

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO DE  
ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA  
BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA.**

**MARTHA LUCIA GARCÍA SUAREZ  
WENDY XIOMARA SEPÚLVEDA VEGA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SECCIONAL BUCARAMANGA**

**2015**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO DE  
ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA  
BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA.**

**MARTHA LUCIA GARCÍA SUAREZ  
WENDY XIOMARA SEPÚLVEDA VEGA**

**Trabajo de grado como requisito para optar por el título de Ingeniero  
Mecánico**

**Director:  
OSCAR ANDRÉS LÓPEZ ANAYA  
Ingeniero Electrónico  
M.Sc. Energías Renovables**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SECCIONAL BUCARAMANGA**

**2015**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

FIRMA DEL DIRECTOR

---

FIRMA DEL JURADO

---

FIRMA DEL JURADO

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto de tesis a Dios primero que todo porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, A mi madre quien a lo largo de toda mi vida ha apoyado y motivado mi formación académica, y a mi padre que a pesar de que no está conmigo desde hace muchos años siempre he sentido su acompañamiento. A mi esposo que ha sido mi apoyo y ha estado a mi lado siendo una fuente de motivación en los momentos de decline y cansancio.

**MARTHA LUCIA GARCÍA SUAREZ**

Principalmente a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto, a mis padres, pilares fundamentales en mi vida; sin ellos, jamás habría llegado a donde estoy ahora, pues su tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y destacar, no solo para mí, sino para mis hermanas y familia en general. A mis hermanas pues ellas fueron, son y serán el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional y personal, han sido en cada momento mi motivación y la fuente de luz de mi vida.

**WENDY XIOMARA SEPÚLVEDA VEGA**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradecemos a Dios por permitirnos llegar hasta este punto, guiándonos y dándonos la fuerza y sabiduría necesarias para alcanzar nuestros objetivos.

Agradecemos el esfuerzo conjunto de todos los que formaron parte del grupo de trabajo, quienes de una u otra forma contribuyeron al desarrollo de este proyecto, aquellos sin los que esto no habría sido posible, pues pusieron a disposición del proyecto su tiempo, esfuerzo y conocimientos. Al Ingeniero Andrés López, director de proyecto quien nos orientó durante todo el camino, a los Ingenieros Víctor<sup>2</sup> Cuellar, Diego Parra, Juan Carlos Villamizar y a Luis Peña, quienes hicieron un gran aporte en el proyecto y que siempre nos tendieron la mano.

A nuestros profesores a quienes les debemos nuestros conocimientos, gracias a su paciencia, consejos y enseñanza. Y finalmente un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad la cual nos abrió sus puertas, preparándonos y formándonos como profesionales competitivos.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION .....	20
1. ALCANCE .....	21
2. JUSTIFICACION.....	22
3. OBJETIVOS .....	23
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	23
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	23
4. MARCO TEÓRICO .....	25
4.1 ¿QUÉ ES EL SOL? .....	25
4.2 ¿QUÉ ES LA ENERGÍA SOLAR?.....	26
4.3 RADIACIÓN SOLAR .....	27
4.3.1 Tipos de radiación .....	28
4.4 ESPECTRO SOLAR.....	30
4.5 IRRADIACIÓN .....	30
4.6 IRRADIANCIA .....	30
4.7 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR.....	30
4.8 ENERGÍA SOLAR TÉRMICA O CONVERSIÓN FOTO-TÉRMICA.....	31
4.9 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	32
4.9.1 Efecto fotovoltaico.....	33
5. SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICO .....	34
5.1 MÓDULOS O PANELES FOTOVOLTAICOS .....	35
5.1.1 Tipos de paneles .....	36
5.1.2 Características eléctricas de un modulo fotovoltaico .....	40
5.2 INVERSORES AUTONOMOS OFF-GRID.....	40
6. MODOS DE FUNCIONAMIENTO.....	43
6.1 SISTEMAS CONECTADOS A RED (GRID-TIE) .....	44

<b>6.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS (OFF GRID).....</b>	<b>46</b>
<b>6.2.1 Partes de un sistema Off-Grid.....</b>	<b>47</b>
<b>6.2.1.1 Baterías.....</b>	<b>47</b>
<b>6.3 CONTROLADORES.....</b>	<b>51</b>
<b>6.3.1 Tipos de controladores. ....</b>	<b>51</b>
<b>6.3.2 Ventajas y desventajas de los controladores PWM y MPPT .....</b>	<b>53</b>
<b>6.4 MONITOR DE BATERÍA .....</b>	<b>54</b>
<b>6.5 GUARDIÁN DE BATERÍA.....</b>	<b>57</b>
<b>6.5.1 Características del guardián de baterías .....</b>	<b>57</b>
<b>6.6 PIRANOMETRO .....</b>	<b>58</b>
<b>6.7 KILL A WATT .....</b>	<b>59</b>
<b>7. FACTORES DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS .....</b>	<b>60</b>
<b>7.1 PÉRDIDAS POR LA TOLERANCIA DE LA POTENCIA NOMINAL.....</b>	<b>60</b>
<b>7.2 PÉRDIDAS DE MISMATCH DE MÓDULOS .....</b>	<b>61</b>
<b>7.3 PÉRDIDAS POR POLVO Y SUCIEDAD .....</b>	<b>62</b>
<b>7.4 PÉRDIDAS POR CAÍDAS OHMICAS EN EL CABLEADO .....</b>	<b>63</b>
<b>7.5 PÉRDIDAS POR TEMPERATURA .....</b>	<b>63</b>
<b>7.6 PÉRDIDAS POR SOMBREADO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO .....</b>	<b>64</b>
<b>8. USO DE LA ENERGÍA SOLAR EN LA HISTORIA.....</b>	<b>66</b>
<b>8.1 ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA.....</b>	<b>67</b>
<b>9. ESTADO DE ARTE DE BANCOS DE PRUEBA.....</b>	<b>68</b>
<b>9.1 LABORATORIOS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN EL MUNDO.</b>	<b>69</b>
<b>9.2 LABORATORIOS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA.</b>	<b>70</b>
<b>9.2.1 EPSA .....</b>	<b>71</b>
<b>9.2.2 Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.....</b>	<b>71</b>
<b>9.2.3 Universidad de la Costa (Barranquilla). ....</b>	<b>72</b>
<b>9.3 LABORATORIOS DE ENERGÍA SOLAR EN BUCARAMANGA .....</b>	<b>73</b>
<b>9.3.1 Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB) .....</b>	<b>73</b>
<b>9.3.2 Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) .....</b>	<b>74</b>
<b>10. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....</b>	<b>76</b>

10.1 MÓDULO No.1: SILICIO MONO-CRISTALINO .....	78
10.2 MODULO No.2: SILICIO POLI-CRISTALINO .....	79
10.3 MÓDULO No.3: SILICIO AMORFO .....	80
10.4 MODULO No.4: SILICIO AMORFO .....	81
11. DISEÑO Y CALCULO DEL SISTEMA .....	82
11.1 ANGULO ÓPTIMO .....	82
11.1.1 Ubicación.....	82
11.2 ESTIMACION DEL CONSUMO.....	86
11.3 DIMENSIONADO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO .....	88
11.4 TENSIONES NOMINALES DE TRABAJO SEGÚN LA CARGA .....	91
11.5 NUMERO DE PANELES EN SERIE.....	91
11.6 NUMERO DE PANELES EN PARALELO.....	92
11.7 DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMA DE ACUMULACION .....	93
11.8 DIMENSIONAMIENTO DEL REGULADOR .....	94
11.8.1 Dimensionamiento del regulador mediante formulas.....	94
11.8.2 Dimensionamiento del regulador mediante el software de victron .....	96
11.8.3 Dimensionamiento en el software con una tensión a 12 v .....	97
11.8.4 Dimensionamiento por software a una tensión a 24v.....	106
11.9 DIMENSIONAMIENTO DEL INVERSOR .....	107
12. SELECCIÓN DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS .....	109
13. DISEÑO ESTRUCTURAL .....	112
14. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN .....	120
15. PRUEBAS Y TOMA DE DATOS .....	129
16. ESTADOS DE FUNCIONAMIENTO .....	154
17. PROGRAMACIÓN DE LOS EQUIPOS .....	162
17.1 CONFIGURACIÓN DEL GUARDIÁN DE BATERÍAS.....	162
17.2 PROGRAMACIÓN DEL MONITOR DE BATERÍAS.....	164
18. PRESUPUESTO .....	166
18.1 PRESUPUESTO ASUMIDO POR LA UNIVERSIDAD .....	166
18.2 PRESUPUESTO ESTUDIANTES.....	167

<b>19. CONCLUSIONES .....</b>	<b>168</b>
<b>20. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>171</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>172</b>
<b>LISTA DE ANEXOS.....</b>	<b>177</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1. Fusión nuclear .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura2. Mapa de radiación solar Colombia .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 3. Tipos de radiación .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 4. Ciclo de absorción y funcionamiento de un sistema térmico .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 5. Efecto fotovoltaico .....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 6. Panel de silicio amorfo (A-Si) .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 7. Panel de silicio mono-cristalino (C-Si).....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 8. Panel de silicio poli-cristalino MC-Si .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 9. Inversor Victron.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 10. Modos de funcionamiento.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 11. Instalación Off-Grid y Grid-Tie .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 12. Sistema Grid-Tie.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 13. Sistema Off-Grid.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 14. Batería AGM solar .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 15. Batería de plomo acido.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 16. Batería AGM.....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 17. Batería de gel.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 18. Controlador MPPT.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 19. Controlador PWM.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 20. Monitor de baterías victron BMV-700 .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 21. Protector de baterías o guardián de baterías .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 22. Medidor de radiación solar.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 23. Kill a watt .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 24. Ejemplo de un sistema FV con pérdidas de sombreado .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 25. Laboratorio FV conex .....</b>	<b>69</b>

<b>Figura 26. Foto del edificio ‘Ciesol’ en el Campus de La Cañada.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 27. Instalación del Laboratorio EPSA.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 28. Plazoleta vida iluminada por un sistema Fotovoltaico .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 29. Laboratorio Universidad de la Costa.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 30. Laboratorio UNAB.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 31. Laboratorio Sena girón.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 32. Sistema off-grid parqueaderos Sena.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 33. MODULO No.1: SILICIO MONO-CRISTALINO .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 34. MODULO No.2: SILICIO POLI-CRISTALINO .....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 35. MODULO No.3: SILICIO AMORFO.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 36. MODULO No.4: SILICIO AMORFO.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 37. Latitud y longitud.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 38. Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 39. Arreglo de paneles FV .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 40. Aspecto gráfico del software Calculate Victron .....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 41. Ubicación de la base de datos .....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 42. Selección de parámetros (Silicio monocristalino).....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 43. Selección de parámetros (Silicio amorfo de 100W) .....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 44. Selección de parámetros (Silicio amorfo 142W) .....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 45. Selección de parámetros (Silicio policristalino 135W) .....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 46. Selección de parámetros (Silicio policristalino).....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 47. Plano estructural del banco de silicio amorfo.....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 48. Plano estructural del banco de silicio mono-cristalino y poli-cristalino .....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 49. Modelamiento del banco de silicio mono- cristalino y poli-cristalino en solid-works .....</b>	<b>117</b>
<b>Figura 50. Modelamiento del banco de silicio amorfo en solid-works .....</b>	<b>118</b>
<b>Figura 51. Estructura de acero cold rolled o acero 1018.....</b>	<b>119</b>

<b>Figura 52. Banco de prueba de energía solar fotovoltaica. Modulo No.4: Silicio amorfo.....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 53. Estructura .....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 54. Estructura con láminas soldadas .....</b>	<b>121</b>
<b>Figura 55. Estructura pintada anticorrosivo gris .....</b>	<b>122</b>
<b>Figura 56. Estructura con pintura electrostática.....</b>	<b>123</b>
<b>Figura 57. Instalación .....</b>	<b>123</b>
<b>Figura 58. Resultado final del montaje del sistema .....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 59. Módulos conectados listos para pruebas.....</b>	<b>125</b>
<b>Figura 60. Prácticas en el diplomado de instalaciones de energías renovables y bioclimáticas .....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 61. Clase de laboratorio de la optativa de energías renovables .....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 62. Ciimca 2015 .....</b>	<b>127</b>
<b>Figura 63. Diplomado de instalaciones de energías renovables y bioclimaticas UPB (Primer cohorte).....</b>	<b>128</b>
<b>Figura 64. Diplomado de instalaciones de energías renovables y bioclimaticas UPB (Segundo cohorte).....</b>	<b>128</b>
<b>Figura 65. Diagrama de conexión a 12 voltios 100ah con un controlador MPPT .....</b>	<b>154</b>
<b>Figura 66. Diagrama de conexión a 12 voltios 100ah con un controlador PWM.....</b>	<b>154</b>
<b>Figura 67. Diagrama de conexión de un sistema con controlador MPPT y paneles conectados en paralelo.....</b>	<b>155</b>
<b>Figura 68. Diagrama de conexión de un sistema con controlador MPPT con paneles y baterías conectadas en paralelo .....</b>	<b>156</b>
<b>Figura 69. Diagrama de conexión para paneles y baterías conectadas en paralelo con un controlador PWM.....</b>	<b>157</b>
<b>Figura 70. Diagrama de conexión para paneles y baterías en serie con un controlador PWM .....</b>	<b>158</b>

<b>Figura 71. Diagrama de conexión para paneles y baterías en serie con un controlador MPPT .....</b>	<b>159</b>
<b>Figura 72. Diagrama de conexión de baterías en serie con un panel y un controlador MPPT .....</b>	<b>160</b>
<b>Figura 73. Conexión de dos controladores a una batería .....</b>	<b>161</b>
<b>Figura 74. Conexión del guardian de baterías.....</b>	<b>162</b>
<b>Figura 75. Monitor de baterías y Shunt .....</b>	<b>164</b>
<b>Figura 76. Conexión de las baterías con el monitor . .....</b>	<b>165</b>

## LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Tipo de ondas.....	42
Gráfica 2. Valores típicos de los porcentajes por pérdidas energéticas.....	61
Gráfica 3. Gráfica Voltaje vs. Temperatura y Corriente vs. Temperatura panel de silicio monocristalino.....	100
Gráfica 4. Gráfica Voltaje vs. Temperatura y Corriente vs. Temperatura panel de silicio amorfo 100w.....	102
Gráfica 5. Gráfica Voltaje vs. Temperatura y Corriente vs. Temperatura panel de silicio amorfo 142w.....	103
Gráfica 6. Gráfica Voltaje vs. Temperatura y Corriente vs. Temperatura panel de silicio policristalino.....	105
Gráfica 7. Gráfica Voltaje vs. Temperatura y Corriente vs. Temperatura panel de silicio policristalino a 24V.....	107
Grafica 8. Corriente de la batería con respecto a la Irradiancia.....	129
Grafica 9. Perfil de variación del voltaje de la batería.....	131
Grafica 10. Perfil de descarga para una batería a 12vdc del módulo de silicio poli-cristalino .....	132
Grafica 11. Perfil de descarga a 12vdc del módulo de silicio mono-cristalino .....	133
Grafica 12. Perfil de descarga a 12vdc del módulo de silicio amorfo .....	134
Grafica 13. Perfil de descarga para baterías en paralelo a 12vdc/155w del modulo de silicio poli-cristalino .....	135
Grafica 14. Perfil de descarga para baterías en paralelo a 24vdc/140w del módulo de silicio amorfo.....	136
Grafica 15. Perfil de carga a 12vdc con un nivel irradiancia baja y dos diferentes controladores .....	138

<b>Grafica 16. Perfil de carga de baterias a 12vdc empleando controladores MPPT y PWM. ....</b>	<b>139</b>
<b>Grafica 17. Perfil de carga de una batería de litio de 3200 mAh. ....</b>	<b>140</b>
<b>Grafica 18. Perfil de irradiación en un día nublado (27/10/2015) ....</b>	<b>141</b>
<b>Grafica 19. Perfil de irradiación (28/10/2015) ....</b>	<b>142</b>
<b>Grafica 20. Perfil de corriente con respecto al ángulo de inclinación.....</b>	<b>143</b>
<b>Grafica 21. Influencia de la sombra para panel de silicio Mono-cristalino ...</b>	<b>145</b>
<b>Grafica 22. Influencia de la sombra para panel de silicio Amorfo. ....</b>	<b>146</b>
<b>Grafica 23. Variación de V y I con respecto a la Temperatura. Panel de silicio Amorfo .....</b>	<b>148</b>
<b>Grafica 24. Variación de V y I con respecto a la temperatura. Silicio Mono-Cristalino .....</b>	<b>149</b>
<b>Grafica 25. Variación de V y I con respecto a la temperatura. Silicio Poli-Cristalino. ....</b>	<b>150</b>

## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Eficiencia según la tecnología de las células FV .....	36
Tabla 2. Ventajas y desventajas de los paneles de silicio.....	39
Tabla 3. Ventajas y desventajas de los inversores.....	43
Tabla 4. Ventajas y desventajas de las baterías Pb-Acido, AGM y Gel .....	50
Tabla 5. Ventajas y desventajas de los controladores PWM y MPPT.....	53
Tabla 6. Selección del controlador según su sistema.....	54
Tabla 7. Tabla de radiación solar del mes de noviembre con un ángulo de inclinación de 8,4° a 90° y 8,4° a 180.....	84
Tabla 8. Radiación solar mensual según la NASA.....	85
Tabla 9. Estimación de consumo .....	87
Tabla 10. Tensiones de trabajo.....	91
Tabla 11. Corriente en corto circuito de las diferentes tecnologías .....	95
Tabla 12. Creación de perfiles.....	98
Tabla 13. Estimación de consumos.....	108
Tabla 14. Factor de selección de conductores.....	110
Tabla 15. Masa de los elementos del sistema .....	112
Tabla 16. Influencia de la sombra para panel de silicio Mono-cristalino .....	144
Tabla 17. Influencia de la sombra para panel de silicio Amorfo .....	146
Tabla 18. Variación de V y I con respecto a la Temperatura. Panel de silicio Amorfo .....	147
Tabla 19. Variación de V y I con respecto a la temperatura. Silicio Mono-Cristalino .....	148
Tabla 20. Variación de V y I con respecto a la temperatura. ....	149
Tabla 21. Corriente producida por cada panel .....	153

<b>Tabla 22. Selección de posiciones para configuración del guardián de batería.....</b>	<b>162</b>
<b>Tabla 23. Presupuesto asumido por la universidad.....</b>	<b>166</b>
<b>Tabla 24. Presupuesto estudiantes .....</b>	<b>167</b>

## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA.

**AUTOR(ES):** Martha Lucía García Suarez  
Wendy Sepúlveda Vega

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR(A):** Oscar Andres Lopez Anaya

### **RESUMEN**

El proyecto DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA DE LA UPB, busca fortalecer la cátedra de energías renovables empleando inicialmente cuatro módulos con los tipos de paneles solares más comunes; Silicio monocristalino, silicio policristalino y Silicio amorfo. La finalidad de este proyecto es suplir la necesidad de capacitación que tienen en la actualidad los ingenieros en cuanto a energías limpias como la energía solar fotovoltaica, ya que su uso es un tema de mucha importancia actualmente. Esta actividad reforzará por medio de un proceso académico formativo (Cátedra de energías renovables) lo cual, facilitará la comprensión de dichas energías y sus usos, complementando con las prácticas que se realizaran con los bancos de pruebas.

### **PALABRAS CLAVES:**

Fotovoltaico, Energía Solar, Bancos De Prueba, Energía Fotovoltaica, Off Grid.

**V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

## **GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** DESIGN, CONSTRUCTION AND IMPLEMENTATION OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY LABORATORY

**AUTHOR(S):** Martha Lucía García Suarez  
Wendy Sepúlveda Vega

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR:** Oscar Andres Lopez Anaya

### **ABSTRACT**

The project DESIGN, CONSTRUCTION AND IMPLEMENTATION OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY LABORATORY at the Pontificia Bolivariana University, want to do the chair of renewable energy initially employing four modules with the most common types of solar panels; Monocrystalline silicon, polycrystalline silicon and amorphous silicon. The purpose of this project is meeting the needs of today's engineers using clean energy such as photovoltaic solar energy is a very important issue today. This activity will reinforce through a formative academic process (Matter of renewable energies) which will facilitate the understanding of these energies and their multiple uses, adding laboratory practices to be undertaken with the benchmarks

### **KEYWORDS:**

Photovoltaic, Solar Panels, Solar energy, Off Grid, Photovoltaic, Banks Test

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental generado por el uso indiscriminado de combustibles fósiles y el agotamiento de las reservas de los mismos son problemáticas que inquietan a la población mundial en la actualidad. Muchas entidades gubernamentales y privadas buscan formas de disminuir el uso de combustibles fósiles, una de ellas es la implementación de energías no contaminantes, como la energía solar fotovoltaica.

El uso de este tipo de energía está conmocionando la industria Colombiana ya que la energía solar fotovoltaica es relativamente nueva en nuestro país y en la actualidad son muy pocas las personas y empresas capacitadas en este aspecto. De allí surge la necesidad de preparar a los futuros ingenieros, en este campo. Para alcanzar este objetivo se crearon cuatro bancos de prueba de energía solar fotovoltaica equipados con paneles, inversores, controladores y baterías, que permiten que los estudiantes se familiaricen con los componentes de un sistema fotovoltaico y puedan realizar las conexiones básicas de una instalación fotovoltaica.

## **1. ALCANCE**

Este proyecto se desarrolló con el fin de complementar la cátedra de energías renovables dándole un fundamento práctico empleando cuatro bancos de pruebas que cuentan con paneles solares de silicio, inversores, controladores, baterías y sus respectivos instrumentos de medición. El manejo y uso de estos elementos estará establecido en el libro con guías de apoyo para la realización de las prácticas que también facilitarían el desarrollo de la práctica.

La finalidad de este proyecto, era obtener cuatro estructuras de los bancos de prueba que soporten la carga a la que serán sometidos permanentemente (paneles, micro-inversores, controladores, cajas de control, entre otros) y el libro con las guías de laboratorio con bases, fundamentos y procedimientos para el correcto desarrollo de las prácticas.

Con este proyecto se busca capacitar a los ingenieros de la institución en el manejo y uso de instalaciones fotovoltaicas y por consiguiente posicionar a la Universidad Pontificia Bolivariana en campo de las energías alternativas.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El impacto del uso de las energías renovables es altamente positivo en la actualidad pues hacen parte de las alternativas para proteger el medio ambiente de los daños causados por el uso de combustibles fósiles y la explotación desenfrenada de los recursos naturales. Por ello es importante que todos los futuros ingenieros de la UPB tengan conocimientos respecto al tema, pues no es un secreto que a largo plazo el uso de estas energías podría reemplazar en gran cantidad la producción de energía por otros métodos como las plantas térmicas, energía nuclear, entre otras. Los bancos de pruebas son el medio ideal para la capacitación en este campo, pues permiten el fácil acceso a los equipos y las conexiones, inclusive permiten tomar medidas de corriente y voltaje de una manera fácil y segura.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir e implementar bancos de pruebas de energía solar empleando paneles de silicio para reforzar la cátedra de energías renovables en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar y construir estructuras que soporten la carga ejercida por los paneles solares, inversores controladores, elementos de medición (voltímetros, amperímetros) teniendo en cuenta la resistencia y la anti-corrosividad para garantizar la calidad de las estructuras necesarias en el desarrollo del proyecto.

**RESULTADO:** Estructuras sólidas que soporten la carga a la que serán sometidos permanentemente (paneles, inversores, controladores, entre otros) y sus respectivos planos con el diseño de los módulos.

**INDICADORES:** Planos y 4 estructuras resistentes que soporten los equipos.

Instalar los paneles solares, inversores, controladores y sus respectivos elementos de medición (Amperímetros, multímetros) en la estructura, de manera que se facilite la interacción de los estudiantes con los equipos.

**RESULTADOS:** 4 sistemas de paneles solares de silicio (1 mono-cristalino, 1 poli-cristalino y 2 amorfos), cada uno con un inversor, un controlador y los elementos de medición requeridos.

**INDICADOR:** 4 bancos de pruebas con sistemas de energía solar fotovoltaica.

Elaborar las guías del laboratorio para orientación técnica en el manejo de los equipos y pasos a seguir durante la práctica.

**RESULTADO:** Guías de laboratorio con bases, fundamentos teóricos y procedimientos para el correcto desarrollo de las prácticas.

**INDICADOR:** guías de laboratorio que facilite el trabajo en la sesión.

## 4. MARCO TEÓRICO

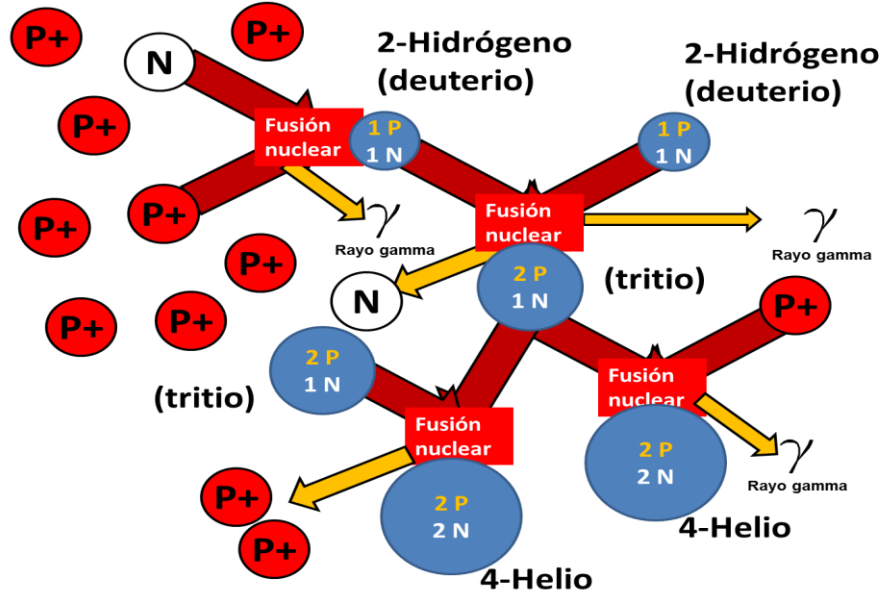
### 4.1 ¿QUÉ ES EL SOL?

El sol, es una estrella ubicada en el centro de nuestro sistema solar, es la mayor fuente de energía del planeta tierra ya que proporciona la luz y el calor suficiente para que todos los procesos naturales se lleven a cabo.

Está ubicada a 150 millones de km de la tierra, cuenta con una masa de aproximadamente 333 mil veces mayor a la de nuestro planeta. Se estima que en su mayoría, está compuesto por hidrogeno y Helio.

Las condiciones en el interior del sol son las óptimas para que se presente la fusión nuclear (Figura 1). En este proceso los átomos de Hidrógeno, Helio y Berilio se fusionan produciendo las conocidas partículas alfa que básicamente son átomos estables de Helio-4. La energía obtenida mediante este proceso llega a la superficie solar mediante la convección, allí se libera en forma de luz y calor.

Figura 1. Fusión nuclear [1]



**35 minutos de existencia del universo**  
300 millones de  $^{\circ}K$  evitan la formación de átomos pues electrones y neutrinos no pueden enlazarse a esta temperatura.

## 4.2 ¿QUÉ ES LA ENERGÍA SOLAR?

Es la energía que da como resultado la fusión nuclear que se lleva a cabo en el centro del sol. Esta energía tarda aproximadamente un millón de años para viajar del núcleo a la superficie solar y es expulsada en forma de luz y calor. Cada segundo, el núcleo solar libera 5 millones de toneladas de energía pura.

La tierra es el tercer planeta más cercano al sol, su luz y energía tardan aproximadamente 8 minutos en llegar a ella. La energía procedente del sol que llega al planeta es filtrada por la atmósfera y la estratosfera, que son las encargadas de evitar que entre gran parte de la radiación nociva, permitiendo el

paso únicamente de longitudes de onda correspondiente a la luz visible y al infrarrojo.

La energía solar proporciona la luz y el calor necesarios para todos los procesos naturales terrestres, entre ellos la vida. También es la responsable de fenómenos terrestres que hacen posible el desarrollo de la vida terrestre, como: los vientos, los cambios climáticos y la formación de las nubes y la lluvia. [2]

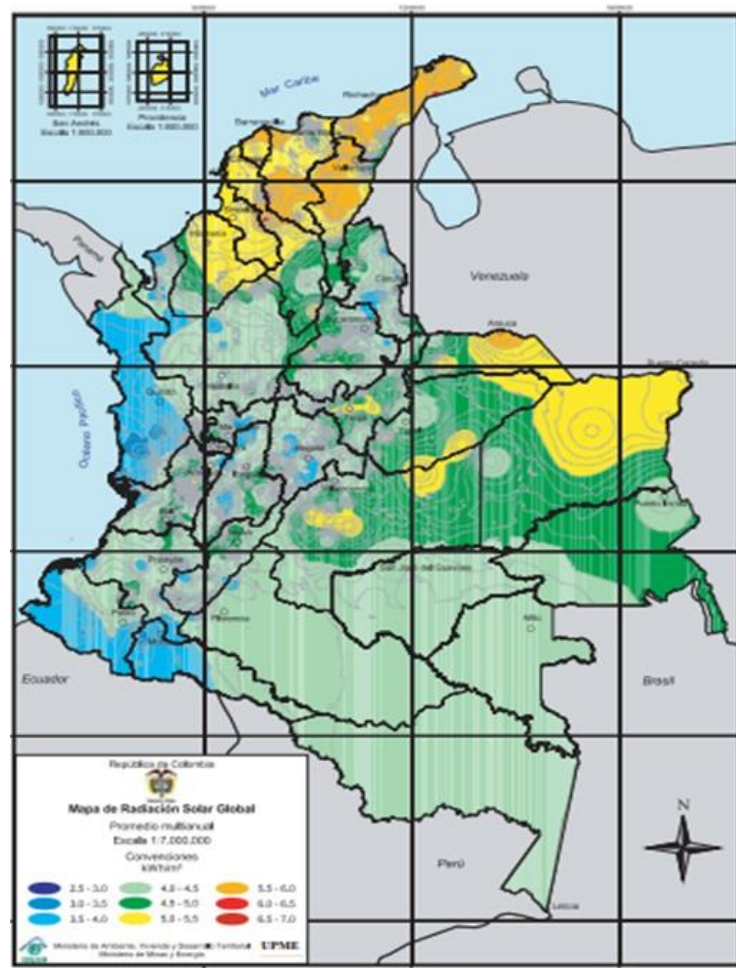
### **4.3 RADIACIÓN SOLAR**

La radiación solar es la energía emitida por el sol que llega a la tierra en forma de ondas electromagnéticas. La frecuencia de las ondas (el número de veces que se repiten completamente por unidad de tiempo) está ligada a la cantidad de energía transportada; a mayor frecuencia, mayor es la energía que transporta la onda.

La cantidad de energía que se puede utilizar depende de la intensidad de la radiación solar en determinada superficie y del tipo de radiación incidente en el área en cuestión.

Actualmente se dispone de mapas de radiación solar, que son registros de la radiación promedio anual, mensual o diaria en determinadas zonas, los datos que aportan estos mapas no son 100% exactos, pero si ofrecen información aproximada que permite determinar qué zonas tienen alto potencial para el aprovechamiento de la energía solar. No obstante, se recomienda realizar un monitoreo de la radiación solar durante un año en el punto de interés si se está interesado en instalar algún sistema de aprovechamiento de la energía solar. La figura 2 es un mapa de radiación solar anual de Colombia en el año 2010.

**Figura2. Mapa de radiación solar Colombia**



**Fuente:** [sebasfonseca.files.wordpress.com/2007/11/radiacion-solar.jpg](http://sebasfonseca.files.wordpress.com/2007/11/radiacion-solar.jpg)

**4.3.1 Tipos de radiación.** Dependiendo de la forma en que los objetos situados en la superficie terrestre reciben la radiación solar, se pueden identificar varios tipos de radiación representados en la gráfica 3 y definidos a continuación:

**4.3.1.1 Radiación directa:** Como su nombre lo dice, la radiación directa es la que llega directamente del sol sin ningún tipo de obstrucción o cambio en su dirección.

**4.3.1.2 Radiación difusa:** No toda la radiación que atraviesa la atmosfera llega a la superficie terrestre, ya que parte de ella es reflejada o absorbida por las nubes, partículas de polvo atmosférico, montañas, arboles, etc. Dicha radiación es conocida como difusa.

**4.3.2.3 Radiación reflejada:** Dependiendo del coeficiente de reflexión de las superficies (albedo), cierta cantidad de radiación es reflejada por la superficie terrestre.

**4.3.2.4 Radiación global:** Es la sumatoria de la radiación directa, difusa y reflejada, que cuantifica la cantidad de radiación que atraviesa la atmosfera.

**4.3.2.5 Radiación extraterrestre:** Es la radiación que llega a la atmosfera pero esta no la deja pasar a la superficie.

**Figura 3. Tipos de radiación [3]**



#### **4.4 ESPECTRO SOLAR**

Es la distribución en el espectro electromagnético de la radiación emitida por el sol. Dicha distribución puede estar en función de la longitud de la onda o de la frecuencia de la misma.

#### **4.5 IRRADIACIÓN**

Cantidad de energía por unidad de superficie que incide en un plano. Se expresa en  $[MJm^{-2}]$ . La cantidad de irradiación incidente depende del ángulo formado entre la normal de la superficie considerada y la relación de incidencia de los rayos solares. Aunque se puede suponer, con un bajo margen de error, que los rayos del sol inciden paralelamente sobre el planeta, en cada punto del mismo la inclinación de los rayos depende de la latitud, y la hora del día en localización en longitud.

#### **4.6 IRRADIANCIA**

Cuantifica la potencia radiante por unidad de superficie que incide sobre un plano dado. Se expresa en  $[Wm^{-2}]$  [4]

#### **4.7 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR**

La energía solar además de ser la principal fuente de vida en el planeta, ya que dirige los ciclos biofísicos y químicos que mantienen la vida, ofrece la posibilidad de ser convertida en energía para uso netamente humano.

El hombre ha desarrollado innumerables tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar. Vale la pena aclarar que no solo la energía solar fotovoltaica y la solar térmica dependen de la energía solar; otros tipos de energías renovables, como la hidroeléctrica, la eólica, la mareomotriz, entre otras están directamente ligadas a la energía solar ya que son producto de la descarga de esta energía sobre la corteza terrestre

La energía solar se puede aprovechar de muchas maneras. Las formas de aprovechar la energía solar se pueden clasificar en pasiva y activa.

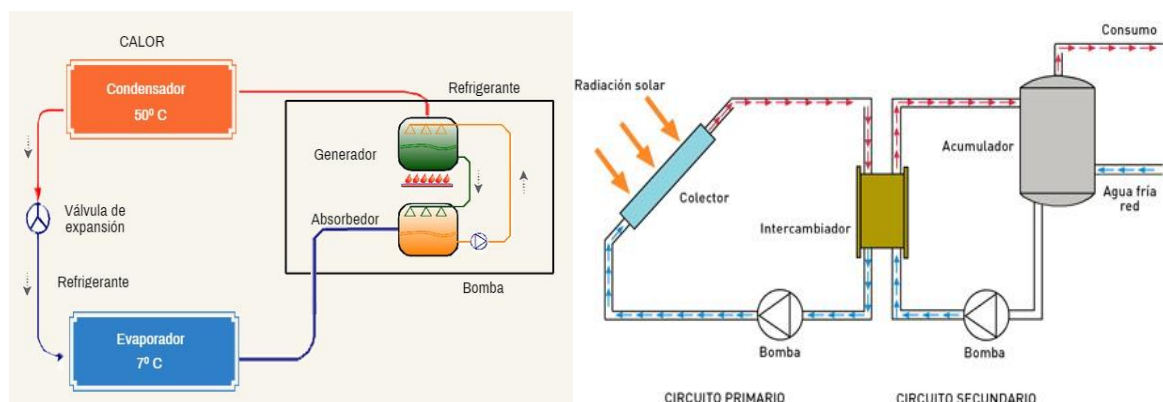
Pasiva, hace referencia a la energía obtenida sin necesidad de usar ningún dispositivo, como es el caso de los edificios que mediante un adecuado diseño y orientación, reducen significativamente la necesidad de iluminación artificial diurna y de sistemas de calefacción.

Cuando se habla de aprovechamiento activo de la energía solar, se hace referencia a los procesos que requieren de ciertos equipos para captar y transformar la energía producida por el sol, como los colectores solares que proporcionan agua caliente sanitaria, calefacción, entre otras; o las células fotovoltaicas, que transforman la radiación solar en energía eléctrica.

#### 4.8 ENERGÍA SOLAR TÉRMICA O CONVERSIÓN FOTO-TÉRMICA

La energía solar térmica se puede aprovechar de diferentes maneras. Los colectores solares, para calentamiento de agua para uso domiciliario, calefacción doméstica, secado de productos agrícolas e inclusive refrigeración (Ciclo de absorción .Figura 4).

**Figura 4. Ciclo de absorción y funcionamiento de un sistema térmico [5]**



El funcionamiento de estos sistemas es sencillo, los rayos del sol inciden a un colector solar calentando el fluido dentro de él, que a través de un intercambiador, calienta el agua almacenada en un depósito donde se almacena la energía recogida hasta el momento de su uso( figura 4).

También existen los concentradores de radiación, que son empleados para refrigeración, aplicaciones industriales y generación de energía mecánica y eléctrica. [6]

#### **4.9 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

La electricidad es la forma de energía más utilizada en la actualidad. La energía solar fotovoltaica consiste en conversión de la energía luminosa proporcionada por el sol en energía eléctrica, este proceso se lleva a cabo empleando placas solares formadas por células fotovoltaicas que generalmente son de silicio. Las células fotovoltaicas permiten esta conversión gracias a un proceso llamado efecto fotovoltaico o fotoeléctrico.

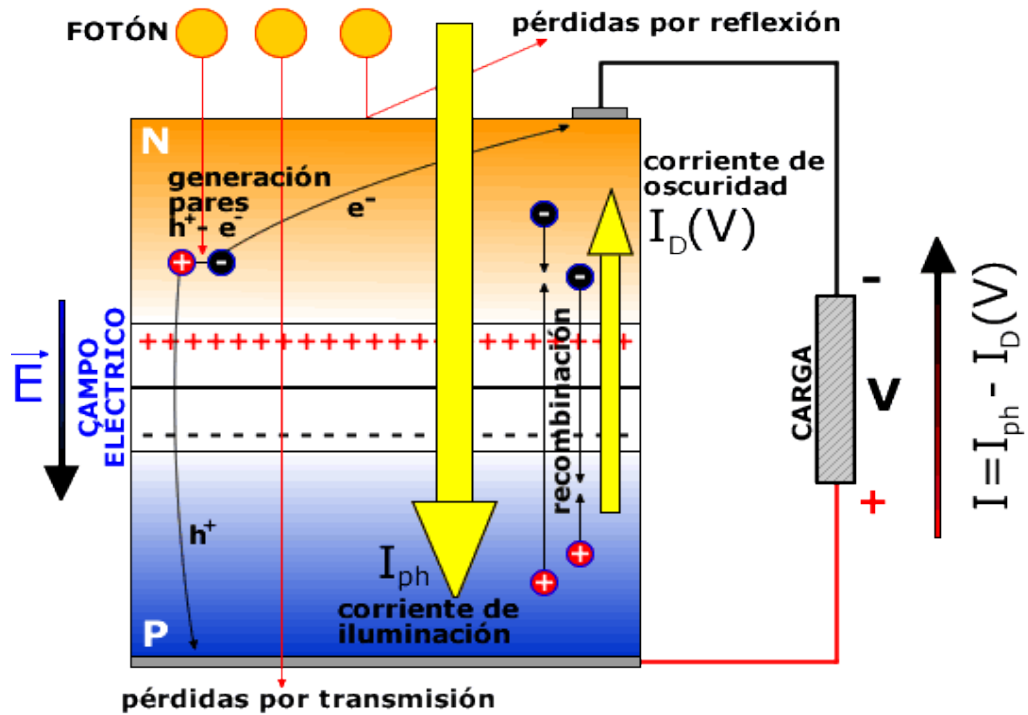
**4.9.1 Efecto fotovoltaico.** El efecto fotovoltaico es la capacidad de los semiconductores que componen el panel o modulo para generar energía eléctrica cuando se exponen a la radiación solar.

La luz solar está compuesta por fotones, o partículas energéticas. Estos fotones tienen diferentes longitudes de onda, situación que se ve reflejada en las distintas cantidades de energía de cada uno. Los fotones incidentes sobre una célula fotovoltaica, pueden ser reflejados, absorbidos o pueden pasar a través de ellos. Únicamente los fotones absorbidos por la célula generan electricidad.

Cuando un fotón es absorbido por la célula fotovoltaica, la energía del fotón se transfiere a un electrón de un átomo de la célula. Con esta nueva carga energética, el electrón puede alterar su posición inicial, para posteriormente formar parte de una corriente en un circuito eléctrico.

Las partes más importantes de la célula solar son las capas de semiconductores, ya que es donde se crea la corriente de electrones. Estos semiconductores son especialmente tratados para formar dos capas diferentemente dopadas (tipo p y tipo n) para formar un campo eléctrico, positivo en una parte y negativo en la otra. Cuando la luz solar incide en la célula se liberan electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico, formando una corriente eléctrica. Es por ello que estas células se fabrican a partir de este tipo de materiales, es decir, materiales que actúan como aislantes a bajas temperaturas y como conductores cuando se aumenta la energía. Desdichadamente no hay un tipo de material ideal para todos los tipos de células y aplicaciones. Además de los semiconductores las células solares están formadas por una malla metálica superior u otro tipo de contacto para recolectar los electrones del semiconductor y transferirlos a la carga externa y un contacto posterior para completar el circuito eléctrico. También en la parte superior de la célula hay un vidrio u otro tipo de material encapsulaste transparente para sellarla y protegerla de las condiciones ambientales, y una capa anti-reflexiva para aumentar el número de fotones absorbidos. [7]

Figura 5. Efecto fotovoltaico [8]



## 5. SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICO

Los sistemas fotovoltaicos son una fuente de energía renovable, que a grandes rasgos capturan energía solar y la transforman en energía eléctrica aprovechable.

Las partes fundamentales de un sistema solar fotovoltaico son los paneles solares y los inversores.

Los paneles solares o módulos fotovoltaicos, son los directamente encargados de transformar la radiación solar en energía eléctrica. Los paneles producen corriente continua, la cual con ayuda de un inversor se convierte en corriente alterna para poder ser inyectada a la red. Si la energía producida por el modulo va a ser

almacenada en un banco de baterías, no es necesario convertirla a corriente alterna.

## **5.1 MÓDULOS O PANELES FOTOVOLTAICOS**

Un módulo o panel es la unidad básica de construcción de cualquier sistema fotovoltaico, que consiste en células interconectadas entre sí, enmarcadas en aluminio, selladas con un recubrimiento de vidrio y un respaldo impermeable. Un módulo fotovoltaico puede contener entre 30 y 72 células conectadas en serie.

Los módulos fotovoltaicos pueden ser de diferentes tamaños, la eficiencia de estos depende no solo de sus características puntuales, si no de la ubicación del sistema, la inclinación de los paneles y la radiación solar en el punto donde estén instalados.

El material con el que están fabricados los paneles está directamente ligada a la eficiencia del sistema. Generalmente los paneles son fabricados de silicio; pero también se pueden conseguir de Teluro de cadmio, arseniuro de galio y diseleniuro de cobre e indio.

Aunque su eficiencia no es tan alta, los más comunes en el mercado son los paneles de silicio (Eficiencia del 8 al 24%), ya que los paneles fabricados con otras tecnologías implican un gasto más elevado. Actualmente los paneles más eficientes son los de arseniuro de galio que alcanza una eficiencia del 25%, pero su costo supera varias veces el de un panel de silicio, lo que lo convierte en un equipo ineficiente en cuanto a la relación costo beneficio.[9]

En la tabla 1 se sintetiza información primordial de los paneles solares, como eficiencia y área requerida por cada tecnología en su instalación.

**Tabla 1. Eficiencia según la tecnología de las células FV [10]**

Tecnología	Película delgada		Oblea cristalina		
	Silicio amorfo	Di seleniuro de indio y cobre (CIS)	Poli-cristalino	Mono-cristalino	Arseniuro de galio
<b>Eficiencia del modulo</b>	6-9%	10-11%	12-20%	13-24%	25%
<b>Área requerida por kWp</b>	15m <sup>3</sup>	10m <sup>2</sup>	8m <sup>2</sup>	7m <sup>2</sup>	5m <sup>2</sup>

**5.1.1 Tipos de paneles.** Los paneles se pueden clasificar según diferentes criterios según el tipo de células que contienen: silicio amorfo, mono-cristalino y poli-cristalino.

Según el tipo de material con el que están fabricados, silicio, arseniuro de galio, telurio de cadmio, etc. Según la potencia producida por el panel que puede variar de 1 a 300w. Según el voltaje, que pueden ser de 6, 12 o 24v.

- **Panel de silicio amorfo (A-SI):** En cuanto a aprovechamiento del material los paneles de silicio amorfo (Figura 6) son los más eficientes, ya que para fabricar láminas de silicio mono-cristalino o poli-cristalino (varios cristales) es necesario cortar láminas más grandes del material, a lo largo de este proceso se desperdicia casi la mitad de silicio, lo cual no sucede con las células fotovoltaicas de silicio amorfo.

Esta tecnología usa silicio de menor calidad, tiene baja eficiencia (que disminuye al aumentar la temperatura) y es de bajo costo. La potencia producida por este tipo de tecnología varía entre 0,1 y 150 Wp y la eficiencia de conversión de este tipo de paneles esta entre 6% y 9%.

Este tipo de celdas fueron las primeras en ser manufacturadas, ya que se empleaban los mismos métodos de producción usados para la fabricación de diodos.

Los paneles solares de silicio amorfo (a-Si) se forman depositando diferentes tipos de silicio tratado sobre un sustrato de vidrio.

En primer lugar, un óxido conductor transparente (TCO) se aplica a un sustrato de vidrio seguido de un trazado con láser para establecer los límites de las celdas. A continuación, las capas silicio tipo p-i-n, se depositan en el TCO. Estas capas tipo p-i-n permiten que los fotones actúen para excitar a los pares electrón-hueco. Las capas de silicio son nuevamente trazadas y, finalmente, se incorporan los contactos que conectan las celdas recién formadas. [10]

**Figura 6. Panel de silicio amorfo (A-Si) [11]**

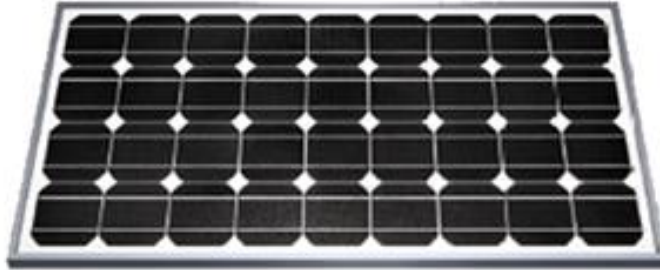


- **Panel de silicio mono-cristalino (C-Si):** Se componen de secciones de un único cristal de silicio (Si), en el que la estructura cristalina es continua, es decir, ininterrumpida y sin bordes de grano.

Los paneles mono-cristalinos (Figura 7) se fabrican a partir de celdas de aproximadamente 0,2 a 0,3 mm de espesor cortadas de un solo cristal de silicio. La potencia de los paneles es oscila entre 60 y 300 Wp por panel y

su eficiencia puede llegar al 24%. Este tipo de paneles es ideal para aplicaciones en las que se disponga de un espacio reducido.

**Figura 7. Panel de silicio mono-cristalino (C-Si) [12]**



- **Paneles de silicio poli-cristalino (MC-Si):** Los paneles de silicio poli-cristalino (también llamado multi-cristalino) (Figura 8) están formadas por láminas de silicio de menor pureza que el mono-cristalino ya que provienen de una barra de silicio estructurada desordenadamente en forma de pequeños cristales; esta característica es la causa de un rendimiento inferior, que varía entre el 12% y el 20%, siendo su precio más bajo. Se pueden reconocer a simple vista ya que su superficie tiene una textura granulada.

**Figura 8. Panel de silicio policristalino MC-Si [13]**



La tabla 2 sintetiza las ventajas y desventajas del uso de los diferentes tipos de paneles solares más utilizados en la industria. Comparando eficiencia, costo, tamaño, entre otros.

**Tabla 2. Ventajas y desventajas de los paneles de silicio.**

TIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>MONO-CRISTALINO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tienen mayor eficiencia</li> <li>• Son hechas de un solo cristal de silicio de alta pureza</li> <li>• Tienen un ciclo de vida larga</li> <li>• Funcionan bien en condiciones de poca luz</li> <li>• Menor necesidad de espacio para instalación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son mucho más costosas por su proceso de fabricación</li> <li>• La eficiencia disminuye al aumentar la temperatura</li> <li>• Con nieve, suciedad y sombra el panel puede dejar de funcionar totalmente.</li> </ul>
<b>POLICRISTALINO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Están hechas de silicio derretido vertido en un molde.</li> <li>• Se fabrican como un mosaico de diversos cristales de silicio.</li> <li>• Más económicos que los paneles de silicio monocristalino</li> <li>• Mayor eficiencia que los paneles de silicio amorfo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son menos eficientes que el panel de silicio mono-cristalino, pero más eficiente que el amorfo</li> <li>• Tienen menor rendimiento al calor que el mono-cristalino</li> <li>• Mayor espacio de instalación</li> </ul>
<b>AMORFO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Más económicos del mercado</li> <li>• Excelente rendimiento a altas temperaturas, sombra o suciedad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son los menos eficientes del mercado</li> <li>• Mayor área superficial.</li> </ul>

### 5.1.2 Características eléctricas de un módulo fotovoltaico

- **Intensidad (I):** es la corriente que está proporcionando el modulo fotovoltaico
- **Corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{PMP}$ ):** es el punto de funcionamiento en la curva I-V ( corriente, tensión) de una celula solar o modulo fotovoltaico en el cual el producto de la corriente por el valor de la tensión alcanza un valor máximo.
- **Intensidad de cortocircuito ( $I_{sc}$ ):** Es la máxima intensidad que produce el dispositivo bajo unas condiciones definidas tales como iluminación y temperatura. Esta condición se da cuando está el voltaje igual a cero. Este valor puede variar de acuerdo a la función de radiación solar.
- **Tensión máxima ( $V_{mp}$ ):** Es el valor de voltaje para un punto de potencia máxima ( $P_{max}$ ) en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura.
- **Voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ):** es la máxima tensión del dispositivo, definidas en unas condiciones de temperatura e iluminación. Esta tensión se da cuando tenemos con una carga igual a cero.
- **Potencia máxima ( $P_{MAX}$ ):** Es la máxima potencia que producirá el dispositivo en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura, correspondiente al par máximo I-V. [14]

### 5.2 INVERSORES AUTÓNOMOS OFF-GRID

Los paneles solares generan corriente continua (CC) o directa (DC). Dado que en la mayoría de aplicaciones de la energía eléctrica requieren corriente alterna (CA),

es necesario emplear un equipo que permita convertir la corriente continua en alterna, este es el inversor (Figura 9), que además adecúa la frecuencia y la tensión a la red local. Y Deben proporcionar una onda lo más senoidal posible, sin armónicos, por lo cual existen diferentes tipos de inversores como se nombran a continuación.

**Figura 9. Inversor Victron. [15]**



**5.2.1 Tipos de inversores.** El flujo de la corriente continua es en una sola dirección, en cambio la corriente alterna cambia rápidamente la dirección de su flujo de corriente, estos cambios de dirección tienen un comportamiento senoidal. La conversión de corriente continua a alterna puede realizarse de varias formas. Las tecnologías de los inversores se clasifican dependiendo de cuánto se parece la onda resultante a la onda senoidal ideal.

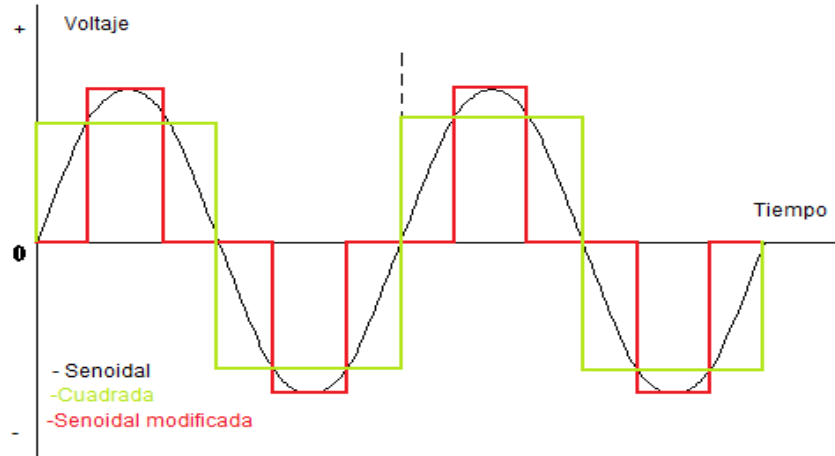
- **Inversores de onda cuadrada:** Producen armónicos que generan interferencias, son baratos pero poco eficientes, se pueden usar en aplicaciones básicas, para aparatos eléctricos pequeños (televisor, computador, etc.). Emplean un oscilador simple que genera ondas cuadradas.
- **Inversores de onda senoidal:** Este tipo de onda es la más adecuada para los aparatos domésticos, ya que el aumento de la tensión es temporal y no tiene oscilaciones armónicas. La onda resultante del proceso es muy similar a la onda

ideal u onda senoidal pura. La eficiencia de este tipo de inversores alcanza el 90% o más.

- **Inversores de onda senoidal modificada:** Utilizan técnicas de modulación de ancho de impulso, es decir que el ancho de la onda es modificado para acercarla lo más posible al comportamiento de una onda senoidal. La onda modificada tiene una meseta plana de voltaje positivo que posteriormente cae a cero, donde se mantiene por un lapso de tiempo antes de caer a la meseta negativa. Son accesibles, pero no son aptos para sistemas de música, relojes digitales, impresoras láser o microondas.

La gráfica 1 compara el comportamiento de los tipos de ondas (Senoidal, cuadrada y senoidal modificada).

**Gráfica 1. Tipos de ondas**



La tabla 3 sintetiza las ventajas y desventajas del uso de los diferentes tipos de inversores. Comparando eficiencia, costo, tamaño, entre otros.

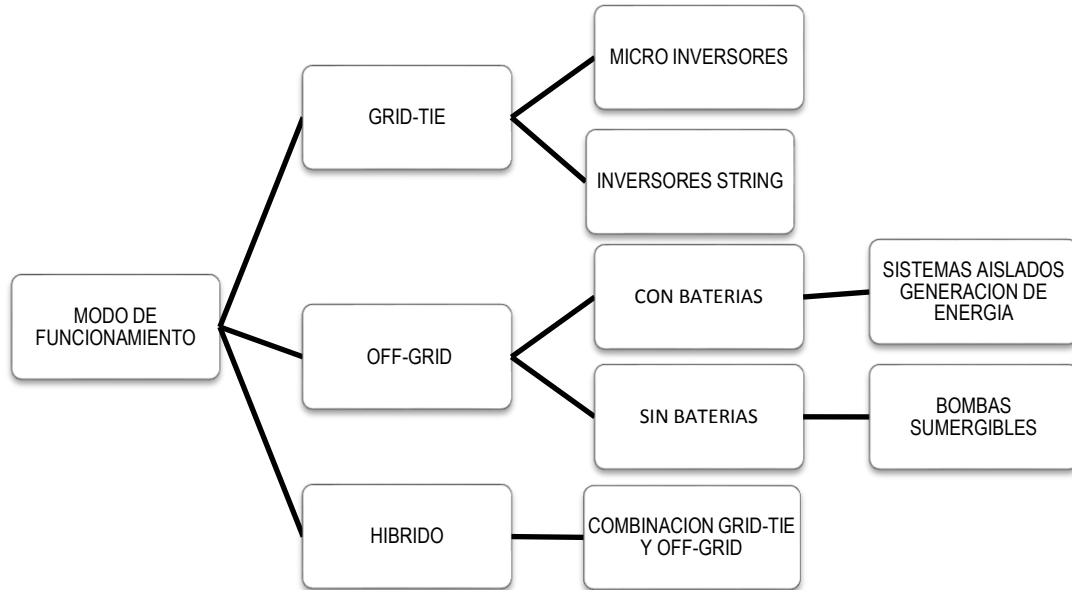
**Tabla 3. Ventajas y desventajas de los inversores**

<b>TIPO</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>ONDA CUADRADA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Económicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja eficiencia</li> <li>• Armónicos que generan ruidos</li> </ul>
<b>ONDA MODIFICA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las eficiencias típicas son de más del 90%.</li> <li>• permite el uso de motores de inducción y aparatos de control ó equipo médico requieren una forma de onda senoidal pura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor costo de los otros dos inversores</li> </ul>
<b>ONDA SENOIDAL MODIFICADA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son más sofisticados y caros.</li> <li>• utilizan técnicas de modulación de ancho de impulso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene sonido armónico mínimo</li> <li>• Reduce la vida útil de motores o fuente de energía que necesitan una onda pura</li> </ul>

## **6. MODOS DE FUNCIONAMIENTO**

Las instalaciones solares fotovoltaicas se pueden instalar de diferentes maneras. Y se clasifican en GRID-TIE, OFF-GRID e híbridos. La figura 10, muestra detalladamente esta clasificación y las características primordiales de cada instalación.

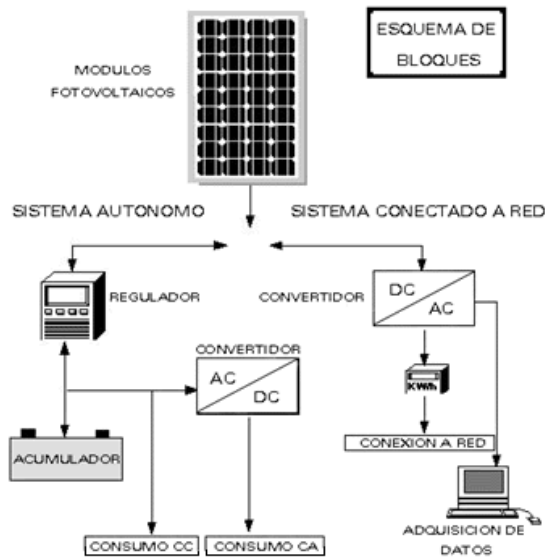
**Figura 10. Modos de funcionamiento**



Fuente. Autor

El esquema de bloques correspondiente a la figura 11 plantea las conexiones pertinentes para un sistema Grid-Tie y uno Off-Grid.

**Figura 11. Instalación Off-Grid y Grid-Tie [16]**



## 6.1 SISTEMAS CONECTADOS A RED (GRID-TIE)

Los sistemas Grid-Tie (Figura 12) están diseñados para trabajar anclados a la red eléctrica y su funcionamiento depende de la estabilidad de la misma, es decir, en caso de una falla en el servicio de electricidad dejan de operar; no son una fuente de respaldo de energía.

Estos sistemas cuentan básicamente con un arreglo de paneles y un inversor (STRING O MICRO-INVERSOR) Grid-Tie. La energía producida que consume inmediatamente y en caso de haber un exceso en la generación, la energía restante se puede inyectar a la red.

En muchos casos es necesario instalar un medidor bidireccional, para que este gire hacia atrás cuando el sistema le inyecte energía a la red. Estos sistemas no usan bancos de baterías por lo que el sistema es más económico.[17]

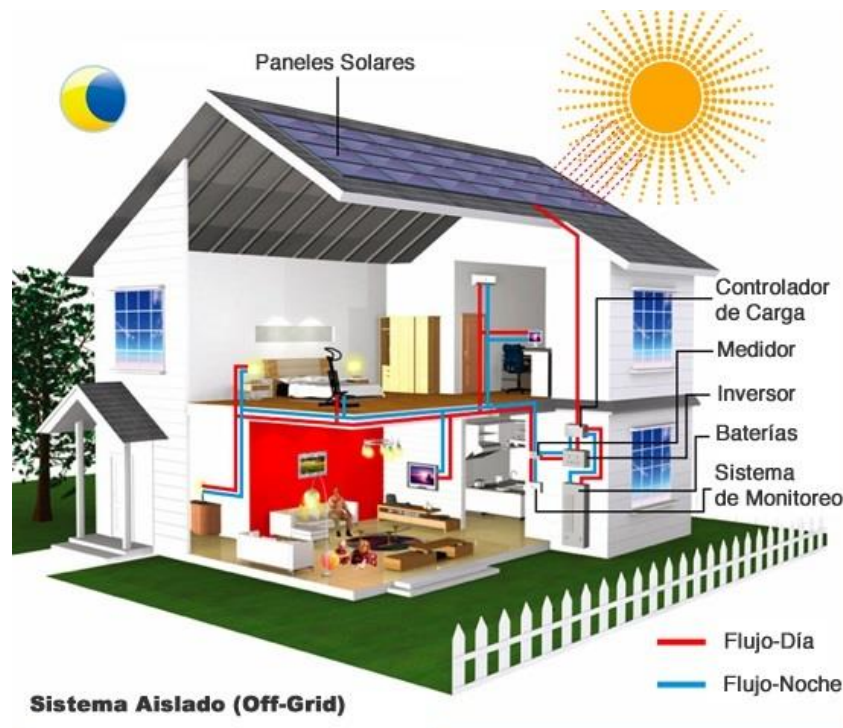
**Figura 12. Sistema Grid-Tie [18]**



## 6.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS (OFF GRID)

Los sistemas off-grid (Figura 13) están diseñados para operar de forma independiente de la red eléctrica. Estos sistemas captan energía que posteriormente será almacenada en un banco de baterías. La cantidad de energía almacenada en las baterías es controlada por el controlador de carga. El inversor permite convertir la corriente almacenada (DC) en corriente alterna (AC) apta para consumo doméstico. En ocasiones, estos sistemas cuentan con un generador de respaldo para contar con energía para abastecerse en días de poca producción o mucho consumo.

**Figura 13. Sistema Off-Grid [18]**



**6.2.1 Partes de un sistema Off-Grid.** Al ser sistemas independientes de la red eléctrica, los sistemas Off-grid necesitan de un banco de baterías para almacenar la energía que se produce y no es consumida directamente. Para que el banco de baterías funcione adecuadamente es necesario contar con un controlador de carga, que es el encargado de como su nombre lo dice controlar el flujo de corriente a la batería y posteriormente detener la carga cuando los acumuladores estén en el límite.

También se emplean algunos accesorios para supervisar el comportamiento del sistema (Monitor de baterías) y para protegerlo de sobrecargas y cortocircuitos (Guardián de baterías, disyuntores también conocidos como tacos, entre otros).

**6.2.1.1 Baterías:** La principal función de las baterías es la acumulación de la energía producida por los paneles durante las horas de luz para poder utilizarla en la noche o durante períodos con poca producción. Las baterías también pueden proveer una intensidad de corriente superior a la generada por el sistema fotovoltaico cuando este no cumple con los requerimientos del usuario.

En los sistemas solares fotovoltaicos es muy común encontrar baterías de Plomo ácido (Pb-ácido), AGM, GEL. LA figura 15 es una batería AGM Solar.

Figura 14. Batería AGM solar [19]

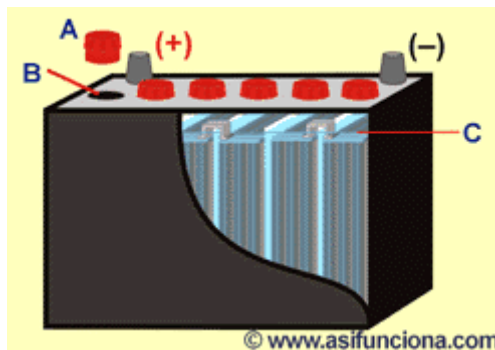


### 6.2.1.2 Tipos de baterías

- **Baterías de Plomo ácido (Pb-Acido) (Figura 15)**

Inventadas en 1859, los acumuladores de plomo ácido fueron las primeras baterías recargables de uso comercial. Cuentan con una serie de placas de plomo (Electrodo) dentro de un depósito de ácido sulfúrico (Electrolito). El ciclo de vida de estas baterías es relativamente corto debido a la corrosión del electrodo positivo y al agotamiento del material activo.

Figura 15. Batería de plomo ácido [20]



- **Baterías AGM (Figura 16)**

En las baterías AGM (Absorbent Glass Mat) el electrólito se absorbe por capilaridad en una estera en fibra de vidrio ubicada entre las placas. Este tipo de baterías pueden suministrar corrientes muy elevadas durante períodos cortos (arranque).

El tiempo de carga de estas baterías es 5 veces más rápido que las de Plomo-Acido, además tienen una vida útil bastante larga aun sometiéndolas a ciclos de descarga profundos. Estas baterías son herméticas (VRLA) y no requieren ningún tipo de mantenimiento.

**Figura 16. Batería AGM [19]**



- **Baterías de Gel (Figura 17)**

En este tipo de baterías, el electrólito está en forma de gel. Estas baterías tienen mayor vida útil y una mejor capacidad de ciclos que las baterías AGM. Tienen una extraordinaria capacidad de recuperación incluso tras una descarga profunda o prolongada, aunque no es recomendado pues las consecuencias de las descargas profundas repetidamente reducen el tiempo de vida útil de la batería. [21]

Figura 17. Batería de gel [21]



La tabla 4 plantea las ventajas y desventajas del uso de los diferentes tipos de baterías, costo, tamaño, ciclos entre otros.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de las baterías Pb- Acido, AGM y Gel

BATERÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Pb-Acido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil fabricación</li> <li>• Tecnología fiable, duradera</li> <li>• Bajo nivel de auto-descarga</li> <li>• Permite altas tasas de carga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja densidad de energía</li> <li>• No se puede almacenar en un estado de baja carga</li> <li>• Tiene un número limitado de ciclos de descarga completa</li> <li>• Impacto negativo del plomo en el ambiente</li> <li>• No permite carga rápida</li> </ul>
<b>AGM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selladas y seguras ante posibles derrames</li> <li>• Tiempo de carga 5 veces más rápido</li> <li>• Buen comportamiento a bajas temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor costo de fabricación</li> <li>• Sensible a sobrecargas</li> <li>• Menor energía específica</li> <li>• Deben almacenarse cargadas.</li> </ul>
<b>Gel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Libres de mantenimiento.</li> <li>• No requieren reposición por pérdidas del electrolito</li> <li>• No expulsan gases por descomposición del electrolito</li> <li>• Duran más que una batería convencional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor costo</li> <li>• Requiere regímenes especiales para su proceso de carga</li> </ul>

## 6.3 CONTROLADORES

También conocidos como reguladores de carga, enlazan los paneles y las baterías, protegiendo las baterías y el sistema fotovoltaico en general de sobrecargas o descargas profundas, manteniendo la tensión adecuada de almacenamiento de carga. El controlador de carga se selecciona teniendo en cuenta varios factores, por ejemplo el tamaño del sistema (Número de paneles y potencia producida) ya que para la selección adecuada del dispositivo es necesario tener en cuenta el número de paneles solares del sistema además de las baterías.

Para sistemas de energía solar fotovoltaica se emplean dos tipos de controladores MPPT y PWM.

### 6.3.1 Tipos de controladores.

- **Controladores MPPT:** Seguidor de Punto de Máxima Potencia (Maximum Power Point Tracker). La radiación solar incidente en los paneles varía constantemente dependiendo de la ubicación, la estación y la hora del día, generando picos de máxima potencia, La tarea del MPPT es precisamente la de determinar instante por instante dicho punto de máxima eficiencia energética. Estos controladores ofrecen la posibilidad de colocar paneles en serie a voltajes superiores al banco de baterías, en el mercado se pueden encontrar hasta de 80A. Muy importante tener en cuenta la simbología que manejan los controladores, como no lo muestra la figura 18. Este es un controlador de carga Victron cuya referencia es MPPT 7515, esto significa que el controlador es apto para funcionar en un sistema de 75 watts, por el que circulen 15 amperios.

Figura 18. Controlador MPPT [22]



- **Controladores PWM:** Controladores de modulación por ancho de pulsos o pulse-width modulation (Figura 19). La potencia máxima en el mercado es 60 A. Tienen una larga vida útil y la mayoría cuentan con un sistema de refrigeración pasiva.

Figura 19. Controlador PWM [23]



**6.3.2 Ventajas y desventajas de los controladores PWM y MPPT.** Uno de los aspectos importantes en un sistema FV es el regulador de carga por eso se debe tener en cuenta las características de los reguladores para saber cuál elegir. También esto depende del número de células que compone un panel, el voltaje de este mismo, también depende del voltaje de los acumuladores. [24]

La tabla 5 muestra las diferencias entre los tipos de controladores mencionados anteriormente.

**Tabla 5. Ventajas y desventajas de los controladores PWM Y MPPT**

TIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>PWM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son controladores económicos</li> <li>• Están disponibles hasta 60 A</li> <li>• La vida útil es larga</li> <li>• Tienen sistema de refrigeración pasiva</li> <li>• Disponibles en varios tamaños</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El voltaje de los acumuladores y los del sistema tienen que ser el mismo.</li> <li>• Su máximo tamaño es de 60A.</li> <li>• Capacidad limitada para crecimiento de sistemas</li> <li>• Tienen menor eficiencia</li> </ul>
<b>MPPT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ofrecen un crecimiento de eficiencia del 30%</li> <li>• El voltaje de los acumuladores puede ser diferente al del sistema de los paneles</li> <li>• Están disponibles hasta 80 A</li> <li>• Tienen capacidad para el crecimiento de sistemas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son más costosos que los PWM</li> <li>• Son más grandes físicamente</li> <li>• El dimensionado puede ser difícil sin la guía apropiada</li> </ul>

Fuente. Autor

## Selección del controlador de acuerdo a su sistema de acumulación y sistema FV (Tabla 6)

**Tabla 6. Selección del controlador según su sistema [25]**

PANELES	BATERÍAS	CONTROLADORES
36 celdas	12V	Mppt
48 celdas	12V/24V	Mppt
54 celdas	12V/24V	Mppt
72 celdas	12V/24V	Mppt
144 celdas	48V	Mppt
30 celdas	12V	Pwm
60 celdas	24 V	Pwm
120 celdas	48 V	Pwm

### 6.4 MONITOR DE BATERÍA

La función principal del BMV-700 es calcular el flujo de energía del panel a la batería y la energía consumida. Permite calcular la duración de la carga teniendo en cuenta el consumo de energía.

El monitor de baterías BMV-700 calcula la duración de carga mediante la fórmula de Peukert, ecuación logarítmica, la cual nos indica teóricamente cuanto tiempo de descarga se tiene bajo un perfil de consumo.

La constante de la ecuación logarítmica Peukert varía desde 1 a 1.50 dependiendo el tipo de batería normalmente para una batería de gel en buena calidad (1,25), para una batería de plomo ácido (1.3).

A continuación vemos la fórmula de Peukert:

$$Cp = I^n * t \quad \text{(EC.1)}$$

**DONDE:**

**n:** es constante

**Cp:** capacidad nominal

**I:** valor de corriente de descarga

**t:** tiempo en el cual ocurre la descarga

Donde la constante de Peukert se puede calcular suponiendo dos tiempos de descarga con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\log t_2 - \log t_1}{\log I_1 - \log I_2} \quad \text{(EC.2)}$$

[Tomado de Manual Monitor de baterías Victron]

Las especificaciones de la batería necesarias para calcular la constante de Peukert es: capacidad nominal de la batería (ritmo de descarga), normalmente es de 20 h, pero la capacidad nominal de la batería también puede ser de un ritmo de 10 h o incluso 5 h, en este ejemplo vamos a escoger un ritmo de 20 h y 5 h

- **RITMO DE 5h**

$$C_{5h} = 75Ah$$

$$T_1 = 5 h$$

$$I_1 = \frac{75Ah}{5h} = 15 A$$

- **RITMO DE 20 H**

$$C_{20h} = 100Ah$$

$$T_2 = 20h$$

$$I_2 = \frac{100Ah}{20h} = 5 A$$

### PEUKERT EXPONENT

$$n = \frac{\log 20 - \log 5}{\log 15 - \log 5} = 1,26$$

El BMV-700 (Figura 20) se puede observar en el display las siguientes características del banco de baterías

**Figura 20. Monitor de baterías Victron BMV-700 [26]**



- Tensión, corriente, potencia.
- Periodo promedio de autonomía restante.
- Autonomía restante al ritmo de descarga actual.
- Alarma visual y sonora programable

- Relé programable, para desconectar cargas no críticas o para arrancar un generador en caso necesario.
- Derivador de conexión rápida de 500 amperios y kit de conexión
- Selección de la capacidad del derivador hasta 10.000 amperios
- Puerto de comunicación VE. Direct
- Almacena una amplia gama de datos históricos, que pueden utilizarse para evaluar los patrones de uso y el estado de la batería. [26]

## 6.5 GUARDIÁN DE BATERÍA

El guardián de batería (Figura 21) funciona como un disyuntor que abre el circuito en caso de algún error en el sistema o cuando la batería está cargada totalmente, también permite desconectar automáticamente consumos no esenciales de la batería antes de que esté totalmente dañada o descargada. Para su correcto funcionamiento es necesario programarlo teniendo en cuenta el tope de carga y el límite inferior de descarga de la batería.

El guardián de batería funciona para tensiones de 12 v donde se maneja un rango (8-20 v) y en tensión a 24 (20-35 v) en tensiones de 48 voltios no configura el equipo.

### 6.5.1 Características del guardián de baterías

- **Entrada universal de 12/24V:** el protector de baterías detecta automáticamente la tensión del sistema.
- **Protección contra sobretensiones:** Para proteger los instrumentos sensibles de las sobretensiones, la batería se desconecta automáticamente cuando la tensión continua supera 16 V ó 32 V.

- **Alarma de acción diferida:** Un contacto de alarma se activa cuando la tensión de la batería es inferior al nivel establecido durante más de 15 segundos. Así, cualquier demanda de alta potencia aunque sea de corta duración (arranque del motor) no provocará una alarma. El contacto de alarma es una salida negativa normalmente abierta, de una intensidad máxima de 500 mA. Puede utilizarse para activar un piloto y/o un zumbador.
- **Desconexión de acción diferida:** La desconexión es de acción diferida para que se produzca sólo en situaciones invariables. Es necesario que la alarma esté activada durante más de un minuto para provocar la desconexión. Si durante este período de tiempo sube la tensión (por ejemplo, tras el arranque del motor) la desconexión no tendrá lugar [27].

**Figura 21. Protector de baterías o guardián de baterías [27]**



## 6.6 PIRANOMETRO O MEDIDOR DE RADIACIÓN SOLAR

El medidor de radiación solar o pirómetro (Figura 22) es un instrumento de precisión para medición de la radiación solar, obtenida mediante la captación de la luz y calor emitido por el sol.

El piranómetro tiene diferentes comandos cada uno con una función diferente, representadas a continuación:



Encendido

PH= Congelamiento de la medida

DH= Ampliar el rango de medidas

W/B= Cambio de unidades de  $[Wm^{-2}]$  a  $[BTU.FT^{-2}h]$  o viceversa

R= Comando para cambiar a decimales.

### Figura 22. Medidor de radiación solar



REFERENCE: SM-206

Fuente: Medidor de radiación solar. Disponible en: [www.viaindustrial.com](http://www.viaindustrial.com)

### 6.7 KILL A WATT

El kill a watt (Figura 23) es un medidor de consumo de energía (watts o KW/h), este dispositivo muestra el consumo diario de potencia, permite monitorear el voltaje, frecuencia, corriente y factor de potencia (Que es la capacidad de cada carga de absorber potencia activa), de cualquier equipo que se encuentre conectado al dispositivo.

### Figura 23. Kill a watt [28]



## **7. FACTORES DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS**

Como en cualquier proceso de generación de potencia ya sea eléctrica, mecánica o hidráulica, la generación de energía a través de sistemas fotovoltaicos, presenta pérdidas. Dichas pérdidas tienen como resultado la disminución de la eficiencia de los equipos y del sistema en general.

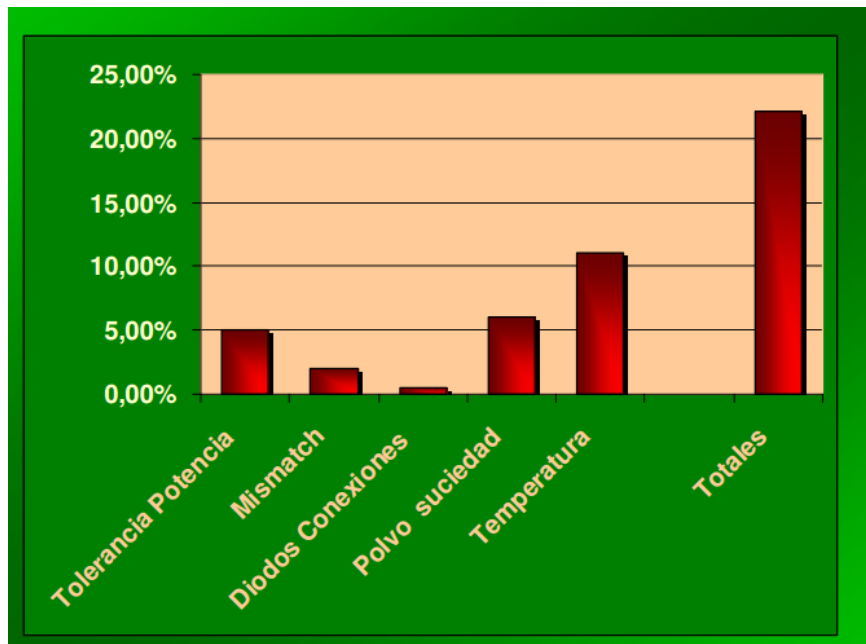
Las pérdidas se pueden cuantificar de diferentes maneras y teniendo en cuenta varios factores, como temperatura, cableado, entre otros.

La gráfica 2, contiene los valores típicos de los porcentajes por pérdidas energéticas.

### **7.1 PÉRDIDAS POR LA TOLERANCIA DE LA POTENCIA NOMINAL**

Los fabricantes de células fotovoltaicas, indican la potencia nominal bajo unas condiciones estándar de irradiación y temperatura que oscilan en un porcentaje del  $\pm 3\%$  al  $\pm 10\%$ .

La producción de módulos fotovoltaicos es un proceso industrial, donde las celdas de silicio resultantes no son idénticas, estas difieren en su estructura cristalina situación que hace variar significativamente el comportamiento de los paneles y por ende su potencia.



**Gráfica 2.** Valores típicos de los porcentajes por pérdidas energéticas  
**Fuente.** [www.cugar.net](http://www.cugar.net)

## 7.2 PÉRDIDAS DE MISMATCH DE MÓDULOS

Estas pérdidas normalmente se originan debido a la interconexión de módulos con diferentes condiciones de trabajo, pues si el sistema cuenta con dos paneles de distintas corrientes de operación, el sistema se verá limitado por la menor intensidad y lógicamente esto implica un porcentaje de pérdidas, tanto en conexiones en serie como en paralelo. El porcentaje de pérdidas por mismatch está dado en un promedio de 3 a 5 %.

Para cuantificar las pérdidas por mismatch de los módulos fotovoltaicos en conexiones, es necesario tener en cuenta la potencia máxima, la tensión en el punto de máxima potencia y la corriente en punto de máxima potencia. Esta información es proporcionada por el fabricante y se puede encontrar en el Data Sheet de los equipos.

En la conexión de varios módulos en serie o paralelo se calcula el porcentaje por pérdida de mismatch con la ecuación 7, teniendo en cuenta que se tiene que

calcular la potencia en serie o paralelo ( $P_s$ ) (Ec. 4) y después se calcula la potencia total ( $P_t$ ) (Ec.6) para el cálculo del porcentaje de error.

Calculo para el sistema sin tener en cuenta las pérdidas

$$V_s = \# \text{modulos} * V \quad \text{EC.3}$$

$$I_s = \text{corriente del menor modulo}$$

$$P_s = V_t * I_t \quad \text{EC. 4}$$

Cálculos con pérdidas en el sistema

$$V_t = \# \text{modulos} * \text{Voltaje unitario menor} \quad \text{EC. 5}$$

$$I_t = \# \text{modulos} * I \text{ corriente}$$

$$P_t = V_t * I_t \quad \text{EC.6}$$

$$\%E = \frac{V_s - V_t}{V_s} * 100 \quad \text{EC.7}$$

### 7.3 PÉRDIDAS POR POLVO Y SUCIEDAD

El polvo y la suciedad en el panel disminuyen la potencia de un sistema FV. Por un lado la suciedad uniforme produce que en el sistema haya disminución de corriente y tensión entregada por el generador y la suciedad puntual localizada aumenta las pérdidas de Mismatch y pérdidas por formación de puntos calientes. Aunque se necesita información detallada sobre el tipo de polvo acumulado (tipo de material, distribución de tamaño y densidad de deposición) para cuantificar su efecto en la potencia producida, se pueden hacer análisis básicos comparando el comportamiento del panel totalmente limpio y con alguna suciedad (que puede variar desde suciedades puntuales o una fina capa de polvo homogénea. El porcentaje por pérdida de polvo y suciedad esta dado en un promedio del 2 al 3%.

## 7.4 PÉRDIDAS POR CAÍDAS ÓHMICAS EN EL CABLEADO

Las pérdidas por cableado pueden llegar a ser significativas, es decir, si en un sistema fotovoltaico no se selecciona adecuadamente el calibre del cableado podrían presentarse muchas dificultades en el desarrollo e instalación del sistema.

Las pérdidas por caída de tensión en el cableado por efecto joule se pueden estimar con la ecuación 8.

$$P_R = I^2 * R_C \quad \text{Ec.8}$$

Dónde

$P_R$ : Potencia perdida en los cables por efecto Joule

$R_C$ : Resistencia Óhmica de los cables

La resistencia Óhmica se puede cuantificar con la ecuación 9.

$$R_C = \frac{\rho * L}{S} \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde:

$\rho$ : Resistividad del conductor del cable

$L$ : Longitud de los cables

$S$  : Sección del conductor del cable

## 7.5 PÉRDIDAS POR TEMPERATURA

Los módulos FV normalmente tienen pérdidas por temperatura en un orden relativamente elevado por cada 10 °C un  $\pm 4\%$ , esto varía de acuerdo a la tecnología. La temperatura de operación depende igualmente de unos factores de

operación dados por el NOCT (normal operacional de la temperatura de la célula). Irradiancia 800W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente 20°C, espectro de 1,5 AMG, velocidad del viento 1 m/s. [29]

La ecuación 10 permite cuantificar las pérdidas por temperatura en un sistema solar fotovoltaico.

$$T_c = T_A + G \times \left[ \frac{NOCT-20}{0,8} \right] \quad \text{Ec. 10.}$$

*WWW.CUGAR.NET*

## **7.6 PÉRDIDAS POR SOMBREADO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO**

Normalmente las pérdidas por sombreado se dan cuando se instala un sistema en entornos urbanos, en que ciertas horas las sombras de estos permiten una disminución de pérdidas energéticas, causadas por la disminución de la irradiación solar, y también que en la célula o en el módulo se puede producir pérdidas por Mismatch. El porcentaje de pérdidas varía dependiendo del sector del panel y la cantidad de este que esté cubierto. [29]

Figura 24. Ejemplo de un sistema FV con pérdidas de sombreados [30]

Superficie de estudio ubicada en Madrid, inclinada 30° y orientada 10° al Sudeste.

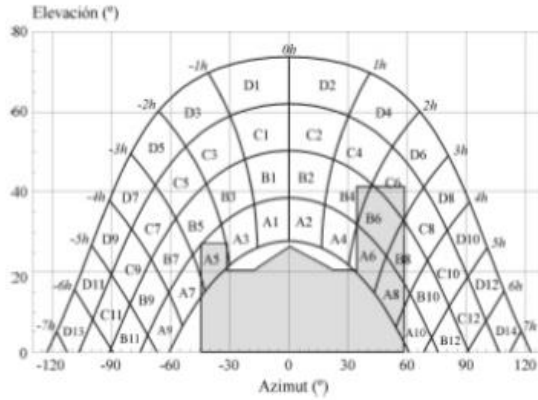


Tabla 6. Tabla de referencia.

$\beta = 35^\circ$ $\alpha = 0^\circ$	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,03
11	0,00	0,01	0,12	0,44
9	0,13	0,41	0,62	1,49
7	1,00	0,95	1,27	2,76
5	1,84	1,50	1,83	3,87
3	2,70	1,88	2,21	4,67
1	3,15	2,12	2,43	5,04
2	3,17	2,12	2,33	4,99
4	2,70	1,89	2,01	4,46
6	1,79	1,51	1,65	3,63
8	0,98	0,99	1,08	2,55
10	0,11	0,42	0,52	1,33
12	0,00	0,02	0,10	0,40
14	0,00	0,00	0,00	0,02

En el ejemplo me muestra un tipo de sombreado sobre un sistema para hallar el porcentaje de pérdidas por sombreado hacemos las siguiente multiplicaciones.

Perdidas por sombreado

$$(\% \text{ de irradiación global incidente anual}) = 0,25x B4 + 0,5xA5 + 0,75xA6+B6+0,25xC6+A8+0,5XB8+0,25xA10 = 6,16\% = 6\%$$

## 8. USO DE LA ENERGÍA SOLAR EN LA HISTORIA

Se podría decir que la energía solar se ha venido utilizando desde los orígenes de la humanidad como fuente de calor. Aunque el bajo o nulo nivel técnico del que se disponía no permitía aprovechar de manera más eficiente los beneficios que el sol ofrece.

En el siglo XVI, Leonardo da Vinci inició un proyecto con el que buscaba encontrar una forma eficiente de mejorar las técnicas de aprovechamiento de la luz solar. Quería construir un concentrador a base de espejos cóncavos para la producción de vapor y calor industrial, aunque nunca culminó el proyecto.

A mediados del siglo XVIII, Georges-Louis Leclerc, inspirado en los relatos de la guerra de Siracusa (Donde Arquímedes usó espejos de bronce para concentrar y reflejar la luz solar, con el fin de destruir las flotas enemigas) empezó a investigar en este campo. Leclerc empleaba cristales de gafas unidos para concentrar el calor del sol y generar fuego a varios metros de distancia. Posteriormente decidió experimentar con hornos solares, uniendo más cristales y logro generar fuego a una mayor distancia y fundir tinajas de arcilla e inclusive fundir viruta de plata.

Durante la revolución industrial, se empleó la energía solar para generación de vapor para alimentar las máquinas de vapor y para la destilación de agua para potabilización.

Desde los inicios de la humanidad el hombre supo aprovechar la energía solar térmica, pero no fue hasta 1893 que Charles Fritts creó la primera célula solar con una eficiencia del 1%, formada por láminas de revestimiento de selenio con una fina capa de oro, este sencillo elemento fue el inicio de lo que hoy conocemos como panel solar.

En 1911 Schuman fundó Sun Power Co. Y posteriormente creó la primera planta solar en Tancony. Estados Unidos, dicha planta generaba un total de 20kW, al año siguiente fundó otra planta solar en Maadi, Egipto, que generaba 88kW.

En 1940 el inventor Russel Ohl creó la primera celda de silicio, muy similar a la empleada en la actualidad. En 1954 en los laboratorios Bells descubrieron que el silicio con algunas impurezas era más sensible a la luz y en 1955 lograron aumentar la eficiencia de las celdas fotovoltaicas en un 11%. [31]

## **8.1 ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA**

A comienzos de los 80, Telecom inició el Programa de Telecomunicaciones Rurales, donde empleaban pequeños generadores fotovoltaicos para radio teléfonos rurales, debido a que los costos de producción de energía, operación y mantenimiento en las zonas remotas del país era muy costoso y la generación de energía solar resultaba más confiable y económica a largo plazo. Los primeros generadores fotovoltaicos eran del 60Wp, pero en poco tiempo se instalaban sistemas de 3 y 4 kWp. [32]

## **9. ESTADO DE ARTE DE BANCOS DE PRUEBA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

La energía solar fotovoltaica a pesar de tener aproximadamente 100 años desde su primera implementación, sigue siendo objeto de investigaciones que buscan optimizar los procesos de obtención de recursos, por ello es muy común encontrar innumerables proyectos de laboratorios para el estudio y desarrollo de estas tecnologías, como por ejemplo el laboratorio de energía solar de la UPV en Zamudio, este laboratorio cuenta con sofisticados equipos para la fabricación y caracterización de paneles solares. Otro ejemplo de ello es el Laboratorio Asociado Europeo de Energía Solar (SolLab), que cuenta con el aporte de los principales institutos de investigación de energía solar. O EU-Solaris ubicado en Almería, que es un centro tecnológico de Energías renovables. Estos proyectos cuentan con financiación estatal y privada y los resultados de sus investigaciones significan grandes aportes para el desarrollo de las energías renovables.

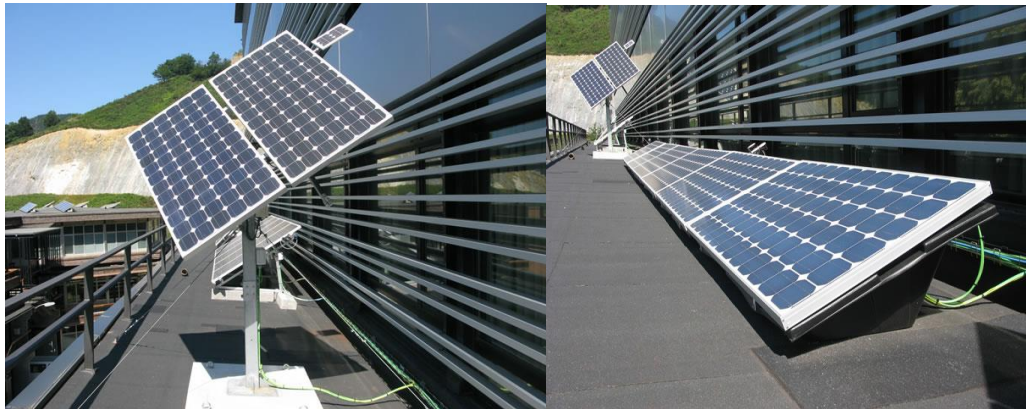
También existen una serie de laboratorios cuya principal finalidad es permitir la interacción de gente común con sistemas solares fotovoltaicos para facilitar la comprensión del funcionamiento del sistema y sus partes. Este tipo de proyectos son un poco más pequeños que los anteriores, pero también hacen aportes al desarrollo de estas tecnologías. Estos laboratorios pueden ser pequeñas instalaciones fotovoltaicas ubicadas en lugares estratégicos de fácil acceso o bancos de pruebas que permiten variar conexiones y otros parámetros. [33]

## 9.1 LABORATORIOS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN EL MUNDO.

- LAB FV Conex red (Figura 25) es una instalación solar fotovoltaica diseñada bajo criterios educativos y construida en forma de laboratorio de experimentación por la Escuela Universitaria de ingeniería técnica de Éibar en el país vasco. El sistema cuenta con los elementos básicos para el estudio de la aplicación fotovoltaica en conexión a red.

Este laboratorio de energía solar pretende crear las tecnologías más avanzadas en células solares para transferirlas a la industria. [34]

**Figura 25. Laboratorio FV Conex**



Fuente: [www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/laboratorios/lab\\_2/fotos/images/04.jpg](http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/laboratorios/lab_2/fotos/images/04.jpg)

- **SOLLAB**

Es el Laboratorio Asociado Europeo de Energía Solar (SoILAB). Este laboratorio virtual está constituido por los principales institutos europeos de investigación en energía solar concentrada, es decir: el PROMES-CNRS de Odeillo (Francia), la división de energía solar del DLR en Colonia (Alemania), el laboratorio de energías renovables del Instituto Tecnológico Federal de Zürich (Suiza), el Paul Scherrer Institut (Suiza) y el propio CIEMAT.

Este laboratorio se utiliza para diferentes universidades para las prácticas del master en energías. SolLab está ubicado en el edificio Ciesol (Figura 26)

**Figura 26. Foto del edificio 'Ciesol' en el Campus de La Cañada**



Fuente. <https://www.psa.es/webesp/gen/colaboracion.php>

## **9.2 LABORATORIOS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA.**

**9.2.1 EPSA.** En la terraza del edificio de la EPSA (Empresa de Energía del Pacífico) ubicado en la autopista Cali-Yumbo, se instaló un campo fotovoltaico que cuenta con 294 paneles de silicio, que generan 6227 kW/h (Figura 27). Este proyecto se instaló con la finalidad de estudiar el comportamiento de estas tecnologías en esa región del país, para seguir haciendo instalaciones de este tipo más adelante en la zona. [36]

**Figura 27. Instalación del Laboratorio EPSA**



Fuente: Elpais.com

**9.2.2 Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.** La Universidad Francisco de Paula Santander UFPS Ocaña cuenta con un banco de prueba de energía solar fotovoltaica que genera la energía que enciende las luces de la Plazoleta de la vida en esa ciudad (Figura 28). Este proyecto fue abordado como trabajo de grado de dos estudiantes de ingeniería mecánica y el objetivo principal es favorecer la innovación en este campo. Este laboratorio consiste en un pequeño campo fotovoltaico que permite el acceso a estudiantes, para que estos puedan relacionarse con el sistema y los equipos. [37]

**Figura 28. Plazoleta vida iluminada por un sistema fotovoltaico**



Fuente: [https://ufps.edu.co/images/images\\_news/1280/1428\\_083945.jpg](https://ufps.edu.co/images/images_news/1280/1428_083945.jpg)

**9.2.3 Universidad de la Costa (Barranquilla).** La facultad de energía eléctrica y la especialización en fuentes renovables de energía diseñaron un laboratorio de energía solar fotovoltaica que está orientado a la investigación aplicada de las energías no convencionales (Figura 29). Este proyecto busca promover y realizar investigaciones sobre diferentes tipos de fuentes energéticas renovables y difundir conocimientos científicos y tecnológicos relacionados con el aprovechamiento de las energías renovables. El laboratorio cuenta con 6 módulos fotovoltaicos de 135Watts de marca Kyocera, 21 sets educativos de energías renovables provistos por la compañía Horizon fuel cell technologies y 6 baterías de 135amperios de marca Trojan. Los sets educativos cuentan con 10 prácticas de laboratorios logradas a través de experimentos realizados en los dispositivos, como el uso de paneles solares para encender lámparas leds o un ventilador, entre otros. Los sistemas permiten conexiones en serie y paralelo logrando conexiones de 12, 24 y 48 voltios.

**Figura 29. Laboratorio universidad de la costa**



Fuente: [www.acofipapers.org/index.php/acofipapers/2013/paper/viewFile/288/153](http://www.acofipapers.org/index.php/acofipapers/2013/paper/viewFile/288/153)

### 9.3 LABORATORIOS DE ENERGÍA SOLAR EN BUCARAMANGA

En la ciudad de Bucaramanga hay dos laboratorios de energía solar fotovoltaica, en la universidad Autónoma de Bucaramanga y en el SENA.

**9.3.1 Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB).** La facultad de Ingeniería de Energías de esta universidad cuenta con cuatro bancos de pruebas equipados con paneles solares, inversores, controladores y baterías (Figura 30). Estos módulos permiten conectar el sistema a la red, es decir ofrecen la posibilidad de trabajar con sistemas OFF-GRID y GRID-TIE.

**Figura 30. Laboratorio UNAB**





Fuente. Autor

**9.3.2 Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA).** Esta institución cuenta con dos sistemas de energía solar fotovoltaica, el primero es un sistema off-grid que energiza los parqueaderos en la noche(Figura 32), otro es un pequeño sistema creado por los estudiantes, fabricando un panel fotovoltaico con celdas solares(Figura 31).

**Figura 31. Laboratorio Sena girón**



Fuente. Autor

**Figura 32. Sistema off-grid parqueaderos Sena**



Fuente. Autor

## 10. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

La UPB está incursionando en el área de las energías renovables, por tal motivo no cuenta con los elementos didácticos para trabajar los diferentes tipos de energías alternativas.

Inicialmente para afianzar la parte práctica de instalaciones fotovoltaicas en la UPB Bucaramanga. Se ubicaban los paneles en el suelo, situación que dificultaba las conexiones e inclusive la toma de medidas.

Partiendo de esta necesidad nació la idea de construir bancos de pruebas que facilitaran la interacción de los estudiantes con los elementos de una instalación fotovoltaica y permitieran realizar las conexiones necesarias de manera sencilla.

Dichos bancos cuentan con todos los elementos de un sistema fotovoltaico off grid: Paneles (Mono-cristalino, poli-cristalino y amorfo), banco de baterías, controladores (MPPT y PWM), inversores de onda pura y onda modificada (12v y 24v), entre otros.

En el caso de los controladores e inversores cada módulo cuenta con uno de cada tipo de controladores (MPPT, PWM) e inversores (12 v y 24v). La finalidad de esto es que el usuario tenga la posibilidad de escoger cual se adapta mejor a sus necesidades y pueda analizar el comportamiento del sistema variando los equipos.

Los tableros están equipados con elementos de medición (Multímetros y pinzas perimétricas), guardianes y monitores de baterías.

Estos sistemas netamente didácticos permiten conectar cargas inductivas y cargas resistivas, pues tienen un tomacorriente y permiten conectar 5 bombillos como

máximo (Esto está limitado por la potencia del inversor). Se puede variar la cantidad de bombillos conectados para observar cómo cambia el sistema dependiendo del número y tipos de carga.

No es un secreto que a la hora de instalar un sistema fotovoltaico es necesario tener conocimientos básicos de electricidad, los tableros permiten realizar las conexiones no solo de los elementos básicos del sistema, sino también de la caja de tacos, los bombillos y los interruptores

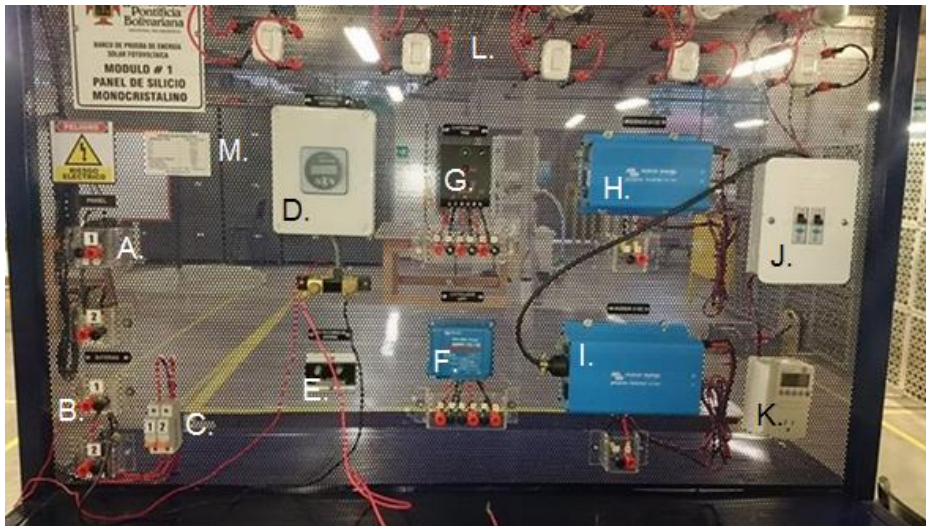
Los paneles fueron instalados de tal manera que permitieran variar el ángulo de inclinación dependiendo de la ubicación del sistema, esto permite a los estudiantes confirmar la importancia de los cálculos de ubicación a la hora de diseñar un sistema FV.

Los elementos están ubicados en el tablero de tal manera que permitan hacer las conexiones de manera fácil y segura, también es posible realizar conexiones en serie y paralelo para paneles y baterías.

## 10.1 MÓDULO No.1: SILICIO MONO-CRISTALINO

El modulo No.1 (Figura 33) está compuesto por dos paneles de silicio mono-cristalino de 100 W y dos baterías de AGM o GEL de 12v/100Ah; además cuenta con:

**Figura 33. MÓDULO No.1: SILICIO MONO-CRISTALINO**



- A. Puerto de conexión para paneles.
- B. Puerto de conexión para baterías
- C. Protección de baterías
- D. Monitor de baterías BMV-700
- E. Guardián de baterías 60 A
- F. Controlador MPPT 7515
- G. Controlador PWM 10 A
- H. Inversor Victron onda pura de 24V-180Watts
- I. Inversor Victron onda pura de 12V-350Watts
- J. Tablero de protección
- K. Cargas inductivas y capacitivas  $\approx 120 W$
- L. Carga resistiva  $\approx 150 W$
- M. Ficha técnica de los paneles

Este módulo es capaz de generar una potencia de 850 Wh/día, en condiciones ideales de irradiación  $1000 [Wm^{-2}]$ .

## 10.2 MODULO No.2: SILICIO POLI-CRISTALINO

El modulo No.2 (Figura 34) está compuesto por dos paneles de silicio poli-cristalino de 135 W y dos baterías de AGM o GEL DE 12V/100Ah, además está equipado con:

**Figura 34. MODULO No.2: SILICIO POLI-CRISTALINO**



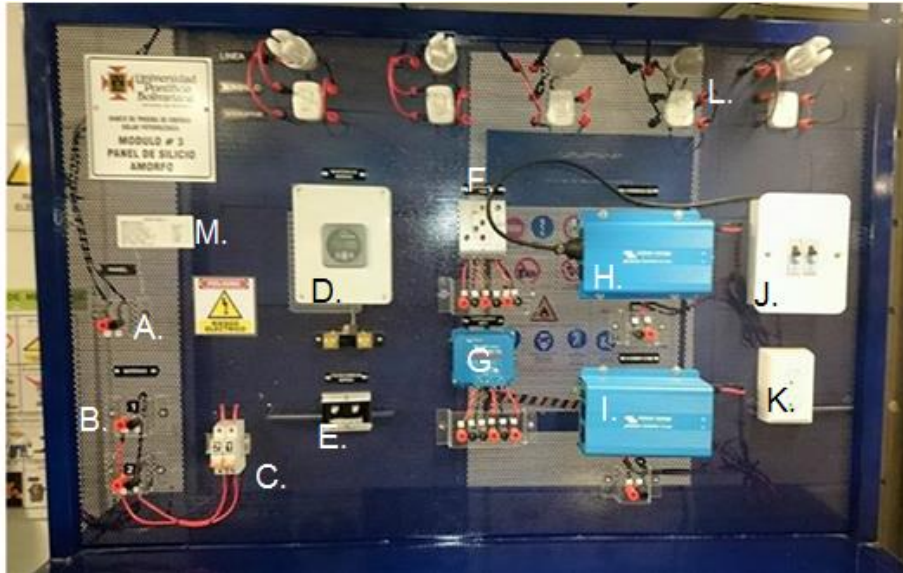
- A. Puerto de conexión para paneles
- B. Puerto de conexión para baterías
- C. Protección de baterías
- D. Monitor de baterías
- E. Guardián de baterías
- F. Controlador MPPT 7515
- G. Inversor Thor de onda modificada 12V- 2000W
- H. Controlador PWM 20 A
- I. Inversor Victron de onda pura de 24V-180Watts
- J. Inversor Victron de onda pura de 12V-350Watts
- K. Tablero de protección
- L. Cargas inductivas y capacitivas  $\approx 120 W$
- M. Carga resistiva  $\approx 140 W$
- N. Ficha técnica del panel

Este módulo es capaz de generar una potencia de 1146,96 Wh/día, en condiciones ideales de irradiación  $1000 [Wm^{-2}]$ .

### 10.3 MÓDULO No.3: SILICIO AMORFO

El modulo No.3 (Figura 35) está compuesto por un panel de silicio amorfo de 100 W y dos baterías de 12V/100Ah, además cuenta con:

**Figura 35. MÓDULO No.3: SILICIO AMORFO**



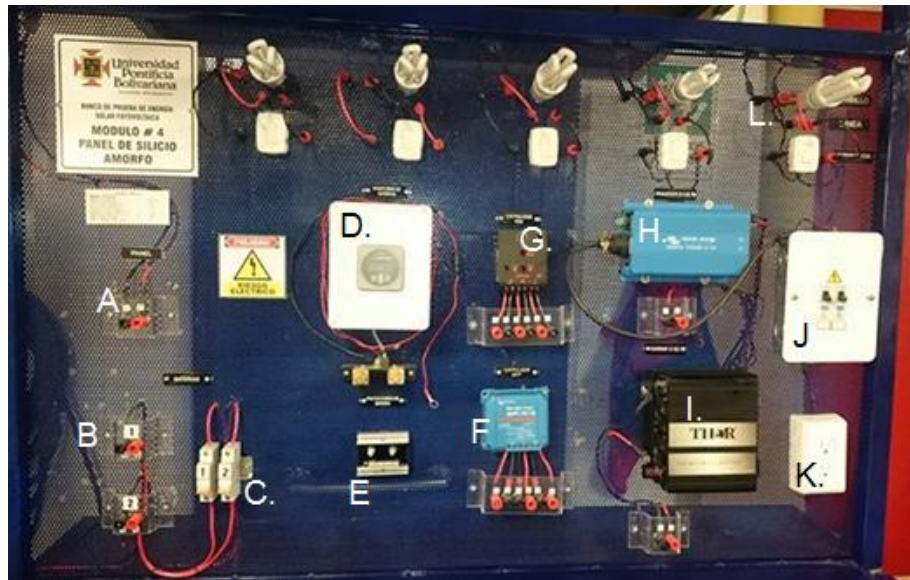
- A. Conexión de paneles
- B. Conexión de baterías
- C. Protección de baterías
- D. Monitor de baterías
- E. Guardián de baterías
- F. Controlador PWM 20 A
- G. Controlador MPPT 7515
- H. Inversor Victron de onda pura de 24V-180Watts
- I. Inversor Victron de onda pura 12V-350Watts
- J. Tablero de protección
- K. Cargas inductivas y capacitivas  $\approx 120 W$
- L. Carga resistiva  $\approx 140 W$
- M. Ficha técnica del panel

Este módulo es capaz de generar una potencia de 425 Wh/día, en condiciones ideales de irradiación  $1000 [Wm^{-2}]$ .

#### 10.4 MODULO No.4: SILICIO AMORFO

El modulo No.4 (Figura 36) está compuesto por un panel de silicio amorfo de 142 W y dos baterías una de 12V/100Ah y otra batería de gel 12V/205Ah. Además cuenta con:

**Figura 36. MODULO No.4: SILICIO AMORFO**



- A. Borneras para conexión del panel
- B. Borneras para conexión de las baterías
- C. Protección de baterías
- D. Monitor de baterías BMV-700
- E. Guardián de baterías
- F. Controlador MPPT 7515
- G. Controlador PWM 10 A
- H. Inversor Victron de onda pura de 24V 180Watts
- I. Inversor Thor de onda modificada de 12V 1000Watts
- J. Tablero de protección
- K. Cargas inductivas y capacitivas  $\approx 120 W$
- L. Carga resistiva  $\approx 140 W$

Este módulo es capaz de generar una potencia de 603,21 Wh/día, en condiciones ideales de irradiación  $1000[Wm^{-2}]$ .

## 11. DISEÑO Y CALCULO DEL SISTEMA

Para el dimensionamiento y selección de los equipos apropiados para los bancos de pruebas se partió de un consumo teórico estimado (cargas inductivas y resistivas), con el que se determinó debido a la cantidad de paneles con que se contaba, su distribución (Paralelo o serie), el número de baterías que cumpliera con las necesidades previamente establecidas, la capacidad del inversor y el controlador. Además con esta información, también se puede cuantificar la producción de energía de cada módulo.

### 11.1 ANGULO ÓPTIMO

**11.1.1 Ubicación.** Los bancos de energía solar, se encuentran ubicados en el bloque K de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA.

Para obtener datos exactos es necesario conocer la latitud y longitud de dicho punto. Una forma sencilla de obtenerlos es accediendo a la plataforma de google maps que cuenta con una interfaz gráfica sencilla y únicamente es necesario ingresar el nombre del punto geográfico deseado en el recuadro “Buscar en Google Maps” para obtener automáticamente la información de latitud y longitud (Figura 37).

La figura 38 es una fotografía obtenida en google maps del punto donde están ubicados los bancos de energía solar fotovoltaica correspondientes a este proyecto.

- Web de coordenadas.

**Figura 37. Latitud y longitud**



Fuente: Google maps.

**Figura 38. Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga**



Fuente:

[www.google.it/maps/place/Universidad+Pontificia+Bolivariana+Seccional+Bucaramanga/@7.034336,73.067418,3a,75y,90t/data=!3m8!1e2!3m6!1s118359584!2e1!3e10!6s%2F%2Fstorage.googleapis.com%2Fstatic.panoramio.com%2Fphotos%2Fsmall%2F118359584.jpg!7i1600!8i1067!4m3!3m2!1s0x8e6840b36653b9c5:0x4dcdbc55842151df!4b1](http://www.google.it/maps/place/Universidad+Pontificia+Bolivariana+Seccional+Bucaramanga/@7.034336,73.067418,3a,75y,90t/data=!3m8!1e2!3m6!1s118359584!2e1!3e10!6s%2F%2Fstorage.googleapis.com%2Fstatic.panoramio.com%2Fphotos%2Fsmall%2F118359584.jpg!7i1600!8i1067!4m3!3m2!1s0x8e6840b36653b9c5:0x4dcdbc55842151df!4b1)

Con la información obtenida en google maps, se puede acceder al software gratuito retscreen el cual me muestra datos altamente confiables de radiación solar que recibirían los paneles de acuerdo a un ángulo de inclinación y orientación de los mismos, (Tabla 7) este programa ofrece información de radiación, vientos, entre otros. El software permite ver la radiación mensual, semanal, diaria, hasta la de una hora específica.

**Tabla 7.** Tabla de radiación solar del mes de noviembre con un ángulo de inclinación de 8,4° a 90° y 8,4° a 180 °

Tiempo - 6,99, -73,05 - NASA		Generación de electricidad						
6,99, -73,05 (7°N, -73,1°E) Elevación: 1.117,6 m (proyecto) 1.117,0 m (NASA)								
P	Fecha	Temperatura c °C	Humedad relativa %	Radiación solar diaria kWh/m <sup>2</sup> /d	Presión atmosférica kPa	Velocidad del Vient m/s	Radiación solar diaria - inclinado (Fijado - 8,4° - 90,0°) kWh/m <sup>2</sup> /d	Radiación solar diaria - inclinado (Fijado - 8,4° - 180,0°) kWh/m <sup>2</sup> /d
+	26 2015-10-02	21,4	89,6%	5,47	83,8	0,9	5,43	5,31
+	26 2015-10-03	24,4	80,4%	5,38	83,8	1,4	5,34	5,22
+	26 2015-10-04	24,8	80,0%	5,28	83,9	1,6	5,25	5,12
+	26 2015-10-05	25,3	78,6%	6,46	83,9	1,6	6,42	6,23
+	26 2015-10-06	24,8	79,6%	6,43	83,9	1,6	6,39	6,19
+	26 2015-10-07	24,4	82,5%	4,77	83,9	1,3	4,74	4,63
+	26 2015-10-08	23,8	82,6%	5,84	83,8	1,2	5,80	5,63
+	27 2015-10-09	23,0	84,4%	4,48	83,9	1,2	4,45	4,35
+	27 2015-10-10	23,7	83,8%	6,10	83,9	1,3	6,06	5,86
+	27 2015-10-11	22,7	87,2%	4,29	83,9	1,0	4,26	4,16
+	27 2015-10-12	23,0	88,9%	4,47	83,9	1,0	4,44	4,32
+	27 2015-10-13	21,6	93,4%	4,64	83,9	0,9	4,61	4,48
+	27 2015-10-14	21,7	90,1%	3,81	83,9	1,0	3,79	3,70
+	27 2015-10-15	22,9	86,8%	4,32	83,8	1,0	4,29	4,17
+	27 2015-10-16	23,3	86,9%	4,12	83,8	1,2	4,10	3,98
+	27 2015-10-17	22,6	85,9%	6,14	83,9	1,1	6,10	5,85
+	27 2015-10-18	22,6	87,1%	5,71	84,1	1,2	5,68	5,45
+	28 2015-10-19	23,6	83,9%	6,06	84,0	1,2	6,02	5,76
+	28 2015-10-20	24,4	79,7%	6,40	84,0	1,3	6,36	6,07
+	28 2015-10-21	25,0	79,6%	5,43	83,9	1,2	5,40	5,18
+	28 2015-10-22	21,5	89,3%	6,23	83,9	0,8	6,19	5,90
+	28 2015-10-23	24,3	85,1%	5,16	83,8	1,1	5,13	4,92
+	28 2015-10-24	21,1	90,9%	2,20	83,9	1,0	2,19	2,12
+	28 2015-10-25	23,2	84,9%	5,41	84,0	1,1	5,38	5,14
+	28 2015-10-26	21,9	89,1%	4,13	84,0	1,1	4,11	3,96

Fuente. Retscreen

Para diseñar sistemas OFF GRID es recomendable tomar el valor del día de menor radiación en el mes y para sistemas GRID-TIE se recomienda emplear un promedio de radiación anual.

De acuerdo con la información suministrada por la NASA (Tabla 8) el índice más bajo de radiación solar incidente en la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA durante el 2014 fue en el mes de noviembre:

$$\text{HSP} = 4.72 \text{ kW}_h / \text{m}^2 / \text{d}$$

Donde

HSP es la hora solar pico, que se puede definir como el número de horas en que se dispone de una hipotética irradiación solar constante de 1000 [Wm<sup>-2</sup>].

Como lo muestra la tabla 8:

**Tabla 8. Radiación solar mensual según la NASA**

Month	Air temperature	Relative humidity	Daily solar radiation - horizontal	Atmospheric pressure	Wind speed	Earth temperature	Heating degree-days	Cooling degree-days
	°C	%	kWh/m <sup>2</sup> /d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
January	23.3	65.6%	5.34	91.9	2.0	24.3	0	417
February	24.7	59.8%	5.34	91.8	1.9	26.4	0	416
March	24.5	66.0%	5.28	91.8	1.7	26.2	0	451
April	23.7	76.6%	4.96	91.8	1.6	24.9	0	412
May	23.2	80.1%	5.01	91.9	1.6	23.9	0	413
June	23.1	76.3%	5.16	91.9	1.8	23.6	0	399
July	23.4	70.0%	5.57	92.0	1.8	24.0	0	423
August	23.6	69.1%	5.55	92.0	1.6	24.4	0	430
September	23.0	75.8%	5.27	91.9	1.5	23.8	0	395
October	22.4	81.9%	4.80	91.9	1.5	23.2	0	386
November	22.3	81.5%	4.72	91.8	1.5	23.0	0	373
December	22.4	76.2%	4.86	91.8	1.9	22.8	0	390
<b>Annual</b>	23.3	73.2%	5.15	91.9	1.7	24.2	0	4905
Measured at (m)					10.0	0.0		

Fuente: NASA

Instalar el panel con su inclinación óptima, garantiza una mayor radiación incidente sobre un captador solar estático. Para calcular este ángulo, se emplea la ecuación 11 que permite determinar la inclinación óptima en función de la latitud del sitio donde se instalará el sistema.

$$\beta_{opt} = 3,7 + (0,69 * \phi) \quad (EC. 11)$$

**Dónde:**

$\beta_{opt}$  = ángulo de inclinación en grados

$\phi$  = latitud del lugar

$$\beta_{opt} = 3,7 + (0,69 * 7,038)$$

$$\beta_{opt} = 8,42^\circ$$

De acuerdo a la latitud de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga el ángulo ideal de inclinación es de 8,42°.

## 11.2 ESTIMACIÓN DEL CONSUMO

Para la estimación del consumo se tuvieron en cuenta cargas inductivas, resistivas y capacitivas que se podrían conectar en cada uno de los bancos (tabla 9). Para calcular el consumo energético, se pueden emplear las ecuaciones 12 y 13, que básicamente relacionan la potencia consumida (En AC y DC) y el tiempo de utilización

$$E_{AC} = \sum P_{(AC)i} t_{di} \quad \text{(EC.12)}$$

$$E_{DC} = \sum P_{(DC)i} * t_{di} \quad \text{(EC.13)}$$

Donde:

$E_{AC}$ = Energía consumida en AC (WH)

$E_{DC}$ =Energía consumida en DC (WH)

$P_{(AC)i}$  = Potencia nominal cargas en AC (W)

$P_{(DC)i}$  = Potencia nominal cargas en DC (W)

$t_{di}$ = tiempo diario de uso (h)

**Tabla 9. Estimación de consumo**

UNIDADES	CARGA	POTENCIA UNITARIA (WATTS)	HORA DE FUNCIONAMIENTO AL DÍA (HORAS)	TOTAL DE ENERGÍA NECESARIA (wh)
3	BOMBILLOS AHORRADORES (AC)	20	3	180
1	BOMBILLO INCANDESCENTE	70	3	210
1	BOMBILLO INCANDESCENTE	25	3	75
1	CARGA INDUCTIVA (VENTILADOR)	65	3	195
1	CARGA CAPACITIVA (CELULAR )	4	3	12
TOTAL				672

Fuente. Autor

**Nota:** Para el cálculo de consumo se determinó que el tiempo de funcionamiento serían 3 horas, ya que normalmente las sesiones de laboratorio duran dos horas aproximadamente, también se propusieron una cargas inductivas (ventilador potencia de 65 W) y una carga capacitiva (un celular con una batería de litio de 3200 mA), que estarían sujetas a cambios dependiendo de los objetivos de cada práctica. Todos estos datos se relacionaron en la tabla 9.

Es importante tener en cuenta las pérdidas por rendimiento de los equipos en el sistema (Batería, inversor) y cableado. Según el Datasheet el rendimiento de la batería es del 91%, es decir 9% de pérdidas, el inversor y el cableado tienen un rendimiento del 90%.

Dicho esto para el cálculo de consumo medio diario ( $L_{MD}$ ), se considera la ecuación 14

$$L_{md} = \frac{L_{md,dc} + \frac{L_{md,ac}}{\eta_{inv}}}{\eta_{BAT} * \eta_{con}} \quad (EC. 14)$$

### DONDE

$L_{md}$ : el consumo medio de energía diario

$L_{md,dc}$ : el consumo medio de energía diario de las cargas en continua

$L_{md,ac}$ : el de las cargas en alterna, cuyas unidades son wh/día.

El consumo medio diario del sistema sería el siguiente:

$$L_{md} = \frac{0 + \frac{672}{0,90}}{0,91 * 0,9}$$

$$L_{md} = 911,68 \text{ wh/d}$$

### 11.3 DIMENSIONADO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO

**Numero de paneles para cada sistema:** el número de paneles se calcula con la siguiente expresión:

$$N_T = \frac{L_{mdcrit}}{P_m * HSP * PR} \quad (EC. 15)$$

$L_{mdcrit}$ : consumo medio diario mensual para el mes crítico, tomado de la “Tabla de estimación de consumos (Tabla 9)”.

$P_m$ : Potencia pico del módulo en condiciones estándar de medida STC

HSP: Horas de sol pico del mes crítico calculado a partir de la tabla 8, es decir:  
Irradiación del mes crítico (Noviembre) = 4,72 HPS

PR: Factor global de funcionamiento que varía entre 0.65 y 0.90. Usaremos 0.90 para garantizar unas condiciones de máximo funcionamiento.

**Nota:** Para  $P_m$  se manejarán 3 diferentes tecnologías las cuales tienen diferentes potencias.

Para el modelo de silicio mono-cristalino (ERDM 100TM/5) de la marca BERGER SOLAR SIMULATOR con una potencia pico de 100 watts el número de paneles sería:

$$N_T = \frac{911,69}{100 * 4,72 * 0,9}$$

$$N_T = 2,14$$

$$N_T \approx 2 \text{ Paneles}$$

Para el modelo de silicio poli-cristalino (**KD135SX-UPU**) de la marca KYOCERA con una potencia pico de 135 watts el número de paneles sería:

$$N_T = \frac{911,68}{135 * 4,72 * 0,9}$$

$$N_T = 1,6$$

$$N_T \approx 2 \text{ Paneles}$$

Para los modelos de amorfo contamos con dos diferentes potencias

Para el **DA142-C3** de la marca DUPONT APOLLO con una potencia pico de 142 watts el número de paneles sería

$$N_T = \frac{911,68}{142 * 4,72 * 0,9}$$
$$N_T = 1,2$$
$$N_T \approx 1 \text{ Panel}$$

Para el **DA100-A2** de la marca DUPONT APOLLO con una potencia pico de 100 watts el número de paneles sería

$$N_T = \frac{911,68}{100 * 4,72 * 0,9}$$
$$N_T = 1,15$$
$$N_T \approx 1 \text{ Panel}$$

Conociendo el número de paneles que se pueden instalar en cada banco, se procede a determinar de forma teórica, la distribución de los mismos, es decir qué tipo de conexión resulta más beneficiosa para el sistema (Serie o paralelo). Para ello, es necesario conocer la tensión nominal de las baterías, que coincidirá con la tensión nominal de cada instalación. Para ello se tendrá en cuenta la información de la tabla 10.

## 11.4 TENSIONES NOMINALES DE TRABAJO SEGÚN LA CARGA

**Tabla 10. Tensiones de trabajo**

POTENCIA DENOMINADA POR LAS CARGAS EN ( W )	TENSIÓN DE TRABAJO ( V )
Menor de 1500	12
1500-5000	24 o 48
Mayor de 5000	120 o 300

Fuente. Boletín solar FV autónomo Disponible en: [http://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2011/09/Sunfields\\_Boletin\\_Fotovoltaica\\_Autonomas.pdf](http://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2011/09/Sunfields_Boletin_Fotovoltaica_Autonomas.pdf)

Teniendo en cuenta la tabla 10 y que la potencia que suministrará cada banco no es mayor a 1500 watts (Según la tabla 9), es viable trabajar con una tensión de 12 v; claro está que al ser un banco de pruebas didáctico, permite variar las conexiones para trabajar con voltajes de 24 o 12V para estudiar su comportamiento.

## 11.5 NUMERO DE PANELES EN SERIE

Partiendo de la cantidad de paneles totales y tensión del banco de acumuladores se puede proceder a realizar el cálculo para determinar si es necesario agrupar los paneles FV en serie o en paralelo con la siguiente expresión:

$$N_{SERIE} = \frac{V_{BAT}}{V_{MOD}} \quad (EC. 16)$$

Dónde:

$V_{BAT}$ = tensión de la batería

$V_{MOD}$ = tensión del módulo FV

$$N_{SERIE} = \frac{12}{12}$$

$$N_{SERIE} = 1$$

## 11.6 NUMERO DE PANELES EN PARALELO

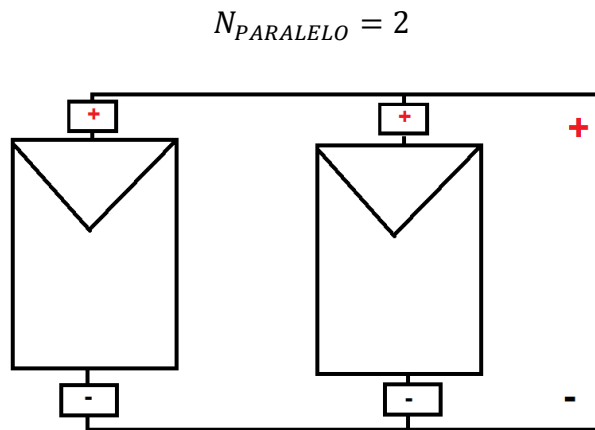
Los cálculos para obtener el número de ramas de paneles en paralelo se da por la siguiente expresión:

$$N_{PARALELO} = \frac{N_T}{N_{SERIE}} \quad (EC. 17)$$

$$N_{PARALELO} = \frac{2}{1}$$

Teniendo en cuenta la información obtenida con las ecuaciones 16 y 17, el sistema permite conectar dos paneles en paralelo y uno en serie para el mayor aprovechamiento energético, como lo muestra la figura 39.

**Figura 39. Arreglo de paneles FV**



Fuente: Autor

## 11.7 DIMENSIONADO DE SISTEMA DE ACUMULACIÓN

Para la selección de las baterías es necesario tener en cuenta la máxima profundidad de descarga (estacional y diaria) y el número de días de autonomía del sistema (En este caso, 3 horas de autonomía como mínimo para cada clase). Como norma general se toman estos parámetros:

Profundidad de descarga máxima estacional ( $PD_{max, e}$ )=70%=0,7

Profundidad de descarga máxima diaria ( $PD_{max, d}$ )=15%=0,15

Número de días de autonomía(N)= 0,125 días = 3 horas

Para la capacidad nominal de la batería en función de descarga máxima diaria ( $C_{nd}$ ) usamos la siguiente expresión:

$$C_{nd}(Wh) = \frac{L_{md} * N}{P_{Dmax,d} * F_{ct}} \quad (EC. 18)$$

$$C_{nd}(AH) = \frac{C_{nd}(Wh)}{V_{BAT}} \quad (EC. 19)$$

### Donde

$F_{ct}$ = Factor de corrección de temperatura=1

$$C_{nd}(Wh) = \frac{911,68 * 0,125}{0,15 * 1}$$

$$C_{nd}(Wh) = 759,73 WH$$

$$C_{nd}(AH) = \frac{759,73}{12}$$

$$C_{nd}(AH) = 63,31AH$$

Capacidad nominal de la batería en función de descarga máxima estacional ( $C_{ne}$ ) se realiza con la siguiente expresión:

$$C_{ne}(WH) = \frac{L_{md} * N}{P_{Dmax,e} * F_{ct}}$$

$$C_{ne}(AH) = \frac{C_{ne}(Wh)}{V_{BAT}}$$

Entonces:

$$C_{ne}(WH) = \frac{911,68 * 0,125}{0,7 * 1}$$

$$C_{ne}(WH) = 162,8 WH$$

$$C_{ne}(AH) = \frac{162,8}{12}$$

$$C_{ne}(AH) = 13,56 AH$$

Se seleccionó el criterio más alto, es decir la capacidad nominal de las baterías como mínimo es de 63.31 AH, las baterías seleccionadas para los bancos fueron de 12v 100AH, de las marcas MTEK DE GEL Y VICTRON DE AGM.

## 11.8 DIMENSIONAMIENTO DEL REGULADOR

**11.8.1 Dimensionamiento del regulador mediante fórmulas.** Para el dimensionamiento del regulador es necesario saber cuál es la máxima corriente que puede soportar cada regulador, a su entrada y a su salida. Para calcular la corriente de entrada del regulador utilizamos la siguiente expresión:

$$I_{in} = 1,25 * I_{MOD,SC} * N_{PARALELO} \quad (EC. 20)$$

Dónde:

$I_{MOD, SC}$  = la corriente de corto circuito del módulo FV.

En este caso, se deben tomar 4 datos, para tener información de cada panel disponible ( $I_{sc}$ ). La tabla 11 agrupa la información de corriente en corto circuito de cada panel proporcionada por el fabricante.

**Tabla 11. Corriente en corto circuito de las diferentes tecnologías**

CORRIENTE EN CORTO CIRCUITO $I_{sc}$ (A)			
MONO-CRISTALINO 100W	POLICRISTALINO 135 W	AMORFO 142W	AMORFO 100W
5,91	8,37	3,57	1,66

Fuente. Autor

- Dimensionado del regulador para el panel de silicio mono-cristalino

$$I_{in,mono} = 1,25 * 5,91 * 2$$

$$I_{in,mono} = 14,78 A$$

- Dimensionado del regulador para el panel de silicio poli-cristalino

$$I_{in,poli} = 1,25 * 8,37 * 2$$

$$I_{in,mono} = 20,09$$

- Dimensionado del regulador para el panel de silicio amorfo de 142 w

$$I_{in,amor142} = 1,25 * 3,57 * 2$$

$$I_{in,amor142} = 8,93 A$$

- Dimensionado del regulador para el panel de silicio amorfo de 100 w

$$I_{in,amor100} = 1,25 * 1,66 * 2$$

$$I_{in,mono} = 4,15 A$$

Para calcular la corriente de salida del regulador utilizamos la siguiente expresión:

$$I_{OUT} = \frac{1,25 * (P_{DC} + \frac{P_{AC}}{\eta_{inv}})}{V_{BAT}} \quad (EC.21)$$

Dónde:

$P_{AC}$ = Potencia de cargas en alterna

$P_{DC}$ = Potencia de cargas en continua

$$I_{OUT} = \frac{1,25 * (0 + \frac{224}{0,90})}{12}$$

$$I_{OUT} = 25,93A$$

El regulador debe soportar como mínimo una corriente de entrada de 4,15 A y una corriente de salida de 25,93 A, se seleccionaron dos tipos de reguladores MPPT 7515 Y PWM CML 20 y 10 A, se seleccionaron diferentes reguladores con el objetivo de analizar los diferentes comportamientos en el sistema, la corriente de salida no impide que el regulador se queme o algo parecido ya que este permite regular al valor de corriente del sistema

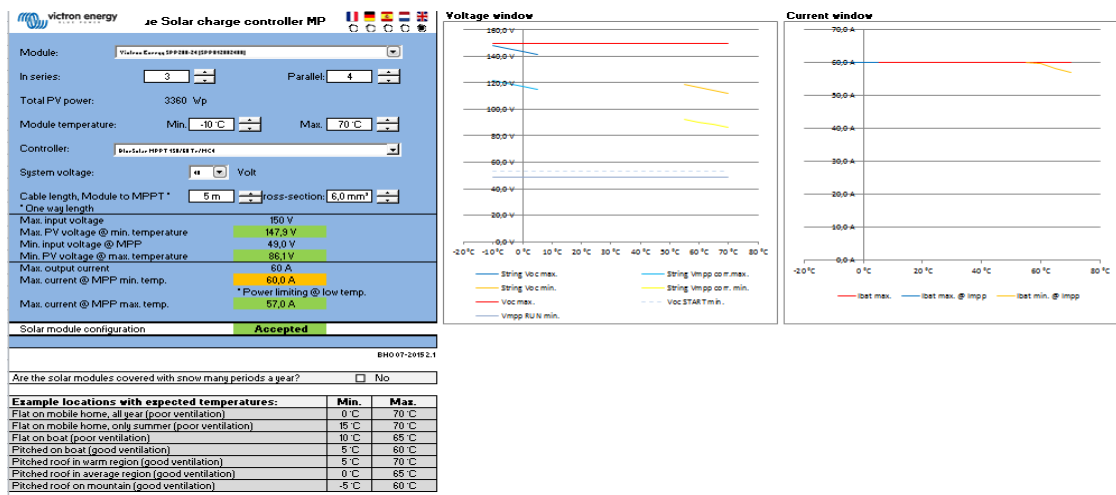
**11.8.2 Dimensionamiento del regulador mediante el software de Victron.** Este software permite identificar que tan viable resultaría la conexión de un sistema a tensiones de 12 o 24 V, la cantidad de conexiones de los paneles tanto en serie como en paralelo para un controlador MPPT, teniendo en cuenta las características del panel que se encuentran en el datasheet.

### 11.8.3 Dimensionamiento en el software Calculate Victron MPPT con una tensión a 12 v

El software Calculate de Victron MPPT permite la selección del controlador MPPT adecuado para determinado sistema solar fotovoltaico. A partir de la información técnica de los paneles y la tensión del sistema, el software determina si el controlador deseado es apto para trabajar en las condiciones establecidas.

La figura 40 muestra el aspecto gráfico del software, la selección de parámetros y las gráficas resultantes de dicho proceso. Con dichas graficas se puede analizar la corriente y el voltaje del sistema, permitiendo determinar si los rangos de corriente y voltaje de este están dentro de los parámetros de funcionamiento del controlador MPPT en cuestión.

**Figura 40. Aspecto grafico del software Calcúlate Victron**



- **Creación el perfil de cada módulo fotovoltaico**

En el software cuenta con un base de datos con la información técnica de los paneles fabricados por Victron (Tabla 12), por ello es necesario incluir en dicho banco de información los parámetros de los paneles de otras marcas que se van a usar.

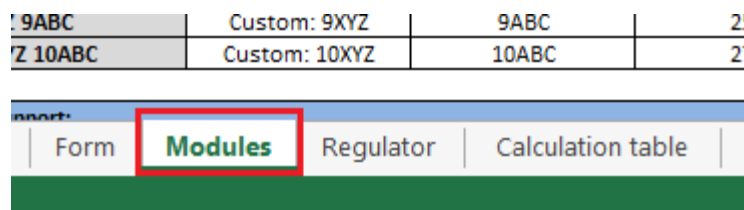
Para la creación del perfil de un panel en el software Calculate Victron es necesario conocer la información técnica completa y exacta (Potencia, Vmpp, Impp, Voc, Isc). Estos datos están disponibles en el Datasheet de los paneles, también es necesario tener presente cual es la tensión de trabajo, pues el comportamiento del controlador MPPT varía con la tensión suministrada por el sistema.

En la parte inferior del software, en la pestaña “Modules” se encuentra la base de datos del sistema y la herramienta para ingresar otros perfiles de paneles solares. (Figura 41)

**Tabla 12. Creación de perfiles**

	Manufacturer	Type	Power	Vmpp	Impp	Voc	Isc
	[name]	[name]	[W]	[V]	[A]	[V]	[A]
Victron Energy SPM30-12 (SPM	Victron Energy	SPM30-12	30	18	1,67	22,5	2
Victron Energy SPM50-12 (SPM	Victron Energy	SPM50-12	50	18	2,78	22,2	3,16
Victron Energy SPM80-12 (SPM	Victron Energy	SPM80-12	80	18	4,45	22,3	4,96
Victron Energy SPM100-12 (SPN	Victron Energy	SPM100-12	100	18	5,56	22,4	6,53
Victron Energy SPM130-12 (SPN	Victron Energy	SPM130-12	130	18	7,23	22,4	8,49
Victron Energy SPM190-24 (SPN	Victron Energy	SPM190-24	190	36	5,44	43,2	5,98
Victron Energy SPM300-24 (SPN	Victron Energy	SPM300-24	300	36	8,06	45,5	8,56
Victron Energy SPP30-12 (SPP01	Victron Energy	SPP30-12	30	18	1,72	22,5	1,85
Victron Energy SPP40-12 (SPP02	Victron Energy	SPP40-12	40	18	2,22	22,5	1,85
Victron Energy SPP50-12 (SPP03	Victron Energy	SPP50-12	50	18	2,85	22,2	3,09
Victron Energy SPP75-12 (SPP02	Victron Energy	SPP75-12	75	18	4,17	22,2	4,64
Victron Energy SPP80-12 (SPP03	Victron Energy	SPP80-12	80	18	4,6	21,6	5,06
Victron Energy SPP100-12 (SPP03	Victron Energy	SPP100-12	100	18	5,75	21,6	6,32
Victron Energy SPP140-12 (SPP03	Victron Energy	SPP140-12	140	18	8,05	21,6	8,85
Victron Energy SPP190-16 (SPP03	Victron Energy	SPP190-16	190	24,7	7,75	29,1	8,24
Victron Energy SPP250-20 (SPP03	Victron Energy	SPP250-20	250	30	8,33	36,01	9,4
Victron Energy SPP280-24 (SPP03	Victron Energy	SPP280-24	280	36	7,78	44,06	8,26
Victron Energy SPP300-24 (SPP03	Victron Energy	SPP300-24	300	36	8,33	44,1	8,85
policristalino KD135SX-UPU	policristalino	KD135SX-UPU	135	17,7	7,63	22,1	8,37
amorfo DA142-C3	amorfo	DA142-C3	142	47,64	2,98	63,01	3,57
amorfo DA100-A2	amorfo	DA100-A2	100	75	1,34	100	1,66
Monocristalino ERDM-100TM/S	Monocristalino	ERDM-100TM/S	100	17,7	5,53	22,89	5,91
Custom: 5XYZ 5ABC	Custom: 5XYZ	5ABC	150	35,5	6,46	45	8,5

**Figura 41. Ubicación de la base de datos.**



Con la información de los paneles en el sistema es posible generar las gráficas de corriente y voltaje para cada panel.

- **Configuración del módulo de C-Si 100 W**

Se simuló el comportamiento del sistema para una instalación con dos paneles de silicio monocristalino de 100W, teniendo en cuenta que los cálculos realizados anteriormente (Ec. 16 y Ec.17) indican que lo ideal sería conectar un panel en serie y dos en paralelo a 12V y empleando el controlador MPPT 7515. Con las características anteriores, el software permite verificar que el controlador se adapta a las condiciones deseadas, pues las casillas con los parámetros resultantes están dentro del rango de funcionamiento permitido por el controlador seleccionado. En la figura 42 se observa la interfaz gráfica del software que da señales de alerta en los resultados, ya que empleando colores (Verde, amarillo y rojo) informa al usuario si el sistema está en los parámetros aceptables del controlador. En este caso la casilla de color amarillo indica que la corriente máxima de salida está en el tope de su límite superior pero aun así puede funcionar correctamente.

**Figura 42. Selección de parámetros (Silicio monocristalino)**

victron energy Blue Solar charge controller MPPT

Módulo FV: Monocristalino ERDM-100TM/S

Cuantos módulos? En Serie: 1 En paralelo: 2

Potencia total FV: 200 Wp

Temp. módulo FV Min. 20 °C Max. 67 °C

Regulador: BlueSolar MPPT 75/15

Voltaje del sistema: 12 Volt

Largo de cable entre modulo y MPPT • 6 m Sección: 6,0 mm<sup>2</sup>  
 \* Longitud de un solo cable

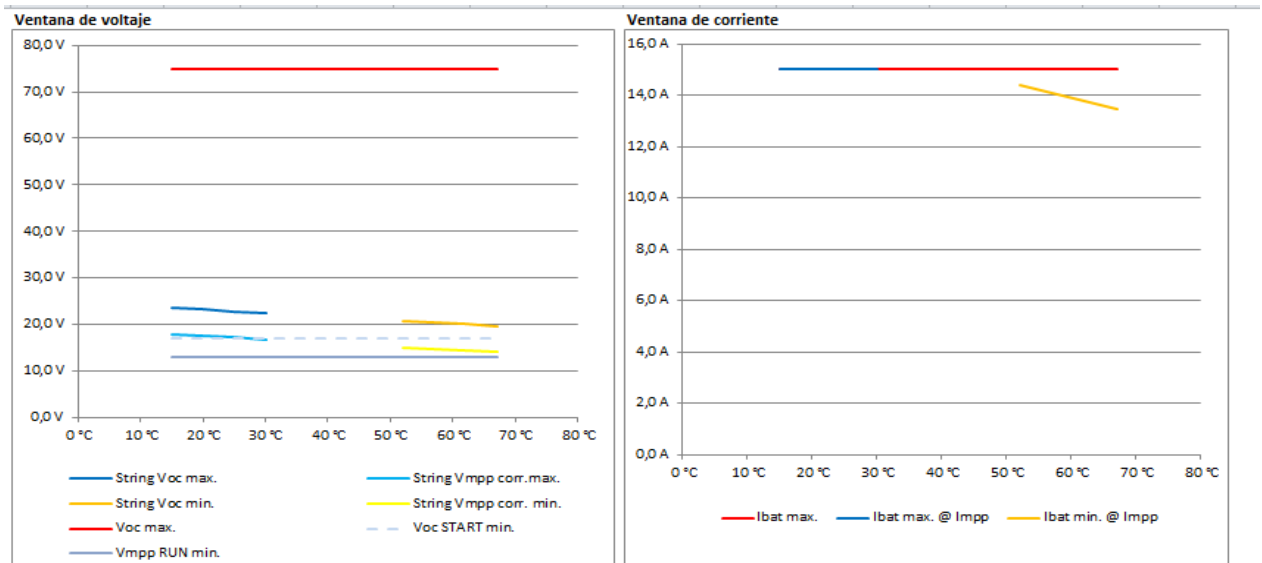
Voltaje max. de entrada	75 V
Voltaje max. FV @ Temperatura mín.	23,3 V
Voltaje mín. de entrada @ PMP	13,0 V
Voltaje mín. FV @ Temperatura max.	14,0 V
Corriente max. de salida	15 A
Corriente max. @ PMP temp. mín.	15,0 A
Corriente max. @ PMP temp. max.	13,5 A
	* Reducción de potencia @ Temp. baja

Configuración del módulo FV **Aceptado**

BHO 07-2015 2.1

Las gráficas de corriente y voltaje proporcionadas por el software (Gráfica 3), permiten verificar si los parámetros del sistema fotovoltaico se adaptan a las características del controlador MPPT.

**Gráfica 3. Graficas Voltaje vs. Temperatura y Corriente vs. Temperatura para paneles de silicio monocristalino.**



En la gráfica 3 se aprecia que la tensión del sistema no supera el voltaje máximo que tolera el controlador. También se puede observar que el controlador puede trabajar normalmente hasta alcanzar una temperatura de 70°C. De acuerdo a eso la selección de tensión y conexión de los paneles es adecuado para el controlador MPPT 7515

### Configuración del módulo A-SI 100 W

Se simuló el comportamiento del sistema para una instalación con un panel de silicio amorfo de 100W y un controlador MPPT 7515. A partir de esto el software permite verificar que el controlador se adapta a las condiciones deseadas, pues

las casillas con los parámetros resultantes están dentro del rango de funcionamiento permitido por el controlador seleccionado.

En la figura 43 se observa que todos los parámetros están en el rango normal.

**Figura 43. Selección de parámetros (Silicio Amorfo)**

victron energy  
Blue Solar charge controller MPPT

Módulo FV: amorfo DA100-C3

Cuantos módulos? En Serie: 1 En paralelo: 1

Potencia total FV: 142 Wp

Temp. módulo FV Min.: 15 °C Max.: 67 °C

Regulador: BlueSolar MPPT 75/15

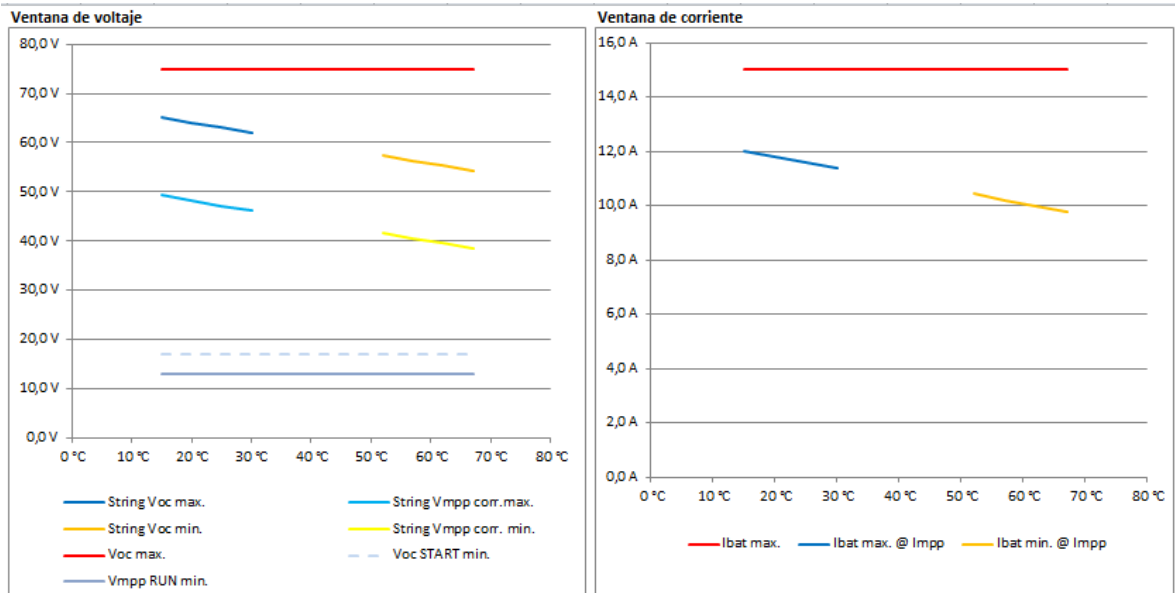
Voltaje del sistema: 12 Volt

Largo de cable entre modulo y MPPT \* 6 m Sección: 6,0 mm<sup>2</sup>  
\* Longitud de un solo cable

Voltaje max. de entrada	75 V
Voltaje max. FV @ Temperatura min.	65,1 V
Voltaje min. de entrada @ PMP	13,0 V
Voltaje min. FV @ Temperatura max.	38,6 V
Corriente max. de salida	15 A
Corriente max. @ PMP temp. min.	12,0 A
Corriente max. @ PMP temp. max.	9,8 A
Configuración del módulo FV	Aceptado

BHO 07-2015 2.1

#### Gráfica 4. Grafica Voltaje vs. Temperatura y Corriente vs. Temperatura para panel de silicio amorfo



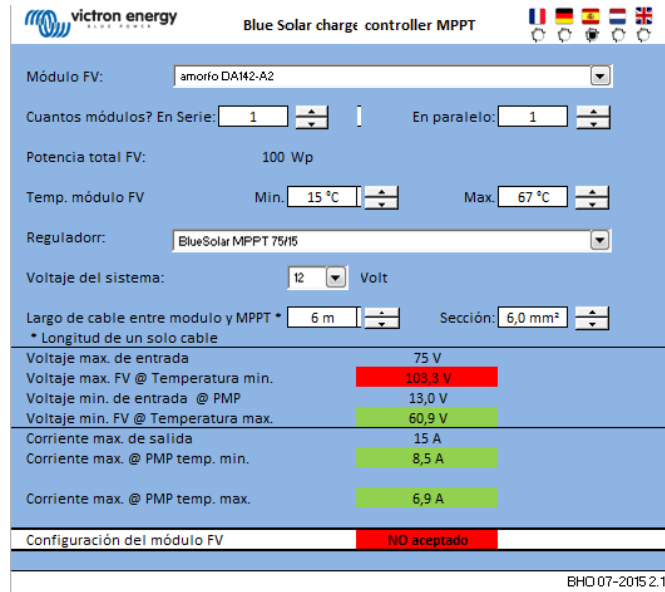
La gráfica 4 muestra el comportamiento del controlador MPPT de acuerdo a la conexión establecida en el sistema de silicio amorfo y a una tensión de 12 V, aquí la tensión del sistema no supera el voltaje máximo tolerado por el controlador, otro aspecto a tener en cuenta es la corriente, pues se puede observar que la corriente se encuentra dentro de los parámetros establecidos para el buen funcionamiento del controlador MPPT 7515.

#### Configuración del módulo de silicio amorfo. A-SI 142 W

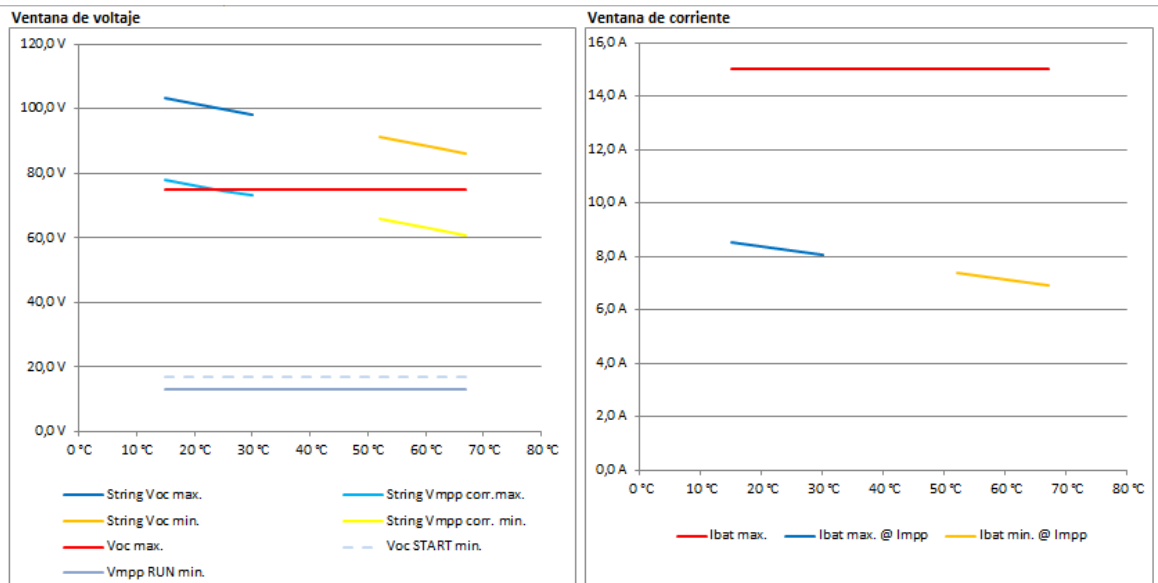
Para la simulación de este sistema se usó un panel de silicio amorfo 142 W y un controlador MPPT 7515. A partir de esto, el software muestra que el controlador no se adapta a las condiciones deseadas, pues el voltaje supera de manera notoria los límites de funcionamiento del controlador MPPT 7515.

En la figura 44 se puede observar a simple vista que la configuración establecida no es aceptada por el controlador, pues la casilla de voltaje máximo está de color rojo.

**Figura 44. Selección de parámetros (Silicio amorfo)**



**Gráfica 5. Graficas Voltaje vs. Temperatura y Corriente vs. Temperatura para panel de silicio amorfo de 142W.**



En la gráfica 5 se puede observar que para una tensión a 12 v con un panel de silicio amorfo de 142 Watts, el voltaje supera el establecido para el correcto funcionamiento del controlador MPPT 7515, pues el límite del controlador es 75

voltios y el sistema seleccionado para la simulación proporciona un voltaje de 103,3V. Por su parte la de corriente si está en el rango establecido por el fabricante para el buen funcionamiento del controlador. Aunque la corriente no supera los límites, no se debe conectar este sistema al controlador MPPT 7515, pues el alto voltaje podría quemar el fusible o el controlador.

- **Configuración del módulo MC-SI 135 W**

Se simuló el comportamiento del sistema para una instalación con dos paneles de silicio policristalino de 135W, teniendo en cuenta que los cálculos realizados anteriormente (Ec. 16 y Ec.17) indican que lo ideal sería conectar un panel en serie y dos en paralelo a 12V y empleando el controlador MPPT 7515. Con las características anteriores, el software permite verificar que el controlador se adapta a las condiciones deseadas, pues las casillas con los parámetros resultantes están dentro del rango de funcionamiento permitido por el controlador seleccionado. En la figura 45 se observa que la corriente máxima de salida está en el tope de su límite superior pero aun así funciona correctamente.

**Figura 45. Selección parámetros (Silicio Policristalino)**

The screenshot shows the configuration interface for a Victron Energy Blue Solar charge controller MPPT. The parameters are as follows:

- Módulo FV: policristalino KD135SX-UPU
- Cuantos módulos? En Serie: 1, En paralelo: 2
- Potencia total FV: 270 Wp
- Temp. módulo FV: Min. 15 °C, Max. 67 °C
- Regulador: BlueSolar MPPT 75/15
- Voltaje del sistema: 12 Volt
- Largo de cable entre modulo y MPPT: 6 m, Sección: 6,0 mm²

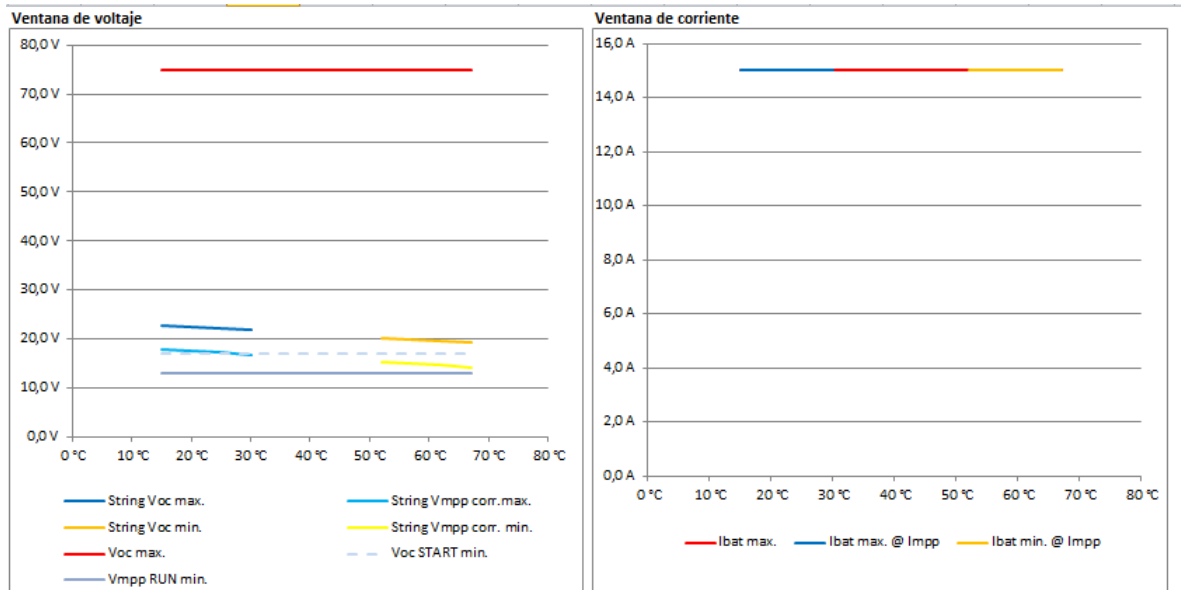
Voltaje max. de entrada	75 V
Voltaje max. FV @ Temperatura min.	22,8 V
Voltaje min. de entrada @ PMP	13,0 V
Voltaje min. FV @ Temperatura max.	14,3 V
Corriente max. de salida	15 A
Corriente max. @ PMP temp. min.	15,0 A
Corriente max. @ PMP temp. max.	15,0 A

\* Reducción de potencia @ Temp. baja  
 \*\* Reducción de potencia @ Temp. alta

Configuración del módulo FV: Aceptado

BHO 07-2015 2.1

**Gráfica 6. Graficas de Voltaje vs. Temperatura y Corriente Vs. Temperatura para panel de silicio policristalino.**



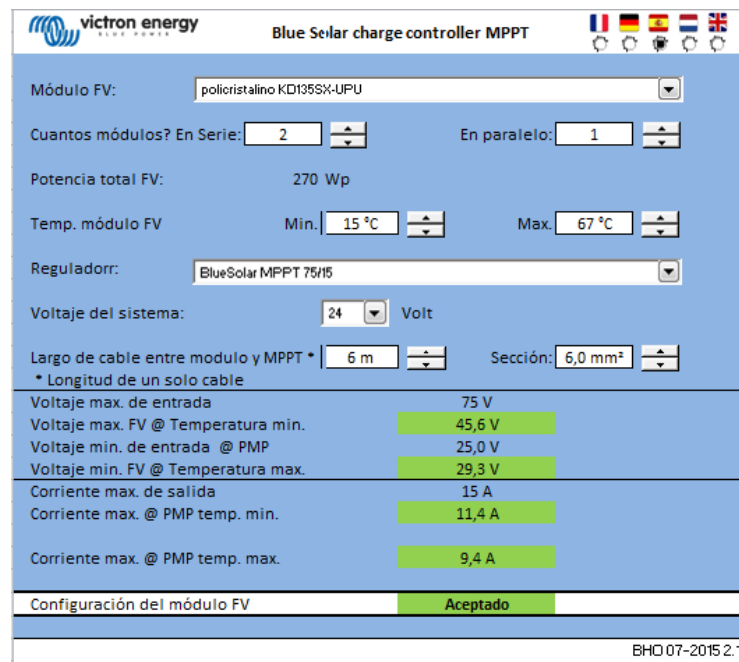
En la gráfica 6 se puede observar que para una tensión a 12 v y los paneles de silicio policristalino, el controlador MPPT 7515 se adapta a las condiciones de funcionamiento, pues la corriente y voltaje producidos por el sistema se adaptan a las condiciones de funcionamiento del controlador.

## 11.8.4 Dimensionamiento por software de un sistema a una tensión a 24v

- **Configuración del módulo C-SI**

Se simuló el comportamiento del sistema para una instalación con dos paneles de silicio policristalino de 135W, empleando el controlador MPPT 7515 a 24v, para ello se conectaron dos paneles en serie y uno en paralelo. Con las características anteriores, el software permite verificar que el controlador se adapta a las condiciones deseadas, pues las casillas con los parámetros resultantes están dentro del rango de funcionamiento permitido por el controlador seleccionado (Figura 46).

**Figura 46. Selección parámetros (Silicio policristalino)**



victron energy BlueSolar charge controller MPPT

Módulo FV: policristalino KD135SX-UPU

Cuantos módulos? En Serie: 2 En paralelo: 1

Potencia total FV: 270 Wp

Temp. módulo FV Min.: 15 °C Max.: 67 °C

Regulador: BlueSolar MPPT 75/15

Voltaje del sistema: 24 Volt

Largo de cable entre modulo y MPPT \* 6 m Sección: 6,0 mm<sup>2</sup>

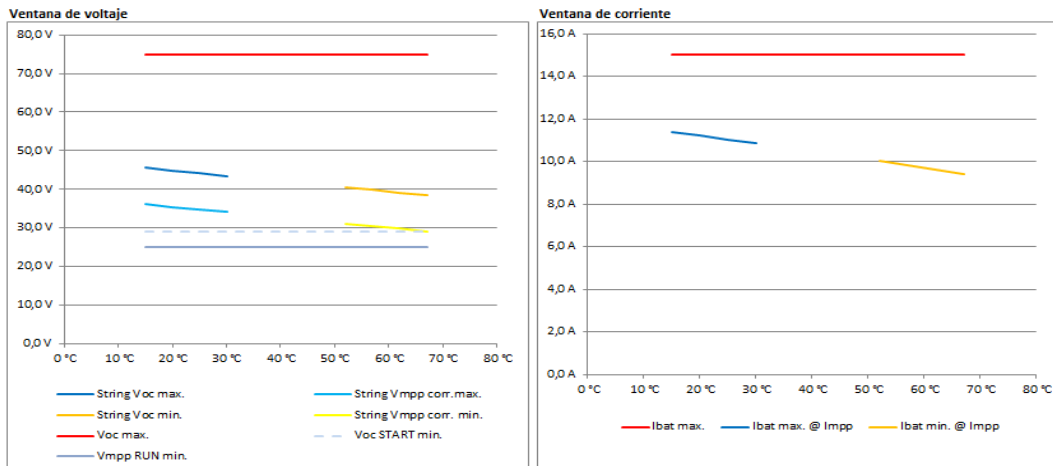
\* Longitud de un solo cable

Voltaje max. de entrada	75 V
Voltaje max. FV @ Temperatura min.	45,6 V
Voltaje min. de entrada @ PMP	25,0 V
Voltaje min. FV @ Temperatura max.	29,3 V
Corriente max. de salida	15 A
Corriente max. @ PMP temp. min.	11,4 A
Corriente max. @ PMP temp. max.	9,4 A

Configuración del módulo FV **Aceptado**

BHO 07-2015 2.1

**Gráfica 7. Gráficas de Voltaje vs. Temperatura y Corriente vs. Temperatura para panel de silicio policristalino a 24Vdc.**



En la gráfica 7 se observa el comportamiento del controlador MPPT 7515 de acuerdo a los parámetros de conexión a una tensión a 24 v. Las gráficas indican que aunque el voltaje aumentó notoriamente comparado con las situaciones anteriores, el controlador sigue siendo apto para este sistema.

En el caso de la corriente disminuyó notoriamente (Con respecto a los sistemas anteriores) debido a la tensión que se está utilizando en el sistema.

### 11.9 DIMENSIONAMIENTO DEL INVERSOR

Para seleccionar el inversor, es suficiente con sumar las potencias en AC. Al elegir el inversor es importante tener en cuenta los picos de potencia de arranque, ya que muchos equipos demandan de 4 a 5 veces más potencia de la nominal para iniciar su funcionamiento. Por esa razón se debe tener en cuenta un factor de seguridad del 20%. Para calcular potencia del inversor, se emplea la siguiente ecuación:

$$P_{INVERSOR} = 1,25 * P_{AC} \quad (EC. 22)$$

Donde:

$P_{AC}$ : Potencia de cargas en corriente alterna.

1,25: Factor de seguridad

**Tabla 13. Estimación de consumos**

UNIDADES	CARGA	POTENCIA UNITARIA (WATTS)	POTENCIA CON MARGEN DE SEGURIDAD DEL 20% (WATTS)
3	BOMBILLOS AHORRADORES (AC)	20	36
1	BOMBILLO INCANDESCENTE	70	14
1	BOMBILLO INCANDESCENTE	25	30
1	CARGA INDUCTIVA (VENTILADOR)	65	78
1	CARGA CAPACITIVA (CELULAR)	4	4,8
TOTAL		224	234,8

Fuente. Autor

De acuerdo con la tabla 13 suministra la estimación de consumo con el margen de seguridad del 20%, la potencia del inversor es:

$$P_{INVERSOR} = 1,25 * 234,8$$

$$P_{INVERSOR} = 293,5 \text{ watts}$$

El inversor seleccionado debe alcanzar como mínimo una potencia de 293,5 watts a 12 v, por ello se seleccionó un inversor de 350 watts a 12 v. Si el sistema trabajase a 24V se podría seleccionar un inversor de 180Watts, debido a que bajo estas condiciones el sistema consume la mita de la corriente.

$$I = \frac{S}{V} \quad \text{(EC.23)}$$

Dónde:

I= corriente (A)

S= potencia aparente (VA)

V= voltaje de tensión (V)

## 12. SELECCIÓN DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS

La selección del calibre de los cables resulta muy importante en estos sistemas ya que no cualquier tipo de conductor funciona correctamente debido a las altas corrientes y temperaturas manejadas en las instalaciones fotovoltaicas. La selección del cable debe hacerse teniendo en cuenta la corriente, caída de tensión, la regulación del sistema y la temperatura máxima permitida en el conductor, por ejemplo : THW 75°C, THW-2 90° C. [39]

La capacidad de la corriente depende de:

- Calibre y material del conductor.
- Tipo de instalación
- Temperatura máxima del conductor, que depende de la temperatura permitida para el material de aislamiento.
- Temperatura ambiente.
- Número de conductores
- El cumplimiento de las normas de seguridad establecidas para las prácticas industriales y procedimientos generalmente aceptados.

La tabla 14 muestra la capacidad de corriente permitidas para cada calibre, la temperatura máxima alcanzada y el tipo de conductor

**Tabla 14. Factores de Selección de conductores**

Conductor de cobre	THW	THW-2	THHN
temperatura	75°C	90°C	90°
calibre	A	A	A
14 AWG	20	25	25
12 AWG	25	30	30
10 AWG	35	40	40
8 AWG	50	55	55
6 AWG	65	75	75
4 AWG	85	95	95
2 AWG	115	130	130
1 AWG	130	150	150
1/0 AWG	150	170	170
2/0 AWG	175	195	195
3/0 AWG	200	225	225
4/0 AWG	230	260	260
250Kcmil	255	290	290
300 Kcmil	285	320	320
350 Kcmil	310	350	350
400 Kcmil	335	380	380
500 Kcmil	380	430	430
750 Kcmil	475	535	535
1000 Kcmil	545	615	615

Fuente. NTC 2050 TABLA 310-16

Para el cálculo del calibre del conductor es necesario tener la corriente en el circuito (I), para ello se emplea la siguiente expresión:

$$I = \frac{S}{V} \quad \text{(EC.23)}$$

Dónde:

S: Potencia aparente (VA)

V: Voltaje de línea (V)

$$S = \frac{P}{Fp} \quad \text{(EC.24)}$$

Dónde:

P: Potencia aparente

Fp: factor de potencia

Para el factor de potencia de los sistemas se seleccionó un punto crítico (0,85) ya que los módulos permiten conectar cargas inductivas, resistivas y capacitivas, este factor se da para el caso de uso de cargas inductiva.

De acuerdo a la tabla 13 el consumo estimado de cada sistema es de 224 watts; entonces:

$$S = \frac{224}{0,85}$$

$$S = 263,53 \text{ VA}$$

$$I = \frac{263,53}{12}$$

$$I = 21,96 \text{ A}$$

El amperaje que circula por cada sistema puede alcanzar los 22 A, por ello se utilizó para la instalación cable THN de cobre calibre 10.

### 13. DISEÑO ESTRUCTURAL

Teniendo en cuenta el peso de los elementos que hacen parte del sistema fotovoltaico (Tabla 15), se diseñó una estructura robusta que soportara las cargas efectuadas por los equipos y que a su vez permitiera el fácil acceso a los instrumentos. Para ello se usó acero cold rolled (Laminas y tubos de sección cuadrada y circular) de diferentes calibres.

En la parte superior de cada módulo se soldaron los soportes para instalar los paneles, dichos apoyos cuentan con un sistema que permite variar fácilmente el ángulo de inclinación de las celdas.

Los equipos están ubicados en una lámina perforada de acero cold rolled calibre 14 con agujeros de 2mm de diámetro. Se seleccionó este material debido a su resistencia y a la facilidad para instalar y fijar los elementos.

Cada módulo cuenta con una superficie de aluminio calibre 18 en la parte inferior para ubicar las baterías. Además se instalaron cuatro ruedas, para facilitar el desplazamiento de los bancos.

**Tabla 15. Masa de los elementos del sistema**

Elemento	Peso
Panel	30kg
Monitor de baterías	1 kg
Controladores	1kg
Inversores	8 kg
Otros elementos	10 kg
Baterías	70 kg
<b>TOTAL</b>	<b>120 kg</b>

Fuente. Autor

Empleando la ecuación 25,26 y teniendo en cuenta la información de la tabla 15 se calcula la fuerza mínima que debe soportar la estructura y la influencia del viento en la misma.

$$F = \sum p(kg) * g\left(\frac{m}{s^2}\right) \quad (EC.25)$$

$$F = \sum 30 * 9,81 + 2 * 9,81 + 8 * 9,8 + 10 * 9,81 + 70 * 9,81$$

$$F = 1177,2 N \text{ ó } 1,18 KN$$

Para calcular la fuerza que el viento ejerce sobre los paneles se tiene la siguiente expresión:

$$P = \frac{F}{S} = 0,11v^2 \times S \quad (EC.26)$$

**Dónde:**

**F** es la fuerza del viento en Kp (Kilopondios)

**V** es la velocidad del aire en m/s

**S** es la superficie receptora en m

**P** es la presión del viento en Kp

Con la expresión calculamos la fuerza del viento.

$$F = 0,11(2.0)^2 \times 0,3$$

$$F = 0,132 kp$$

$$FT = 1,32 KN$$

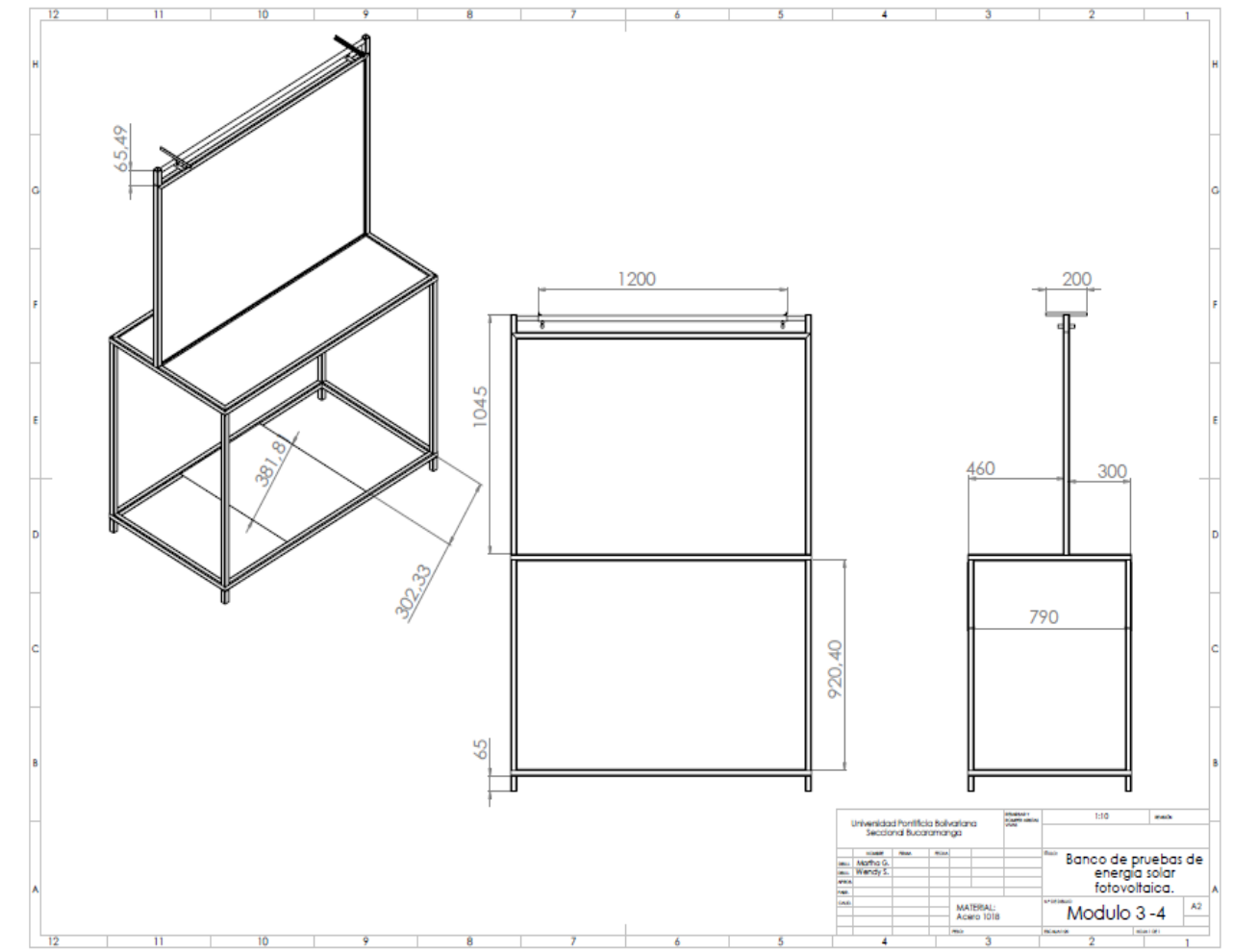
La estructura está diseñada para soportar la fuerza que ejerce el viento y cada panel se fijó previendo el efecto de este sobre la estabilidad del sistema.

A la hora de diseñar las estructuras también se tuvieron en cuenta algunos parámetros en cuanto a dimensiones, por ejemplo que el tablero fuera lo suficientemente grande para ubicar todos los equipos, sus conectores en acrílico y la señalización pertinente, y que el banco fuera lo suficientemente alto para mover los paneles sin que su ángulo de inclinación entorpeciera el trabajo en el tablero.

En las figuras 47 y 48 se muestran los tipos de estructuras construidas, cada uno para un tipo de panel diferente. Las figuras 49 y 50 son los modelamientos de los módulos en solidworks correspondientes a las figuras 47 y 48.

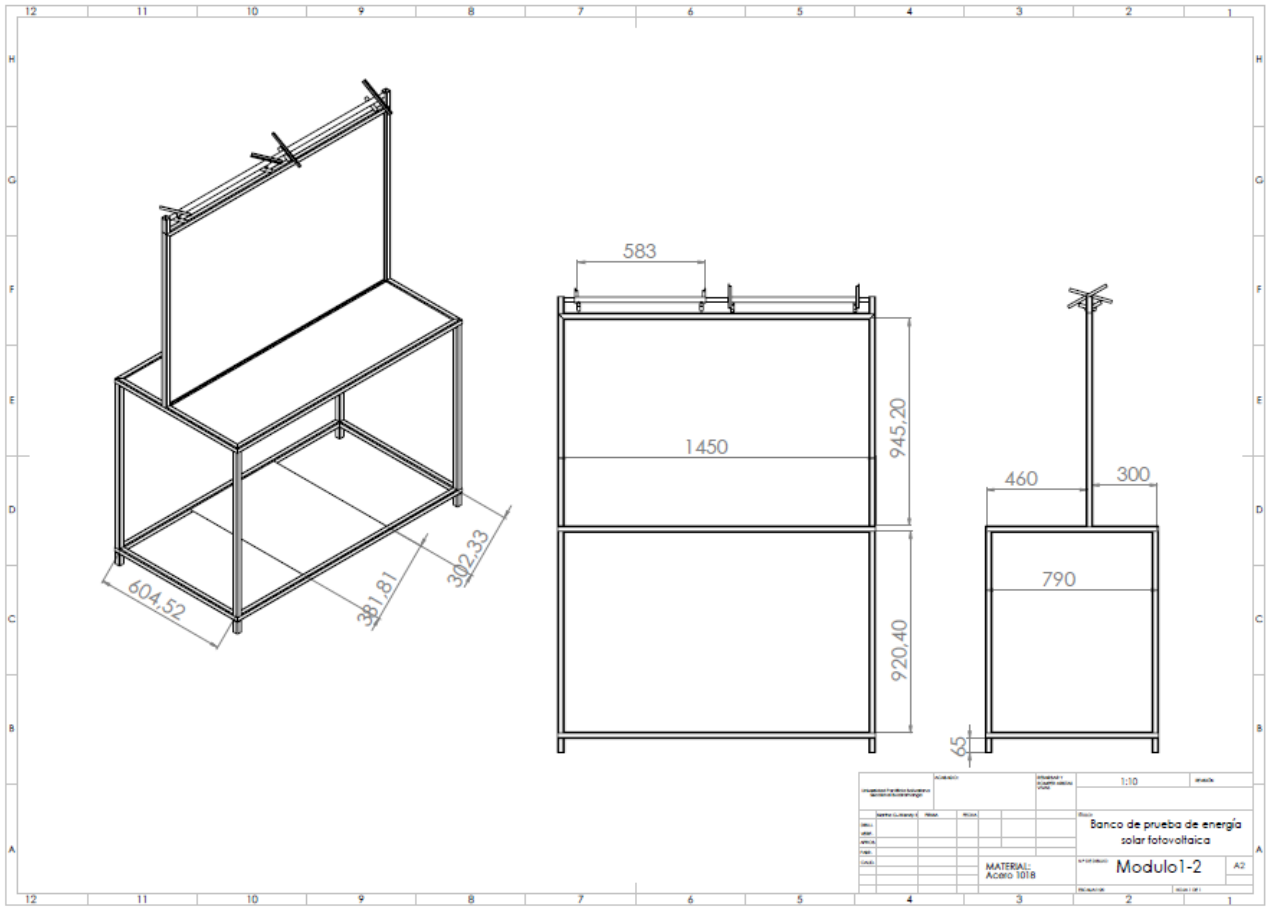
La figura 47 corresponde al tipo de estructura empleado para soportar los paneles de silicio amorfo, la figura 48 es la estructura diseñada para instalar los paneles de silicio monocristalino y policristalino, esta cuenta con cuatro soportes que permiten instalar los paneles en cada módulo.

**Figura 47. Plano estructural del banco de silicio amorfo**



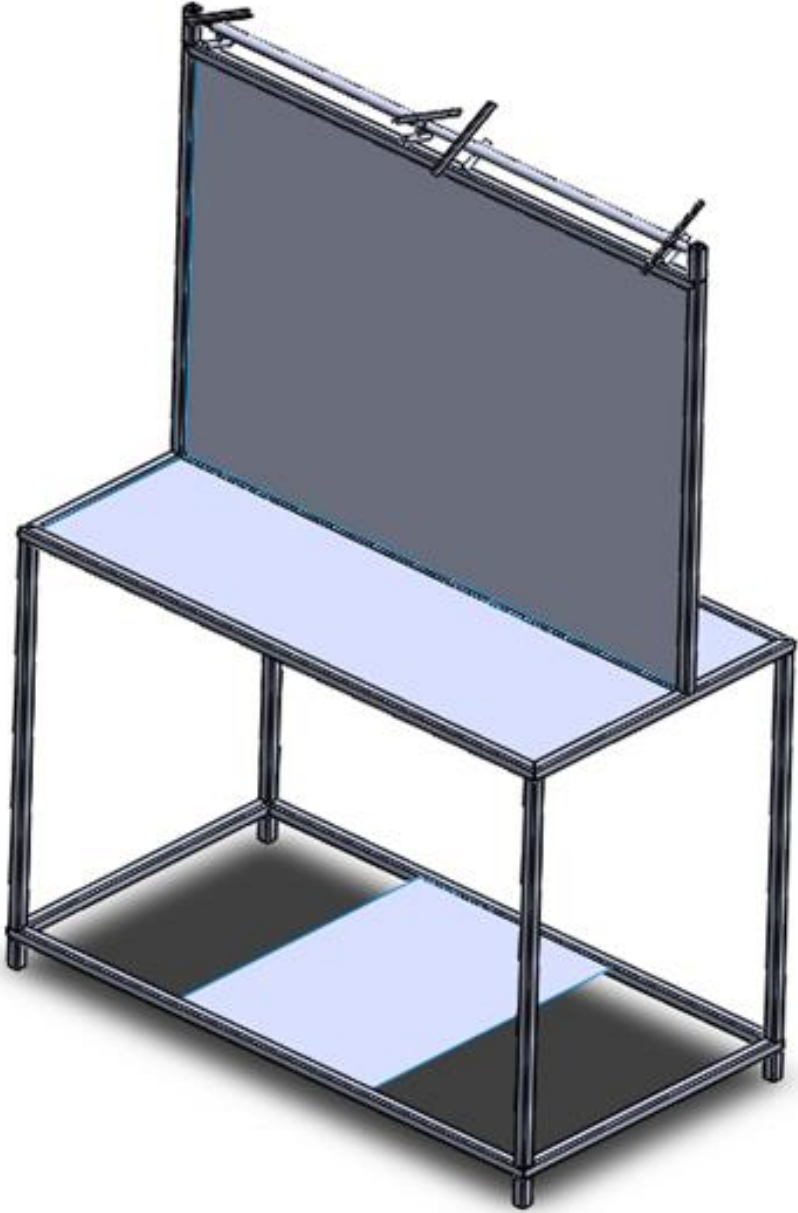
Fuente. Autor

**Figura 48. Plano estructural del banco de silicio mono-cristalino y poli-cristalino**



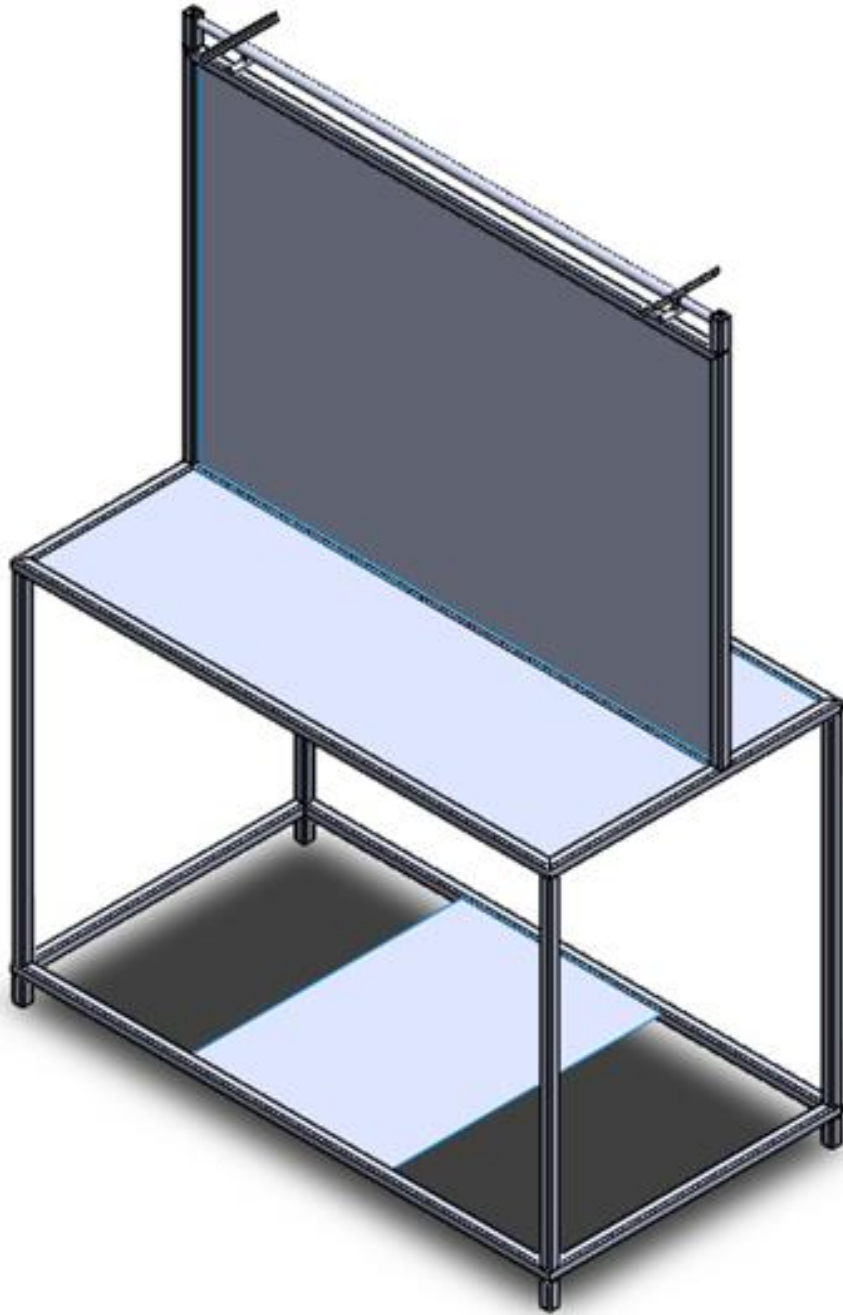
Fuente. Autor

**Figura 49. Modelamiento del banco de silicio mono- cristalino y poli- cristalino en Solid Works**



Fuente. Autor

**Figura 50. Modelamiento del banco de silicio amorfo en Solid Works**



Fuente. Autor

Las figuras 51 y 52 son los módulos reales, de acero cold rolled. La 51 es el modulo sin equipos y la 52 la estructura con las instalaciones pertinentes.

**Figura 51. Estructura de acero cold rolled o acero 1018**



Fuente. Autor

**Figura 52. Banco de prueba de energía solar fotovoltaica, Modulo No.4: Panel de silicio amorfo.**



## 14. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

Una vez calculado cada sistema OFF-GRID, diseñado los planos y determinado el material de construcción de la estructura se lleva al cabo el proceso de construcción. Nuestra primera parte es la construcción de la estructura (Figura 53).

- Estructura en acero cold rolled de perfil cuadrado calibre 16

**Figura 53. Estructura**



Fuente. Autor

- Estructura con láminas de acero cold rolled calibre 18, para la parte superior e inferior, y en la parte frontal se utiliza malla perforada de acero calibre 14 (Figura 54).

**Figura 54. Estructura con láminas cold rolled soldadas**



Fuente. Autor

- Después de soldadas todas las láminas y la estructura se siguió a pintar las 4 estructuras con dos capas de pintura la primera capa de las estructuras se realizó con pintura gris anticorrosivo (Figura 55) y la segunda capa de pintura de polietileno color azul (Figura 56).

**Figura 55. Estructura pintada con anticorrosivo gris.**



Fuente. Autor

**Figura 56. Estructura con pintura electrostática.**



Fuente. Autor

- Instalación de los equipos e instrumentos en la malla perforada de acero (Figura 57).

**Figura 57. Instalación**



Fuente. Autor

En la figura 58 se observa el resultado final del trabajo.

**Figura 58. Resultado final del montaje del sistema**



Fuente: Autor.

## Pruebas de funcionamiento

- Realización de pruebas por diferentes aspectos y cargas

Después de que se terminó de instalar todos los elementos y equipos en la malla se procedió a la realización de las pruebas, también se usaron para clases y diplomado de energías renovables (Figura 59).

**Figura 59. Módulos conectados listos para pruebas**



Fuente. Autor

- Prácticas el diplomado de instalaciones de energías renovables y bioclimáticas segundo cohorte (Figura 60) y en clase de energías renovables (Figura 61).

**Figura 60. Prácticas en el diplomado de instalaciones de energías renovables y bioclimáticas**



Fuente. Autor

**Figura 61. Clase de laboratorio de la optativa de energías renovables**



Fuente. Autor

- Los bancos de energía solar fotovoltaica se presentaron durante el congreso de ingeniería mecánica CIIMCA 2015, donde se expuso el proyecto a participantes que venían de diferentes ciudades y países (Figura 62).

**Figura 62. CIIMCA 2015**



Fuente. Autor

- Realización de las prácticas anteriormente en el diplomado o en la optativa (Figura 63) y con el nuevo sistema (Figura 64).

**Figura 63. Diplomado de instalaciones de energías renovables y bioclimáticas UPB (primer cohorte)**



Fuente. Autor

**Figura 64. Diplomado de energías renovables y bioclimáticas UPB (segundo cohorte)**



Fuente. Autor

## 15. PRUEBAS Y TOMA DE DATOS

- **Primera prueba: Profundidad de descarga experimental.**

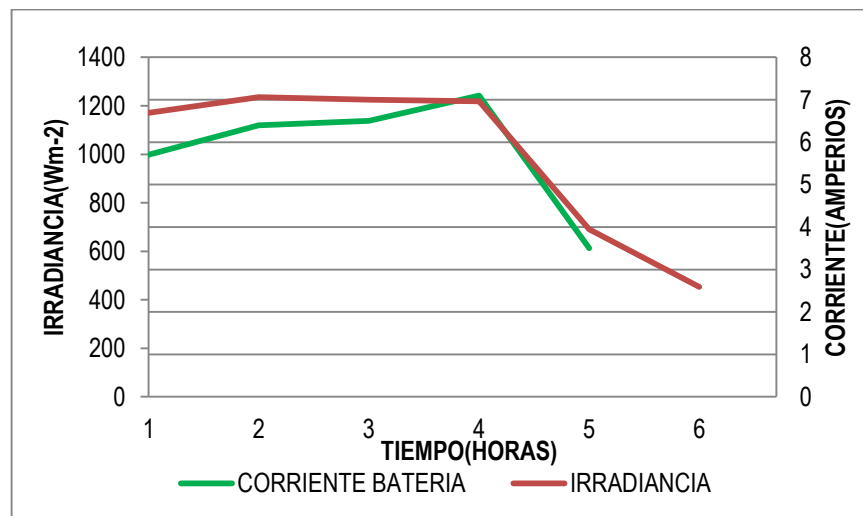
El 18 de septiembre entre las 9:30 am y las 2:20 pm se realizó una prueba con el modulo No.1. Dicha prueba consistía en descargar la batería para conocer su profundidad de descarga y su tiempo de autonomía. Se conectó el sistema completo (Panel, batería, inversor, controlador y cargas resistivas (85W)) y se tomaron medidas cuidadosamente de la corriente que entraba y salía de la batería.

Con la prueba anterior se pudieron determinar los siguientes parámetros

- Límite de carga de la batería: 14,4V
- Límite de mínimo descarga= 10,40V
- Tiempo de autonomía de la batería : 5Horas

**Nota:** La variación de la Irradiación durante el transcurso de esta prueba fue bastante notorio, situación que se ve reflejada en el comportamiento de la gráfica 8.

**Gráfica 8. Perfil de corriente con respecto a la irradiancia a 12 vdc/85 watts**



Fuente: Autores

La corriente producida por el generador está estrechamente ligada a la irradiancia incidente sobre el mismo. Esta prueba se realizó para corroborar dicha información y como se puede observar en la gráfica anterior, la gráfica 8 permite determinar que la corriente varía dependiendo de la irradiancia, en los momentos de mayor irradiancia se observan picos en la corriente del panel y de la misma manera, se presentan caídas de corriente cuando la irradiancia cae. Esta prueba se realizó para los tres tipos de paneles, pero como el comportamiento es similar se optó por presentar una sola gráfica, pues describe claramente el comportamiento de los tres.

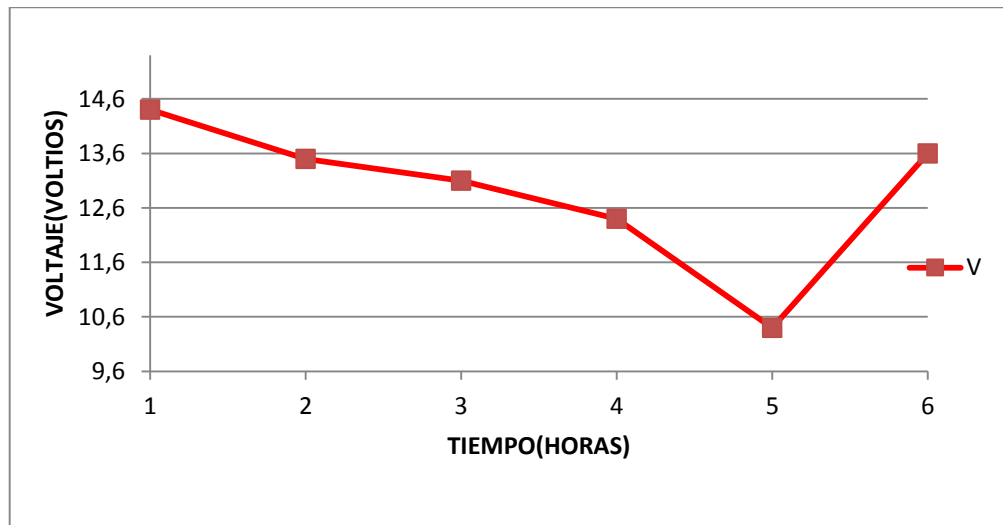
Según la gráfica 8, aproximadamente al medio día la irradiación disminuyó drásticamente debido a cambios climáticos, situación que generó una caída en la corriente de la batería.

- **Segunda prueba: Perfil de descarga de una batería de 12V/100Ah a una potencia constante.**

Esta prueba se realizó con el fin de ver el comportamiento de la batería con una potencia constante sin ninguna conexión a un generador FV, para analizar el comportamiento en el momento que no haya ninguna clase de irradiación.

La batería del estudio es de 12v 100 A, la potencia seleccionada fue 85 watts, con cargas resistivas. La gráfica 9 muestra el comportamiento de descarga de la batería con respecto al tiempo.

**Grafica 9. Perfil de variación de voltaje de la batería a 12 Vdc/85w**



Fuente: Autores

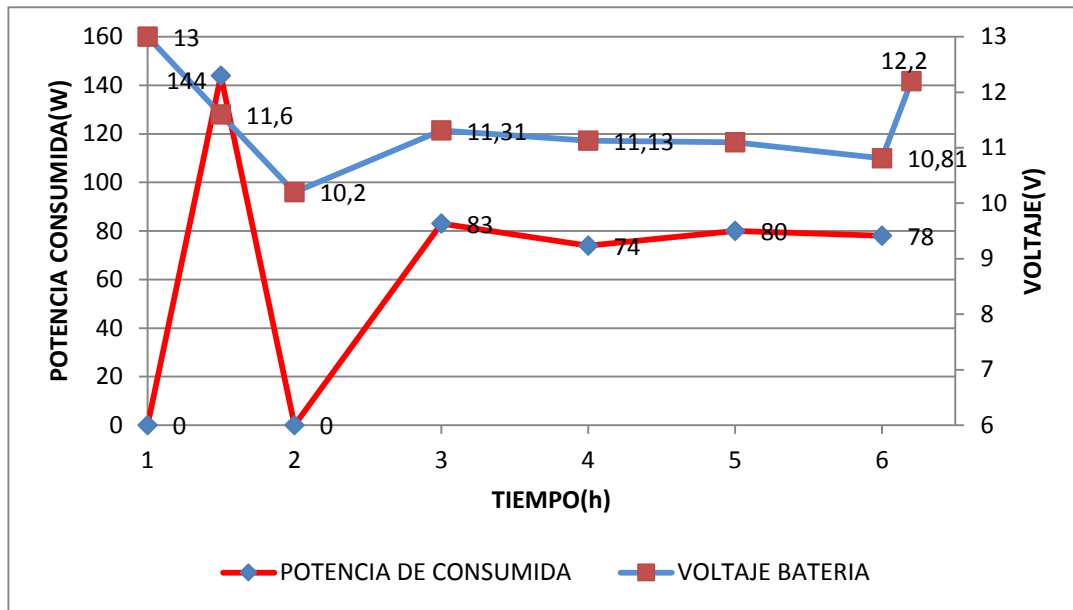
La grafica 9 muestra una carga inicial del acumulador de 14,5 V, que con el paso de las horas va disminuyendo debido al consumo constante, con esa información se pudo determinar el tiempo de autonomía que son 5 horas. Al transcurrir las 5 horas el sistema se apagó, en ese instante se midió voltaje real del acumulador.

Se determinó que durante las 5 horas el acumulador se descargó 0,7V.

- **Tercera prueba: Descarga de una batería alimentada por un panel de silicio poli-cristalino**

Esta prueba se hizo con el fin de determinar el perfil de descarga de una batería de 12V 100A conectada a un módulo de silicio poli-cristalino.

**Grafica 10. Perfil de descarga para una batería a 12vdc del módulo de silicio poli-cristalino**



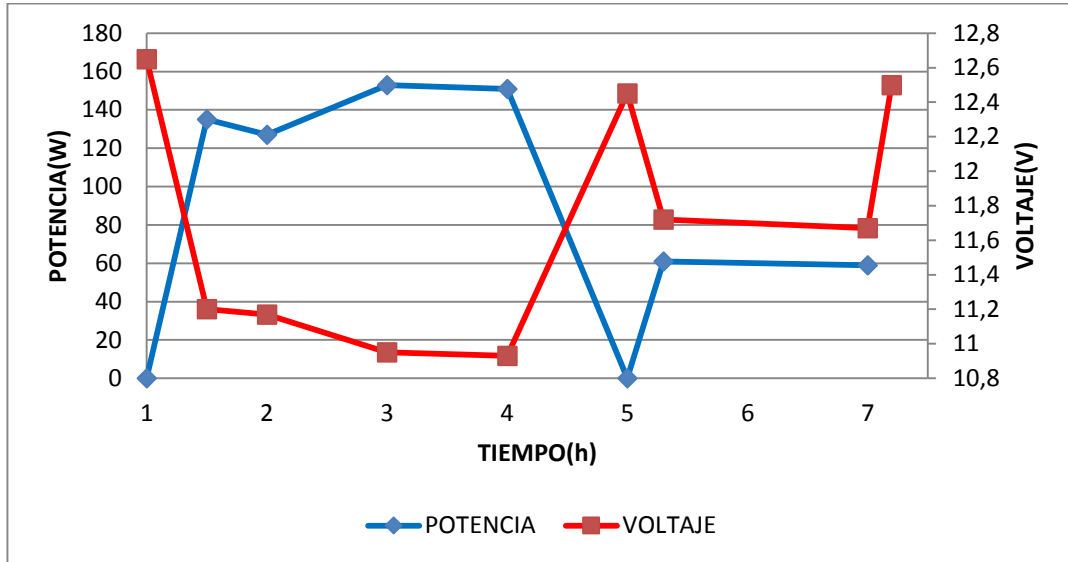
Fuente Autores

La gráfica 10 representa el perfil de descarga de una batería de 12V/100Ah en el módulo de silicio poli-cristalino. Inicialmente, sin cargas (Potencia cero), el nivel máximo de la batería es 13V, pero al activar todas las cargas tanto inductivas como resistivas (144 Watts), dicho voltaje desciende hasta 10,4V en dos horas y el sistema se apaga, debido que la batería alcanza su límite inferior con cargas (definido por el controlador). Para esta prueba inicialmente se encendieron bombillos (80Watts) y un ventilador (65 watts), pero la batería alcanzó el límite inferior con cargas establecido por el controlador muy rápidamente, entonces, la prueba se realizó disminuyendo la potencia consumida. De esta manera, el sistema soporta aproximadamente 6horas con una potencia de 80watts. Al final de la gráfica se puede observar, que la batería se descargó aproximadamente 0,8V.

- **Cuarta prueba: Descarga de una batería alimentada por un panel de silicio mono-cristalino.**

Esta prueba se hizo con el fin de determinar el perfil de descarga de una batería de 12V 100A conectada a un módulo de silicio mono-cristalino

**Grafica 11. Perfil de descarga a 12vdc del módulo de silicio mono-cristalino**



Fuente Autores

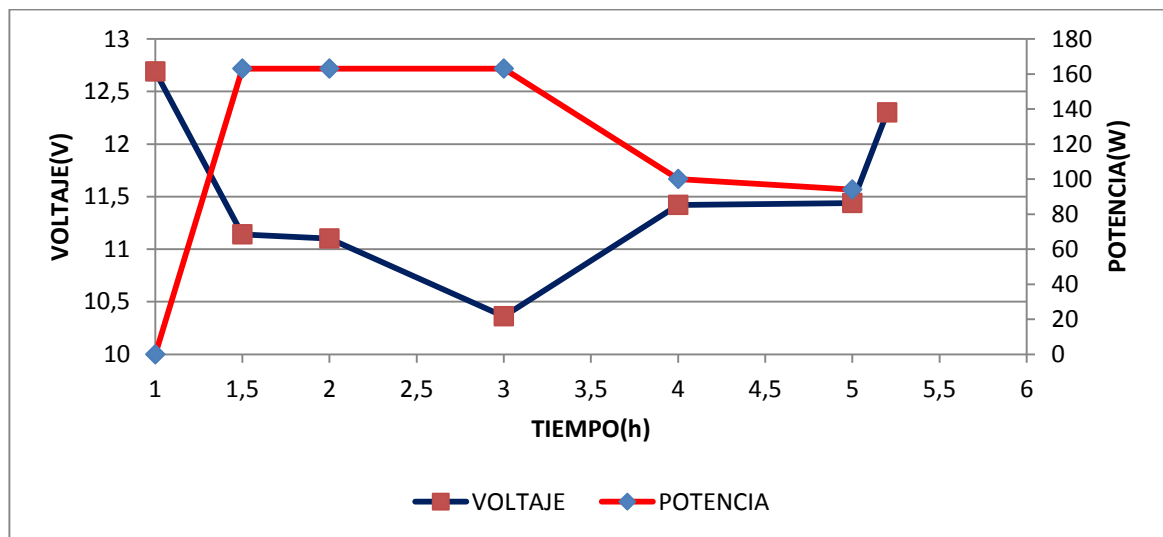
En la gráfica 11 se representa el perfil de descarga de una batería de 12V 100A, conectada a un módulo de silicio mono-cristalino. El nivel de carga inicial (potencia cero) de la batería es de 12,75V y el voltaje mínimo de la misma desciende a 10,5V (Con una potencia de 155Watts). La potencia máxima que soporta el sistema es de 150Watts, al exceder este valor el sistema se apaga y el voltaje de la batería sube, en esta ocasión el nivel de carga es de 12,5Watts. Con una potencia de 155watts, el sistema tiene aproximadamente 5 horas de autonomía. Después de la caída de potencia del sistema, se optó por seguir realizando la prueba disminuyendo el consumo de la misma con el fin de analizar la velocidad de descarga con una potencia constante sin correr el riesgo que el sistema volviera a fallar. En las dos últimas horas de la prueba la potencia consumida estuvo alrededor de los 60 watts, el sistema no tuvo ninguna alteración o caída y

se puede afirmar la autonomía podría ser de más horas, pero la prueba tuvo que ser suspendida debido a que ya no había sol.

- **Quinta prueba: Descarga de una batería alimentada por un panel de silicio Amorfo.**

Esta prueba se hizo con el fin de determinar el perfil de descarga de una batería de 12V 100A conectada a un módulo de silicio amorfo

**Grafica 12. Perfil de descarga para una batería a 12Vdc del módulo de silicio amorfo**



Fuente: Autores

Al iniciar esta prueba el nivel de carga de la batería era de 12,75V aproximadamente y al finalizar la prueba, casi 5 horas y media después era de 12,25V. A lo largo de la prueba la potencia consumida en el sistema cambió debido a diferentes factores.

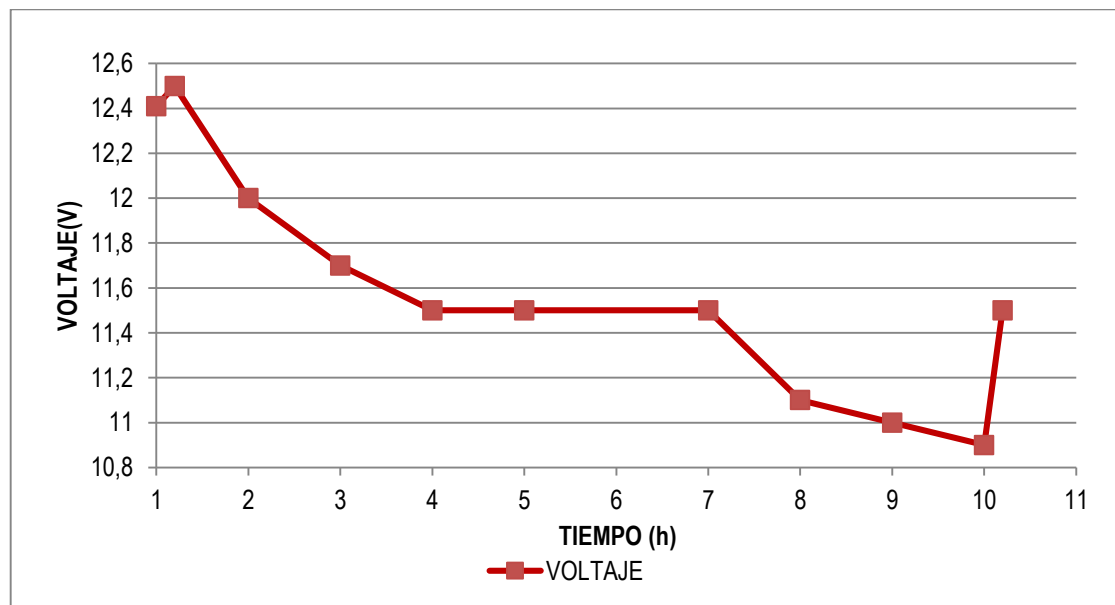
La primera medida se tomó sin cargas (Potencia cero), posteriormente se conectaron ciertas cargas cuya potencia total ascendía a los 170 Watts. Tres

horas después el sistema alcanzó su límite de descarga (10,48V) y fue necesario reducir la potencia para poder continuar con la prueba. En la segunda parte del estudio, se tomaron datos del comportamiento del sistema con una carga de 100Watts, allí el voltaje de la batería llegó a 11,5 watts, bajo estas condiciones el sistema funcionó cerca de dos horas más. Todo esto se ve en la gráfica 12.

- **Sexta prueba: Descarga de baterías conectadas en serie y en paralelo.**

La siguiente prueba a realizar, es la de descarga de las baterías conectadas en serie y paralelo. Cada banco contaba con cargas resistivas (155 Watts), el comportamiento de los bancos conectados en serie y paralelo se puede deducir en las gráficas 13 y 14:

**Gráfica 13. Perfil de descarga para baterías en paralelo a 12vdc/155w del módulo de silicio poli-cristalino**

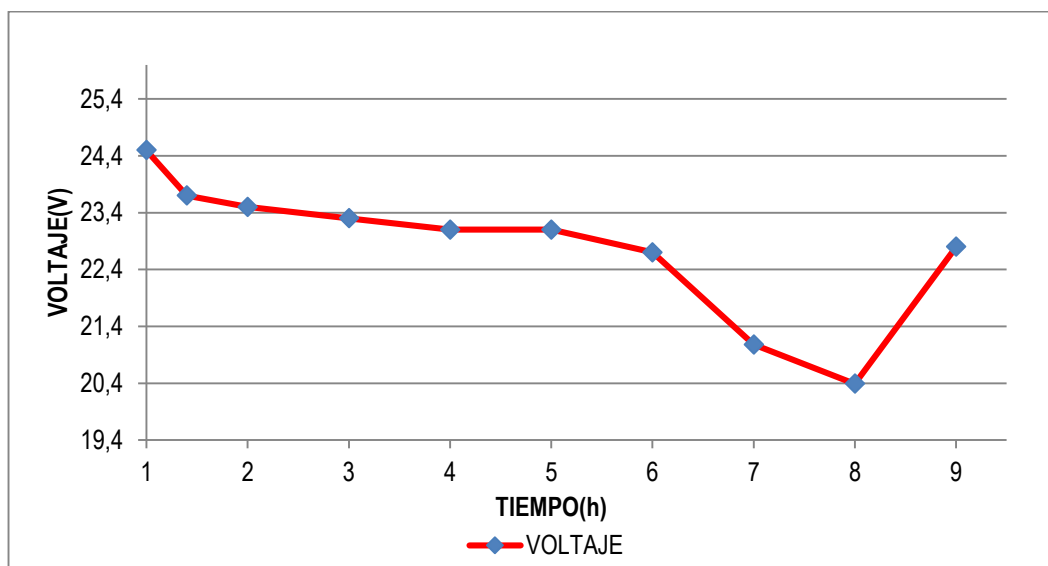


Fuente: Autor

La gráfica 13 permite concluir que conectando dos baterías en paralelo, el tiempo de autonomía se duplica, y el comportamiento del sistema es mucho mejor ya que permite mayor potencia de consumo.

En el primer intervalo de la gráfica se observa un aumento del voltaje de la batería, esto se debe a que la prueba se inició cargando el sistema sin ninguna carga conectada (potencia cero), posteriormente se observa un descenso en el voltaje al conectar las cargas. En el lapso de  $t=4h$  y  $t=7h$ , no se observa ninguna variación notoria en el voltaje debido a que el sistema se estabilizó es decir, se estaba consumiendo directamente lo que producía el panel.

**Gráfica 14. Perfil de descarga para baterías en paralelo a 24vdc/140w del módulo de silicio amorfo**



Fuente: Autores

En la gráfica 14 se observa que conectando dos baterías en serie, voltaje se duplica y por consiguiente el tiempo de autonomía aumenta, el comportamiento

del sistema es mucho mejor ya que permite mayor potencia de consumo aunque esta sigue siendo limitada por la potencia del inversor.

En la gráfica se puede apreciar un descenso constante del voltaje desde 24,4V que era el máximo de carga del banco de baterías hasta 20,4V que era el límite de descarga. En el punto límite, el sistema se apaga. Tras desconectar las cargas, el voltaje de la batería alcanza los 22,6V, que va a ser el nuevo nivel de carga.

- **Séptima prueba: Perfil de carga de las baterías dependiendo del tipo de controlador (MPPT y PWM)**

Otra de las pruebas realizadas fue la carga de los acumuladores con diferentes tipos de controladores, esta práctica se realizó para analizar el comportamiento de la carga dependiendo del tipo de controlador.

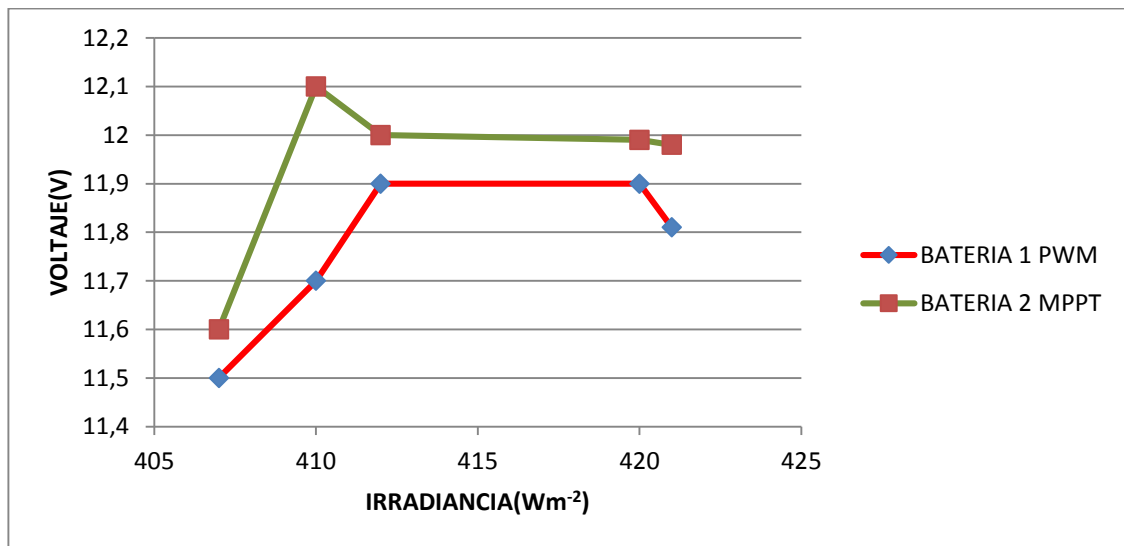
En el módulo No.2 (poli-cristalino) la batería 1 se conectó al controlador PWM y la Batería 2 al MPPT. Durante esta prueba la irradiancia fue muy baja (Entre 400 y 450 W/m<sup>2</sup>) y el porcentaje de carga de las baterías no aumentó significativamente (B1= 3,5% y B2= 3,3%)

En el módulo No. 1 (mono-cristalino) se conectó la batería 1 al PWM y la batería 2 al MPPT. En esta ocasión la irradiancia fue un poco más alta, pero poco constante. Las baterías aumentaron B1:6% y B2: 6,40%.

El comportamiento de los sistemas se puede observar en las gráficas 15 y 16.

## CARGA DE LOS ACUMULADORES BAJA IRRADIANCIA (Inferior a 500 W/m<sup>2</sup>)

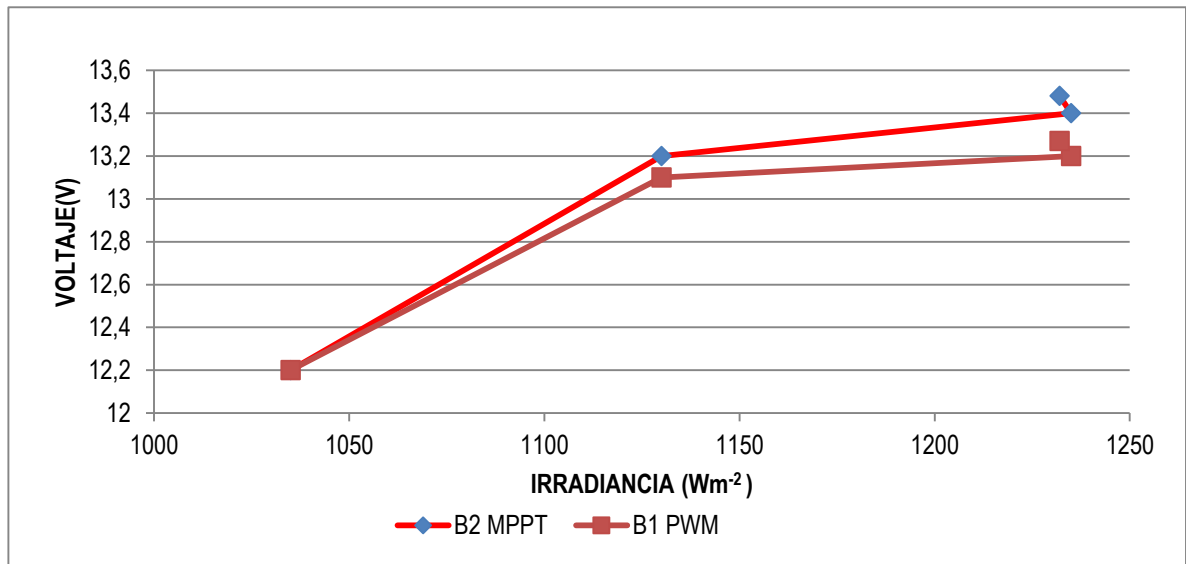
**Grafica 15. Perfil de carga a 12vdc con un nivel irradiancia baja (Inferior a 500 Wm<sup>-2</sup>) con dos diferentes controladores**



Fuente: Autores

En el caso de la gráfica 15 el porcentaje de carga de la batería no fue significativo, debido a las variaciones en la irradiancia y a la baja intensidad de esta. Se puede observar que a batería número uno tuvo mayor carga que la batería número dos esto se debe al tipo de controlador empleado (PWM).

**Grafica 16. Perfil de carga de una batería a 12vdc, empleando controladores MPPT y PWM. Nivel de irradiancia alto (Ente 1000 y 1300 W/m<sup>2</sup>)**



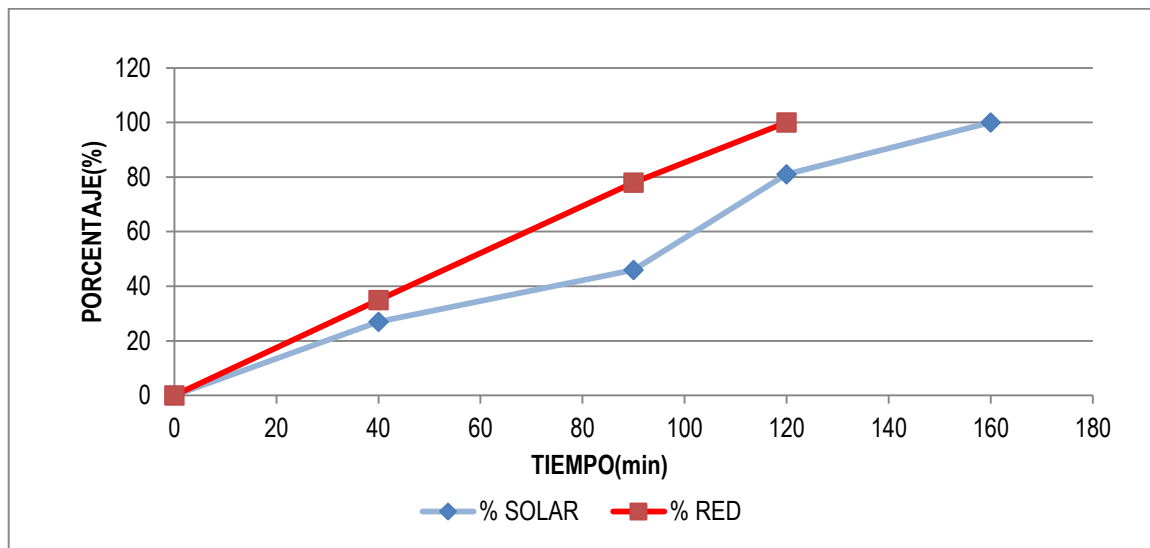
Fuente: Autores

Para esta prueba se tomaron dos baterías con un nivel similar de carga, cada una se conectó a un controlador diferente. La batería 1 al PWM y la batería 2 al MPPT. En la gráfica 16 se puede observar que el rendimiento del MPPT es mucho mejor, ya que después de transcurrido el mismo tiempo (5 horas) de carga para ambas baterías y que estas estuvieran sometidas a la misma irradiancia, el nivel de carga de la batería numero 2 es mayor.

- **Novena prueba: Perfil de carga de una batería de 3200mAh conectada a un sistema fotovoltaico y a la red.**

Se realizó la prueba para determinar qué tan eficiente resultaba el proceso de carga de determinado equipo con energía solar y se comparó con el tiempo de carga del mismo aparato conectado a red. Para esta prueba se utilizó un teléfono celular (Batería=3200mAh). Tras esta prueba se pudo concluir que con energía solar tarda un 25% más de tiempo del que emplea cargando con energía eléctrica proporcionada con la red.

**Gráfica 17. Perfil de carga de una batería de litio de 3200 mAh.**



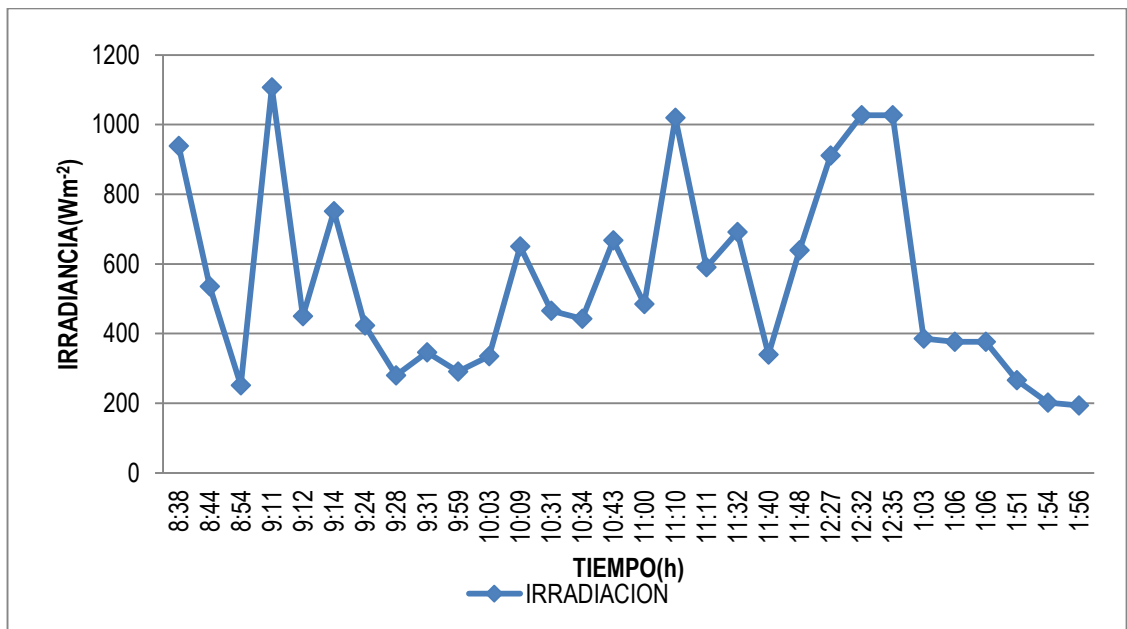
Fuente: Autores

La gráfica 17 permite hacer una comparación de la velocidad de carga de una batería de 3200mAh cargada con un sistema de energía solar y conectándolo a la red doméstica. Se puede observar que al cargar la batería con la red el tiempo de consumo es más corto, esto se debe a que la corriente de la red doméstica es constante, en cambio la corriente proporcionada por el sistema solar fotovoltaico es fluctuante debido a los cambios de radiación y otros factores.

- **Decima prueba: Análisis de la irradiación en un día nublado (27/10/2015)**

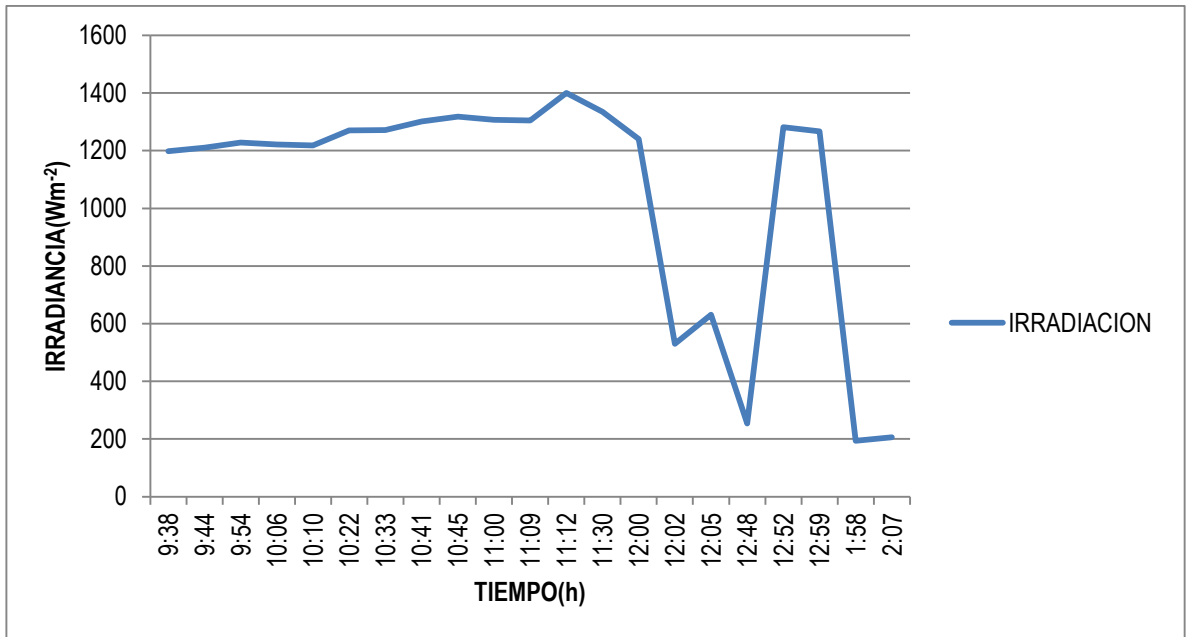
Se desea analizar el comportamiento de la irradiación en dos días con condiciones climáticas diferentes, un día nublado (Gráfica 18) y un día soleado (Gráfica 19).

**Gráfica 18. Perfil de irradiancia en un día nublado (27/10/2015)**



Fuente: Autores

**Grafica 19. Perfil de irradiancia (28/10/2015)**



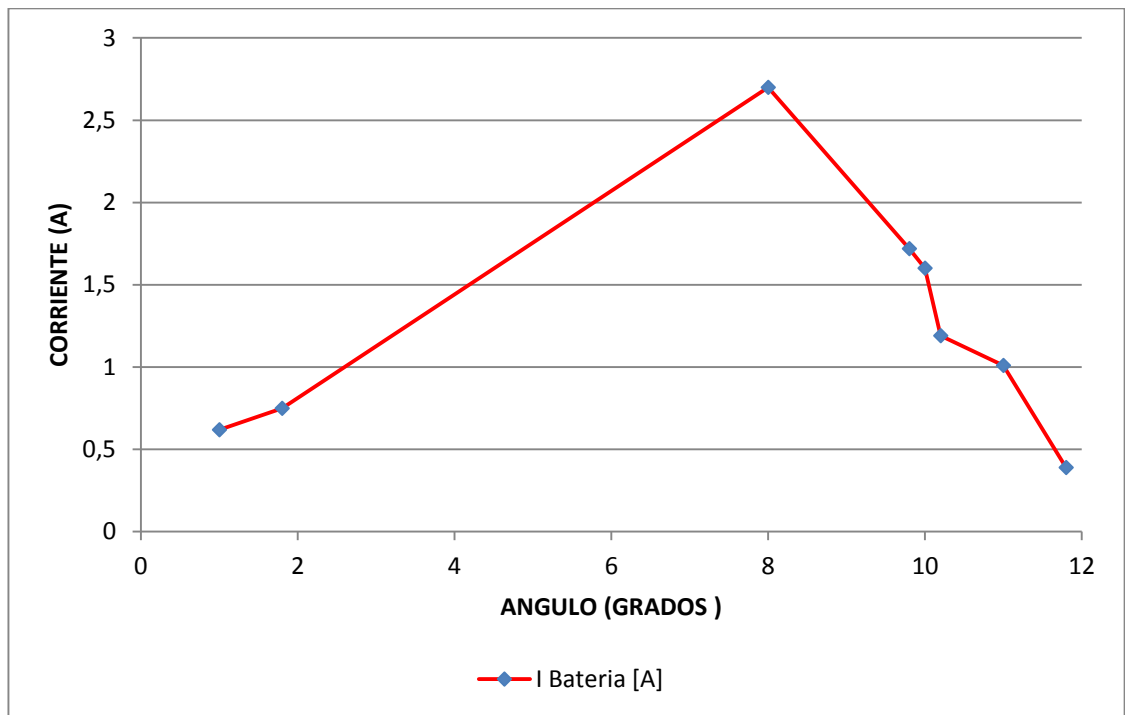
Fuente: Autores

Las gráficas 18 y 19 muestran la variación de la radiación durante los días 27 y 28 de octubre. El día 27 de octubre las fluctuaciones en cuanto a radiación fueron más notorias que el día 28, por ello, las pruebas realizadas son poco confiables y las variaciones en cuanto a carga no fueron significativas.

- **Onceaba prueba: Variación de la corriente con respecto al ángulo de inclinación.**

Se realizó un estudio de la corriente producida por el generador variando el ángulo de inclinación con el fin de compararlo con el ángulo óptimo teórico. Para esta prueba se mantuvieron valores de irradiancia alrededor de  $1200 \text{ Wm}^{-2}$

**Grafica 20. Perfil de corriente con respecto al ángulo de inclinación.**



Fuente: Autores

La grafica 20 permite observar el comportamiento de la corriente con respecto al ángulo de inclinación del panel. Aquí se obtiene de manera experimental el ángulo óptimo del panel, que para la ubicación del sistema es de  $8^\circ$ . Para esta prueba fue necesario tomar los datos de corriente manteniendo un valor de irradiancia similar en cada punto.

## **Pérdidas por suciedad y/o sombra.**

Las pérdidas por suciedad implican el uso de métodos específicos para determinar la naturaleza de los elementos que cubren el panel. En el proyecto se analizó el comportamiento de los paneles simulando la suciedad y el sombreado, estudiando la variación de la corriente del mismo con respecto al porcentaje del panel que estaba cubierto.

Este estudio se realizó para el panel de silicio mono-cristalino, formado por varias celdas y para el panel de silicio amorfo cuya estructura consiste en una única celda. Los datos obtenidos están presente en las tablas 16 y 17, son posteriormente analizadas en las gráficas 21 y 22. Se obvió el análisis en paneles de silicio poli-cristalino debido a que posee una estructura similar al mono-cristalino y su comportamiento en este caso es semejante.

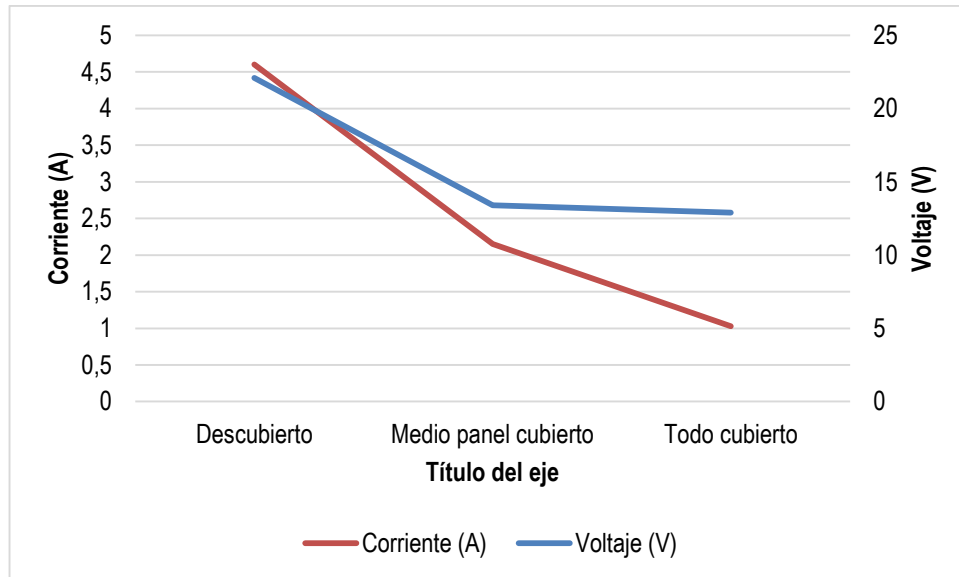
### **Silicio mono-cristalino**

**Tabla 16. Influencia de la suciedad y la sombra para panel de silicio Mono-cristalino**

<b>Cantidad de sombra</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Irradiación (W/m<sup>2</sup>)</b>
<b><i>Descubierto</i></b>	22,1	4,6	1250
<b><i>50% cubierto</i></b>	13,4	2,15	1281
<b><i>100% cubierto</i></b>	12,9	0,43	1263

Fuente: Autores.

**Grafica 21. Influencia de la sombra para panel de silicio Mono-cristalino**



Fuente: Autores

$$\%P\u00e9rdidas = \frac{A_{Descubierto} - A_{\% cubierto}}{A_{Descubierto}} * 100$$

50% Cubierto

$$\%P\u00e9rdidas = \frac{4,6 - 2,15}{4,6} * 100 = 53,26\%$$

100% Cubierto

$$\%P\u00e9rdidas = \frac{4,6 - 0,43}{4,6} * 100 = 90.65\%$$

En la gr\u00e1fica 21 se observa que al cubrir el panel de silicio mono-cristalino la corriente se ve afectada dr\u00e1sticamente, el voltaje tambi\u00e9n disminuye, pero el factor mayormente afectado es la corriente. Un panel de silicio monocristalino de 100W con la mitad de su \u00e1rea superficial cubierta puede perder hasta un 53,26% de la energ\u00eda producida.

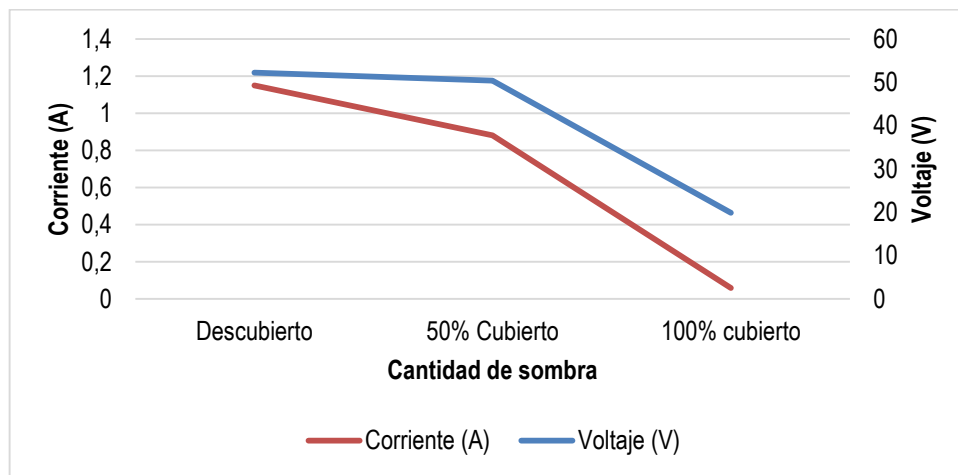
## Silicio Amorfo

**Tabla 17. Influencia de la sombra para panel de silicio Amorfo**

Cantidad de sombra	Voltaje (V)	Corriente (A)	Irradiación
<i>Descubierto</i>	52,2	1,15	1275
<i>50% Cubierto</i>	50,4	0,88	1260
<i>100% cubierto</i>	19,9	0,03	1299

Fuente: Autores

**Gráfica 22. Influencia de la sombra para panel de silicio Amorfo.**



Fuente: Autores

$$\%P\u00e9rdidas = \frac{A_{Descubierto} - A_{\% cubierto}}{A_{Descubierto}} * 100$$

50% Cubierto

$$\%P\u00e9rdidas = \frac{1,15 - 0,88}{1,15} * 100 = 43,75$$

100% Cubierto

$$\%P\u00e9rdidas = \frac{1,15 - 0,03}{1,15} * 100 = 97,3\%$$

Aunque la corriente de los paneles var\u00eda significativamente dependiendo del porcentaje de la superficie que est\u00e9 recibiendo radiaci\u00f3n solar, los paneles de

silicio amorfo son más eficientes en casos en los que la radiación no incide en la totalidad del área del panel (Gráfica 22), esto se concluye ya que al cubrir la mitad del panel este pierde únicamente un 43% de la energía producida, aproximadamente un 6% menos que los otros tipos de paneles.

En las pruebas donde se indica que el 100% del panel estaba cubierto, se sigue presentando un flujo de corriente debido a que el elemento empleado para cubrir el panel no era totalmente homogéneo en su forma, lo que permitía la filtración de luz y por consiguiente la producción de corriente.

### **Perdidas por temperatura.**

Para cuantificar el índice de pérdidas por temperatura en un sistema de energía solar fotovoltaica se realizaron una serie de pruebas, en las que se medía corriente y voltaje teniendo en cuenta su variación con respecto a la temperatura superficial del módulo y los datos obtenidos se organizaron en la tabla 18 para silicio amorfo, la tabla 19 para silicio monocristalino y la tabla 20 para silicio policristalino.

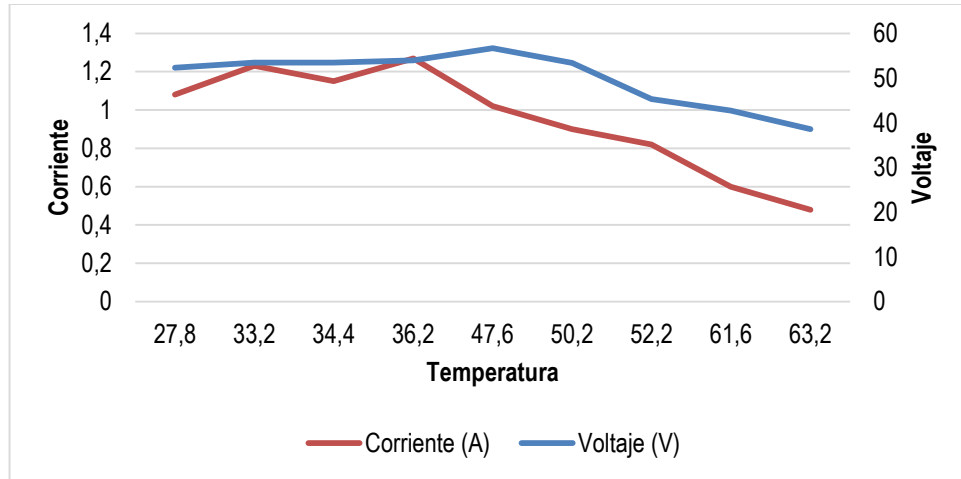
### **Silicio Amorfo**

**Tabla 18. Variación de V y I del panel con respecto a la Temperatura. Panel de silicio Amorfo.**

Temperatura	Voltaje (V)	Corriente (A)
27,8	52,3	1,08
33,2	53,5	1,23
34,4	53,5	1,15
36,2	54	1,27
47,6	56,7	1,02
50,2	53,4	0,9
52,2	45,3	0,82
61,6	42,7	0,6
63,2	38,6	0,48

Fuente: Autores

**Grafica 23. Variación de V y I del panel con respecto a la Temperatura. Panel de silicio Amorfo.**



Fuente: Autores

En la gráfica 23 los paneles de silicio amorfo presentan caídas de corriente de 0,5 amperios aproximadamente y de 15V al incrementar la temperatura, esto se debe a que la estructura cristalina de la célula se modifica levemente con el cambio de temperatura.

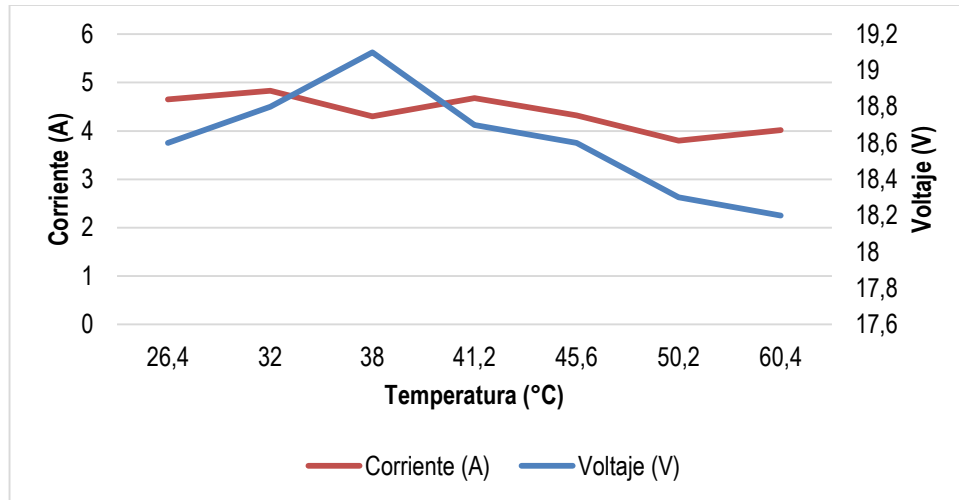
### Silicio Mono-Cristalino

**Tabla 19. Variación de V y I del panel con respecto a la temperatura. Silicio Mono-Cristalino**

Temperatura (°C)	Voltaje (V)	Corriente (A)
26,4	18,6	4,65
32	18,8	4,83
38	19,1	4,3
41,2	18,7	4,68
45,6	18,6	4,32
50,2	18,3	3,8
60,4	18,2	4,02

Fuente: Autores

**Grafica 24. Variación de V y I del panel con respecto a la temperatura. Silicio Mono-Cristalino**



La grafica 24 permite concluir que silicio mono-cristalino se ve afectado por el aumento de la temperatura, pero comparándolo con otras tecnologías, este no presenta cambios sustanciales en la corriente y el voltaje. Pues pierde aproximadamente 0,4 amperios, un valor bastante bajo teniendo en cuenta la corriente total y 0,4v aproximadamente.

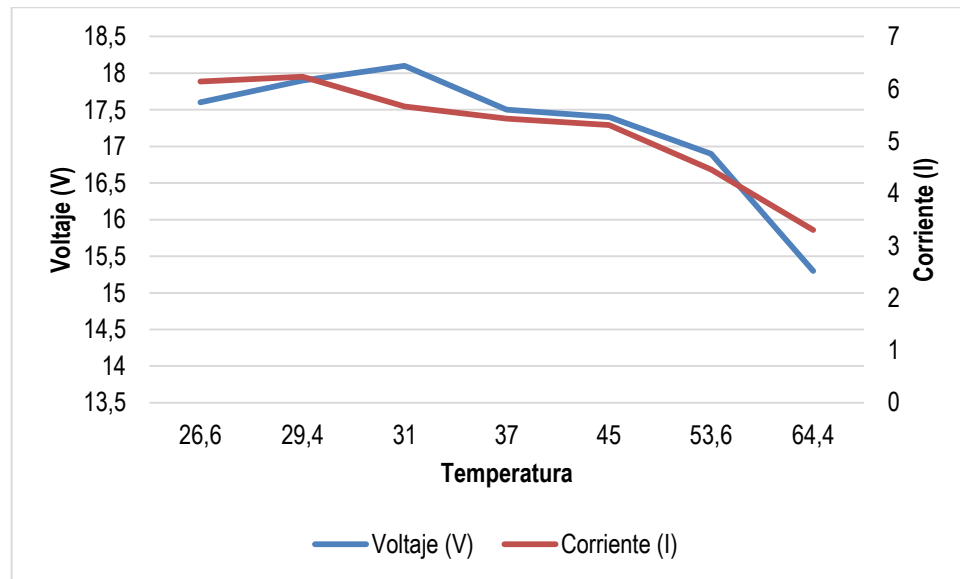
**Silicio Poli-Cristalino**

**Tabla 20. Variación de V y I con respecto a la temperatura.**

Temperatura	Voltaje (V)	Corriente (I)
26,6	17,6	6,14
29,4	17,9	6,23
31	18,1	5,66
37	17,5	5,43
45	17,4	5,31
53,6	16,9	4,46
64,4	15,3	3,3

Fuente: Autores

**Grafica 25. Variación de V y I del panel con respecto a la temperatura. Silicio Poli-Cristalino.**



Fuente: Autores

En la gráfica 25 se observa que el silicio poli-cristalino ante las variaciones de temperatura tiene un comportamiento similar a los paneles de silicio mono-cristalino, aunque este presenta un porcentaje de pérdidas un poco mayor que el anterior

### Perdidas por cableado

Las pérdidas por caída de tensión en el cableado por efecto joule se pueden estimar de la siguiente forma

$$P_R = I^2 * R_C \quad (\text{Ec.27})$$

Dónde

$P_R$ : Potencia perdida en los cables por efecto Joule

$R_C$ : Resistencia Óhmica de los cables

La resistencia Óhmica se puede cuantificar de la siguiente manera

$$R_C = \frac{\rho * L}{S} \quad (\text{Ec. 28})$$

Dónde:

$\rho$ : Resistividad del conductor del cable

$L$ : Longitud de los cables

$S$  : Sección del conductor del cable

Para calcular la resistencia Óhmica es necesario tener en cuenta que se emplearon dos tipos de cables para las conexiones. Cable Vehicular calibre 12 para acoplar los paneles al controlador, el monitor de batería y el guardián de batería. Y cable THW calibre 10 para las conexiones de las baterías, los bombillos, la caja de tacos y para acoplar el inversor al controlador.

En las diferentes conexiones la longitud y la sección del cable varían, entonces es necesario cuantificar las pérdidas en cada sección del sistema.

### **Panel-Controlador**

Ya que se empleó el mismo tipo de cable para esta conexión en los 4 módulos, la resistencia óhmica del conductor es la misma. Pero el cálculo de las pérdidas en cada módulo debe hacerse por separado, pues la intensidad de la corriente es diferente para cada caso.

$$R_c = \frac{0,0171 \left( \frac{\text{Ohm} * \text{mm}^2}{\text{m}} \right) * 2\text{m}}{3\text{mm}} = 0,0114 \text{ Ohm}$$

### **Silicio Mono-Cristalino**

La medida de corriente para este caso se obtuvo con una Irradiancia de 1150 [Wm<sup>-2</sup>] y una temperatura de 42°C  
I=4,03A

$$P_R = 4,03^2 * 0,0114 = 0,18 \text{ Watts}$$

### **Silicio Poli-Cristalino**

La medida de corriente para este caso se obtuvo con una Irradiancia incidente de 1240 [Wm<sup>-2</sup>] y T=38°C  
I= 5,42A

$$P_R = 5,42^2 * 0,0114 = 0,33 \text{ Watts}$$

### **Silicio Amorfo**

La medida de corriente para este caso se obtuvo con una Irradiancia incidente de 978 [Wm<sup>-2</sup>] y T=39°C  
I= 1,36<sup>a</sup>

$$P_R = 1,36^2 * 0,0114 = 0,02 \text{ Watts}$$

### Controlador-Batería

Para esta conexión se empleó cable THW calibre 10. En los 4 módulos la longitud de los cables es la misma.

$$R_c = \frac{0,0171\left(\frac{Ohm * mm^2}{m}\right) * 0.7m}{5mm} = 0,00239 Ohm$$

Para calcular correctamente las perdidas por cableado es necesario tener en cuenta la corriente de salida de cada panel, estos datos están registrados en la tabla 21.

**Tabla 21. Corriente de salida de cada panel.**

Panel	I <sub>Batería</sub>
Monocristalino	1,72
Policristalino	3,2
Amorfo	2,09

Fuente: Autores

Mono-Cristalino

$$P_R = 1,72^2 * 0,00239 = 7,07 \times 10^{-3} Watts$$

Poli-cristalino

$$P_R = 3,2^2 * 0,00239 = 0,024 Watts$$

Amorfo

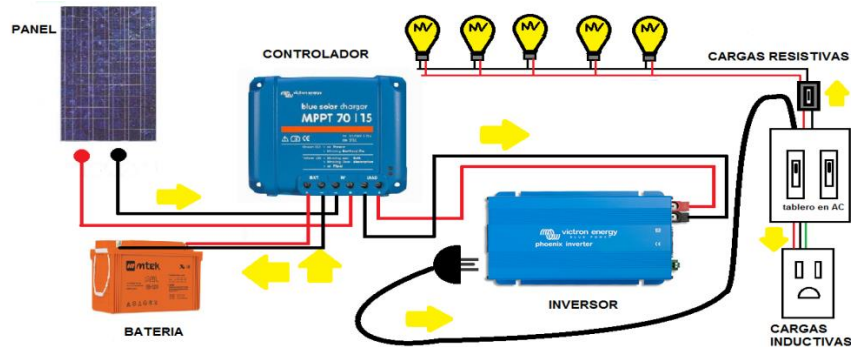
$$P_R = 2,09^2 * 0,00239 = 0,01 Watts$$

Según los cálculos anteriores se deduce que el silicio policristalino es el que presenta mayor de energía perdida en el cableado

## 16. ESTADOS DE FUNCIONAMIENTO

En las figuras de la 65 a la 73 se presentan diferentes tipos de conexiones que se pueden hacer en los bancos de pruebas.

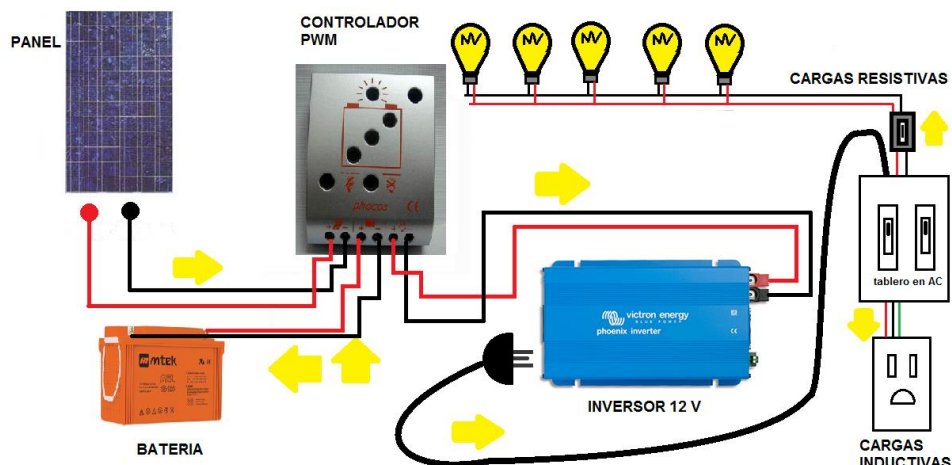
**Figura 65. Diagrama de conexión a 12 voltios 100ah con un controlador MPPT.**



Fuente: Autores

La figura 65 muestra un sistema básico, compuesto por un panel, un controlador MPPT, una batería de 12V, un inversor y sus respectivas cargas.

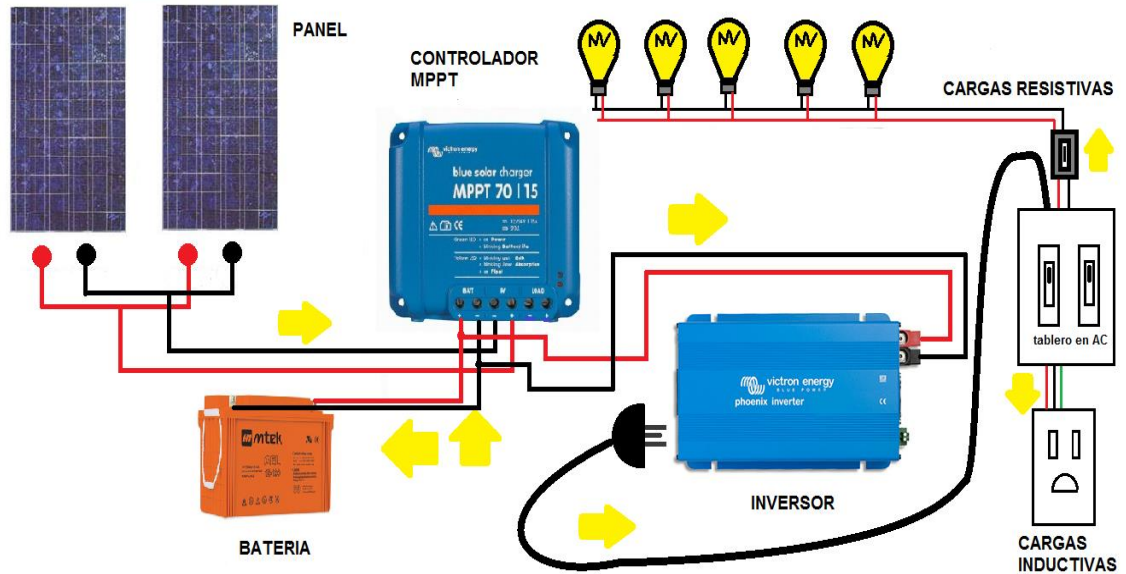
**Figura 66. Diagrama de conexión a 12 voltios 100ah con un controlador PWM.**



Fuente: Autores

La figura 66 muestra un sistema básico, compuesto por un panel, un controlador PWM, una batería de 12V, un inversor y sus respectivas cargas.

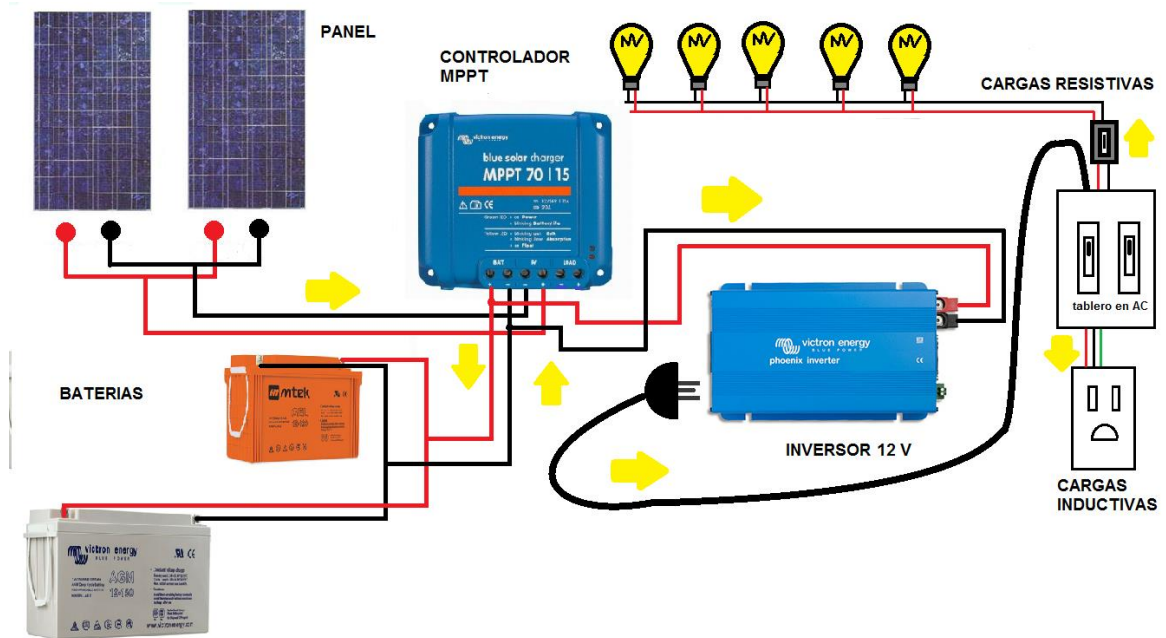
**Figura 67. Diagrama de conexión de un sistema con controlador MPPT con paneles conectados en paralelo**



Fuente: Autores

En la figura 67 están conectados los paneles fotovoltaicos en paralelo con una sola batería y un controlador MPPT. Este controlador configura automáticamente el flujo de corriente de salida y funciona con diferentes corrientes de entrada y salida, la cual así aumenta la corriente generada y por consiguiente el tiempo de autonomía del sistema

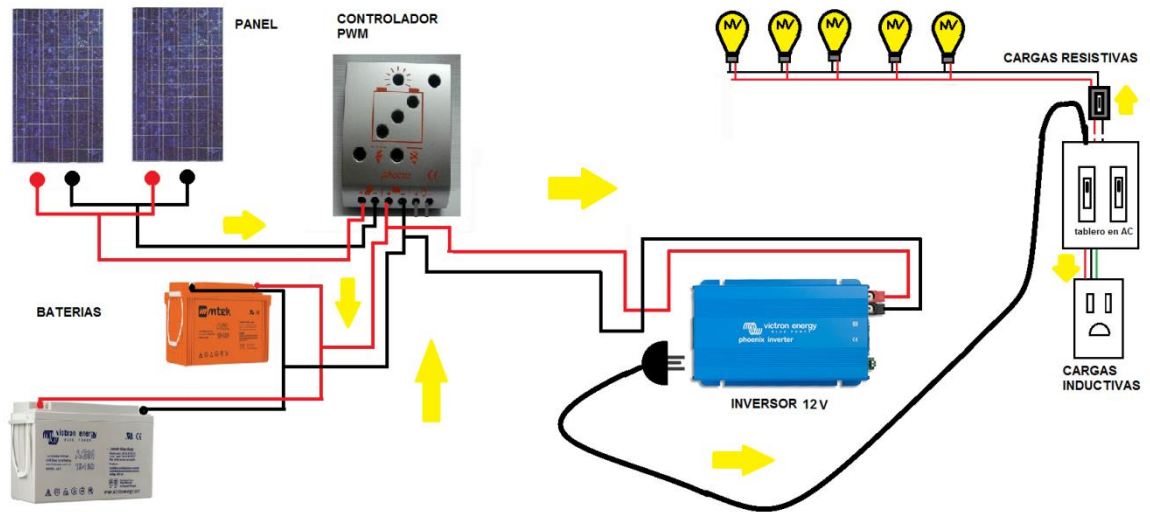
Figura 68. Diagrama de conexión a un sistema con controlador MPPT con paneles y baterías conectadas en paralelo



Fuente: Autores

En la figura 68 están conectados los paneles fotovoltaicos en paralelo con las dos a batería y un controlador MPPT

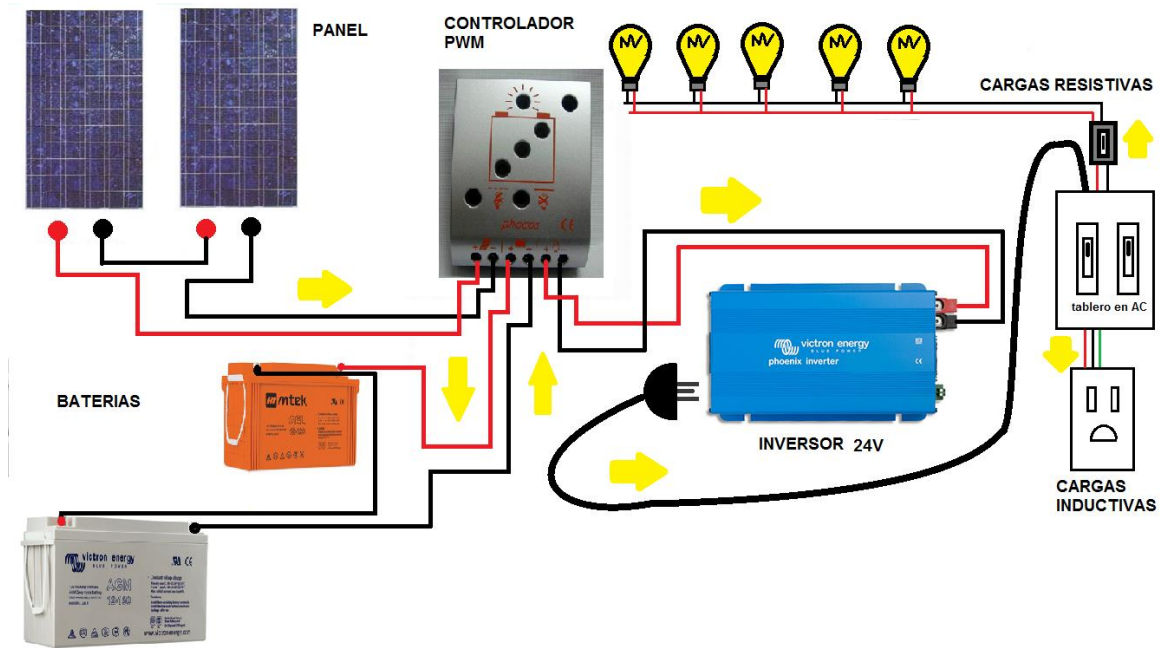
**Figura 69. Diagrama de conexión para paneles y baterías conectadas en paralelo con un controlador PWM**



Fuente: Autores.

En este sistema (Figura 69) conectado al controlador PWM es necesario tener en cuenta que cuando se conecta el sistema solar en paralelo las baterías tienen que estar igualmente conectadas debido a que este controlador no configura la misma entrada y la misma salida.

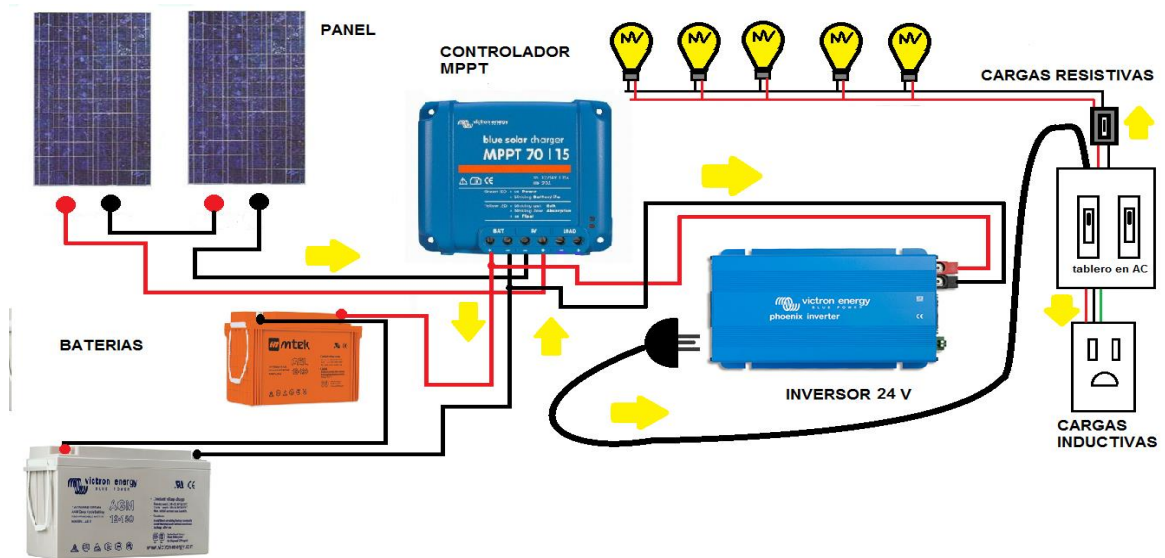
**Figura 70. Diagrama de conexión para paneles y baterías en serie con un controlador PWM**



Fuente: Autores

En el caso de la figura 70, sistema a 24 v, con un controlador PWM, el gasto de la corriente sería menor que a 12 voltios aproximadamente la mitad del consumo, requiere un inversor a 24V. Con este tipo de conexión aumenta el tiempo de autonomía de la batería ya que se disminuye la corriente a la mitad.

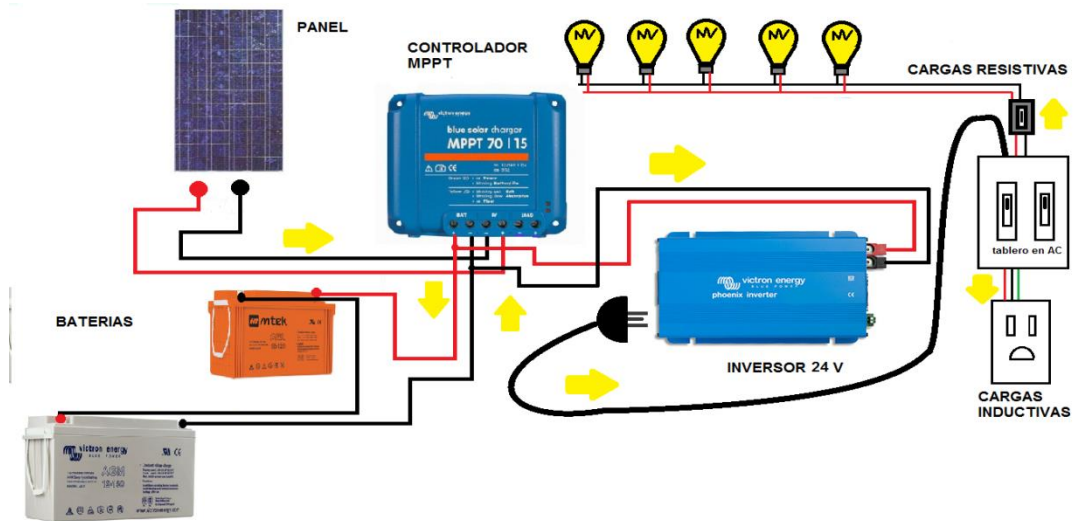
**Figura 71. Diagrama de conexión con paneles y baterías en serie con un controlador MPPT**



Fuente: Autores

La grafica 71 es un sistema a 24 v con un controlador MPPT en este caso el consumo de la corriente sería menor que a 12 voltios o la mitad del consumo, también esta conexión nos ayuda a que el sistema dure más el tiempo de cargas de las baterías.

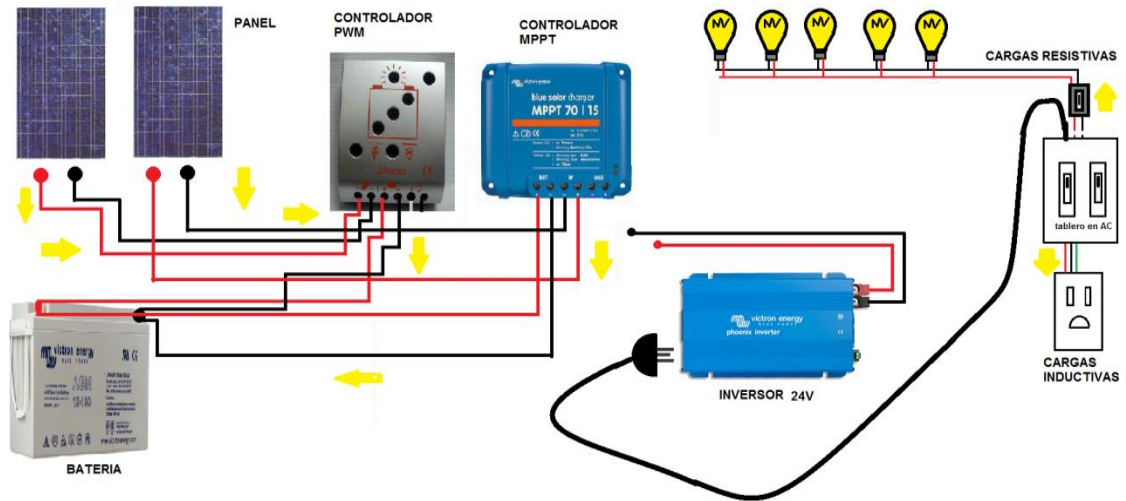
**Figura 72. Diagrama de conexión de baterías en serie con un panel y controlador MPPT**



Fuente: Autores

La grafica 72 es un sistema a 24 v con un controlador MPPT en este caso se conectó a un solo panel, debido a que el controlador MPPT configura la entrada y la salida de corriente permitiendo óptimo funcionamiento del sistema

**Figura 73. Conexión de dos controladores a una batería**



Fuente: Autores

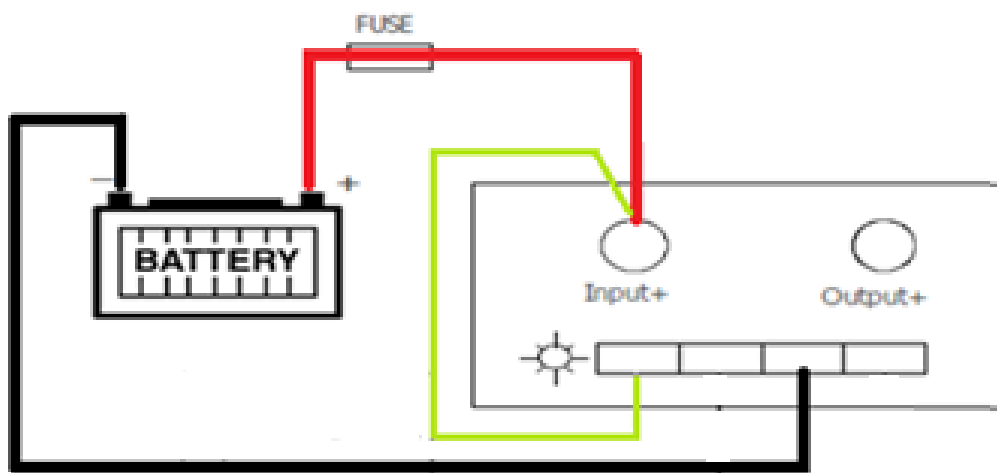
La figura 73 muestra un sistema con los dos controladores conectados a una sola batería. Cada controlador está conectado a un panel diferente, tiene como resultado la reducción del tiempo de carga del acumulador.

## 17. PROGRAMACIÓN DE LOS EQUIPOS

### 17.1 CONFIGURACIÓN DEL GUARDIÁN DE BATERÍAS

Para la configuración del guardián de baterías, es necesario contar con cables con terminales faston (Para la entrada negativa) y terminales de ojo (Para la entrada positiva. cuando tengamos los materias seguimos las conexiones de acuerdo a la figura 74.

**Figura 74. Conexión del guardián de baterías**



Fuente: Data Sheet guardián de baterías Victron

Para la correcta programación del guardián de baterías, se debe proceder de la siguiente manera:

1. Ubicar cada terminal en el lugar predeterminado para ello, es decir el terminal que viene desde la fuente (+) de la batería al input(+) del guardián.
2. Conectar el terminal de ojo del negativo de la batería a la tercer puesto de izquierda a derecha con conector faston del guardián de baterías

3. Se realiza un “puente” entre el input (+) del guardian y el primer puerto negativo (de izquierda a derecha) del monitor para la programación, para esto es necesario estipular el voltaje minimo de la bateria utilizada y se revisa la tabla 22, para la seleccion de posiciones.
4. Despues de programarlo se puede desconectar el “puente” entre el input (+) del guardian y el primer puerto negativo.
5. Para confirmar la posición programada, el LED parpadeará el número de veces de la posición seleccionada. En caso que no indique la posición deseada, se deben repetir los pasos anteriores.
6. Las posiciones programadas serán recordadas, incluso si la conexión de la batería es eliminada. [40]

**Tabla 22. Selección de posiciones**

12 Volt mode			24 Volt mode		
	Undervoltage Threshold	Uppervoltage Threshold		Undervoltage Threshold	Uppervoltage Threshold
Position 1	10,5V	12 V	Position 1	21 V	24 V
Position 2	10 V	11,5V	Position 2	20 V	23 V
Position 3	9,5V	11,5V	Position 3	19 V	23 V
Position 4	11,25 V	13,25 V	Position 4	22,5 V	26,5 V
Position 5	11,5V	13,8 V	Position 5	23 V	27,6 V
Position 6	10,5V	12,8 V	Position 6	21 V	25,6 V
Position 7	11,5V	12,8 V	Position 7	23 V	25,6 V
Position 8	11,8 V	12,8 V	Position 8	23,6 V	25,6 V
Position 9	12 V	13 V	Position 9	24 V	26 V
Position 10	10 V	13.2 V	Position 10	20 V	26.4 V
Position 11	Normal Alarm		Position 11	Normal Alarm	
Position 12	Relay function		Position 12	Relay function	

Fuente: Data Sheet guardián de baterías Victron.

**¡ATENCIÓN!** Primero retire la batería de conexión, conecte el equipo a la salida + y luego vuelva a conectar la batería

## 17.2 PROGRAMACIÓN DEL MONITOR DE BATERÍAS

La programación del BMV-700 (Figura 75) es muy fácil después de que ya esté conectado al SHUNT y a la batería tal cual como se muestran en la figura 76, se hizo la programación rápida con los siguientes pasos:

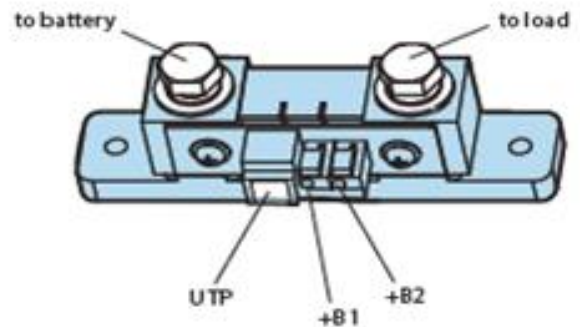
- Se debe pulsar el botón de SETUP y SELECT juntos durante unos segundo hasta que aparezca el letrero DE BATTERY CAPACITY la cual este valor se cambia por la corriente de la batería que estaremos monitoreando
- Se realizó la descarga y carga del sistema para el fin de que el monitor se acople a los parámetros que se estipulen

**Figura 75. Monitor de baterías y Shunt**

Battery monitor

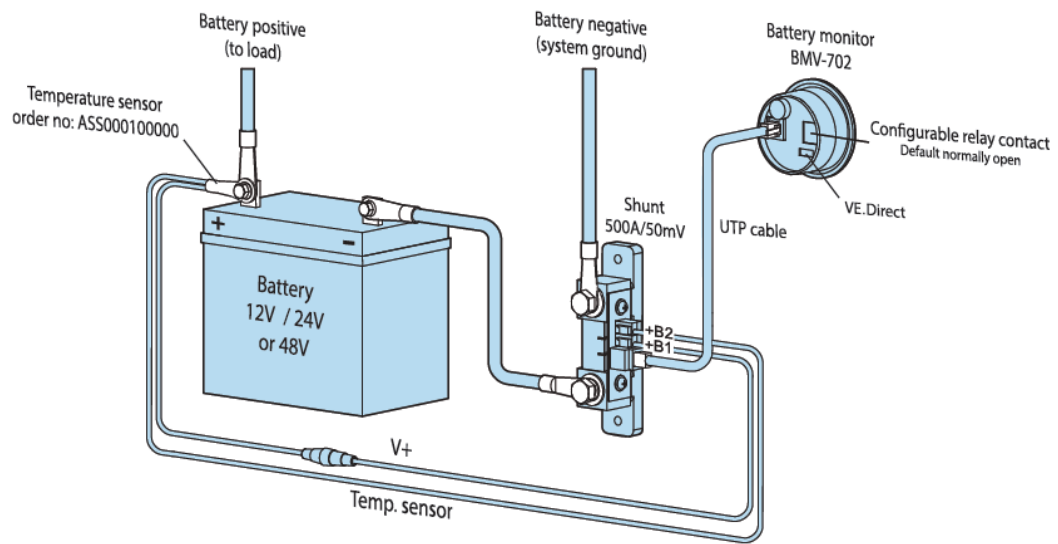


Shunt



Fuente: Guía de instalación rápida Monitor de Bateria Victron.

**Figura 76. Conexión de las baterías con el monitor**



Fuente:Guía de instalación rapida Monitor de Bateria Victron.

## 18. PRESUPUESTO

### 18.1 PRESUPUESTO ASUMIDO POR LA UNIVERSIDAD

**Tabla 23. Presupuesto asumido por la universidad**

EMPRESA	INTEMS	DESCRIPCION	PRECIO
ERGEA	5	Baterías AGM 100 Ah Marca Mtek	\$ 2.356.000,00
ERGEA	1	Inversor 350w 12vdc Marca Victron	\$ 469.800,00
ERGEA	3	Inversor 350w 24vdc Marca Vcitra	\$ 1.409.400,00
ERGEA	3	Controlador MPPT 15A Marca Victron	\$ 969.000,00
ERGEA	2	Controlador PWM 20A Marca Phocos	\$ 351.200,00
ERGEA	100	Cable solar 6mm	\$ 700.000,00
ERGEA	4	Monitores de baterías Marca Victron	\$ 2.200.000,00
ERGEA	4	Protección de baterías Victron	\$ 1.200.000,00
ERGEA	4	Terminales mc4 macho	\$ 36.000,00
ERGEA	4	Terminales mc4 hembra	\$ 60.000,00
ERGEA	4	Macho positivo	\$ 140.000,00
ERGEA	4	Macho negativo	\$ 140.000,00
		IVA 16%	\$ 1.605.024,00
<b>WEATHER CONTROLS</b>	4	Medidor de poder solar	\$1.192.480
<b>Lixi Colombia</b>	4	Kill a watt	\$399.200
<b>ELECTRONICA GENERAL</b>	1	Elementos de medición, cables y otros	\$1.500.000
<b>ANIACRIL</b>	1	Acrílicos puestos en los bancos	\$1.500.000
<b>MALLAS ESPECIALES</b>	5	Mallas	\$1.300.000
<b>TOTAL=</b>			<b>\$ 17.528.104,00</b>

## 18.2 PRESUPUESTO ESTUDIANTES

**Tabla 24. Presupuesto estudiantes**

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	PRECIO
300	Terminales	\$180.000
20	Bombillos	\$ 35.000
12m	Termoencogible	\$30.000
8	Tacos en DC	\$160.000
6	Transportadores	\$30.000
8 m	Coraza metálica	\$ 21.000
40	Empalmes de bombillos	\$25000
200 m	Cable para conexiones	\$500.000
4	Pinzas amperimétricas	\$600.000
4	Estructuras	\$1.090.000
2	Pinturas electroestática	\$ 100.000
176	Borneras	\$ 124.000
1	Transportes	\$ 30.000
1	Fichas	\$ 30.000
<b>Total</b>		<b>\$ 2.955.000</b>

## 19. CONCLUSIONES

Debido a las cargas ejercidas por los equipos (Aproximadamente 120 kg ó 1,2 kN) se seleccionó acero cold rolled o 1018 o acero estructural para la construcción de cuatro bancos prueba de energía solar fotovoltaica. Y además tienen una capa de anticorrosivo que garantiza un mayor tiempo de duración del material.

El uso de las guías de laboratorio, representa un apoyo fundamental en el desarrollo de la práctica, pues facilita el alcance de los objetivos propuestos en orientando al usuario la manera adecuada de realizar los procedimientos estipulados.

Inicialmente se propusieron siete (7) guías, después de varios análisis y de algunas pruebas en los bancos, se pudo concluir que 5 prácticas serían suficientes para sintetizar los procesos básicos a la hora de instalar un sistema de energía solar fotovoltaica.

Se estudió diferente comportamiento de los diferentes elementos y tecnologías puestos en nuestro sistema, por lo cual se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En el estudio de sombreado y suciedad que se realizó, se pudo determinar que panel de mayor rendimiento con sombreado parcial o suciedad es el de silicio amorfo pues tiene menor índice de pérdidas, que varían de 0,02 a 0,4%.
- De acuerdo al estudio realizado del comportamiento de la corriente del panel con respecto a la temperatura (independientemente de la estructura cristalina de la célula) se puede deducir que a mayor temperatura la corriente aumenta pero disminuye el voltaje, reduciendo la eficiencia del sistema. El aumento de 36°C puede disminuir hasta un 40% de la eficiencia del panel.

- De acuerdo a la página de la NASA, los peores meses en cuanto a irradiación en las coordenadas correspondientes a la UPB son octubre y noviembre, dicha información se pudo confirmar haciendo los perfiles de irradiación en diferentes días, durante el mes de octubre.

De acuerdo a los datos obtenidos en las pruebas realizadas los sistemas fotovoltaicos cargan un 20% más rápido con un controlador MPPT que con un PWM. En el caso que se manejen diferentes tensiones es mejor usar un MPPT ya que se configura automáticamente a los requisitos del sistema, pero en lugares de baja irradiancia el PWM resulta ser una opción más acertada.

De la información obtenida con las pruebas realizadas, se determinó que el proceso de carga para una batería de litio con un sistema fotovoltaico es aproximadamente un 25% más lento que con un sistema conectado a la red.

De acuerdo al estudio realizado el tiempo promedio de descarga de los acumuladores (12V/100Ah) con una potencia de salida constante (85watts) con cargas resistivas fue de 5 horas a 12v. La batería conectada al módulo monocristalino tuvo mayor tiempo de autonomía aproximadamente una hora más que los otros bancos. Los acumuladores conectados 24v tienen mayor tiempo de autonomía debido a que la corriente de salida es la mitad de la corriente de consumo.

La instalación de los equipos y de puertos de conexión en un tablero didáctico organizado apropiadamente facilitó la interacción con los equipos y reduce notablemente el riesgo de accidentes.

En el momento de la configuración del guardián y el monitor de baterías es importante tener claro los límites de carga y descarga de los acumuladores (Con cargas conectadas), de lo contrario los equipos no realizarán su función de manera adecuada.

## 20. RECOMENDACIONES

- Para las conexiones entre equipos se emplearon cables de banana. Dichos terminales se ajustan al cable mediante un tornillo que con el uso constante tiende a aflojarse y el terminal se suelta. Por ello es recomendable cambiar dichos cables por unos de banana fija con recubrimiento de plástico, que son más resistentes y seguros.
- El monitor de baterías y el controlador MPPT ambos de Victron, ofrecen la posibilidad de configurarse empleando un software que suministra el fabricante. Para ello es necesario un cable Ve Direct USB Interface. Es recomendable adquirir este cable para posteriormente realizar prácticas de configuración de equipos mediante este método.
- Con el uso de las baterías estas van disminuyendo su tope máximo de carga, para evitar este inconveniente se recomienda adquirir un Balanceador de Baterías.
- Es recomendable instalar un reóstato para controlar el voltaje del panel instalado en el módulo #4, debido a que su máximo voltaje excede considerablemente los parámetros de funcionamiento de ambos controladores.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ADNtesis Estelar en el sol. Disponible en: <http://www.artinaid.com/wp-content/uploads/2013/02/Nucleos%C3%ADntesis-Estelar-en-el-Sol.png>

[2] LÓPEZ RASO, M<sup>a</sup>. José. Energías renovables para el desarrollo: Energía solar Fotovoltaica. THOMSON EDITORES SPAIN PARANINFO S.A. España. 1 edición, 2007.

[3] Tipos de radiación solar. Disponible en: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSqpwFDx6vX4aK8mBKllqYGvJWvcy0gFcIlgRyWsQjGoo-UcSpik>

[4] Unidad de Apoyo Técnico. Para el saneamiento básico del área rural. Estimación de la radiación solar. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cosude/xxii.pdf>

[5] Refrigeración-absorción. Disponible en: <http://www.caloryfrio.com/images/articulos/Frio-refrigeracion/refrigeracion-absorcion.jpg>

[6] RUFES MARTINEZ, Pedro, Energía solar térmica. Técnicas para su aprovechamiento, editorial marcombas edición 2010

[7] El efecto fotovoltaico y sus aplicaciones. Disponible en:  
<http://solarfotovoltaica.galeon.com/ARCHIVOS/efecto.htm>

[8] Función celular. Disponible en:  
[http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/03\\_celula/01\\_basico/images/func\\_cel.gif](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/images/func_cel.gif)

[9] M<sup>a</sup>. JOSE LOPEZ RASO.: Energías renovables para el desarrollo. THOMSON EDITORES SPAIN PARANINFO S.A. España. 1 edición, 2007

[10] Energía solar. Disponible en: <http://cifes.gob.cl/tecnologias/solar/fotovoltaica-pv/silicio-amorfo-a-si/>

[11] Esfera solar. Disponible en: [http://www.sfe-solar.com/wpcontent/uploads/2011/03/Sharp\\_NA\\_Capa\\_Fina.jpg](http://www.sfe-solar.com/wpcontent/uploads/2011/03/Sharp_NA_Capa_Fina.jpg)

[12] Monocrystalline solar modules. Disponible en:  
<http://www.linklightsolar.com/images/monocrystalline-solar-modules-01.jpg>

[13] Panel solar policristalino. Disponible en: <http://www.sitiosolar.com/wp-content/uploads/2014/01/panel-solar-policristalino2.jpg>

[14] Energía solar fotovoltaica. Paneles o módulos fotovoltaicos: características eléctricas. Disponible en: <http://www.mailxmail.com/curso-energia-solar-fotovoltaica/paneles-modulos-fotovoltaicos-caracteristicas-electricas>

[15] Phoenix Inverter 180VA-1200VA. 12 / 24 / 48 Volt. Disponible en:  
<http://www.victronenergy.com.es/inverters/Phoenix-inverter-180VA-1200VA>

- [16] Energías renovables y Arquitectura bioclimática. Energía Solar Fotovoltaica. Disponible en: [http://erenovablesarqbioclimatica.blogspot.com/2012\\_02\\_01\\_archive.html](http://erenovablesarqbioclimatica.blogspot.com/2012_02_01_archive.html)
- [17] Interconexión. Disponible en: <http://enalmex.com/sites/default/files/Interconexion.jpg>
- [18] Sistema aslado- OFF GRID. Ingemecanica.com Disponible en: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut192/fig6tut192.jpg>
- [19] Batería AGM sol. Victron. Disponible en: <http://www.victron.com>
- [20] Batería plomo acido. Disponible en: <http://www.asifunciona.com>
- [21] Batería de gel. Victron. Disponible en: [www.victron.com](http://www.victron.com)
- [22] Controlador de carga Victron 75-15. Victron Energy. Disponible en: [www.victronenergy.com](http://www.victronenergy.com)
- [23] Blue Power IP65 Charger. Victron Energy. Disponible en: [www.victronenergy.com](http://www.victronenergy.com)
- [24] Diferencia entre regulador PWM y MPPT. Disponible en: <http://www.elecsolsolar.com/diferencia-entre-regulador-pwm-y-mppt/>
- [25] Sistema solar fotovoltaico. Disponible en: [www.mpptsolar.com](http://www.mpptsolar.com)
- [26] monitor de baterías Victron BMV-700. Disponible en: [www.victronenergy.com.es](http://www.victronenergy.com.es)

[27] Guardián de baterías Victron. Manual del guardián de baterías Victron Energy. Disponible en: <http://www.victronenergy.com.es>

[28] Kill a watt. Disponible en: [www.P3international.com](http://www.P3international.com)

[29] Factores de pérdidas energéticas. Disponible en: <http://www.cugar.net/documentos/Perdidas%20en%20instalaciones%20solares%20fotovoltaicas.pdf>

[30] Pérdidas por sombreado. Disponible en: [http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC\\_Julio\\_Fernandez\\_Ferichola.pdf?sequence=1](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf?sequence=1)

[31] Historia de la energía solar. Disponible en: <http://recuerdosdepandora.com/historia/inventos/historia-de-la-energia-solar/>

[32] Humberto Rodríguez Murcia. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. En: Revista de ingeniería Universidad de los Andes. No. 28 (Nov., 2008); p. 86. ISSN. 0121-4993.

[33] Laboratorios de energía solar en el mundo. Disponible en: <http://www.dforcesolar.com/energia-solar/laboratorio-de-energia-solar-fotovoltaica-abre-sus-puertas-en-zamudio/>

[34] Laboratorio FV Conex. Disponible en: [http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/laboratorios/laboratorio\\_2.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/laboratorios/laboratorio_2.html)

[35] Entorno de colaboración. Disponible en:  
<https://www.psa.es/webesp/gen/colaboracion.php>

[36] EPSA puso en operación el laboratorio solar más grande de Colombia. Disponible en: [www.epsa.com.co/nosotros/sala-de-prensa/notas-especiales/epsa-puso-en-operaci%C3%B3n-el-laboratorio-solar-m%C3%A1s-grande-de-colombia](http://www.epsa.com.co/nosotros/sala-de-prensa/notas-especiales/epsa-puso-en-operaci%C3%B3n-el-laboratorio-solar-m%C3%A1s-grande-de-colombia)

[37] La UFPS Ocaña cuenta con el primer Banco de Prueba de Energía Solar fotovoltaica. Disponible en: [ufpso.edu.co/new/La-UFPS-Ocana-cuenta-con-el-primer-Banco-de-Prueba-de-Energia-Solar-fotovoltaica\\_1428](http://ufpso.edu.co/new/La-UFPS-Ocana-cuenta-con-el-primer-Banco-de-Prueba-de-Energia-Solar-fotovoltaica_1428)

[38] ROMERO DÍAZ, Pedro Antonio. Diseño e implementación de un laboratorio de energías renovables en la universidad de la costa. Disponible en: <http://www.acofipapers.org/index.php/acofipapers/2013/paper/viewFile/288/153>

[39] Raúl Ortíz. Selección de Conductores eléctricos monopolares: THW, THW-2 o THHN. En: Infocables, procables. No. 2 (Ago., 2005); p. 9.

[40] Data Sheet guardián de baterías Victron

## LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A.** Manual del laboratorio (Adjunto en cuadernillo)
- ANEXO B.** Datasheet Poli-Cristalino (Adjunto medio magnético)
- ANEXO C.** Datasheet Mono-Cristalino(Adjunto medio magnético)
- ANEXO D.** Datasheet de Silicio Amorfo 100 W(Adjunto medio magnético)
- ANEXO E.** Datasheet de Silicio Amorfo de 142 W (Adjunto medio magnético)
- ANEXO F.** Datasheet Baterías 12VDC100Ah (Adjunto medio magnético)
- ANEXO G.** Datasheet batería 12VDC205Ah (Adjunto medio magnético)
- ANEXO H.** Datasheet del monitor de baterías (Adjunto medio magnético)
- ANEXO I.** Instalación del monitor de baterías (Adjunto medio magnético)
- ANEXO J.** Datasheet del protector de baterías (Adjunto medio magnético)
- ANEXO K.** Manual de controlador MPPT (Adjunto medio magnético)
- ANEXO L.** Manual de inversor. (Adjunto medio magnético)
- ANEXO M.** Manual de protector de batería. (Adjunto medio magnético)
- ANEXO N.** Manual monitor de baterías. (Adjunto medio magnético)
- ANEXO O.** Manual PWM gris. (Adjunto medio magnético)
- ANEXO P.** Manual PWM negro. (Adjunto medio magnético)