

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BANCO DIDÁCTICO
DE PRUEBAS DE UN SISTEMA SOLAR
FOTOVOLTAICO PARA EL DEPARTAMENTO DE
ENERGÍAS RENOVABLES DE LA ESCUELA DE
INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE
EL SALVADOR Y OTRAS INSTITUCIONES
EDUCATIVAS**

PRESENTADO POR:
**JESÚS ÁNGEL GUARDADO LÓPEZ
EDGARD ISAÍ HERNÁNDEZ RIVAS
ARIEL BORISOV SEGOVIA SALAZAR
FREDY MAURICIO TRUJILLO VÁSQUEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL:

Ing. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA

SECRETARIO:

Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR INTERINO:

Ing. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título:

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BANCO DIDÁCTICO
DE PRUEBAS DE UN SISTEMA SOLAR
FOTOVOLTAICO PARA EL DEPARTAMENTO DE
ENERGÍAS RENOVABLES DE LA ESCUELA DE
INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE
EL SALVADOR Y OTRAS INSTITUCIONES
EDUCATIVAS**

Presentado por:

**JESÚS ÁNGEL GUARDADO LÓPEZ
EDGARD ISAÍ HERNÁNDEZ RIVAS
ARIEL BORISOV SEGOVIA SALAZAR
FREDY MAURICIO TRUJILLO VÁSQUEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor: ING. ALBERTO ANTONIO ROSA LUE

San Salvador, mayo de 2023

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. ALBERTO ANTONIO ROSA LUE

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a Dios por regalarme salud y el don de la perseverancia para poder culminar mi carrera que con tanto anhelo deseaba; solo él sabe la cantidad de obstáculos y caídas superadas durante este proceso. Mis más sinceros agradecimientos a mis hermanos por siempre creer en mí, por nunca dudar que lograría mi meta y por apoyarme incondicionalmente durante estos años, sin su ayuda, aquel sueño de niño y aquella meta que en su momento parecía imposible, no hubiera sido posible. A mis padres, que desde pequeño me forjaron por el buen camino, que me enseñaron a ser fuerte y a luchar por mis sueños; sabía que, desde su ser humilde y cayado deseaban que un día lograra terminar mi carrera. Gracias a mis amigos y compañeros de tesis, por regalarme su bonita amistad, por las horas compartidas durante los últimos años, por haber compartido sus conocimientos conmigo, por permitirme formar parte de los trabajos realizados en conjunto y por compartir las historias vividas que de una u otra manera nos dejan un aprendizaje en nuestra vida. A todas aquellas personas que forman parte de mi círculo social que gracias a sus consejos y palabras de aliento me motivaron a continuar. Le agradezco de manera muy especial y sincera a nuestro asesor, por haber aceptado guiarnos en el desarrollo de nuestra tesis, por estar siempre pendiente de los avances, por su dedicación y paciencia; sin sus palabras y correcciones precisas no hubiésemos podido lograr llegar a esta instancia tan anhelada. A los docentes que son muchos, pero que han sido parte de mi camino universitario, a todos ellos les quiero agradecer por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí. Por último, pero no menos importante a la Universidad de El Salvador por sus exigencias que me han ayudado a forjar personalidad, pero que a la vez me ha permitido perseverar para lograr mi tan ansiado título. A sus autoridades por su trabajo y gestión que siempre han sido para una mejora continua.

GUARDADO LÓPEZ, JESÚS ÁNGEL

Infinitas gracias al Dios Todopoderoso, del cual proviene todo y todo vuelve a Él, a quien atribuyo el logro y lo que requirió el arduo camino. Ruta que emprendí y nunca estuve solo, siempre estuvo a mi lado en todo momento mi madre, quien no escatimo ningún esfuerzo, razón suficiente para ser desde siempre el mayor deseo de superación.

Mis hermanos por siempre ser mis mayores ejemplos a seguir, por creer en mí y estar atentos en todo momento. Mis hermanas por su apoyo incondicional y cálido que siempre me hacen sentir.

Sin tener en poco, todas las personas, que durante el transcurso hicieron de los días difíciles, un tanto livianos y gratos, les agradezco a cada uno de ustedes, por el mínimo esfuerzo que hayan realizado a mi favor.

A todos los docentes, que sembraron en mi lo mejor de ustedes, siempre les estaré agradecido por brindarme las herramientas necesarias para ser un gran profesional.

A la UES, por darme lo mejor para mi educación, forjando mi carácter, mi pensamiento crítico, que contribuirá a mi vida profesional y a la sociedad a la cual nos debemos.

Este logro no es mío, sino de TODOS los que creyeron en mí y siguen a mi lado. Con mucho amor y sacrificio les expreso si pudimos y siempre podremos, con el mayor esfuerzo y tomados de la mano de Dios no tendremos limites, ahora se vuelve realidad uno de mis mayores sueños y sin duda empezaran nuevos y mejores, solo espero tenerles a mi lado, es la mayor recompensa.

Gracias por ser y estar.

HERNÁNDEZ RIVAS, EDGARD ISAÍ

El siguiente orden no muestra una preferencia de las personas y/o sucesos que se van a mencionar:

En primer lugar, darles un enorme agradecimiento a mis padres y a mi hermano, que, sin ellos, la realización de este trabajo y mi estadía en la UES no hubiera sido posible. Su apoyo a lo largo de mi camino ha sido de vital importancia, el combustible que me mantenía vivo en tiempos oscuros y con el pasar del tiempo puedo decirles: ¡lo logramos!

A mis amigos de la vida: su aporte fue demasiado para la conservación de mi salud mental, esas pláticas después de pasar semanas fuera de casa, el salir a pasar un buen tiempo juntos créanlo que puede parecer poco, pero para mí fue más que suficiente para desconectarme de los problemas y hacerme caer en la realidad que la vida es bella y no hay que enfocarse en el pasado.

A mis amigos de la UES: para los que siguen y para los que ya no están por razones desconocidas, crean también que su aporte a la realización de mi carrera profesional fue grande, el pasar parcial juntos, ser derrotados en batalla nos forjó un carácter de sobrevivencia y aprendizaje que no todos pueden obtener.

Por último y no menos importante, le agradezco a la UES, que me enseñó a ser un gran profesional, con la ayuda de docentes y estudiantes de la misma, me hizo darme cuenta de los diferentes tipos de personas que existen y a quienes debo tener como modelo a seguir.

SEGOVIA SALAZAR, ARIEL BORISOV

Primeramente, agradecer a Dios, a mis padres y hermana que me dieron su apoyo y comprensión en momentos de flaqueza que se me presentaron en el tiempo que estuve en la UES, ya que sin ellos no hubiera podido terminar mis estudios. También agradecer a mis abuelos paternos.

A mis amigos que conocí en la UES, ellos fueron otra parte importante en mi vida personal y universitaria, ya que nos dimos ánimos y palabras de aliento para seguir adelante en nuestras respectivas carreras y seguir avanzando hasta este punto de finalización.

También hacer una mención importante de los compañeros de carrera, ya que con ellos pasamos momentos de alegrías y tristezas en distintas materias, a la vez que esas experiencias nos ayudaron a tener carácter cuando las cosas no se nos daban de la manera que esperábamos.

Al asesor, le agradezco enormemente ya que no ha sido la primera vez que he tenido la dicha de trabajar con él en un proyecto de la carrera, decirle que es una persona correcta a la cual lo admiro por su perseverancia y deseos de ayudar a los estudiantes en temas que estén dentro de su ámbito de enseñanza. Además, a los docentes que tuve la dicha de recibir clases y su conocimiento, también aquellos con los que no pude recibir clases, pero me ayudaron dándome algunos consejos importantes.

Por ultimo y no menos importante a la UES por los valores inculcados y la personalidad forjada a través del periodo de tiempo que estuve en el alma mater que por generaciones a formado a profesionales y hoy por fin digo que soy uno de ellos.

TRUJILLO VÁSQUEZ, FREDY MAURICIO

Resumen

Se presenta teoría para entender lo que es el fenómeno fotovoltaico, se construye la base para después enfocar en lo que es la generación de energía por medio de este fenómeno y lograr pasarlo a una pequeña escala. Se toman diversos aspectos de diseño, selección y cálculos de elementos, tomando los criterios necesarios para que dichos equipos y elementos sean los más adecuados para nuestro objetivo: repartir el conocimiento al estudiante o persona interesada. Se realizaron laboratorios en base a todos los temas que se mencionaron en el desarrollo de este trabajo, incluyendo pruebas a los paneles y pruebas que mencionan algunas normas. También incluyen cotizaciones de todos los equipos y componentes del banco, así como los planos del mismo, haciendo al final una cordial invitación a quien esté interesado de seguir este proyecto en hacer uso de la mejor y más eficiente manera, cumpliendo siempre el objetivo anteriormente mencionado.

Índice.

Introducción.	1
Objetivos	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 Antecedentes generales de la energía solar fotovoltaica.	3
1.2 Energías no renovables y renovables.....	6
1.2.1 Energías renovables.....	6
1.2.2 Energías no renovables.....	11
1.3 Proyecciones de la energía solar fotovoltaica.	12
1.3.1 Sostenibilidad de la energía solar fotovoltaica.	16
1.3.2 Agentes de influencia en la producción de energía.	20
1.3.3 Producción y uso de la energía solar fotovoltaica en El Salvador.	21
1.3.4 Comparación de la producción solar fotovoltaica respecto a otras tecnologías en El Salvador.....	26
1.3.5 La energía solar a futuro en El Salvador.	32
1.4 Operación de un panel solar.....	34
1.4.1 Célula fotovoltaica.	35
1.4.2 Funcionamiento de la célula solar fotovoltaica.	35
1.4.3 Modelo de una célula fotovoltaica.	37
1.4.4 Curva característica V-I de una célula fotovoltaica.....	39
1.4.5 Tipos de célula fotovoltaica.	40
1.4.6 Conexión de células solares.....	44
1.4.7 Características del módulo solar fotovoltaico.	46
1.5 Orientación e inclinación optima de los paneles fotovoltaicos.	50
2. TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, CAPACIDADES Y ELEMENTOS DE INSTALACIÓN.	53
2.1 Operación de la instalación.	53
2.1.1 Sistema fotovoltaico conectado a red.....	53
2.1.2 Sistema fotovoltaico aislado.	54
2.1.3 Sistema fotovoltaico hibrido.....	56
2.2 Capacidad de los paneles solares fotovoltaicos.	56
2.3 Elementos de instalación.....	57

2.3.1 Módulo fotovoltaico.....	57
2.3.3 Regulador de carga.....	58
2.3.2 Estructura de sujeción de módulos.....	59
2.3.4 Baterías.....	61
2.3.5 Inversor.....	64
2.3.6 Elementos de protección.....	65
2.3.7 Otros elementos.....	66
3. PRUEBAS ELÉCTRICAS A PANELES SOLARES.....	69
3.1 Pruebas realizadas directamente a paneles solares.....	69
3.1.1 Voltaje de circuito abierto (V_{oc}).....	69
3.1.2 Corriente de corto circuito (I_{sc}).....	70
3.2 Resultados que se obtienen.....	71
3.2.1 Curva I-V.....	81
3.2.2 Curva P-V.....	85
3.2.3 Voltaje de máxima potencia (V_{mp}).....	86
3.2.4 Corriente de máxima potencia (I_{mp}).....	87
3.2.5 Potencia máxima (P_{mp}).....	87
3.2.6 Factor de forma (FF).....	88
3.2.7 Rendimiento (η).....	88
4. DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA UN BANCO DE PRUEBAS DIDÁCTICAS.....	90
4.1 Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico.....	90
4.2 Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico.....	90
4.3 Panel fotovoltaico.....	91
4.4 Regulador de carga.....	92
4.5 Banco de baterías.....	93
4.6 Inversor.....	94
4.7 Protecciones y cableado.....	94
5. ANÁLISIS DE COSTOS.....	97
5.1 Cotizaciones.....	97
5.1.1 Cotización en taller.....	97
5.1.2 Ferreterías.....	97

5.1.3 Montelec.....	98
5.1.4 Otros elementos	98
5.2 Selección de elementos.....	99
5.2.1 Base	99
5.2.2 Base de panel	100
5.2.3 Modificador de ángulo.	100
5.2.4 Marco para colocación de equipos del sistema FV.	102
5.2.5 Análisis de perno.....	102
5.2.6 Inversor.	107
5.2.7 Regulador de carga.	108
5.2.8 Baterías.	108
5.2.9 Panel FV.....	109
5.3 Costo total del proyecto.	110
5.3.1 Construcción de estructura base para panel solar.	110
5.3.2 Equipo para sistema fotovoltaico.....	111
5.3.3 Elementos de ferretería.	111
5.3.4 Equipos especial para realizar pruebas.....	113
5.3.5 Costo total.	113
Recomendaciones.	114
Conclusiones.	115
Referencias.....	116
Anexos.....	119
Anexo A: Laboratorios a realizar.	119
Anexo B: Cotizaciones.....	146
Anexo C: Guías de mantenimiento a equipos.	150
Anexo D: Hojas de trabajo de banco de prueba.	151

Figuras.

Figura 1. SFV generación en el escenario de emisiones netas cero 2000-2030.	5
Figura 2. Generación SFV en El Salvador 2019.	6
Figura 3. Energía hidráulica.	7
Figura 4. Energía mareomotriz.	7
Figura 5. Parque eólico Ventus, Metapán, El Salvador.....	8
Figura 6. Biomasa/materia orgánica.	9
Figura 7. Parque de paneles FV, por AEE El Salvador, San Juan Opico, El Salvador.....	9
Figura 8. Central de energía solar térmica. Sevilla, España.	10
Figura 9. Esquema de generación de energía eléctrica mediante energía geotérmica.	10
Figura 10. Pozo petrolero.	11
Figura 11. Esquema de una planta nuclear.	12
Figura 12. Estadísticas energéticas 2020-2022. Fuente: Consejo Nacional de Energía.	23
Figura 13. Consumo de electricidad per cápita. Fuente: Banco Mundial (2020e)	27
Figura 14. Capacidad total de energía instalada por fuente, 2019. Fuente: IRENA (2022a).	28
Figura 15. Evolución de la demanda de electricidad (demanda mínima y máxima por año). Fuente: SIGET (2019).	29
Figura 16. Generación bruta de electricidad por tipo de recurso. Fuente: IRENA (2020a).	30
Figura 17. Suministro eléctrico neto por recurso, 2018. Fuente: Unidad de Transacciones (2019).	31
Figura 18. Esquema de generación fotovoltaica.	36
Figura 19. Comparación entre célula fotovoltaica y diodo.	36

Figura 20. Modelo equivalente de una célula fotovoltaica.	37
Figura 21. Circuito equivalente de una célula solar real.	38
Figura 22. Curva v-i característica de la célula solar.	40
Figura 23. Célula de silicio monocristalino.	41
Figura 24. Célula de silicio policristalino.	42
Figura 25. Célula de silicio amorfo.	42
Figura 26. Tecnologías de las células solares de silicio.	43
Figura 27. Vista parcial de una planta FV de 100 kW de tecd en aragón	44
Figura 28. Célula solar flexible de gaas creada por científicos del nrel (laboratorio nacional de energías renovables de estados unidos) en febrero 2019.....	44
Figura 29. Esquema de conexión entre células.	45
Figura 30. Esquema de conexión en serie de células solares para formar el panel solar.	46
Figura 31. Panel solar típico de 36 células solares conectadas en serie.	46
Figura 32. Curvas características V-I y P-V.	49
Figura 33. Datos técnicos de panel solar zytech 160 W. Fuente: curso instalación y mantenimiento de paneles solares – insaforp.....	49
Figura 34. Datos técnicos de panel solar Canadiansolar 325 V. Fuente: curso instalación y mantenimiento de paneles solares – INSAFORP.	50
Figura 35. Inclinación de paneles solares.	51
Figura 36. Sistema fotovoltaico conectado a red (on grid).	54
Figura 37. Sistema fotovoltaico aislado (off grid).	55
Figura 38. Sistema fotovoltaico hibrido.	56
Figura 39. Modulo fotovoltaico trv szyl-p100-18c; 100 W, 17.8 V, 5.62 A, 30mm.	58
Figura 40. Regulador de carga para sistemas fotovoltaicos.	59
Figura 41. Soporte fijo para módulo fotovoltaico.	60
Figura 42. Soporte con seguidor solar para módulo fotovoltaico.	61
Figura 43. Batería plomo-ácido.	62
Figura 44. Batería de gel.	63
Figura 45. Batería agm.	63

Figura 46. Inversor para sistemas fotovoltaicos.....	64
Figura 47. Protecciones para sistemas fotovoltaicos.	65
Figura 48. Interruptor termomagnético.....	65
Figura 49. Fusible de cadena fotovoltaica.	65
Figura 50. Varilla copperweld 5/8".	66
Figura 51. Cepo de cobre para barra de 5/8".....	66
Figura 52. Cable de cobre desnudo #8.....	66
Figura 53. Cable solar dúplex pv1-f de 4 mm ² negro.	66
Figura 54. Terminal pin hueco.	67
Figura 55. Conector mc4 macho y hembra.....	67
Figura 56. Vista de armado para conectores mc4.	67
Figura 57. Caja plexo con conos.....	68
Figura 58. Esquema representativo para medir Voc con multímetro.	70
Figura 59. Esquema representativo para medir Isc con tenaza amperimétrica.	70
Figura 60. Imagen satelital de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.....	72
Figura 61. Ficha técnica de panel monocristalino Montelec RDM-185M	73
Figura 62. Analizador Amprobe solar-600.	74
Figura 63. Piranómetro de mano Frederiksen 4890.2.....	76
Figura 64. Cámara de imagen térmica Flir E4.	77
Figura 65. Analizador solar conectado a panel solar de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador.	82
Figura 66. Fotografía de parámetros utilizados.....	82
Figura 67. Fotografía de piranómetro.	83
Figura 68. Imagen de referencia de primeras pruebas realizadas.....	83
Figura 69. Imagen de referencia utilizando la cámara de imagen térmica.....	84
Figura 70. Curvas y datos finales obtenidos del analizador solar amprobe.	84
Figura 71. Curva I-V obtenida de Amprobe solar-600.....	85
Figura 72. Curva P-V mostrada en amarillo.....	86
Figura 73. Voltaje máximo obtenido de Amprobe solar-600.	86
Figura 74. Corriente máxima obtenido de Amprobe solar-600.....	87

Figura 75. Potencia máxima obtenido de Amprobe solar-600.	87
Figura 76. Diagrama unifilar.....	90
Figura 77. Ficha técnica de panel.....	92
Figura 78. Base.....	99
Figura 79. Base para panel.....	100
Figura 80. Modificador de ángulo de incidencia para el panel.	101
Figura 81. Vista lateral de modificador de ángulo.	101
Figura 82. Vista preliminar del banco.....	102
Figura 83. Dcl representativa de fuerza para el perno.	103
Figura 84. Dcl con valor de fuerzas que actúan sobre el perno.	104
Figura 85. Dcl de fuerza resultante que actúa sobre el perno.	105
Figura 86. Propiedades mecánicas de pernos, obtenido de diseño en ingeniería mecánica de shigley, 8va edición.	106
Figura 87. Inversor de onda pura montelec, 500 W a 12 V.....	107
Figura 88. Controlador de carga análogoMPPT 12-24 V / 60 A.....	108
Figura 89. Batería de 12 V con 100 Ah.....	109
Figura 90. Panel de 185 W monocristalino.	110

Introducción.

El presente trabajo muestra una oportunidad a la innovación de la enseñanza en la UES, específicamente en la Escuela de Ingeniería Mecánica. Además de que este proyecto es de estudiantes para estudiantes, no se limita a que personas ajenas a la UES no puedan elegir este minicurso introductorio a la tecnología solar fotovoltaica. En los siguientes capítulos se describe el panorama general de las energías renovables para después aterrizar en lo que más interesa en este trabajo: la energía solar. Se desglosa de manera informativa el funcionamiento de un sistema fotovoltaico a una escala mayor como lo es la generación y después lo traemos a una escala más manejable como lo es un banco didáctico de pruebas de paneles. También contamos con la descripción de las pruebas eléctricas que se les hacen a los módulos FV para revisar su integridad y corroborar que funcionan correctamente. Se realizaron laboratorios que comprenden desde la limpieza e inspección visual hasta las pruebas directas que se la hacen a los módulos para que los estudiantes tengan la experiencia de la práctica. Finalizando con este trabajo se presentó una propuesta de un banco didáctico, donde culmina todo el esfuerzo realizado para presentarlo al departamento de Energías Renovables de la Escuela de Ingeniería Mecánica y que este haga el uso correspondiente en la asignatura respectiva y que la UES invite a la población en general a informarse de esta relativamente nueva energía.

Objetivos

General

- Proponer el diseño de un banco didáctico de paneles solares fotovoltaicos para prácticas y pruebas formativas o educativas.

Específicos

- Proponer a la escuela de Ingeniería Mecánica un laboratorio en donde sus estudiantes, así como personas ajenas pertenecientes a otras universidades o instituciones puedan realizar prácticas respecto a la energía solar fotovoltaica.
- Diseñar guías de estudio y práctica, que ayuden al estudiante a una mejor comprensión del funcionamiento de los sistemas de energía solar fotovoltaica.
- Planificar la propuesta del proceso de construcción o selección de los componentes del banco de pruebas.
- Elaboración de manuales de usuario para una buena manipulación de los equipos seleccionados en el diseño propuesto del banco de pruebas.
- Elaboración de guías respecto al uso de los equipos de protección personal adecuados a las prácticas en el banco de pruebas propuesto.
- Elaborar los manuales de mantenimiento correspondientes para los equipos y el sistema en general.
- Motivar la búsqueda de financiamiento para la inversión en este tipo de proyectos sobre energías renovables, para el enriquecimiento del conocimiento técnico de los estudiantes.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes generales de la energía solar fotovoltaica.

El efecto fotovoltaico fue descubierto por el francés Alexandre Edmond Becquerel en 1838 cuando tenía sólo 19 años. Becquerel estaba experimentando con una pila electrolítica con electrodos de platino cuando comprobó que la corriente subía en uno de los electrodos cuando este se exponía al sol. El siguiente paso se dio en 1873 cuando el ingeniero eléctrico inglés Willoughby Smith descubre el efecto fotovoltaico en sólidos. En este caso sobre el Selenio.

La posibilidad de una aplicación práctica del fenómeno no llegó hasta 1953 cuando Gerald Pearson de Bell Laboratories, mientras experimentaba con las aplicaciones en la electrónica del silicio, fabricó casi accidentalmente una célula fotovoltaica basada en este material que resultaba mucho más eficiente que cualquiera hecha de selenio. A partir de este descubrimiento, otros dos científicos también de Bell, Daryl Chaplin y Calvin Fuller perfeccionaron este invento y produjeron células solares de silicio capaces de proporcionar suficiente energía eléctrica como para que pudiesen obtener aplicaciones prácticas de ellas. De esta manera empezaba la carrera de las placas fotovoltaicas como proveedoras de energía.

En la década de los 90 y en los primeros años del siglo XXI las células fotovoltaicas han experimentado un continuo descenso en su coste junto con una ligera mejora de su eficiencia. Estos factores unidos al apoyo por parte de

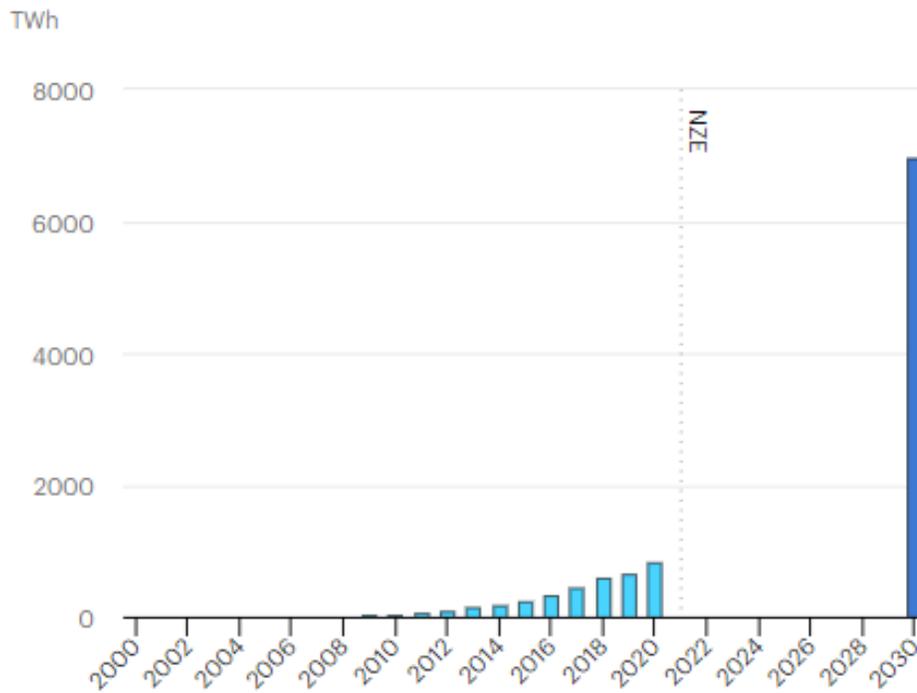
algunos gobiernos hacia esta tecnología han provocado un espectacular impulso de la electricidad solar en los últimos años.

Las instalaciones de equipo fotovoltaico han contado con muchas subvenciones en diversos países y administraciones que financiaban una parte importante de los costos facilitando su adquisición. Junto con las instalaciones de pequeño y mediano tamaño se han construido o se están construyendo grandes centrales fotovoltaicas.

En los últimos años, con la aparición de la tecnología de los paneles flexibles a precios asequibles, han proliferado también los gadgets solares destinados a recargar las baterías de numerosos artículos portátiles (teléfonos portátiles, cámaras de fotos, reproductores portátiles de música etc...), así como kits solares para electrificar caravanas o barcos.

La energía solar fotovoltaica se está convirtiendo en la opción de menor costo para la generación de electricidad en la mayor parte del mundo, lo que se espera que impulse la inversión en los próximos años. Sin embargo, el Escenario de Emisiones Netas Cero para 2050 muestra un crecimiento anual promedio de la generación del 24 % entre 2020 y 2030, lo que corresponde a 630 GW de capacidad neta adicional en 2030. Este aumento de casi cinco veces en el despliegue anual hasta 2030 requerirá una política mucho más ambiciosa y más esfuerzos de las partes interesadas públicas y privadas, especialmente en las áreas de integración de la red y la mitigación de los desafíos de política,

regulación y financiación, particularmente en los países emergentes y en desarrollo. Por lo tanto, se necesitan más esfuerzos para la energía solar fotovoltaica, lo que refleja la mayor ambición del Escenario Net Zero.



IEA. All Rights Reserved

Figura 1. SFV generación en el escenario de emisiones netas cero 2000-2030.

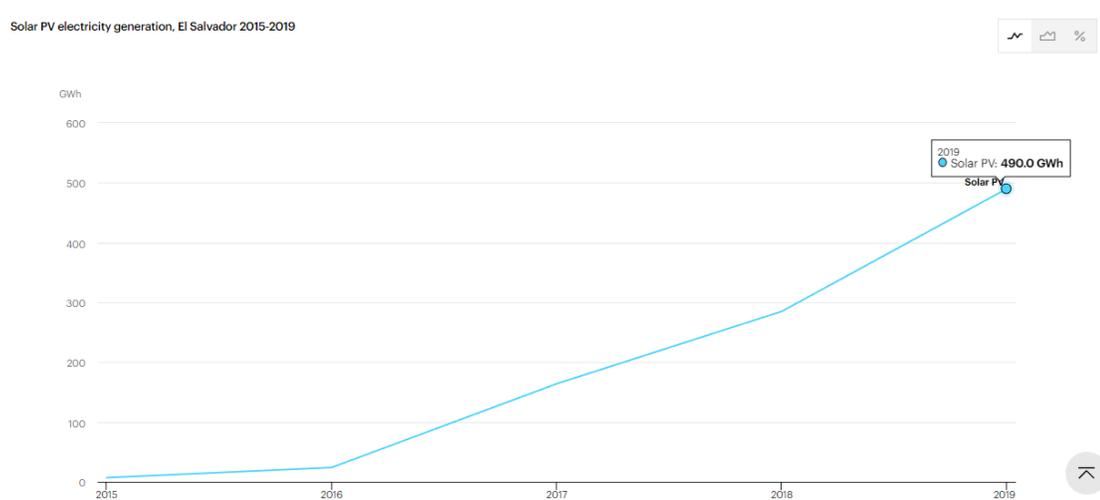


Figura 2. Generación SFV en El Salvador 2019.

1.2 Energías no renovables y renovables.

1.2.1 Energías renovables.

Comprende aquellas energías cuya renovación es mayor al tiempo de uso. No obstante, si el ritmo de uso también puede sobrepasarse tal como es el caso de la sobre utilización de biomasa (sobre uso de leña) para generar calefacción.

- Energía hidráulica: en el caso del agua que por efecto de la energía potencial gravitatoria desciende de las montañas formando cursos de agua como ríos. El movimiento del agua río abajo genera energía cinética. Esta energía potencial se transforma en energía hidroeléctrica al pasar por turbinas de generación eléctrica.

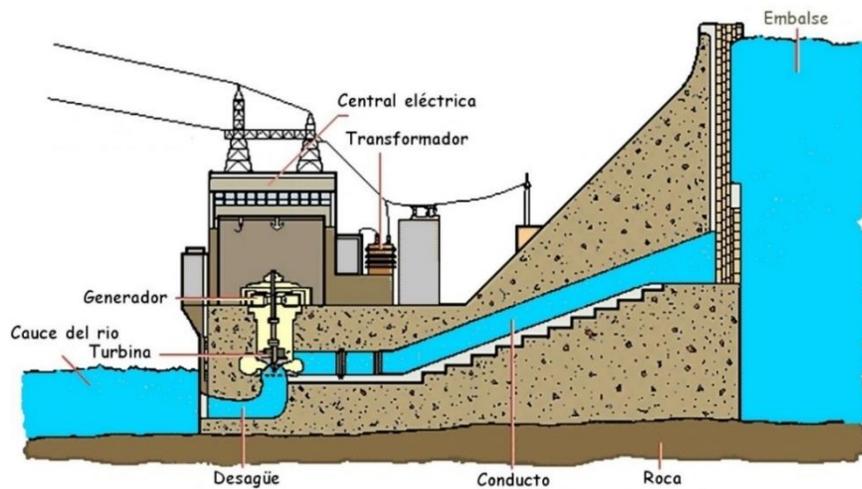


Figura 3. Energía hidráulica.

- Energía marina o de movimiento de aguas oceánicas: El movimiento de las aguas marinas en océanos y mares son un almacén interminable de energía cinética, y que, utilizando la tecnología apropiada, es posible transformarla en energía eléctrica. La energía marina puede ser: mareomotriz (energía de la diferencia de mareas), undimotriz (energía del movimiento de las olas) y conversión térmica (OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion).

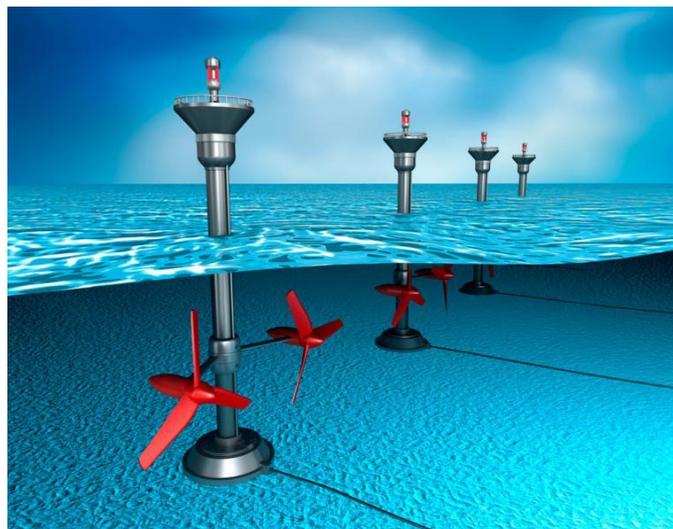


Figura 4. Energía mareomotriz.

- **Energía Eólica:** se refiere a la energía contenida en las grandes masas de aire que se desplazan por la superficie del planeta producto de la acción del Sol. Es así, que la energía cinética de las masas de aire se convierte en energía mecánica para luego transformarse en energía eléctrica en una turbina eólica.



Figura 5. Parque eólico Ventus, Metapán, El Salvador.

- **Biomasa/materia orgánica:** es la energía del Sol almacenada en la materia orgánica. Como es sabido, las plantas y algunos microorganismos tienen la capacidad de guardar esta energía en forma química mediante el proceso de la fotosíntesis. El proceso básicamente utiliza luz solar, agua y el CO₂ troposférico, para formar moléculas orgánicas compuestas de en carbono, hidrógeno y oxígeno.

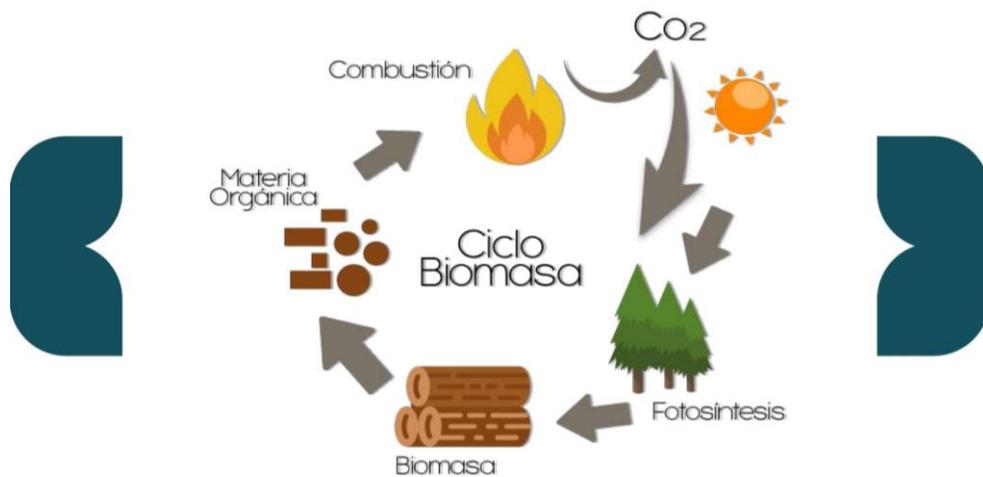


Figura 6. Biomasa/materia orgánica.

- Energía solar: es la energía proveniente de la radiación electromagnética del Sol. En este caso, a diferencia del caso anterior, se usa directamente mediante las tecnologías desarrolladas para este fin. Esta energía, en forma de calor y luz, puede aprovecharse por medio de células fotoeléctricas, heliostatos o colectores solares, que la convierten en energía eléctrica o térmica.



Figura 7. Parque de paneles FV, por AES El Salvador, San Juan Opico, El Salvador.



Figura 8. Central de energía solar térmica. Sevilla, España.

- Energía geotérmica: esta energía aprovecha las altas temperatura que emergen desde las capas interiores del planeta. Esta energía se manifiesta normalmente como géiseres, fumarolas, pozos de lodo hirviendo, volcanes y fuentes termales. Este calor es utilizado tanto para la generación de electricidad o bien como energía térmica

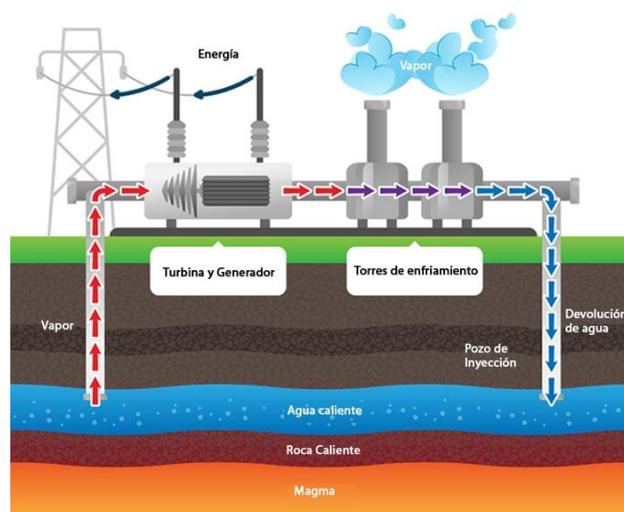


Figura 9. Esquema de generación de energía eléctrica mediante energía geotérmica.

1.2.2 Energías no renovables.

Son aquellas fuentes energía de uso limitado, que una vez consumido se agota el abastecimiento. En general, el ritmo de uso es mayor a su regeneración. Entre las fuentes de energía no renovables están:

- Combustibles fósiles: es biomasa de tiempos milenarios sometida a procesos de transformación por presión y temperatura. Son combustibles fósiles el carbón, el petróleo y el gas natural y licuado del petróleo.



Figura 10. Pozo petrolero.

- Energía nuclear o atómica o energía proveniente del átomo: esta energía proviene del proceso de fisión nuclear del núcleo de uranio. Al momento de la división del núcleo se libera una gran cantidad de energía en forma de radiación y calor utilizada para generar electricidad o energía termonuclear.

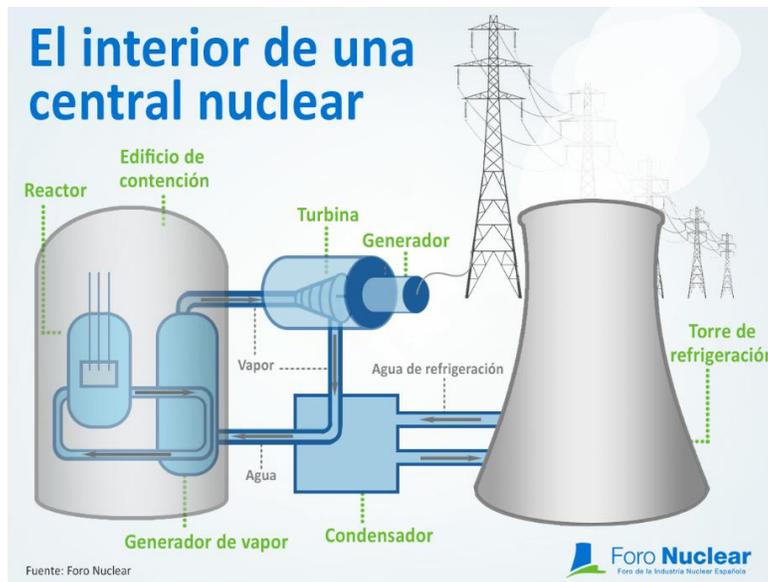


Figura 11. Esquema de una planta nuclear.

1.3 Proyecciones de la energía solar fotovoltaica.

Se espera que en el año 2030 el 34% de la electricidad mundial provenga de energías renovables, como la eólica y solar, y que en el año 2040 este porcentaje llegue al 50%. El futuro de la energía solar fotovoltaica es por lo tanto prometedor y representa una alternativa sostenible, limpia y sin apenas mantenimiento y que ofrece muchos beneficios, siendo los más importantes la no emisión de gases nocivos a la atmósfera y el ahorro.

La luz solar es un recurso que todos los países del mundo disponen en mayor o menor medida. Por este motivo, si fuésemos capaces de utilizar la energía solar de manera más eficiente, la economía de todos los países cambiaría de forma radical, dejando de depender de grandes empresas, así como de terceros países. Es esencial potenciar una mayor independencia energética en los países, lo que

redunda en una mayor estabilidad. Los avances en materia de energía solar son constantes, y lo que era impensable hace pocos años ya es realidad. La investigación en nuevos materiales está permitiendo fabricar células fotovoltaicas más económicas y que en un futuro no muy lejano, podrán integrarse en construcciones, vehículos o incluso en la ropa.

El uso de la energía solar en el futuro no solo es importante por los valores sociales y medioambientales que aporta, sino que, si se instalasen paneles fotovoltaicos en una vivienda o se generase por barrios de una ciudad, sería un modelo más eficiente que supondría un importante ahorro para los usuarios.

Modelo de generación distribuido.

Un modelo de futuro que ya se está comenzando a implementar en algunas ciudades es la generación distribuida o descentralizada. Consiste en la generación de energía eléctrica mediante muchas pequeñas fuentes de generación que se instalan cerca de los puntos de consumo (micro generación). La generación distribuida está basada en la cooperación entre esta micro generación y la generación de las centrales convencionales. La micro generación implica el uso de las energías renovables, lo que contribuye a reducir las emisiones de CO₂. De esta forma no se depende tanto de las grandes centrales.

En el caso de la energía solar fotovoltaica un tipo de micro generación son las placas solares fotovoltaicas. Al instalar placas solares en un edificio conseguimos

que éste sea autosuficiente y, también, que aporte parte de la electricidad a la red eléctrica de la ciudad.

Beneficios de un modelo de generación distribuido.

La apuesta de futuro por la generación distribuida se justifica por los diversos beneficios que ofrece, tanto para la red eléctrica como para la economía y el medioambiente:

- Beneficios en la red eléctrica. Este tipo de modelo provoca una reducción de pérdidas en la red, ya que al generar la electricidad cerca de los puntos de consumo se consigue que haya que transportar menos desde las grandes centrales, lo que hace que las líneas de transporte y distribución estén menos cargadas y se reduzcan sus pérdidas eléctricas, que para un consumidor doméstico se estiman en un 15-20%.
- Beneficios económicos. La generación distribuida tiene la capacidad de reducir el precio del mercado mayorista de electricidad, ya que se comporta como una disminución de la demanda total de energía, aunque es un ahorro muy difícil de cuantificar. También se le atribuyen otros beneficios económicos, como el aumento de la actividad económica y la generación de empleo.
- Beneficios medioambientales. Son todos los que se dan a consecuencia de utilizar energías renovables, siendo los más importantes la reducción de emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes, la lucha contra el cambio climático y el aumento de la seguridad de suministro al depender menos de otras energías importadas del exterior.

Todos estos diversos beneficios han conseguido que la generación distribuida sea uno de los pilares sobre los que apoya la transición energética en muchos países, los cuales están promoviendo mediante políticas públicas este tipo de instalaciones.

Evolución futura de los materiales fotovoltaicos.

Cada vez se avanza más en la investigación y desarrollo de nuevos materiales para fabricar paneles solares. Se pretende que, en un futuro no muy lejano, la placa encargada de convertir la energía solar pueda llegar a ser tan fina como un papel, y de esta forma que sus costes sean cada vez menores.

Nuestro país es un lugar privilegiado en lo que a horas anuales de luz solar respecta y el futuro de la energía solar fotovoltaica debe centrarse en conocer en profundidad como aprovechar esta energía de forma eficiente. La meta debería ser abastecer el total de los hogares con energía solar mediante el autoconsumo fotovoltaico en viviendas, desplazarnos gracias a la energía solar en los transportes y fabricar baterías de móviles o portátiles que se puedan cargar de forma rápida y sencilla con energía solar.

Algunos otros avances sobre los que se está investigando son, por ejemplo, los coches eléctricos totalmente autónomos con ventanas fotovoltaicas y paneles

solares en el techo, la pintura fotovoltaica que sea capaz de generar electricidad, los vidrios fotovoltaicos para los edificios, las tejas fotovoltaicas, etc.

1.3.1 Sostenibilidad de la energía solar fotovoltaica.

La energía solar fotovoltaica está llamada a ser una de las principales fuentes renovables en un futuro cercano. Sin embargo, es muy importante mejorar su sostenibilidad y reducir al mínimo el impacto ambiental que produce.

Actualmente, ese impacto de la energía solar es abrumadoramente positivo, pero es importante minimizar las alteraciones del entorno y la contaminación a lo largo del ciclo de vida. Para ello, siempre se deberían realizar informes previos de sostenibilidad, que informen de ese impacto y desarrollen acciones para minimizarlo.

El impacto ecológico de la energía solar y las posibilidades para impulsar la sostenibilidad del sector fotovoltaico, que crecerá mucho en los próximos años. Aunque la energía solar fotovoltaica sea limpia durante y tenga cero emisiones, hemos de considerar todo su ciclo vital.

Esto significa contemplar desde la fabricación, hasta la instalación en el terreno y posterior reciclaje, cuando paneles y sistemas alcanzan el fin de su vida útil. Así, el impacto de la energía solar en el medio ambiente se produce por:

- El uso de la tierra.

Dependiendo de la ubicación, grandes extensiones de paneles solares fotovoltaicos pueden provocar una posible degradación del terreno o pérdida de hábitat para la flora y fauna local.

El área total que se requiere depende de la topografía del sitio, la intensidad del sol y la tecnología de los paneles solares utilizados.

Para paliar este posible impacto, las siguientes medidas aumentan la sostenibilidad del uso de la tierra según los datos:

- Ubicar los paneles en terrenos de baja calidad y diversidad biológica. Estamos hablando de minas abandonadas, corredores de transporte ya construidos o parajes desiertos sin apenas flora y fauna.
- Innovación constante de los materiales y tecnología. Los paneles son cada vez más eficientes, lo que permite obtener la misma energía, o más, ocupando menos terreno.
- Soluciones ingeniosas de ubicación. Como, por ejemplo, las iniciativas para construir medianas y delimitaciones en carreteras que integran paneles solares.

- El uso del agua.

Como todo sistema que genera energía, la solar fotovoltaica precisa de refrigeración y limpieza. Para ello, hace uso del agua, un recurso escaso. Este desafío puede tener un impacto ambiental mayor, porque las zonas con mucho sol también suelen ser bastante secas. Lo mismo ocurre con el uso de agua durante su fabricación.

Aunque según los estudios el impacto es mucho menor y más positivo que el de otro tipo de energía, es importante racionalizar el uso de agua.

- Analizando con cuidado el impacto en los recursos hídricos del terreno durante el estudio previo.
- Innovando en materiales y sistemas. Que requieran de menor limpieza de paneles usando agua.
- Haciendo un consumo responsable del agua en todos los procesos y reutilizando toda la que se pueda.

- Materiales peligrosos y contaminantes.

En la fabricación de paneles solares e instalaciones fotovoltaicas se usan materiales que pueden resultar tóxicos. Por ejemplo: Ácido clorhídrico, sulfúrico, nítrico, fluoruro de hidrógeno, etc.

De hecho, algunos paneles modernos tienden a usar en ocasiones ciertos materiales más tóxicos que los paneles antiguos. Sin duda, este es el desafío ambiental más importante de la energía solar.

Muchos problemas de impacto ambiental se van minimizando con la innovación tecnológica, como hemos visto. En este caso, la principal actuación para la sostenibilidad sería enfocar la investigación en materiales menos tóxicos, pero no siempre es posible.

Por eso, la principal actuación ahora mismo sería:

- Aumentar el reciclaje y disposición adecuada de estos materiales. Actualmente, la energía solar se encuentra en una posición compleja respecto al reciclaje. Al ser tan nueva, a veces es económicamente inviable reciclar. Esto se solucionará con el tiempo, pero sin duda es el mayor reto de sostenibilidad.

- Uso y agotamiento de recursos materiales.
Para fabricar paneles solares son necesarias grandes cantidades de materiales. Aunque la mayor parte suelen ser muy abundantes (hierro, aluminio, etc.), hay que tener en cuenta el posible impacto.
Además, hay que planificar un uso racional, dado el enorme crecimiento que se espera en la energía solar.

Por suerte, además de comunes, muchos de esos materiales usados masivamente son reutilizables, por eso, la principal actuación sería:
 - Establecer políticas claras de reciclaje, aprovechando que estos materiales lo son, en vez de emplear siempre nueva materia prima, por abundante que sea.

- Emisiones a la atmósfera y uso de energía durante la fabricación de paneles solares e instalaciones.
Este desafío siempre ha estado muy presente. Las emisiones que se producen con la energía solar se dan durante la fabricación y el transporte, porque luego son cero.

La gran esperanza en estos dos aspectos es que, cuando las renovables sean el principal origen de la energía, el problema se minimizará por sí solo, tanto en emisiones como en uso de energía, si se usan renovables tanto en la fabricación como en el transporte.

Sin embargo:

- Es necesario invertir en energía renovable que suministre al proceso de fabricación.
- Usar las nuevas tecnologías que ya están reduciendo enormemente la emisión de gases de efecto invernadero durante dicha fabricación.
- Hacer un consumo responsable de la energía, sin importar su origen.

La energía solar está llamada a ser la principal fuente renovable en el futuro. La tecnología está avanzando mucho más que en otras energías, y eso reduce el impacto ambiental en muchos sentidos.

Sin embargo, es importante tener siempre en cuenta la sostenibilidad, siguiendo con los estudios ambientales y aplicando los mejores procesos posibles.

1.3.2 Agentes de influencia en la producción de energía.

Debemos considerar agentes críticos que repercuten en la producción de energía eléctrica a través de la energía solar fotovoltaica, los cuales nos muestran un panorama del posible éxito al implementar proyectos de esta naturaleza y de no considerarse podrán volverse una problemática, respecto a la viabilidad económica, conflictos medios ambientales, dependiendo del país y su legislación, se enlistan los principales.

Costos de producción: el coste inicial puede ser elevado, aunque hoy en día existen ayudas y subvenciones para la instalación de paneles solares, y la inversión se amortiza en unos años.

Espacio utilizado: requiere de instalaciones importantes para producir grandes cantidades de energía que puedan cubrir las necesidades energéticas.

Continuidad en la producción: no es una energía constante. Fluctúa durante el día, mientras que por la noche no está disponible. Esto se evita mediante el almacenamiento de energía.

Factores ambientales: las condiciones atmosféricas como el excesivo calor, la humedad, o periodos con nubes y niebla, pueden afectar negativamente a su rendimiento.

1.3.3 Producción y uso de la energía solar fotovoltaica en El Salvador.

En el balance estadístico de diciembre de 2019, la Comisión Nacional de la Energía de El Salvador indica que la solar FV alcanzó un total de un 9,2% en el total de la generación eléctrica acumulado hasta mediados de diciembre de 2020.

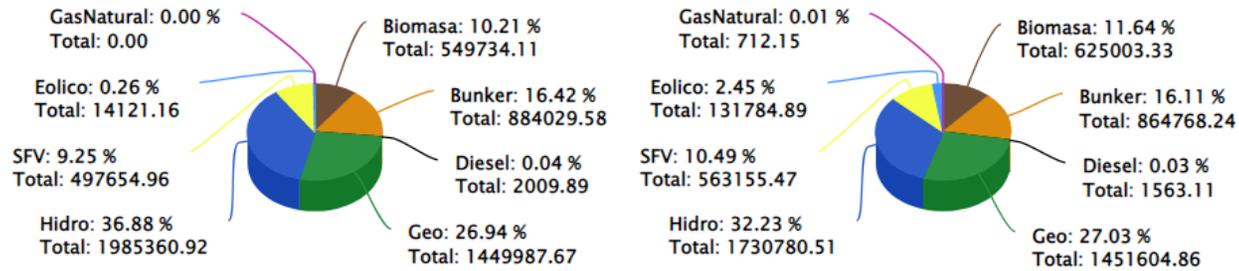
La energía solar se ubica en cuanto a volumen por delante del Bunker, el eólico y muy cerca de la biomasa. No obstante, en una comparativa este récord logra un mayor contraste y esto se refleja en la figura 12.

La Solar fotovoltaica (SFV) habría pasado de un 2,7% en 2018 al 4,2% en 2019 al 9,2% en 2020. Esto supone que la fotovoltaica habría crecido más del 120% respecto a diciembre de 2019. El año pasado se produjeron varias inauguraciones en el país como la planta de 140MW más acumulación de NEOEN o la planta solar Opico Power de AES. Según fuentes de IRENA, el país contaba en 2019 con 273 MWp instalados, las últimas instalaciones habrían añadido alrededor de 200 MWp nuevos, a la espera de cifras definitivas. al menos 200 MWp de nuevos sistemas fotovoltaicos.

El 2020 fue un año de extremos y palabras superlativas. Lo que muchos no se esperaban es que curiosamente la actual situación vírica haya favorecido la superación de múltiples récords de generación renovable y solar. Y en concreto El Salvador es uno de los ejemplos más notables de esta situación.

Inyección 2020 por Recurso MWh ≡

Inyección 2021 por Recurso MWh ≡



Inyección 2022 por Recurso MWh ≡

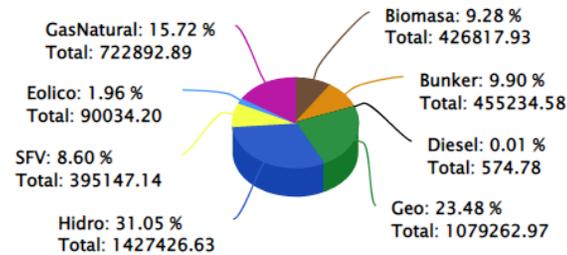


Figura 12. Estadísticas energéticas 2020-2022. Fuente: Consejo Nacional de Energía.

El Salvador pasa en pocos años de contar con una presencia testimonial de la solar fotovoltaica en su mix de generación a superar el 9,2% del total. En el 2021 hicieron un estimado que se supere dicha cifra ampliamente por la entrada de nuevos proyectos.

De cara al 2021 se espera que esta cifra del 9,2% se supere ampliamente pues buena parte de los nuevos proyectos se inauguraron a mitad del año y no generaron todo el periodo. Asimismo, se aguarda la conclusión de nuevos proyectos como los 8 MWp de Bid Invest o la planta de 6,4MWp que pretende conectar a la red la empresa MPC Capital.

En definitiva, El Salvador, pese a contar apenas con una superficie igual al de la provincia de Badajoz en España y una orografía montañosa plagada de volcanes, se está consagrando como uno de los destinos más atractivos en Centroamérica para la inversión en plantas fotovoltaicas. Las aplicaciones pueden ser todas las que tengan que ver con energía o electricidad en su caso.

Algunas pueden ser las siguientes, aunque cada día este campo se va incrementando:

Sistemas de aprovechamiento térmico: El calor recogido en los colectores puede destinarse a satisfacer numerosas necesidades. Por ejemplo, se puede obtener agua caliente para consumo doméstico o industrial, o bien para dar calefacción a

nuestros hogares, hoteles, colegios, fábricas, etc. Incluso podemos climatizar las piscinas y permitir el baño durante gran parte del año.

Sistemas con paneles solares: Una aplicación solar es la refrigeración durante las épocas cálidas. En efecto, para obtener frío hace falta disponer de una «fuente cálida», la cual puede perfectamente tener su origen en unos paneles solares instalados en el tejado o azotea. En los países árabes ya funcionan acondicionadores de aire que utilizan eficazmente la energía solar.

Las aplicaciones agrícolas son muy amplias. Con invernaderos solares pueden obtenerse mayores y más tempranas cosechas; los secaderos agrícolas consumen mucha menos energía si se combinan con un sistema solar, y, por citar otro ejemplo, pueden funcionar plantas de purificación o desalinización de aguas sin consumir ningún tipo de combustible. Los paneles solares, ya producían electricidad en los primeros satélites espaciales. Actualmente se perfilan como la solución definitiva al problema de la electrificación rural, con clara ventaja sobre otras alternativas, pues, al carecer los paneles de partes móviles, resultan totalmente inalterables al paso del tiempo, no contaminan ni producen ningún ruido en absoluto, no consumen combustible y no necesitan mantenimiento.

Además, y aunque con menos rendimiento, funcionan también en días nublados, puesto que captan la luz que se filtra a través de las nubes. La electricidad que así se obtiene puede usarse de manera directa (por ejemplo, para sacar agua de

un pozo o para regar, mediante un motor eléctrico), o bien ser almacenada en acumuladores para usarse en las horas nocturnas. También es posible inyectar la electricidad generada en la red general, obteniendo un importante beneficio.

La energía solar puede ser perfectamente complementada con otras energías convencionales, para evitar la necesidad de grandes y costosos sistemas de acumulación. Así, una casa con ambos sistemas puede disponer de agua caliente y calefacción solares, con el apoyo de un sistema convencional a gas o eléctrico que únicamente funcionaría en los periodos sin sol. El costo de la «factura de la luz» sería sólo una fracción del que alcanzaría sin la existencia de la instalación solar

1.3.4 Comparación de la producción solar fotovoltaica respecto a otras tecnologías en El Salvador.

Considerando que en el 2018 se logró una tasa de acceso a la electricidad del 97 %, El Salvador está cerca del acceso universal en todo el país (ONU CEPAL, 2020). La población restante sin acceso a la electricidad se encuentra en zonas rurales muy dispersas.

De 2000 a 2014, el consumo de electricidad per cápita aumentó de aproximadamente 615 a 937 kilovatios hora (kWh), siguiendo la misma tendencia que el PIB per cápita (Figura 13).

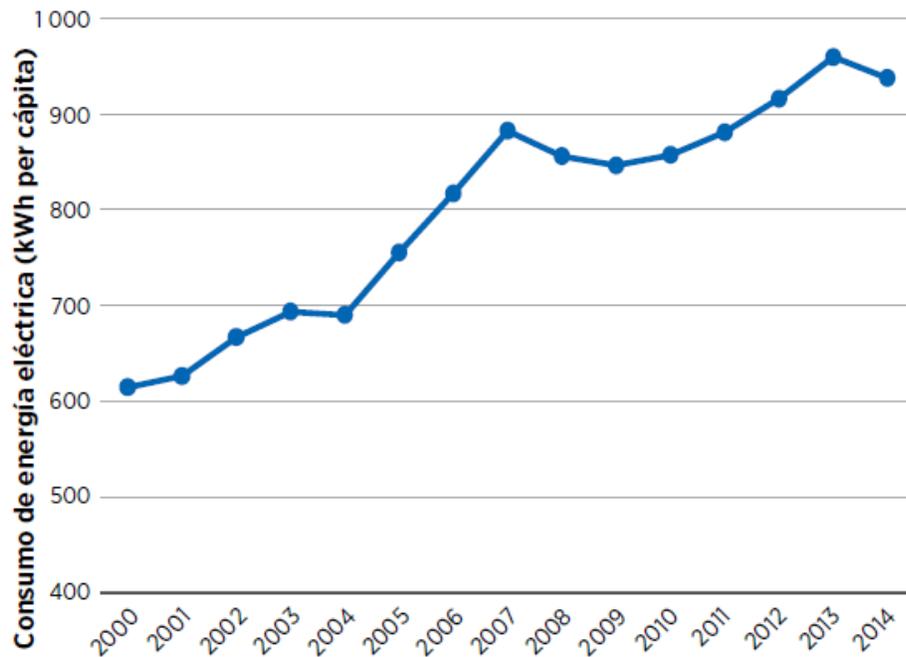


Figura 13. Consumo de electricidad per cápita. Fuente: Banco Mundial (2020e)

Como se muestra en la Figura 14, en 2019, la capacidad instalada total en El Salvador alcanzó 2,2 gigavatios (GW) (incluida la generación no conectada a la red). En los últimos cinco años, la tasa de crecimiento anual promedio de la capacidad instalada total ha sido de alrededor del 6 %. Sin embargo, desde 2013 no ha habido nuevas adiciones de capacidad térmica convencional (que en El Salvador ha correspondido tradicionalmente a combustóleo o combustible de caldera). Sin embargo, este tipo de generación de energía sigue teniendo la mayor participación entre todas las fuentes de energía.

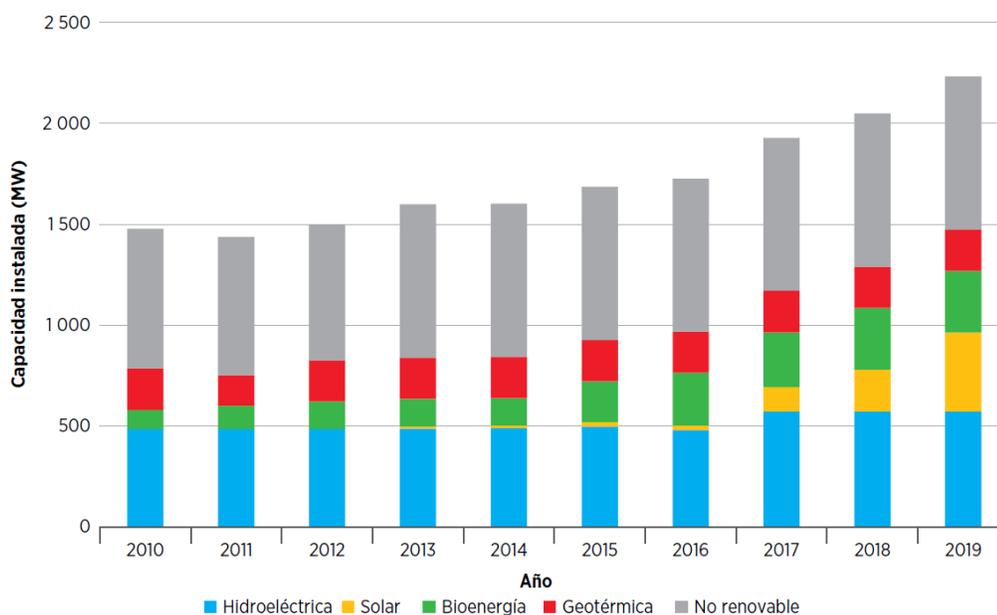


Figura 14. Capacidad total de energía instalada por fuente, 2019. Fuente: IRENA (2022a).

En 2019, la capacidad térmica convencional se situó en el 35,7 %, seguida de la energía hidroeléctrica (26,9 %), la energía de biomasa (14,9 %), la energía solar fotovoltaica (FV) (12,9 %) y la energía geotérmica (9,6 %). Desde 2015, la capacidad de energía solar fotovoltaica se ha multiplicado casi por diez veces, alcanzando los 273 MW en 2019 (incluida la generación no conectada a la red). Además, se espera que la capacidad de energía solar fotovoltaica y eólica aumente en los próximos años, ya que hay múltiples proyectos en trámite.

A partir de 2018, el sistema eléctrico de El Salvador constaba de 25 centrales eléctricas ubicadas en todo el país. Estas están interconectadas con el sistema de transmisión eléctrica y operan en el mercado mayorista. Esta flota generadora está compuesta por cuatro centrales hidroeléctricas operadas por CEL (552,7 MW); dos centrales geotérmicas operadas por LaGeo (204,4 MW), diez centrales térmicas (757,1 MW), siendo una de propiedad estatal y operada por Inversiones Energéticas (INE); cinco centrales de biomasa (293,6 MW)¹ y una planta solar

fotovoltaica (60 MW). En total, el 45,9 % de la capacidad total de generación de energía en El Salvador es de propiedad estatal.

La Figura 15 muestra la evolución de la demanda final de electricidad de 1997 a 2018. Para cubrir la tasa de crecimiento anual promedio de la demanda, que se sitúa entre el 2 y el 3 %, se ha incrementado la capacidad de energía instalada. La diferencia entre la capacidad instalada que se muestra en la Figura 14 y la demanda pico en la Figura 15 se determina por la capacidad instalada nominal y la confiabilidad de generación. Las centrales térmicas se utilizan en la actualidad como respaldo para la generación de energía renovable variable (ERV). Sin embargo, la producción de electricidad térmica en El Salvador es a veces más costosa que importar electricidad dentro del mercado regional.

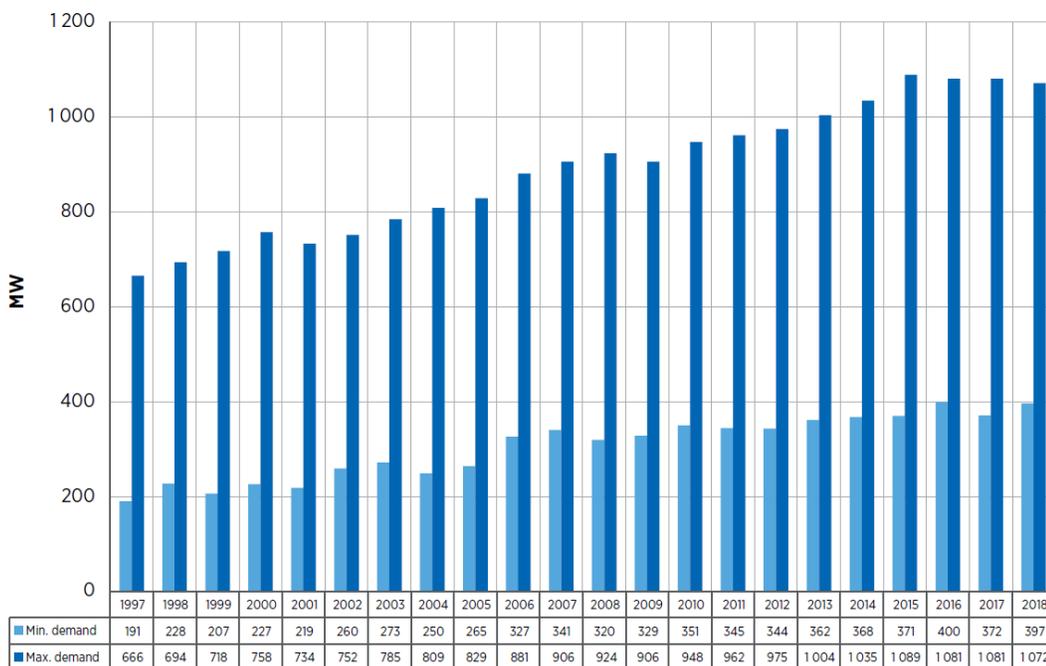


Figura 15. Evolución de la demanda de electricidad (demanda mínima y máxima por año).
Fuente: SIGET (2019).

La evolución de la generación de electricidad en El Salvador entre 2000 y 2018 se muestra en la Figura 16. Desde la década de 1990, el sector eléctrico salvadoreño ha dependido principalmente de la generación de energía térmica, seguido de la energía hidroeléctrica y geotérmica. La generación de energía geotérmica alcanzó más de 1 500 gigavatios hora (GWh) en 2008 y se ha estancado desde entonces. La generación de energía solar fotovoltaica alcanzó los 309 GWh en 2018, mientras que la generación de bioenergía superó los 700 GWh. Ese mismo año, la participación de generación de energía no renovable alcanzó uno de sus valores más bajos de la última década, 1 200 GWh (IRENA, 2020a).

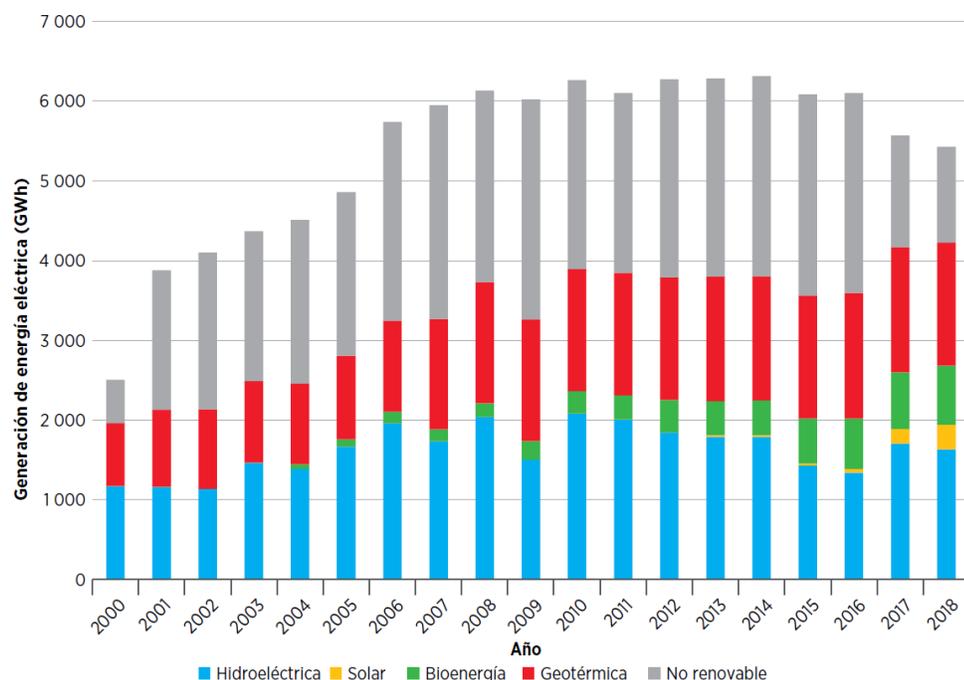


Figura 16. Generación bruta de electricidad por tipo de recurso. Fuente: IRENA (2020a).

En los últimos años, ha habido una disminución en la generación de electricidad nacional, principalmente debido a las crecientes importaciones de electricidad, cuya mayoría proviene de Guatemala. La Figura 16 refleja una clara reducción

en la generación nacional desde 2014, con una generación neta total de electricidad de 5 426 GWh en 2018.

La Figura 17 muestra el suministro eléctrico neto (incluidas las importaciones) por recurso de generación en 2019, lo que representa un total de 6 639,2 GWh. Los combustibles fósiles tuvieron la mayor participación, con un 32,5 %, seguidos de las importaciones netas, con un 21,8 %, la energía hidroeléctrica con un 21,7 %, la energía geotérmica con un 20,7 % y otras fuentes de energía renovable (biomasa, solar fotovoltaica, etc.) con un 3,3 %.

Existe un alto grado de interacción entre el Mercado Eléctrico Regional (MER) y el mercado eléctrico nacional, como lo demuestra la considerable participación de las importaciones netas. Además, con un 20,7 %, la participación de la energía geotérmica en el suministro eléctrico neto es una de las más altas del mundo.

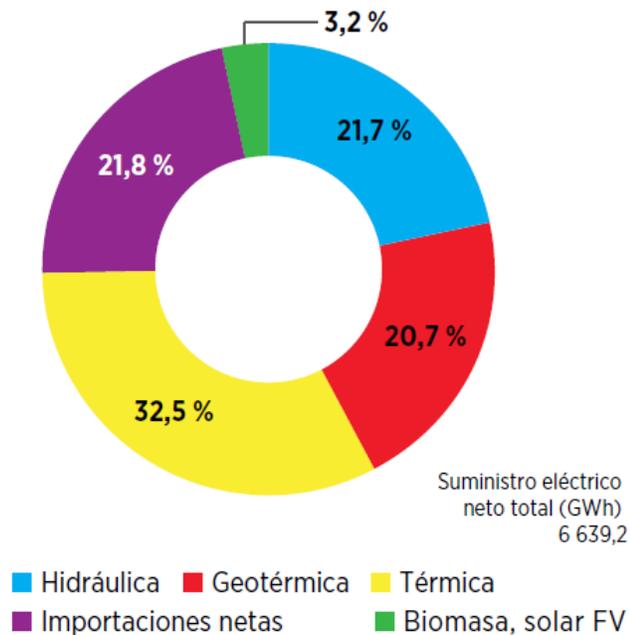


Figura 17. Suministro eléctrico neto por recurso, 2019. Fuente: Unidad de Transacciones (2019).

1.3.5 La energía solar a futuro en El Salvador.

En los últimos años se están realizando importantes inversiones en el área de energías renovables en El Salvador, en el área de energía solar fotovoltaica en concreto, se están realizando importantes inversiones y constituye una de las propuestas más significativas de avance del sector eléctrico en pro de una diversificación de la matriz y un futuro energético de bajo impacto ambiental. Esto representa un logro importante de la política energética de El Salvador y el proceso de transformación del sector que abrió las puertas a una mayor participación del sector privado.

La multinacional española Enerland Group ha anunciado en un comunicado la inversión de US\$ 30 millones en la construcción de cuatro nuevas plantas fotovoltaicas -Llano Grande I, Llano Grande II, Santa Rosa y Villa Sol- con una potencia total de 38,2 MW que generarán una energía de 87.000 MWh anuales.

Para su ejecución, se instalarán más de 63.000 módulos fotovoltaicos y se crearán alrededor de 200 empleos directos e indirectos. Una vez finalizada la misma, tanto durante la vida útil de cada proyecto, como durante las actividades de operación y mantenimiento de estos, se crearán entorno a una decena de puestos de empleo locales.

Según un artículo de Forbes Centroamérica, se espera en El Salvador una inversión de 200 millones de dólares en la cuál será construcción de una planta fotovoltaica gracias a un consorcio suizo. “Ésta inyectará energía a la red nacional, pero también será utilizada para minar bitcoin”, palabras de la embajadora de El Salvador para Estados Unidos.

La actual embajadora salvadoreña adelantó que la primera piedra de la obra será colocada en Nueva Concepción, Chalatenango, donde tienen los primeros

terrenos la infraestructura tardará alrededor de ocho meses para que se puedan ver los paneles solares funcionando. Se proyecta que para la primera fase se destinará un monto de hasta USD 15 millones de dólares. La planta contará inicialmente con una capacidad instalada de 1.5 MW de energía, logrando una capacidad total de 6 MW

Por otra parte, La Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL) colocó la primera piedra para la construcción de la primera planta de generación fotovoltaica del Estado salvadoreño, que se edificará en el municipio de Talnique, departamento de La Libertad y que tendrá una capacidad instalada de 17 MW Pico.

Se trata del proyecto “Talnique Solar”, que será ejecutado a través de Inversiones Energéticas (INE), una de las empresas subsidiarias de CEL y cuya inversión es de \$20 millones, permitiendo generar energía renovable para 25 mil hogares salvadoreños, que consumen en promedio 100 kWh.

Según las autoridades por primera vez en la historia de nuestro país, el Estado crea, diseña, planifica y ejecuta un proyecto solar. Talnique Solar estará listo y generando en diciembre del 2023.

Talnique Solar estará conformada por 29,600 módulos de paneles solares, que serán instalados en un terreno con una extensión de aproximadamente 19 manzanas. Los paneles contarán con tecnología bifacial, lo que hace que sean más eficiente al generar en ambas caras del panel.

El primer proyecto fotovoltaico del Estado estará conectado con el Mercado Mayorista de Electricidad, lo que permitirá disminuir la tarifa eléctrica que pagan los salvadoreños. La comercialización será realizada mediante el contrato de naturaleza pública de largo plazo, que fue posible gracias a las

reformas a la Ley General de Electricidad, aprobada por los diputados este año a iniciativa de CEL.

El proyecto estatal tiene un alto impacto ambiental, pues evitará la emisión de 20 mil toneladas de dióxido de carbono (CO₂) y como parte de su medida social, construirá un aula didáctica que estará a disposición de toda la comunidad estudiantil del país para enseñar cómo se genera energía a partir de la radiación del sol.

Talnique Solar que generará 100 empleos directos en su fase de construcción y 300 indirectos, es la puerta para que la empresa subsidiaria de CEL migre a generación renovable. Actualmente Inversiones Energéticas es una empresa que genera energía a través de los derivados del petróleo; por lo que, con este proyecto comienza a hacer un giro de negocio, mediante la generación de energía limpia y no contaminante.

1.4 Operación de un panel solar.

Como ya se habló anteriormente, la energía solar es la energía producida por el sol que es convertida a energía útil por el ser humano, y esta energía se puede utilizar para producir energía eléctrica.

Para generar energía eléctrica se utilizan las células solares, las cuales son el alma de lo que se conoce como paneles solares, ya que dichos paneles están compuestos por un cierto número definido de células solares.

Es por lo expuesto que se abordará en mayor medida lo referente a los paneles solares y los elementos que lo conforman.

1.4.1 Célula fotovoltaica.

En el año 1839 el físico francés Edmon Becquerel descubre el efecto fotovoltaico, este efecto se observó a través de algunos materiales semiconductores los cuales son capaces de producir una corriente eléctrica cuando se exponen a la luz solar.

En el año de 1954 Chapín, Fuller y Pearson de Bell Telephone desarrollan la primera célula solar. En 1958 se usó por primera vez las células fotovoltaicas en el satélite Vanguard.

1.4.2 Funcionamiento de la célula solar fotovoltaica.

El efecto fotovoltaico se produce al incidir la radiación solar (fotones) sobre los materiales semiconductores. La energía que reciben estos provenientes de los fotones, provoca un movimiento caótico de electrones en el interior del material.

Al unir dos regiones de un semiconductor al que artificialmente se había dotado de concentraciones diferentes de electrones, mediante los elementos que denominábamos dopantes, se provocaba un campo electrostático constante que reconducirá el movimiento de electrones.

Recordemos que este material formado por la unión de dos zonas de concentraciones diferentes de electrones se le denomina unión PN, pues la célula fotovoltaica se crea con la unión de materiales de tipo P y tipo N a partir del semiconductor (silicio).

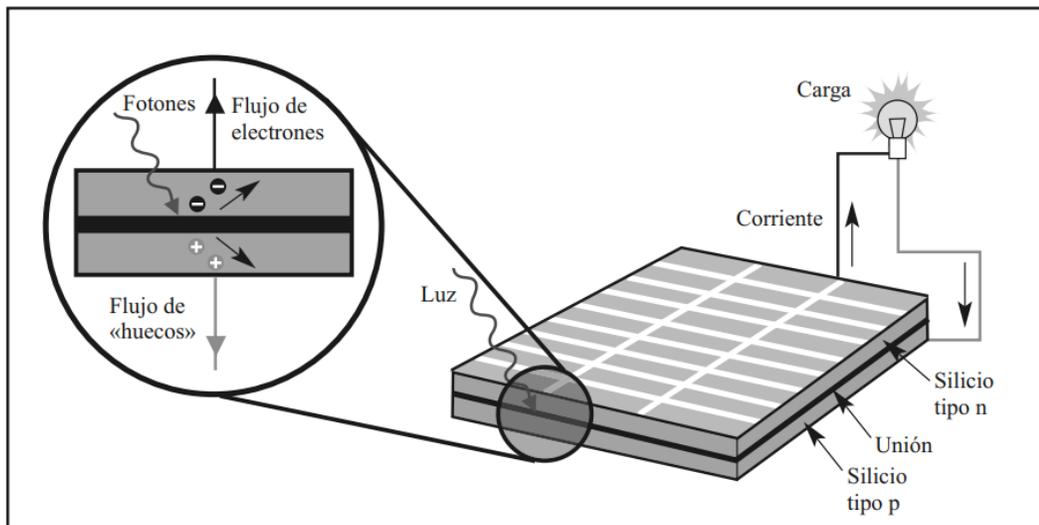


Figura 18. Esquema de generación fotovoltaica.

En la Figura 19 se observa el comportamiento de una célula fotovoltaica comparada con el funcionamiento de un diodo, en él se identifican sus partes como el ánodo (A), el cátodo (K), la corriente (I_A) y la diferencia de potencial en sus terminales (V_{AK}). En la oscuridad la célula fotovoltaica se comporta de la misma forma que el diodo, pero cuando es expuesta a la luz solar se comporta de forma diferente debido a que, en vez de consumir energía, la energía se genera y esta cantidad dependerá de las características de fabricación de la célula y la irradiancia solar en la superficie de la célula.

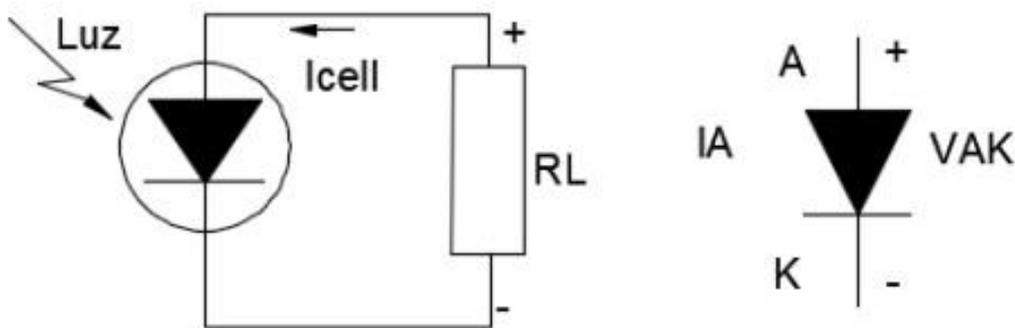


Figura 19. Comparación entre célula fotovoltaica y diodo.

1.4.3 Modelo de una célula fotovoltaica.

El circuito mostrado en la Figura 20, describe el circuito equivalente de un panel fotovoltaico conectado a una carga genérica.

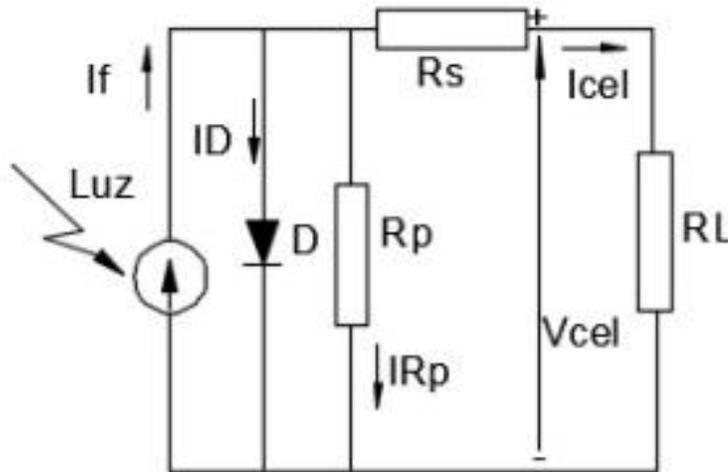


Figura 20. Modelo equivalente de una célula fotovoltaica.

Donde:

I_f : Es una fuente de corriente DC donde el valor de esta es igual a la corriente máxima que puede generar la célula fotovoltaica.

D : Es el diodo y representa la unión de semiconductores de tipo P y N.

R_p : Es la resistencia debido a la no idealidad de la unión P-N y a las impurezas cercanas a la unión (valores típicos entre 200 y 800 Ω).

R_s : Representa la resistencia del volumen del material y de los contactos metálicos (valores típicos entre 0.05 y 0.3 Ω).

V_{cel} : Diferencia de potencial en la salida de la célula.

I_{cel} : Corriente generada por la célula.

R_L : Representa a la carga conectada a la célula.

Por lo tanto, la ecuación de la corriente generada por una célula fotovoltaica se aproxima por la expresión siguiente:

$$I_{cel} = I_f - I_0 \left(e^{\left[\frac{q(V_{cel} + I_{cel}R_S)}{mKT} \right]} - 1 \right) - \frac{V_{cel} + I_{cel}R_S}{R_P}$$

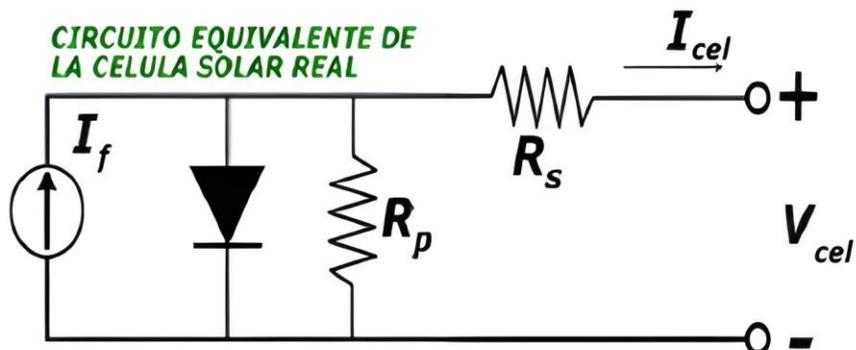


Figura 21. Circuito equivalente de una célula solar real.

Donde:

I_{cel} : Corriente generada por la célula (o el módulo).

I_f : Corriente máxima generada por la célula.

I_0 : Corriente de oscuridad.

m : Factor de idealidad del diodo.

V_{cel} : Diferencia de potencial en la salida de la célula.

R_S : Resistencia serie.

R_P : Resistencia paralelo.

q : Magnitud de la carga del electrón = 1.60×10^{-19} C.

K : Constante de Boltzmann = 1.38×10^{-23} J/K.

T : Temperatura absoluta (K).

1.4.4 Curva característica V-I de una célula fotovoltaica.

Debido al tipo de unión P-N, la célula se asemeja a un diodo y es por eso que En la curva V-I típica de una célula fotovoltaica podemos distinguir las regiones de trabajo mostradas en la Figura 22. En la misma figura, se han representado los puntos más significativos de la curva.

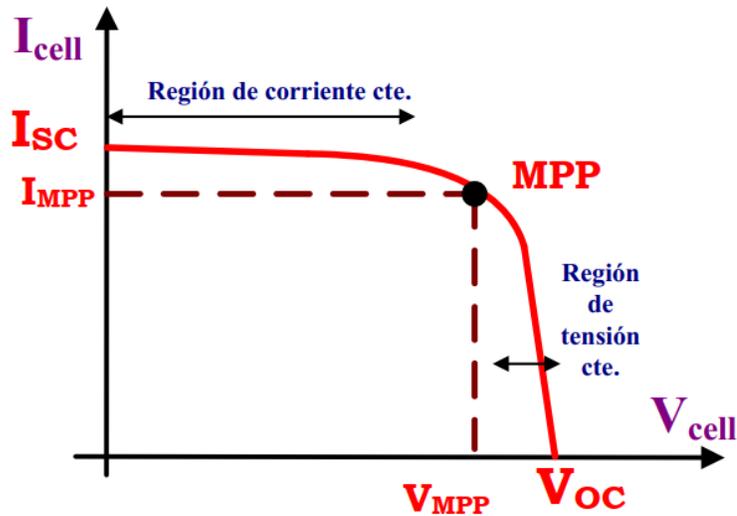


Figura 22. Curva V-I característica de la célula solar.

Acá es importante señalar que dicho diagrama se caracteriza por una tensión de circuito abierto (V_{OC}), una corriente de corto circuito (I_{SC}) y por un punto de máxima potencia (MPP).

Dicho punto (MPP) se cuenta definido por los valores de I_{MPP} y V_{MPP} (que más adelante se abordará) y pueden obtenerse de la condición de máxima capacidad del panel.

1.4.5 Tipos de célula fotovoltaica.

Como se hizo mención en el apartado 1.4.2, el principal semiconductor para la fabricación de células solares es el Silicio, en el cuál encontramos tres tipos de tecnologías, las cuales son silicio monocristalino (x-Si o m-Si), seguida por la de silicio policristalino (p-Si) y por último encontramos la de silicio amorfo (a-Si).

Además, podemos encontrar células de alto rendimiento, generalmente GaAs o compuestos relacionados InP, InAs, TeCd, CIS, etc.

Finalmente se presentan las células multiunión, las células bifaciales y las células de TiO_2 y orgánicas (en esta tesis no se tomarán en cuenta las últimas 2 mencionadas).

- Células de Silicio.

- Silicio monocristalino (m-Si): presenta una estructura completamente ordenada, cuyo comportamiento uniforme lo convierte en óptimo semiconductor, pero de una costosa fabricación. Es fácilmente reconocible por su monocromía azulada oscura y metálica.



Figura 23. Célula de Silicio monocristalino.

- Silicio policristalino (p-Si): presenta una estructura ordenada por regiones separadas, en la que los enlaces irregulares de las fronteras cristalinas disminuyen el rendimiento de la célula, al limitar la fotocorriente. Su aspecto es una composición de diferentes cristales azulados y grises metálicos.

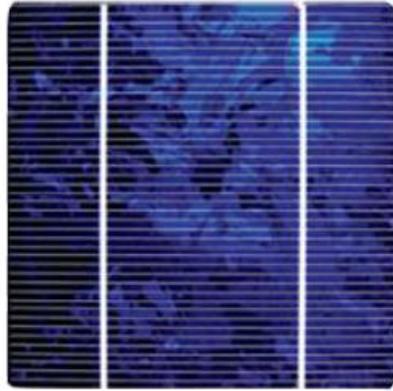


Figura 24. Célula de Silicio policristalino.

- Silicio amorfo (a-Si): difiere de las demás estructuras cristalinas por presentar un alto grado de desorden en la estructura de los átomos, con lo cual contiene un gran número de defectos estructurales y de enlaces.

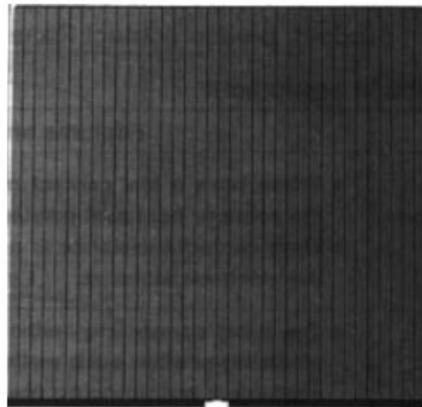


Figura 25. Célula de Silicio amorfo.

La célula de a-Si, por presentar una respuesta espectral tirando más para el azul, se muestran muy eficientes bajo iluminación artificial (principalmente bajo lámparas fluorescentes) con eficiencia -en este caso- superior a la de del Silicio monocristalino. Con respecto a las células

cristalinas tienen un proceso de fabricación más simple y por tanto un coste muy inferior.

A manera de resumen para las células de Silicio se tiene lo siguiente:

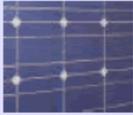
CÉLULAS		RENDIMIENTO LABORATORIO	RENDIMIENTO DIRECTO	CARACTERÍSTICAS	FABRICACIÓN
	MONOCRISTALINO	24 %	15 - 18 %	Es típico los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralsky).	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.
	POLICRISTALINO	19 - 20 %	12 - 14 %	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules.	Igual que el del monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
	AMORFO	16 %	< 10 %	Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células.	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico.

Figura 26. Tecnologías de las células solares de Silicio.

- Otros tipos de células.
 - Teluro o telururo de Cadmio (CdTe): es otro material policristalino de lámina delgada importante. Con una brecha de energía (gap) de 1.44eV y se corresponde con el valor teórico óptimo para el aprovechamiento del espectro solar.

Uno de sus problemas es su elevada resistividad eléctrica, esto lo han solventado mediante la adición de una capa de ZnTe entre el CdTe y el contacto.



Figura 27. Vista parcial de una planta FV de 100kW de TeCd en Aragón

- Arseniuro de Galio (GaAs): es un componente conductor mezcla de dos elementos. Tiene la ventaja sobre el silicio, que trabaja mejor a altas temperaturas, hecho de gran importancia para células que trabajan en sistemas concentradores de radiación.

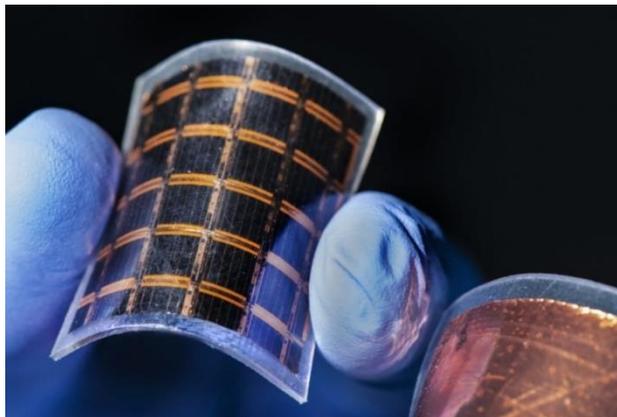


Figura 28. Célula solar flexible de GaAs creada por científicos del NREL (Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos) en febrero 2019.

1.4.6 Conexión de células solares.

Una célula solar por sí sola no tiene la capacidad de generar la corriente ni la tensión necesaria para el aprovechamiento que se requiere, es por eso, que las

células solares se asocian eléctricamente en diferentes combinaciones (en serie y/o paralelo) de forma que permiten obtener los valores de corriente y tensión deseados.

Dicha combinación de células se encapsula entre materiales que la protegen de los efectos de la intemperie, la aíslan eléctricamente del exterior y, por último, aporta rigidez mecánica a todo el conjunto. Al conjunto de células, protecciones internas, conexiones, soportes, etc., se le conoce como panel fotovoltaico o panel solar.

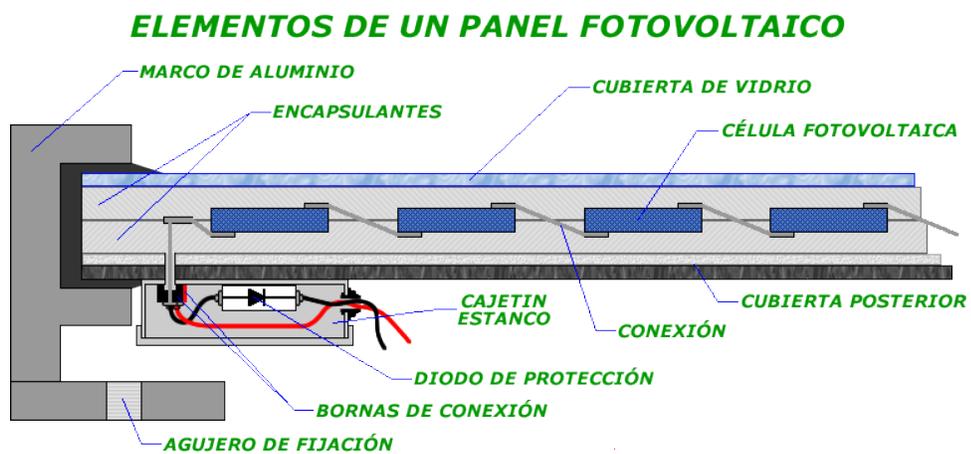


Figura 29. Esquema de conexión entre células.

Dicho panel solar, habitualmente está constituido por la asociación eléctrica de células solares en serie (entre 30 y 36 células), las cuales también están conformadas por un subgrupo de células denominados cadenas (o Sting).

Las cadenas son aquellas formadas por una fila de células conectadas en serie de forma vertical, tal como observamos en la Figura 30.

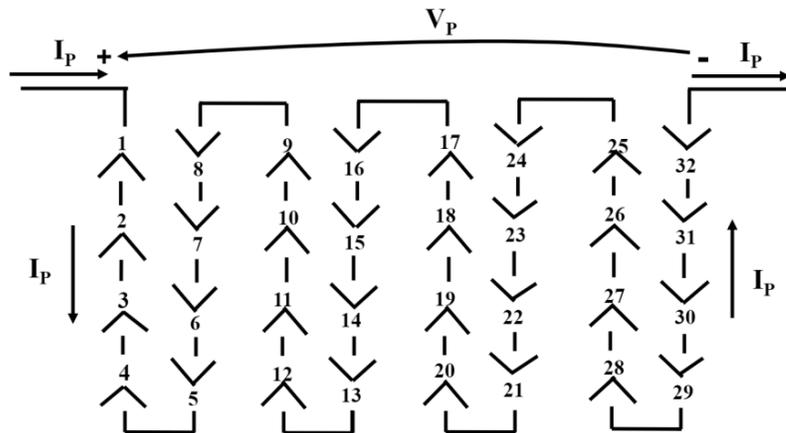


Figura 30. Esquema de conexión en serie de células solares para formar el panel solar.

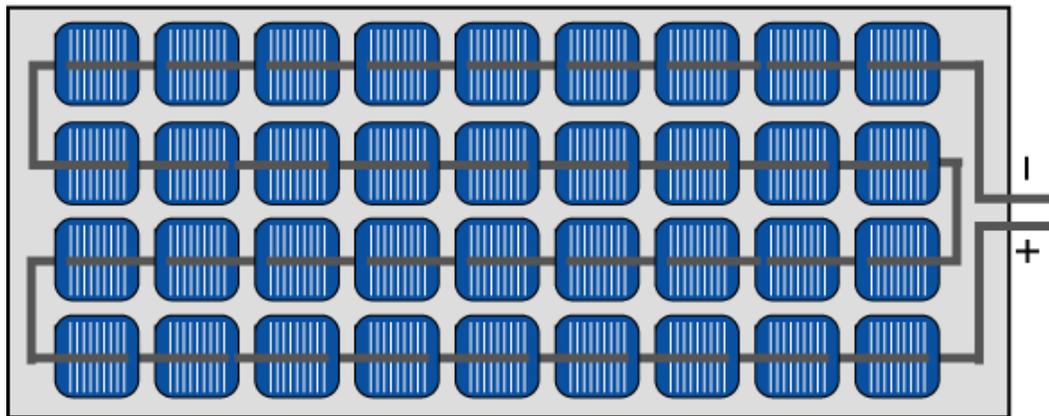


Figura 31. Panel solar típico de 36 células solares conectadas en serie.

1.4.7 Características del módulo solar fotovoltaico.

Los paneles solares cuentan con parámetros con los cuales siempre se deben de tomar en cuenta para cualquier tipo de diseño e implementación de instalaciones fotovoltaicas. Estos datos son proporcionados por el fabricante del panel solar y a su vez están constituidos por parámetros obtenidos mediante pruebas controladas y los principales son:

- Parámetros eléctricos. Condiciones estándares de medida (Standard Test Conditions, STC).
 - Irradiancia: 100 mW/cm² (1000 W/m²)
 - Distribución espectral: AM 1.5 (masa de aire)
 - Incidencia normal
 - Temperatura de la célula: 25°C

- Parámetros térmicos. Temperatura de operación nominal de la célula (TONC).
 - Irradiancia: 80 mW/cm² (800 W/m²)
 - Distribución espectral: AM 1.5 (masa de aire)
 - Incidencia normal
 - Temperatura del ambiente: 20°C
 - Velocidad del viento: 1.5 m/s

Bajo estas condiciones se logran definir los parámetros eléctricos en los paneles solares de la siguiente manera:

- Voltaje de circuito abierto (V_{OC}): Es la tensión que se obtiene cuando los terminales positivo y negativo no tienen ninguna carga conectada ($I = 0$), es decir, se encuentran en estado de circuito abierto.
- Corriente de corto circuito (I_{SC}): Es la corriente que se obtiene en la salida cuando las terminales positivo y negativo del módulo se conectan ($V = 0$).
- Voltaje en el punto de máxima potencia (V_{MPP}): Es la tensión producida cuando la potencia es máxima.

- Corriente en el punto de máxima potencia (I_{MPP}): Es la corriente producida cuando la potencia es máxima.
- Potencia máxima del panel (P_{max}): Es la potencia máxima que puede suministrar el panel, es el punto donde el producto de la intensidad y la tensión es máximo. Usualmente se mide en vatios pico (Wp).

$$P_{max} = V_{MPP} \cdot I_{MPP}$$

- Factor de forma (FF): Es la relación entre la máxima potencia con respecto al producto de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} < 1$$

- Rendimiento o eficiencia del panel (η): Es la relación adimensional (habitualmente expresada como porcentaje) entre la potencia eléctrica generada respecto a la potencia de irradiación.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_R} = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{S \cdot G}$$

Donde

S : es el área de la célula.

G : es la irradiación.

En resumen, en la curva V-I también se logra visualizar estos parámetros, tal como se muestra en la Figura 32.

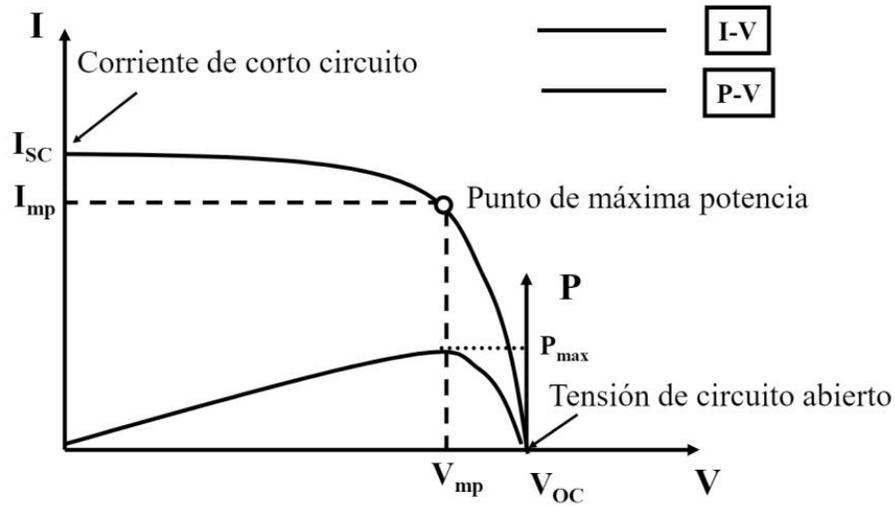


Figura 32. Curvas características V-I y P-V.

En las Figuras 33 y 34 se muestran las características que deberían de mostrar los paneles solares.

ZYTECH	
Model	ZT160S
Maximum Power (Pm)	160 W
Power tolerance	±5 %
Open-circuit voltage (Voc)	42.48 V
Short-circuit current (Isc)	5.40 A
Voltage at Pmax (Vmp)	34.04 V
Current at Pmax (Imp)	4.70 A
Weight	16 Kg
Module dimension	1581 × 809 × 40 mm
Fuse rating	15 A
Maximum system voltage	1000 V
Temp coefficient of Voc	-(160 ±10)mV/°C
Temp coefficient of Isc	+(0.065 ±0.015)%/°C
Temp coefficient of Power	-(0.5 ±0.05)%/°C
All technical data at Standard test condition AM=1.5 E=1000W/m ² Tc=25°C	

Figura 33. Datos técnicos de panel solar ZYTECH 160W. Fuente: Curso Instalación y mantenimiento de paneles solares – Insaforp.



Figura 34. Datos técnicos de panel solar CanadianSolar 325W. Fuente: Curso Instalación y mantenimiento de paneles solares – Insaforp.

1.5 Orientación e inclinación óptima de los paneles fotovoltaicos.

Para obtener el máximo aprovechamiento de los paneles solares es importante la orientación de estos, debido a que estos producen mayor energía cuando los rayos del sol inciden perpendicularmente sobre su superficie, es por eso que si se desea hacer una instalación en el hemisferio norte dichos paneles deberán de estar orientados hacia el sur, caso contrario si la instalación se hará en el hemisferio sur los paneles tienen que estar orientados hacia el norte.



La orientación y el ángulo de inclinación pueden afectar el rendimiento energético de la instalación fotovoltaica

Figura 35. Inclinación de paneles solares.

La mejor manera de poder obtener una inclinación óptima es haciendo uso de fórmulas en las cuales se basan en análisis estadísticos de radiación solar anual en superficies con inclinaciones diferentes y ubicadas en diferentes latitudes, esta se expresa en grados y valor absoluto.

$$S_{opt} = 3.7 + 0.69|\varphi|$$

Donde

S_{opt} : es la orientación óptima en grados.

φ : representa la latitud del lugar expresada en grados.

Nota: aprovechando la posición geográfica de nuestro país (El Salvador), se podría hacer la consideración sobre la inclinación del panel solar que sea de 15° (Fuente: Curso Instalación y mantenimiento de paneles solares – Insaforp)

2. TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, CAPACIDADES Y ELEMENTOS DE INSTALACIÓN.

2.1 Operación de la instalación.

Existen tres tipos de sistemas fotovoltaicos, todo obedece a las necesidades o requerimientos por las cuales serán implementados, el funcionamiento se debe comprender definiendo cada uno de los tipos que son:

2.1.1 Sistema fotovoltaico conectado a red.

La energía eléctrica producida en este tipo es generada por el módulo fotovoltaico, la cual depende en intensidad y nivel de tensión mayormente de la construcción del mismo, siendo corriente directa y pasa a ser corriente alterna por medio del inversor. Esta corriente alterna es producida en las horas de mayor intensidad de la luz solar, y al carecer de un método de almacenaje el sistema, la instalación utilizará parte de la energía eléctrica generada y el excedente será inyectado de manera directa a la red eléctrica de la cual la instalación se alimenta.

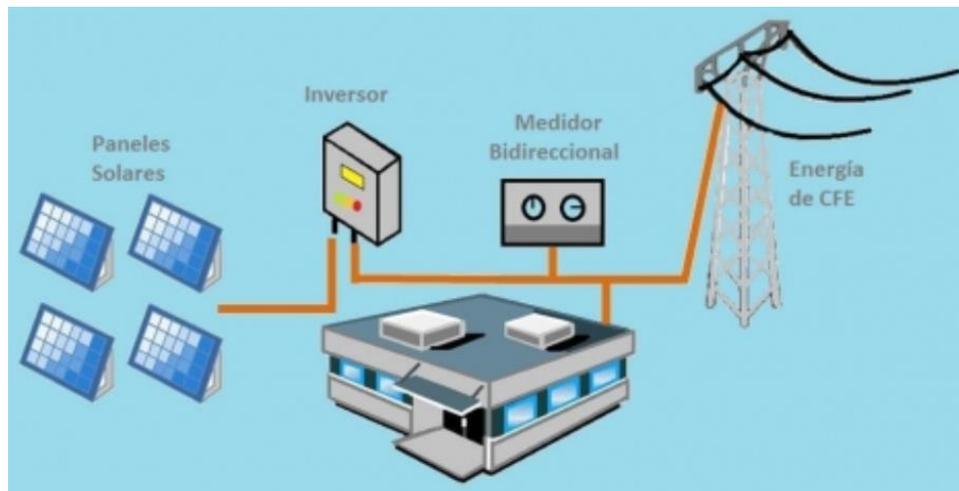


Figura 36. Sistema fotovoltaico conectado a red (On Grid).

Durante las horas de mayor producción eléctrica, existe un excedente que se inyecta a la red, durante las horas nocturnas en las que no hay producción de electricidad la instalación tomara electricidad de la red, para lo cual se debe instalar un contador bidireccional de electricidad, contabilizando así la energía entregada a la red durante el día y la energía sustraída de la red en la noche. Por lo general en los países donde se puede instalar un contador eléctrico bidireccional, las regulaciones de energía permiten la producción de electricidad por medio de sistemas fotovoltaicos de manera tal que no exceda el consumo de la instalación en la cual se ha colocado.

2.1.2 Sistema fotovoltaico aislado.

Las instalaciones fotovoltaicas aisladas son aquellas que generan electricidad de forma autónoma, sin conexión a red, y que están provistas de sistemas de acumulación (baterías) y regulación para poder cubrir en todo momento la demanda. Estas instalaciones son de poca potencia, normalmente de entre 3 y

10 kW, y son especialmente útiles en zonas rurales y lugares remotos con escaso desarrollo de las redes eléctricas, aunque últimamente su reducción en costes la están haciendo una alternativa atractiva para todo tipo de usuario. Un esquema de este tipo de instalaciones se muestra en la Figura 37.



Figura 37. Sistema fotovoltaico aislado (Off Grid).

El consumo de las cargas domésticas suele ser en corriente alterna AC. Es por ello, que es necesario introducir un sistema de adaptación de corriente o inversor que transforme la electricidad generada por los módulos en corriente continua DC a alterna AC. Sin embargo, últimamente se están desarrollando muchos diseños nuevos para alimentación DC, si bien en el desarrollo de este trabajo sólo se considerará el consumo AC.

2.1.3 Sistema fotovoltaico híbrido.

El tipo de sistema híbrido es el menos frecuente, esto debido a su costo, ya que los componentes necesarios para este tipo de sistema por lo general son más caros y como su nombre lo dice es la unión de los dos sistemas anteriormente mencionados, es un sistema que contiene una unidad de almacenamiento de energía para poder suministrar energía aun en las horas nocturnas y al mismo tiempo tiene una conexión a la red eléctrica para que en caso de que la unidad de almacenamiento se quede vacía, permite seguir operando la instalación a la que alimenta. Por ende, este tipo de sistema es el más confiable, y es utilizado en instalaciones eléctricas que así lo requieran. Un esquema de la conexión de un sistema híbrido se puede observar en la Figura 38.

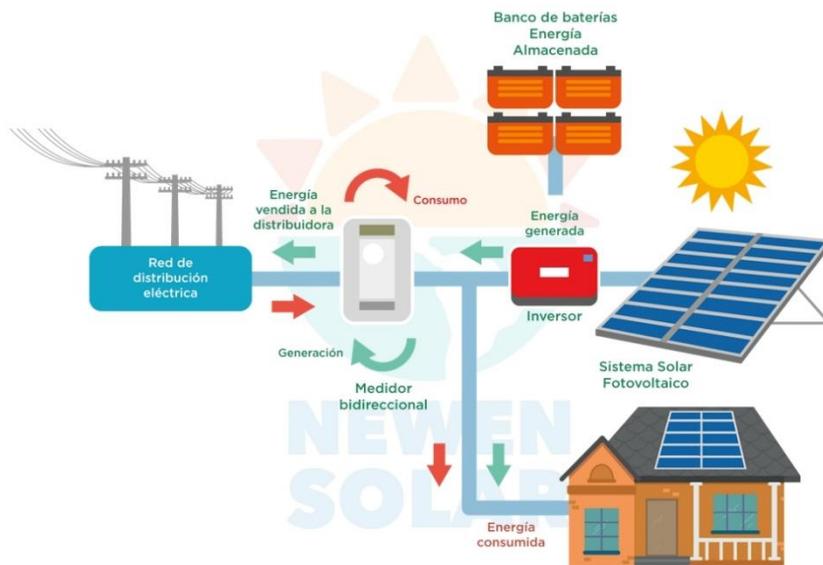


Figura 38. Sistema fotovoltaico híbrido.

2.2 Capacidad de los paneles solares fotovoltaicos.

Hay un amplio rango de capacidad de los paneles, todo enfocado en la carga que se desea manejar en la instalación con energía solar. Al final, es importante recalcar que factores importantes como las condiciones ambientales, el diseño y arreglo en que se conecten los paneles nos dirán cual realmente es la capacidad real, porque el fabricante puede ofrecer un modelo con una cierta capacidad teórica de generación eléctrica, pero al final puede resultar que genere menos según el ambiente y las horas de sol.

Es por eso que es importante siempre el revisar los datos técnicos (ver Figura 33 y 34) de los paneles solares que se deseen adquirir para evitar cualquier tipo inconveniente que se pueda presentar.

2.3 Elementos de instalación.

2.3.1 Módulo fotovoltaico.

Los módulos fotovoltaicos están compuestos de células capaces de convertir la energía radiada en energía eléctrica, estas células están unidas entre sí, de esta forma suma su potencia y así alcanza la potencia nominal del módulo. Esta potencia se mide en vatios pico (Wp), la cual es la potencia que el módulo puede generar, cuando el módulo está sometido a la intensidad máxima es decir la intensidad que da el sol al medio día en un día despejado. Además, estos módulos pueden ser de cualquier tipo tal como se presentó en la Figura 26.



Figura 39. Modulo fotovoltaico TRV SZYL-P100-18C; 100w, 17.8v, 5.62a, 30mm.

2.3.3 Regulador de carga.

Este equipo regula la carga y descarga de las baterías, reduce la intensidad de corrientes producida por los módulos fotovoltaicos en función del nivel de carga de las baterías, cuando la carga de las baterías está completa, el regulador las desconecta del sistema fotovoltaico, también puede desconectar el consumo de las baterías si detecta un nivel peligrosamente bajo.



Figura 40. Regulador de carga para sistemas fotovoltaicos.

2.3.2 Estructura de sujeción de módulos.

Esta estructura es la que nos permite mantener los módulos fotovoltaicos en una posición fija, garantizando la integridad de los módulos contra la acción del viento o movimientos sísmicos. Este tipo de estructura son rígidas y algunas veces un poco robustas para poder enfrentar las condiciones a intemperies donde suelen instalarse algunos sistemas fotovoltaicos. Ejemplo de una estructura fija es la que se muestra en la Figura 40.



Figura 41. Soporte fijo para módulo fotovoltaico.

Además, existen estructuras que siguen la trayectoria del sol de oriente a poniente, tienen la ventaja de aumentar las horas de sol aprovechables por el módulo solar, pero también tienen sus desventajas, su costo es elevado y requiere de mayor mantenimiento ya que tiene piezas móviles. Ejemplo de una estructura con seguidor solar es la que se muestra en la Figura 41.

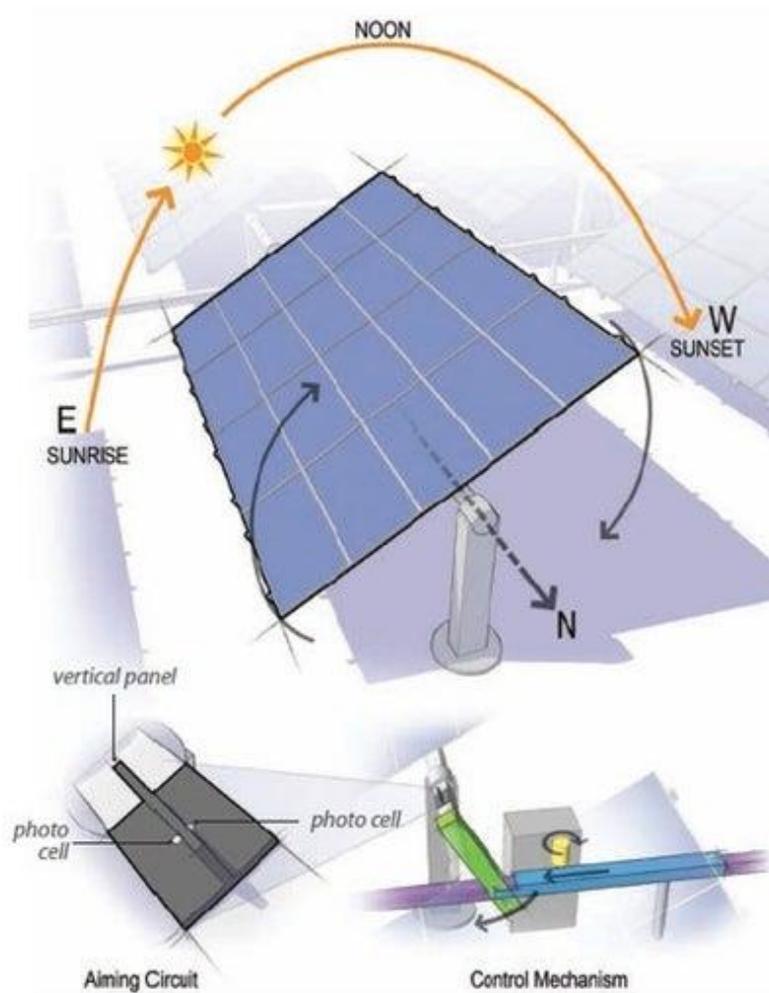


Figura 42. Soporte con seguidor solar para módulo fotovoltaico.

2.3.4 Baterías.

Las baterías son una solución bastante eficiente a la necesidad de acumular energía para su consumo, en las noches dado que los módulos fotovoltaicos no generan energía de noche. Existen diversos tipos de baterías para los sistemas fotovoltaicos, pero solo se expondrán tres tipos los cuales son:

- **Batería de ácido-plomo:** este tipo de baterías es la más común ya que se usa para alimentar al sistema eléctrico de motocicletas, automóviles y camiones. Tienen un bajo costo, entregan corrientes muy altas, son fiables y de larga vida, además que trabajan bien a temperaturas bajas. En sus desventajas encontramos que son muy pesadas y peligrosas debido a que el plomo es sumamente tóxico, pierden capacidad de carga por esfuerzos mecánicos y no son convenientes para descargas profundas debido al fenómeno de sulfatación.



Figura 43. Batería plomo-ácido.

- **Batería gel:** también llamadas baterías sin mantenimiento al ser completamente selladas no requieren de mantenimiento pues no se producen evaporaciones y su cuidado se vuelve mucho más sencillo, son adecuadas para los ciclos de descarga profunda con hasta 800 ciclos de vida, duran alrededor de tres veces más que las baterías de ácido-plomo, puede soportar un elevado número de ciclos de carga-descarga, tiene un costo más alto que las de ácido-plomo.



Figura 44. Batería de gel.

- **Batería AGM:** usan una tecnología la cual permite a las placas de plomo de la batería absorber más rápido y mejor el ácido. Son compactas, libre de cortocircuitos y muy resistentes a la tensión mecánica. Puede ser montada en cualquier posición, tiene una vida media de diez años, no sufre a altas temperaturas, la fuga de ácido, no requieren mantenimiento debido a son completamente selladas, tiene altas corrientes de irrupción, baja descarga, mayor velocidad de carga y el costo es mayor que las baterías de gel.



Figura 45. Batería AGM.

Por último, es recomendable para las baterías mantenerlas en un ambiente controlado, con temperaturas bajas, ya que un exceso de calor se ha comprobado que reduce considerablemente la longevidad de las baterías.

2.3.5 Inversor.

La corriente generada por los módulos fotovoltaicos y la que acumulan las baterías es corriente continua, normalmente a voltajes bajos como 12V, 24V y 48V. Para poder utilizarlas en casas alimentadas por la red eléctrica convencional que utilizan corriente alterna a 110/120 V, se utiliza el inversor que convierte esta corriente continua (12, 24 y 48V) en corriente alterna (110/120V).

Los inversores más comunes para alimentar cargas de corriente alternan son de tres tipos:

- Onda cuadrada.
- Onda senoidal pura.
- Onda senoidal modificada.



Figura 46. Inversor para sistemas fotovoltaicos.

2.3.6 Elementos de protección.

Los elementos de protección deben estar calculados para los circuitos de consumo, tanto para proteger los elementos como la batería y evitar así incendios provocados por cortocircuitos, así también para la protección de las personas, en caso de una descarga eléctrica se pueden usar interruptores diferenciales. Se pueden usar fusibles en la parte de corriente continua e interruptores electromagnéticos en corriente alterna.

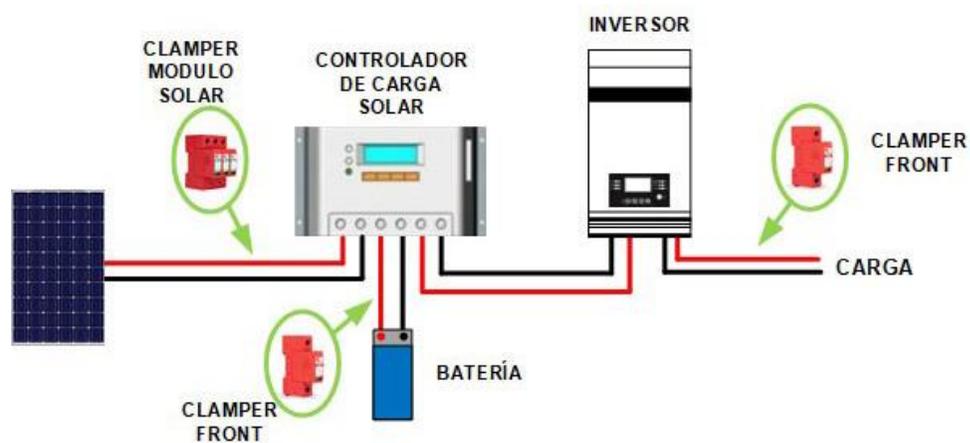


Figura 47. Protecciones para sistemas fotovoltaicos.



Figura 48. Interruptor termomagnético.



Figura 49. Fusible de cadena fotovoltaica.

2.3.7 Otros elementos.

En cualquier instalación de un sistema fotovoltaico también están presentes los siguientes elementos:

- Varilla copperweld, cepo y cable desnudo de cobre calibre 8.



Figura 50. Varilla copperweld 5/8".



Figura 51. Cepo de cobre para barra de 5/8".



Figura 52. Cable de cobre desnudo #8.

- Cable solar o cable PV.



Figura 53. Cable solar dúplex PV1-F de 4 mm² negro.

- Terminal tipo pin hueco.



Figura 54. Terminal pin hueco.

- Conectores MC4.



Figura 55. Conector MC4 macho y hembra.



Figura 56. Vista de armado para conectores MC4.

- Caja plexo.



Figura 57. Caja plexo con conos.

- Riel DIN.
- Tubería coraza LT y sus accesorios.
- Cable eléctrico THHN.

3. PRUEBAS ELÉCTRICAS A PANELES SOLARES.

Los paneles FV a pesar de que los fabricantes incluyen los datos técnicos necesarios, es importante realizar pruebas en las cuales se garantice el buen estado y funcionamiento de los paneles.

Es por eso, que a continuación se detallara como realizar de la mejor manera las pruebas a dichos paneles FV.

3.1 Pruebas realizadas directamente a paneles solares.

3.1.1 Voltaje de circuito abierto (Voc).

Voltaje de circuito abierto (voltage open circuit por sus siglas en inglés) es el voltaje máximo que un módulo solar puede dar cuando no tiene carga sobre él. Voc se utiliza cuando se dimensionan las matrices solares junto con los coeficientes de temperatura para determinar los escenarios de tensión en el peor de los casos. La siguiente imagen muestra brevemente el cómo se obtiene la lectura en un módulo FV:

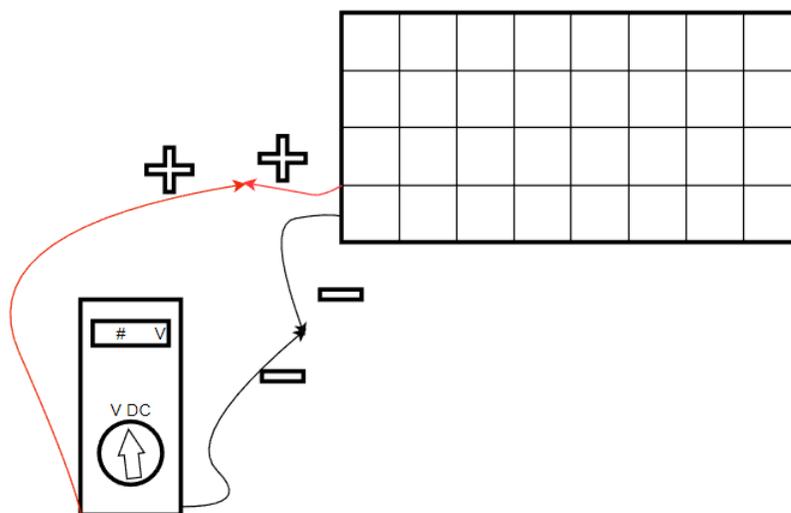


Figura 58. Esquema representativo para medir V_{oc} con multímetro.

3.1.2 Corriente de corto circuito (I_{sc}).

Es la cantidad máxima en amperios que un módulo FV puede producir. La siguiente imagen detalla el proceso de la obtención de este dato a la hora de trabajar con un módulo FV.

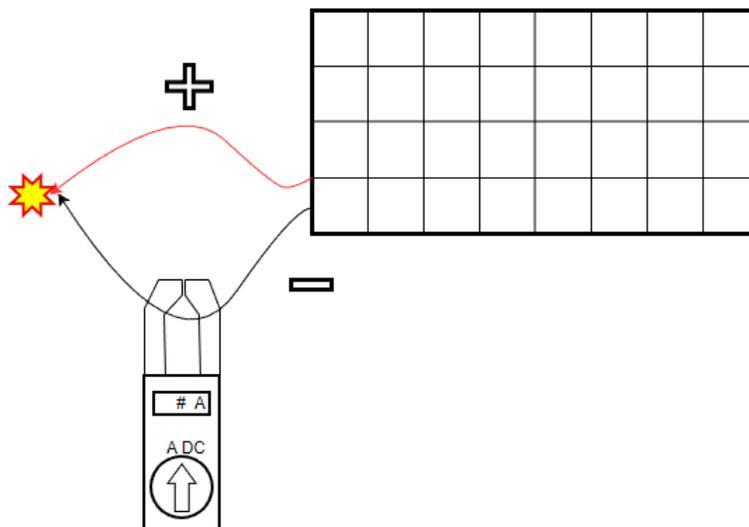


Figura 59. Esquema representativo para medir I_{sc} con tenaza amperimétrica.

3.2 Resultados que se obtienen.

Antes de comenzar con las pruebas se necesita definir ciertos aspectos importantes como la ubicación, instrumentos de medición, tipo de luz y su irradiancia, lo cual se detalla a continuación.

- Ubicación del panel:

A la hora de realizar las pruebas se debe tomar en cuenta como requisito que la superficie esté libre de sombras, es decir que no contenga árboles o demás elementos que propinen sombra a la instalación, debe de ser un espacio abierto, sin paredes u obstáculos divisorios que impidan justamente la circulación de la luz y sobre todo capaz de albergar la estructura que sostiene el panel solar, así como la capacidad de poder movilizarla para buscar una mejor ubicación en caso de ser necesario.

Por lo que considerando lo anterior, se tiene como fin utilizar un espacio del parqueo que se encuentra ubicado a un costado del edificio de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.

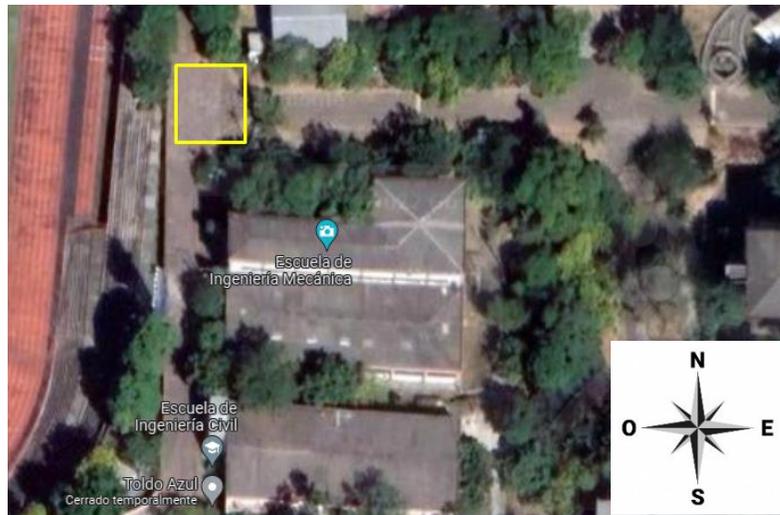


Figura 60. Imagen satelital de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.

- Descripción del panel.

Se utilizó un panel solar monocristalino de 185 W MONTELEC RDM-185M, propiedad de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador el cual cuenta con la siguiente ficha técnica.

RDM-185M	
Potencia	185 W
Tipo de celda solar	Monocrystalino
Vmp	37.8 V
Imp	4.9 A
Voc	45 V
Isc	5.4 A
Voltaje máximo en sistema	1000 V (IEC)
Máxima capacidad para fusibles	10 A
Dimensiones	1580x808x35 mm
Peso	15 Kg
Tolerancia de salida	0~+3%
Prueba en condición estándar (STC)	1000 W/m ² 25°C AM 1.5
Temperatura de funcionamiento	-40°C a +85°C
Garantía de rendimiento	10 años > 90% 25 años > 85%
ISO9001, TUV, CEC, IEC61215, IEC61730, CE	

Figura 61. Ficha técnica de panel monocristalino MONTELEC RDM-185M

- Tipo de luz utilizada.

Para las pruebas que se realizaron al panel solar, se aprovechó la luz solar directa, ya que de esta manera se obtienen resultados acordes a la realidad de cualquier tipo de sistema que esté instalado.

- Descripción del equipo utilizado.

Para realizar las pruebas al panel solar es necesario contar con equipo especial como un analizador solar, piranómetro y cámara termográfica de tal forma de registrar la irradiancia y las condiciones de temperatura a la que se encuentra sometido el panel solar a la hora de realizar las pruebas con el fin de obtener los datos más certeros y cercanos a las especificaciones técnicas del panel en prueba.

- Analizador solar.

El analizador solar que se utilizó es el Amprobe SOLAR-600, el cual es de uso profesional para pruebas, mantenimiento, solución de problemas, y eficiencia de paneles solares.

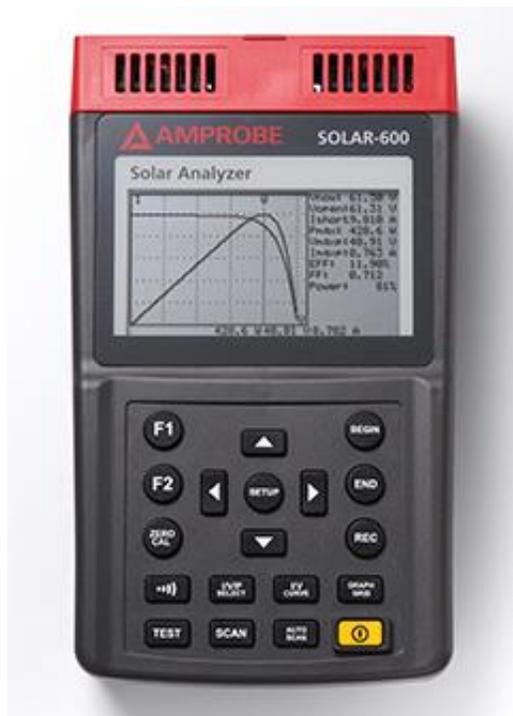


Figura 62. Analizador AMPROBE Solar-600.

El analizador es utilizado en la instalación de paneles solares, para determinar la apropiada medida del inversor, óptima posición de salida de energía de los paneles e identificar celdas rotas o gastadas.

Además, permite obtener lo siguiente:

- Curva de prueba I-V para celdas solares.
- Máxima Energía Solar (P_{max}) alcanzada por el auto-escaneo (60V, 12A)
- Voltaje Máximo (V_{maxp}) al P_{max}
- Máxima Corriente (I_{maxp}) al P_{max}
- Voltaje a circuito abierto (V_{open})
- Corriente a corto circuito (I_{short})
- Curva I-V con cursor
- Cálculo de eficiencia del panel (%)
- Prueba Manual de un Punto.
- Registro de Datos en tiempo real
- Descarga de datos a PC.

Especificaciones técnicas:

Tipo de batería: litio recargable, 11,1 V DC, 3400 mAh.

Duración de la batería: 400 veces de barrido lineal de 60V a 0V y de 0A a 12A.

Tamaño de la memoria de registro de datos: 99.

Adaptador AC: Entrada de 110V o 220V AC, Salida de 15V DC/ 1~3ª.

Dimensiones: 257x155x57 mm.

Peso: 1160g (Baterías incluidas).

Funcionamiento: 0°C a 50°C, 85% HR.

Coeficiente de temperatura: 0,1% del fondo de escala / °C (<18°C o >28°C).

Temperatura de almacenamiento: -20°C a 60°C, 75% HR.

- Piranómetro.

Para determinar el nivel de irradiancia que se obtuvo en el lugar donde se realizaron las pruebas, se utilizó el piranómetro de mano Frederiksen 4890.2.



Figura 63. Piranómetro de mano Frederiksen 4890.2

Este instrumento está diseñado para medir la irradiación solar. El piranómetro manual está diseñado para mediciones rápidas de irradiancia global, por ejemplo, en colectores de calor solar o paneles fotovoltaicos.

Especificaciones técnicas:

Dimensiones: 185 x 108 x 56 mm.

Fuente: batería de 9V

Rango de medida: 0-1999 W/m².

Resolución: 1 W/m².

Precisión: +/-5% de la escala total

- Cámara termográfica.

La cámara de imagen térmica FLIR E4 es una herramienta de resolución de problemas fácil de usar para aplicaciones de construcción, eléctricas y mecánicas. Encuentra problemas ocultos, toma de lecturas de temperatura precisas con una resolución infrarroja de 4.800 (80 x 60) píxeles.



Figura 64. Cámara de imagen térmica FLIR E4.

Especificaciones.

Descripción general:

- Tamaño de la cámara (L x W x H) 244 x 95 x 140 mm (9,6 x 3,7 x 5,5 pulgadas).
- Peso de la cámara con batería 0,575 kg.
- Tipo de detector microbolómetro no refrigerado.
- Monitor LCD en color de 320 x 240 de 3,0 pulg.
- Lista de contenidos.
- Cámara de infrarrojos.
- Estuche rígido de transporte.
- Batería (cámara interior).
- Cable USB.
- Imágenes dinámicas multiespectrales (MSX) Imagen IR mejorada con detalles visibles de la cámara.

Conexiones y comunicaciones:

- Operación AC Adaptador de CA, entrada de 90-260 VCA, salida de 5 VCC a la cámara.
- Interfaz USB Micro: transferencia de datos desde y hacia PC y dispositivo Mac.
- Wifi.
- Estándar: 802.11 b / g / n.
- Rango de frecuencia: 2400–2480 MHz, 5150–5260 MHz.
- Máx. potencia de salida: 15 dBm.

Ambiental:

- Encapsulación / Gota IP 54 (IEC 60529) / 2 m (6,6 pies).
- Humedad (funcionamiento y almacenamiento) IEC 60068-2-30 / 24 h 95% de humedad relativa.
- Rango de temperatura de funcionamiento -15°C a 50°C .
- Choque 25 g (IEC 60068-2-27).
- Rango de temperatura de almacenamiento De -40°C a 70°C .
- Vibración 2g (IEC 60068-2-6).

Imágenes y ópticas:

- Color Negro y gris.
- Paletas de colores Blanco y negro, hierro y arcoíris.
- Resolución de cámara digital / FOV $640 \times 480/55^{\circ} \times 43^{\circ}$.
- Campo de visión (FOV) $45^{\circ} \times 34^{\circ}$.
- número f 1,5.
- Enfocar: Enfoque libre.
- Ajuste de imagen: Imagen de ajuste / bloqueo automático.
- Frecuencia de imagen 9 Hz.
- Modos de imagen MSX térmica, térmica, imagen en imagen, fusión térmica, cámara digital.

- Resolución IR 80 x 60 píxeles.
- Distancia mínima de enfoque 0,5 m (1,6 pies).
- Imagen en imagen Área de infrarrojos en la imagen visual.
- Resolución espacial (IFOV) 10,3 mrad.
- Rango espectral 7,5–13 μm .
- Sensibilidad térmica / NETD <0,15 ° C (0,27 ° F) / <150 mK.

Medición y análisis:

- Precisión ± 2 ° C o $\pm 2\%$ de la lectura, para temperatura ambiente de 10 ° C a 35 ° C y temperatura del objeto por encima de 0 ° C.
- Área Caja con máx. /min.
- Isoterma Arriba / Abajo / Intervalo.
- Rango de temperatura del objeto: -20 ° C a 250 ° C.
- Corrección de temperatura aparente reflejada automático, basado en la entrada de la temperatura reflejada.
- Comandos de configuración Adaptación local de unidades, idioma, formatos de fecha y hora.
- Spotmeter y área Punto central; caja con min. /max.

Energía:

- Tipo de batería y tiempo de funcionamiento Batería recargable de iones de litio de 3,6 V; aprox. 4 horas de uso típico.
- Cargando sistema La batería se carga dentro de la cámara o en un cargador específico.
- Tiempo de carga 2,5 horas al 90% de capacidad en cámara. 2 horas en cargador.
- Gestión de energía Apagado automático.

Medios de almacenamiento:

- Formatos de archivo JPEG estándar, datos de medición de 14 bits incluidos

3.2.1 Curva I-V.

Para la obtención de las curvas que describen la característica del panel FV de 200W MONTELEC RDM-185M, se usó el equipo descrito anteriormente, es por eso que se plantea el siguiente método para realizar las pruebas:

Procedimiento:

- 1- Conectar el panel al analizador solar.



Figura 65. Analizador solar conectado a panel solar de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador.

2- Configurar el analizador a una irradiancia de 1000 W/m².

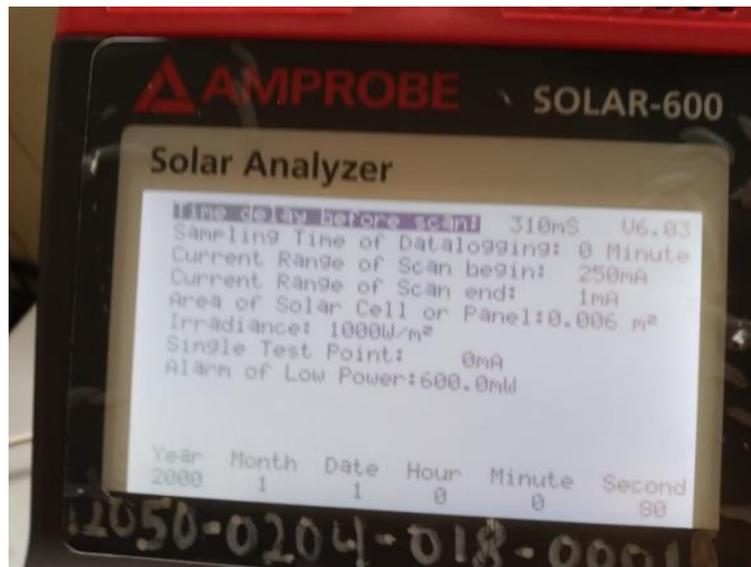


Figura 66. Fotografía de parámetros utilizados.

- 3- Verificar con el piranómetro el nivel de irradiancia cercana a 1000 W/m^2 en el lugar que se realizó la prueba.



Figura 67. Fotografía de piranómetro.

- 4- Colocar el panel a la luz solar directa ya con el analizador conectado.



Figura 68. Imagen de referencia de primeras pruebas realizadas.

- 5- Con la cámara termográfica medir la temperatura del panel y observar que esté funcionando bien, además de verificar que todo esté correctamente instalado.

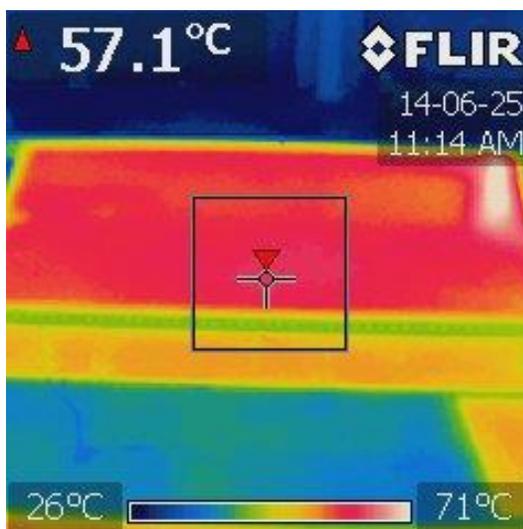


Figura 69. Imagen de referencia utilizando la cámara de imagen térmica.

- 6- Ya con los dispositivos verificados se procede a leer la medición directo del analizador solar.

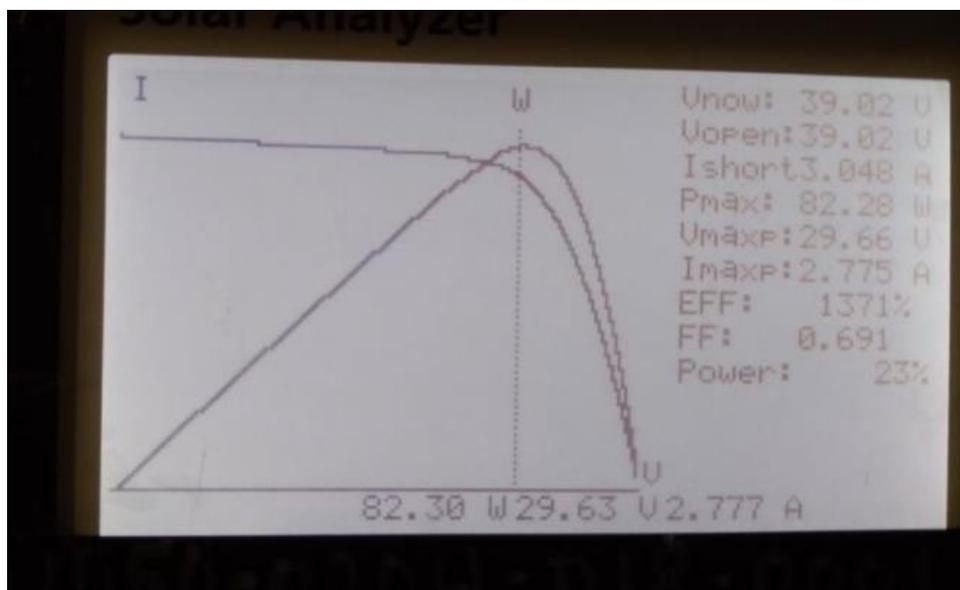


Figura 70. Curvas y datos finales obtenidos del analizador solar AMPROBE.

7- Posteriormente la gráfica que se obtiene se traslada a la PC para una mejor imagen de la curva I-V y los datos que mostro con la prueba.

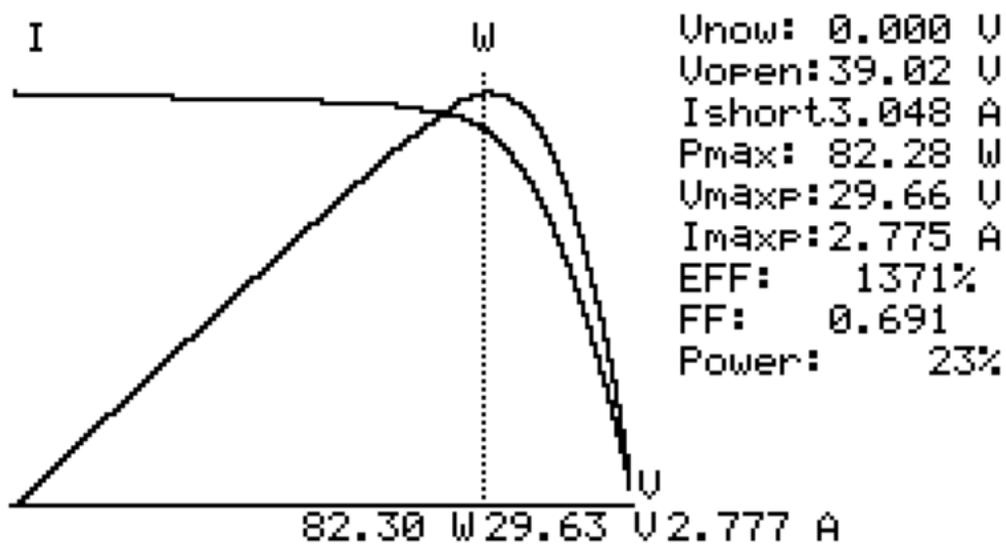


Figura 71. Curva I-V obtenida de AMPROBE solar-600.

3.2.2 Curva P-V.

Para la obtención de la curva P-V no es necesario volver a realizar los pasos del apartado 3.2.1, ya que el analizador solar hace la gráfica automáticamente, tal como se muestra en la siguiente figura.

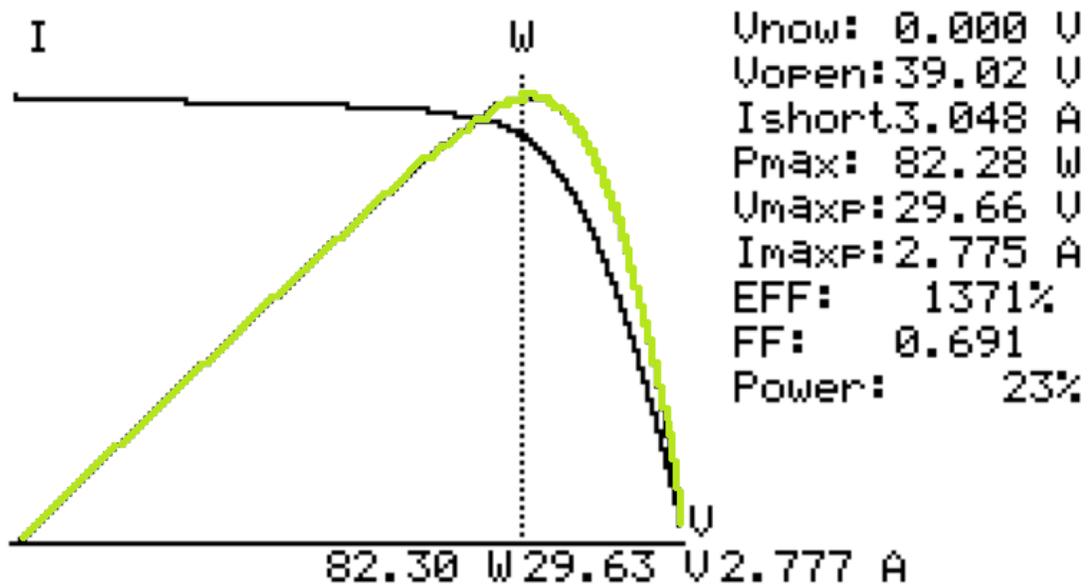


Figura 72. Curva P-V mostrada en amarillo.

3.2.3 Voltaje de máxima potencia (Vmp).

El voltaje de máxima potencia se obtiene directamente de la gráfica que el analizador solar obtuvo, dando como resultado:

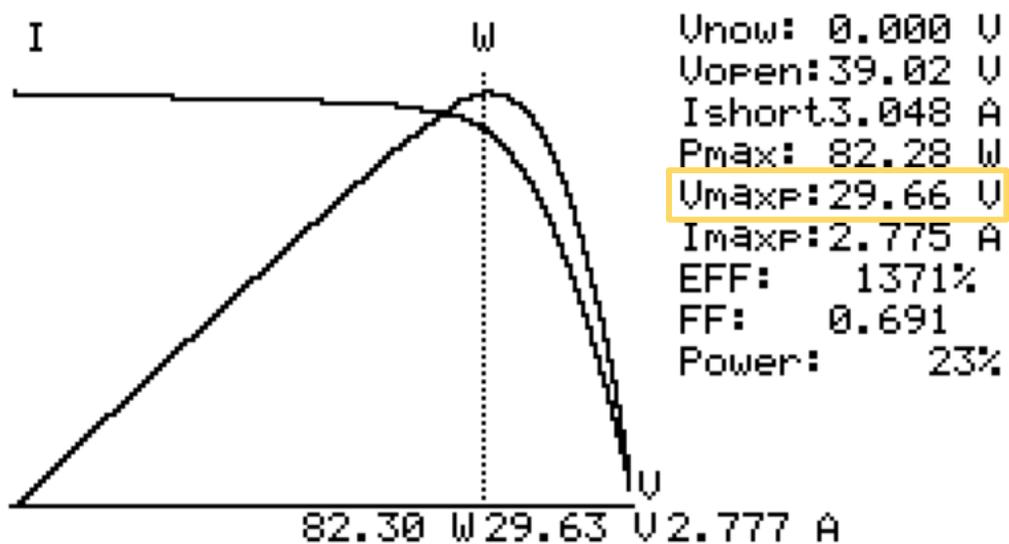


Figura 73. Voltaje máximo obtenido de AMPROBE solar-600.

3.2.4 Corriente de máxima potencia (I_{mp}).

La corriente de máxima potencia se obtiene directamente de la gráfica que el analizador solar obtuvo, dando como resultado:

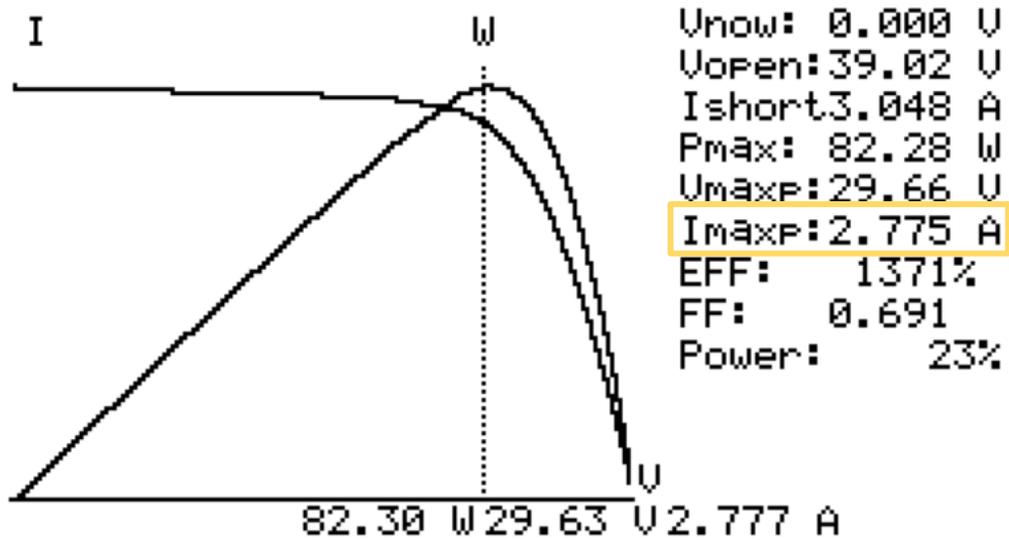


Figura 74. Corriente máxima obtenido de AMPROBE solar-600.

3.2.5 Potencia máxima (Pmp).

La potencia máxima se obtiene directamente de la gráfica que el analizador solar obtuvo, dando como resultado:

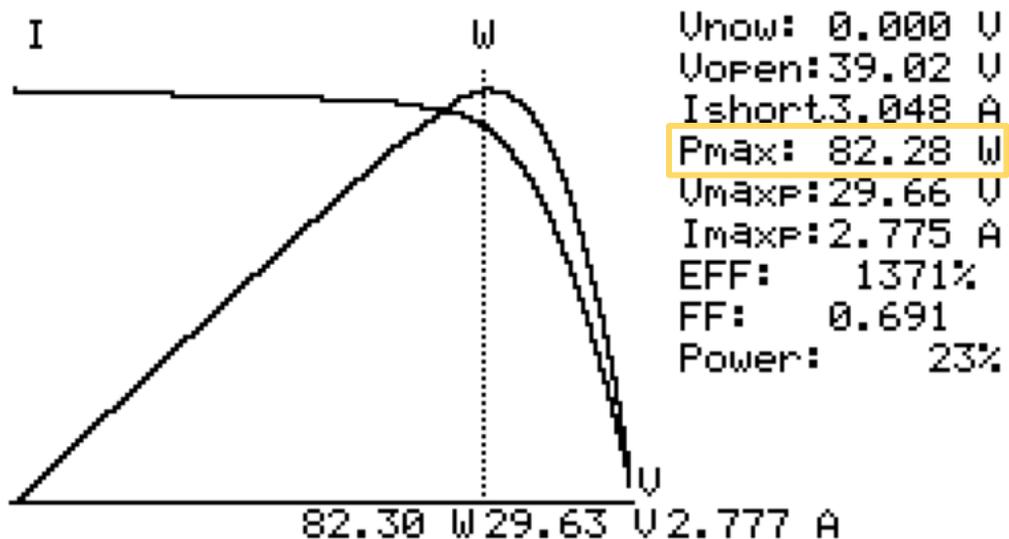


Figura 75. Potencia máxima obtenido de AMPROBE solar-600.

3.2.6 Factor de forma (FF).

Para corroborar el factor de forma obtenido mediante el analizador solar se utiliza la siguiente ecuación:

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

$$FF = \frac{29.66 \cdot 2.775}{39.02 \cdot 3.048}$$

$$FF = 0.692$$

3.2.7 Rendimiento (η).

El rendimiento del panel se obtiene con la siguiente formula:

$$\eta = \frac{P_{max}}{A \cdot G} \cdot 100\%$$

Donde:

η : eficiencia del panel en %.

A: área del panel en m² = 1.277 m².

G: irradiancia solar en W/m² (obtenida del piranómetro) = 1020 W/m².

P_{max}: potencia máxima del panel (obtenida del analizador solar) = 82.28 W.

$$\eta = \frac{82.28}{1.277 \cdot 1020} \cdot 100$$

$$\eta = 6.317 \%$$

Por lo tanto, se hizo una comparación de los datos que nos proporciona el fabricante con respecto a los datos obtenidos del analizador solar y se presentan a continuación:

	Datos de fabricante.	Datos de analizador.
Voc	45.0 V	39.02 V
Isc	5.40 A	3.048 A
Vmp	37.8 V	29.66 V
Imp	4.90 A	2.775 A
Pmp	185.22 W	82.28 W
FF	0.762	0.691
η	14.219%	6.317 %

Al realizar la comparación se observa que los datos proporcionados por el fabricante son relativamente iguales a los obtenidos a través del analizador solar, por lo que se determina que el panel solar aún se encuentra en buenas condiciones.

4. DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA UN BANCO DE PRUEBAS DIDÁCTICAS.

4.1 Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico.

Debido al objetivo de enseñar el funcionamiento de un sistema fotovoltaico, la complejidad de este es muy baja. Las protecciones de todo el sistema tendrán un 50% adicional en el parámetro de corriente para las conexiones del sistema para la seguridad del mismo. La elección del inversor y regulador dependerán del modelo del módulo, que en nuestro caso es de 185 W MONTELEC RDM-185M. Se entrará a más detalle en los siguientes apartados para los correspondientes componentes de un sistema fotovoltaico.

4.2 Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico.

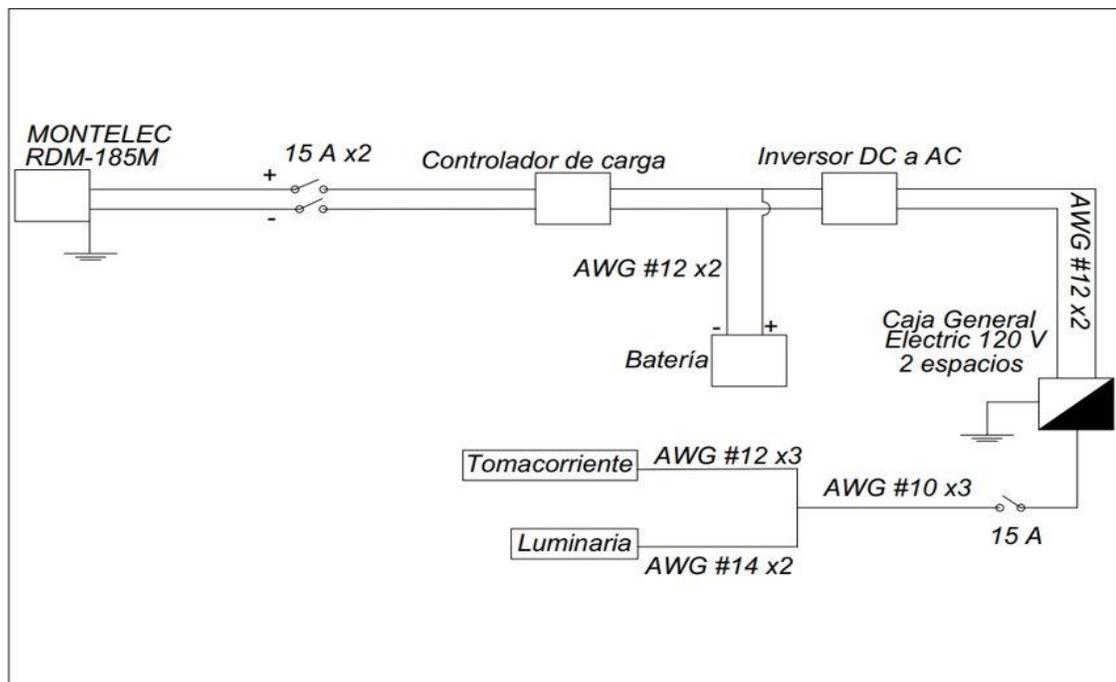


Figura 76. Diagrama Unifilar.

4.3 Panel fotovoltaico.

Para dimensionar la capacidad del panel o paneles a utilizar se debe considerar la potencia que se requiere producir; de ser más de un panel se debe considerar la conexión entre ellos que tiene influencia directa aumentando el voltaje si la conexión es en serie o produciendo una mayor potencia si la conexión es en paralelo, además tener la caracterización del recurso solar promedio disponible. Una consideración importante para dimensionar es elegir el tipo de celda, que posee cada una una característica específica que se adecuan a las condiciones climáticas donde estarán instaladas. Las consideraciones son relevantes para que la producción sea óptima y segura.

El objetivo del trabajo se limita a un banco de pruebas por lo que no se requiere una potencia específica. Pero si se debe cumplir con las características de paneles que suelen encontrarse en el campo laboral, y con existencia en el mercado, por ello se elige el panel del cual se consideraran sus características técnicas para los cálculos y luego verificar la disponibilidad en el capítulo posterior o elegir uno que se asemeje:

MONTELEC RDM-185M

Las características técnicas del panel solar son las siguientes:

RDM-185M	
Potencia	185 W
Tipo de celda solar	Monocrystalino
Vmp	37.8 V
Imp	4.9 A
Voc	45 V
Isc	5.4 A
Voltaje máximo en sistema	1000 V (IEC)
Máxima capacidad para fusibles	10 A
Dimensiones	1580x808x35 mm
Peso	15 Kg
Tolerancia de salida	0~+3%
Prueba en condición estándar (STC)	1000 W/m ² 25°C AM 1.5
Temperatura de funcionamiento	-40°C a +85°C
Garantía de rendimiento	10 años > 90% 25 años > 85%
ISO9001, TUV, CEC, IEC61215, IEC61730, CE	

Figura 77. Ficha técnica de panel.

4.4 Regulador de carga.

Utilizado para regular el flujo de energía proveniente de los paneles solares hacia las baterías, de una forma óptima y protegiendo al sistema de acumulación de sobre cargas, lo realiza mediante el control de los parámetros de corriente y voltaje. El flujo de energía depende del estado de carga de las baterías y de la energía generada por el panel solar. Cabe agregar que este equipo se enfoca en la protección de las baterías, para que no sufran una descarga total y que estén cargadas completamente y cumplan su papel cuando este sea requerido.

Se debe cumplir las siguientes condiciones:

$$V_{OC Max SFV} \leq V_{MaxRegulador}$$

$$45 V \leq V_{MaxRegulador}$$

$$I_{SC SFV} \leq I_{MaxRegulador}$$

$$5.4 A \leq I_{Maxregulador}$$

4.5 Banco de baterías.

Para un mejor calculo, la selección de días de autonomía por parte del banco debe ser respaldados en información de los días consecutivos donde exista mal tiempo y por ende mala producción por parte del panel. Para este trabajo, además de ser simple y sin gran consumo de energía se asumieron los días consecutivos.

Si asumimos que la duración aproximada de uso del foco y del tomacorriente es 1h en ambos equipos, el consumo total es de 300 Wh, considerando una profundidad de descarga de la batería de un 50% y asumiendo 2 días de autonomía, se tiene:

$$Almacenamiento = \frac{Consumo}{Profundidad de descarga}$$

$$Almacenamiento = \frac{600}{0.5} = 1200 Wh$$

Se tiene un sistema a 12 V.

$$Ah = \frac{Almacenamiento}{V_{sistema}}$$

$$Ah = \frac{1200}{12} = 100 Ah$$

Se decide seleccionar 1 batería de 100 Ah a 12 V. Esta estará en los anexos con la cotización que se realizó en Montelec.

4.6 Inversor.

Los inversores se encargan de transformar la corriente directa de un panel fotovoltaico en corriente alterna, para poder tener acceso a la energía y poder utilizarla en los diferentes equipos electrónicos. Al igual que los reguladores las condiciones que se deben cumplir.

$$V_{OC Max SFV} \leq V_{MaxInversor}$$

$$45 V \leq V_{MaxInversor}$$

$$I_{SC SFV} \leq I_{MaxInversor}$$

$$5.4 A \leq I_{Max inversor}$$

4.7 Protecciones y cableado

La salida del módulo FV hacia el inversor y regulador de carga debe ir protegida por si se llega a dar alguna falla en el sistema, así como del lado AC del inversor se va a simular una carga de tipo residencial como lo es un tomacorriente a 120 V y una luminaria para efectos de demostración. Por lo que llegamos a los siguientes cálculos:

Salida del módulo: bajo el parámetro del módulo de la corriente de cortocircuito que es de 5.4 A, la protección resulta en:

$$I = I_{sc} * 1.5$$

$$I = 5.4 A * 1.5$$

$$I = 8.1 A$$

Bajo el rango de capacidades de interruptores térmicos el mercado eléctrico en El Salvador, se instalará un interruptor térmico General Electric de 15 A en la salida negativa y positiva del módulo FV.

Respecto al cableado a la salida del módulo, debemos utilizar uno que sea de seguridad para resistir tanto la corriente de cortocircuito y los 15 A del interruptor térmico, el cable AWG #12 soporta hasta 25 A, por lo que es el más óptimo para este apartado.

Salida del inversor hacia carga en AC:

Las potencias de luminarias y tomacorrientes se manejan de 100 W y 200 W respectivamente, debido a que es un sistema simple, se conectaran a un solo interruptor termomagnético quedando en circuito mixto. Si el voltaje del sistema es de 120 V, se encontrará la corriente con la siguiente ecuación:

$$P = VI\cos(\theta)$$

Asumiendo el $\cos(\theta)=1$, y despejando para I quedaría de la siguiente manera:

$$I = \frac{P}{V}$$

Sustituyendo datos:

$$I = \left(\frac{300 \text{ W}}{120 \text{ V}} \right)$$

$$I = 2.5 \text{ A}$$

Este valor por un 50% de factor de seguridad, quedaría:

$$I = 2.5 \text{ A} \cdot 1.5$$

$$I = 3.75 \text{ A}$$

En conclusión, por la poca carga y rango de capacidades de interruptores térmicos el mercado eléctrico en El Salvador, se instalará un interruptor térmico General Electric de 15 A.

Para el cableado de este apartado, la carga no es muy grande ni mucho menos exigente por lo que de igual forma se utilizará el cable AWG #12 para la alimentación del sistema AC que se tenga. Por seguimiento de prácticas en instalaciones eléctricas en el país, también se utilizará cable AWG #14 para luminaria y cable AWG #12 para unidad de tomacorrientes.

5. ANÁLISIS DE COSTOS.

5.1 Cotizaciones.

5.1.1 Cotización en taller

Taller Industrias F&F ubicada en Metapán, Santa Ana entregó una cotización que incluye mano de obra y materiales de \$271.20.

5.1.2 Ferreterías

Se cotizaron los precios de las partes eléctricas y los componentes eléctricos del banco, a la fecha de este proyecto se encontraron los diversos precios:

Componente	Freund	Vidrí
Cable #12 rojo, negro, blanco, verde	\$0.56/m	\$0.50/m
Cable #14 negro, blanco, amarillo	\$0.41/m	\$0.35/m
Cable #10 negro, blanco, verde	\$0.84/m	\$0.85/m
Tecno ducto 1/2 in	\$0.47/m	\$0.48/m
Toma corriente	\$3.55/unidad	\$3.55/unidad
Varilla Copperweld 1/2 in x 5 ft con cepo	\$9.20/unidad	-
Varilla Copperweld 1/2 in x 6 ft con cepo	-	\$10.70/unidad
Caja rectangular plástica	\$0.50/unidad	\$0.50/unidad
Interruptor sencillo	\$1.5/unidad	\$1.75/unidad

Receptáculo	\$0.70/unidad	\$0.75/unidad
Caja octogonal	\$0.55/unidad	\$0.55/unidad
Foco LED	\$1.80/unidad	\$1.58/unidad
Caja térmica 120 V de 2 circuitos GE	\$38.00/unidad	\$35.95/unidad
Interruptor térmico GE 15 A	\$7.25/unidad	\$7.25/unidad
Cinta aislante 3M	\$1.75/unidad	\$1.75/unidad
Perno 1 in x 5 in con tuerca	-	\$8.80/unidad

5.1.3 Montelec

Se realizó una cotización y en los anexos se encuentra mayor detalle.

5.1.4 Otros elementos

Para los siguientes elementos, se hizo uso de la red para consultar los precios, por ende, los enlaces directos se encuentran en el apartado de bibliografía de este documento.

- Cámara térmica Flir E4 cotizada en Amazon.
- Analizador solar cotizado en Octopar.com
- Piranómetro cotizado en DJB microtech LTD
- Multímetro cotizado en Freund.

5.2 Selección de elementos.

5.2.1 Base

Para la base del banco didáctico se tomaron ideas de imágenes de documentos consultados y de la experiencia de uno de los integrantes de este grupo que ha visto un banco parecido en un curso de electricidad. Las medidas se detallan en los planos del Anexo B, de manera breve se describe que la estructura que soportara la base del panel y el panel mismo se tendrá una mesa de trabajo en el mismo banco y una base para que las baterías puedan estar ubicadas. La selección del acero que se hizo uso, será acero comercial que venden la mayoría de ferreterías.

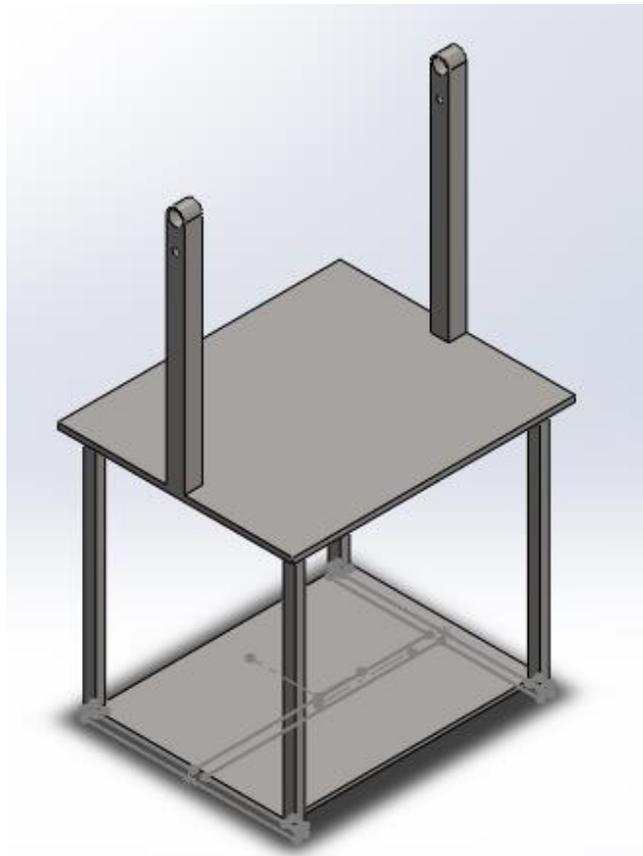


Figura 78. Base.

5.2.2 Base de panel

Este elemento cumple la función de retener el panel, quedará descansando en la base y podrá rotar de 0 a 13.7 grados, esto con el objetivo que los estudiantes o interesados puedan observar la importancia que tiene que los rayos solares impacten perpendicularmente a las células.

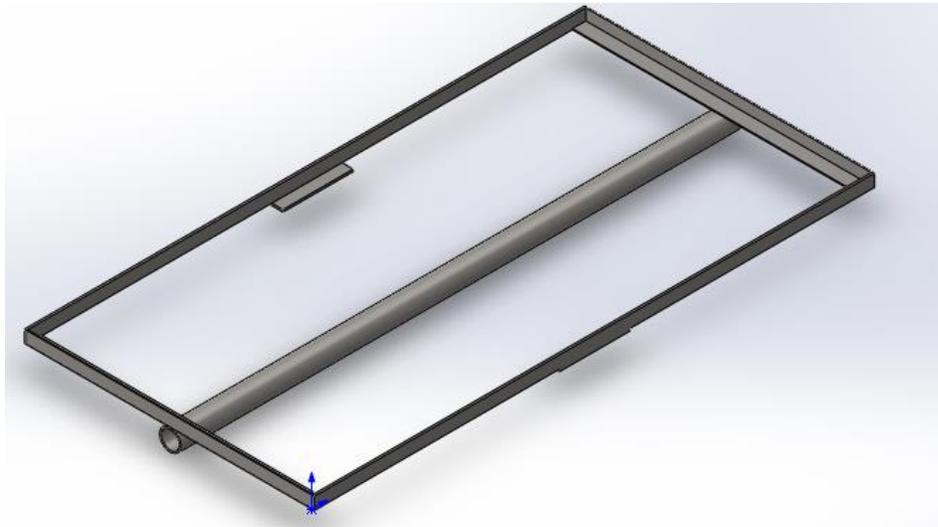


Figura 79. Base para panel.

5.2.3 Modificador de ángulo.

Este accesorio se diseñó para poder modificar el ángulo de inclinación del panel, irá colocado en el tubo de la base del panel para que a la hora de retener el ángulo se haga mediante un perno. Las siguientes imágenes dan la representación de cómo se observaría en la vida real.

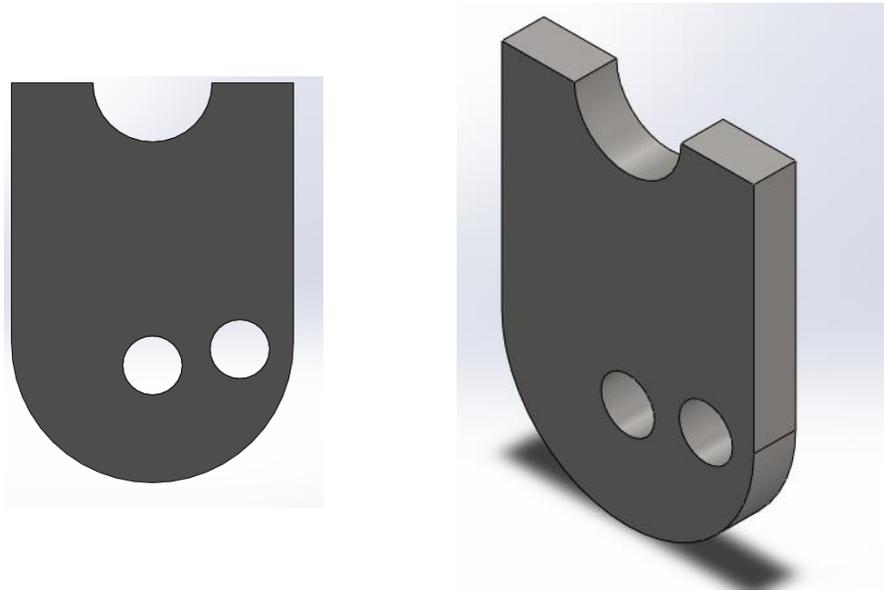


Figura 80. Modificador de ángulo de incidencia para el panel.

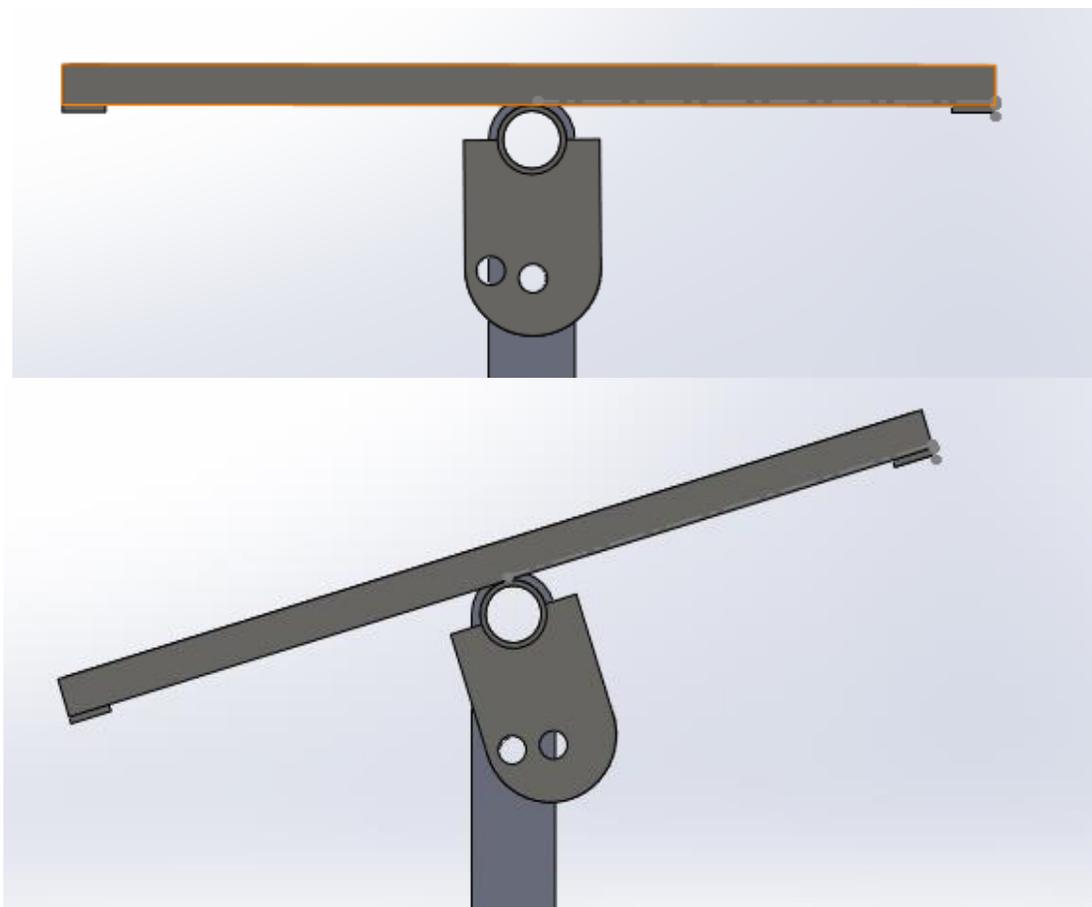


Figura 81. Vista lateral de modificador de ángulo.

5.2.4 Marco para colocación de equipos del sistema FV.

Los equipos del sistema FV y también los equipos que simulará una carga residencial irán debajo de la base del panel como lo muestra la imagen:



Figura 82. Vista preliminar del banco.

No es obligatorio que sea madera como lo muestra la figura, más bien solo es la representación del lugar donde irán los equipos, es decisión propia de quien siga o tome de ejemplo este trabajo la elección sobre el tipo de material que colocará para soporte de los equipos necesarios para el sistema FV.

5.2.5 Análisis de perno.

El perno solo funcionará de retenedor de ángulo, ya que el modificador de ángulo estará soldado al tubo de la base del panel y este mismo tubo descansará en la parte superior de la base del banco, por lo que fuerzas grandes no estará

soportando el perno. A continuación, se hará un análisis de fuerzas para encontrar el diámetro del perno más adecuado.

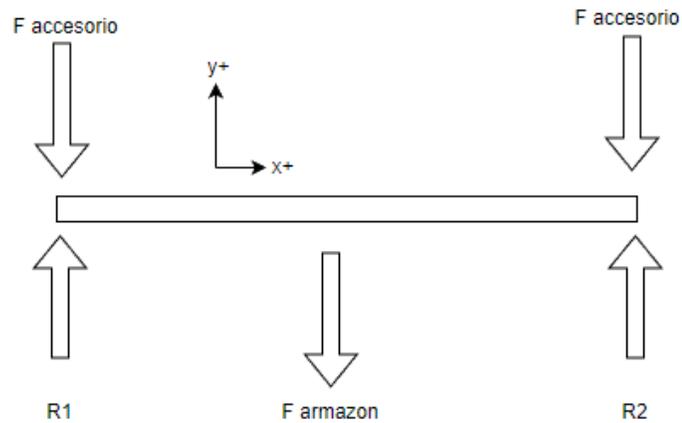


Figura 83. DCL representativa de fuerza para el perno.

Donde:

$$F_{armazón} = (m_{armazón} + m_{panel}) * 9.8$$

$$F_{armazón} = (20.32 \text{ kg} + 15 \text{ kg}) * 9.8$$

$$F_{armazón} = 346.136 \text{ N}$$

$$F_{accesorio} = m_{accesorio} * 9.8$$

$$F_{accesorio} = 2.69 \text{ kg} * 9.8$$

$$F_{accesorio} = 26.362 \text{ N}$$

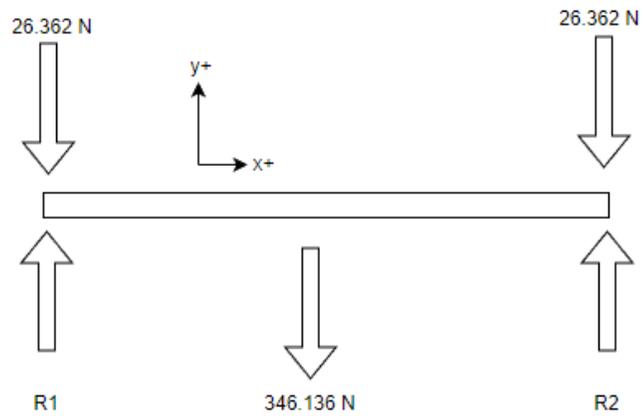


Figura 84. DCL con valor de fuerzas que actúan sobre el perno.

Haciendo sumatoria de fuerzas y teniendo una distribución simétrica, cada perno estará bajo una carga de:

$$R_1 = R_2 = 2R$$

$$\sum F_y = -346.136 - 2(26.362) + 2R = 0$$

$$R = 199.43 \text{ N}$$

Considerando que la única carga cortante que actuará en el perno será cuando el panel sea rotado a 13.7° , el DCL quedaría:

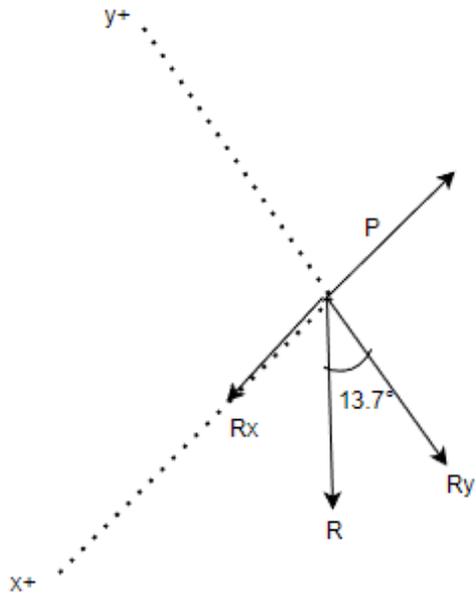


Figura 85. DCL de fuerza resultante que actúa sobre el perno.

Haciendo sumatoria de fuerzas se tiene lo siguiente:

$$\sum F_x = -P + R \text{sen}(13.7) = 0$$

$$P = 199.43 \text{sen}(13.7)$$

$$P = 47.232 \text{ N}$$

Hacemos el cálculo con ecuaciones y tabla de Shigley:

$$\tau = \frac{P}{A} = \frac{S_{sy}}{n}$$

$$S_{sy} = 0.577 * S_y$$

Tabla 8-11

Clases métricas de propiedad mecánica de pernos, tornillos y birlos de acero*

Clase de propiedad	Intervalo de tamaños, inclusive	Resistencia de prueba mínima,† MPa	Resistencia mínima a la tensión,† MPa	Resistencia mínima a la fluencia,† MPa	Material	Marca en la cabeza
4.6	M5-M36	225	400	240	Acero de bajo o medio carbono	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Acero de bajo o medio carbono	

Figura 86. Propiedades mecánicas de pernos, obtenido de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 8va Edición.

De la Figura 86 utilizaremos el valor para S_y de 400MPa.

$$S_{sy} = 0.577 * 400 = 230.8 MPa$$

A continuación, se procede a utilizar la ecuación planteada anteriormente y despejar la variable "A", la cual nos indica el área del perno.

$$\frac{P}{A} = \frac{S_{sy}}{n}$$

$$A = \frac{P * n}{S_{sy}}$$

$$A = \frac{47.232 * 1.5}{230.8 * 10^6} = 3.06 * 10^{-7} m^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 3.06 * 10^{-7}}{\pi}} = 0.624 mm$$

Con el diámetro calculado, concluimos que un perno de 1 pulg sería conveniente colocar ya que este estaría sobrado para la finalidad de retención del panel.

5.2.6 Inversor.

En la red, se encuentran numerosos tipos de inversor y con diferentes capacidades, esto va acorde a las condiciones que reúna al sistema en AC en el cual estaremos conectado el sistema FV. Algunos ejemplos de inversores son para fuera o dentro de la red eléctrica, en nuestro caso como estaremos aislados de la red nos conviene los siguientes tipos de inversores: inversor de onda pura, capacidad de 500 a 3000 W a 12, 24 o 48 V, según sea la necesidad del sistema FV. Nuevamente, el tipo a utilizar va a depender de la tensión de nuestro sistema de baterías. Para este trabajo se utilizará el de la siguiente imagen:



Figura 87. Inversor de onda pura Montelec, 500 W a 12 V.

5.2.7 Regulador de carga.

Al igual que los inversores, los reguladores de carga dan un amplio rango de selección de acuerdo con nuestro sistema FV, hay tanto análogos como digitales, varían según la tensión del banco de baterías y la corriente máxima que estos pueden soportar. Se utilizará el siguiente regulador para este proyecto:



Figura 88. Controlador de carga análogo MPPT 12-24 V / 60 A.

5.2.8 Baterías.

Para la selección del banco, lo importante es saber los Ah (amperio-hora) que necesita la carga a la cual se va a conectar, también es importante saber en qué rango cae de 12, 24 o 48 V nuestro sistema. Los rangos de Ah suelen estar entre 3 a 200 Ah, dependiendo el tipo de aplicación. La facilidad que se tiene es que

estas baterías se pueden encontrar en cualquier tienda de índole automotriz, ya que las baterías de 12 V no se limitan al área solar. Según lo descrito en el capítulo 4, se utilizará la siguiente batería:



Figura 89. Batería de 12 V con 100 Ah.

5.2.9 Panel FV.

Los paneles FV varían según su fabricación y son utilizados dependiendo su objetivo. Como se explicaba en capítulos anteriores, todo dependerá si es para producción de energía conectado o fuera de la red, así el presupuesto es grande o pequeño, capacidades de 65 W hasta 450 W o más. La aplicación no solo radica en consumo propio de una residencial o la industria, o también para inyectar la red, algunas aplicaciones se ven en las carreteras donde las lámparas tienen su propio panel pequeño para subsistir de manera independiente de la red. Este trabajo utilizará el siguiente panel



Figura 90. Panel de 185 W monocristalino.

5.3 Costo total del proyecto.

5.3.1 Construcción de estructura base para panel solar.

Cantidad	Descripción	Precio (\$)
1	Mano de obra	100.75
	Materiales	
1	Lámina de hierro negro calibre 3 mm (6.56x3.28 pie)	77.75
1	Tubo cuadrado 1 ½ pulg chapa 16 (1.50 mm)	19.90
1	Tubo cuadrado 2 pulg chapa 16 (1.50 mm)	25.90
1	Rodo de espiga 40 mm (4 pzas)	6.95
1	Tubo industrial redondo 1 ½ pulg chapa 20 (0.90 mm)	8.75
	Sub-Total	240.00
	13% IVA	31.20
	Total	271.20

5.3.2 Equipo para sistema fotovoltaico.

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
1	Inversor onda pura de 12Vdc/550W/120Vac	110.00	110.00
1	Panel solar de 185 W	192.50	192.50
1	Controlador MPPT 60A (AGM, Gel y Litium) 12/24/48V	300.00	300.00
1	Batería tipo AGM 12VDC/100AH	132.00	132.00
5	Cable fotovoltaico (metro)	1.55	7.75
1	Conectores MC4 (par)	3.00	3.00
4	Riel abrazadera o grapa final (END CLAMP) 40mm	10.00	40.00
1	Riel terminal de puesta a tierra (grounding lug)	5.00	5.00
1	Riel 4.2m aluminio para panel solar	27.00	27.00
Total			707.25

5.3.3 Elementos de ferretería.

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
4	Cable AWG #12 Rojo (metro)	0.50	2.00
5	Cable AWG #12 Negro (metro)	0.50	2.50
2	Cable AWG #12 blanco (metro)	0.50	1.00
1	Cable AWG #12 verde (metro)	0.50	0.50

1.5	Cable AWG #14 blanco (metro)	0.35	0.70
1.5	Cable AWG #14 negro (metro)	0.35	0.70
1	Cable AWG #14 amarillo (metro)	0.35	0.35
2	Tecno ducto 1/2 in (metro)	0.47	0.94
1	Toma corriente (unidad)	3.55	3.55
1	Interruptor sencillo (unidad)	1.75	1.75
1	Receptáculo (unidad)	0.70	0.70
1	Foco LED (unidad)	1.58	1.58
1	Caja térmica 120 V de 2 circuitos GE	38.00	38.00
3	Interruptor térmico GE 15 A (unidad)	7.25	21.75
2	Perno 1 in x 5 in con tuerca (unidad)	8.80	17.60
1	Caja octagonal (unidad)	0.55	0.55
2	Caja rectangular (unidad)	0.50	1.00
1	Cinta aislante 3M (unidad)	1.75	1.75
1	Varilla Copperweld 1/2 in x 6 ft con cepo	10.70	10.70
1.5	Cable AWG #10 Negro (metro)	0.84	1.26
1.5	Cable AWG #10 Negro (metro)	0.84	1.26
1.5	Cable AWG #10 Negro (metro)	0.84	1.26

Total	111.4
--------------	--------------

5.3.4 Equipos especial para realizar pruebas.

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
1	Cámara térmica (unidad)	923.12	923.12
1	Analizador solar (unidad)	2299.95	2299.95
1	Multímetro (unidad)	189.00	189.00
1	Piranómetro (unidad)	140.24	140.24
Total			3552.31

5.3.5 Costo total.

Descripción	Precio Total (\$)
Construcción de estructura base para panel solar.	271.20
Equipo para sistema fotovoltaico.	707.25
Elementos de ferretería.	111.4
Equipos especial para realizar pruebas.	3552.31
Total	4642.16

Recomendaciones.

La construcción del banco y la impartición de los laboratorios pueden ser realizado en el taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica por estudiantes y puede implementarse como horas sociales para los mismos.

Lo que se desarrolló en este trabajo no significa que así tenga que hacerse, las modificaciones para el mejoramiento y optimización de recursos es bienvenida por parte de quien decida retomar esta propuesta de diseño.

La Escuela de Ingeniería Mecánica debería de realizar gestiones con las autoridades competentes y de esta manera dar seguimiento a este proyecto, ya que es de suma importancia en el aprendizaje de los estudiantes que vayan a cursar la materia de energías renovables.

Si en algún momento se llegara a tomar en cuenta la construcción de este proyecto, se tiene que involucrar a docentes y estudiantes para que se tenga un asesoramiento y/o capacitación en el desarrollo y manejo de este equipo.

Los laboratorios propuestos en este trabajo están sujetos a cambios, dependiendo de los objetivos de la materia de energías renovables o del docente encargado en esa área.

Antes de plantearse la construcción del banco de pruebas se recomienda disponer de los equipos necesarios de medición descritos en este trabajo, ya que de esta manera se garantiza la disponibilidad y el funcionamiento del banco de pruebas fotovoltaico.

La construcción del banco es deseable que se haga de manera que se pueda desmontar la base del panel para su mejor traslado y almacenamiento.

Conclusiones.

Los 5 laboratorios propuestos se han estructurado de manera que sean fáciles de llevar a cabo, tomando en cuenta todos los temas y aspectos necesarios que se abordan en dichos laboratorios.

Además del desarrollo de los laboratorios, esto incluye teoría que respecta a los fundamentos para que el laboratorio se lleve a cabo.

La propuesta de construcción del banco y sus componentes son solo la primera iteración del diseño, cualquier mejora u optimización de recurso y tiempo tanto de donde se haga la cotización de la construcción o se haga por cuenta propia es bienvenida.

Los laboratorios cuentan con aspectos del buen manejo de los equipos, señalando las partes y como estas se deben manejar para la integridad de los usuarios y del equipo mismo.

Los manuales de mantenimiento han sido incluidos en los anexos, donde se abordan puntos más que todo de mantenimiento predictivo de ciertos componentes, a los equipos de medición se hace la recomendación de seguir los manuales de usuario.

Referencias.

(2018) *Instalación y mantenimiento de paneles solares.* CFP - Ricaldone.

Amazon.com: *FLIR E4: Compact Thermal Imaging Camera with 80 x 60 ir ...*
amazon. Available at: <https://www.amazon.com/FLIR-E4-Compact-Thermal-Resolution/dp/B00IZAF3CW>.

AMPERIMETRO DIGITAL TENAZA 2000 AMPERIOS 1000 VOLTIOS TRMS.
Freundferreteria.com. Available at:
<https://www.freundferreteria.com/Productos/Detalle/3284a1d2-95dc-49b5-836e-9da8e3f346bb?producto=amperimetro%20digital%20tenaza%202000%20amperios%201000%20voltios%20trms>.

Bayod Rújula, Á.A. (2009) *Energías renovables - Sistemas fotovoltaicos.* 1ª edición.

Chafoya Castro, P.J., Larios Rivera, E. and Torres García, J.I. (2021) *Análisis comparativo de la utilización de módulos fotovoltaicos bifaciales con respecto a los tradicionales.* Tesis.

Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV). Parte 2: Requisitos para ensayos. (2010) Oficinas de estándares de India.

Curso Solar Radiación Solar. Disponible en:
http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/2_radiacion_00.htm.

Célula fotovoltaica - *Enciclopedia de Energía.* Disponible en:
https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/C%C3%A9lula_fotovoltaica.

Fernández, P.P.-B. (2022) *¿Cuál es el futuro de la energía solar fotovoltaica?,* POWEN. Disponible en: <https://powen.es/futuro-energia-solar-fotovoltaica/>.

Gimeno Sales, F.J., Orts Grau, S. and Seguí Chilet, S. (2014) *Módulos FOTOVOLTAICOS. Unidad 2 Curso Energía Solar Fotovoltaica Una Apuesta de Futuro sostenible.* Universidad Politécnica de Valencia - Trina Solar. Disponible en: <https://docplayer.es/17971156-Modulos-fotovoltaicos-unidad-2-curso-energia-solar-fotovoltaica-una-apuesta-de-futuro-sostenible-universidad-politecnica-de-valencia-trina-solar.html>.

Handheld pyranometer. Pyranometer. Available at:
https://www.djb.co.uk/ppen_pyranometer.html.

Lamaison Urioste, R.M. (2009) *Energía Solar Fotovoltaica ESF.*, 1Library.Co. Departamento d'Enginyeria Electrónica-UPC. Disponible en: <https://1library.co/document/ye3d27eq-energia-fotovoltaica-rafael-martin-lamaison-urioste-enginyeria-electronica.html>.

Las principales ventajas y desventajas de la Energía Solar (2021) TotalEnergies. Disponible en: <https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/ventajas-desventajas-energia-solar>.

Matriz de Generación. Estadísticas - Consejo Nacional de Energía. Disponible en: <https://estadisticas.cne.gob.sv/mercado-electrico/matriz-generacion/>.

Mendoza Jiménez, I.D. and Torres Suárez, E.A. (2019) *Construcción de un banco de pruebas SFV para el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás Tunja.* Tesis.

Pastrán, R.M. (2022) *BCIE Aprueba préstamo de \$100 millones para la cel, La Prensa Gráfica. Noticias de El Salvador - La Prensa Gráfica.* Disponible en: <https://www.laprensagrafica.com/economia/BCIE-aprueba-prestamo-de-100-millones-para-la-CEL-20221101-0081.html>.

Solar Technology El Salvador energía solar. ANTECH EL SALVADOR. Disponible en: <https://www.antechsv.com/2010/05/blog-post.html>.

Solar-600 amprobe - distributors, price comparison, and datasheets: Octopart Component Search. Octopart. Available at: <https://octopart.com/solar-600-amprobe-20204391>.

Staff, F. (2022) *Inversión en el Salvador: Construirán Planta fotovoltaica de 200 MDD, Forbes Centroamérica • Información de negocios y estilo de vida para los líderes de Centroamérica y RD.* Disponible en: <https://forbescentroamerica.com/2022/06/28/inversion-en-el-salvador-construiran-planta-fotovoltaica-de-200-mdd>.

Staff, F. (2022) *Mercado en verde: Impulsa flexibilidad en China ¿Rebote o avance duradero?, Forbes Centroamérica • Información de negocios y estilo de vida para los líderes de Centroamérica y RD.* Disponible en: <https://forbescentroamerica.com/2022/06/28/mercado-en-verde-impulsa-flexibilidad-en-china-rebote-o-avance-duradero%ef%bf%bc>.

Una colección de recursos para el educador fotovoltaico. PVEducation. Disponible en: <https://www.pveducation.org/>.

Vivanco Font, E. (2020) *Energías renovables y no renovables - Ventajas y desventajas de ambos tipos de energía.* Disponible en:

[https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29102/1/BCN Energia renovable y no renovable ventajas y desventajas final.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29102/1/BCN_Energia_renovable_y_no_renovable_ventajas_y_desventajas_final.pdf).

¿Qué tipos de baterías existen? (2020) Autosolar. Disponible en: <https://autosolar.es/baterias-placas-solares/tipos-baterias-solares>.

Términos básicos para el diseño de sistemas fotovoltaicos-paneles solares. Disponible en: <https://www.electrilocada.com/terminos-diseno-fotovoltaico-paneles-solares/#voc>.

Anexos.

Anexo A: Laboratorios a realizar.

Laboratorio 1. Caracterización del recurso solar.

Laboratorio 2. Mediciones eléctricas básicas para paneles fotovoltaicos.

Laboratorio 3. Obtención de curvas características para paneles fotovoltaicos

Laboratorio 4. Aislamiento eléctrico.

Laboratorio 5. Prueba de resistencia de paso de corriente a tierra.

**Universidad de El Salvador.
Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
Escuela de Ingeniería Mecánica.
Departamento de Energías Renovables.**



Laboratorio 1: Caracterización del recurso solar.

Nombre: _____ **Fecha:** _____

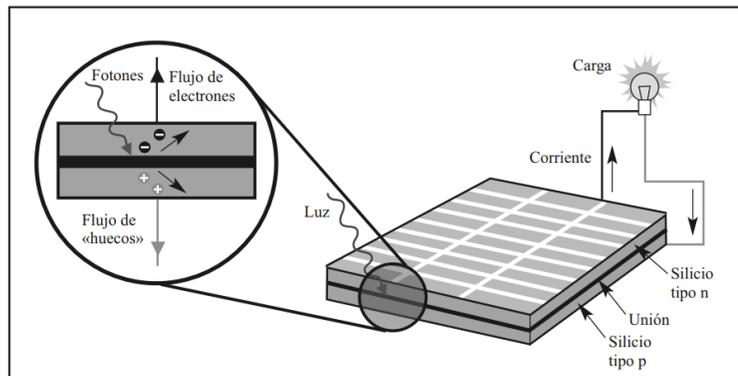
Objetivos:

- Conocer el funcionamiento detrás de los paneles FV.
- Familiarizarse con los términos y equipos relacionados a los paneles FV.

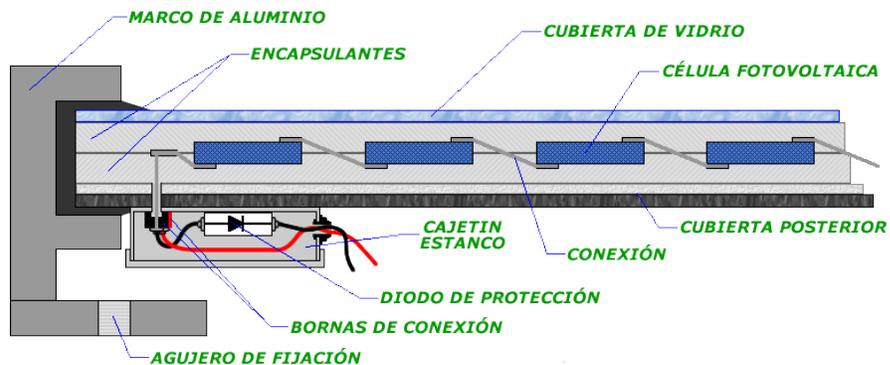
Generalidades:

Energía solar: es la energía proveniente de la radiación electromagnética del Sol. Se usa directamente mediante las tecnologías desarrolladas para este fin. Esta energía, en forma de calor y luz, puede aprovecharse por medio de células fotoeléctricas, heliostatos o colectores solares, que la convierten en energía eléctrica o térmica.

El efecto fotovoltaico se produce al incidir la radiación solar (fotones) sobre los materiales semiconductores. La energía que reciben estos provenientes de los fotones, provoca un movimiento caótico de electrones en el interior del material.



ELEMENTOS DE UN PANEL FOTOVOLTAICO

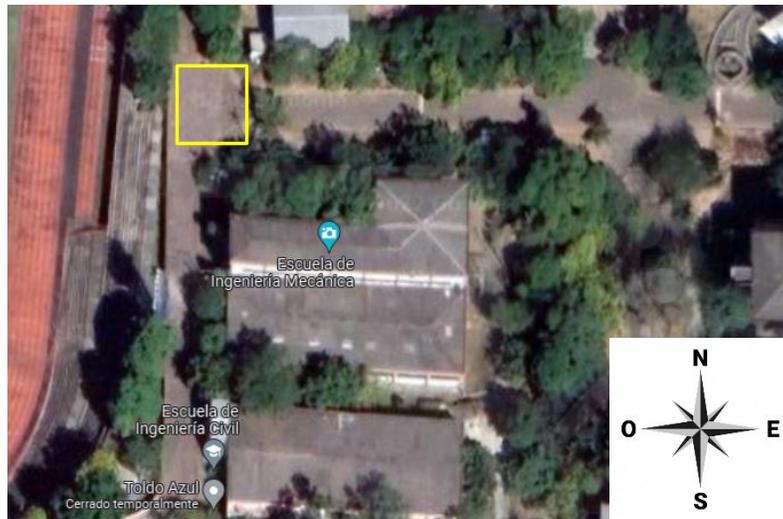


Materiales y equipo:

- Banco de pruebas de paneles FV.
- Medidor de irradiancia solar (Piranómetro).
- Lápiz o lapicero para anotaciones (ultima hoja de este documento).
- Escobilla limpia vidrios.
- Cámara termográfica.

Desarrollo:

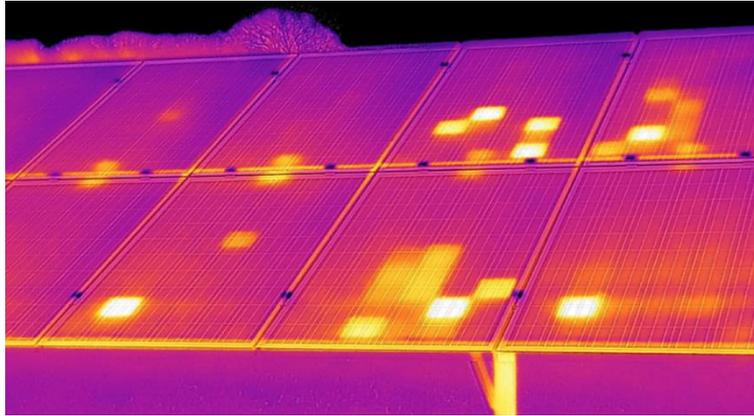
- Ubicar el banco de prueba en un lugar adecuado que se encuentre libre de sombras.



- Realizar una inspección visual del estado del panel mediante los pasos siguientes:
 - Verificar que la cubierta de vidrio que protege las celdas no tenga ninguna grieta o esté quebrado.



- Verificar que la caja de conexión y los cables a la salida del panel no presenten roturas.
- Con la ayuda de la cámara termográfica verificar que no exista ningún punto caliente.



- Si no presenta grietas o algún desperfecto se procede a la limpieza. Con agua y la escobilla ir removiendo cualquier suciedad adherida al vidrio del panel.



- Colocar del piranómetro paralelo al plano del módulo.
- Asegurar que el módulo esté configurado a 13.7° (valor de latitud para El Salvador) para que los rayos del sol sean perpendiculares al módulo.
- Realizar cinco mediciones del piranómetro y anotar los datos en la siguiente tabla siguiendo los pasos:
 - Para la primera lectura esperar un lapso de cinco minutos.
 - Seguir tomando lectura del piranómetro con un lapso de tres minutos cada uno hasta completar la tabla.
- Por último, anotar la hora y la temperatura en el panel para cada lectura de irradiancia tomada.

Medición de irradiancia.

Lectura	Hora	Irradiancia (W/m ²)	Temperatura (°C)
1			
2			
3			
4			
5			

Universidad de El Salvador.
Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
Escuela de Ingeniería Mecánica.
Departamento de Energías Renovables.



Laboratorio 2: Mediciones eléctricas básicas para paneles fotovoltaicos.

Nombre: _____ Fecha: _____

Objetivo:

- Tomar lectura de las mediciones que los paneles FV nos brindan para recolectar datos y posteriormente analizarlos.

Generalidades:

Irradiancia: es la cantidad de radiación solar que cae sobre un área particular en un momento dado. Es una medida de potencia. Su unidad es W/m^2 .

Irradiación: es una medida de la energía solar, es la cantidad de irradiancia que hace en una ubicación de a través del tiempo. Su unidad es $kWh/m^2 \cdot día$

Voc: voltaje de circuito abierto (voltage open circuit por sus siglas en inglés) es el voltaje máximo que un módulo solar puede dar cuando no tiene carga sobre él.

Vmp: voltaje de máxima potencia (voltage maximum power por sus siglas en inglés) es el voltaje máximo que un módulo puede producir estando a carga bajo condición de prueba permanente

Imp: corriente de máxima potencia, usualmente dada por el fabricante en la ficha técnica del módulo FV.

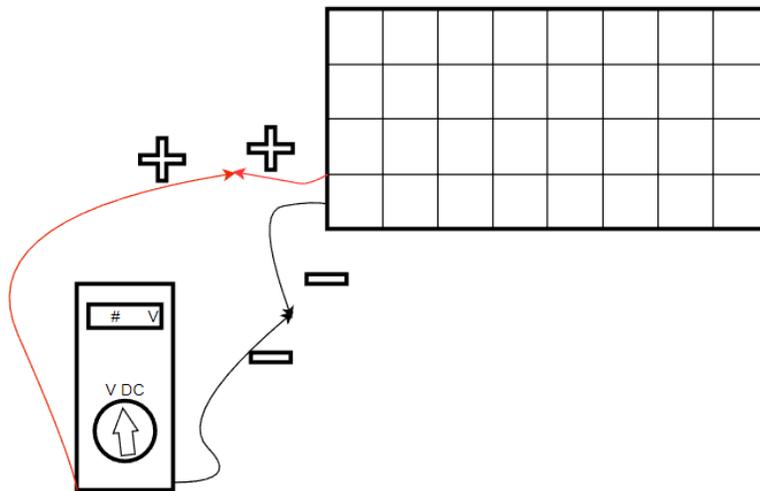
Isc: cantidad máxima de amperios que un módulo FV puede producir.

Materiales y equipo:

- Banco de pruebas de paneles FV
- Multímetro Fluke
- Lápiz o lapicero para anotaciones (ultima hoja de este documento)

Desarrollo:

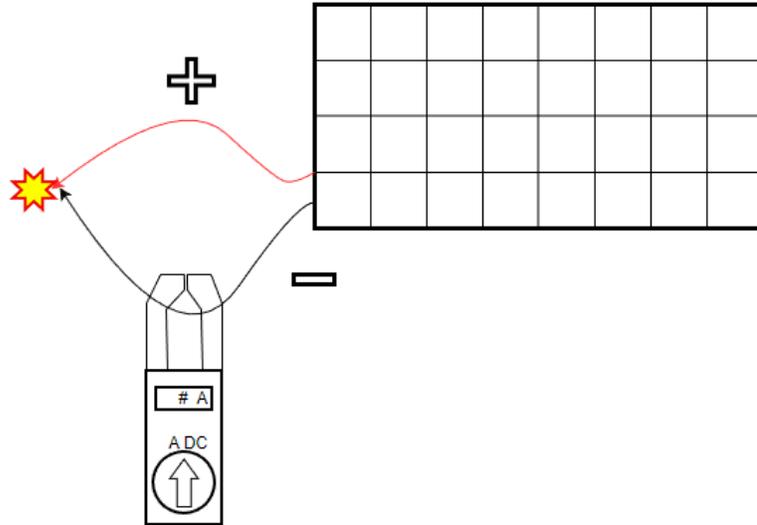
- Para la determinación del Voc necesitamos la lectura que nos brindará el multímetro. Para esto, el módulo FV debe estar en funcionamiento; en primer lugar, configuramos el multímetro a voltaje DC, luego, conectamos las terminales tanto del multímetro y del módulo (positivo con positivo y negativo con negativo) y leemos el dato del multímetro. Si en dado caso la lectura es negativa, esto quiere decir que las terminales no están conectadas correctamente. La siguiente imagen es un esquema de cómo se debe proceder.



- Para Isc medir con la tenaza para cortocircuito.

Para este apartado necesitamos una tenaza amperimétrica o algún multímetro que pueda medir corriente eléctrica. De la misma forma que el Voc, para tomar este dato necesitamos que el módulo esté en funcionamiento. Como lo dice su nombre, la corriente de corto circuito ocurre cuando las terminales positivas y negativas de los módulos hacen contacto. Entonces procedemos como en la

siguiente imagen al hacer contacto entre ambas terminales y justo en ese momento hacemos lectura con la tenaza amperimétrica.



Nota: para esta prueba se recomienda no hacer cortocircuito por mucho tiempo, ya que daña al módulo FV.

Tabla de datos medidos.

Lectura	Voltaje de circuito abierto (Voc)	Corriente de corto circuito (Isc)
1		
2		
3		
4		
5		
Prom.		

Tabla comparativa.

	Voc [V]	Isc [A]
Datos de fabricante		
Datos medidos (prom)		

**Universidad de El Salvador.
Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
Escuela de Ingeniería Mecánica.
Departamento de Energías Renovables.**



Laboratorio 3: Obtención de curvas características para paneles fotovoltaicos.

Nombre: _____ **Fecha:** _____

Objetivo

- Obtener las curvas características que muestran el comportamiento de los paneles FV que ayudan al análisis del mismo.

Generalidades:

Las curvas características PV e IV de los paneles FV son gráficas, en donde el par de puntos dentro de ella nos indican valores de V, I y P respectivamente en la gráfica que estemos utilizando, estas son de una gran utilidad cuando se desconocen los datos técnicos de los paneles que estemos trabajando.

También son de gran utilidad para saber ciertos datos; como el factor de forma, la potencia máxima, voltaje y corriente dependiendo la irradiancia y temperatura en la que estemos trabajando el panel.

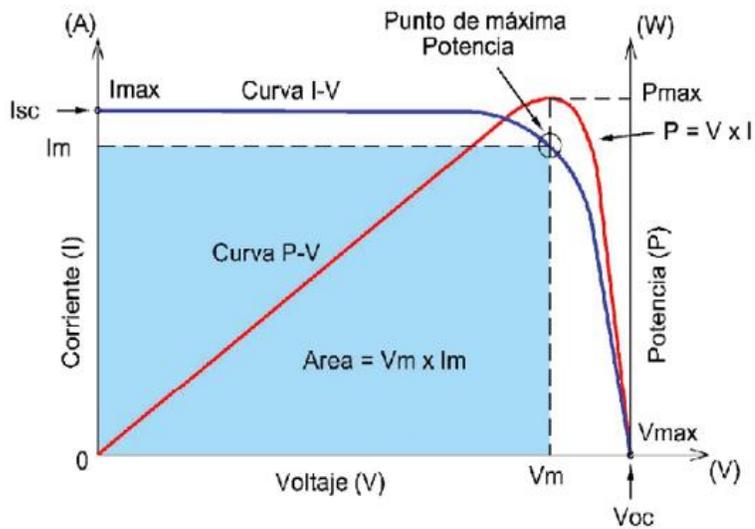


Imagen de:

<https://www.revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/70300/66831>

Materiales y equipo:

Analizador solar Amprobe solar 600.

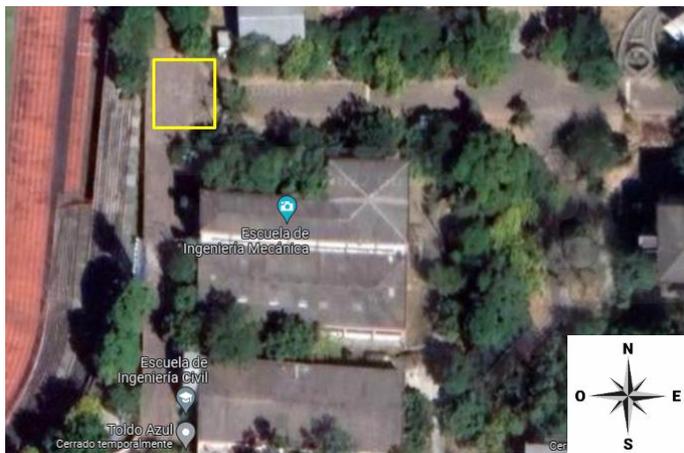
Modulo FV.

Medidor de irradiancia o piranómetro.

Cámara termográfica FLIR E4.

Desarrollo:

- Colocación del banco de pruebas en un lugar adecuado.



- Conectar el panel al analizador solar, así como se muestra en la figura.



Imagen de muestra.

- Configurar el analizador a una irradiancia de 1000 W/m².

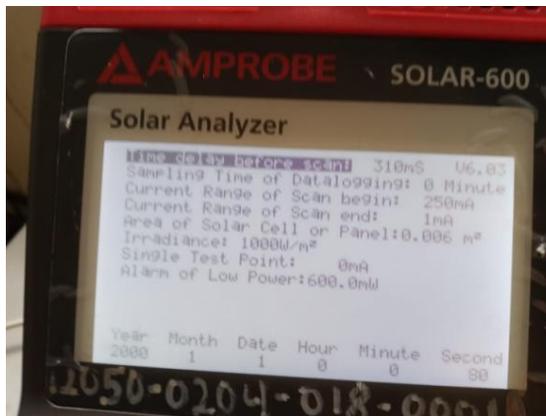


Imagen de muestra.

- Verificar con el piranómetro el nivel de irradiancia cercana a 1000 W/m² en el lugar que se realizó la prueba.



Imagen de muestra.

- Colocar el panel a la luz solar directa ya con el analizador conectado y orientarlo a un ángulo aproximado de 13.7° .

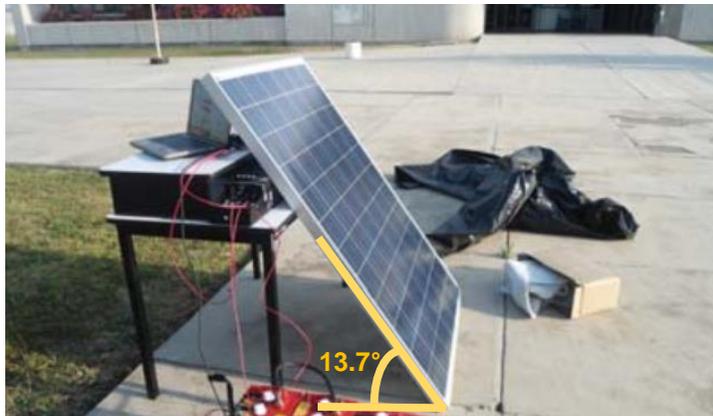


Imagen de muestra.

- Con la cámara termográfica medir la temperatura del panel y observar que esté funcionando bien.

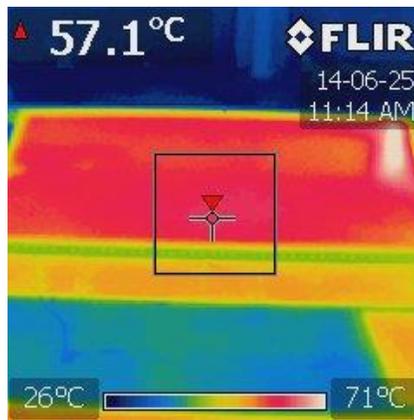


Imagen de muestra.

- Ya con los dispositivos verificados se procede a leer la medición directo del analizador solar.

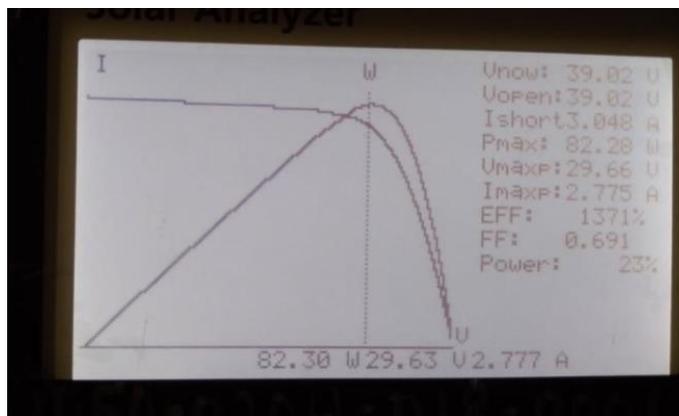


Imagen de muestra.

- Por último, anotar los datos obtenidos y compararlos con los del fabricante.

Ecuaciones a utilizar.

Factor de forma:

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

Rendimiento:

$$\eta = \frac{P_{max}}{A \cdot G} \cdot 100\%$$

Tabla comparativa.

	Datos de fabricante.	Datos de analizador.
Voc		
Isc		
Vmp		
Imp		
Pmp		
FF		
η		

Importante: para la creación del gráfico, es necesario exportar la imagen del analizador solar hacia una computadora, el aparato ya cuenta con un puerto USB para que la transferencia sea sencilla.

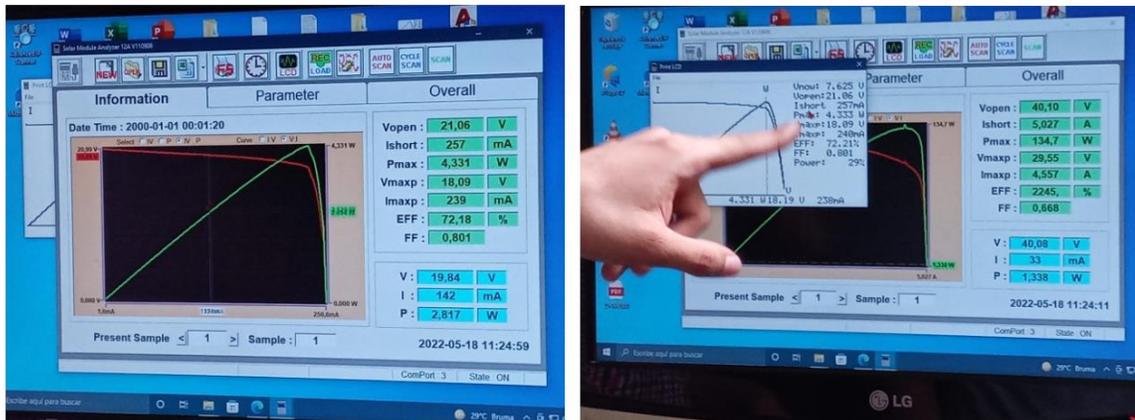


Imagen de muestra.

Universidad de El Salvador.
Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
Escuela de Ingeniería Mecánica.
Departamento de Energías Renovables.



Laboratorio 4: Aislamiento eléctrico.

Nombre: _____ **Fecha:** _____

Objetivo

- Determinar el estado del aislamiento de un módulo solar fotovoltaico.

Generalidades

El laboratorio busca comprobar si el módulo fotovoltaico está lo suficientemente aislado eléctricamente mediante la comprobación de la rigidez dieléctrica y la medición de la resistencia de aislación. El ensayo consiste en aplicar tensión eléctrica entre el marco y el circuito eléctrico del módulo y verificar que no se produzcan descargas o discontinuidad dieléctrica. La tensión aplicada es de 1000 V más el doble de la tensión de circuito abierto del sistema bajo las condiciones estándar de medida. Si la tensión del sistema no supera los 50 V la tensión aplicada debe ser de 500 V. La tensión se debe aplicar con una razón de incremento no mayor a 500 V/s y luego mantenerse durante un minuto. Posteriormente se mide la resistencia de aislamiento a una tensión igual o superior a 500 V que deberá ser igual o superior a los 50 M Ω .

Megohmetro

Utilizado para realizar mediciones de resistencia de aislamiento, normalmente resistencias elevadas que pueden alcanzar los M Ω o más.

La tensión de prueba que utilizan estos equipos es producida mediante un generador interno de manivela o mediante baterías. La medición se inicia girando la manivela del generador, si es el caso, o apretando el botón de Prueba o Test, que tienen los equipos de baterías.



Fig. 2.3 Megohmetro de manivela



Fig. 2.4 Megohmetro de baterías

Material y equipo

- Megohmetro.
- Modulo solar.
- Implemento de limpieza para modulo Solar.
- Estructura.
- Fuente de voltaje regulable.

Desarrollo

- Escribir lo datos de placa del módulo solar y condiciones específicas para el laboratorio.

P _{máx} [W]	V _{máx} [V]	I _{máx} [A]	V _{oc} [V]	I _{sc} [A]	Dimensiones [m]

Condiciones para realizar el laboratorio:

- Fijar el equipo, y limpiarlo antes de ensayar.
- Si el voltaje de circuito abierto es menor que 50V aplicar una tensión de 500V, luego mantenerse durante un minuto, entre el marco y el circuito eléctrico del módulo.

Reproducción de descargas: _____

- Si el voltaje de circuito abierto es mayor que 50V aplicar una tensión de 1000V más el doble de la tensión de circuito abierto a una razón máxima de 500V/s, luego mantenerse durante un minuto, entre el marco y el circuito eléctrico del módulo.

Reproducción de descargas: _____

- Aplicar una tensión de 500V entre el marco y el circuito eléctrico y medir la resistencia de aislamiento corroborando que esta sea mayor a 50M Ω .
- Valor de la resistencia de aislamiento:

Resistencia de aislamiento [Ω]	
---	--

**Universidad de El Salvador.
Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
Escuela de Ingeniería Mecánica.
Departamento de Energías Renovables.**



Laboratorio 5: Prueba de resistencia de paso de corriente a tierra.

Nombre: _____ **Fecha:** _____

Objetivo

- Demostrar que hay un camino conductivo entre todas las superficies expuestas conductoras en el módulo y que debido a eso ellas pueden ser conectadas a tierra adecuadamente en un sistema FV, bajo la norma IEC 61730-2.

Generalidades.

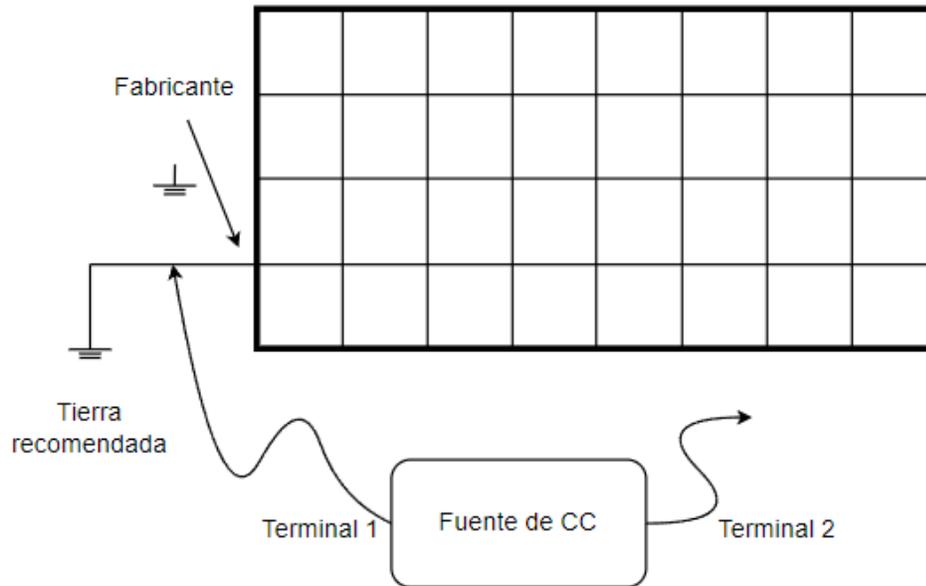
La importancia de que los equipos tengan una excelente puesta a tierra es para evitar que cualquier fallo que ocurra en la red eléctrica a la que estén conectadas o también en el mismo sistema FV en el que funcionan no involucre la integridad del mismo, para eso se ocupan los lineamientos de la norma IEC 61730-2 para que el valor encontrado de la resistencia entre las superficies expuestas sea el adecuado para el buen funcionamiento del sistema a tierra.

Equipo.

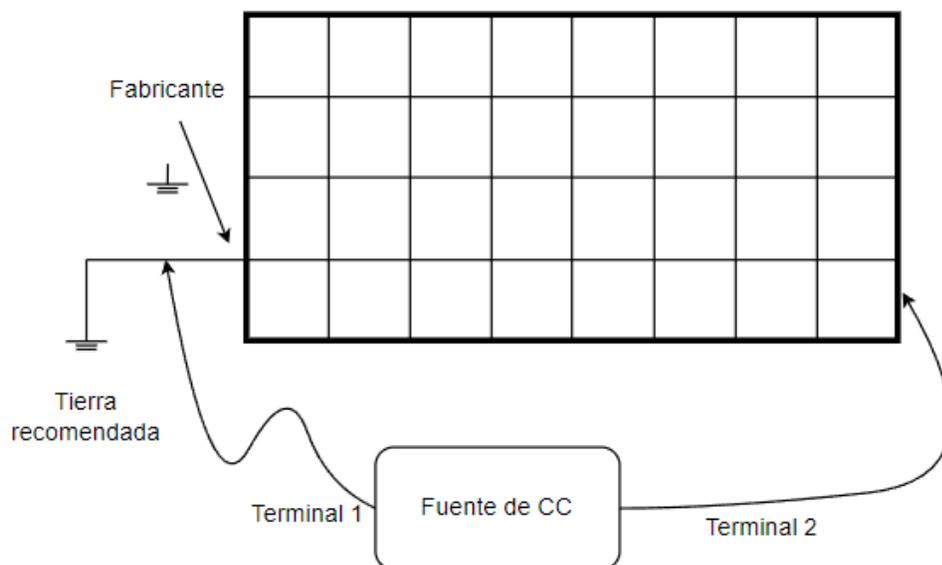
- Fuente continua de corriente constante capaz de producir la corriente 2.5 veces mayor que la clasificación de protección máxima de sobre corriente del módulo a probar.
- Un voltímetro adecuado.

Procedimiento.

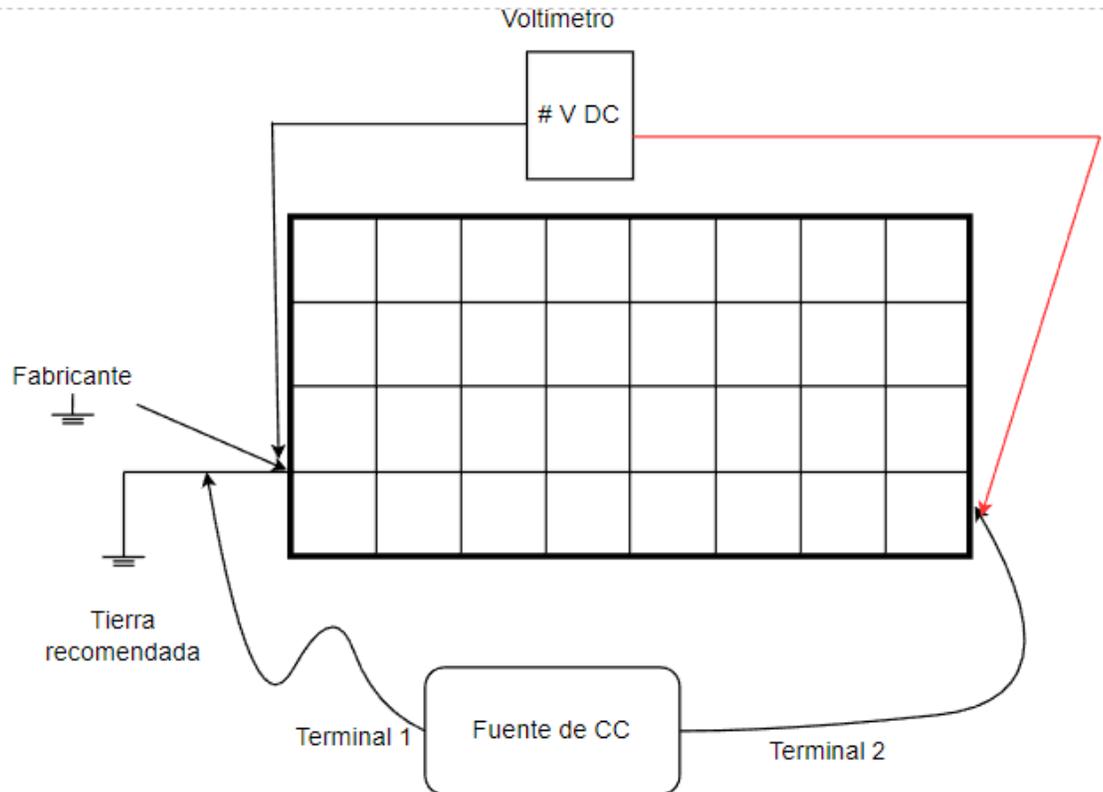
- Seleccione el punto de aterrizaje designado por el fabricante y la conexión a tierra recomendada. Conecte a una terminal de la fuente de corriente constante.



- Seleccione y conecte un componente expuesto adyacente conductivo con el mayor desplazamiento físico del punto de conexión a tierra y conecte a la otra terminal de la fuente de corriente.



- Coloque el voltímetro a las dos componentes conectados a la fuente de corriente lo más cercano a las guías de corriente.



- Aplique una corriente 2.5 mayor $\pm 10\%$ a la clasificación de protección máxima de sobre corriente por un mínimo de 2 min. Según ficha técnica, es de 10 A, entonces el valor de la corriente a aplicar oscilará entre 24 y 26 A.

Máxima capacidad para fusibles	10 A
--------------------------------	------

- Mida la corriente aplicada y la caída de voltaje resultante.
- Reduzca la corriente a cero.
- Repita la prueba con otro componente del marco.

Criterio de aprobación.

La resistencia entre el componente conductivo seleccionado y entre otro componente conductivo del módulo debe ser menor a 0.1 Ω .

Datos obtenidos.

Medición	Resistencia a tierra [Ω]
1	
2	
3	
4	
5	

- MONTELEC.

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	Precio Unitario	Precio Total
A	1	INVERSOR ONDA PURA DE 12Vdc/550W/120Vac 	\$ 110.00	\$ 110.00
B	1	PANELES SOLARES DE 185WATTS	\$ 192.50	\$ 192.50
C	1	CONTROLADOR MPPT 60A (AGM, GEL Y LITIUM) 12/24/48V-	\$ 300.00	\$ 300.00
D	4	BATERIA TIPO AGM 12VDC /100AH	\$ 132.00	\$ 528.00
E	1	PROTECCIONES DC MINIBREAKER 63A/2P	\$ 35.00	\$ 35.00
F	1	PROTECCION DC SUPRESORES DE TRASIENTOS DE 20KA	\$ 75.00	\$ 75.00
G	20	METROS DE CABLE FOTOVOLTAICO	\$ 1.55	\$ 31.00
H	1	PARES DE CONECTORES MC4	\$ 3.00	\$ 3.00
I	4	RIEL ABRAZADERA O GRAPA FINAL (END CLAMP) 40MM	\$ 10.00	\$ 40.00
J	0	RIEL ABRAZADERA O GRAPA MEDIA (MID CLAMP) 40MM	\$ 5.00	\$ -
K	1	RIEL TERMINAL DE PUESTA A TIERRA (GROUNDING LUG)	\$ 5.00	\$ 5.00
L	4	RIEL PIEZAS "L", ANCLA PARA FIJACION A CERO GRADOS	\$ 5.00	\$ 20.00
M	1	RIEL 4.2M ALUMINIO PARA PANEL SOLAR	\$ 27.00	\$ 27.00
				\$ -
		NO INCLUYE INSTALACION, NI DEMAS MATERIALES EN AC		
				\$ 1,366.50
				\$ -
		TOTAL		\$ 1,366.50

- Páginas de la red.



Pasa el mouse encima de la imagen para aplicar zoom



FLIR Cámara térmica compacta con resolución IR de 80 x 60 y MSX

Visita la tienda de FLIR

★★★★☆ 251 calificaciones

US\$ 1,049⁰⁰

US\$224.37 de envío y depósito de derechos de importación a El Salvador [Detalles](#)

Estilo: **E4**

E4 US\$1,049.00	E4 (con WiFi) 6 opciones desde US\$900.00	E5-XT (no WiFi) 2 opciones desde US\$2,399.10
E5-XT US\$1,624.93	E6-XT (no WiFi) 2 opciones desde US\$3,440.00	E6-XT US\$2,169.39
E8-XT US\$3,954.42	E54 3 opciones desde US\$5,900.00	

Marca	FLIR
Fuente de energía	Funciona con baterías
Estilo	E4
Color	E4 no WiFi
Peso del artículo	1.27 Libras



AMPERIMETRO DIGITAL TENAZA 2000 AMPERIOS 1000 VOLTIOS TRMS

CODIGO 611471 / MODELO CL900

[Agregar a favoritos](#)

\$189.00

1

[Agregar a carrito](#)

UNIDAD: C/U
KLEIN

Disponible
Despacho a domicilio

Disponible
Retiro en tienda

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

- PROTECCION CONTRA CAIDAS A 6.6 PIES (2 METROS)
- GAMA AUTOMATICA DE LA MEDIA CUADRADA VERDADERA (TRMS) PARA UNA MAYOR PRECISION
- APAGADO AUTOMATICO DESPUES DE 15 MINUTOS DE INACTIVIDAD CONSERVA LA VIDA UTIL DE LA BATERIA
- CLASIFICACIÓN DE SEGURIDAD CAT IV 600V CAT III 1000V DOBLE AISLAMIENTO



Amprobe SOLAR-600

Amprobe SOLAR-600 Analizador profesional de energía solar para pruebas, mantenimiento y eficiencia

\$ 2,299.95

Anexo C: Guías de mantenimiento a equipos.

Componentes eléctricos

Lo que corresponde la parte AC del sistema, que incluye caja térmica, interruptores termomagnéticos, tomacorrientes, luminaria y su controlador es de verificar que cada equipo esté lo más limpio posible, así se cuida la vida útil de cada parte. Dependiendo del lugar donde se guarde, así será la frecuencia de la cual se recomienda limpiar.

Panel FV

La parte más crítica del sistema, además de la limpieza señalada en los laboratorios, es recomendable cubrir el panel utilizando una funda protectora cuando no se esté utilizando para cuidar las celdas y el vidrio de posibles rayaduras.

Baterías

Revisar en los bornes si existe un agente que impida la buena conducción. Además, revisar cada año por la tensión que maneja la batería para comprobar la vida útil y cambiarla cuando sea necesario. También hacer limpieza general del equipo.

Banco de pruebas

Además de la limpieza de toda la estructura, revisar en su totalidad por posibles comienzos de óxido y tratarlas lo más pronto posible para evitar su propagación.

Sistema FV

Incluyendo el controlador, inversor se recomienda limpieza general de equipo para que suciedad no entre en sus circuitos y bajen su vida útil o un posible fallo prematuro.

Amperímetro

Limpieza de equipo y comprobación de terminales que funcionen para no tener falsos contactos o mediciones incorrectas.

Cámara digital

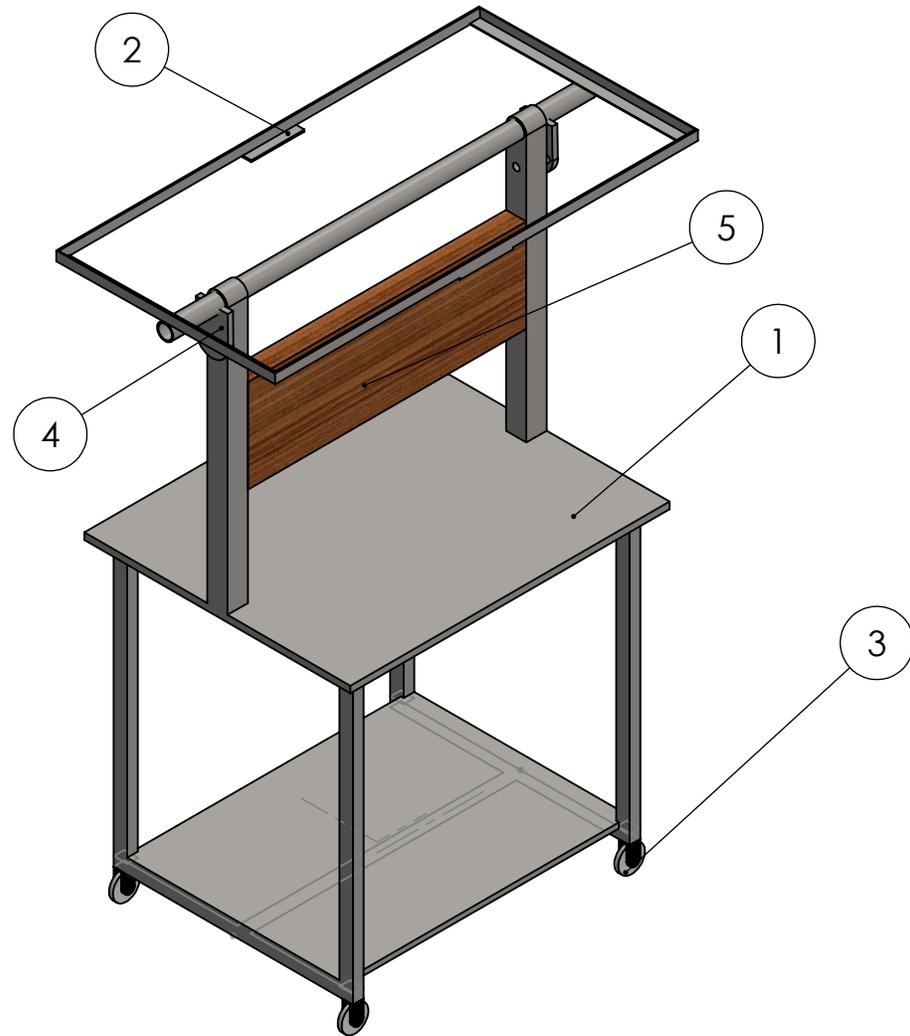
Seguir instrucciones de manual de fabricante.

Analizador solar

Seguir instrucciones de manual de fabricante.

Anexo D: Hojas de trabajo de banco de prueba.

COMPONENTE: ENSAMBLE TOTAL



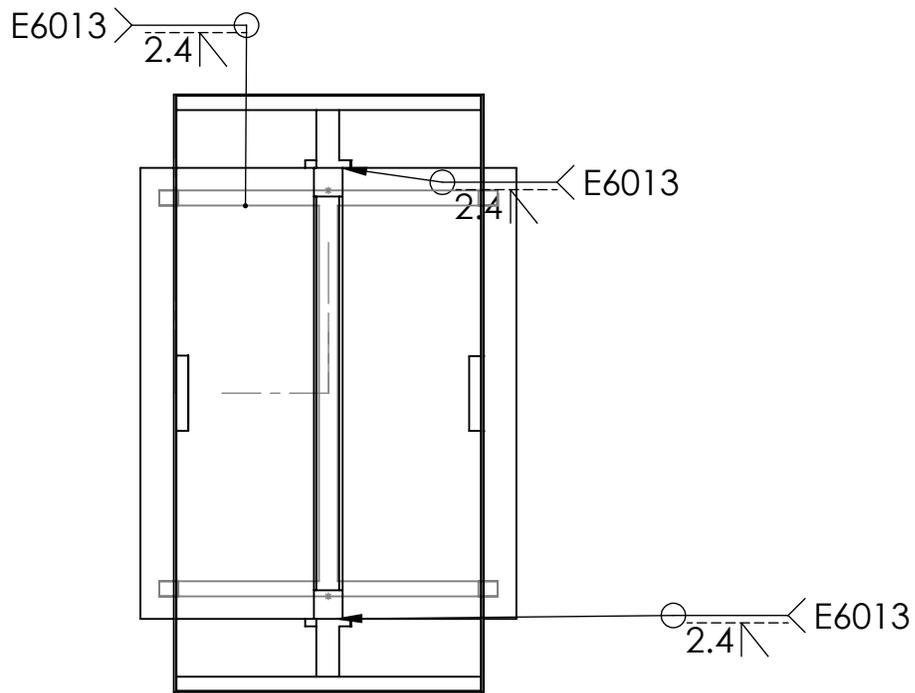
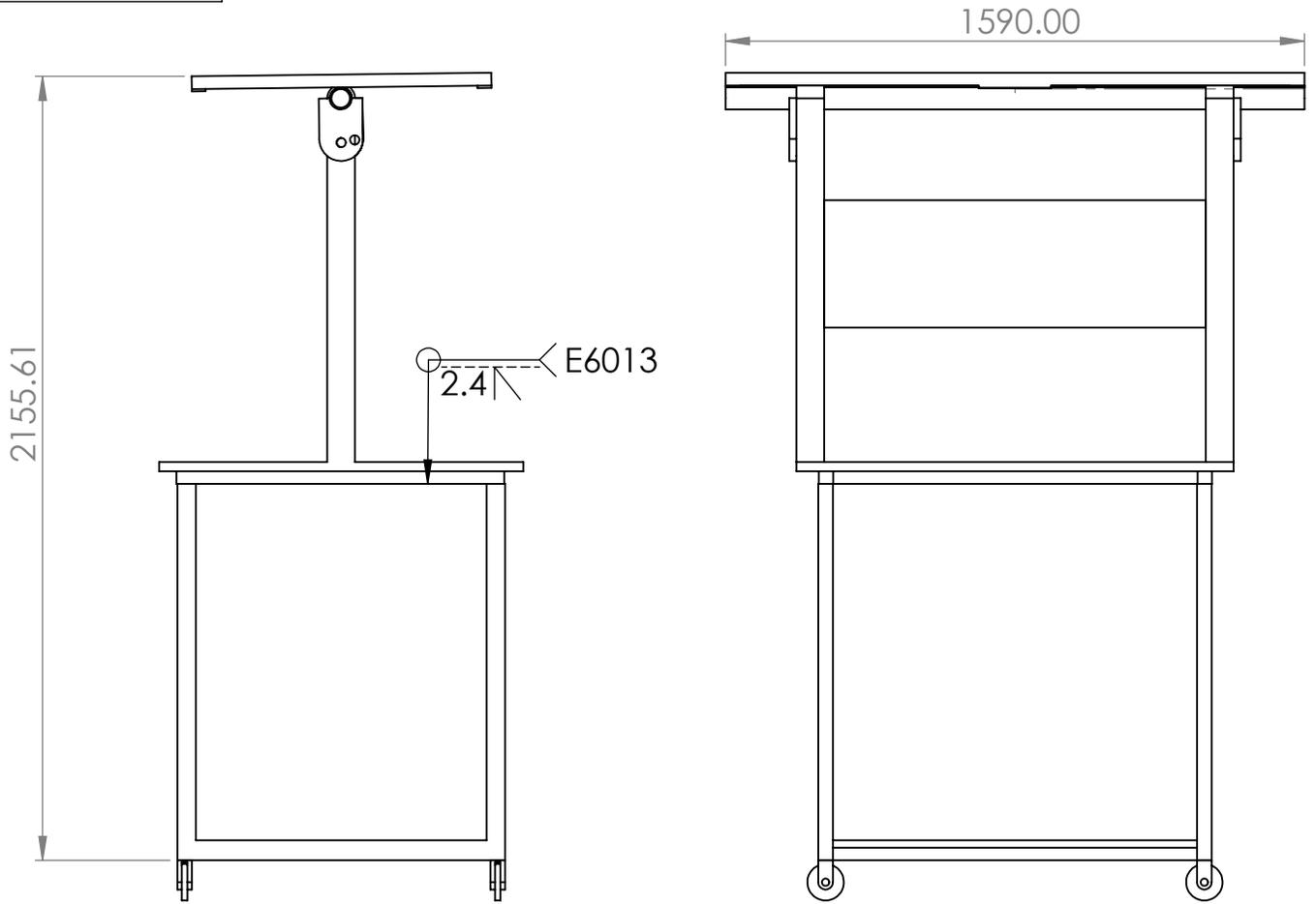
NÚMERO	NOMBRE	CANTIDAD
1	BASE	1
2	BASE DE PANEL	1
3	RODOS DE EPIGA	4
4	MODIFICADOR DE ÁNGULO	2
5	LUGAR PARA EQUIPOS	1



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

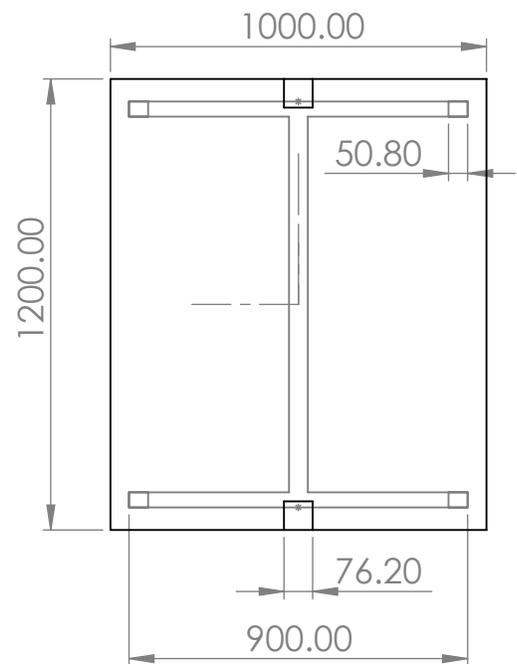
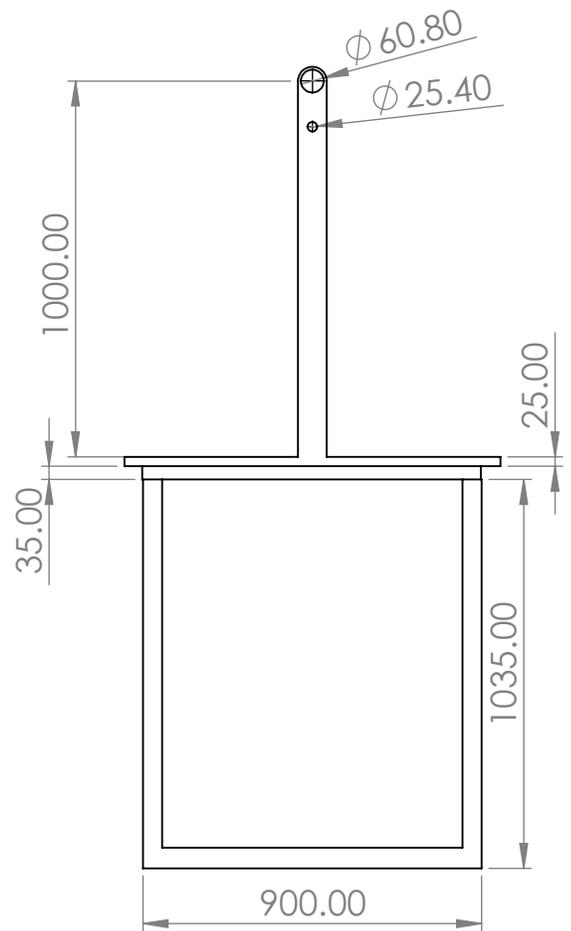
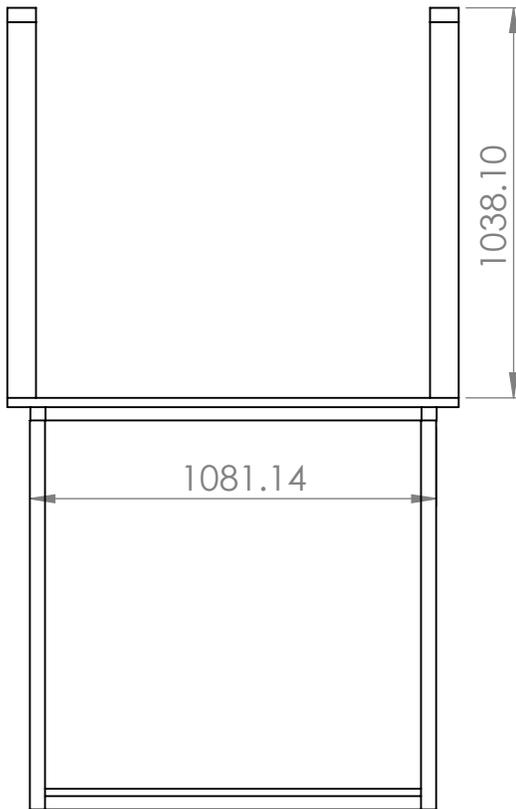
COMPONENTE: BANCO DE PRUEBAS ENSAMBLADO

Cotas en mm



COMPONENTE: BASE

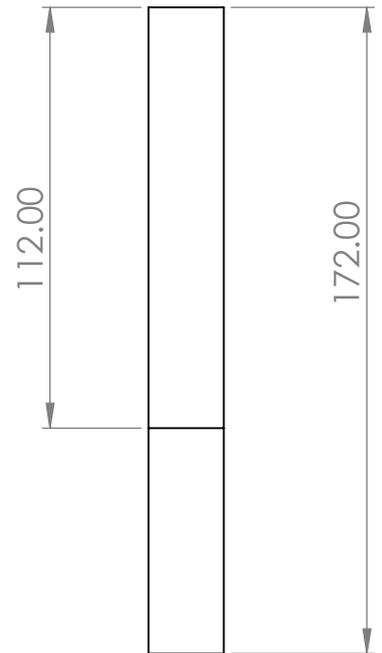
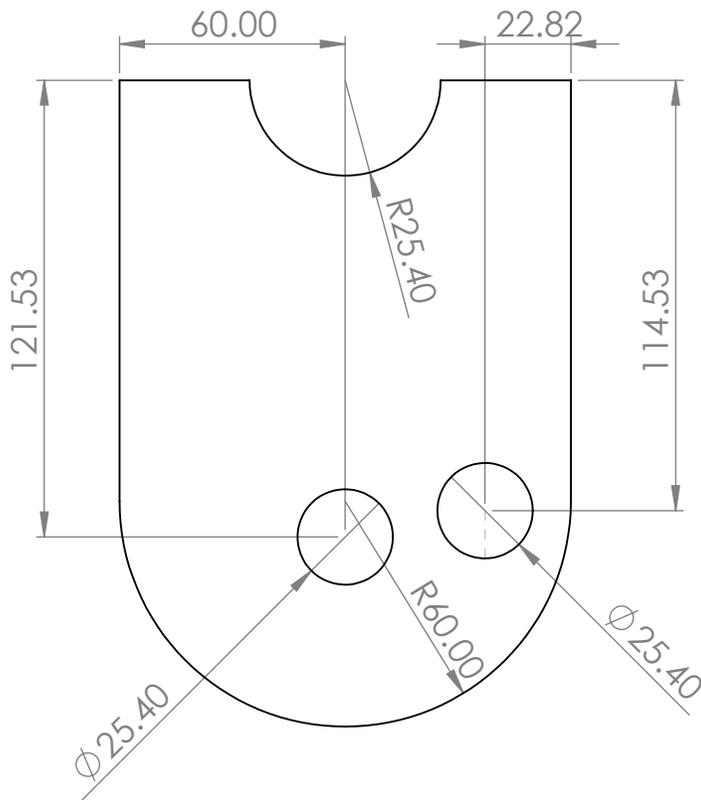
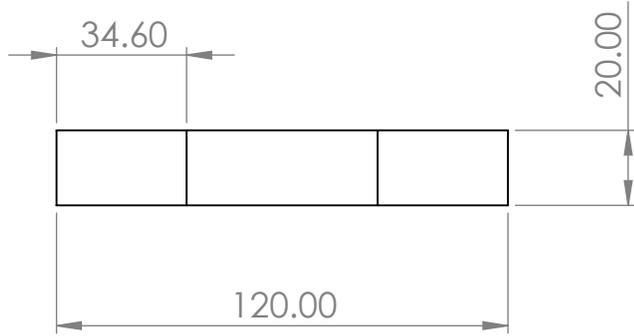
Cotas en mm



CANTIDAD	MATERIAL
1	Lámina de hierro negro calibre 3.00 mm de 6.56 x 3.28 ft
1	Tubo cuadrado de 1-1/2 in chapa 16 (1.5 mm)
1	Tubo cuadrado de 2 in chapa 16 (1.5 mm)
1	Rodo de espiga de 4 piezas 40 mm
1	Tubo industrial redondo 1-1/2 in chapa 20 (0.90 mm)

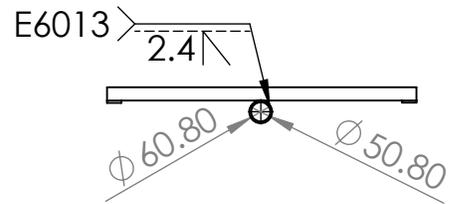
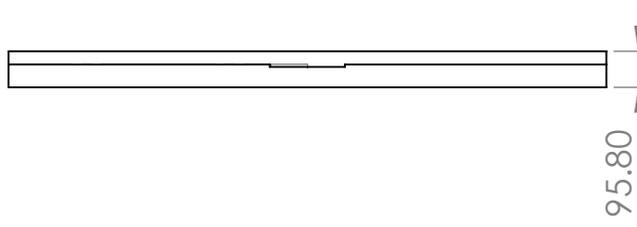
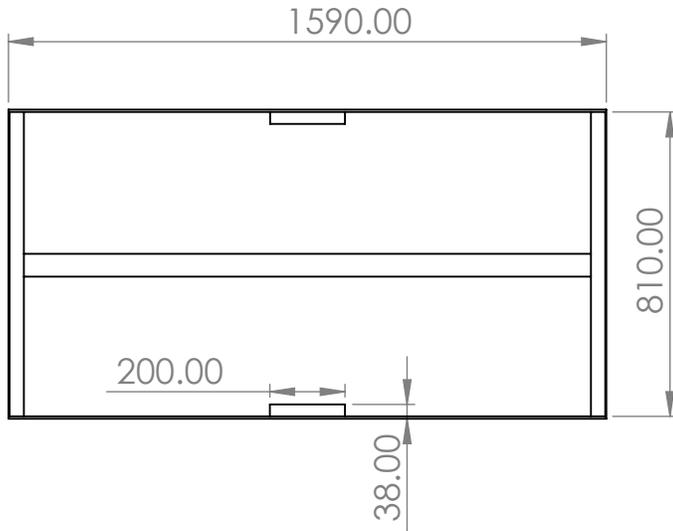
COMPONENTE: MODIFICADOR DE ÁNGULO

Cotas en mm



COMPONENTE: BASE DE PANEL

Cotas en mm



MATERIALES EN HOJA #3