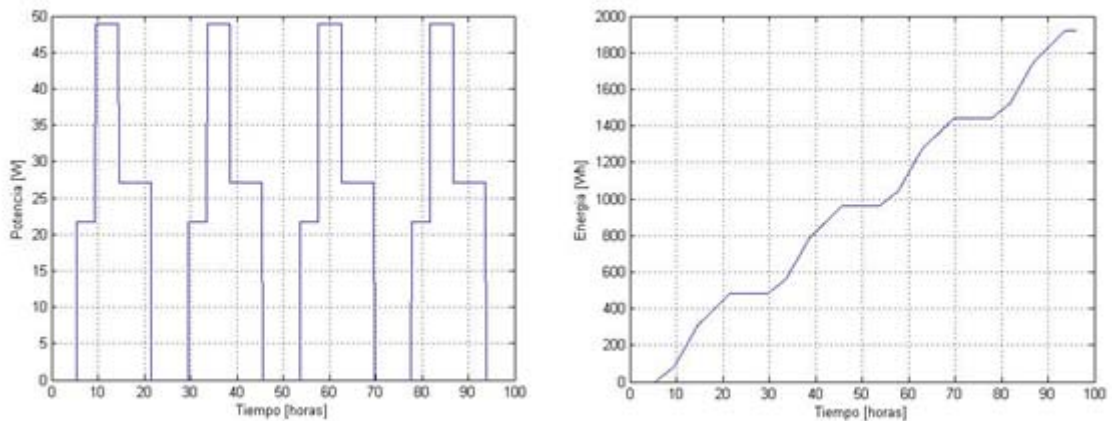


Figura 126. Estado de carga en la batería.

Adicionalmente, se puede ver el consumo de potencia en la salida del convertidor DC/DC para comprobar el efecto de la eficiencia del regulador.

Como se puede apreciar en la Figura 125.a), la potencia de salida del regulador es un poco mayor a la potencia consumida, esto se debe a la eficiencia del convertidor DC/DC.



a) Potencia en la salida del regulador

b) Energía consumida por la carga

Figura 127. Potencia en la salida del regulador y energía consumida por la carga.

Sistema Stand Alone con respaldo

El sistema *Stand Alone* está conformado por un sistema batería-regulador, e incorpora un inversor para la atención de cargas de corriente alterna. Además, posibilita la interconexión de fuentes externas de generación, como un sistema de energía eólica, una planta Diesel o una red de distribución local, a través de un proceso de conmutación.

Su funcionamiento es similar al sistema anterior, en donde el regulador realiza la monitorización de la potencia disponible en cada instante y determina el punto de trabajo para la carga y cada uno de sus dispositivos; la conmutación se realiza cuando el sistema fotovoltaico no está en capacidad de abastecer la demanda exigida por la carga, dando paso a otro sistema de alimentación alternativo que si esté en capacidad.

En la Figura 128 se muestra el esquema eléctrico de este tipo de sistema, y se presenta el montaje en SIMULINK en la Figura 129.

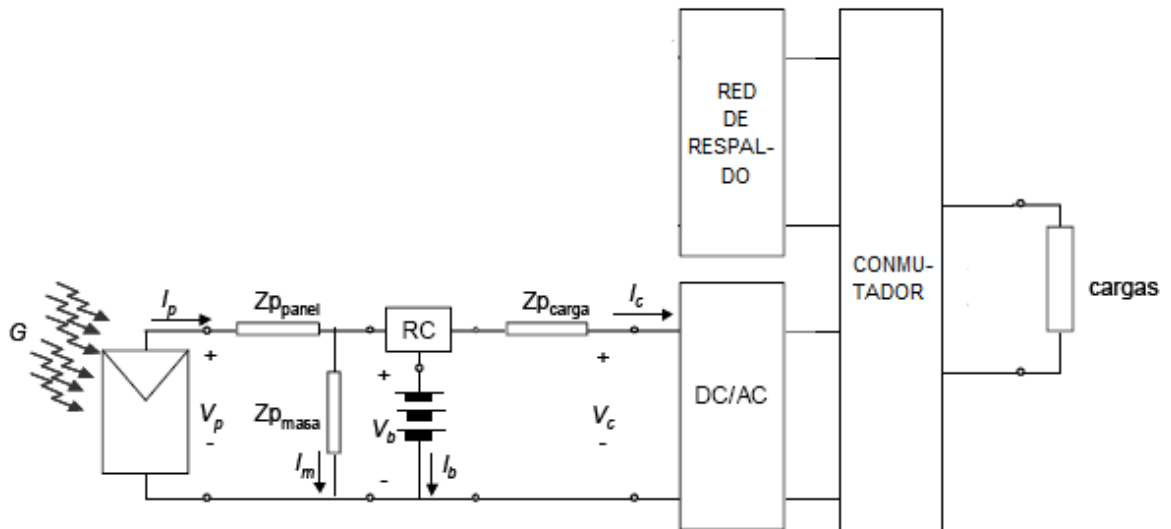


Figura 128. Montaje eléctrico de un sistema Stand Alone.

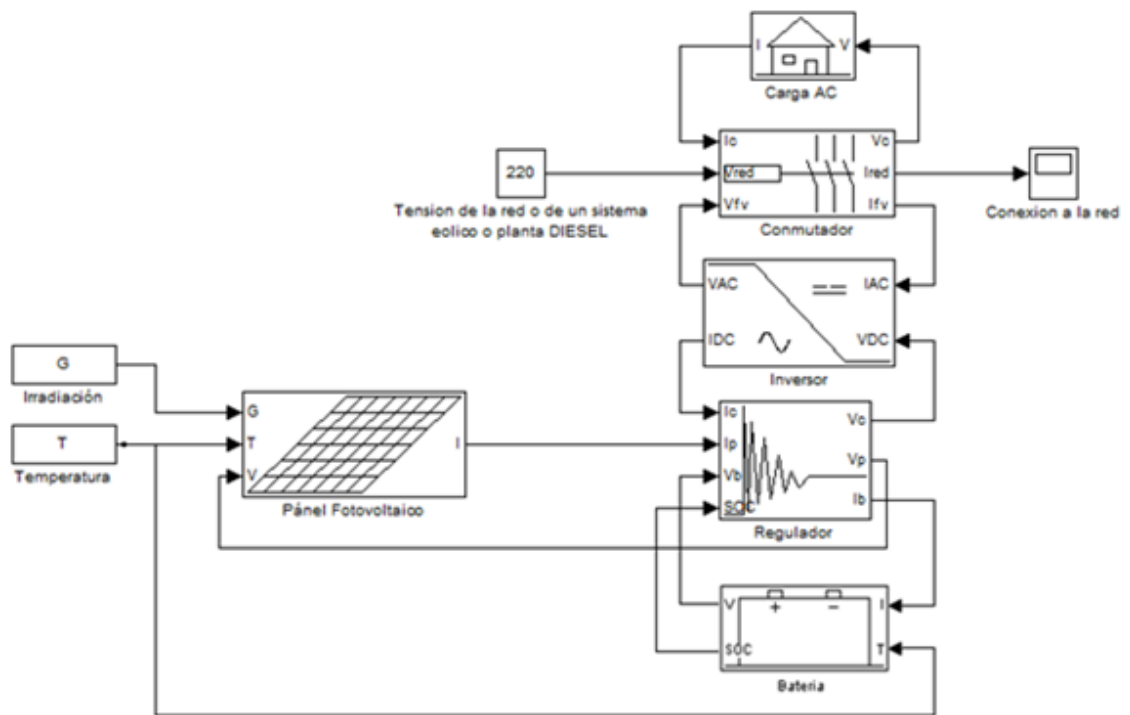


Figura 129. Montaje en SIMULINK de un sistema Stand Alone.

El sistema aislado o *stand alone*, es un tipo de sistema más completo por su autosuficiencia para el abastecimiento de energía para cargas tanto de corriente alterna como de corriente directa, y con buenas condiciones eléctricas.

En la Figura 129, se simula un sistema *stand alone* con diez paneles solares marca Evergreen ES 210 fa3b con tensión de circuito abierto de 22,8 V, corriente de cortocircuito de 12,11 A y 114 células; la batería tendrá una capacidad de 500 Ah, con régimen de descarga de 20 horas a 24V; el inversor tendrá una salida trifásica de 220V eficaces; y el consumo de carga será variable.

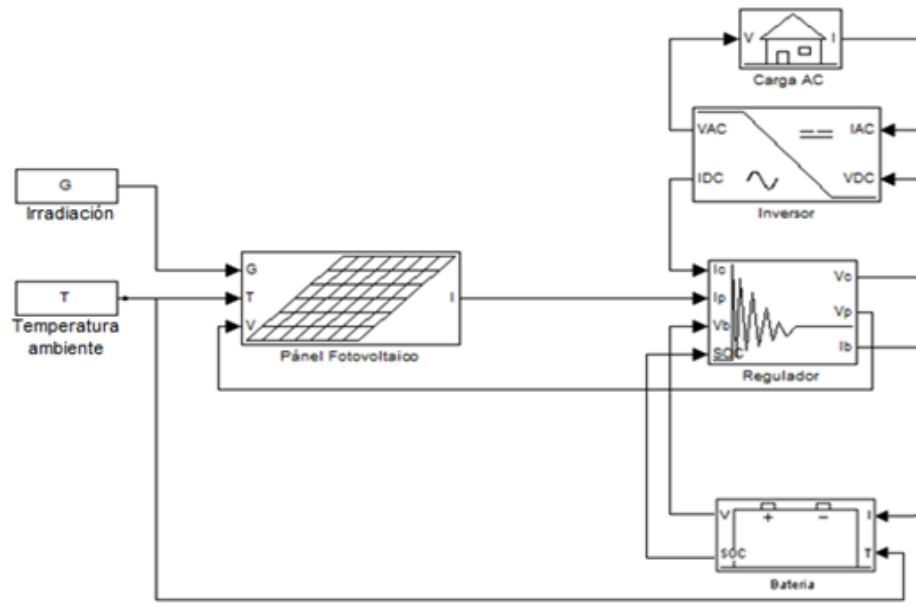
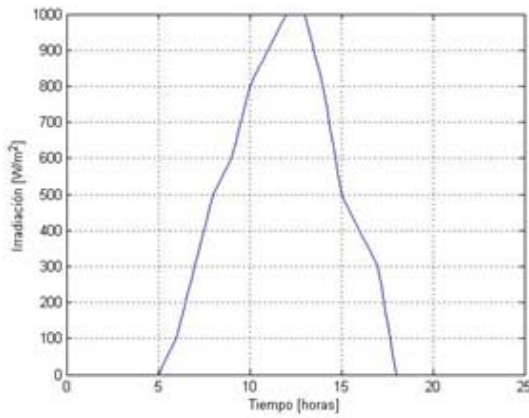
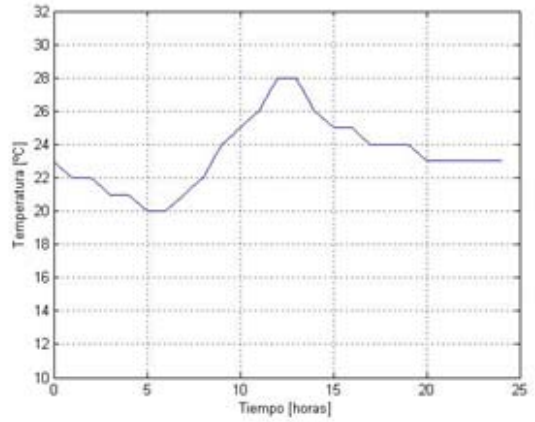


Figura 130. Conexión en SIMULINK del sistema stand alone.

Las entradas de irradiación y temperatura ambiente se muestran en la Figura A.19.



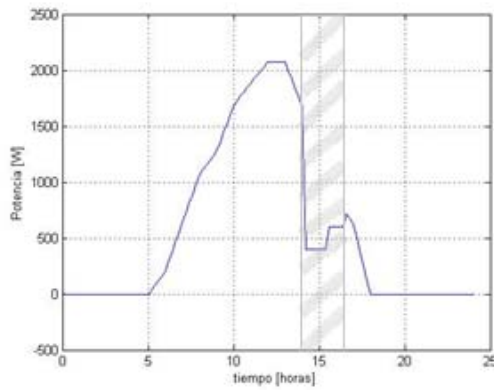
a) Curva de Irradiación



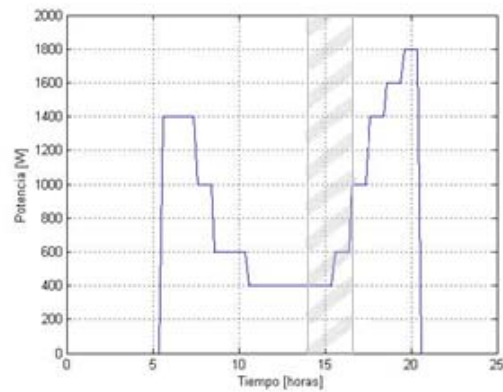
b) Curva de temperatura

Figura 131. Curvas de irradiación y temperatura.

Los resultados obtenidos de la simulación fueron:

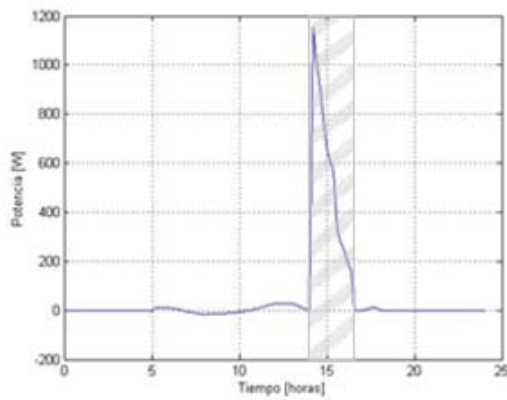


a) *Generación*

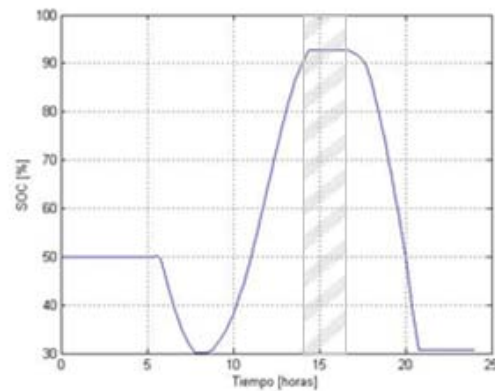


b) *Demanda*

Figura 132. Curvas de generación y demanda.

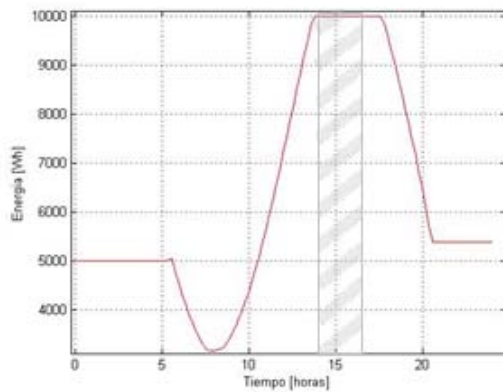


a) *Potencia desaprovechada*

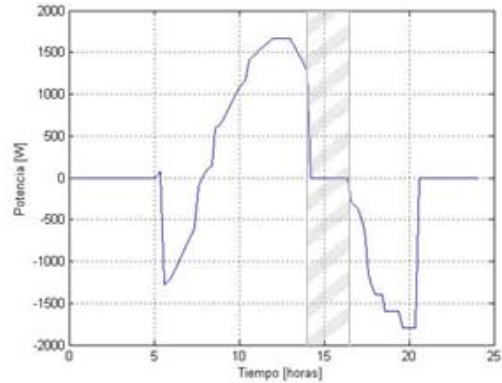


b) *Estado de carga de la batería*

Figura 133. Potencia desaprovechada y estado de carga de la batería.



a) Energía acumulada en la batería



b) Flujo de potencia en la batería

Figura 134. Potencia y energía acumulada en la batería.

En esta simulación se aplica una demanda de potencia variable; en cuanto a los resultados, se observa que la potencia entregada por los paneles fotovoltaicos es la máxima hasta la hora 14, tiempo en el cual la batería está completamente cargada y los paneles deberán entregar únicamente la potencia demandada por la carga.

A partir de las figuras 133 a) y 134 a) se puede ver la potencia desaprovechada en los paneles cuando éstos se adecuan a la potencia demandada, también se observan los estados de carga, energía de la batería y la potencia que ésta entrega y recibe a lo largo del día.

Sistema grid tied

La principal característica de estos sistemas es su capacidad para inyectar energía a la red eléctrica de distribución local, a partir de un inversor *grid tied*, que se sincroniza en tensión y frecuencia con la red. Estos dispositivos generalmente incorporan medición de variables eléctricas. Son de uso popular en aquellos países donde la generación de energía a nivel residencial se encuentra regulado y

se reconoce financieramente a favor del usuario la energía eléctrica inyectada a la red.

En el estudio del modelo matemático para el regulador (Ver sección 2.3), se incorporó la función MPPT, la cual consiste en extraer la máxima potencia de los paneles fotovoltaicos. A diferencia de los sistemas anteriores, el encargado de realizar la gestión de energía eléctrica, en este caso es el inversor, de forma similar a lo realizado por el regulador.

En la herramienta diseñada, las tensiones en corriente alterna y demás variables eléctricas son trabajadas en valores eficaces; por lo cual, a la hora de hacer conexión del sistema fotovoltaico con la red, se asume un valor de frecuencia ideal, y no es necesario especificarlo dentro de las simulaciones. A continuación se presenta el esquema eléctrico y el montaje en SIMULINK del sistema *grid tied* en las figuras 135 y 136 respectivamente.

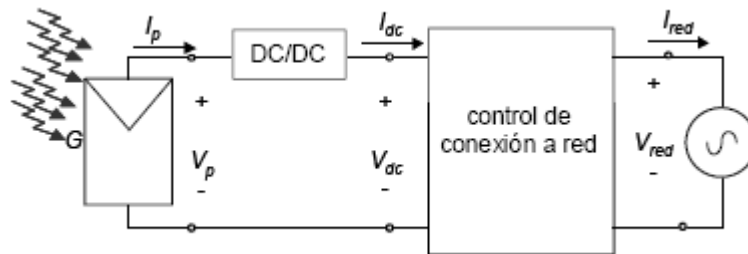


Figura 135. Montaje eléctrico de un sistema Grid Tied [2].

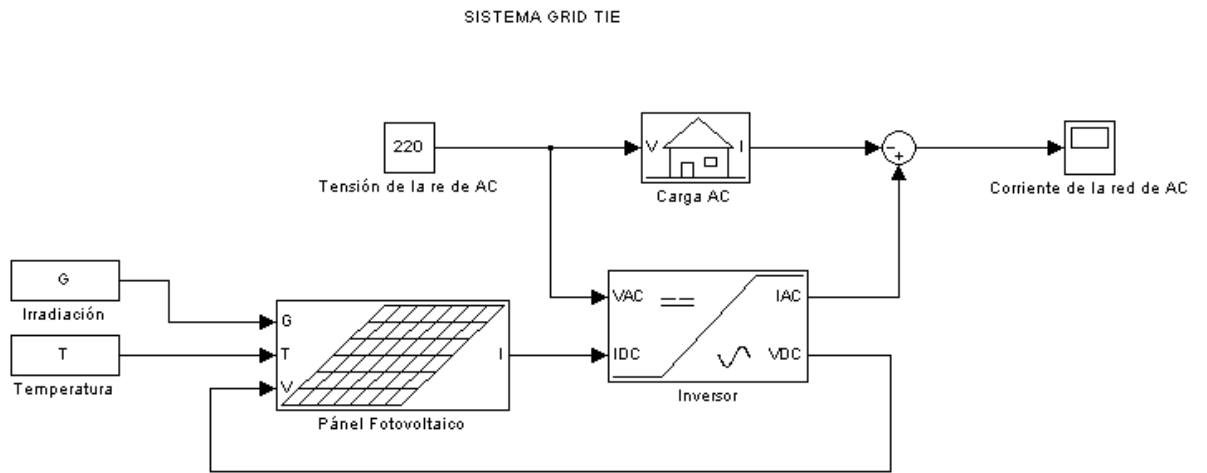


Figura 136. Montaje en SIMULINK de un sistema Grid Tied.

La prueba para este sistema se hace a partir de la simulación del sistema fotovoltaico a implementar en el Edificio de Ingeniería Eléctrica II desarrollado en el capítulo 4.

ANEXO B.

INSTRUCCIONES PARA AGREGAR MODELOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS A LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

La herramienta computacional de este proyecto incluye una sub función que permite al usuario añadir modelos de paneles fotovoltaicos comerciales o personalizados, en caso de ser necesario. A continuación se describe el proceso de inclusión de paneles en la herramienta computacional.

Para ilustrar este proceso es necesario disponer de un catálogo de fabricante, el cual contenga la información esencial para modelar este dispositivo, se utiliza un panel fotovoltaico marca TENESOL TE2000 190W, el cual puede ser consultado en el siguiente link.

<http://pdf.directindustry.es/pdf/tenesol/modulos-fotovoltaicos-te2000-te2200/20497-34443- 2.html>

Para modelar correctamente un panel fotovoltaico en la herramienta computacional debe disponerse de la siguiente información, esto se hará por medio del modelo matemático estudiado en la sección 2.1.

Tabla 25. Parámetros eléctricos para el panel fotovoltaico TE 2000 190W.

PARAMETRO	VALOR
Tensión de circuito abierto	33,1V
Corriente de cortocircuito	1,7 A
Temperatura nominal de operación de una célula (NOCT)	45 °C
Coefficiente de temperatura para la tensión	- 0,11448 V/°C
Coefficiente de temperatura para la corriente	0,0024 A/°C
Número de células	54 Células
Potencia máxima	190W
Tensión de potencia máxima	16,8V
Corriente de potencia máxima	7,1A

Luego de extraídos los parámetros más importantes del panel fotovoltaico, se procede a abrir la interfaz del panel fotovoltaico de la herramienta SIMULINK_FV, como se indicó en el capítulo 5, después vaya al menú “modulo fotovoltaico” de la Figura 137.

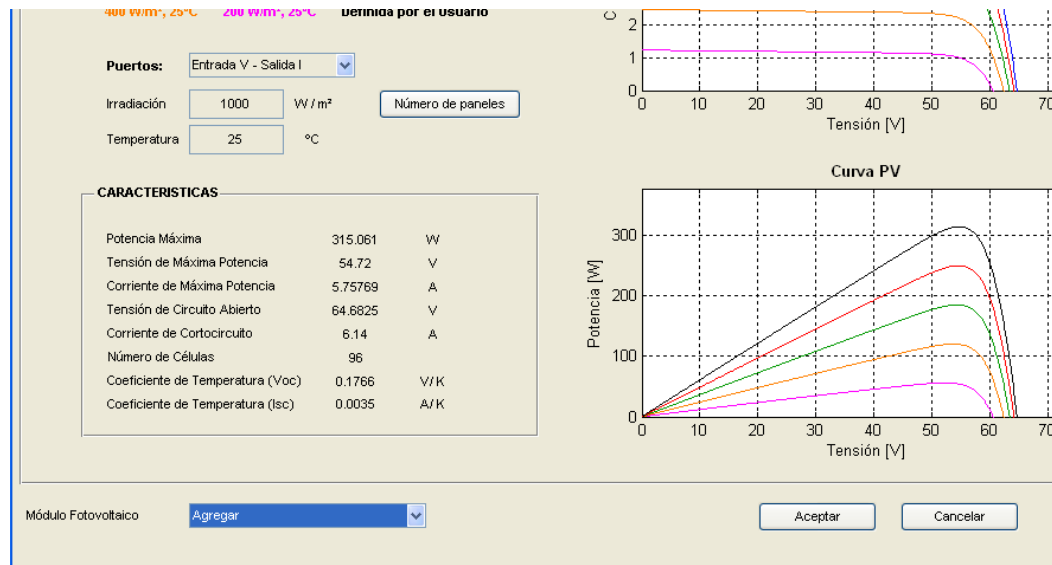


Figura 137. Interface panel fotovoltaico

A continuación se desplegará una lista de 53 paneles fotovoltaicos; al final de esta seleccione la opción “agregar”.

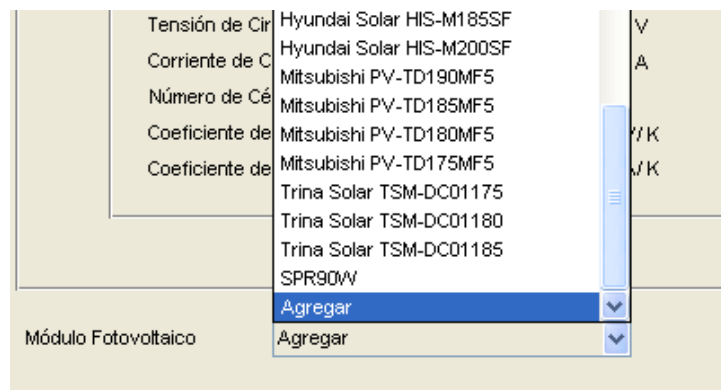


Figura 138. Base de datos de paneles fotovoltaicos.

Después de seguir los pasos anteriores, aparecerá la ventana de edición de parámetros de la Figura 139.

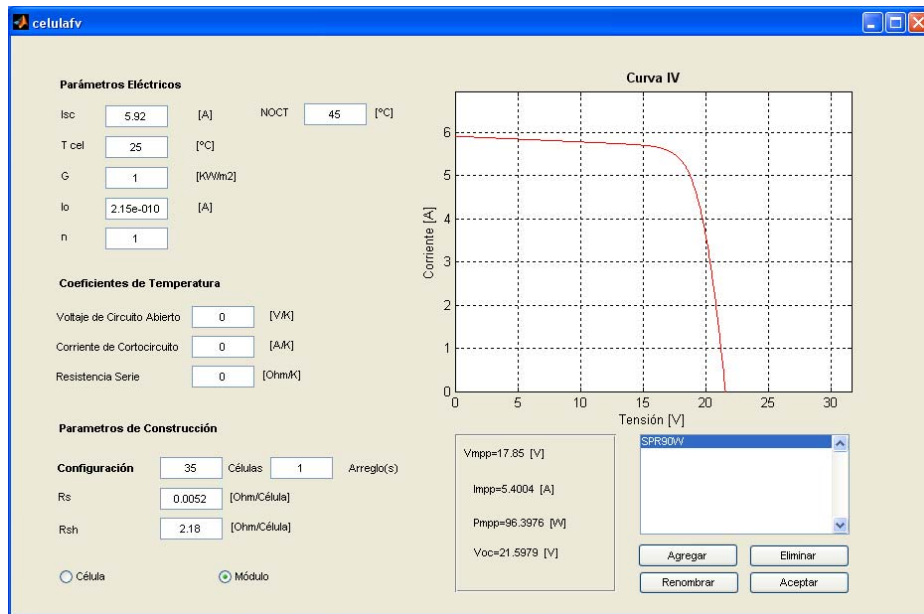


Figura 139. Herramienta de edición de paneles fotovoltaicos.

Seleccione el botón agregar de la ventana de la Figura 139 y asígnele un nombre al nuevo panel fotovoltaico, por medio del cuadro de dialogo de la Figura 140.

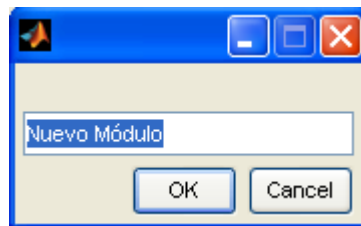


Figura 140. Cuadro de dialogo, botón "agregar".

En la parte inferior de la ventana de edición de parámetros Figura 141. seleccione la opción “célula”, con lo cual se modelará el panel fotovoltaico a partir de una célula solar.

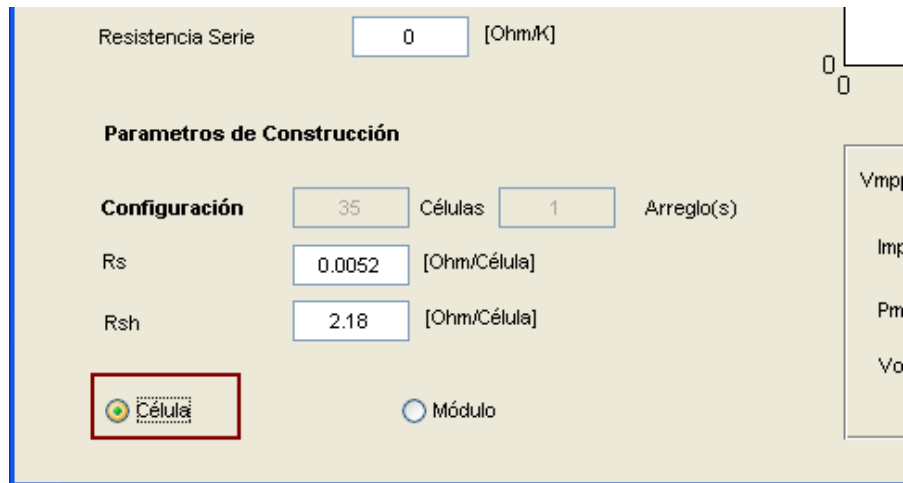


Figura 141. Herramienta de edición de paneles fotovoltaicos.

A continuación introduzca la información de la Tabla 25 en la interfaz como se indica en la Figura 142.

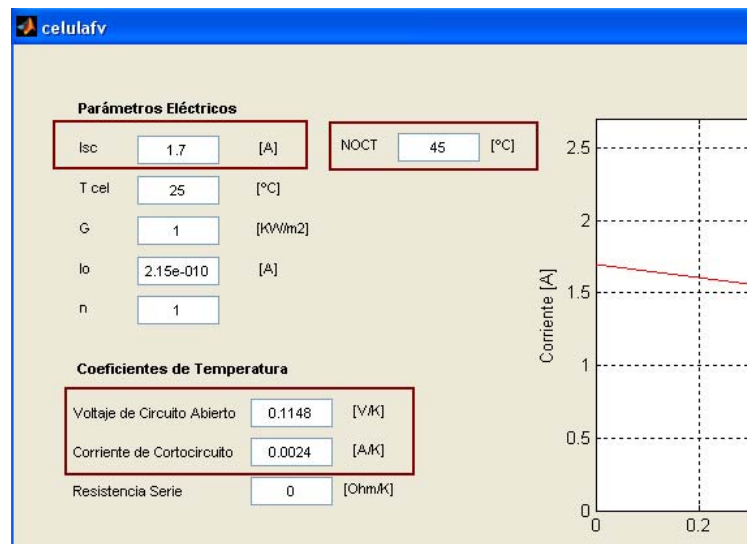


Figura 142. Herramienta de edición de paneles fotovoltaicos.

Calcule el valor de tensión de circuito abierto de una célula fotovoltaica, esto se hace dividiendo la tensión de circuito abierto suministrada por el fabricante entre el número de células también suministrado por el fabricante.

$$V_{OC} = \frac{33.1V}{54} = 0.6130 V \quad (B.1)$$

Ajuste la corriente de saturación I_0 de la interfaz hasta que coincida con el valor de la ecuación (B.1) como se indica en la Figura 143.

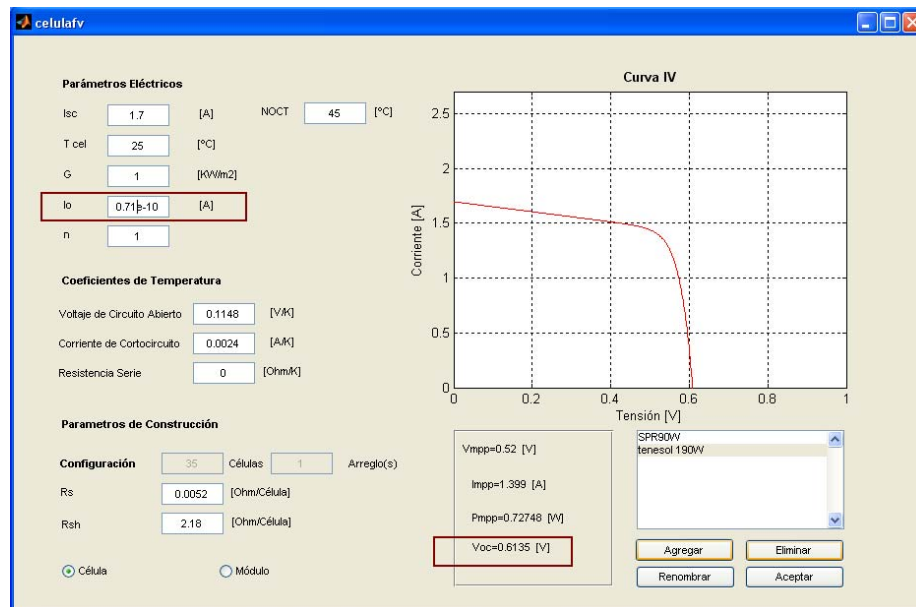


Figura 143. Herramienta de edición de paneles fotovoltaicos.

En la parte inferior de la interfaz active la casilla “módulo” e introduzca el número de células, como se indica en la Figura 144.

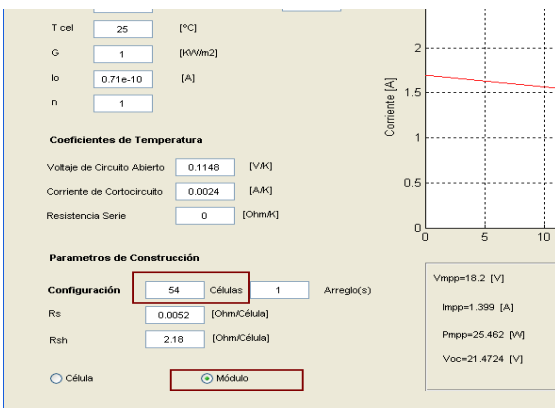


Figura 144. Herramienta de edición de paneles fotovoltaicos.

Finalmente, ajuste los valores de resistencia serie (R_s), resistencia en paralelo (R_{sh}) y coeficiente de temperatura para resistencia serie mostrados en la Figura 145, hasta encontrar valores de potencia nominal, tensión y corriente de máxima potencia cercanos a los suministrados por el fabricante.

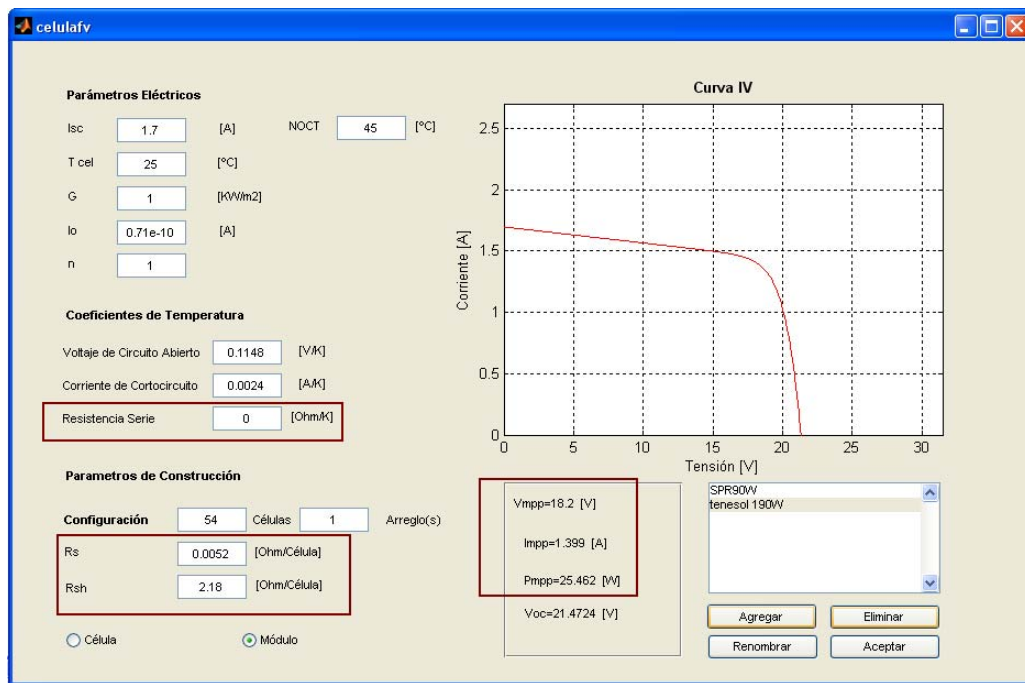


Figura 145. Herramienta de edición de paneles fotovoltaicos.

ANEXO C.

DATOS TÉCNICOS DE MODELOS COMERCIALES DE BATERÍAS, REGULADORES E INVERSORES

La herramienta computacional de este proyecto no incluye modelos comerciales de baterías, reguladores e inversores; este anexo le facilitará al estudiante los datos técnicos necesarios en el manejo de la herramienta de algunos modelos disponibles en el mercado de estos elementos.

Tabla 26. Modelos comerciales de baterías.

BATERIAS				
Modelo		Especificaciones técnicas		
		Tensión [V]	Capacidad [Ah]	Régimen de descarga [h]
Baterías solares trojan	24TMX	12	70	5
	27TMX	12	85	5
	27TMH	12	115	20
	30XHS	12	130	20
	T-1275	12	166	100
	J185E-AC	12	194	100
	J185H-AC	12	249	100
SOLENER	Baterías Monoblock	12	72	100
		12	106	100
		12	165	100
		12	216	100
		12	250	100
	Acumuladores Estacionarios	12	205	100
		12	361	100
		12	433	100
		12	519	100
		12	627	100

		12	731	100
		12	900	100
		12	1 200	100
		12	1 500	100

Tabla 27. Modelos comerciales de reguladores.

REGULADORES					
Modelo		Especificaciones técnicas			
		Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	
Reguladores MorningStar	MorningStar ProStar 15M	12	15	180	
		24	15	360	
	MorningStar ProStar 30M	12	30	360	
		24	30	720	
	TriStar PWM 45	12	45	540	
		24	45	1 080	
		48	45	2 160	
	TriStar PWM 60	12	60	720	
		24	60	1 440	
		48	60	2 880	
	TriStar MPPT 45	12	45	540	
		24	45	1 080	
		36	45	1 620	
		48	45	2 160	
	TriStar MPPT 60	12	60	720	
		24	60	1 440	
		36	60	2 160	
		48	60	2 880	
	SOLENER	DSD 10	12	10	120
			24	10	240
DSD 30		12	30	360	
		24	30	720	
DSD 50		12	50	600	

		24	50	1 200
	DSD 20	48	20	960
	DSD 40	48	40	1 920
	DSS 10	12	10	120
		24	10	240
	DSS 30	12	30	360
		24	30	720

Tabla 28. Modelos comerciales de inversores.

INVERSORES				
Modelo		Especificaciones técnicas		
		Tensión DC [V]	Tensión AC [V]	Potencia [VA]
Inversores Studer	Studer Xtender XTH8000-48	48	230	8 000/7 000
	Studer Xtender XTH6000-48	48	230	6 000/5 000
	Studer Xtender XTH5000-24	24	230	5 000/4 500
	Studer Xtender XTH3000-12	12	230	3 000/2 500
	Studer Xtender XTM4000-48	48	230	4 000/3 500
	Studer Xtender XTM3500-24	24	230	3 500/3 000
	Studer Xtender XTM2000-12	12	230	2 000/2 000
	Studer Xtender XTM2600-48	48	230	2 600/2 000
	Studer Xtender XTM2400-24	24	230	2 400/2 000
	Studer Xtender XTM1500-12	12	230	1 500/1 500
Inversores solares TBS Electronics	PS300-12	12	230 +/-2% ó 115 +/- 2%	250
	PS350-24	24	231 +/-2% ó 115 +/- 2%	300
	PS600-12	12	232 +/-2% ó 115 +/- 2%	500
	PS800-24	24	233 +/-2% ó 115 +/- 2%	600
	PS1000-12	12	234 +/-2% ó 115 +/- 2%	850
	PS1400-24	24	235 +/-2% ó 115 +/- 2%	1 000

	PS1600-12	12	236 +/-2% ó 115 +/-2%	1 300
	PS1800-24	24	237 +/-2% ó 115 +/-2%	1 400
SOLENER	Inversor-Trifasico 220 V/380+N	300	220 V/380+N	5 000
	Inversor-Trifasico 220 V/380+N	300	220 V/380+N	7 500
	Inversor-Trifasico 220 V/380+N	300	220 V/380+N	15 000
Inversores Fotovoltaicos Riello-Aros	Riello Aros Sirio 1500	150	230	1 500
	Riello Aros Sirio 2000	150	230	2 000
	Riello Aros Sirio 2800	150	230	2 800
	Riello Aros Sirio 3100	150	230	3 100
	Riello Aros Sirio 4000	150	230	4 000
	Riello Aros Sirio 4000P	150	230	4 000
	Riello Aros Sirio 4600P	150	230	4 600
	Riello Aros Sirio 6000P	180	230	6 000
	Riello Aros Sirio 10000P	350	400	10 000
	Riello Aros Sirio K12	540-640	320-480	12 000
	Riello Aros Sirio K15	540-640	340-460	15 000
	Riello Aros Sirio K18	540-640	340-460	18 000
	Riello Aros Sirio K25	540-640	340-460	25 000
	Riello Aros Sirio K33	540-460	340-460	33 000
	Riello Aros Sirio K40	540-640	340-460	40 000
	Riello Aros Sirio K64	540-640	340-460	64 000
	Riello Aros Sirio K80	540-640	340-460	80 000
Riello Aros Sirio K100	540-640	340-460	100 000	
Riello Aros Sirio K200	540-640	340-460	200 000	

ANEXO D.

COMPILADORES PARA WINDOWS 7

La herramienta computacional de este proyecto fue diseñada en *Windows xp* y puesta a prueba en MATLAB 7.7.0 R2008b, por lo tanto no se garantiza su funcionamiento en otro sistema operativo o en alguna versión de MATLAB más antigua a la especificada, sin embargo es posible su correcto funcionamiento en *Windows 7* instalando los compiladores adjuntos a esta herramienta computacional.

Al ejecutarse cualquier simulación en *Windows 7*, SIMULINK desplegará un cuadro de error como el que se muestra en la Figura 146, este error se debe a que SIMULINK no encuentra los compiladores para procesar los bloques de la herramienta computacional, de esta manera el usuario puede determinar si es necesaria la instalación de los compiladores.

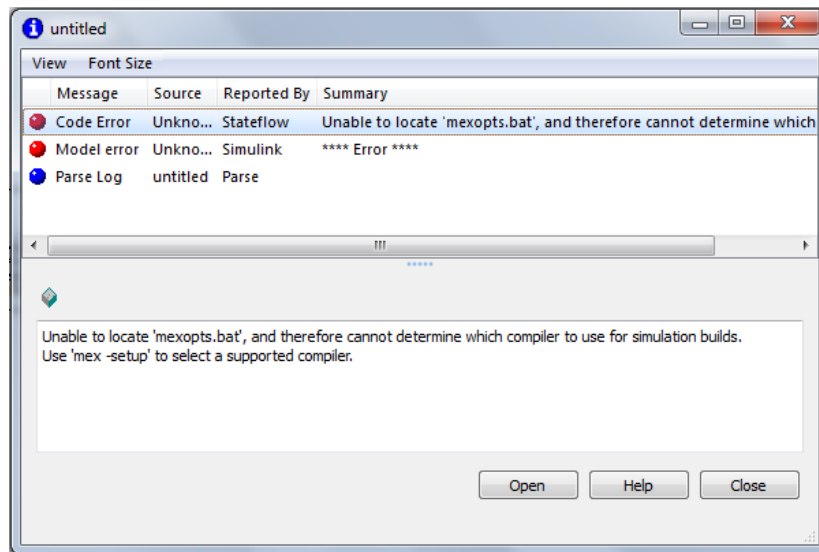


Figura 146. Error que hace necesario el uso de los compiladores

Pasos para instalar los compiladores para Windows 7

1. En la carpeta de compiladores para Windows 7 existe un archivo de block de notas, el cual contiene el link de descarga e instalación en línea de *Visual Basic 2008 Express*.



Figura 147. Pagina web para la descarga de Visual Basic 2008 Express

2. Ejecute el archivo para su instalación

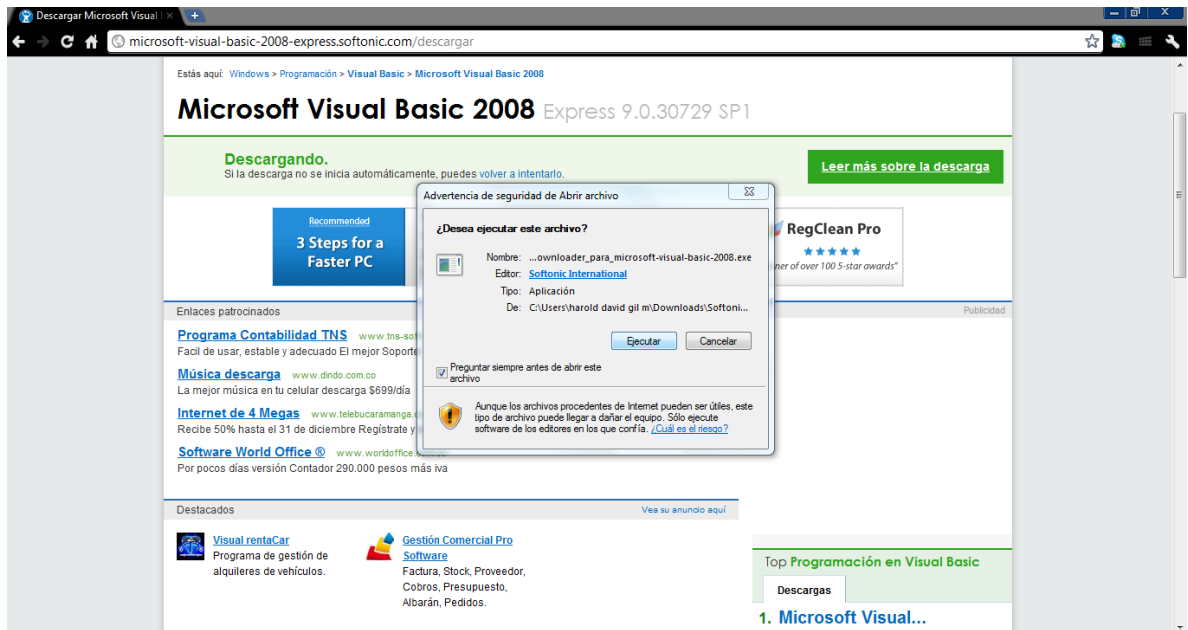


Figura 148. Descarga en línea de Visual Basic 2008 Express

3. Siga las indicaciones del programa de instalación y espere hasta que termine.

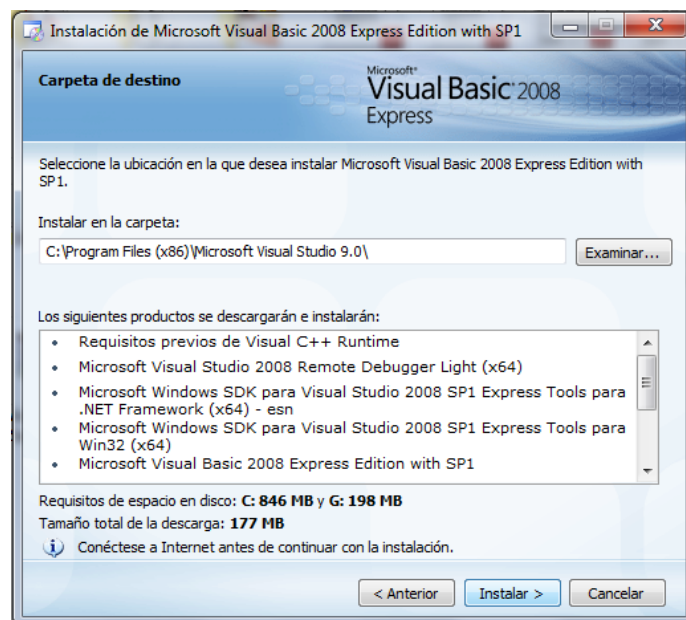


Figura 149. Instalación de Visual Basic 2008 Express

Hasta esta instancia solo se ha instalado *Visual Basic 2008 Express*, ahora es necesaria la instalación de *Microsoft Software Development Kits (SDK)*, la cual proporciona la documentación, ejemplos de código, herramientas, encabezados, bibliotecas y otros archivos que pueden ser utilizados para crear aplicaciones de software y bibliotecas.

4. Se abre el instalador de *SDK* con la extensión *.iso*, el cual se encuentra en la carpeta adjunta a la herramienta computacional, para ejecutarlo es necesario disponer de algún *software* especializado en imágenes virtuales como *Alcohol*, *PowerISO* u otros.

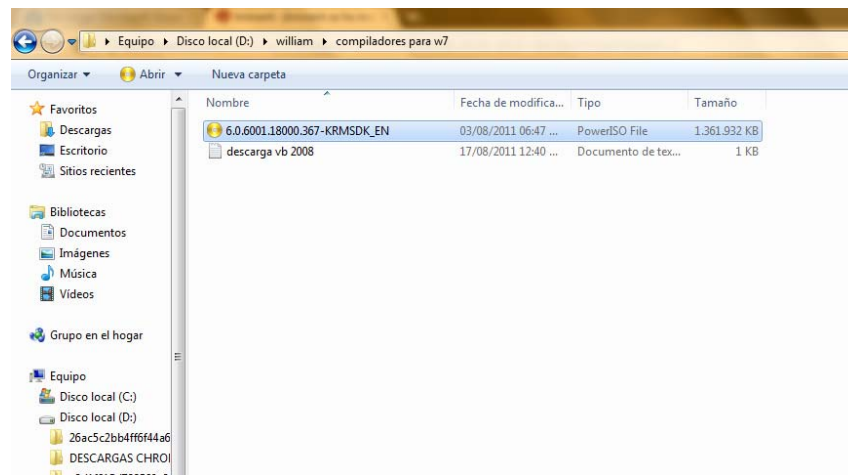


Figura 150. Imagen Virtual de SDK

5. Una vez abierta la carpeta de instalación, se ejecuta el archivo *setup.exe* de la Figura 151.

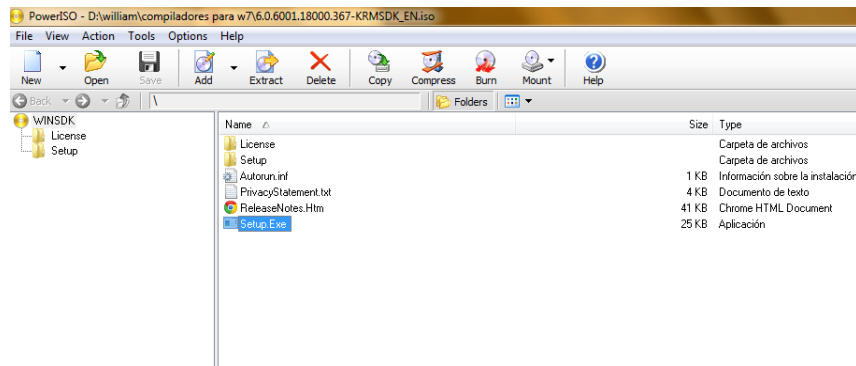


Figura 151. Carpeta de instalación de SDK

- En el cuadro de dialogo de la Figura 152 se selecciona un folder temporal para la extracción de los archivos de instalación.

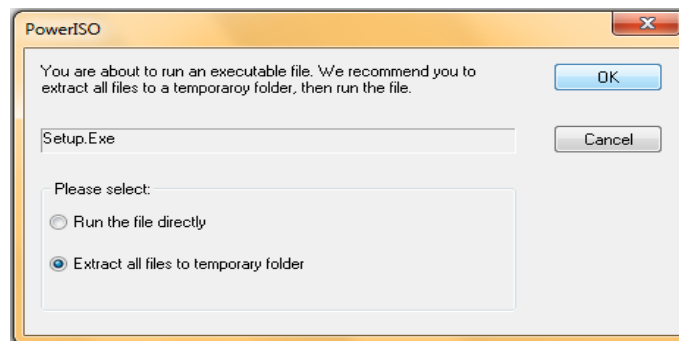


Figura 152. Archivos temporales para la instalación de SDK

- Se continúa con las etapas de instalación existentes en el instalador de SDK.

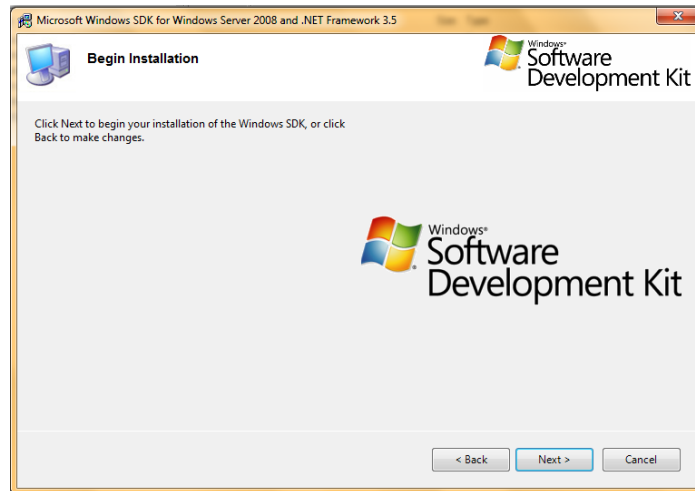


Figura 153. Programa de instalación de SDK

Una vez finalizada la instalación se procede a hacer el reconocimiento de los compiladores en MATLAB.

8. Desde el *comand window* de MATLAB se escribe la siguiente sentencia:

```
>>mex -setup
```

Como se muestra en la Figura 154, se procede a seleccionar el compilador “*Microsoft Visual C++ 2008 Express*” de la lista que aparece en el *comand window*.

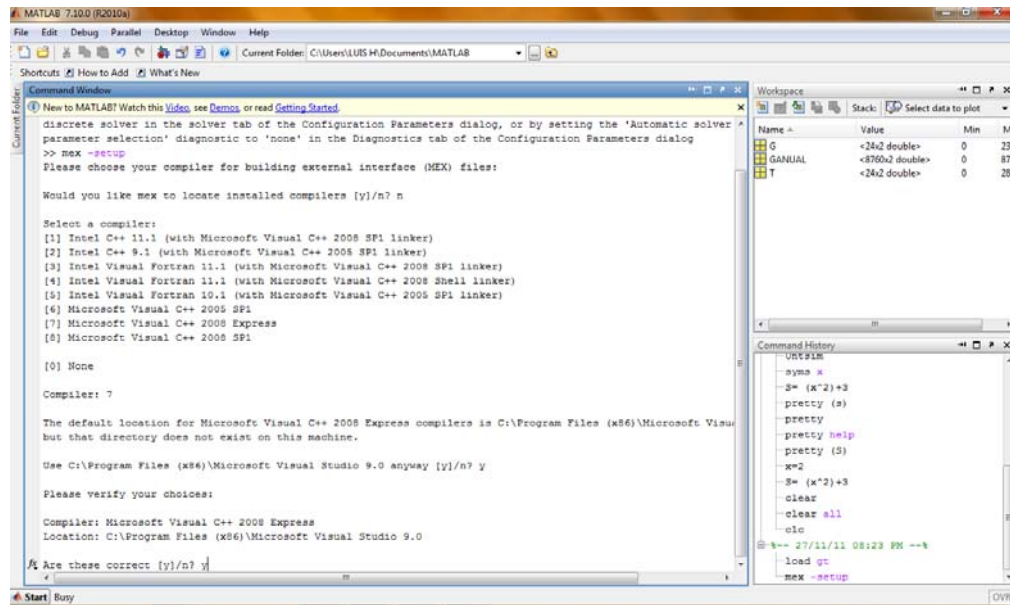


Figura 154. Selección de compiladores en MATLAB

La pantalla de la Figura 155 indica que la herramienta computacional esta lista para trabajar en Windows 7.

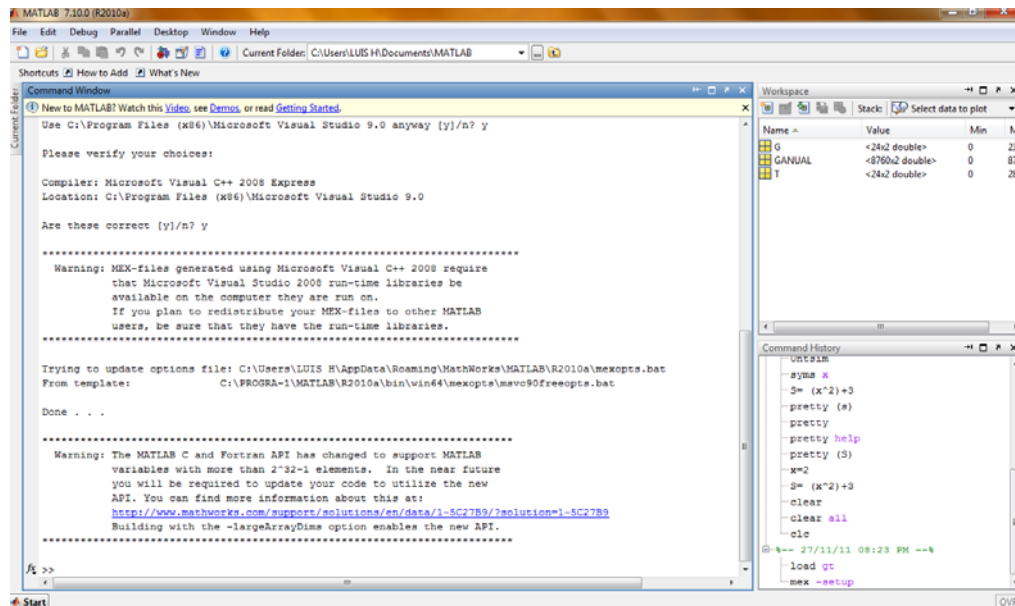


Figura 155. Finalización de la instalación