



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

CARACTEROGRAFO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA

PRESENTA

ING. GERARDO BARRERA
HUERTA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ

NOMBRE DE LOS SINODALES:

DR. J. JESÚS ESCOBEDO ALATORRE

DR. ALVARO ZAMUDIO LARA

DR. MIGUEL ANGUEL BASURTO PENSADO

DR. GILBERTO ANZUETO SANCHEZ

CUERNAVACA, MORELOS

ENERO, 2018

RESUMEN

En la actualidad el aumento del uso de las energías renovables las ha llevado a su rápida evolución, así como a la necesidad del desarrollo acelerado de la tecnología entorno a estas. La energía solar fotovoltaica, es una de las de mayor alcance, esto gracias al potencial solar con el que cuenta México, lo que la hace ideal para usos a pequeña y gran escala en casi todo el país, sin embargo, la energía fotovoltaica para su uso tiene la limitante de requerir un control y una forma de monitoreo propia, que nos ofrezca los datos de generación real dada por este, en condiciones reales de operación. En este presente trabajo se realizó el diseño de un dispositivo, sistema capaz de obtener todos estos datos, tales como voltaje a circuito abierto (V_{oc}), corriente de corto circuito (I_{sc}), voltaje en el punto máximo de potencia (V_{mpp}), corriente en el punto máximo de potencia (I_{mpp}), punto de potencia máxima (P_{max}), factor forma (FF), prestación, trazo de la característica I-V así como la obtención de las condiciones ambientales a las que está trabajando el módulo fotovoltaico, el traslado de estos datos a condiciones estándar de operación, y poder así con esto realizar la comparación de la información dada por el fabricante, logrando así tener los datos reales de la generación del sistema fotovoltaico para pronósticos o evaluación del funcionamiento de este. Este diseño se logró de la forma más simple y practica para impulsar el uso de la energía fotovoltaica, de ahí su importancia para promover el uso de esta y obtener sistemas más sustentables a costos más accesibles.

ABSTRACT

Currently, the increase in the use of renewable energies has led to a rapid evolution, as well as the need for accelerated development of technology around these. Photovoltaic solar energy is one of the largest, thanks to Mexico's solar potential, which makes it ideal for small and large-scale uses in almost the entire country, however, photovoltaic energy for its use has the limitation of requiring control and a form of own monitoring, which offers us the real generation given by this, in real operating conditions. In this present work we designed a device, a system capable of obtaining all these data, such as open-circuit voltage (V_{oc}), short-circuit current (I_{sc}), voltage at the maximum power point (V_{mpp}), current at the maximum point of power (I_{mpp}), point of maximum power (P_{max}), form factor (FF), performance, trace of the characteristic IV as well as the obtaining of the environmental conditions to which the photovoltaic module is working, the transfer of these data to standard conditions of operation, and thus be able to make the comparison of the information given by the manufacturer, thus achieving the real data of the generation of the photovoltaic system for forecasts or evaluation of the operation of this. This design was achieved in the simplest and most practical way to promote the use of photovoltaic energy, hence its importance to promote the use of this and obtain more sustainable systems.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Diego Seuret Jiménez, quien me aceptó en su grupo de trabajo y que ha dirigido esta tesis, por su incondicional apoyo, contribución en las sugerencias e ideas, interpretaciones y reflexiones surgidas durante el desarrollo de este trabajo, así como su valiosa aportación como ser humano y guía.

A todos los profesores investigadores que me formaron en las materias llevadas durante la maestría, a los miembros del comité tutorial, al Dr. Álvaro Zamudio Lara, Dr. Jesús Escobedo Alatorre, Dr. Miguel Ángel Basurto Pensado y al Dr. Gilberto Anzueto Lara, por sus valiosas recomendaciones y aportaciones para la mejora de este proyecto.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada y hacer posible el objetivo de finalizar el proyecto de la maestría.

También quiero agradecer al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en sus instalaciones y siempre ofrecerme lo mejor de esta institución.

Agradezco a mis compañeros de generación, por haber sido los mejores colegas durante los dos años de maestría.

A los nuevos y viejos, amigos y compañeros, que más de estudio lo son de vida, Edgardo, Randy, Fernando y Alfredo que siempre han estado conmigo alentándome, apoyándome con su amistad sincera y compartiendo juntos los mejores momentos en esta etapa de mi vida.

Finalmente, agradezco a mis padres por su total apoyo y a dios por permitirme vivir, tener paciencia y sabiduría, dedicación y motivación, pero sobre todo brindarme la dicha de dar este importante paso en mi vida profesional.

DEDICATORIAS

Esta tesis la dedico Principalmente a todos aquellos que por el simple hecho de convivir o habernos cruzado en este camino fueron parte del resultado final, siendo para bien o para mal, no se habría podido alcanzar este momento sin el complejo y extraño conjunto de momentos y circunstancias que ahora dan como resultado esté presente.

A mis amados padres José Gerardo Barrera Álvarez y Celina Huerta Justo, por todos los sacrificios, enseñanzas y sobre todo que nunca han dejado de creer en mí para salir adelante.

INDICE

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIAS	v
LISTA DE FIGURAS	ix
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Título de tesis	1
1.2 Introducción	1
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivo Particular.....	4
1.4 Justificación	5
1.5 Hipótesis	7
1.6 Alcance	8
1.7 Estado del arte	8
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 Tecnología Fotovoltaica	16
2.1.1 La célula fotovoltaica	16
2.1.2 Panel o Modulo Fotovoltaico.....	17
2.1.3 Descripción general de una instalación fotovoltaica	18
2.2 Curva característica del módulo fotovoltaico (curva o característica I-V)	19
2.2.1 Principales parámetros de la característica I-V.....	20
2.2.2 Ecuación característica	21
2.2.3 Factores que afectan a la característica I-V del generador	23
2.2.4 Condiciones de referencia.....	25
2.2.5 Extrapolación a condiciones estándar de medida (CEM)	26
2.2.6 Condiciones nominales de operación (CON)	27

2.3 Eficiencia del módulo fotovoltaico.....	28
2.3.1 Eficiencia con respecto al área total	28
2.3.2 Eficiencia con respecto al área de célula.....	29
CAPITULO 3. DESARROLLO TEÓRICO/EXPERIMENTAL	30
3.1 Planteamiento del diseño	30
3.2 Diseño del circuito de potencia	31
3.2.1 Generación de condiciones para la medición	31
3.2.2 Carga capacitiva.....	32
3.2.3 Esquema del circuito	40
3.3 Diseño del sistema de adquisición de datos	48
3.3.1 Placa Arduino uno.....	49
3.3.2 Medición mediante la placa Arduino uno	50
3.3.3 Secuencia de funcionamiento.....	63
3.4 Interfaz y tratamiento de datos	65
3.4.1 Excel y macros	67
3.4.2 Desarrollo de la interfaz	68
3.4.3 Tratamiento de datos.....	69
3.4.3 Recapitulando.....	78
3.5 Pruebas.....	79
3.5.1 Prueba del circuito de potencia	79
3.5.2 Prueba del sistema de adquisición de datos.....	86
3.5.3 Prueba de interfaz y tratamiento de datos	88
3.5.4 Recapitulando.....	88
3.6 Generación de reporte.....	89
CAPITULO 4. RESULTADOS	91
4.1 Circuito de potencia	91
4.2 Sistema de adquisición de datos	95
4.3 Interfaz y tratamiento de datos	96
4.4 Característica y datos obtenidos.....	97
4.5 Validación del sistema	101

4.6 Reporte	106
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	108
5.1 Conclusiones	108
5.2 Perspectivas.....	109
REFERENCIAS	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una instalación solar fotovoltaica. (Israel Blanco Sardinero, 2012)	19
Figura 2. Curva característica, con sus principales elementos. (Fernandez Ferichola, 2009).....	20
Figura 3. Esquema de conexionado eléctrico en un módulo fotovoltaico. (Fernandez Ferichola, 2009).....	22
Figura 4. Efecto de la irradiancia sobre la característica I-V de un generador FT. (Fernandez Ferichola, 2009).....	24
Figura 5. Ejemplo teórico de la variación de la característica I-V del módulo FV al variar la temperatura manteniendo la irradiancia constante. (Fernandez Ferichola, 2009).....	25
Figura 6. Esquema de partes que conforman el Caracterografo para sistemas fotovoltaicos.	30
Figura 7. Esquema de comportamiento de carga y descarga de un capacitor/condensador. (lorenzo, 2011)	32
Figura 8. Curvas de corriente y de tensión para el proceso de carga de un capacitor/condensador. (lorenzo, 2011)	33
Figura 9. Tipos de capacitor/condensador (Guzman, 2017).....	35
Figura 10. Capacitores/condensadores electrolíticos (SCIENCE19, 2017)	36
Figura 11. Disposición de capacitores en serie (tecnologico., s.f.).....	38
Figura 12. Disposición de capacitores en serie. (tecnologico., s.f.).....	39
Figura 13. Circuito básico de potencia del sistema	41
Figura 14. Tipos de interruptores. (Maocho, 2014).....	42
Figura 15. Tipos de resistencias. (D'Ambros, 2016).....	44
Figura 16. Tipos de diodos. (Solarweb.net, 2011)	46
Figura 17. Hoja de cálculo para dimensionamiento	47

Figura 18. Placa Arduino uno. (IESCAMP, 2017).....	50
Figura 19. Esquema de interconexión de elementos del sistema.	51
Figura 20. Punto de medición de voltaje.	52
Figura 21. Esquema divisor de voltaje. (5Hertz, 2011).....	53
Figura 22. Esquema de conexión del divisor de voltaje.	54
Figura 23. Esquema de conexión de la resistencia tipo shunt.	55
Figura 24. Esquema de conexión de la resistencia tipo shunt.	56
Figura 25. Esquema de puntos de medición.	57
Figura 26. Esquema de estructura de panel fotovoltaico. (Victor Messina Lopez, 2016).....	58
Figura 27. Sensor LM35, diagrama de conexión y encapsulado. (Victor Messina Lopez, 2016).....	58
Figura 28. Sensor LM35, diagrama de conexión Arduino. (Rivera, 2014) 59	
Figura 29. Ejemplo de la posición de los sensores de temperatura. (Rivera, 2014)	59
Figura 30. Esquema de medición de temperatura.	59
Figura 31. Piranómetro utilizado para la medición de radiación solar. (Gonzalo Navia, 2015)	60
Figura 32. Esquema de medición de radiación.	61
Figura 33. Esquema de relé mecánico. (Gonzalo Navia, 2015).....	61
Figura 34. Esquema de implementación de relés.	62
Figura 35. Esquema de secuencia de operación manual.	63
Figura 36. Esquema de secuencia de operación automática.	64
Figura 37. Esquema de secuencia de operación final.	64
Figura 38. Esquema del Caracterografo.	65
Figura 39. Lectura de corriente y voltaje.	66
Figura 40. Lectura de temperatura.	66
Figura 41. Excel y funciones. (Microsoft, 2016).....	67
Figura 42. Pestaña de macros en Excel. (Microsoft, 2016).....	68

Figura 43. Código base de comunicación Arduino-Excel. (Microsoft, 2016)	68
Figura 44. –Interfaz, elementos principales-fijos.	69
Figura 45. Interfaz, elementos principales-fijos con los valores obtenidos.	70
Figura 46. Interfaz, Valor de Isc.	71
Figura 47. Interfaz, Valor de Voc.	71
Figura 48. Interfaz, Valor de Pmax, Isc y Voc.	71
Figura 49. Interfaz, grafica de corriente y voltaje.	72
Figura 50. Interfaz, columna de potencia y valor encontrado de Ppmax.	73
Figura 51. Interfaz, Curva o característica I-V obtenida experimentalmente.	74
Figura 52. Interfaz, Curva o característica I-V obtenida experimentalmente sometida a fitting.	74
Figura 53. Interfaz, sección de traslado a condiciones estándar de medida.	77
Figura 54. Interfaz, curva I-V trasladada a condiciones estándar de medida.	77
Figura 55. Interfaz, visualización de la prestación.	78
Figura 56. Panel fotovoltaico Steren empleado para la prueba.	80
Figura 57. Dimensionamiento de los elementos empleando hoja de cálculo.	80
Figura 58. Simulación del circuito.	81
Figura 59. Simulación del circuito, inicio de descarga.	81
Figura 60. Simulación del circuito, descarga del capacitor.	82
Figura 61. Simulación del circuito, estado inicial.	82
Figura 62. Circuito físico.	83
Figura 63. Equipo externo.	83
Figura 64. –Equipo montado.	84
Figura 65. Conexión al panel.	84

Figura 66.	Metodología de medición.	85
Figura 67.	Curva I-v obtenida experimentalmente.	85
Figura 68.	Análisis de la curva I-v obtenida experimentalmente.	86
Figura 69.	Esquema de operación con el sistema de adquisición de datos.	86
Figura 70.	Circuito armado con el sistema de adquisición de datos.	87
Figura 71.	Circuito armado con el sistema de adquisición de datos.	87
Figura 72.	–Interfaz, después de prueba de operación.	88
Figura 73.	Interfaz, esquema de generación de reporte.	89
Figura 74.	Interfaz, Botón de generación de reporte.	89
Figura 75.	Vista general del reporte generado.	90
Figura 76.	Elementos que componen el sistema.	91
Figura 77.	Circuito de potencia.	92
Figura 78.	Herramienta de dimensionamiento.	92
Figura 79.	Simulación 1.	93
Figura 80.	Simulación 2.	93
Figura 81.	Simulación conexión paralelo.	94
Figura 82.	Simulación conexión serie.	94
Figura 83.	Curva I-V obtenida.	95
Figura 84.	Visualización de datos mediante monitor serial.	96
Figura 85.	Vista general de la interfaz.	97
Figura 86.	Datos de corriente voltaje y potencia.	98
Figura 87.	Datos de Pmax, Isc, Voc, temperatura y radiación.	98
Figura 88.	Curva o característica I-V experimental.	99
Figura 89.	Curva o característica I-V experimental.	99
Figura 90.	Curva o característica I-V experimental corregida.	100
Figura 91.	Curva o característica I-V experimental corregida.	100
Figura 92.	Curva o característica I-V obtenida, trasladada a condiciones estándar.	101
Figura 93.	Prestación del panel.	101

Figura 94. Curva trazada por el dispositivo (azul) y manualmente (rojo).	103
Figura 95. –Curva trazada por el dispositivo (azul) y manualmente (rojo.)	103
Figura 96. Curva I-V obtenida con el sistema desarrollado.	105
Figura 97. Curva I-V obtenida con el sistema Solmetric.	105
Figura 98. Calculo de error en la medición.	106
Figura 99. Reporte.	107

LISTA DE ABREVIATURAS

FV	Fotovoltaico
$I-V$	Corriente-Voltaje
V_{OC}	Voltaje a circuito abierto
I_{SC}	Corriente de corto circuito
FF	Fil factor
V_{MP}	Voltaje de máxima potencia
I_{MP}	Corriente de máxima potencia
R_{SH}	Resistencia en paralelo
R_S	Resistencia en serie
I	Corriente
V	Voltaje
P	Potencia
Pmax	Potencia máxima

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Título de tesis

Caracterógrafo para sistemas fotovoltaicos.

1.2 Introducción

La energía fotovoltaica es la energía eléctrica obtenida a través de los fotones procedentes de la luz solar mediante células fotovoltaicas. Este tipo de energía es cada día más importante debido a la mayor necesidad de energías limpias que permitan un desarrollo sostenible. La aparición de este nuevo método de producir energía estaba años atrás, restringido a la alimentación eléctrica de lugares aislados, aplicaciones rurales, en la actualidad, las nuevas normativas y la evolución en la tecnología hacen que las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red supongan un porcentaje considerable de la potencia total instalada. (M.A.Muñoz, 2011)

El empleo de la electricidad en la vida diaria necesita de fuentes de energías autónomas y sustentadas. Una de las opciones más viables y que sigue ganando fuerza debido a la bajada de precios y la necesidad del uso de energías sustentables, es la generación de electricidad mediante paneles solares fotovoltaicos. Los paneles fotovoltaicos tienen garantías en su tiempo de vida útil que indica que esta oscila entre los 20 y 25 años sobre la potencia máxima entregada. Medir esta potencia necesita de unas condiciones que habitualmente no se consiguen de forma simple y de equipos de medida normalmente muy caros e inaccesibles para pequeños usuarios y para pequeñas y medianas instalaciones. (Fernandez Ferichola, 2009)

Cuando se instala un sistema de energía solar fotovoltaica se hace en base a los cálculos previos de potencia necesaria, así como la potencia final instalada y la estimación de horas de sol previstas. Sin embargo, el sistema deberá estar funcionando durante al menos 25 años según las hipótesis y características habituales de estos. Esto significa e implica que será muy útil conocer cualquier fallo en la potencia entregada durante su tiempo de vida. La detección de un fallo en un panel fotovoltaico a menudo no es sencilla. Y de esta forma se encuentra con la problemática de cómo emplear o adquirir dispositivos para realizar este monitoreo de la potencia en el tiempo de vida del panel y la degradación de este y los efectos que ocasionará en la generación. (M.A.Muñoz, 2011)

Actualmente las instalaciones de paneles solares son dimensionadas antes de realizar la puesta en servicio, tomando en cuenta las condiciones del lugar, así como los rangos solares de este, que nos permitirán calcular la potencia instalada, así como la potencia generada de la instalación, sin embargo, una vez realizada la instalación y esta entrar en operación, surgen problemas, así como condiciones que afectan estos parámetros de generación inicial. El problema básicamente se debe a que se empiezan a tener variaciones en la generación ya sea por panel, conjunto de paneles, o toda la instalación, siendo la causa, falta de mantenimiento, suciedad en los paneles, defectos de fábrica, sombras, entre muchos otros, lo cual en instalaciones grandes dificulta el control y seguimiento de cada uno de los paneles o del sistema en general para descartar problemas, y en instalaciones a pequeña escala repercute instantáneamente a la hora de abastecer la carga prevista. Además de que es de suma importancia para el dueño saber cuánto se está produciendo y así con esta información llevar un control más a detalle de cuanto realmente se está generando y compararlo con cuanto se supondría que se debería estar generando, y por ende saber cuánto se está ganando realmente, así como la aportación a la red de CFE si es que la hay.

La extensión a gran escala para atacar esta problemática requiere el desarrollo de métodos de ingeniería específicos, que permitan evaluar sus características y rendimientos en el conjunto del sistema eléctrico. (Sci., 202)

La representación estándar de un dispositivo fotovoltaico es la característica I-V. La curva representa las posibles combinaciones de corriente y voltaje para un dispositivo fotovoltaico bajo unas condiciones ambientales determinadas (radiación solar incidente y temperatura ambiente). El punto en concreto de corriente y voltaje en el que el dispositivo fotovoltaico trabajará vendrá determinado por la carga a la que esté conectado. (Jimmy E. Quiroz, 2000)

La caracterización de módulos fotovoltaicos de forma eficaz y confiable es importante en la implementación de nuevas instalaciones y averiguación del desempeño de las instalaciones ya existentes. Ensayos mecánicos, térmicos y eléctricos son importantes para prever el comportamiento del generador fotovoltaico bajo diferentes condiciones de operación. (Arno Krenzinger, 2016)

Actualmente se usan caracterizadores o equipo avanzado de medición y monitoreo para sistemas fotovoltaicos, los cuales son muy costosos, y presentan mayor problemática para su adquisición por medianas y pequeñas instalaciones fotovoltaicas. Estos obtienen en tiempo real los parámetros de corriente y voltaje (I-V), y de esta forma se logra identificar alguna perturbación o caída inusual en la generación. (S. Berberkic, 2010)

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un Caracterografo, para sistemas fotovoltaicos, capaz de monitorear en tiempo real los parámetros de la característica I-V.

1.3.2 Objetivo Particular

- Estudiar el estado del arte de la caracterización de sistemas fotovoltaicos.
- Realizar la medición de la curva I-V en condiciones reales de operación.
- Realizar la medición de parámetros de interés.
- Obtener el punto de máxima potencia comparado con el dado en condiciones estándar.
- Calcular factor de forma (FF).
- Obtener un diseño de fácil construcción.

1.4 Justificación

La medida de la curva de potencia de un panel fotovoltaico o de un conjunto de ellos normalmente implica el uso de costosos sistemas de medida que suelen quedar fuera del alcance del propietario de una pequeña o mediana instalación solar. Por esto se hace necesario en estos casos el uso de un sistema de medición suficiente, eficiente y de bajo costo para la determinación en campo de posibles defectos en paneles o sistemas fotovoltaicos.

Este trabajo tiene gran importancia debido a que se está atacando un problema importante y común en las instalaciones y sistemas de paneles solares, como es la variación en la generación de estas y el lograr tener el monitoreo en tiempo real de la característica I-V, para de esta forma poder analizar el comportamiento de la generación, ya sea por panel, conjunto de paneles o el sistema completo, y de esta forma percatarse de algún problema o irregularidad en esta y poder solucionarlo, reduciendo así los tiempos de corrección de estos problemas además de poder hacer estimaciones reales de la generación siguiendo los patrones obtenidos, es por eso que se trabaja en un Caracterografo para sistemas fotovoltaicos, que nos permita realizar un monitoreo en tiempo real de estos valores, pudiendo deducir con estos el correcto funcionamiento o irregularidades en la instalación, y obtener los datos de generación mediante la característica I-V. Que nos permitirán conocer la generación real y así tener de forma clara y plasmada en números la generación aportada ya sea a una instalación o a la red de CFE y saber cuánto se está ganando.

De esta forma se piensa aportar el diseño y desarrollo de este dispositivo que será muy útil y actualmente necesario, además de dotarlo de una gran área de aplicación, y así evitar que sea necesario emplear otro dispositivo en diferentes instalaciones o sistemas y comparar que el costo será considerablemente menor a comparación de otros equipos similares del mercado. Además de que por ser de fácil adquisición para todos los usuarios así como de uso universal para los distintos tipos de instalaciones este gane popularidad e importancia en cualquier instalación y todos

los usuarios, fomentando su empleo de forma indispensable en cualquier instalación, además del uso que podría dársele como equipo de prueba para personal de mantenimiento o empresas que se dediquen a ofrecer planes de mantenimiento sirviendo como herramienta de diagnóstico para las instalaciones o paneles fotovoltaicos.

La principal problemática, es lograr el control así como los circuitos para la medición de potencia, así como trazar la característica I-V, ya que presenta un gran riesgo el no ser bien dimensionados los componentes necesarios para esto, lo que podría ocasionar un dispositivo inestable o inseguro, y por ende impreciso en las mediciones ya que estos rangos de potencia requieren un cálculo extensivo de cada uno de los elementos necesarios para lograr la medición, y una vez logrado el dispositivo físico, la comunicación con una interfaz visual donde se podrá visualizar en tiempo real la característica I-V y la representación de esta.

Este proyecto está impulsado por el conocimiento y experiencia del Dr. Diego Seuret, quien avala con su experiencia en el campo que es necesario el desarrollo del dispositivo, por razones de control y monitoreo de la generación de forma más específica para poder detectar problemas o malos funcionamientos que estén ocasionando repercusiones en la generación, además de tratar que este pueda ser empleado en distintos tipos de instalaciones, sistemas sin necesidad de adquirir otro dispositivo diferente o adicional, tomando como punto extra el desarrollar este dispositivo con un costo mucho menor a otros que se podrían usar para estas funciones, lo que lo vuelve o volverá accesible para su adquisición para todo tipo de usuarios, lo que garantizaría un mejor monitoreo de la generación y de esta forma impulsar el uso de la energía solar en todos los niveles.

Por lo es muy pertinente ya que actualmente se está dando mucho énfasis en el empleo de energías limpias, como es el caso de la solar, por lo que se debe trabajar en solucionar las problemáticas que éstas tengan para ser empleadas, así como en mejoras para promover su uso, no solo en grandes instalaciones sino de igual forma

en usos domésticos o por pequeños usuarios. Por lo que atacar este problema es fundamental para el desarrollo y avance de esta tecnología.

1.5 Hipótesis

- Para el análisis del desempeño eléctrico de un módulo fotovoltaico es necesaria la determinación de la curva de corriente y voltaje denominado curva característica (Característica I-V), para esto se diseñará un dispositivo que realice esta función.
- Se puede lograr desarrollar a un coste reducido a comparación de los equipos similares en el mercado, pero no por ello sin la suficiente precisión y agregando mejoras de control.
- Se podría con este dispositivo llevar un mejor control de la generación y con esta información saber el estado de la instalación, ganancias y aportaciones a la red, sin la necesidad de una revisión física.
- Este dispositivo podría ser empleado por todo tipo de usuarios que lo necesiten, así como para los distintos tipos de instalaciones, lo cual lo volverá popular, a diferencia de lo actual que son específicos para un panel.
- Teniendo en cuenta el estado del arte se piensa que se puede lograr el desarrollo de un dispositivo mejor, con la tecnología actual.
- Surge la duda si se podrá desarrollar el dispositivo con la tecnología básica de electrónica y así no elevar su costo final.

1.6 Alcance

La presente tesis se enfoca en desarrollar un Caracterografo para sistemas fotovoltaicos, el cual podrá ser empleado en cualquier sistema o instalación dentro del rango de operación, lo cual facilitará su adquisición tanto por su rango como en costo, así como la capacidad de llevar el monitoreo de la generación mediante este. Logrando así un dispositivo generalizado para esta función a diferencia de otros existentes que son de uso específico para ciertos equipos. Pudiendo así diagnosticar problemas en los componentes de la instalación o hacer predicciones de la generación y el comportamiento de este a través del tiempo. Logrando dar más sustentabilidad a los sistemas que empleen el dispositivo. Y saber a ciencia cierta la ganancia que se está obteniendo por la generación de esta electricidad.

Este dispositivo tendrá gran impacto debido a la necesidad del control y monitoreo de la generación cada vez más exhaustiva que se requiere hoy en día, ya sea para incorporaciones a la red de CFE como para su empleo en pequeñas y medianas instalaciones o aplicaciones, además de la opción que presenta como herramienta para el diagnóstico del funcionamiento del sistema en base a irregularidades presentadas en la generación, entre otras, lo que diversifica su empleo no solo como dispositivo de monitoreo sino además como herramienta de diagnóstico y mantenimiento para instalaciones.

1.7 Estado del arte

En esta presente sección se describirá los trabajos que se han realizado para el trazo de la característica I-V, obtención de parámetros y algunas semejanzas con el presente trabajo.

1. *Capacitive load base don IGBTs for on-site characterization of PV arrays.* (J. Muñoz, 2008)

Se realizó el diseño práctico de una carga capacitiva basada en las características de los transistores bipolares de puerta aislada (IGBTs), con esto se realizaron mediciones en condiciones reales de operación, esto para lograr:

- Proporcionar información para la detección de posibles anomalías en el panel fotovoltaico.
- Generación de características I-V para organizaciones de mediana escala.

El resultado de este trabajo fue obtener la característica I-V dentro del rango de corriente de corto circuito (I_{sc}) 80 A y voltaje de circuito abierto (V_{oc}) 800 V. teniendo un tiempo para realizar la medición de 5 minutos y teniendo que iniciar la medición en las condiciones ambientales más cercanas a las condiciones ideales de operación, ya que al alejarnos de estas surge un aumento de impresión en el trazo de la curva. (J. Muñoz, 2008)

2. Sistema para la generación automática de curvas I-V, P-V y monitorización de módulos fotovoltaicos. (Andujar Marquez, 2009)

En este trabajo se usaron convertidores DC/DC en sistemas de generación fotovoltaica como interfaz entre el panel fotovoltaico y la carga, permitiendo el seguimiento del punto de máxima transferencia de potencia (MPPT).

En este se demostró que mediante la simulación la posibilidad de caracterizar las curvas I-v y P-V de un panel fotovoltaico mediante el uso de convertidores CC/CC con α variable. Esta metodología abre una alternativa en el diseño de trazadores I-V fotovoltaicos, pudiendo tener consecuencias importantes en el proceso de simplificación de estos. Además, como se ha demostrado, la topología elevadora-reductora es la única eficaz para este fin, ya que es capaz de barrer la curva completa.

El método propuesto en este trabajo proporciona las ventajas siguientes:

- Mínima pérdida de potencia al contrario de los sistemas que operan en zona lineal (zona activa). Esto implica ventajas en tamaño y coste.
- Adaptación automática del intervalo de interpolación.

La metodología propuesta, una vez verificada mediante simulación, se ha implementado en un sistema real, el cual permite, además, mediante la adquisición de los valores de radiación luminosa y temperatura en el panel, monitorizarlo y detectar cualquier fallo o anomalía de funcionamiento. (Andujar Marquez, 2009)

3. Aparato para medir curvas características de módulos fotovoltaicos con radiación natural. (Arno Krenzinger, 2016)

Con la intención de utilizar las ventajas de la radiación solar natural combinadas con el hecho de poderse mantener baja la temperatura de los módulos, fue construido, en el laboratorio de energía solar de la UFRGS, un gabinete acondicionado con una ventana con apertura suficientemente grande, como para exponer uniformemente toda el área de los módulos a la radiación solar.

El sistema mide tensión, corriente, radiación solar y temperatura mientras una fuente electrónica de potencia produce un barrido de tensión desde los valores negativos de tensión hasta ultrapasar la tensión de circuito abierto del módulo fotovoltaico.

Como resultado fue construido un gabinete con temperatura controlada para abrigar módulos fotovoltaicos en el momento de determinación de sus características eléctricas. El gabinete puede ser orientado para poner los módulos frente a la radiación solar en varias horas del día. El aparato cuenta también con una adecuada instrumentación para el trazado de curvas de módulos, con capacidad de operar a través de un computador personal y completar un ensayo en tiempos del orden de

las décimas de segundo. Se ha comprobado la eficacia del aparato midiendo diversas curvas características en diferentes temperaturas. (Arno Krenzinger, 2016)

4. *Design of a monitoring and test system for PV based renewable energy systems.* (S. Berberkic, 2010)

El sistema desarrollado se compone de tres módulos, en primer lugar, el módulo de adquisición, que está conectado físicamente al RES bajo prueba, a través de una serie de sensores. Una vez que las diferentes señales de los sensores se digitalizan y procesan, los datos se envían al módulo de interfaz de la PC, para que se muestren, en una PC, utilizando una interfaz gráfica de usuario de LabView. El módulo de interfaz de PC también está equipado con una pantalla LCD para permitir el monitoreo remoto y también el acceso a datos cuando la PC esta apagada. La transición de datos entre los dos módulos se realiza utilizando los dispositivos ZigBee. Finalmente, el módulo de carga electrónica es controlada y alimentada por el módulo de adquisición.

Los resultados demuestran que el sistema diseñado puede monitorear la corriente, el voltaje y la temperatura de los paneles fotovoltaicos, así como calcular la potencia de salida y la producción de energía. La carga electrónica fue probada con éxito y las actuaciones evaluadas. Si bien la carga se limita a una disipación de potencia de 50W, el principio de funcionamiento sigue siendo el mismo si se requiere una potencia más alta. (S. Berberkic, 2010)

5. *Power rating of photovoltaic modules from outdoor measurements.* (Knaupp, 2010)

En definitiva, en la cuestión de la potencia nominal de un módulo fotovoltaico. Existe la necesidad de un procedimiento de transformación de especificaciones de hojas de datos o mediciones reales en el exterior a cualquier otra condición, por ejemplo, a las condiciones de prueba estándar (STC). En el pasado, se han propuesto procedimientos semi-empíricos, para la transformación de curvas I-V medidas de módulos de silicio cristalino a otros valores de irradiancia y temperatura de la celda. Se requiere la misma respuesta espectral del sensor y el módulo de irradiancia y no proporcionan información sobre los efectos de cambiar las distribuciones espectrales. En este trabajo se propone un enfoque para un procedimiento de transformación de curvas I-V medidas de módulos de silicio cristalino a otras condiciones dada teniendo en cuenta la distribución espectral de la irradiancia.

Como resultado en este trabajo el procedimiento de transformación presentado aquí es una herramienta útil para una evaluación precisa de las mediciones en exteriores de los módulos fotovoltaicos y con ello una mejora de la potencia nominal de estos. El procedimiento en conjunto con los modelos de irradiación espectral y temperatura del módulo sirve como base para los algoritmos de clasificación de energía. (Knaupp, 2010)

6. *Design of a twin capacitive load and its application to the outdoor rating of photovoltaic modules.* (Javier Muñoz, 2013)

En este se describe el diseño de una carga capacitiva puramente, que puede rastrear simultáneamente las características I-V de dos módulos fotovoltaicos. Además, se presentó un ejemplo de la aplicación de este sistema dual a la clasificación exterior de módulos fotovoltaicos, cuyos resultados han mostrado un buen grado de repetibilidad.

El diseño de la carga capacitiva doble que se describió, así como el sistema, mostraron una repetibilidad de alrededor %, lo que es suficiente para considerar la

caracterización de los módulos fotovoltaicos en el marco de los procedimientos de garantía de calidad. (Javier Muñoz, 2013)

7. Modelado y simulación de un panel fotovoltaico empleando técnicas de inteligencia artificial. (Adalberto Ospino Castro, 2015)

En este se presenta la modelación del comportamiento energético y la determinación de los parámetros del circuito equivalente de un panel fotovoltaico con el empleo de técnicas de inteligencia artificial. Para tal efecto, se desarrolló en Matlab un algoritmo genético que permite obtener los parámetros físicos no brindados por los fabricantes para la implementación de funciones matemáticas que se homologuen al comportamiento dinámico de un panel solar. El algoritmo desarrollado en Matlab permite determinar, además, la eficiencia del algoritmo seguidor del punto de máxima potencia del inversor, el cual es un parámetro de no simple obtención o no determinado en condiciones de campo. Finalmente, el algoritmo se probó satisfactoriamente en un panel solar monocristalino de 50W obteniendo adecuados resultados en comparación con el modelo experimental para diferentes niveles de irradiación solar. Los resultados demuestran que el proceso desarrollado constituye una herramienta que puede ser aplicada a paneles fotovoltaicos en condiciones de campo.

- Se realizó un algoritmo genético que permite obtener los parámetros físicos no entregados por ningún fabricante de paneles fotovoltaicos, que hacen parte del circuito eléctrico equivalente, y que permite tener los valores de la ecuación matemática que se homologue al comportamiento en campo o real del panel fotovoltaico en estudio; en base a los resultados entregados del algoritmo, las pruebas realizadas permitieron evaluar el desempeño del panel fotovoltaico para cambios en los niveles de irradiación solar. (Adalberto Ospino Castro, 2015)

8. *An open-source hardware I-V curve tracer for monitoring PV output in Bolivia.* (Abrahamse, 2014)

Se presenta el desarrollo de un trazador de curva I-V de código abierto para el monitoreo de potencia producida por un panel solar en Bolivia, y los resultados obtenidos por éste. El dispositivo está elaborado con componentes de bajo costo y es posible adaptar su diseño para monitorear paneles de diferentes potencias. El dispositivo toma muestras de corriente y voltaje para un elemento fotovoltaico utilizando una carga variable para obtener los diferentes puntos que conforman una curva corriente-voltaje. El dispositivo también tiene un régimen de control, el cual desconecta y reconecta el panel de su carga en intervalos de tiempo fijos para la toma de datos, permitiendo el monitoreo del panel aun cuando está siendo utilizado en un sistema de energía solar. (Abrahamse, 2014)

9. *An autonomous online I-V tracer for PV monitoring applications.* (Riley, 2015)

En este trabajo se realizó un trazador I-v que funciona de forma autónoma, sin necesidad de ser desconectado de su carga. Se analizó el estado actual de los trazadores I-V disponibles comercialmente y se tomó en cuenta todo para la motivación e impulso para el trazador I-V autónomo en línea.

Para este se tomaron los diseños óptimos en cuestión de trazadores I-V y se potenciaron con la opción de realizar un equipo online.

Un trazador I-V de funcionamiento autónomo sería la mejor opción para monitorear completamente un módulo fotovoltaico. Al utilizar una topología de convertidor CC / CC SEPIC, se puede construir un trazador I-V con corriente de entrada continua que funciona en línea con el inversor. El SEPIC debe operar en DCM cerca de VOC, lo que dificulta el control. Sin embargo, una forma de onda de voltaje de referencia

que permite al convertidor tiempo adicional para alcanzar su punto de operación en DCM resuelve este problema. (Riley, 2015)

10. *Análisis del comportamiento de módulos fotovoltaicos. Diagnóstico, modelado matemático de curvas I-V y P-V, y construcción de prototipo de trazador de curvas I-V.* (fonseca, 2013)

Se realizó el diseño e implementación de un trazador de curvas de bajo costo al cual le resta algunos ajustes entre los cuales debe estar la implementación de un método de 4 puntas (método kelvin) para la medición de V e I del módulo fotovoltaico. Además de esto se deben realizar pequeños ajustes en la precisión de la carta de adquisición de datos, además de algunos otros ajustes que se requerirán en el uso.

La obtención de un modelo matemático para los módulos fotovoltaicos resulta una herramienta interesante para el monitoreo del sistema fotovoltaico ya que con mediciones de corriente de cortocircuito y tensión de circuito abierto se puede obtener una estimación de la potencia producida por el sistema. Esta aproximación fue evaluada mediante el error entre la curva simulada y la curva real la cual, para estado estable, un punto estable de funcionamiento puede tener un error tan bajo como 0.88% dependiendo del modelo utilizado. Esta precisión se puede alcanzar siempre que se utilice un ajuste individual del modelo a cada conjunto de datos (V_{oc} , I_{sc} , V_{mpp} y I_{mpp}). Para los cuales la variación de la temperatura y radiación ya están incluidos en los valores utilizados. Si se quiere tener un modelo que varíe con la temperatura y la radiación, se debe contar con estos dos valores y con los coeficientes de variación de I_{sc} y V_{oc} con la temperatura y la radiación, se puede realizar un ajuste al conjunto de datos obtenido en STC por el mismo modelo matemático. (fonseca, 2013)

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

En este presente apartado se presentan conceptos básicos que trataremos. Además de algunos fenómenos, principios, esquemas e información fundamentales a tomar en cuenta para el diseño del Caracterografo para sistemas fotovoltaicos.

2.1 Tecnología Fotovoltaica

2.1.1 La célula fotovoltaica

El fenómeno fotovoltaico fue descubierto en 1839 por el científico francés, Henri Becquerel. Las primeras celdas solares de selenio fueron desarrolladas en 1880, sin embargo, no fue sino hasta 1950 que se desarrollaron las celdas de silicio monocristalino que actualmente dominan la industria fotovoltaica. Las primeras celdas de este tipo tenían una eficiencia de conversión de solo 1%; ya para 1954 se había logrado incrementar la eficiencia al 6% en condiciones normales de operación, mientras en el laboratorio se lograron eficiencias cercanas a 15%. Desde entonces hasta nuestros días la eficiencia en las células no ha mejorado notablemente.

La producción eléctrica está basada en el fenómeno físico denominado "efecto fotovoltaico", que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de unos dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas. Estas células están elaboradas a base de silicio puro (uno de los elementos más abundantes en la naturaleza, componente principal de la arena) con adición de impurezas de ciertos elementos químicos (boro y fósforo), y son capaces de generar cada de ellas una corriente de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,48 Voltios, utilizando como fuente de energía la radiación luminosa. Las células se montan en serie sobre módulos fotovoltaicos o módulos solares para conseguir un voltaje

adecuado. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión (rebota) y otra parte por transmisión (atraviesa la célula).

El resto es capaz de hacer saltar electrones de una capa a la otra creando una corriente proporcional a la radiación incidente. La capa antirreflejo aumenta la eficacia de la célula.

Generalmente, una célula fotovoltaica tiene un grosor que varía entre los 0,25 y los 0,35mm y una forma generalmente cuadrada, con una superficie aproximadamente igual a 100 mm².

Los materiales para la fabricación de los módulos fotovoltaicos solares son:

- Silicio Monocristalino: de rendimiento energético hasta 15 - 17%.
- Silicio Poli-cristalino: de rendimiento energético hasta 12 - 14 %
- Silicio Amorfo: con rendimiento energético menor del 10 %;
- Otros materiales: Arseniuro de galio, diseleniuro de indio y cobre, telurio de cadmio.

Actualmente, el material más utilizado es el silicio monocristalino que tiene prestaciones y duración en el tiempo superiores a cualquier otro material utilizado para el mismo fin. (Fernandez Ferichola, 2009)

2.1.2 Panel o Modulo Fotovoltaico

Al grupo de células fotoeléctricas o celdas fotovoltaicas se le conoce como panel fotovoltaico.

Los paneles fotovoltaicos consisten en una red de células conectadas como circuito en serie para aumentar la tensión de salida hasta el valor deseado (usualmente se utilizan 12V a 36V) a la vez que se conectan varias redes como circuito paralelo para aumentar la corriente eléctrica que es capaz de proporcionar el dispositivo.

La eficiencia de conversión media obtenida por las células disponibles comercialmente (producidas a partir de silicio monocristalino) está alrededor del 16%. La vida útil media a máximo rendimiento se sitúa en torno a los 25 años, período a partir del cual la potencia entregada disminuye.

El tipo de corriente eléctrica que proporcionan es corriente continua, por lo que si necesitamos corriente alterna o aumentar su tensión, tendremos que añadir un inversor y/o un convertidor de potencia. (Renovetec, 2018)

2.1.3 Descripción general de una instalación fotovoltaica

Una instalación fotovoltaica conectada a la red dispone del conjunto de equipos, conexiones, aparamenta y sistemas que permiten su conexión a la red y su correcto funcionamiento.

Según el tipo de instalación, de forma muy general, se puede distinguir entre instalaciones fotovoltaicas conectadas a red e instalaciones fotovoltaicas aisladas de red. Las conectadas a red están formadas por un generador fotovoltaico y un sistema de acondicionamiento de potencia, encargado de transformar la energía en forma de corriente continua a corriente alterna, con las características de la red de distribución. El sistema de acondicionamiento de potencia es el inversor, que debe cumplir todos los requisitos de seguridad y garantía para que su funcionamiento no provoque alteraciones en la red ni disminuya su seguridad, contando para ello con las funciones de protección correspondientes.

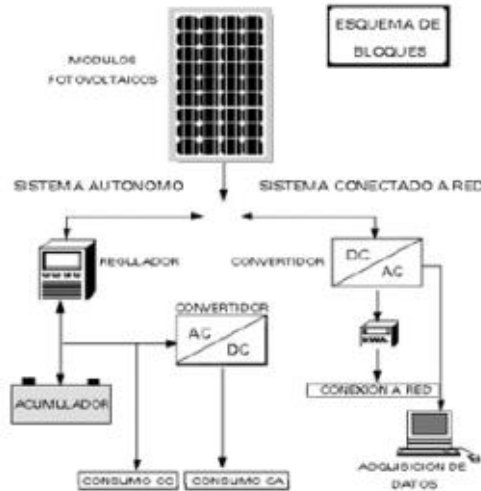


Figura 1. Esquema de una instalación solar fotovoltaica. (Israel Blanco Sardinero, 2012)

Las instalaciones fotovoltaicas aisladas pueden contar o no con sistemas de acumulación o baterías. Los sistemas sin acumulación habitualmente son bombeos directos. Las baterías en un 90% corresponden a las estacionarias del tipo Plomo-Ácido, que con un mantenimiento adecuado se adaptan perfectamente a los sistemas de generación.

Se puede emplear esta energía como tal o después transformarla a corriente alterna mediante un inversor. (Israel Blanco Sardinero, 2012)

2.2 Curva característica del módulo fotovoltaico (curva o característica I-V)

La representación estándar de un dispositivo fotovoltaico es la curva o característica I-V (característica corriente-tensión), figura 2. La curva representa las posibles combinaciones de corriente y voltaje para un dispositivo fotovoltaico bajo unas condiciones ambientales determinadas (radiación solar incidente y temperatura ambiente). El punto en concreto de corriente y voltaje en el que el dispositivo fotovoltaico trabajará vendrá determinado por la carga a la que esté conectado.

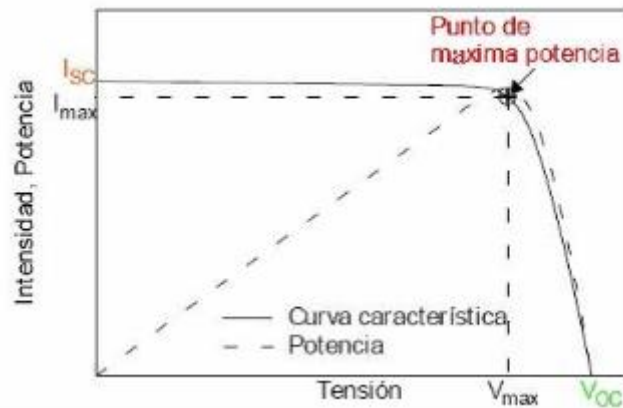


Figura 2. Curva característica, con sus principales elementos. (Fernandez Ferichola, 2009)

2.2.1 Principales parámetros de la característica I-V

- Corriente de cortocircuito (I_{sc} notación internacional): es la máxima corriente que producirá el dispositivo bajo unas condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondientes a un voltaje igual a cero.
- Voltaje de circuito abierto (V_{oc} notación internacional): Es el máximo voltaje del dispositivo bajo unas condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondientes a una corriente igual a cero.
- Potencia máxima (P_{max}): Es la máxima potencia que producirá el dispositivo en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura, correspondiente al par máximo I-V.
- Corriente en el punto de máxima potencia (I_{pmp}): Es el valor de la corriente para P_{max} en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura.
- Voltaje en el punto de máxima potencia (V_{pmp}): Es el valor de voltaje para P_{max} en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura.
- Factor de forma (FF): Es el valor correspondiente al cociente entre P_{max} y el producto de I_{sc} x V_{oc} . Puede venir expresado en tanto por ciento o tanto por 1,

siendo el valor 100% el que corresponderá a un hipotético perfil de cuadrado, no real. Nos da una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico, siendo este tanto mejor cuánto más alto sea su factor de forma. Ecuación 1

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1).$$

Generalmente las células dentro del módulo fotovoltaico se asocian en serie, con el fin de obtener unos valores de voltaje más apropiados para su conexión a distintas cargas o a una batería (el voltaje de una célula estándar suele ser de unos 0.6V). El voltaje total del módulo dependerá, por tanto, del número de células asociadas en serie. Por el contrario, la corriente que podemos obtener del módulo fotovoltaico va a depender básicamente del tipo y tamaño de células (suponiendo que no haya células conectadas en paralelo en el interior del módulo). (Fernandez Ferichola, 2009)

2.2.2 Ecuación característica

La curva característica corriente tensión de una célula fotovoltaica puede describirse con suficiente precisión por la ecuación (2):

$$I = I_l - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{mV_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2).$$

Donde I_l es la corriente fotogenerada, I_0 es la corriente inversa de saturación del diodo, V_t es el voltaje térmico ($V_t = \frac{KT}{e}$, siendo K la constante de Boltzman, T la temperatura en grados Kelvin y e la carga del electrón), m es el factor de idealidad del diodo, R_s es la resistencia serie y R_p la resistencia paralela. Para el caso de un módulo FV, su característica eléctrica dependerá del número de células en serie y paralelo que posea. Si suponemos que todas las células constituyentes de un módulo fueran iguales a la corriente generada por el módulo sería igual a la corriente

de la célula multiplicada por el número de células en paralelo, y el voltaje sería igual al voltaje de la célula multiplicado por el número de células en serie:

$$I_{mod} = IC * Np \quad (3).$$

$$V_{mod} = VC * Ns \quad (4).$$

Donde Np y Ns son respectivamente el número de células en paralelo y en serie que contiene el módulo que empleamos como ejemplo en la figura 3.

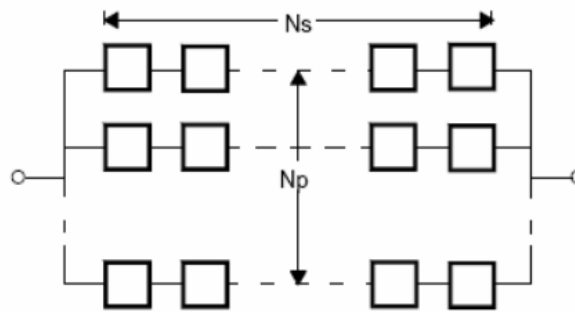


Figura 3. Esquema de conexión eléctrica en un módulo fotovoltaico. (Fernandez Ferichola, 2009)

Teniendo esto en cuenta, si combinamos las ecuaciones 2, 3 y 4 se obtendría, para la curva característica de un módulo fotovoltaico formado por células iguales y con relación a los parámetros de la célula:

$$I = N_p * \left(I_l - I_0 \left(\exp \left(\frac{V/N_s + IR_s/N_p}{mv_t} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V/N_s + IR_s/N_p}{R_p} \right) \right) \quad (5).$$

Esta ecuación muestra el mismo comportamiento que la característica I-V de una célula, y de hecho en la práctica, cuando hablamos de la ecuación característica y los parámetros fundamentales de un módulo fotovoltaico, no se suele hacer referencia a su relación con la célula solar, sino que se escribe la ecuación 2 con todos los parámetros característicos (I_l , I_0 , m , R_s , R_p) del módulo. La figura 2

muestra un ejemplo de la curva característica de un módulo FV partiendo de la misma célula y con diferentes configuraciones serie paralelo. Los parámetros significativos de esta curva son los mismos que se empleaban para el caso de células, es decir, I_{sc} es la corriente de cortocircuito, V_{oc} es la tensión de circuito abierto, V_{pmp} e I_{pmp} son los valores de voltaje de y corrientes correspondientes al punto de máxima potencia P_{max} , y FF es el "Fill factor" o "Factor de forma" que nos da una idea de la calidad de la curva.

2.2.3 Factores que afectan a la característica I-V del generador

La curva característica corriente tensión (curva o característica I-V) del generador fotovoltaico se ve afectada por factores ambientales tales como la intensidad de iluminación (irradiancia), la temperatura y la distribución espectral de la luz a las que está sometida el panel o sistema fotovoltaico en las condiciones reales de operación.

- Efecto de la Intensidad de Iluminación (Irradiancia)

La irradiancia afecta principal y directamente a la corriente, de forma que se puede considerar que la corriente de cortocircuito del generador fotovoltaico es proporcional a la irradiancia, figura 4:

$$I_{sc}(E_2) = I_{sc}(E_1) * \frac{E_2}{E_1} \quad (6).$$

Donde:

- $I_{sc}(E_2)$ es la corriente de cortocircuito para un nivel de irradiancia E_2
- $I_{sc}(E_1)$ es la corriente de cortocircuito para un nivel de irradiancia E_1

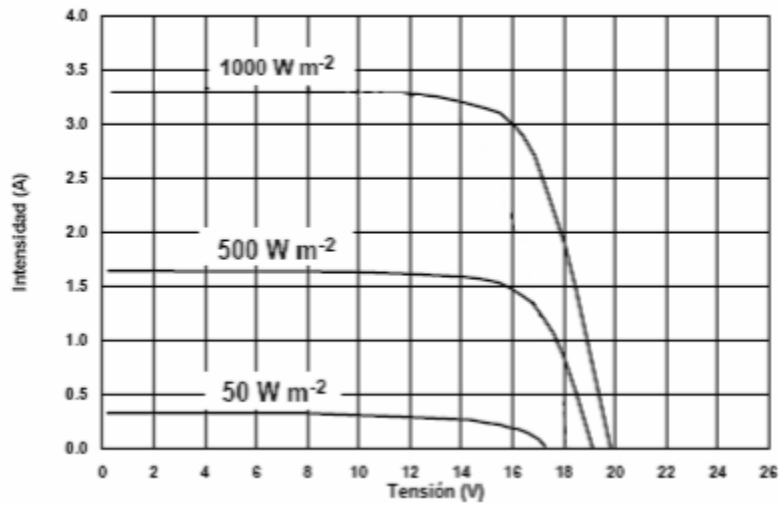


Figura 4. Efecto de la irradiancia sobre la característica I-V de un generador FT. (Fernandez Ferichola, 2009)

- Efecto de la Intensidad de Iluminación (Irradiancia)

La temperatura afecta principalmente a los valores de voltaje de la característica I-V, y tiene su mayor influencia en el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), aunque también modifica los valores del punto de máxima potencia y el valor de I_{sc} (éste muy ligeramente). En la figura 5 podemos observar la variación de la curva característica I-V de un módulo fotovoltaico al variar la temperatura y con pequeñas variaciones de irradiancia.

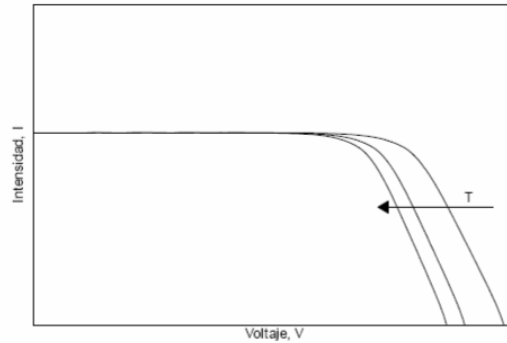


Figura 5. Ejemplo teórico de la variación de la característica I-V del módulo PV al variar la temperatura manteniendo la irradiancia constante. (Fernandez Ferichola, 2009)

- Efecto del contenido espectral de la luz

Dependiendo de la hora de medida y la época del año el espectro presenta pequeñas desviaciones y variaciones respecto al espectro considerado estándar en la superficie terrestre. Si se realiza una medida del espectro en el momento de tomar la característica I-V puede realizarse una pequeña corrección multiplicando la corriente de cortocircuito por el “factor espectral”, obteniendo de la comparación del espectro estándar y el espectro en condiciones experimentales. Esta corrección suele ser muy pequeña y se utiliza cuando se requiere elevada precisión por tratarse de calibraciones de células o módulos fotovoltaicos. (Fernandez Ferichola, 2009)

2.2.4 Condiciones de referencia

Debido a que la curva característica del módulo fotovoltaico cambia con las condiciones ambientales y depende de estas, es necesario definir o tener en cuenta una serie de condiciones de operación para poder contrastar los valores de distintos fabricantes y extrapolar a partir de ellas a otras condiciones deseadas.

- Condiciones Estándar de medida (STC)

Estos parámetros son las de uso más generalizado y universal, y vienen definidas por:

- Irradiancia = 1000W/m²
- Distribución espectral = AM 1.5G
- Incidencia Normal
- Temperatura de la célula 25°C

Normalmente los parámetros característicos de los módulos o células incluidos en las hojas de especificaciones técnicas de los fabricantes vienen definidos en estas condiciones. Sin embargo, la experiencia muestra que pocas veces los módulos fotovoltaicos alcanzan estas condiciones, ya que un nivel de irradiancia de 1000W/m² que puede alcanzarse al mediodía, los módulos adquieren temperaturas de más de 25°C, a no ser que sea un día claro de invierno. Es por esto por lo que se definen, además, otras condiciones que pretenden representar el comportamiento del módulo de manera más realista.

2.2.5 Extrapolación a condiciones estándar de medida (CEM)

El método básico o general empleado comúnmente consiste en corregir los valores de I_{sc} y V_{oc} a los niveles de irradiancia y temperatura de la célula deseados, y posteriormente trasladar toda la curva I-V hasta la I_{sc} y V_{oc} corregidas. Los valores de I_{sc} y V_{oc} en las condiciones deseadas se obtienen según las ecuaciones:

$$I_{SC,2} = I_{SC,1} * \frac{E_2}{E_1} + \alpha(T_2 - T_1) \quad (7).$$

$$V_{OC,2} = V_{OC,1} * m \frac{K * t}{e} \ln \left(\frac{E_2}{E_1} \right) + \beta(T_2 - T_1) \quad (8).$$

Donde $I_{SC,1}$, $V_{OC,1}$, T_1 y E_1 son la corriente de cortocircuito, voltaje de circuito abierto, temperatura e irradiancia respectivamente en las condiciones experimentales, $I_{SC,2}$, $V_{OC,2}$, T_2 y E_2 son estos mismos parámetros en las condiciones a las que se desea corregir la curva.

- m es el factor de idealidad del diodo
- a y β son los coeficientes de temperatura
- k es la constante de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$) y e la carga del electrón ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{C.}$)

2.2.6 Condiciones nominales de operación (CON)

- Irradiancia = 800W/m^2
- Velocidad del viento 1 m/s
- Temperatura de la célula – Temperatura de Operación Nominal de la Célula (TONC)
- Temperatura ambiente = 20°C

Donde TONC es lo que se define como la temperatura nominal de operación de la célula, y representa la temperatura que alcanzarían las células solares para un nivel de irradiancia de 800W/m^2 , temperatura ambiente de 20°C , velocidad del viento 1m/s e incidencia normal. El valor de TONC también viene incluido en las hojas de características técnicas de los módulos, y para un módulo de silicio monocristalino suele estar en torno a los 47°C . Además, existen normas internacionales que indican la forma de calcular esta temperatura. (Fernandez Ferichola, 2009)

Dado que las condiciones nominales de operación hacen referencia a la temperatura ambiente, y no a la temperatura del módulo, se hace necesario una expresión que relacione ambas. Se puede considerar una buena aproximación:

$$T_c = T_a + \frac{NOCT-20}{800} * E \quad (8).$$

Donde:

- Tc es la temperatura de la célula o módulo
- Ta es la temperatura ambiente
- NOCT es la Temperatura de Operación Nominal de la Célula
- E es la irradiancia

2.3 Eficiencia del módulo fotovoltaico

La eficiencia de un dispositivo es la manera común de definir la calidad de este. Para el caso de un generador fotovoltaico, esta sería el cociente entre la energía producida por el dispositivo y la energía incidente. Sin embargo, existen varias maneras de definir la eficiencia del generador fotovoltaico, dependiendo del área de este que se tenga en cuenta. Así, en los catálogos de fabricantes y en bibliografías de referencia podemos encontrar:

2.3.1 Eficiencia con respecto al área total

Esta definición implica la relación entre la máxima potencia generada por el dispositivo y la cantidad de radiación solar incidente en el dispositivo completo. Por dispositivo completo se entiende el área total del módulo, incluyendo células, espacio intercelular, contactos y marco de este.

$$\eta_{Areatotal} = \frac{P_{max}}{A_T * E_T} \quad (9).$$

Donde $\eta_{Areatotal}$ es la eficiencia con respecto al área total, P_{max} es la potencia máxima que puede generar el dispositivo, A_t es el área total del mismo y E_t es la radiación solar incidente total.

2.3.2 Eficiencia con respecto al área de célula

Es una estimación o versión modificada de la anterior, en la que sólo se considera el área cubierta por las células dentro del módulo ignorando el espacio entre células y el marco del módulo. De esta manera se evita el efecto de marcos muy grandes, que en realidad no afectan a la calidad de la célula FV. La expresión sería la misma que la de la ecuación (9), sustituyendo el área total A_t por el área de células A_c .

2.3.3 Eficiencia con respecto al área activa de célula

La definición área activa de célula implica el cálculo de la eficiencia basada solamente en el área del dispositivo que está expuesta a la luz solar incidente. Las áreas sombreadas por los contactos o las rejillas de las células no estarían incluidas. Esta es la eficiencia que nos ofrece siempre un valor mayor, aunque normalmente sólo se utiliza para células individuales y en resultados de laboratorio, y no en dispositivos comerciales acabados.

CAPITULO 3. DESARROLLO TEÓRICO/EXPERIMENTAL

En esta sección se describen las particularidades del desarrollo del presente trabajo. En las cuales se explicarán las consideraciones técnicas y teóricas empleadas para el diseño del Caracterografo para sistemas fotovoltaicos

3.1 Planteamiento del diseño

En este se va a explicar el desglose de las partes del diseño del Caracterografo para sistema fotovoltaicos, las consideraciones que permitan trazar la curva I-V, además de obtener parámetros deseados del módulo o sistema fotovoltaico.

Para llevar un mejor control sobre el desarrollo y diseño del Caracterografo este se dividió en las partes a trabajar en específico, para lograr un desarrollo ordenado y lograr así una metodología clara para el diseño y construcción de nuestro Caracterografo, figura 6.

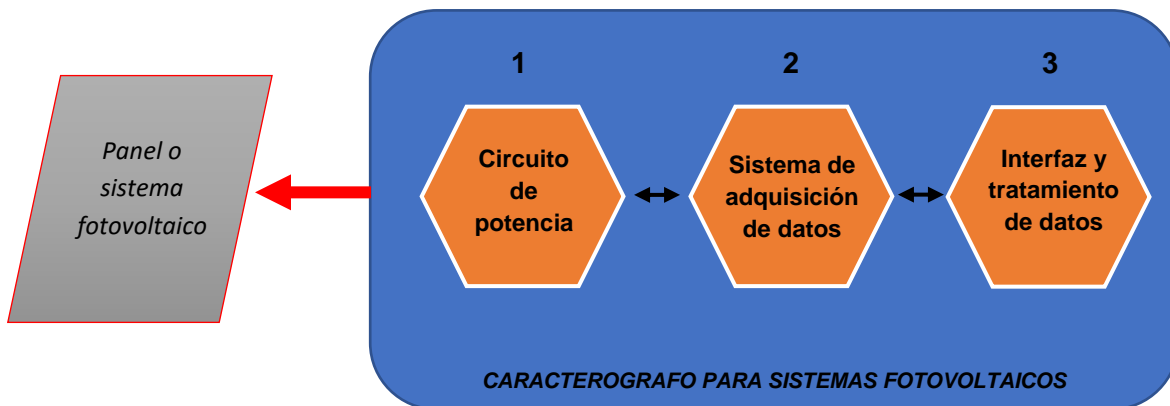


Figura 6. Esquema de partes que conforman el Caracterografo para sistemas fotovoltaicos.

El diseño base o inicial para lograr el desarrollo del Caracterografo se determinaron tres elementos en los cuales trabajar, estos combinados darán como resultado obtener el sistema completo deseado. Los elementos son:

1. Circuito de potencia
2. Sistema de adquisición de datos
3. Interfaz y tratamiento de datos

3.2 Diseño del circuito de potencia

Para realizar el diseño de este, se tomó en cuenta cuál es su función y lo que debe realizar y generar para el sistema.

Este circuito es el que va conectado directamente al panel o sistema fotovoltaico y debe generar las condiciones ideales para la medición de los valores de voltaje y corriente, necesarios para el análisis. Proporciona los puntos de medición, elementos a manipular, y los valores de ajuste necesarios para el sistema de adquisición de datos.

3.2.1 Generación de condiciones para la medición

El principio del diseño del circuito es la carga y descarga de una carga capacitiva o inductiva, esto permite al panel solar simular una carga variable, y medir puntos de corriente y voltaje de diferentes niveles. Como se observa en la ecuación (10), la corriente en un capacitor está en función a la variación del voltaje en el tiempo, y su carga también está en función del tiempo de acuerdo con su valor de capacitancia, ecuación (11).

$$I = C \frac{dV}{dt} \tag{10}.$$

$$q(t) = CV(t) \tag{11}.$$

3.2.2 Carga capacitiva

Se decidió emplear el método capacitivo para la medida de la curva I-V, ya que se basa en la propiedad que presenta un condensador/capacitor de comportarse como un cortocircuito cuando se encuentra descargado y como un circuito abierto cuando está plenamente cargado. De esta forma, mientras el condensador se va cargando se van tomando medidas que permiten pasar del estado donde se obtiene I_{sc} hasta un punto donde esta V_{oc} .

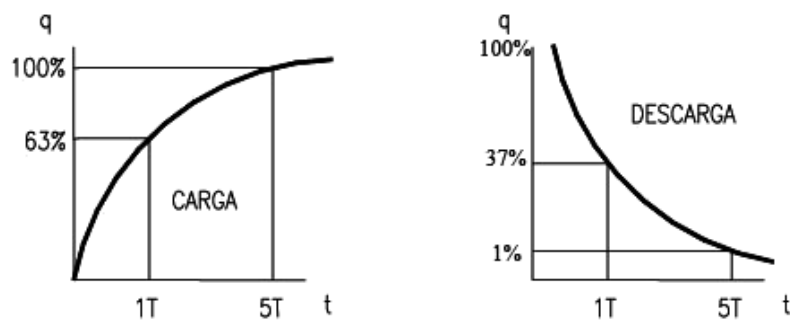


Figura 7. Esquema de comportamiento de carga y descarga de un capacitor/condensador. (lorenzo, 2011)

Como se observa en la figura 7 son procesos inversos, que ocurren durante la carga y descarga, por lo que si monitoreamos este elemento en esta transición obtendremos los valores deseados de corriente y voltaje.

Para poder medir la curva I-V de un módulo fotovoltaico es necesario conectarle en paralelo algún tipo de carga, para poder medir los valores de corriente y tensión. Decidimos conectar una carga capacitiva ya que el comportamiento de un módulo fotovoltaico es similar al de una fuente de corriente continua, y como podemos comprobar en la figura 8, en el proceso de carga de un condensador, a través de un módulo fotovoltaico, éste pasa por todos sus posibles estados de carga.

Comenzando por la corriente de cortocircuito, pasando por el punto de máxima potencia, hasta llegar al circuito abierto en el que la corriente es cero.

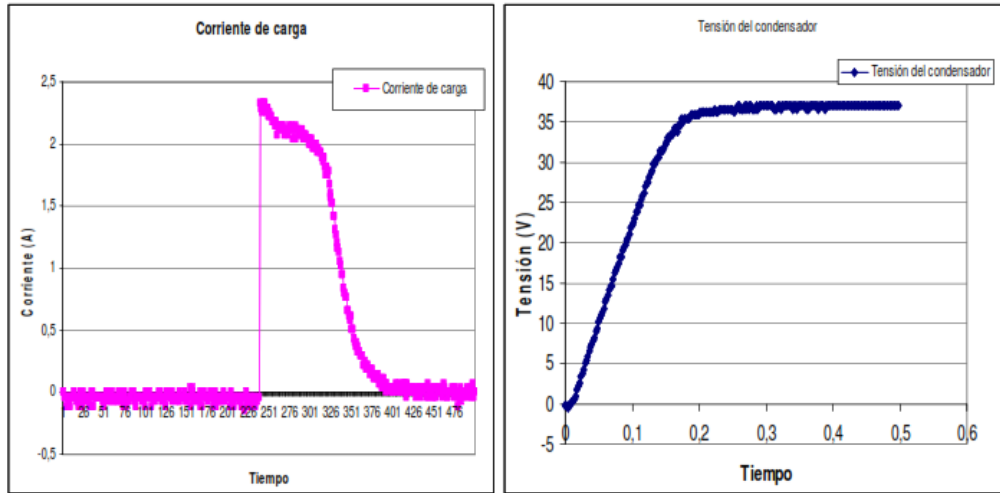


Figura 8. Curvas de corriente y de tensión para el proceso de carga de un capacitor/condensador. (lorenzo, 2011)

Se debe determinar el valor de la capacidad para disminuir el tiempo de medida de forma que las condiciones meteorológicas que rodean el módulo fotovoltaico no cambien sus valores (temperatura e irradiancia).

La ecuación característica de un capacitor/condensador es:

$$I_C(t) = C \frac{dV}{dT} \tag{12}$$

Considerando que la corriente es constante se desarrolla la siguiente ecuación:

$$\int I_C * dT = \int C * dV \tag{13}$$

Lo que da lugar a:

$$I_C * T = C * V \tag{14}$$

Despejando se obtiene:

$$V = \frac{I_C * T}{C} \quad (15)$$

En donde:

V: tensión del módulo fotovoltaico a circuito abierto

T: tiempo de carga del condensador

C: capacidad (capacitancia)

I_c: Corriente de carga

De la ecuación (15) se obtiene que la capacidad (capacitancia) será:

$$C = \frac{I_C * T}{V} \quad (16)$$

Y empleando términos más acordes a la aplicación que se le dará a la formula queda:

$$C = \frac{I_{sc} * T_m}{V_{oc}} \quad (17)$$

En donde:

V_{oc}: voltaje a circuito abierto del módulo o sistema fotovoltaico

T_m: tiempo de carga del condensador (tiempo para realizar la medición)

C: capacidad (capacitancia)

I_{sc}: Corriente de corto circuito del módulo o sistema fotovoltaico

Para el cálculo del valor de C suponemos y debemos tener en cuenta un tiempo que este dentro de los rangos y consideraciones necesarias, como que sea en un instante de tiempo para que las condiciones ambientales no cambien, así como un tiempo justo a las capacidades del sistema de adquisición de datos, y este pueda sin problema realizar la captura de los datos, así debe considerarse un tiempo de carga que entre dentro del rango de tiempos que se tiene previstos.

Un punto importante que tratar fue el hecho de lograr alcanzar la capacitancia (capacidad del capacitor/condensador) calculada y trasladar esta a lo real, es decir obtener el elemento físico deseado y la elección del tipo de tecnología de este, cerámico, electrolítico, metálico etc.

Existen tres tipos de capacitores:

- Electrolíticos
- Cerámicos
- Variables

El capacitor electrolítico puede tener diferentes tipos de dieléctrico (aislante) pudiendo ser líquido, aire, papel, plástico etc. entre sus placas. Este tipo de capacitor tiene polaridad.

El capacitor cerámico es el que tiene un dieléctrico de placas de tipo cerámico. Generalmente los capacitores electrolíticos tienen mayor capacidad de carga eléctrica que los cerámicos. Ambos pueden tener aplicaciones muy especiales en diferentes áreas de la electrónica. Este tipo de capacitor no tiene polaridad.

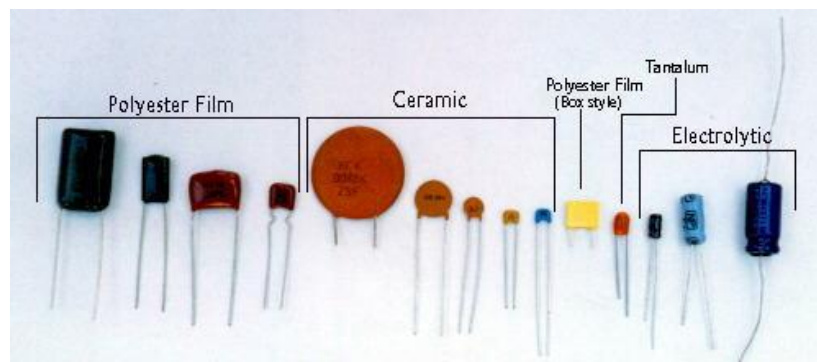


Figura 9. Tipos de capacitor/condensador (Guzman, 2017)

En nuestro caso para el diseño se decidió emplear una carga capacitiva y utilizar del tipo electrolíticos.



Figura 10. *Capacitores/condensadores electrolíticos* (SCIENCE19, 2017)

Los condensadores electrolíticos obtienen una gran parte de su capacitancia de la formación de una capa gaseosa en una placa cuando se aplica la polaridad adecuada. La capacitancia (C) es la magnitud de la carga (Q) en cada placa dividida por la tensión (V) aplicada a las placas:

$$C = Q / V. \quad (18)$$

Esta capa gaseosa y un mayor efecto dieléctrico dan a un condensador electrolítico una capacidad por volumen mucho mayor que otros tipos de capacitores pueden lograr. (SCIENCE19, 2017)

Las ventajas de emplear estos elementos son:

✓ Tamaño

El tipo más común de condensador electrolítico es el condensador de tántalo. Otros se componen por tipo de gas o pasta dieléctrica utilizada, siendo el electrolítico y el polipirrol de aluminio los típicos. En cada caso, la capacitancia disponible en un condensador electrolítico solo podría lograrse mediante un condensador no electrolítico (como condensadores de papel o mica) de un tamaño mucho mayor.

✓ Capacidad

Los condensadores electrolíticos tienen una mayor capacidad por volumen que cualquier otro tipo de capacitor. Debido a esta diferencia de tamaño, pocos

condensadores no electrolíticos están hechos con capacitancia superior a 10 microfaradios (uF). (SCIENCE19, 2017)

✓ Usos

Debido a sus valores de capacitancia más altos, los condensadores electrolíticos se usan con mayor frecuencia en aplicaciones de baja frecuencia, como en los filtros de suministro de energía. Los altos valores de capacitancia típicamente asociados con los condensadores electrolíticos actúan como líneas de cortocircuito o baja impedancia para RF (frecuencia de radio) y aplicaciones de frecuencia más alta.

✓ Aplicaciones

Debido a su construcción y operación sensible a la polaridad, los condensadores electrolíticos requieren un uso más cuidadoso que otros condensadores. Si se instalan incorrectamente (polarización inversa), los condensadores electrolíticos no alcanzarán la capacitancia correcta y pueden generar presión interna de gas, lo que provocará una explosión (menor). Los condensadores electrolíticos también son más sensibles a la temperatura que otros tipos de condensadores.

3.2.2.1 Arreglos de conexión

Uno de los mayores contratiempos y dificultades a la hora de determinar la capacidad (capacitancia) que requiere la carga capacitiva, es dimensionar esta con un valor que este fuera de los elementos comerciales y aún más mientras esta sea mayor, o el elemento requerido sea de características más robustas, esto potenciara el costo de este y por ende el de todo el sistema (Caracterografo para sistema fotovoltaicos).

Una forma de atacar este problema es la combinación de capacitores de distintas capacidades (capacitancia) para que juntos ofrezcan una mayor juntos, para esto se debe considerar que estos elementos deben tener las mismas características de

operación (Voltaje, voltaje de ruptura) o las más cercanas posibles para evitar generar efectos o fenómenos en estos que afecten su funcionamiento o capacidad

Esta combinación de elementos no es más que la forma de conexión o arreglos entre ellos

En muchas aplicaciones es necesario utilizar arreglos de capacitores, de tal forma que entre dos puntos a y b se tiene una capacitancia equivalente, como si se tratase de un solo capacitor. Los arreglos de capacitores en serie o en paralelo son de gran importancia en el uso práctico ya que ofrecen alternativas para conseguir la capacitancia requerida sin la necesidad de usar un solo elemento que por lo general es más costoso (ver figuras 11 y 12).

✓ Capacitores en serie

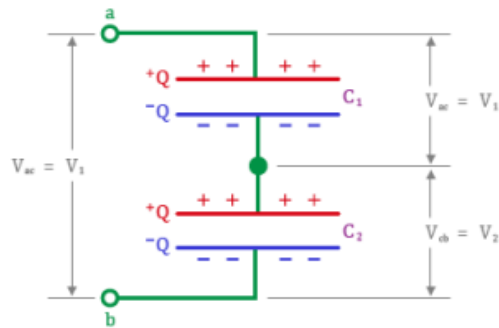


Figura 11. Disposición de capacitores en serie (tecnologico., s.f.)

La conexión de capacitores en serie tiene las siguientes propiedades:

1. Cada uno de los capacitores tiene la misma carga.
2. La carga del capacitor equivalente es igual a la carga de los capacitores individuales.
3. La capacitancia equivalente de la combinación de capacitores (C) se obtiene a partir de la suma de los inversos de las capacitancias de los capacitores individuales.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (18)$$

4. Cada capacitor se encuentra a distintas diferencias de potenciales: V_1, V_2, \dots, V_n , tal que:

$$V = V_1 + \dots + V_n \quad (19)$$

es la diferencia de potencial a la que se encuentra el capacitor equivalente de la configuración.

✓ Capacitores en paralelo

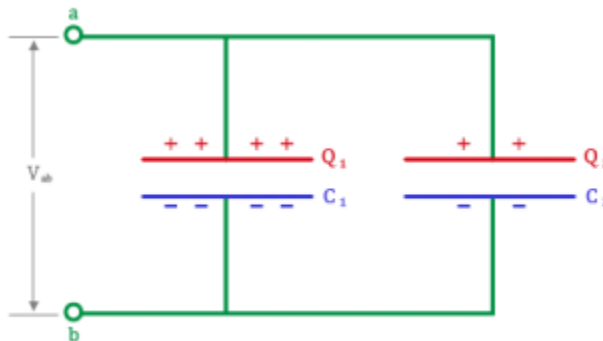


Figura 12. Disposición de capacitores en paralelo. (tecnologico., s.f.)

La conexión de capacitores en paralelo tiene las siguientes propiedades:

1. La diferencia de potencial es la misma para cada capacitor.
2. Las cargas de los capacitores son diferentes:

$$Q_1, \dots, Q_n \quad (20)$$

tal que

$$Q = Q_1 + \dots + Q_n \quad (21)$$

es la carga total suministrada por la fuente.

3. La capacitancia equivalente de la combinación de capacitores se obtiene a partir de la suma de las capacitancias individuales.

$$C = C_1 + \dots + C_n \quad (22)$$

3.2.2.2 Recapitulando

Con esto tenemos que se eligió para la carga que empleara el sistema para poder generar las condiciones que nos permitirán realizar las medidas y así caracterizar el módulo o sistema fotovoltaico, para esto se eligió una carga capacitiva, por las ventajas que esta nos trae y que esta satisface las necesidades requeridas y más específicamente capacitores/condensadores de tecnología electrolítica.

De igual forma se cuenta con la teoría necesaria para poder realizar el dimensionamiento de esta carga, tomando en cuenta las características del módulo o sistema fotovoltaico a caracterizar y las consideraciones que se deben tomar para esto.

3.2.3 Esquema del circuito

Ya que es posible dimensionar la carga capacitiva para los parámetros de un módulo o sistema fotovoltaico, se debe diseñar la secuencia de operación de esta carga, mediante el circuito, el cual plantea el uso de elementos adicionales necesarios para la operación del sistema.

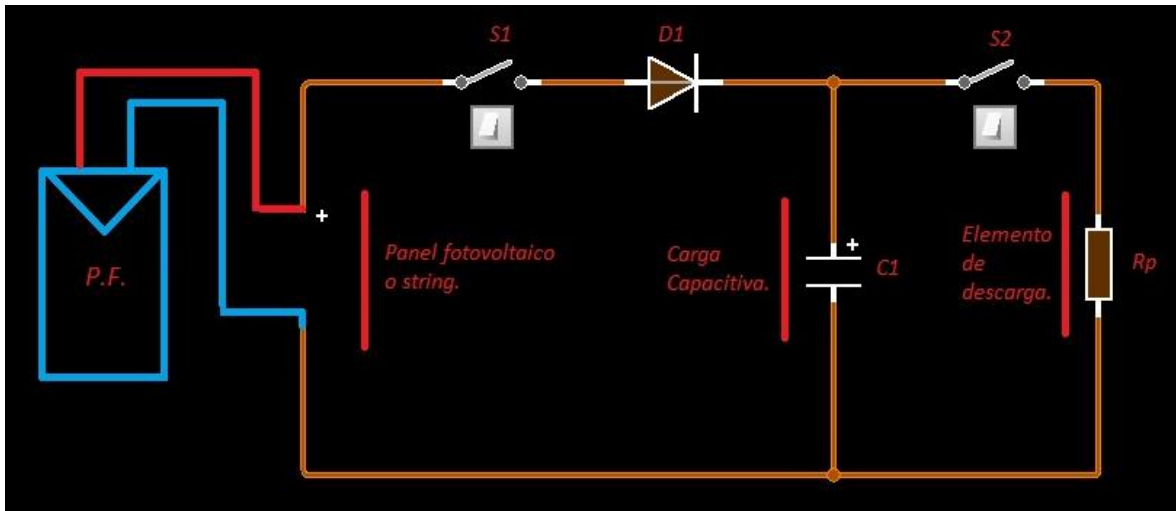


Figura 13. Circuito básico de potencia del sistema.

En la figura 13 tenemos un esquema simplificado del circuito, el cual consta además de la carga capacitiva (C1) de interruptores (S1, S2), diodos D1, y una resistencia de potencia (Rp).

Aquí una descripción general del funcionamiento del sistema.

1. Una vez conectado el módulo fotovoltaico al circuito, el interruptor S1 abierto, permite mantener aislado a los elementos y así elegir dar inicio a la carga del capacitor hasta que el operador lo desee y se esté preparado.
2. Cerrado el interruptor S1, inicia la carga del capacitor lo que genera las condiciones en este elemento para realizar las mediciones de voltaje y corriente y obtener los datos deseados, la razón de la posición y uso del diodo D1, es de protección, así como evitar circulaciones inversas de corriente, lo que ocasionaría disturbios en las mediciones.

que se ha producido un cortocircuito, con el objetivo de evitar daños a los equipos eléctricos.

A diferencia de los fusibles, que deben ser reemplazados tras un único uso, este puede ser rearmado una vez localizado y reparado el problema que haya causado su disparo o desactivación automática. (Magallanes, 2017)

Los parámetros más importantes que los definen son:

- Calibre o corriente nominal: corriente de trabajo para la cual está diseñado el dispositivo. Existen desde 5 hasta 64 amperios.
 - Tensión de trabajo: tensión para la cual está diseñado el disyuntor. Existen monofásicos (110 - 220 V) y trifásicos (300 - 600 V).
 - Poder de corte: intensidad máxima que el disyuntor puede interrumpir. Con mayores intensidades se pueden producir fenómenos de arcos eléctricos o la fusión y soldadura de materiales que impedirían la apertura del circuito.
 - Poder de cierre: intensidad máxima que puede circular por el dispositivo al momento del cierre sin que éste sufra daños por choque eléctrico.
 - Número de polos: número máximo de conductores que se pueden conectar al interruptor automático. Existen de uno, dos, tres y cuatro polos.
- ✓ Resistencias, resistencia de potencia.

Se denomina resistor o resistencia al componente electrónico y eléctrico diseñado para introducir una resistencia eléctrica determinada entre dos puntos de un circuito, figura 15. Los parámetros más importantes para considerar son:

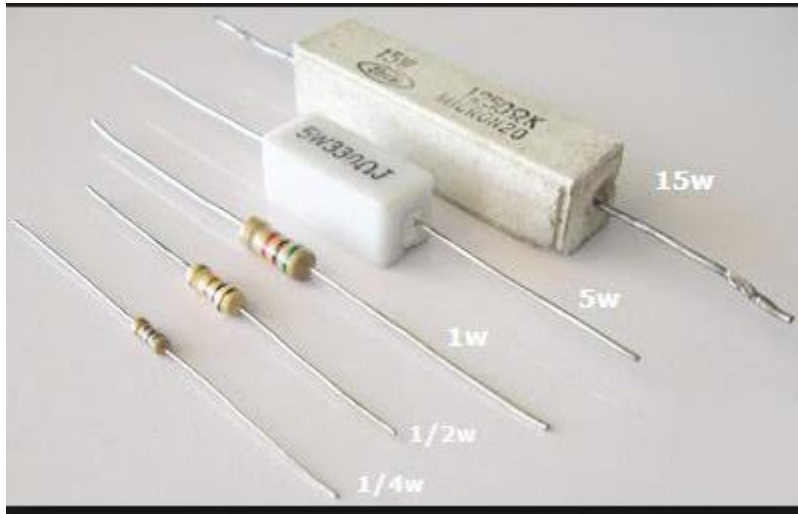


Figura 15. Tipos de resistencias. (D'Ambros, 2016)

- Potencia de disipación.

Es la potencia máxima que puede soportar sin que su valor se vea alterado a lo largo del tiempo. Cuanto más se caliente una resistencia, más peligro corre de que su valor se vea modificado a lo largo de su vida útil. Calcular la potencia de disipación de una determinada resistencia y sobredimensionarla lo suficiente para que su valor permanezca invariable con el paso de los años. Los fabricantes ya han tenido en cuenta esto e indican dicha potencia de disipación para que esta nunca se sobrepase. (visitor, 2015)

La fórmula de la potencia eléctrica que soporta un componente a través del cual circula una corriente eléctrica es la siguiente:

$$P = V * I \quad (23)$$

Siendo "P" la potencia consumida de la fuente de energía, "V" la tensión en sus bornes e "I" la intensidad de corriente que circula a su través. la fórmula según Ohm para calcular la intensidad de corriente que circula a través de la resistencia es:

$$I = \frac{V}{R} \quad (24)$$

Si en la fórmula básica de la potencia ($P=V \cdot I$) sustituimos la "I" por el término de la derecha de la expresión equivalente anterior, tenemos lo siguiente:

$$P = V * \frac{V}{R} \quad (25)$$

Y si simplificamos, la expresión se nos queda como sigue:

$$P = V * \frac{V^2}{R} \quad (26)$$

Con lo que ya tenemos una fórmula para calcular la potencia consumida por una resistencia en función de la tensión aplicada a sus bornes.

✓ Calculo de la resistencia de descarga del capacitor.

El valor tiene que ser lo más alto posible porque de esta forma no influirá en el funcionamiento normal del circuito ni las mediciones.

$$T = R * C \quad (27)$$

Despejando:

$$R = \frac{T}{C} \quad (28)$$

Donde:

R: Resistencia (valor del elemento)

C: Capacitancia (valor del elemento)

T: Tiempo (tiempo de descarga del capacitor)

✓ Capacidad del cable.

Los cables AWG están diseñados para soportar niveles de corriente en uso comprendidos entre los 500-600 volts.

Los niveles de corriente dependen de la carga en uso y no del voltaje utilizado, tensión baja (110-220v).

Calibre	Amperes
14	15
12	20
10	30
8	50
6	70

Tabla 1 – relación, calibre-corriente. (Electricaplicada, 2015)

✓ Diodo de potencia

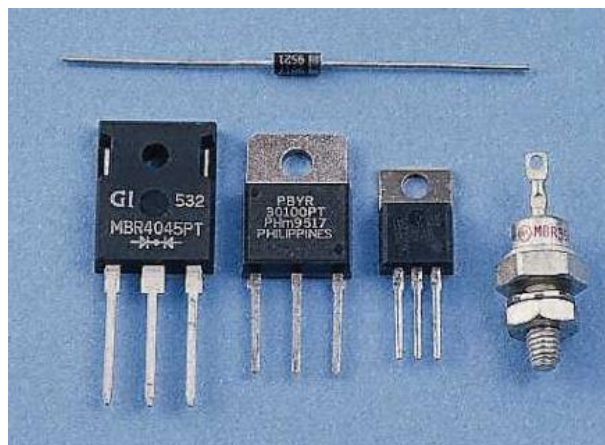


Figura 16. Tipos de diodos. (Solarweb.net, 2011)

Uno de los dispositivos más importantes de los circuitos de potencia son los diodos, figura 16, aunque tienen algunas limitaciones: son dispositivos unidireccionales, no pudiendo circular la corriente en sentido contrario al de conducción. El único procedimiento de control es invertir el voltaje entre ánodo y cátodo.

Los diodos de potencia se caracterizan porque en estado de conducción, deben ser capaces de soportar una alta intensidad con una pequeña caída de tensión. En sentido inverso, deben ser capaces de soportar una fuerte tensión negativa de ánodo con una pequeña intensidad de fugas.

Teniendo en cuenta el número de cálculos que se debe realizar para el dimensionamiento de los elementos del circuito entre otros factores que dificultarían o volvería tedioso el diseño, se elaboró como herramienta una hoja de cálculo (Excel) en la cual se encuentran alojadas todas las fórmulas de dimensionamiento de los elementos, así como las consideraciones que se deben tener, esto para facilitar el diseño y dimensionamiento del circuito de potencia, además de tener un mayor panorama al poder dimensionar con respecto al tiempo de carga deseado, a la capacidad de la carga capacitiva con la que se cuenta o la capacidad del sistema de adquisición de datos, figura 17.

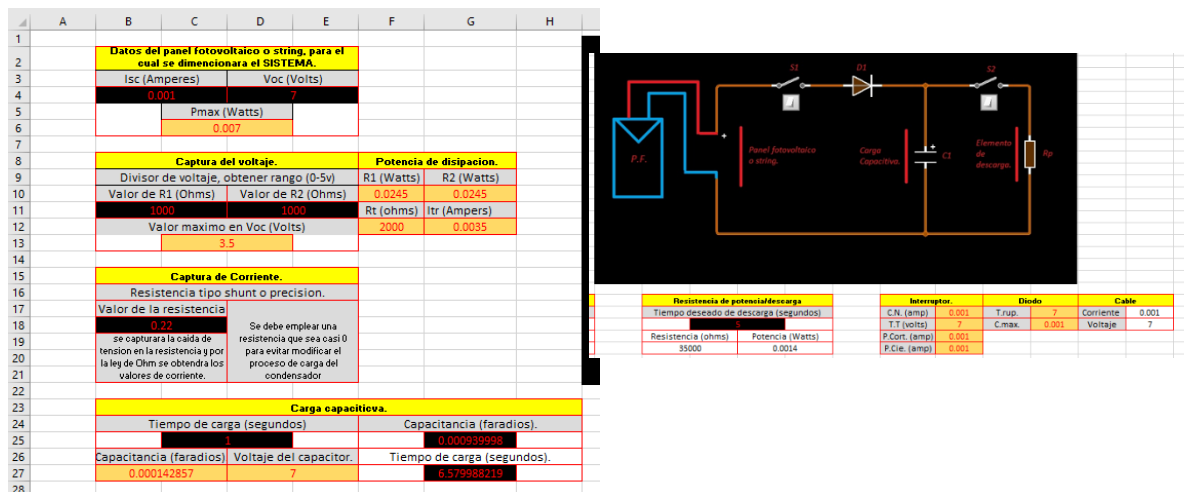


Figura 17. Hoja de cálculo para dimensionamiento

3.2.3.2 Recapitulando

El circuito de potencia del sistema portátil está formado por un o un conjunto de condensadores que desempeñarán la función de carga para el módulo fotovoltaico, paralelamente a los condensadores se encuentra una resistencia de potencia mediante la cual se descargarán los condensadores. Tanto la conexión del circuito a los módulos fotovoltaicos a medir, como la resistencia de potencia destinada a la descarga de los condensadores se realizarán mediante el accionamiento interruptores. Para facilitar el dimensionamiento se realizó una hoja de datos con todas las fórmulas y teoría para llevar a cabo el diseño de este de una forma más ordenada y tener consideraciones con base a que se realiza el dimensionamiento.

3.3 Diseño del sistema de adquisición de datos

Para la obtención de los datos se debe realizar la medición de estos, si bien emplear directamente al circuito de potencia un osciloscopio portátil o un conjunto de multímetros podría ser una opción, no es eficiente ni lo que se desea ya que, uno de los objetivos es diseñar un sistema que no requiera de mayor número de elementos o dispositivos adicionales a este, por lo cual se requiere emplear un sistema de adquisición de datos propio y de fácil adquisición, pero que a la vez satisfaga las necesidades que requiere el sistema para realizar la caracterización con la mayor precisión posible.

La característica fundamental del circuito de potencia es que, a través de la carga capacitiva, el módulo fotovoltaico pasa por todos los estados posibles de carga que se necesita para obtener los datos deseados y lo hace en un tiempo relativamente corto de tal forma que con esto se logra que no haya cambios significativos en las condiciones externas (irradiancia y temperatura) a las que el módulo fotovoltaico se encuentra sometido.

Con esto en cuenta se exploraron las diversas opciones para el diseño del sistema de adquisición de datos, empleando dispositivos como PIC, micros, electrónica puramente digital y analógica, todas estas opciones eran viables técnicamente y en cuestión de capacidad de muestreo sin embargo representaban una limitante, la cual en cuestión es que quien deseara emplear o construir este tipo de dispositivos tendría que tener un conocimiento previo en electrónica y programación en los diferentes lenguajes que emplean estos para su configuración, lo cual limitaría potencialmente la facilidad de construcción del sistema para personas principiantes en estos temas.

Así con la finalidad de cumplir nuestro objetivo se empleó para el desarrollo del sistema de adquisición de datos una tarjeta Arduino Uno, ya que esta cuenta con gran capacidad, con una gran facilidad de uso, al ser una tarjeta ya armada, lista para su uso.

3.3.1 Placa Arduino uno

Arduino Uno, figura 18, es una placa electrónica basada en el microcontrolador ATmega328. Cuenta con 14 entradas/salidas digitales, de las cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM (Modulación por ancho de pulsos) y otras 6 son entradas analógicas. Además, incluye un resonador cerámico de 16 MHz, un conector USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reseteado. La placa incluye todo lo necesario para que el microcontrolador haga su trabajo, basta conectarla a un ordenador con un cable USB o a la corriente eléctrica a través de un transformador.



Figura 18. Placa Arduino uno. (IESCAMP, 2017)

3.3.2 Medición mediante la placa Arduino uno

Para iniciar la programación y uso de la placa se planteó cuáles serían las mediciones que se realizarían con esta y las acciones que se podrían ejecutar de forma automática. En un principio el circuito de potencia era manipulado mediante elementos manuales, lo que en su momento funcionaría, sin embargo, empleando el Arduino será posible automatizar el control del circuito, volviendo más exacta la ejecución y accionamiento de los interruptores, empleando los tiempos exactos calculados para estos.

Con esto se tomó en cuenta las mediciones a realizar y elementos a controlar:

- Medición voltaje.
- Medición corriente.
- Medición temperatura.
- Medición radiación.
- Accionamiento de 2 interruptores.

3.3.2.1 Acondicionamiento de las señales

Para realizar las mediciones y ejecuciones, el sistema de adquisición de datos (Arduino), debe interconectarse al circuito de potencia para realizarse la interacción entre estos, figura 19.

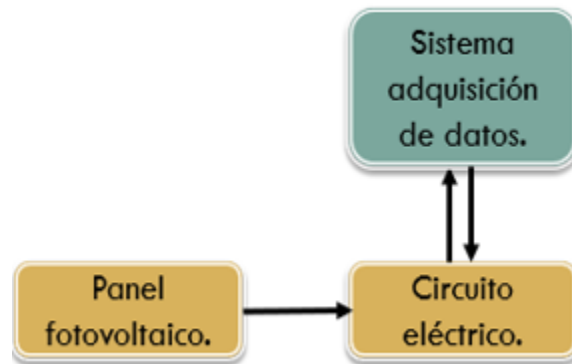


Figura 19. Esquema de interconexión de elementos del sistema.

Para esto se debe realizar el acondicionamiento necesario para que el Arduino pueda realizar las acciones adecuadamente sin arriesgar su integridad o un mal funcionamiento del circuito de potencia, que más haya de realizar una mala operación se pueda llegar a un accidente.

- ✓ Medición de voltaje y corriente

Para la medición del voltaje y corriente primero se debe establecer donde se realizará la medición, para el voltaje al usar la carga capacitiva se debe realizar la medición en este elemento ya que los cambios de voltaje en este son los datos que se deben medir.

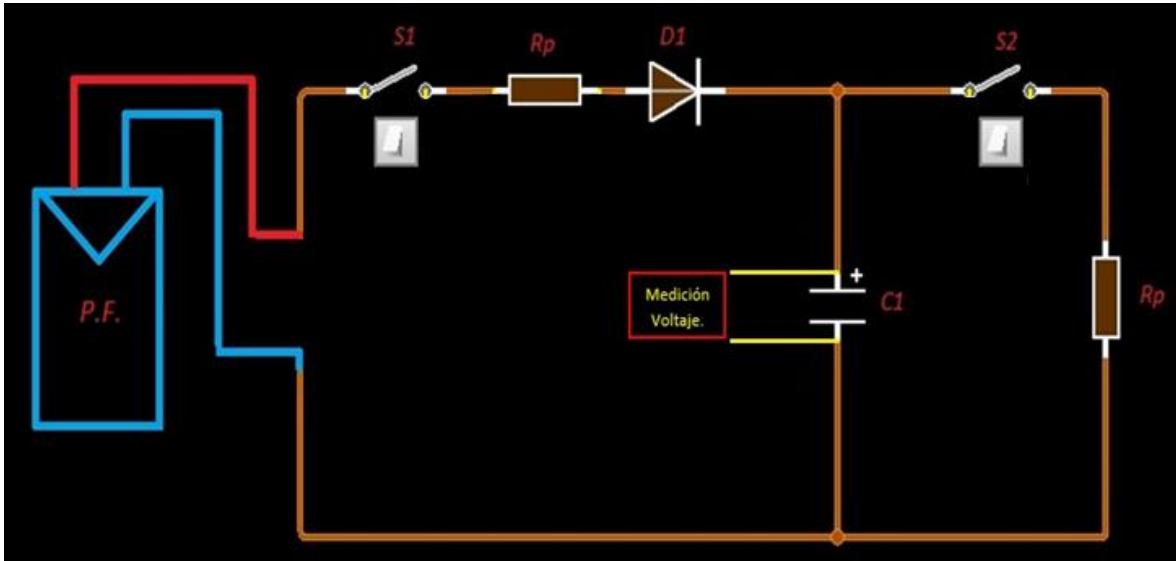


Figura 20. Punto de medición de voltaje.

En la figura 20 se observa el punto de medición de voltaje, sin embargo pensando en el uso del sistema completo (Caracterografo para sistemas fotovoltaicos), este está pensado en un futuro para trabajar con módulos o sistemas fotovoltaicos con rangos mayores de 600V de V_{oc} y 30A de I_{sc} , con esto se deberán realizar mediciones de voltajes altos cuando el voltaje máximo de medición que soporta la placa Arduino es de 5V, para lograr acondicionar la señal para el rango de operación del Arduino será necesario emplear un divisor de voltaje.

✓ Divisor de voltaje

Un divisor de voltaje es un circuito simple que reparte la tensión de una fuente entre una o más impedancias conectadas. Con sólo dos resistencias en serie y un voltaje de entrada, se puede obtener un voltaje de salida equivalente a una fracción del de entrada, figura 21. Los divisores de voltaje son uno de los circuitos más fundamentales en electrónica. (5Hertz, 2011)

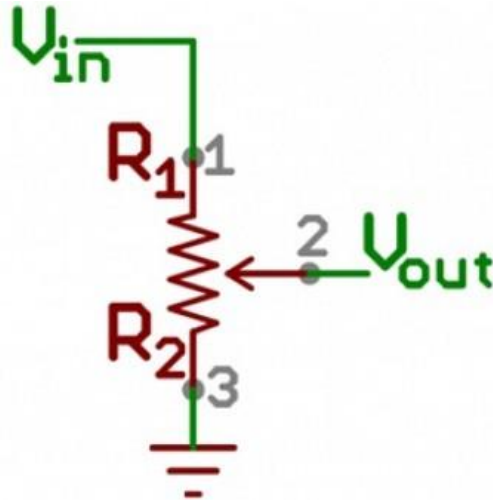


Figura 21. Esquema divisor de voltaje. (5Hertz, 2011)

La ecuación del divisor de voltaje supone que se conocen tres valores del circuito: el voltaje de entrada (V_{in}), y ambos valores de resistencia (R_1 y R_2). Teniendo en cuenta estos valores, podemos usar esta ecuación para encontrar el voltaje de salida (V_{out}):

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (29)$$

Esta ecuación establece que el voltaje de salida es directamente proporcional al voltaje de entrada conforme a la relación de R_1 y R_2 .

Hay algunas generalidades que se deben tener en cuenta al utilizar los divisores de voltaje. Estas son simplificaciones que hacen que la evaluación de un circuito divisor de voltaje sea un poco más fácil.

En primer lugar, si R_2 y R_1 son iguales, entonces el voltaje de salida es la mitad del de la entrada. Esto es así independientemente de los valores de las resistencias.

$$R_1 = R_2: V_{out} = V_{in} * \frac{R}{2R} = \frac{V_{in}}{2} \quad (30)$$

Si R_2 es mucho mayor que R_1 , entonces el voltaje de salida será muy cercano al de la entrada. Habrá muy poco voltaje a través de R_1 .

$$R2 \gg R1: V_{out} \approx V_{in} * \frac{R2}{R2} = V_{in} \quad (31)$$

Por otro lado, si R2 es mucho más pequeño que R1, el voltaje de salida será muy pequeño en comparación con el de la entrada. La mayor parte del voltaje de entrada estará a través de R1.

De esta forma podemos acondicionar la señal a rangos adecuados para el Arduino, sin importar el valor máximo de voltaje a censar, figura 22.

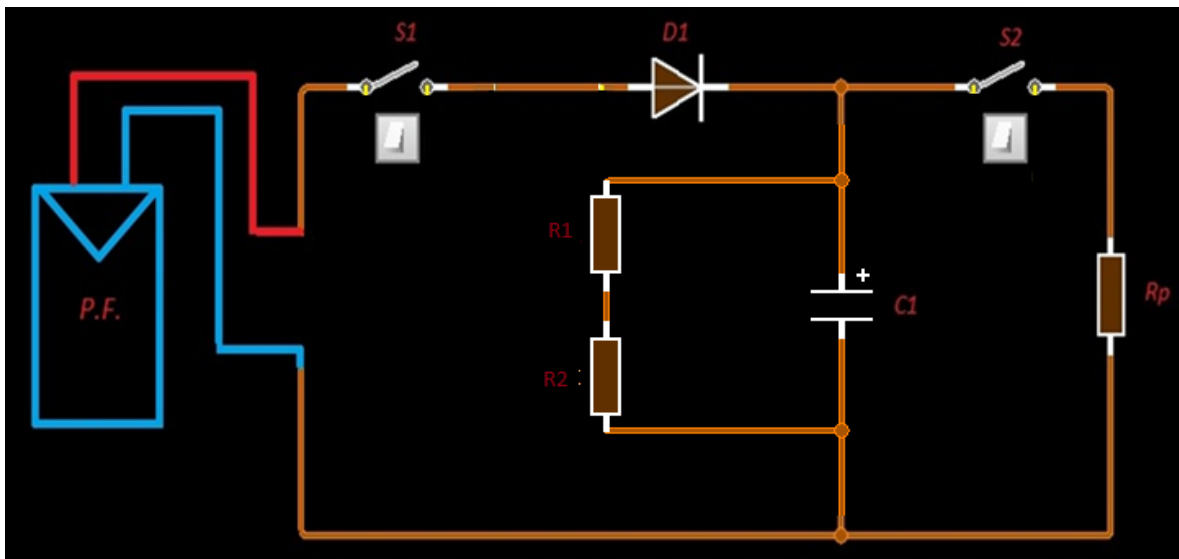


Figura 22. Esquema de conexión del divisor de voltaje.

Para la medición de la corriente, esta debe ser la corriente máxima otorgada por el módulo o sistema fotovoltaico a una carga (Isc), esta corriente será presente en el conductor, para razones de mejor lectura esta se realizara en el lado más cercano al positivo del módulo, en un principio se pensó en emplear un sensor de corriente, sin embargo estos además de requerir una apertura en el conductor para su conexión proporcionan al circuito una resistencia propia variable, lo que volvería inconsistentes las mediciones a efectuar o un decremento en los valores de estas, por lo que se buscaron otras opciones para esto se evaluaron muchas opciones pero se optó por emplear una resistencia tipo shunt.

- ✓ Resistencia tipo shunt

La resistencia del shunt se conoce con precisión por lo que se utiliza para medir corrientes. Es una resistencia conocida que te permite conocer la corriente empleando la ley de Ohm.

$$I = \frac{V}{R} \quad (32)$$

El uso del shunt es especialmente para las altas corrientes, como corrientes de 100 a 300 a, ya que dispositivos como, multímetros u osciloscopios aguantan corrientes de 10-20 a. son resistencias de alta potencia no como las comúnmente empleadas en electrónica, para evitar interferir en la medida, lo que se hace es buscar valores muy bajos de resistencia.

Hay que tener en cuenta los coeficientes de temperatura de la resistencia y si es necesario añadir un remedio al problema de la temperatura.

Para evitar que la medida de la corriente afectara de manera significativa en el proceso de carga de los condensadores/capacitores, empleamos una resistencia del valor mínimo posible y sobre esta resistencia medimos la caída de tensión, figura 23.

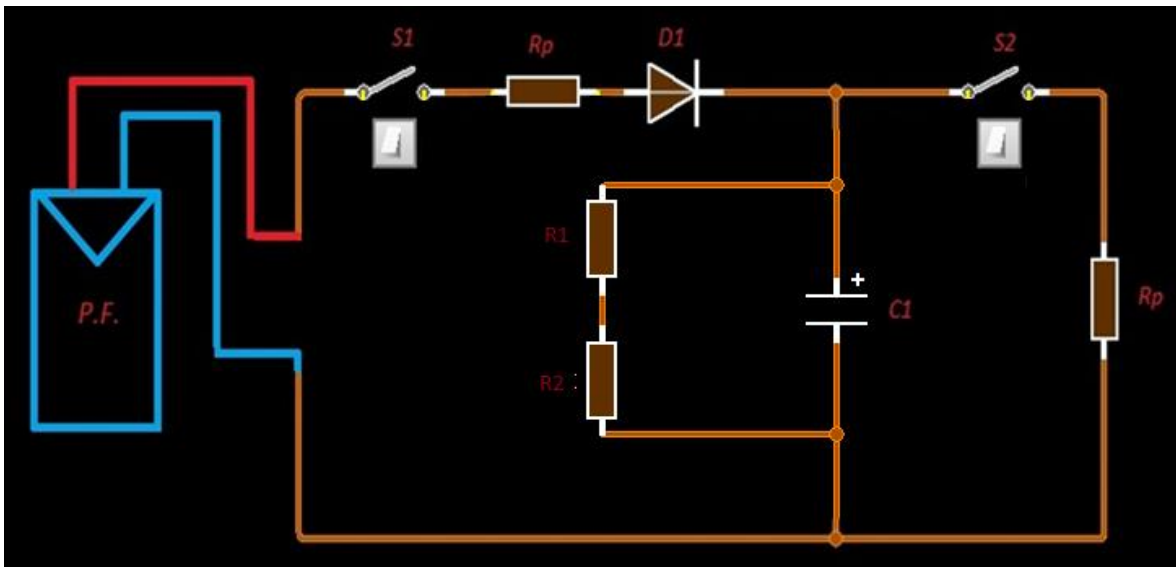


Figura 23. Esquema de conexión de la resistencia tipo shunt.

Si bien para la lectura de corriente será una lectura de voltaje, este de igual forma podría ser demasiado alto para el Arduino por lo que podemos saber mediante la ley de Ohm cual será este.

$$V = R * I \quad (33)$$

Donde:

V: Voltaje máximo a medir

R: Valor de resistencia del shunt

I: Corriente máxima del módulo o sistema fotovoltaico

En caso de que el voltaje sea demasiado alto podemos emplear nuevamente un divisor de voltaje para garantizar la integridad del Arduino, figura 24.

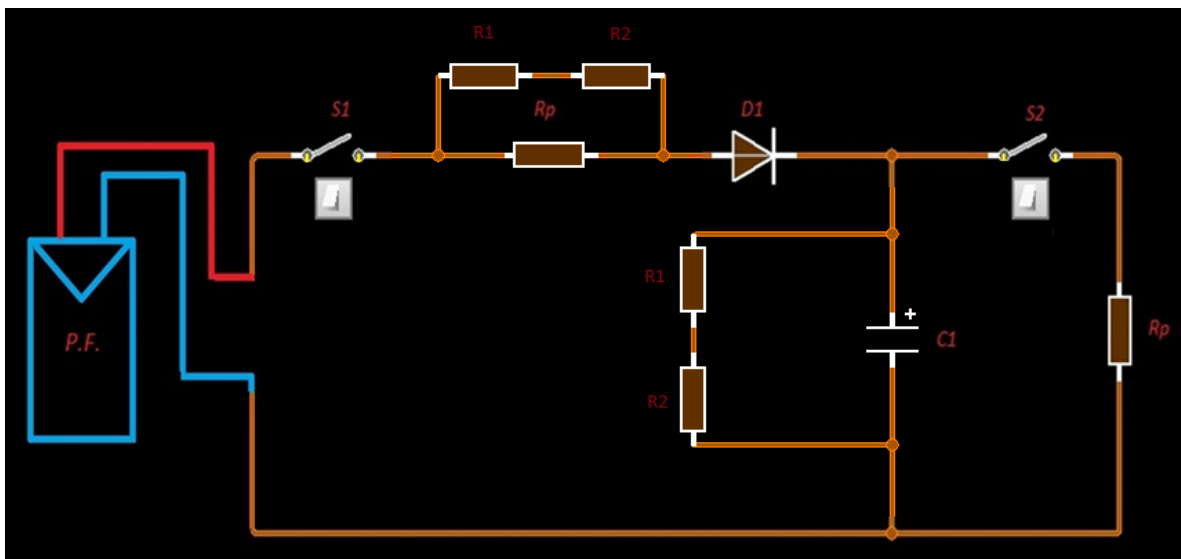


Figura 24. Esquema de conexión de la resistencia tipo shunt.

Con esto obtuvimos nuestros dos puntos principales de medición (voltaje y corriente), debidamente acondicionados para el uso de la tarjeta Arduino, sin tener en cuenta las mediciones de las condiciones ambientales en el módulo o sistema fotovoltaico, que se atenderán de igual forma y cuya medición se realizara mediante la misma tarjeta, figura 25.

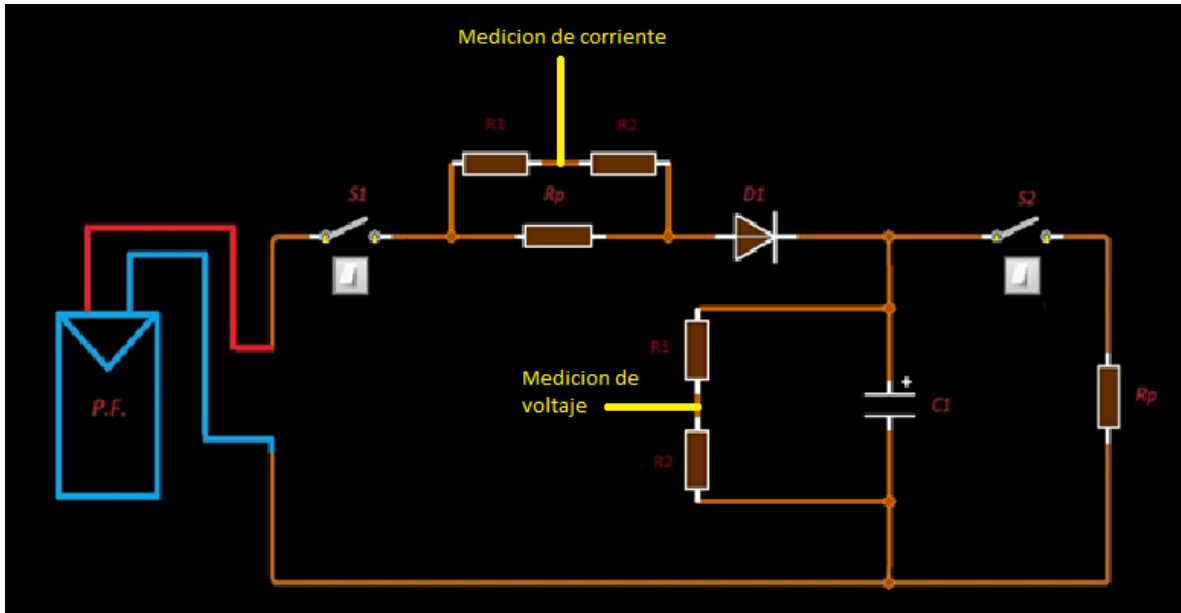


Figura 25. Esquema de puntos de medición.

✓ Medición de Temperatura y Radiación

Un parámetro muy importante en el comportamiento de un módulo fotovoltaico es la temperatura de la célula. La influencia de la temperatura sobre la curva característica de una célula es notable, se estima que la tensión a circuito abierto descende $-2.45 \text{ mV}/(^{\circ}\text{C-cel})$, mientras que la intensidad de cortocircuito apenas se ve afectada. Esta cifra puede parecer pequeña, pero conlleva para una diferencia de temperatura de 30°C una disminución de la potencia, en el punto de máxima potencia que se puede estimar en 11-14 W para un panel de 110 Wp de 72 células, es decir un descenso del 10-12 % con respecto a la potencia pico. (Sanchez, 2012)

Para nosotros la importancia es conocer la temperatura a la que se encuentra el panel a la hora de realizar la medición, esto para poder emplear dicha temperatura para realizar cálculos posteriores y consideraciones en las afectaciones de generación dadas por este factor.

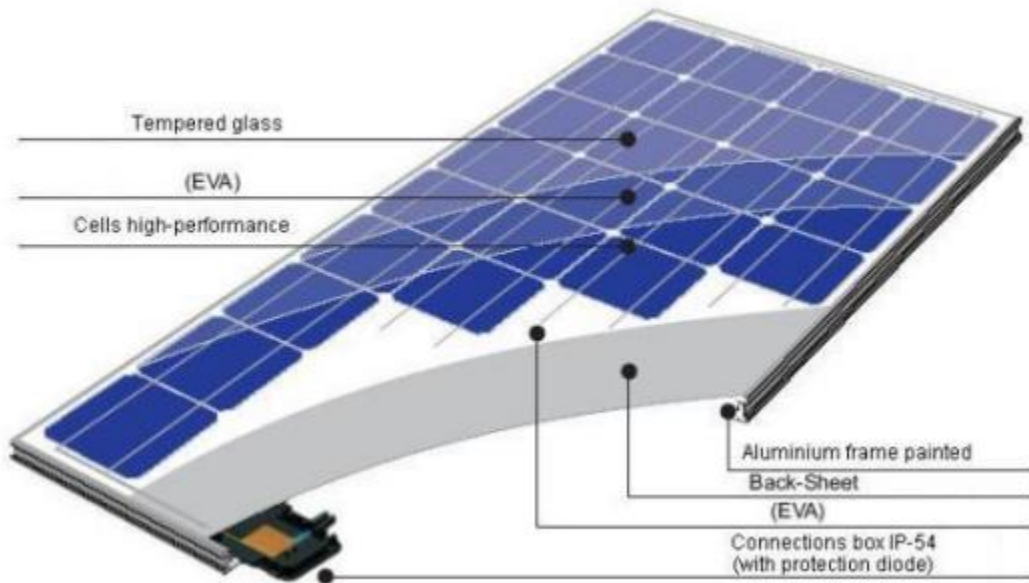


Figura 26. *Esquema de estructura de panel fotovoltaico.* (Victor Messina Lopez, 2016)

Todos los componentes de panel forman una estructura o elemento único, el cual se puede resumir en la medición de temperatura en dos puntos, la parte frontal y exterior, siendo la frontal donde generalmente se realiza la medición de temperatura, figura 26. El sensor empleado para realizar esta medición es el LM35, debido a su amplio rango de operación, y a su sencilla implementación en conjunto con él Arduino, figura 27, 28.

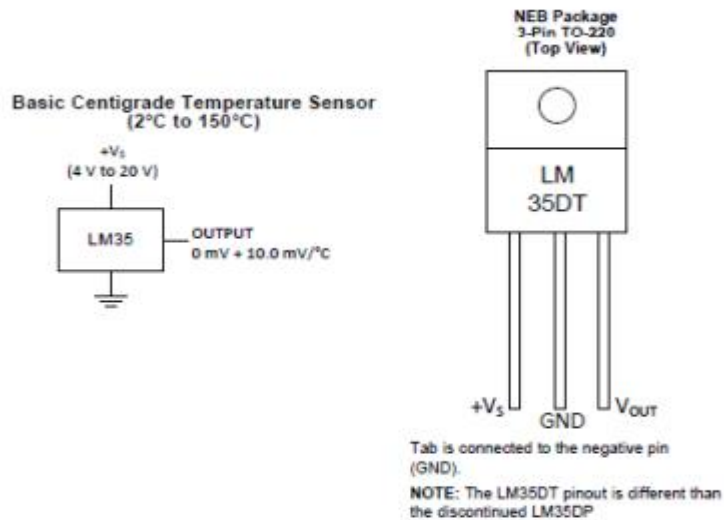


Figura 27. *Sensor LM35, diagrama de conexión y encapsulado.* (Victor Messina Lopez, 2016)

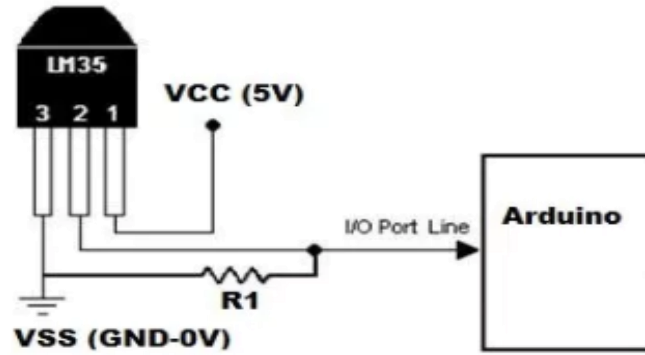


Figura 28. Sensor LM35, diagrama de conexión Arduino. (Rivera, 2014)

El rango de operación según las especificaciones indica que su operación incrementa o decrecienta 10mV por cada grado centígrado de temperatura. Lo cual lo vuelve lo suficientemente sensible para nuestro uso, este será colocado en la parte frontal, figura 29.



Figura 29. Ejemplo de la posición de los sensores de temperatura. (Rivera, 2014)

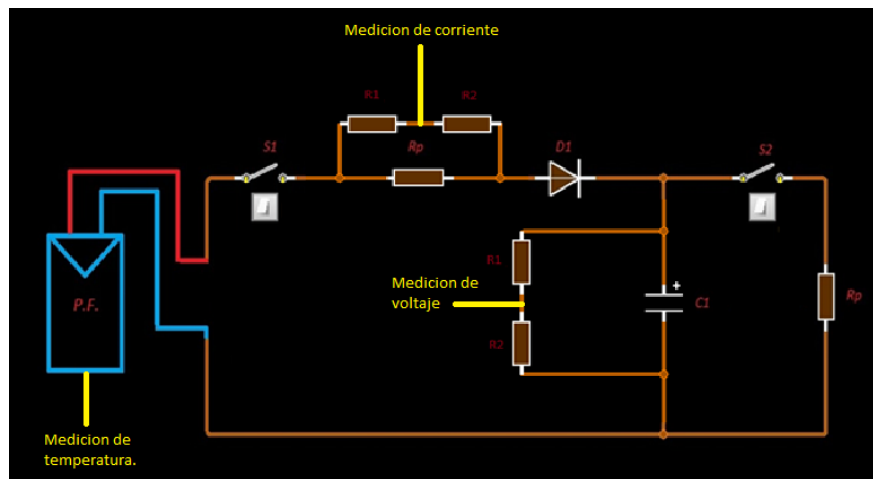


Figura 30. Esquema de medición de temperatura.

De esta forma podremos obtener la medición de la temperatura del módulo o sistema fotovoltaico, figura 30.

El último dato que se necesita obtener es la medida de la radiación en el momento de realizar la medición de voltaje y corriente, esta radiación es a la que está expuesta el módulo o sistema fotovoltaico. Para realizar esta medición emplearemos un piranómetro.



Figura 31. Piranómetro utilizado para la medición de radiación solar. (Gonzalo Navia, 2015)

El piranómetro, Figura 31, es un instrumento meteorológico utilizado para medir la radiación solar incidente sobre la Tierra (vatios por metro cuadrado), expresando su salida en mV según la intensidad del Sol. En este caso, se tiene un rango de 1 (mV/m^2) a 15.78 (mV/m^2), donde el máximo voltaje representa la radiación solar de 1000 (W/m^2). Para el programa se utiliza la siguiente relación:

$$G = V * \frac{1000}{15.87} \quad (34)$$

Donde:

G: irradiación actual del sol (W/m^2)

V: tensión de salida del piranómetro (mV/m^2).

Al manejarse voltajes muy bajos este es adecuado para la conexión directa con la tarjeta Arduino sin ningún problema. Este para la medición debe posicionarse de igual forma que el módulo o sistema fotovoltaico, para que este expuesto a las mismas condiciones, figura 32.

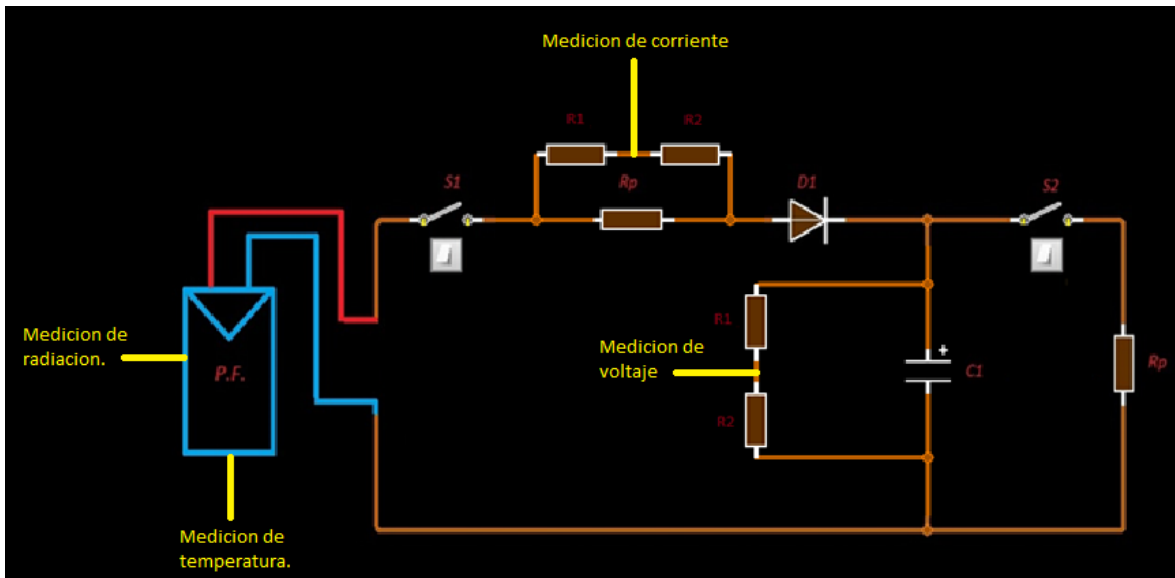


Figura 32. Esquema de medición de radiación.

✓ Accionamiento de interruptores

Por último, al emplear la tarjeta Arduino se cuenta con la posibilidad de que el circuito sea controlado automáticamente por esta, accionando los interruptores en los intervalos de tiempo deseados y realizar las mediciones correspondientes, asegurando así una mayor precisión en estas acciones, originalmente se tenían contemplados interruptores manuales sin embargo para que estos puedan ser accionados por el Arduino emplearemos relevadores.

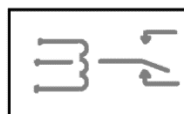


Figura 33. Esquema de relé mecánico. (Gonzalo Navia, 2015)

El relé es un dispositivo que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico que, a través de una bobina y un electroimán, se acciona un interruptor que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes, Figura 33. De esta forma simplemente implementaremos los relés en lugar de los interruptores manuales, Figura 34.

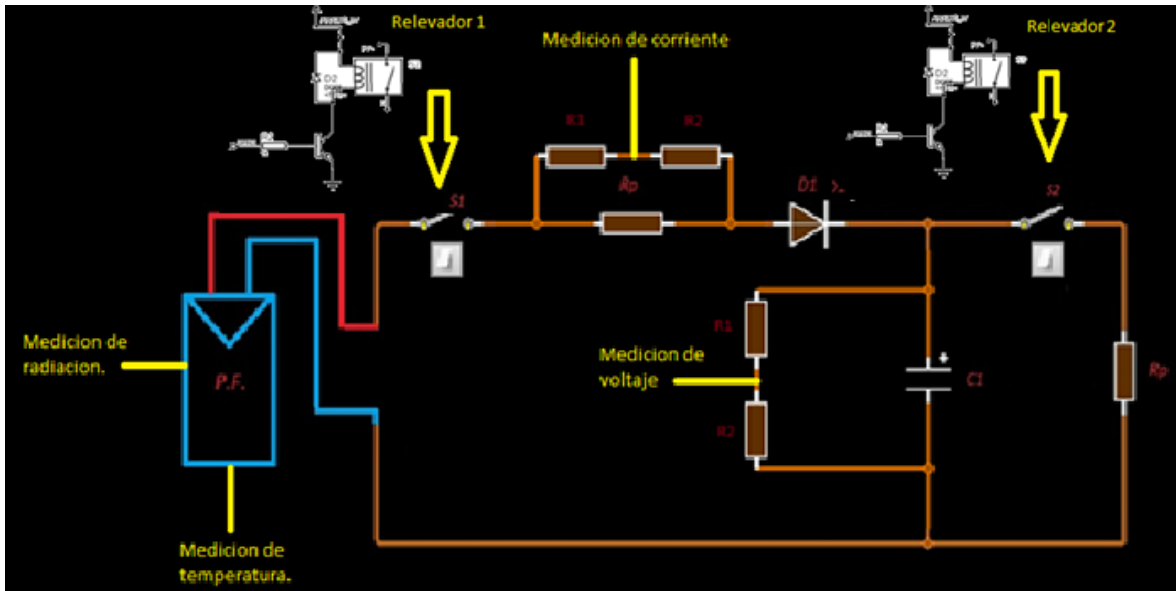


Figura 34. Esquema de implementación de relés.

3.3.2.2 Recapitulando

El hecho de emplear un sistema de adquisición de datos propio nos genera la capacidad de no requerir equipo adicional para realizar la caracterización, además de que como una ventaja la operación del sistema podrá realizarse de forma automática y secuencial controlada por la tarjeta Arduino, lo que nos dará como resultado una ejecución más precisa de la secuencia al no ser necesaria la intervención del operados en la operación del circuito y la medición precisa y adecuada de todos los elementos a medir empleando un único elemento.

3.3.3 Secuencia de funcionamiento

Ya que el circuito de potencia esta interconectado debidamente a la placa Arduino, y las conexiones están acondicionadas para realizar la medición, se debe realizar la programación de la placa, para esto se tiene que tener claro cuál es la secuencia de acciones que este debe realizar.

Al principio cuando solo se tenía el circuito de potencia, se pensaba como un elemento único y de operación manual.

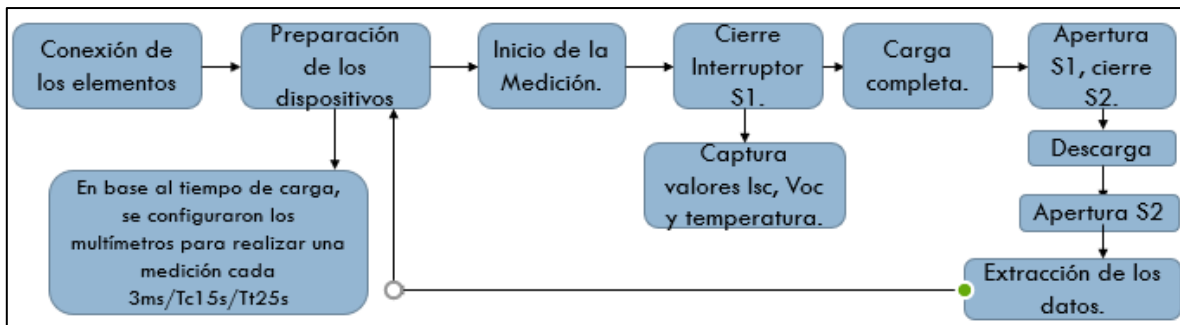


Figura 35. Esquema de secuencia de operación manual.

En la figura 35 se observa la secuencia de operación manual, en la que era necesario emplear dispositivos adicionales para la medición, además de realizar de forma manual la apertura y cierre de los interruptores, al igual que el inicio de medición de los equipos, lo cual a pesar de los esfuerzos resultaba en una ejecución en términos generales imprecisa, lo cual podría reflejarse en los datos obtenidos.

Empleando la placa Arduino podemos considerar acciones automáticas que este realizara como las mediciones, accionamiento de interruptores, todo según lo deseado dando origen a:

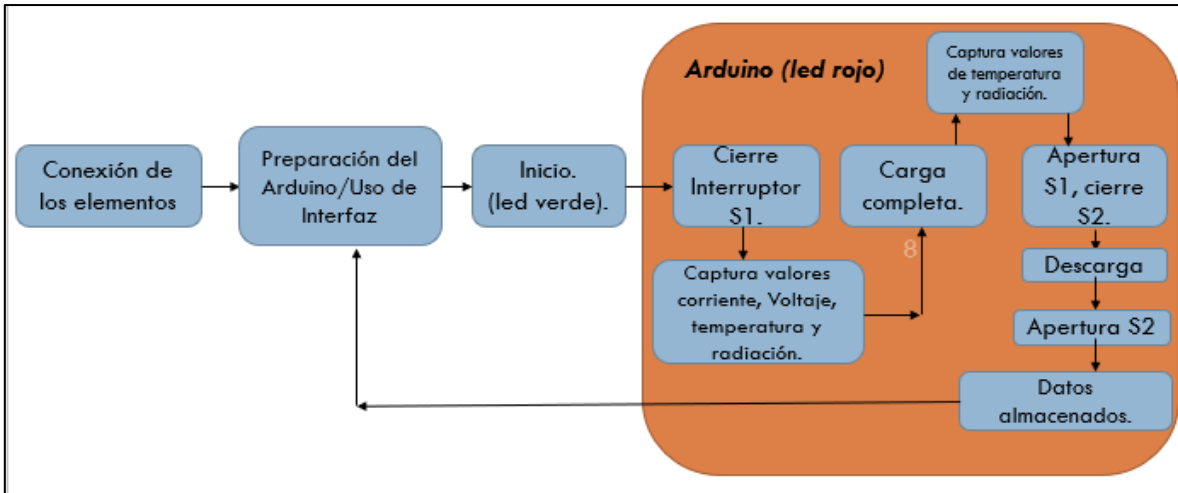


Figura 36. Esquema de secuencia de operación automática.

En el cual, figura 36, las acciones dentro del cuadro naranja serán ejecutadas por la placa Arduino.

Con todo esto este esquema pudo desarrollarse de manera más específica tomando en cuenta todos los cálculos y consideraciones, en cuestiones del circuito y dimensionamiento de sus elementos, además de los tiempos específicos calculados o establecidos entre cada acción.

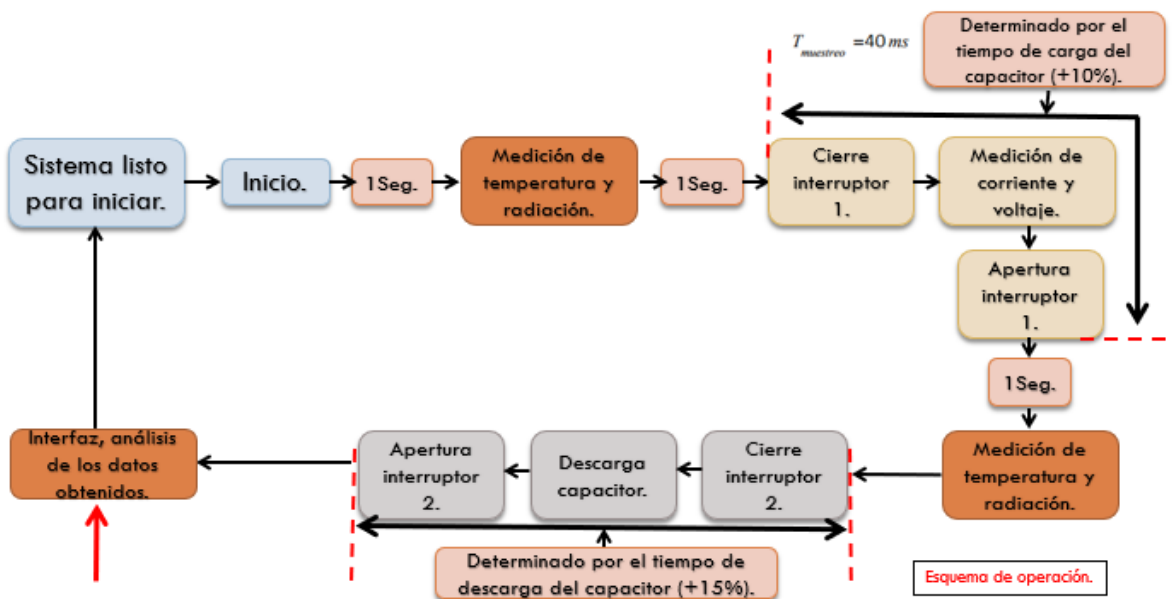


Figura 37. Esquema de secuencia de operación final.

En la figura 37 podemos observar que para esta secuencia de operación se toman en cuenta los tiempos previamente calculados, de tiempo de carga y descarga del capacitor y por lo tanto el tiempo en que se debe realizar la medición y los tiempos de espera entre una y otra acción. Con esto como referencia se realizó la programación de la tarjeta Arduino para realizar estas acciones de esta forma.

3.3.3.1 Recapitulando

En este punto se tiene la conexión del circuito de potencia con el sistema de adquisición de datos, además de que este ya es el encargado de la operación del circuito y realizar las mediciones requeridas dentro de los tiempos calculados, con la mínima intervención del operador, logrando así la adquisición de los datos deseados.

3.4 Interfaz y tratamiento de datos

Ya que se es posible la obtención de los valores deseados, estos deben ser tratados para lograr llegar al resultado deseado, para esto se debe emplear una interfaz en la cual estos datos medidos serán analizados y nos den lo que realmente se busca.

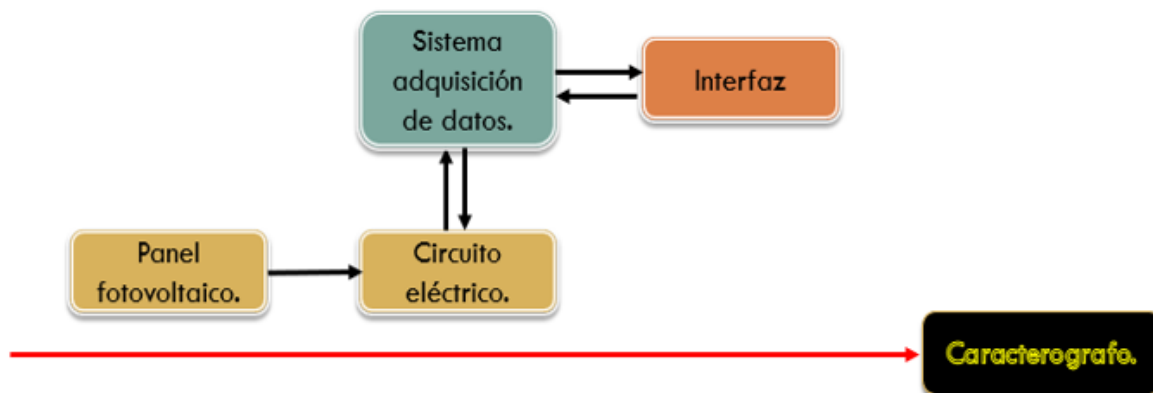


Figura 38. Esquema del Caracterografo.

Como se observa en la figura 38, la interfaz es el último elemento que compone al Caracterografo para sistemas fotovoltaicos, este es muy importante ya que en este será depositados los datos adquiridos y originados por los demás elementos (Circuito eléctrico y Sistema de adquisición de datos), y será en la interfaz en la que realmente el operador tendrá contacto con el sistema, ya que en esta se realizara el análisis de la información entre otras acciones.

En el punto en que se encuentra el sistema, los datos se observan a través del monitor serial “hyper terminal”, este permite almacenarlos en archivos en formato .csv (comma separated values) que permite el manejo de la información en hojas de datos.

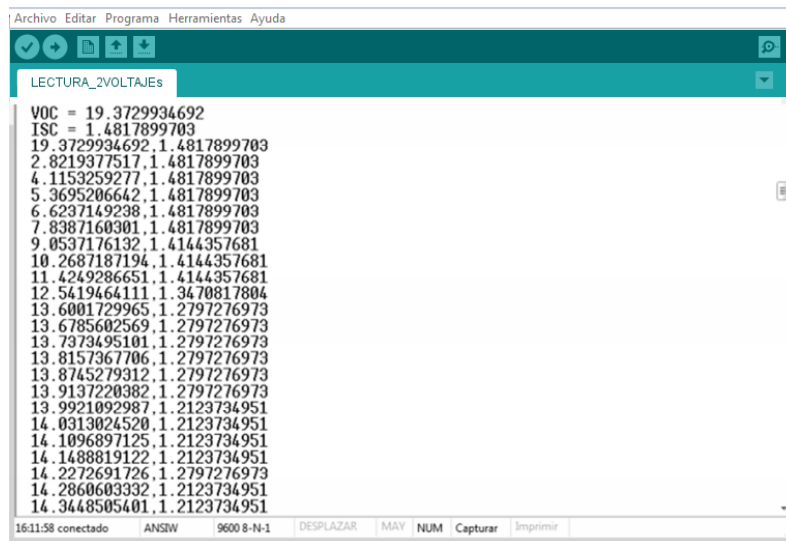


Figura 39. Lectura de corriente y voltaje.

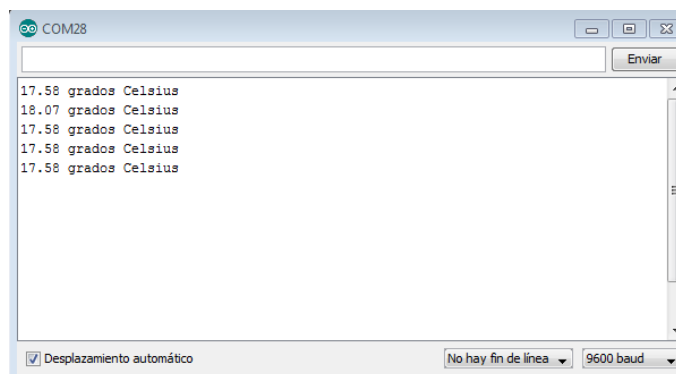


Figura 40. Lectura de temperatura.

Como se observa en la figura 39 y 40 se tienen las lecturas sin embargo esta forma no es practica ya que los datos se encuentran de forma estática simplemente y no se puede realizar una manipulación de estos directamente.

3.4.1 Excel y macros

Debido a la problemática de manejar los datos directamente en el monitor serial, se consideró otra opción, Se requería una interfaz más grafica que ofreciera una fácil manipulación de los datos adquiridos, herramientas y principalmente de código abierto para garantizar que sea casi imposible de que alguien este limitado o carezca de este software, por lo que se eligió emplear Excel, figura 41.



Figura 41. Excel y funciones. (Microsoft, 2016)

Investigando sobre las funciones de Arduino se encontró como enviar datos directamente de Arduino a Excel en tiempo real y emplear Excel como interfaz de control. Esto mediante Macros, programas escritos en VBA cuyas instrucciones pueden ser ejecutadas por Excel.

Una macro es una acción o un conjunto de acciones que se puede ejecutar todas las veces que desee.

Microsoft VBA (Visual Basic para aplicaciones) es el lenguaje de macros de Microsoft Visual Basic que se utiliza para programar aplicaciones Windows y que se incluye en varias aplicaciones Microsoft. Este lenguaje permite acceder a

prácticamente todas las funcionalidades de Excel y con ello también ampliar la funcionalidad del programa, figura 42, 43.

De esta forma se logró que los datos adquiridos fueran visualizados y descargados directamente en Excel, además de usar este como botón de inicio de operación del Arduino.

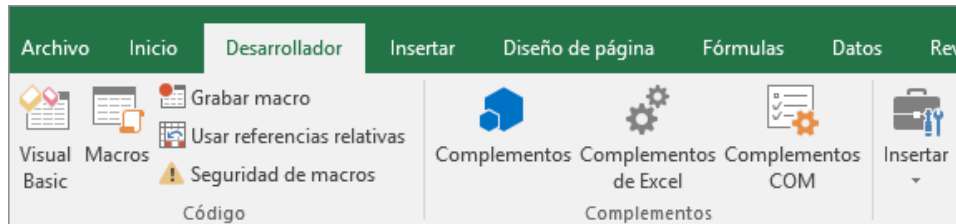


Figura 42. Pestaña de macros en Excel. (Microsoft, 2016)

```
/* educachip.com */
int V_Previo;
float Datos;
char Se_Envia[10];

void setup() {
  Serial.begin(9600); //Se inicia la comunicación serie a 9600 baudios.
}

void loop() {
  //Se leen voltajes en la entrada analógica A0.
  V_Previo = analogRead(A0);
  //Se convierte la entrada tipo int en float en función de la resolución de Arduino
  Datos = V_Previo * (5.0 / 1023.0);
  //Función que permite la conversión de float a String. Los datos se almacenan en un array de caracteres
  //char* dtostrf (double _val, signed char _width, unsigned char _prec, char* _str);
  dtostrf(Datos, 5, 3, Se_Envia);
  //Se envían los datos por el puerto serie.
  Serial.print(Se_Envia);
  //Se da tiempo a que Excel capture los datos.
  delay(30);
}
```

Figura 43. Código base de comunicación Arduino-Excel. (Microsoft, 2016)

3.4.2 Desarrollo de la interfaz

La interfaz tiene 7 elementos principales o base fijos para su funcionamiento, estos son:

- 3 botones de acción.
- 2 columnas.
- 2 celdas.

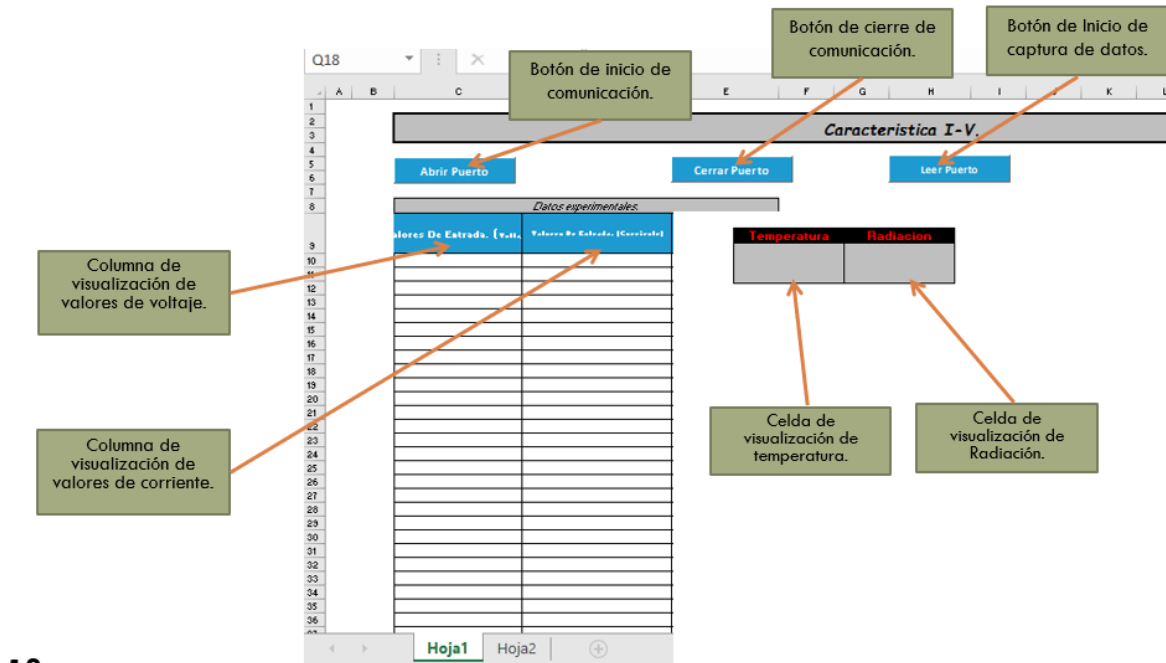


Figura 44.–Interfaz, elementos principales-fijos.

En la figura 44, se observa la interfaz, con los elementos principales-fijos, 3 botones, uno para el inicio de la comunicación, otro para el cierre de la operación, y el ultimo para dar inicio a la operación del Arduino, además de 2 columnas, una para los valores de voltaje capturados, y la otra para los valores de corriente, y dos celdas una para el valor de temperatura y la otra para el de irradiancia, de esta forma tenemos en la interfaz todos los datos necesarios para realizar el análisis.

3.4.3 Tratamiento de datos

Ya que los datos se encuentran en la interfaz, tenemos la información necesaria para realizar el análisis de esta y obtener la información deseada, recordamos que

estos datos obtenidos están en los elementos principales-fijos de la interfaz ya que estos, son los que se irán actualizando y generando cada vez que se realiza una medición nueva, por lo que el tratamiento debe ser aplicado directamente a estos y específicamente a los elementos que los almacenan, gracias a la versatilidad de Excel, estos elementos se pueden usar para generar formulas, graficas, operaciones con los datos, directamente con los elementos y que cuando estos contengan los datos, los valores numéricos se generen automáticamente, siendo por esto fundamental los elementos principales-fijos, figura 45.

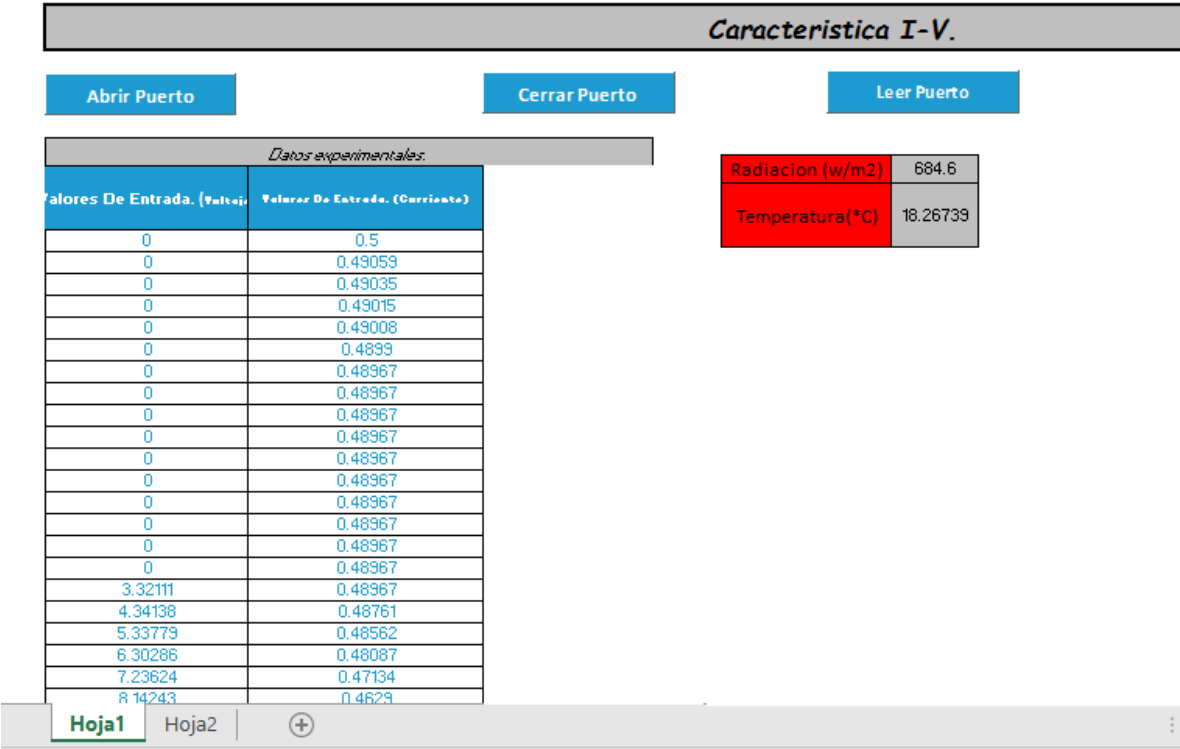


Figura 45. Interfaz, elementos principales-fijos con los valores obtenidos.

Como primer paso tenemos los valores de corriente, voltaje, temperatura e irradiancia. Para obtener la corriente de corto circuito (Isc), a la columna de valores de corriente se le aplica la formula básica, el valor máximo, el cual nos dará el valor de corriente correspondiente a la Isc.

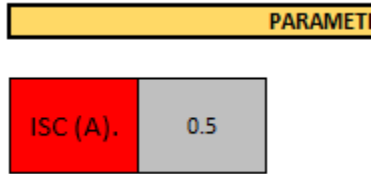


Figura 46. Interfaz, Valor de Isc.

En la figura 46, se observa el resultado de la búsqueda del valor máximo de corriente, el cual corresponde a la Isc, esto es programado en una celda en la interfaz, para una mayor visualización.

Para obtener el voltaje en circuito abierto (Voc), aplicamos la misma metodología, pero esta vez en la columna de voltaje.

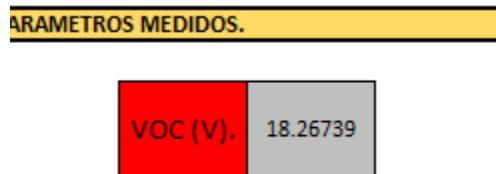


Figura 47. Interfaz, Valor de Voc.

En la figura 47, se observa el resultado de la búsqueda del valor máximo de voltaje, el cual corresponde al Voc, esto es programado en una celda en la interfaz, para una mayor visualización.

Para obtener la potencia máxima simplemente seguimos la siguiente formula empleando los 2 valores ya encontrados:

$$P_{max}: Voc * Isc \tag{35}$$

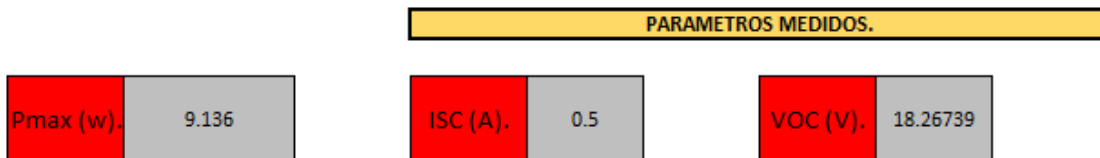


Figura 48. Interfaz, Valor de Pmax, Isc y Voc.

En la figura 48 observamos los valores obtenidos de los datos adquiridos, estos ya representados de forma más independiente y grafica en la interfaz.

Otra representación que podemos obtener con los datos adquiridos es la representación gráfica de la curva de corriente y voltaje, la cual da de manera visual el comportamiento de estos. Para esto simplemente se grafica la columna de voltaje y la columna de corriente.

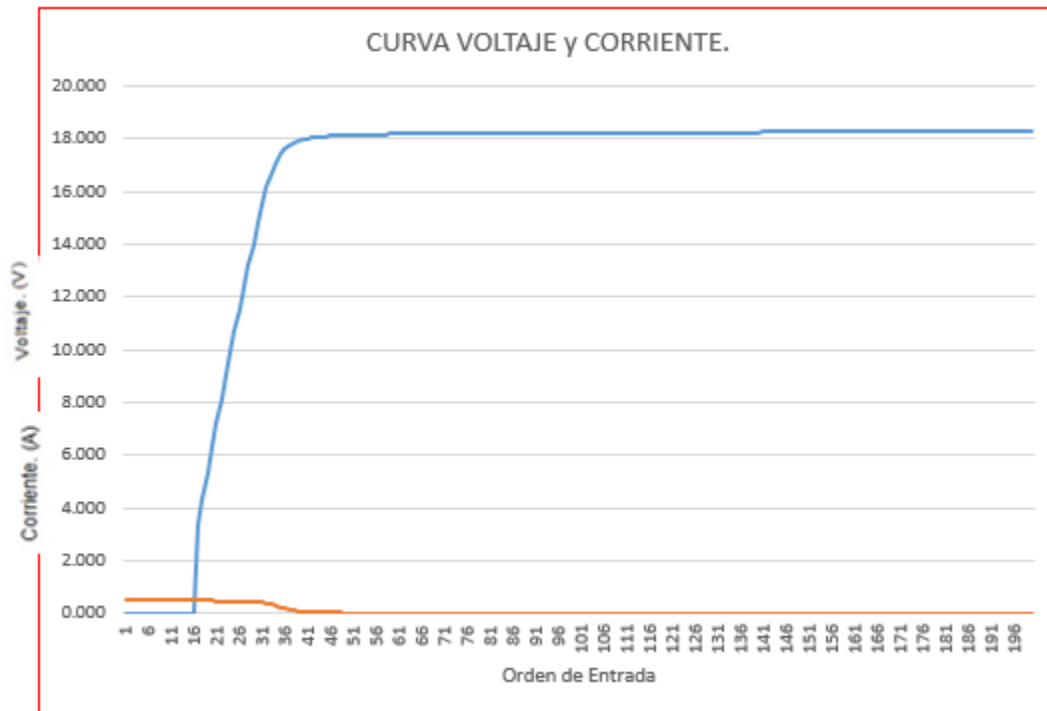


Figura 49. Interfaz, grafica de corriente y voltaje.

Figura 49, Curva de corriente y voltaje con respecto al tiempo (número de muestras), indica el comportamiento de la corriente y voltaje.

Otro dato importante que se puede obtener es, el Ppmax (punto de potencia máximo) y los valores de Vmpp (voltaje en el punto de potencia máxima) y Impp (corriente en el punto de potencia máxima), para esto simplemente realizamos un manejo de datos, multiplicamos la columna de voltaje por la columna de corriente,

para obtener una tercera columna con los valores de potencia de cada para de datos, a esta nueva columna de potencias, aplicamos la formula del mayor valor, el cual nos dará Ppmax y por ende el valor de Vmpp y Impp.

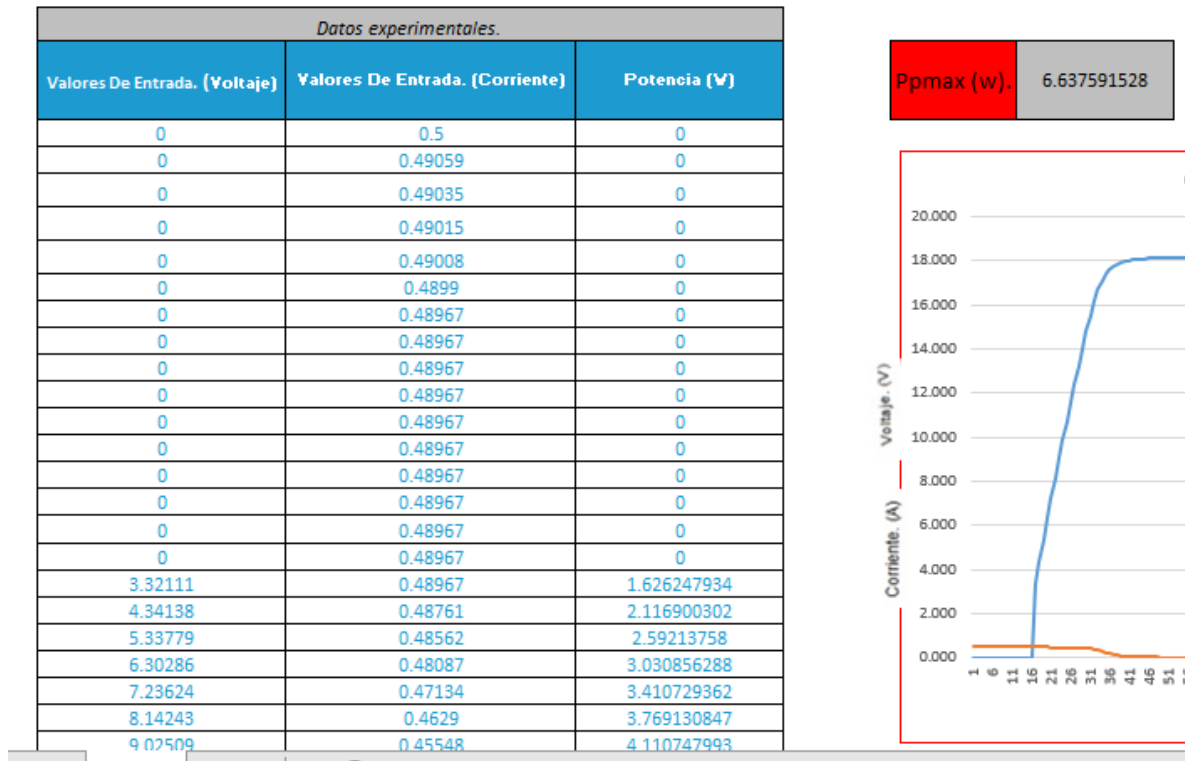


Figura 50. Interfaz, columna de potencia y valor encontrado de Ppmax.

En la figura 50 observamos la columna de potencia obtenida y el valor de Ppmax que se buscaba.

Uno de los puntos más importantes que se deseaban conseguir es la curva o característica I-V, para esto simplemente graficamos la columna de corriente con respecto a la de voltaje para obtenerla.

Esta es la más importante porque es la curva I-V del módulo o sistema fotovoltaico en condiciones reales de operación, lo que la convierte en la herramienta principal para determinar o valorar el buen o mal funcionamiento del sistema, comparándola con la dada por el fabricante o los datos dados por este, ya que en esta curva se encuentran de forma gráfica los valores de Pmax, Voc, Isc, Ppmax, Ippm, Vppm.

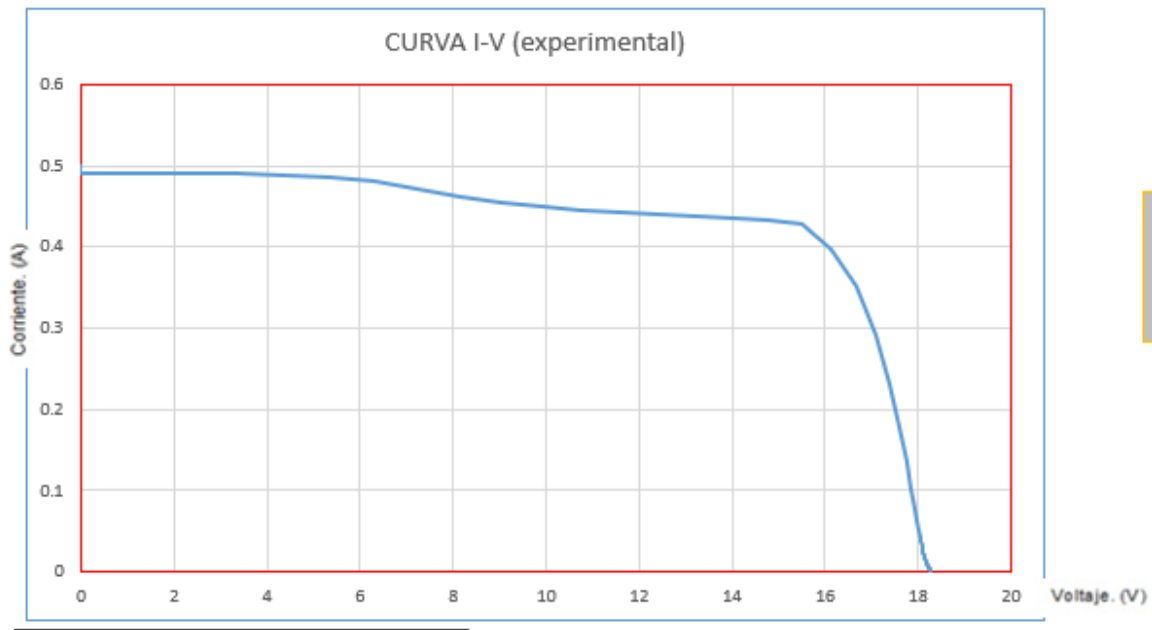


Figura 51. Interfaz, Curva o característica I-V obtenida experimentalmente.

En la figura 51 observamos la Curva I-V (corriente vs voltaje), representación de la relación voltaje-corriente del módulo fotovoltaico. Como es normal en los datos adquiridos pueden existir irregularidades lo que se reflejara con desperfecciones en los datos centrales, sin embargo, al emplear Excel como interfaz nos permite emplear un fitting al grafico para corregir estas imperfecciones, figura 52.

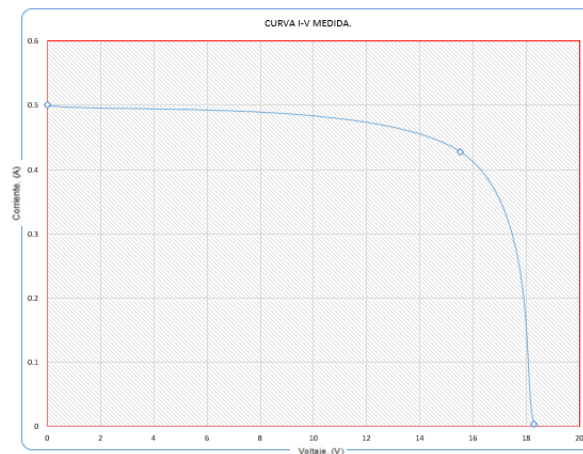


Figura 52. Interfaz, Curva o característica I-V obtenida experimentalmente sometida a fitting.

Si bien el objetivo es obtener estos datos en condiciones reales de operación, para lograr realizar una comparación de lo obtenido con lo que el fabricante reporta en las hojas de datos de los módulos, es importante tener un método de traslado de estos datos a condiciones estándar de medida, lo cual nos dará de forma concreta la prestación del panel. Las condiciones estándar de medida son de irradiancia de $1000 \frac{w}{m^2}$ y una temperatura de 25 °C.

Para esto usamos la siguiente metodología.

Sandia PV Array Model. (King & W. E. Boyson, 2005)

Definiciones necesarias:

- I_{sc} : corriente de corto circuito.
- I_{mp} : corriente en el máximo punto de potencia
- V_{mp} : voltaje en el máximo punto de potencia
- V_{oc} : voltaje en circuito abierto
- P_{mp} : potencia en el punto de máxima potencia
- a_{isc} : coeficiente de temperatura normalizado para I_{sc} , este parámetro esta normalizado dividiendo la dependencia de la temperatura medida para un estándar particular de espectro solar e intensidad de radiación por la corriente de cortocircuito del módulo en el estándar de condición de referencia, I_{sc} .
- a_{imp} : coeficiente de temperatura normalizado para I_{mp} , normalizado de la misma manera que el anterior.
- β_{voc} : coeficiente de temperatura para el voltaje de circuito abierto del modulo
- γ_{mpp} : coeficiente de temperatura para el voltaje en el punto de potencia máxima del modulo
- T_c : temperatura de la celda dentro del módulo, °C. obtenido tomando el módulo de la superficie posterior su temperatura mediante un sensor y agregando el diferencial de temperatura (típicamente 3 grados)

Definiciones del proceso de traslado, el modelo básico de translación emplea las siguientes aproximaciones:

- Pmp: es proporcional a E, la irradiancia
- Imp: no depende de la temperatura
- Vmp: es dependiente de E
- Pmp: varia con la temperatura de acuerdo con γ_{mpp} . (tomado de hojas de datos)
- Voc: es independiente de E

Empleando estas aproximaciones, hacemos estas suposiciones:

- Isc: escala directamente con E, y con la temperatura
- Voc: varia linealmente con la temperatura de acuerdo con β_{voc}
- Pmp: escalas con E y varia con la temperatura de acuerdo con γ_{mpp}
- Vmp: cambia con la temperatura dependiendo de γ_{mpp} solamente ya que a_{imp} es mucho mas pequeño que a_{isc} y se supone es cero

Sistema de ecuaciones de translación:

m: valor medido

trans: valor trasladado

$$V_{oc\ trans} = V_{oc\ m} / (1 + \frac{\beta_{voc}}{100} * (T\ m - T\ trans)) \quad (36)$$

$$I_{sc\ trans} = I_{sc\ m} * (\frac{E_{trans}}{E_m}) / (1 + \frac{\alpha_{isc}}{100} * (T\ m - T\ trans)) \quad (37)$$

$$I_{mp\ trans} = I_{mp\ m} * E_{trans} / E_m \quad (38)$$

$$V_{mp\ trans} = V_{mp\ m} * (\ln \frac{E_{trans}}{E_m}) / (1 + \frac{\gamma_{mpp}}{100} * (T\ m - T\ trans)) \quad (39)$$

$$P_{mp\ trans} = P_{mp\ m} * (\frac{E_{trans}}{E_m}) / (1 + \frac{\gamma_{mpp}}{100} * (T\ m - T\ trans)) \quad (40)$$

Mediante este sistema de ecuaciones se realiza el traslado de los valores medidos a condiciones estándar, como se observa la mayoría de estos, son valores con los que se cuenta, y los que no son simplemente coeficientes o valores dados por el

fabricante que dependen principalmente del tipo de tecnología de panel. Con esto simplemente se ingresaron las fórmulas a la interfaz (Excel) y se manipularon los datos para poder realizar la translación deseada directamente figura 53.

Traslado a condiciones estandar.		<i>i_m</i> 23 E:	1000	Traslado de valores obtenidos en condiciones reales de operacion a condiciones estandar.			
		(C.) T:	25				
		Condiciones estandar.					
Coefficientes de temperatura		Parametros trasladados.		Parametros medidos.		Parametros de fabricante.	
<i>a</i> <i>i_{sc}</i>	0.03	Voc trans	18.13032474	Voc	18.2674	Voc	22
<i>a</i> <i>i_{mp}</i>	-0.4	Isc trans	0.730813904	Isc	0.5	Isc	0.91
<i>B</i> <i>voc</i>	-0.36	I _{mp} trans	0.625533158	I _{mp}	0.42824	I _{mp}	0.85
<i>Y</i> <i>mpp</i>	-0.4	V _{mp} trans	16.26294859	V _{mp}	15.5	V _{mp}	17.7
		P _{mp} trans	9.61481187	P _{mp}	6.63759	P _{mp}	15

Figura 53. Interfaz, sección de traslado a condiciones estándar de medida.

Con los valores trasladados simplemente se grafican para obtener la curva o característica I-V en condiciones estándar, figura 54.

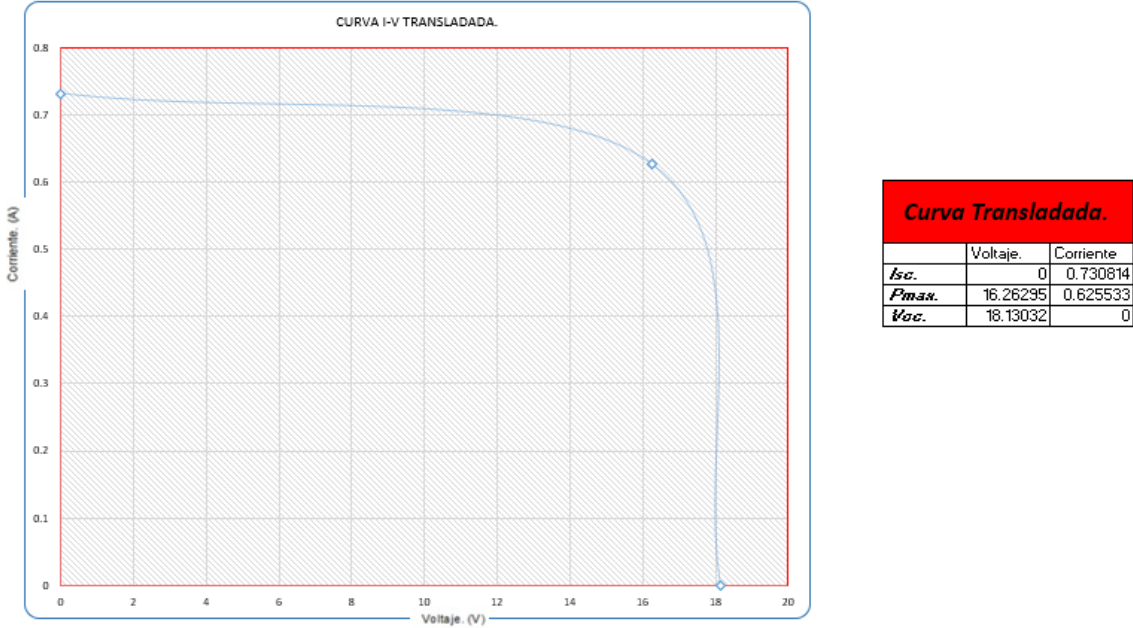


Figura 54. Interfaz, curva I-V trasladada a condiciones estándar de medida.

Ya que se tienen los valores reales obtenidos experimentalmente en condiciones reales de operación y estos mismos trasladados a condiciones estándar de operación, se puede realizar el análisis de prestación, el cual nos dirá realmente el

porcentaje de eficiencia que el módulo o sistema fotovoltaico ofrece en comparación con lo dicho por el fabricante, empleando la ecuación 41:

$$Prestacion = \frac{V_{ocT} * I_{stT}}{V_{ocF} * I_{scF}} \quad (41)$$

Donde:

Voc T: voltaje en circuito abierto trasladado

Isc T: corriente de corto circuito trasladada

Voc F: voltaje de circuito abierto dado por el fabricante

Isc F: corriente de corto circuito dado por el fabricante

Esta fórmula de igual forma se programa en la interfaz para que de manera automática al contar con los datos necesarios se despliegue el valor de la prestación, figura 55.

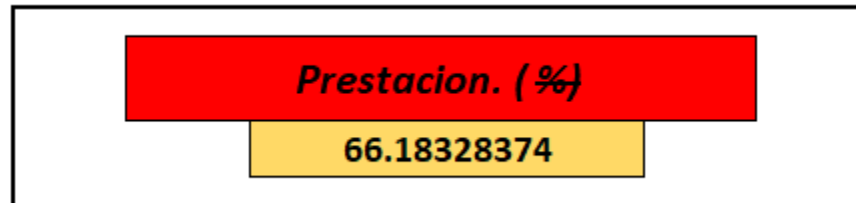


Figura 55. Interfaz, visualización de la prestación.

3.4.3 Recapitulando

El uso de una interfaz de código abierto como Excel, permite además de garantizar un uso por la mayoría de los usuarios, brinda la opción de poder ser modificable a conveniencia del usuario y así poder usar los datos para su propio diseño de análisis o la obtención de algún valor específico, pudiendo modificar la hoja de cálculo a su conveniencia.

3.5 Pruebas

A pesar de que, para realizar la selección de los elementos a emplear, como la tecnología de los capacitores, la forma de medición del voltaje y corriente entre otros, se realizaron análisis y pruebas, las pruebas aquí mostradas son de un entorno de funcionamiento general.

3.5.1 Prueba del circuito de potencia

Para realizar la prueba se estableció una metodología:

1. Selección de modulo o sistema fotovoltaico.
 2. Dimensionar los elementos.
 3. Simulación del circuito.
 4. Armado del circuito.
 5. Prueba.
 6. Tratamiento de datos.
- Selección del módulo o sistema fotovoltaico.

Para no generar un gasto excesivo o inaccesible para realizar la prueba se empleó un panel didáctico, ya que al final es comprobar el principio de operación, y no la escala a la que se realice, figura 56.



Datos:
 Isc: 14 mA
 Voc: 5 V.
 P: 0.7 W.
 Medida del panel:
 177.5x9 cm.

Figura 56. Panel fotovoltaico Steren empleado para la prueba.

- o Dimensionar los elementos.

Elegido el módulo o sistema fotovoltaico, se utilizan los datos del fabricante para realizar el dimensionamiento, para facilitararlo se emplea la hoja de cálculo, figura 57.

Datos:
 Isc: 14 mA
 Voc: 5 V.
 P: 0.7 W.
 Medida del panel: 177.5x9 cm.

Isc: 15 mA.
Voc: 10 v.
P: 0.15 w.

Carga capacitiva.		
Tiempo de carga (segundos)		Capacitancia (faradios).
5		0.0075
Capacitancia (faradios)	Voltaje del capacitor.	Tiempo de carga (segundos).
0.0075	10	5

Datos del panel fotovoltaico o string, para el cual se dimensionara el SISTEMA.	
Isc (Amperes)	Voc (Volts)
0.015	10
Pmax (Watts)	
0.15	

Captura del voltaje.		Potencia de disipación.	
Divisor de voltaje, obtener rango (0-5v)	R1 (Watts)	R2 (Watts)	
Valor de R1 (Ohms)	0.05	0.05	
1000	1	1000	
Valor maximo en Voc (Volts)	Rt (ohms)	Itr (Amperes)	
5	2000	0.005	

Captura de Corriente.	
Resistencia tipo shunt o precision.	
Valor de la resistencia	0.22
Se debe emplear una resistencia que sea casi 0 para evitar modificar el proceso de carga del condensador	

Resistencia de potencia de carga		Interruptor		Diodo		Cable	
Tiempo de carga (segundos)		C.N. (amp)	0.015	T.rup.	10	Corriente	0.015
Tiempo de carga de descarga (segundos)		T.T (volts)	10	C.max.	0.015	Voltaje	10
Resistencia (ohms)	Potencia (Watts)	P.Cort. (amp)	0.015	P.Cie. (amp)	0.015		
3191.828918	0.03133						

Figura 57. Dimensionamiento de los elementos empleando hoja de cálculo.

Al ingresar los datos del panel y el tiempo que se desea que dure el proceso, la hoja genera automáticamente los valores de los eventos para la prueba.

- Simulación del circuito.

Con los valores a emplear en los elementos, se realizó la simulación del circuito, esto para observar de manera visual el comportamiento y funcionamiento de este, ya que no es posible simular el sol ni las condiciones de temperatura y radiación.

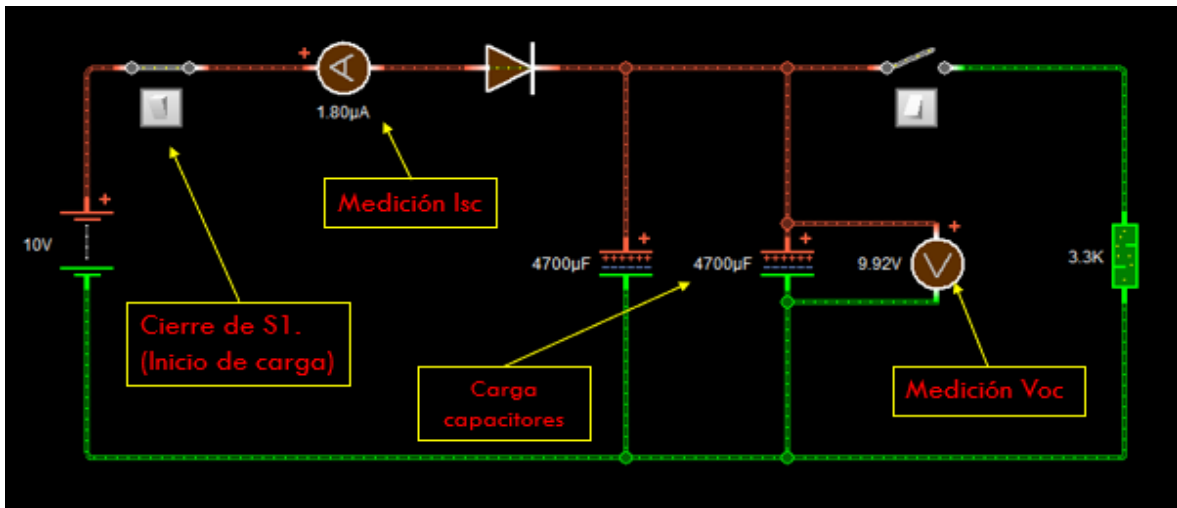


Figura 58. Simulación del circuito.

Iniciada la simulación, al cerrar el interruptor inicia la carga del capacitor, pasando de la I_{sc} al V_{oc} , con base a los cálculos este proceso dura 6.266 s, figura 58.

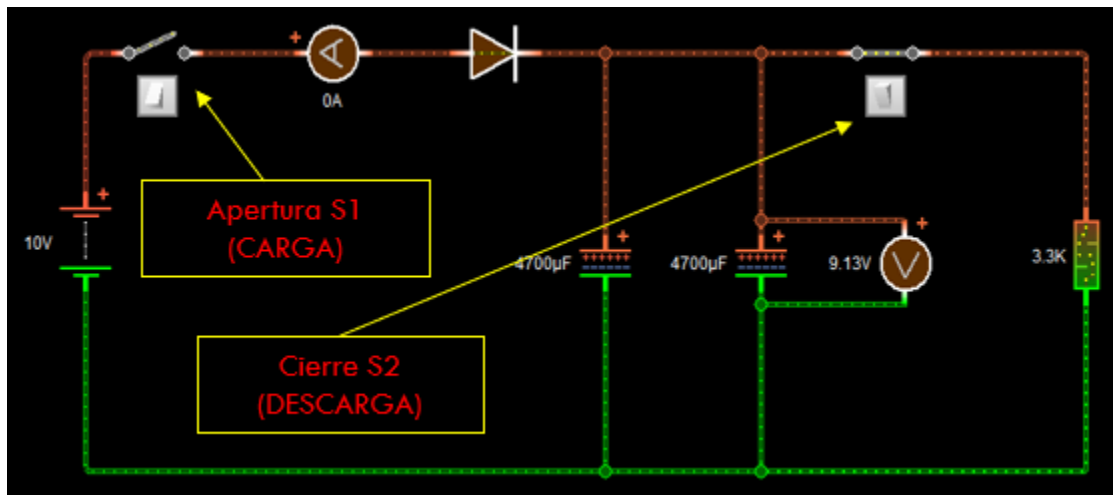


Figura 59. Simulación del circuito, inicio de descarga.

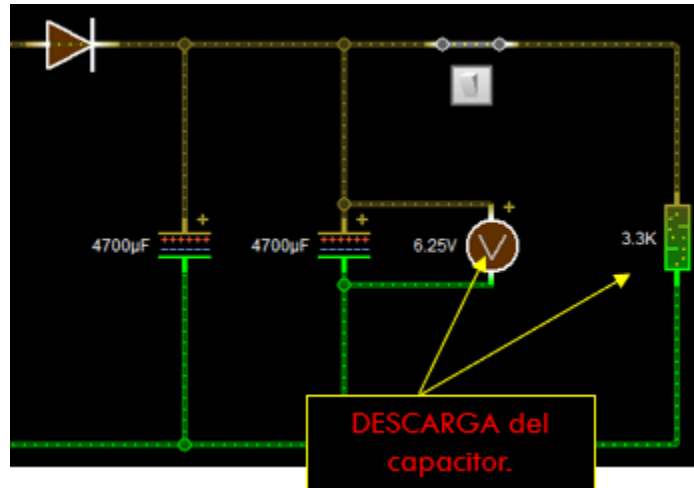


Figura 60. Simulación del circuito, descarga del capacitor.

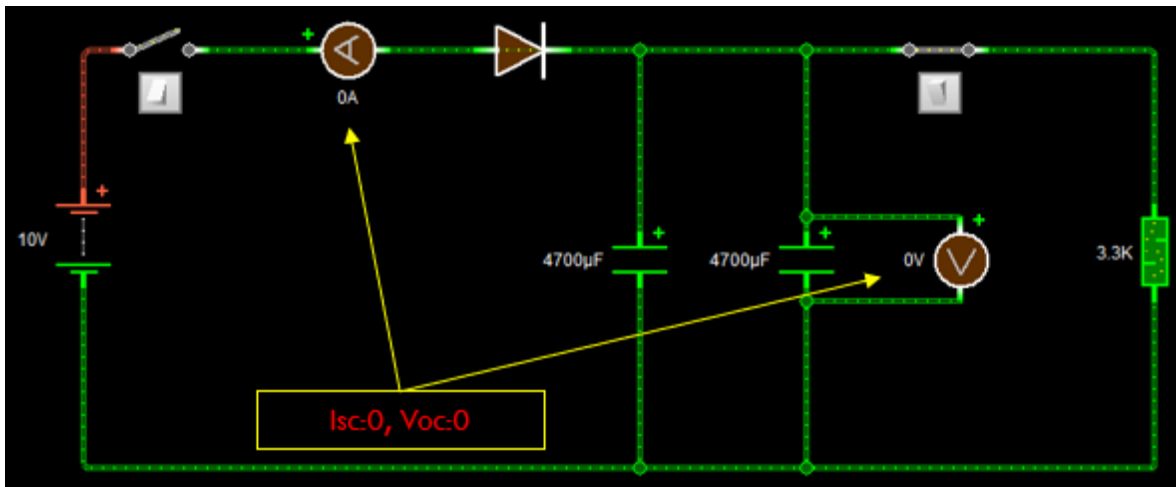


Figura 61. Simulación del circuito, estado inicial.

Una vez en el Voc, se abre el interruptor de carga, y se cierra el de descarga, el que da paso a esta, hasta tener las condiciones para una nueva prueba (Isc:0, Voc:0), figura 59, 60 y 61.

Lo que mostro una correcta operación del sistema.

- Armado del circuito.

Con la seguridad del comportamiento del circuito, se realiza el armado de este, figura 62.

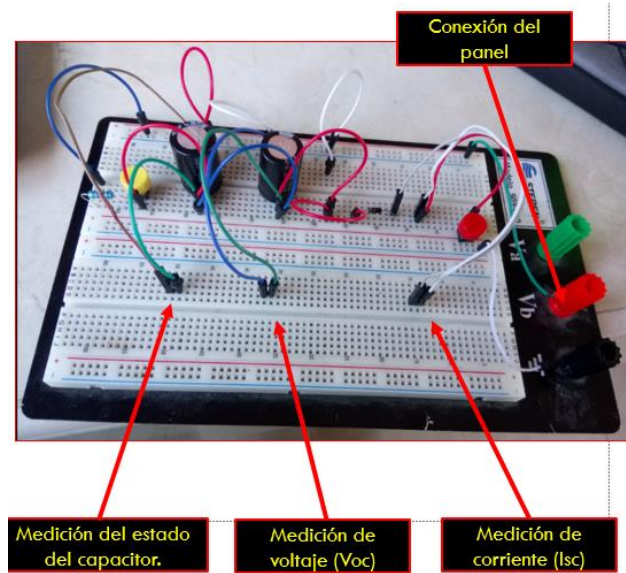


Figura 62. Circuito físico.

En esta prueba se emplearon equipos externos para la adquisición de los datos, figura 63, esto ya que lo que se prueba es el circuito de potencia.

Para realizar la medición se emplearon los siguientes equipos:



Medición del estado
Del capacitor.



Medición de
temperatura



Medición de corriente.



Medición de Voltaje.

- 2- Tektronix DMM 4050 Digit precisión Multimeter.
- 1- Thermometer Flukew 62 MAX.
- 1- Multimetro Fluke 77.



Figura 63. Equipo externo.

El equipo se montó en el circuito, así como la conexión al panel, figura 64 y 65.



Figura 64.-Equipo montado.



Figura 65. Conexión al panel.

Con el circuito y los elementos conectados debidamente, se estableció una metodología para realizar la medida ya que hasta este punto el sistema es totalmente manual, figura 66.

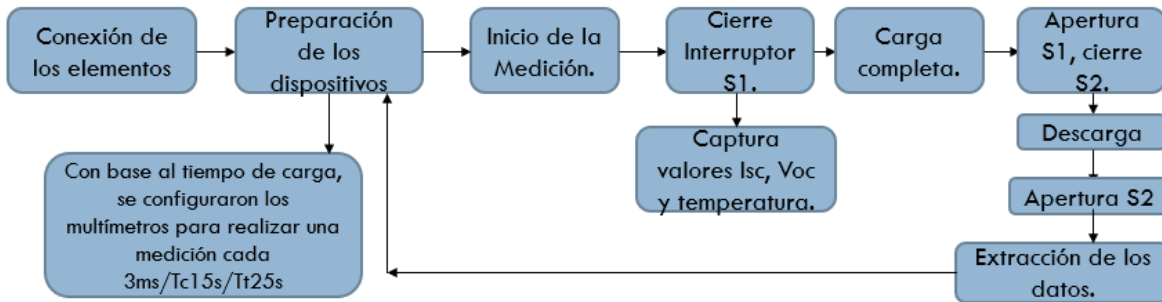


Figura 66. Metodología de medición.

Con esto se realizó la prueba, y los datos obtenidos fueron extraídos mediante la función de extracción de datos USB de los equipos empleados.

- Tratamientos de datos.

Realizada la prueba se obtuvieron los datos de corriente y voltaje, los cuales fueron extraídos de los multímetros mediante el puerto USB (Archivo Excel) y la temperatura mediante el termómetro laser en el tiempo de la prueba.

Con los datos obtenidos, estos fueron sometidos al tratamiento básico para obtener la curva I-V, Isc, Voc, Imp, Vmp y Pmax y el FF, esto para comprobar el resultado.

Los datos obtenidos experimentalmente (Isc y Voc), se graficaron (Origin) para obtener la Curva I-V, figura 67.

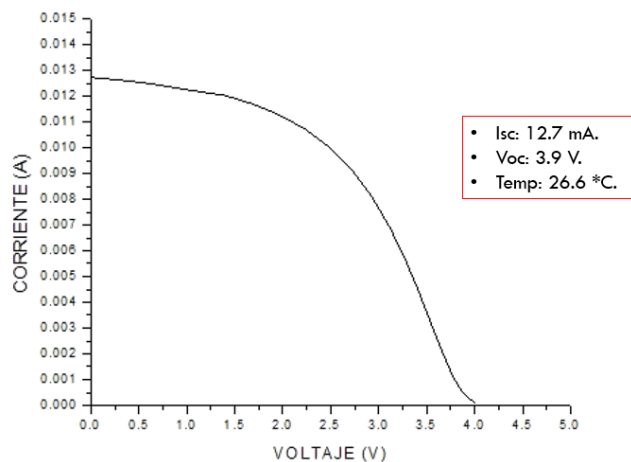


Figura 67. Curva I-v obtenida experimentalmente.

Al realizar un análisis más profundo de la curva I-V obtenida experimentalmente, se logró obtener los datos deseados, figura 68.

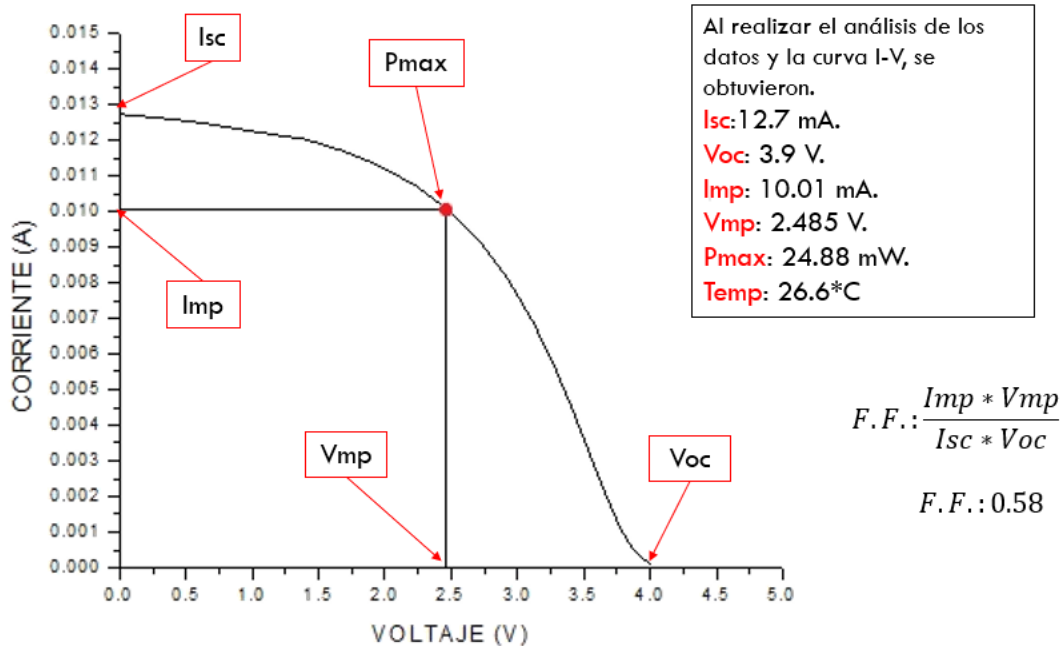


Figura 68. Análisis de la curva I-v obtenida experimentalmente.

3.5.2 Prueba del sistema de adquisición de datos

La prueba del sistema de adquisición es simplemente repetir la prueba anterior, pero en lugar de emplear los dispositivos adicionales, emplear el sistema diseñado para la captura de los datos y teniendo en cuenta que con esto la operación del circuito se automatizara, figura 69 y 70.

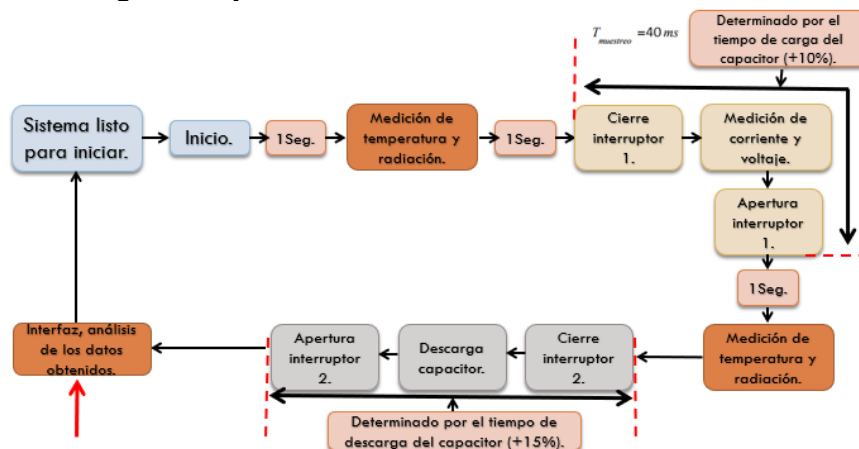


Figura 69. Esquema de operación con el sistema de adquisición de datos.

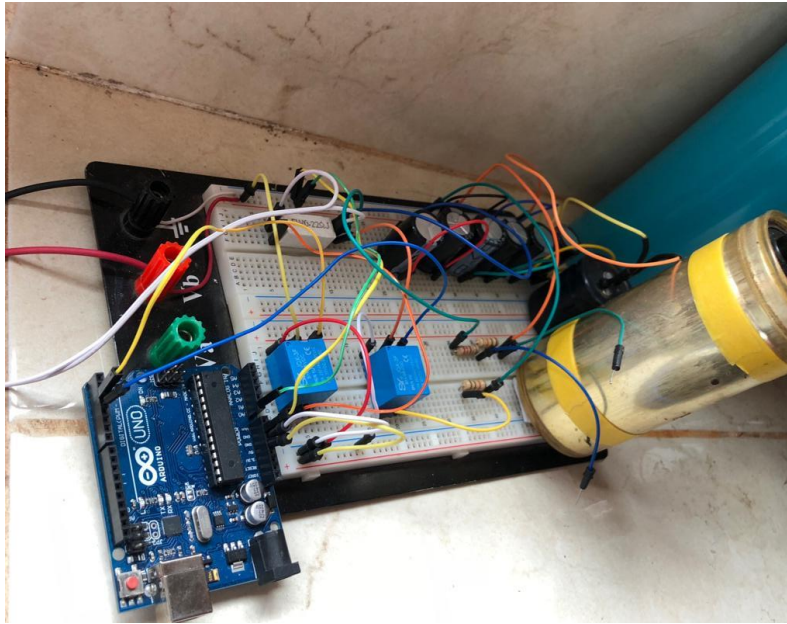


Figura 70. Circuito armado con el sistema de adquisición de datos.

Con esta prueba se comprobó la correcta generación y lectura de los datos, estos generados por el circuito y leídos por el sistema de adquisición de datos.

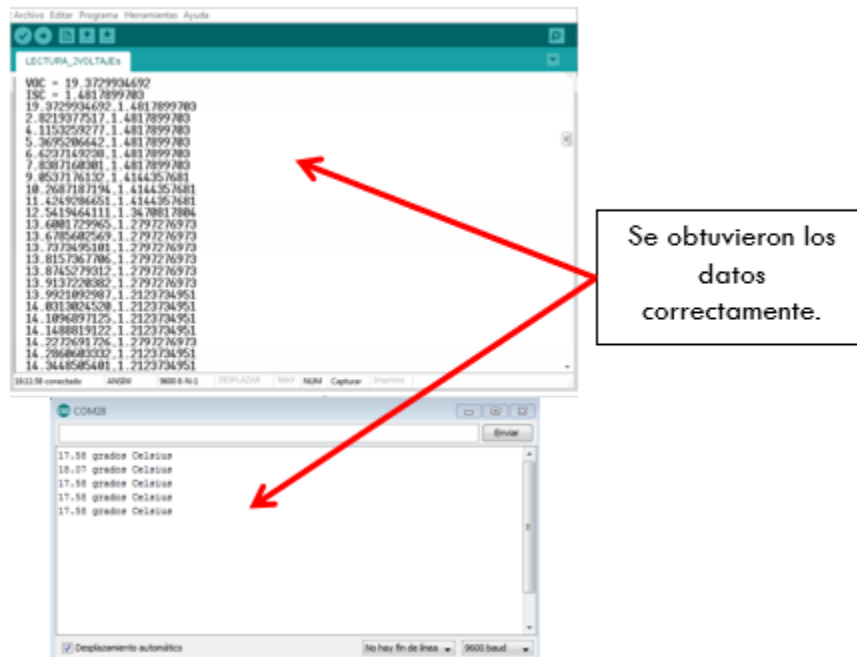


Figura 71. Circuito armado con el sistema de adquisición de datos.

Mediante el monitor serial de Arduino comprobamos la adquisición de los datos, figura 71, comprobando el correcto funcionamiento del sistema de adquisición.

3.5.3 Prueba de interfaz y tratamiento de datos

Por último, simplemente se realizó la conexión entre la tarjeta Arduino y la hoja de cálculo (Excel), y se realizó la prueba en conjunto.

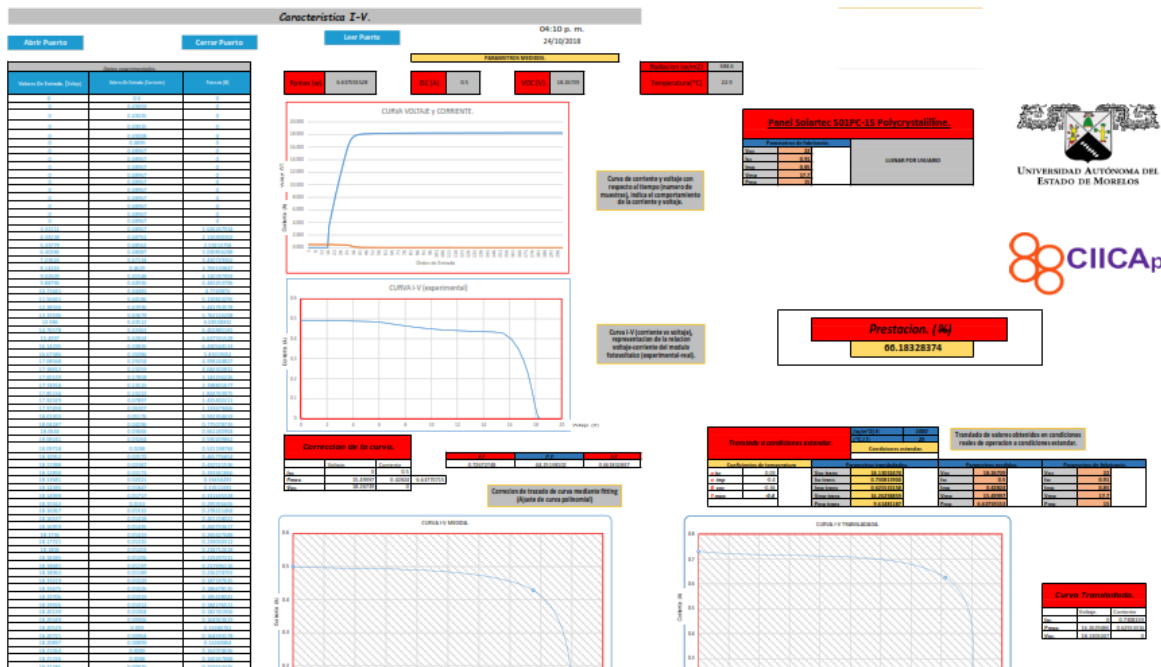


Figura 72.–Interfaz, después de prueba de operación.

En la figura 72 se observa que, al finalizar el proceso, la interfaz automáticamente se auto rellena, ya que, al tener los datos en los elementos principales, lo demás se genera automáticamente, desplegando la información deseada.

3.5.4 Recapitulando

A pesar de que el funcionamiento en el desarrollo de las partes del sistema se fue comprobando en el proceso, era necesario comprobar el funcionamiento de cada

uno de estos, y el funcionamiento en conjunto, se realizaron las pruebas aisladas de cada parte, dando como resultado el buen funcionamiento y operación de estas.

3.6 Generación de reporte

Al contar con la interfaz y toda la información que esta contiene se pensó en una forma de generar un reporte con esta información y que este pueda ser visualizado por internet. Para realizar esto empleamos nuevamente la programación mediante macros, directamente sobre nuestra hoja de datos, para esto creamos o alojamos una copia de nuestra de hoja de datos en algún servidor en línea (empleamos Dropbox), y programamos el macro para enlazar el archivo empleado en la PC con el alojado en el servidor y al momento de activar el generar reporte, simplemente la información será capturada en el archivo en línea, y estará online siempre, teniendo acceso a él mediante un enlace, para consulta o descarga, figura 73.

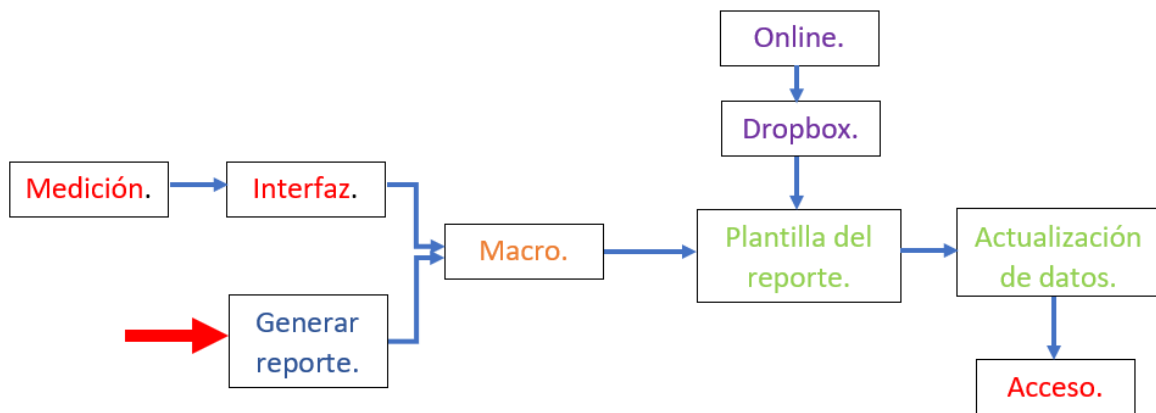


Figura 73. Interfaz, esquema de generación de reporte.

Para dar inicio a la generación del reporte se creó un botón específico para la tarea el cual está inmerso en la interfaz.



Figura 74. Interfaz, Botón de generación de reporte.

En la figura 74 observamos el botón que se agregó a la interfaz el cual, al ser accionado, inicia la secuencia programada para la generación del reporte, figura 75.

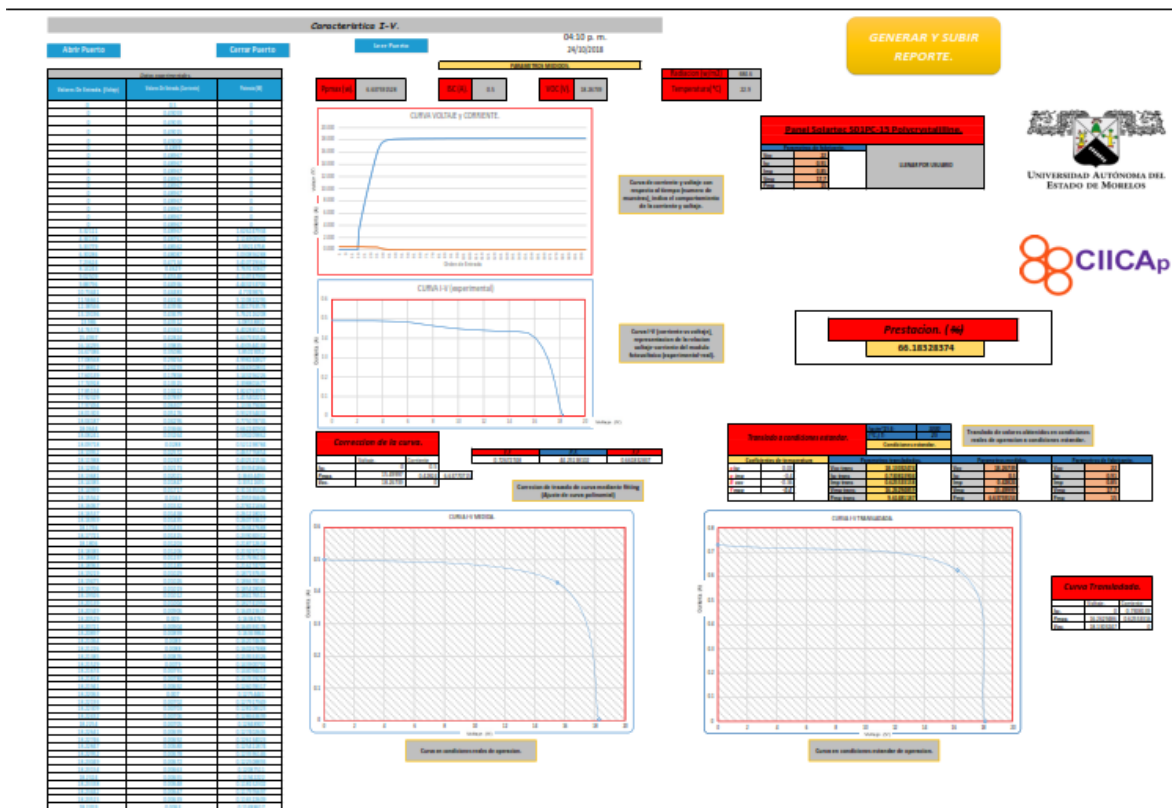


Figura 75. Vista general del reporte generado.

CAPITULO 4. RESULTADOS

A pesar de que desde un principio se cuenta con un objetivo y por lo tanto con un resultado esperado o a esperar, para obtener este resultado final, este se compone de distintos resultados y logros en los distintos puntos trabajados, figura 76.

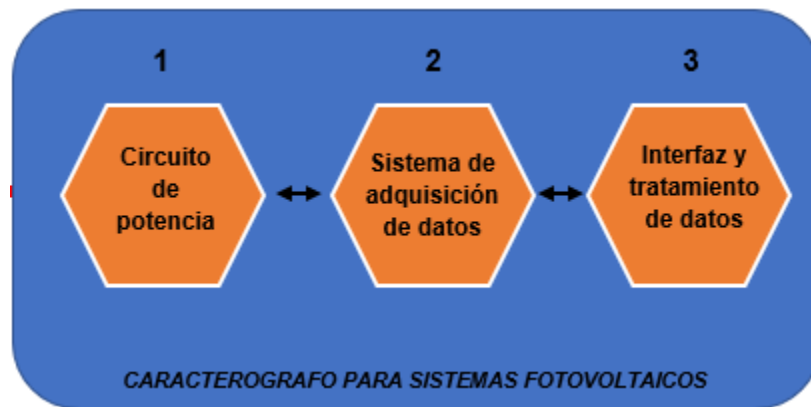


Figura 76. Elementos que componen el sistema.

4.1 Circuito de potencia

Se probó y obtuvo un circuito base de configuración simple, que cumple con la función y requerimientos necesarios para realizar la medición, este circuito se comporta adecuadamente en las distintas situaciones de estrés a las que es sometido.

Este circuito es simple, se compone de su conexión al módulo o panel fotovoltaico a caracterizar, la sección de carga y la sección de descarga de la carga capacitiva que nos da las condiciones para realizar la medición de corriente y voltaje, figura 77.

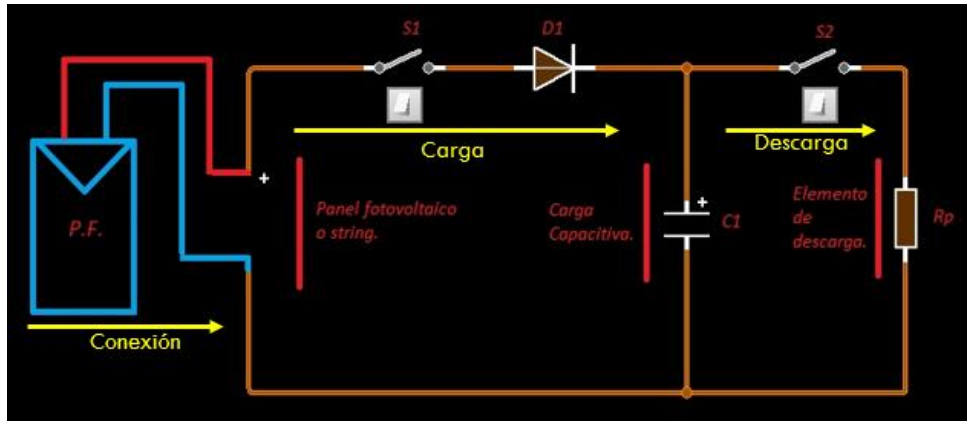


Figura 77. Circuito de potencia.

Con este circuito base podemos realizar el dimensionamiento de los elementos, así como las modificaciones necesarias para alcanzar el valor de la carga capacitiva y los elementos a emplear para dicho modulo o sistema fotovoltaico.

Esto de forma fácil y simple al emplear la hoja de dimensionamiento que se creó, figura 78, como una herramienta adicional para el sistema.

Datos del panel fotovoltaico o string, para el cual se dimensionara el SISTEMA.		Potencia de disipación.	
Isc (Amperes)	Voc (Volts)	R1 (Watts)	R2 (Watts)
0.001	7	0.0345	0.0345
Pmax (Watts)		Rt (ohms)	Itr (Amperes)
0.007		2000	0.0035
Valor maximo en Voc (Volts)		3.5	
Captura de Corriente.		Resistencia de potencia/descarga	
Resistencia tipo shunt o precisión.		Interrupor.	
Valor de la resistencia	0.25	C.N. (amp)	0.001
Se debe emplear una resistencia que sea casi 0 para evitar modificar el proceso de carga del condensador		T.Rup. (volts)	7
		C.max.	0.001
		Corriente	0.001
		P.Cort. (amp)	0.001
		P.Cie. (amp)	0.001
		Cable	
		Tiempo deseado de descarga (segundos)	
		Resistencia (ohms)	35000
		Potencia (Watts)	0.0014
		Tiempo de carga (segundos)	
		Capacitancia (faradios)	0.00143257
		Voltaje del capacitor	7
		Capacitancia (faradios)	0.00143257

Figura 78. Herramienta de dimensionamiento.

Con estos dos, circuito y herramienta de dimensionamiento, se puede llegar a los rangos de operación deseados por el usuario.

Se comprobó mediante las simulaciones, la correcta operación del circuito en las distintas situaciones de estrés a las que es sometido, una vez dimensionado para las características del panel, lo que arrojo un correcto funcionamiento físico, así como la generación correcta de los valores a medir, figura 79.

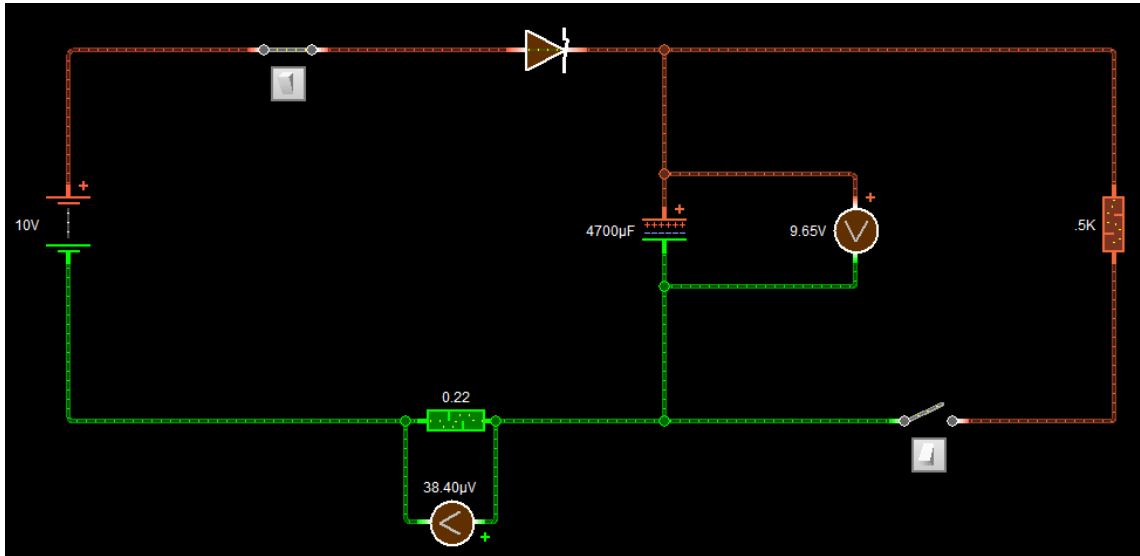


Figura 79.Simulación 1.

De igual forma en la descarga el circuito, se comportó de forma adecuada, disipando la potencia almacenada en la carga capacitiva, figura 80.

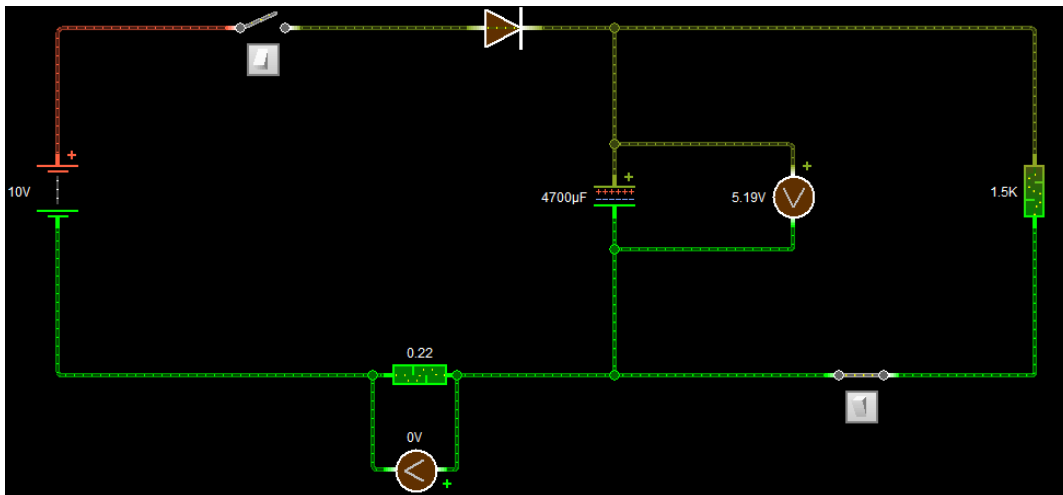


Figura 80.Simulación 2.

Uno de los puntos más importantes y difíciles de cumplir, es lograr el valor de la carga capacitiva de forma real, ya sea por los valores comerciales o capacidades de este elemento.

Sin embargo, mediante el análisis se comprobó que no es necesario emplear un elemento único para alcanzar este valor, sino que es posible y viable emplear varios elementos y emplear conexión en serie, paralelo o mixto, en estos elementos para lograr alcanzar el valor deseado, figura 81, 82.

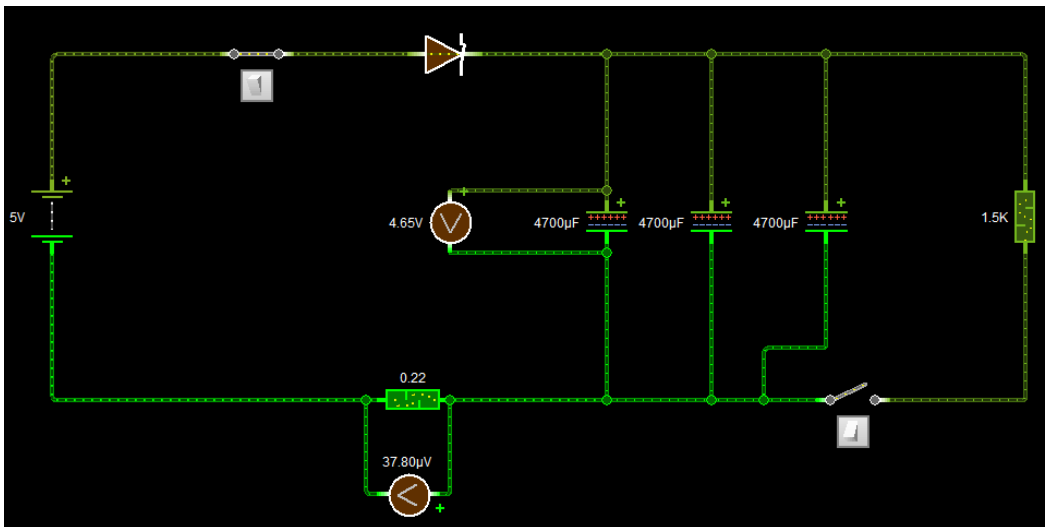


Figura 81. Simulación conexión paralelo.

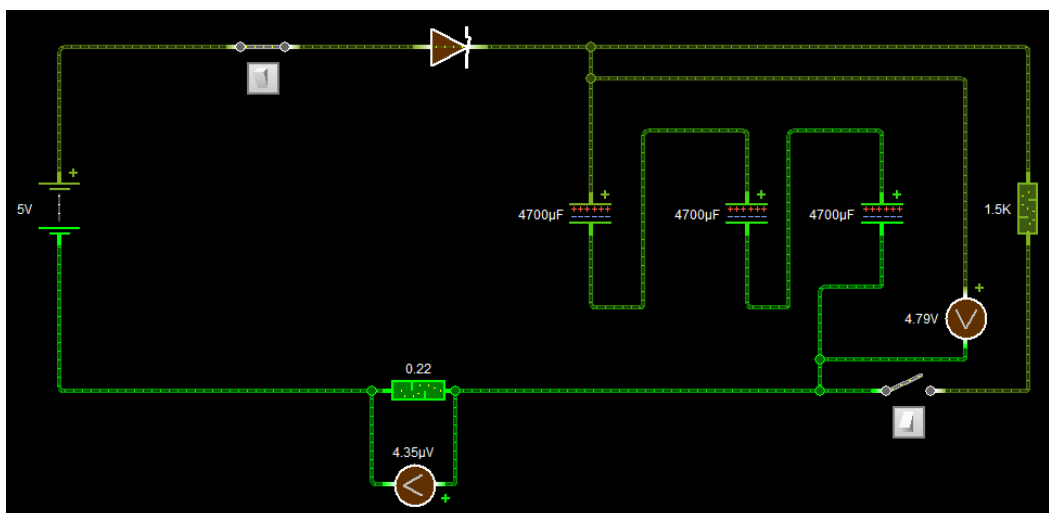


Figura 82. Simulación conexión serie.

Si bien el análisis comprueba que puede emplearse las distintas conexiones entre los capacitores se debe tener en cuenta que al emplearse se debe realizar un análisis propio de corriente y voltaje en la conexión empleando y tomando en cuenta las características que aplica en cada una de las conexiones, para encontrar la compensación que requerirán las mediciones, caídas o altas que estas pueden tener.

Con esto el circuito cumple con su función perfectamente, generando las condiciones para realizar las mediciones de corriente y voltaje para obtener la curva I-V, figura 83.

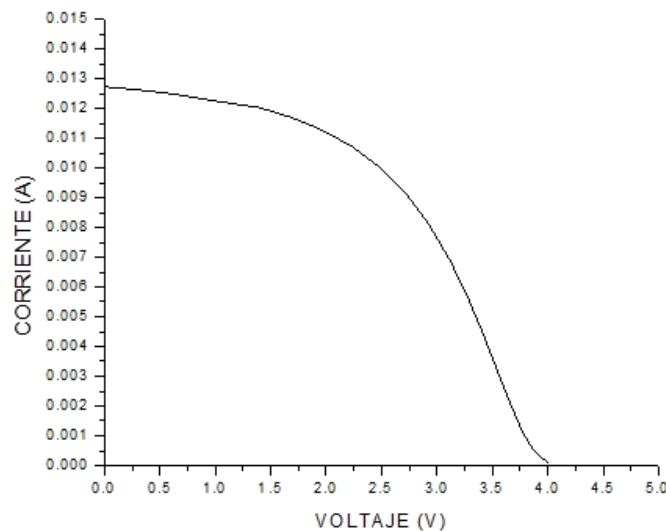


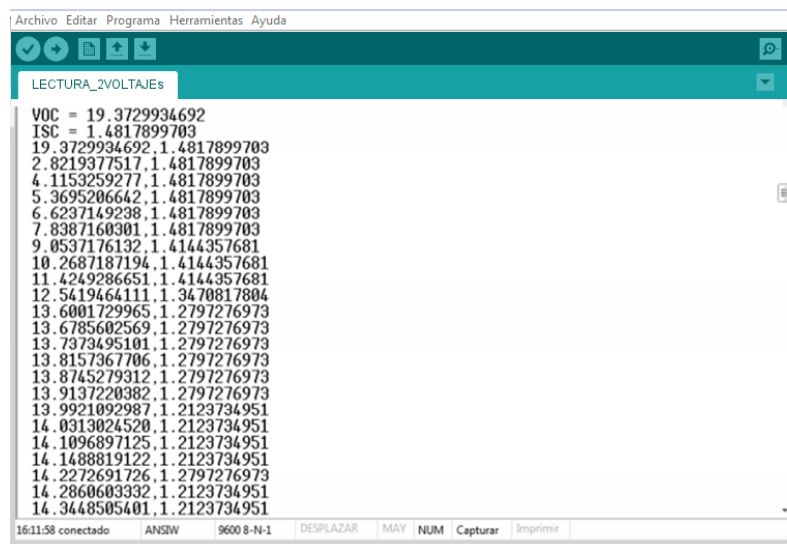
Figura 83. Curva I-V obtenida.

4.2 Sistema de adquisición de datos

Se logro obtener un sistema con elementos simples, de fácil aplicación y empleo, el cual además de realizar las mediciones de corriente y voltaje, realiza la medición de temperatura y radiación las cuales son indispensables para realizar el análisis de los datos, esto mediante el uso de la tarjeta Arduino uno, que además de las mediciones se encarga de la operación del circuito, dando como resultado un

sistema automatizado que no requiere de la intervención del operador para realizar las mediciones, si no, solo para dar inicio a la operación.

De igual forma mediante este elemento es posible modificar las condiciones de operación del sistema, ya sea para establecer los tiempos de accionamiento de los interruptores, tiempos de muestreo dependiendo del tiempo de carga, descarga, las constantes y variables que se requieran en cada caso de tipo de panel o tecnología. Las mediciones realizadas se almacenan en la tarjeta y pueden ser extraídos o visualizados por el monitor serial, figura 84, o en nuestro caso enlazar mediante una conexión USB a un software, para tener mayor manipulación de datos e incluso una interfaz gráfica, dependiendo las necesidades del usuario.



The image shows a screenshot of a serial monitor application window. The title bar includes 'Archivo', 'Editar', 'Programa', 'Herramientas', and 'Ayuda'. The main window title is 'LECTURA_2VOLTAJES'. The content area displays a list of numerical data points, each on a new line, representing voltage readings. The data starts with 'VOC = 19.3729934692' and 'ISC = 1.4817899703', followed by 14 rows of three numbers separated by dots. At the bottom of the window, there is a status bar with the text '16:11:58 conectado ANSIV 9600 8-N-1' and several control buttons: 'DESPLAZAR', 'MAY NUM', 'Capturar', and 'Imprimir'.

```
VOC = 19.3729934692
ISC = 1.4817899703
19.3729934692.1.4817899703
2.8219377517.1.4817899703
4.1153259277.1.4817899703
5.3695206642.1.4817899703
6.6237149238.1.4817899703
7.8387160301.1.4817899703
9.0537176132.1.4144357681
10.2687187194.1.4144357681
11.4249286651.1.4144357681
12.5419464111.1.3470817804
13.6001729965.1.2797276973
13.6785602569.1.2797276973
13.7373495101.1.2797276973
13.8157367706.1.2797276973
13.8745279312.1.2797276973
13.9137220382.1.2797276973
13.9921092987.1.2123734951
14.0313024520.1.2123734951
14.1096897125.1.2123734951
14.1488819122.1.2123734951
14.2272691726.1.2797276973
14.2860603332.1.2123734951
14.3448505401.1.2123734951
```

Figura 84. Visualización de datos mediante monitor serial.

4.3 Interfaz y tratamiento de datos

El sistema de adquisición de datos obtenido nos permite la conexión con un programa externo para la manipulación de los datos, en este caso la interfaz desarrollada es una hoja de cálculo (Excel) empleado macros como programación para esta.

La interfaz permite una fácil conexión con el sistema de adquisición, desplegando la información medida. La cual queda a nuestra disposición para su manipulación y sometiendo a las fórmulas y manejo de datos necesarios mediante las herramientas de Excel, figura 85, logrando así una interfaz de código abierto al igual que de gran compatibilidad con cualquier ordenador al ser un programa (Excel) básico que la mayoría de los usuarios poseen.

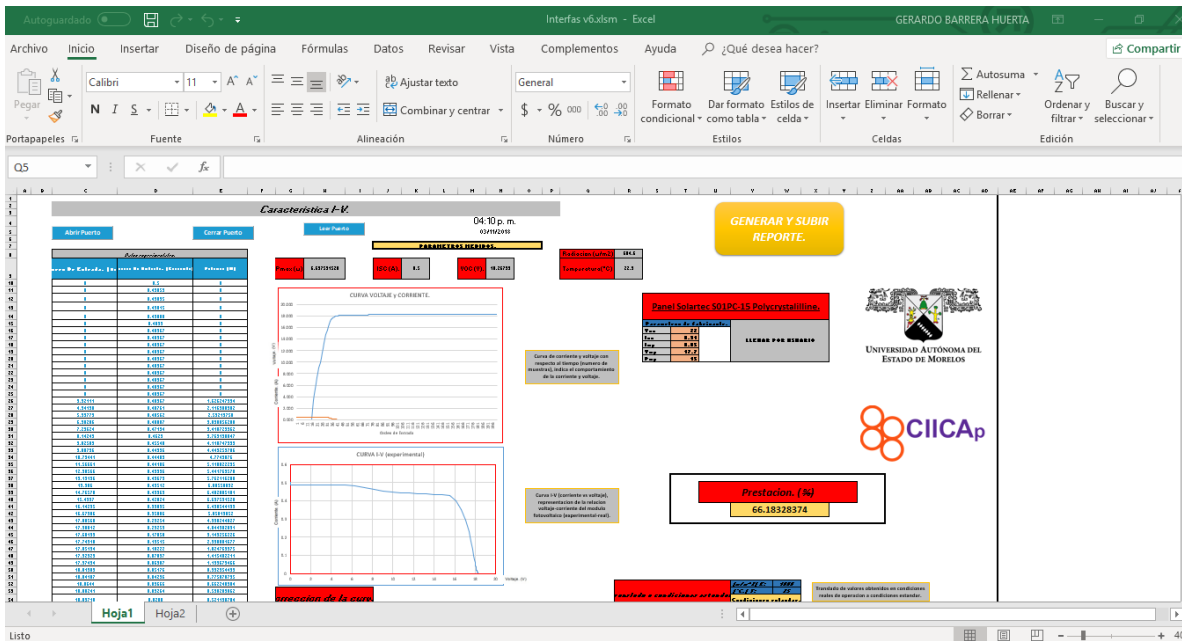


Figura 85. Vista general de la interfaz.

4.4 Característica y datos obtenidos

La funcionalidad del sistema en conjunto se define con las mediciones y el resultado de los datos que este nos despliega como resultado final, iniciando con la generación de condiciones y medición de datos, hasta la visualización y tratamiento de estos para interpretarlos.

El sistema nos proporciona los pares de datos medidos de corriente y voltaje y automáticamente la potencia en cada uno de estos puntos (en este caso se capturaban 200 puntos), figura 86.

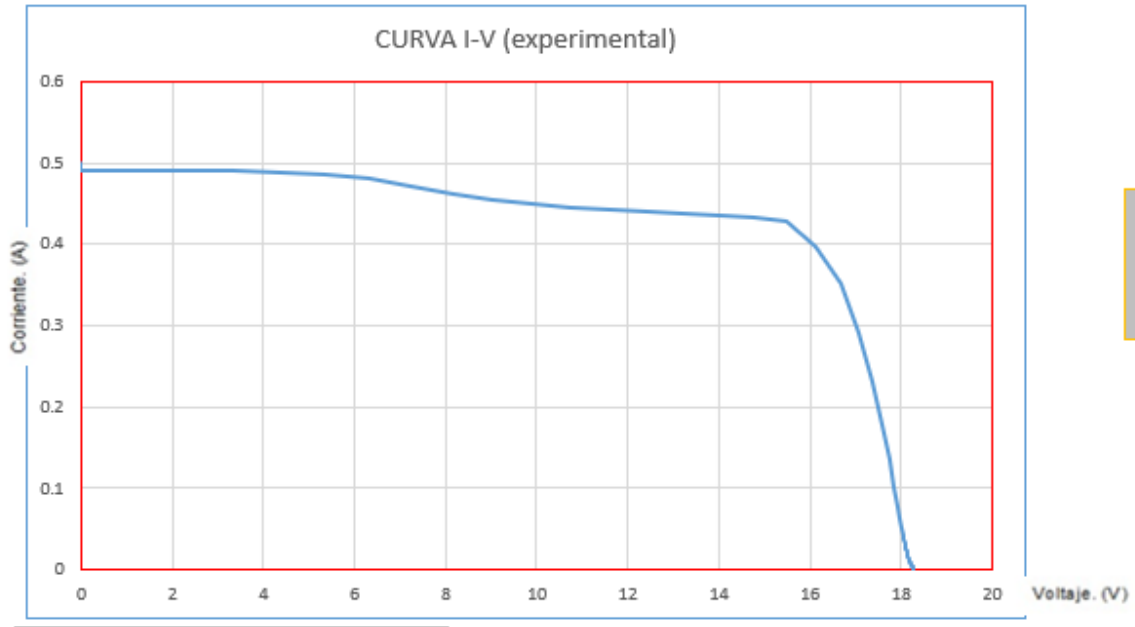


Figura 88. Curva o característica I-V experimental.

De igual forma obtenemos la gráfica de comportamiento de la corriente y voltaje en función de las muestras, figura 89.

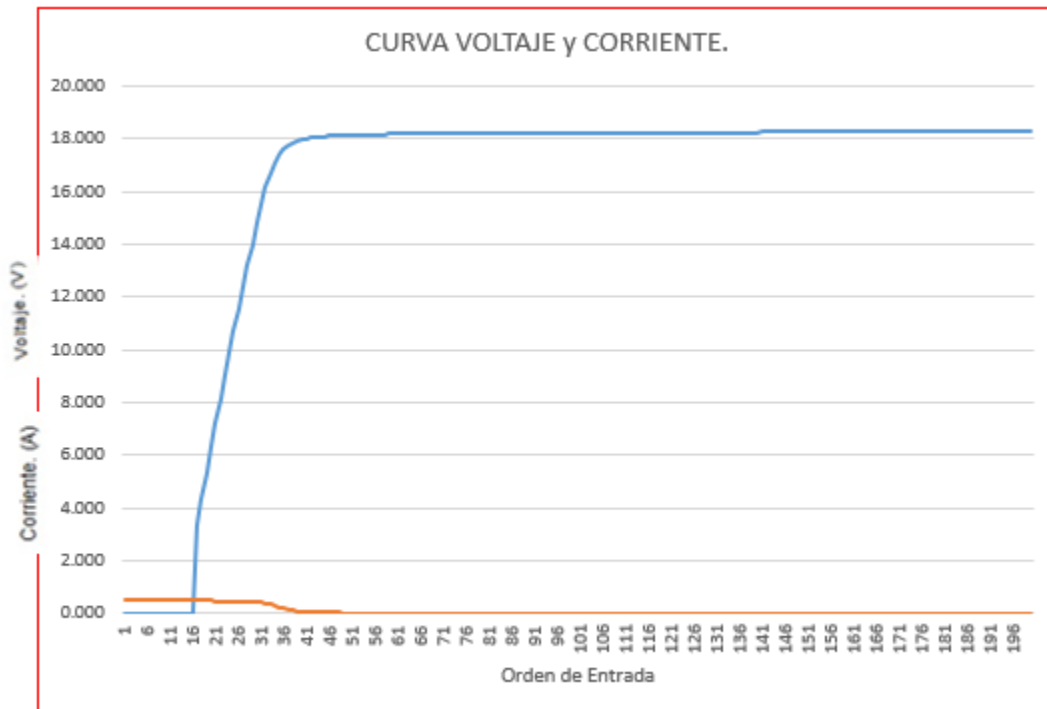


Figura 89. Curva o característica I-V experimental.

Con los datos y la curva I-V experimental, el sistema nos despliega una curva I-V corregida mediante un ajuste de curva polinomial, el cual solo requiere los 3 puntos importantes de la curva experimental, Pmax, Isc, Voc, figura 90.

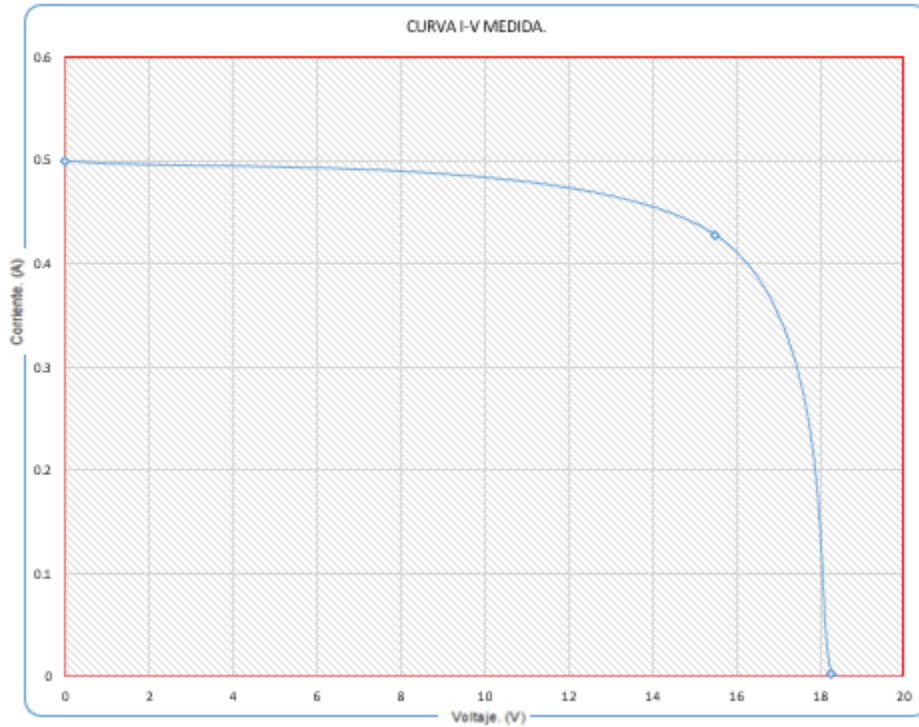
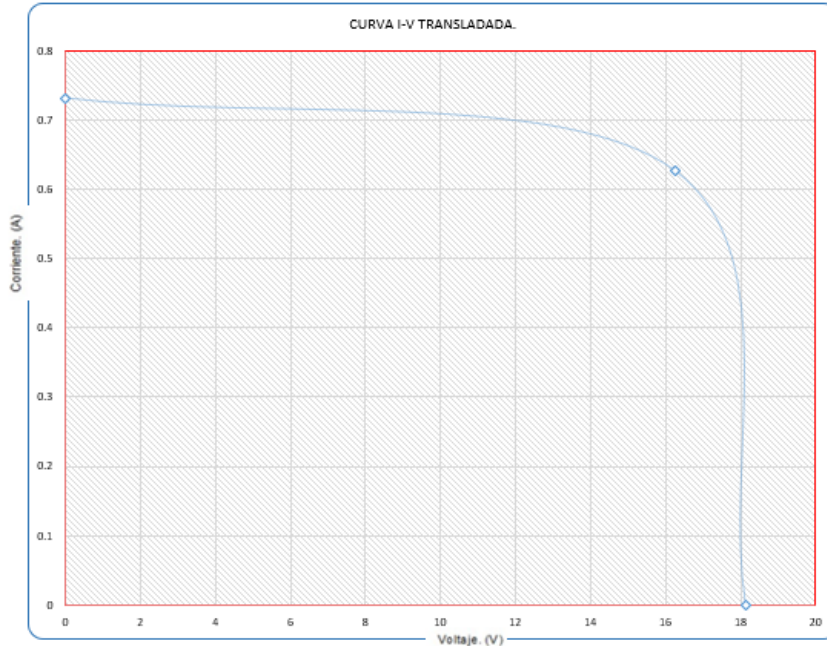


Figura 90. Curva o característica I-V experimental corregida.

Uno de los puntos más importantes obtenidos es la capacidad de realizar el traslado de las mediciones realizadas en condiciones reales de operación a condiciones estándar de medida, esto para tener la comparación real de la curva experimental con la proporcionada por el fabricante, así como los datos. Para esto simplemente se usaron los datos obtenidos, como los datos del panel y los coeficientes dados por la tecnología, figura 91 y 92.

Coeficientes de temperatura		Temperatura		Temperatura		Temperatura	
		Temperatura		Temperatura		Temperatura	
		Temperatura		Temperatura		Temperatura	
a_{isc}	0.03	Voc trans	18.13032474	Voc	18.2674	Voc	22
a_{imp}	-0.4	Isc trans	0.730813904	Isc	0.5	Isc	0.91
B_{voc}	-0.36	Imp trans	0.625533158	Imp	0.42824	Imp	0.85
Y_{mpp}	-0.4	Vmp trans	16.26294859	Vmp	15.5	Vmp	17.7
		Pmp trans	9.61481187	Pmp	6.63759	Pmp	15

Figura 91. Curva o característica I-V experimental corregida.



Curva Transladada.		
	Voltaje.	Corriente
<i>I_{sc}</i>	0	0.730814
<i>P_{max}</i>	16.26295	0.625533
<i>V_{oc}</i>	18.13032	0

Figura 92. Curva o característica I-V obtenida, trasladada a condiciones estándar.

Al contar con los datos a condiciones reales de operación y en condiciones estándar de medida, se obtuvo la prestación (%), que nos indica el porcentaje real de efectividad que está teniendo el panel, figura 93.

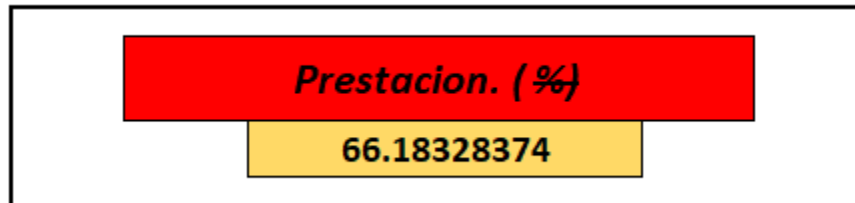


Figura 93. Prestación del panel.

4.5 Validación del sistema

El microcontrolador Arduino tiene definida su resolución de voltaje por su convertor analógico-digital. Esta resolución depende directamente de la alimentación que recibe el Convertor Analógico-Digital (ADC), que es el que usa como voltaje de referencia. Por este motivo, el valor de 5V es nominal y es necesario conocer con

exactitud que voltaje ingresa como alimentación del microcontrolador y referencia del ADC. El voltaje real medido como alimentación del ADC, es de 4.78V, el cual puede variar si se conecta carga adicional a este, que para 10 bits da una resolución de 4.66mV. Se calcula entonces, empleando la ecuación (5), la resolución de voltaje antes de ingresar en el divisor de voltaje.

$$V_{in} = \frac{\frac{0.00466}{120120}}{120+120+39410} = 0.019V \quad (42)$$

Se realiza el cálculo para la resolución de corriente con el mismo valor del ADC de 10 bits, de 4.66mV, aplicando la Ley de Ohm,

$$I = \frac{0.00466}{0.068} = 0.0685A \quad (43)$$

Con esto corroboramos que la resolución que nos ofrece la tarjeta Arduino es más que suficiente, para la captura de datos deseada.

Para la validación de los datos adquiridos se realizó una comparación de los datos de corriente y voltaje medidos por el sistema, con los datos obtenidos de manera manual con equipo externo, empleando 2 multímetros de precisión tektronic uno como voltímetro y otro como amperímetro, estos conectados al circuito de potencia para realizar la medición en el mismo punto, también se midieron Voc e Isc por separado. Para la estimación del error se realizó tomando los puntos medidos por los multímetros como reales y calculando la diferencia entre estos y los de la curva medida por el sistema, figura 94 y 95.

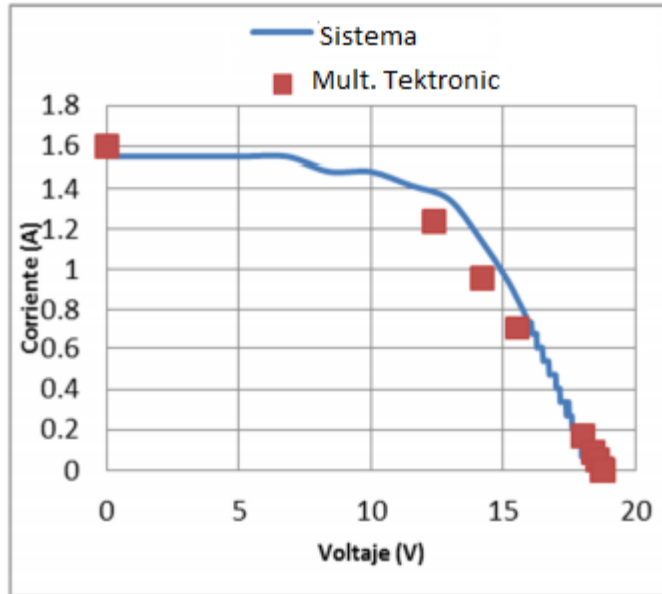


Figura 94. Curva trazada por el dispositivo (azul) y manualmente (rojo).

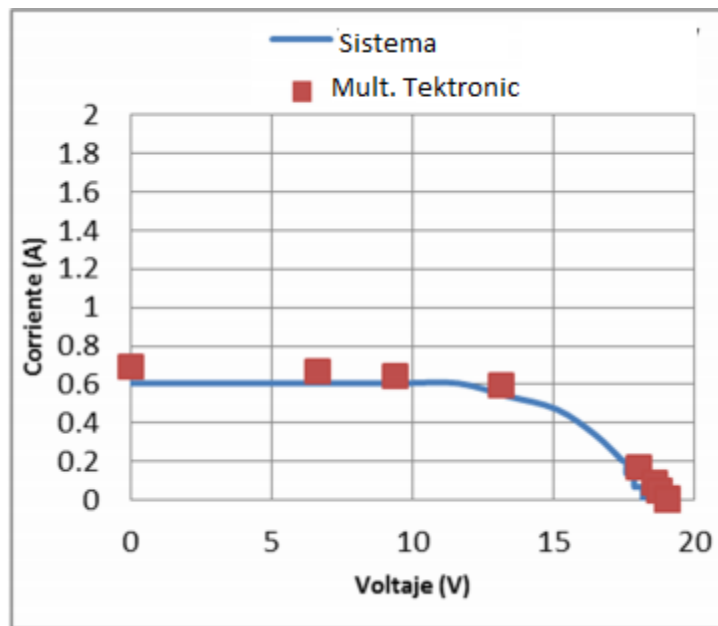


Figura 95. Curva trazada por el dispositivo (azul) y manualmente (rojo.)

Para estimar el error, se sacó el promedio de los valores obtenidos.

$$Error_1 = \frac{0.09723+0.11284+0.1235+0.08881+0.1009+\dots+N}{N} = 0.055078 \quad (43)$$

$$Error_V = \frac{0.142+0.125+0.1024+0.108+0.366+0.1785+\dots+N}{N} = 0.105406 \quad (44)$$

Para Voc e Isc se consideró la diferencia máxima medida para cada uno de estos valores.

$$I_{sc} = I_{sc_{medido}} \pm 0.059 \quad (45)$$

$$V_{oc} = V_{oc_{medido}} \pm 0.113 \quad (46)$$

El error arrojado puede ser ocasionado por la variación que presenta el voltaje de referencia, lo que origina que el microcontrolador proporcione valores con ese error o diferencia respecto a los reales al producirse la conversión analógico digital, en este caso el error es pequeño debido a que el voltaje proporcionado por la tarjeta se reservó para cosas que requirieran necesariamente la conexión a este, al igual que el análisis de cargas, corrientes y voltajes del circuito nos ayudan a reducir este error o calcular la compensación necesaria para eliminarlo. En nuestro caso el sistema presenta un error mínimo que puede ser despreciado sin algún problema.

Otro punto de validación del sistema, se compararon los datos obtenidos con este con los obtenidos con un equipo especializado, como lo es el de Solmetric, la medición se realizó al mismo panel, en la figura 96 se muestra la curva I-V obtenida y los valores principales de esta con el sistema diseñado, en la figura 97 de igual forma se visualiza la curva I-v y los datos obtenidos con él Solmetric.

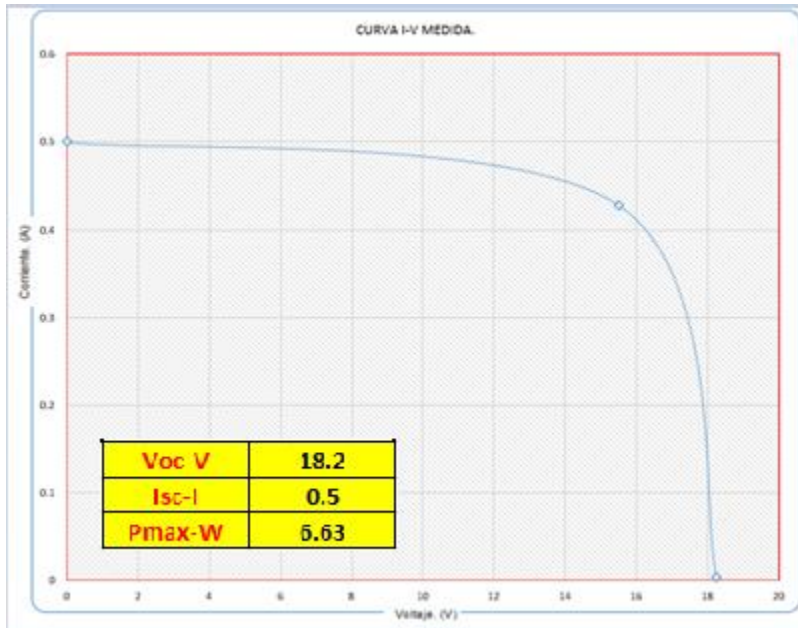


Figura 96. Curva I-V obtenida con el sistema desarrollado.

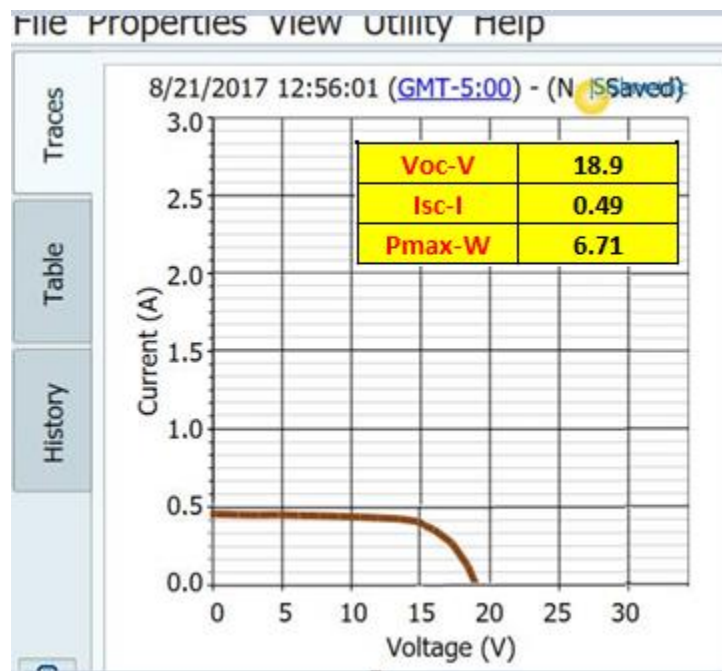


Figura 97. Curva I-V obtenida con el sistema Solmetric.

Como se observa en las figuras 95 y 96 ambos sistemas trazan la curva I-V, los valores de I_{sc} , V_{oc} y P_{max} obtenidos presentan una ligera variación entre ellos, sin embargo esta variación es mínima y puede ser ocasionada a que se realizó cada prueba de forma independiente, y no en conjunto, lo que pudo dar como resultado que en cada prueba las condiciones ambientales (temperatura y radiación) no fueran las mismas ocasionando esta variación en la caracterización del panel.

Tomado en cuenta esta condición en la operación de los sistemas, la variación puede despreciarse y tomarse como una variación en las condiciones ambientales, e incluso si fuera una variación originada por el sistema, esta es mínima, figura 98, dando como resultado que el sistema obtenido tiene un desempeño óptimo considerando el resultado mostrado por el Solmetric como el real.

	ERROR RELATIVO	ERROR RELATIVO PORCENTUAL
Voc	0.7	3.703703704
Isc	-0.01	-2.040816327
Pmax	0.08	1.192250373

Figura 98. Calculo de error en la medición.

4.6 Reporte

Como resultado final, el sistema genera la hoja de reporte la cual contiene toda la información, estando está disponible en línea para su consulta, conteniendo los datos de la última medición realizada, figura 99, hasta la generación de la próxima.

Ahora mismo el reporte se encuentra en línea y puede ser consultado mediante este enlace:

<https://www.dropbox.com/s/t1zmgjkxtpc6mvu/REPORTE.pdf?dl=0>

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

5.1 Conclusiones

Se realizó el diseño de un Caracterografo para sistemas fotovoltaicos, este sistema se diseñó partiendo desde cero, desde la teoría fundamental de operación, hasta lograr la obtención de los resultados deseados.

Con respecto al diseño del sistema se trabajó en tres partes, el circuito de potencia, el sistema de adquisición de datos, la interfaz y tratamiento de datos.

El circuito de potencia se estableció teniendo en cuenta el principio de funcionamiento básico, manejando siempre la simplicidad de operación de este, pero logrando la generación de las condiciones necesarias para realizar la medición y adquisición de los datos, la importancia de este se debe a que es el que soporta el estrés eléctrico de la conexión al panel, de aquí se logró obtener una metodología de elección de componentes y cálculos entrelazados tomando en cuenta las características de los elementos del circuito, y lograr este circuito tomando en cuenta la capacidad del panel y las condiciones a generar, como el tiempo de duración de la carga, esto teniendo en cuenta que las características físicas del circuito no afectaran los valores reales a medir.

El sistema de adquisición de datos empleado fue desarrollado con base a la tarjeta Arduino uno, la cual nos proporcionó las características necesarias para nuestras necesidades sin embargo esta no es la única opción y en este caso se empleó esta por la facilidad y versatilidad que ofrece.

La interfaz y el tratamiento de datos en un principio se manejaba en el programa LabView sin embargo este presentaba la problemática que alguien externo tendría que hacerse con una licencia o el programa para emplear el sistema, por lo que se optó por Excel el cual nos ofreció todas las características necesarias para tratamiento de los datos además de ser prácticamente de código abierto.

La ventaja de este sistema frente a otros capaces de caracterizar módulos fotovoltaicos, como pueden ser un PVE o empleando una carga electrónica, es la simplicidad con la que se realizan las medidas, la precisión obtenida en las mismas y una muy importante a la hora de realizar medidas en instalaciones que se encuentren aisladas o lejos de poder conectarse a la red normal, es el funcionamiento sin alimentación necesaria ya que el ordenador provee de alimentación a la tarjeta Arduino y esta a los componentes que lo requieren, volviendo al sistema autónomo.

El sistema cumplido con los requerimientos, obteniendo los datos deseados y logrando un dispositivo de simplicidad de construcción y operación, el cual solo requiere realizar el dimensionamiento y cálculo de los elementos de circuito para llegar a los parámetros de operación requeridos por el usuario, logrando así obtener su sistema ajustado a sus necesidades y realizar el análisis deseado y en el proceso evitar la adquisición de equipos costosos o que estén totalmente sobrados para los parámetros a los que se usara.

5.2 Perspectivas

Seguir el desarrollo del sistema a un nivel más óptimo ya que a pesar de que se obtuvieron los resultados deseados, para realizar la medición de la radiación, se empleó un piranómetro avanzado, el cual podría ser desarrollado en un trabajo futuro, al igual que un sensor de inclinación lo que daría mayor independencia al sistema y de esta forma volverlo más dúctil para el uso en todas las escalas.

De igual forma el sistema podría ser dotado de una capacidad inalámbrica lo cual permitiría que una vez montado el sistema, este no tenga que realizar la conexión mediante cable con el ordenador, si no por algún protocolo de comunicación inalámbrico, lo cual le daría mayor versatilidad

REFERENCIAS

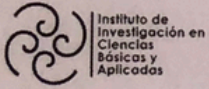
- 5Hertz. (2011). Divisores de voltaje. *Electronica Aplicada*.
- Abrahamse, T. V. (204). An-open source hardware I-V curve tracer for monitoring PV output in Bolivia. *Investigacion y desarrollo*., 100-116.
- Adalberto Ospino Castro, R. A. (2015). Modelado y simulacion de un panel fotovoltaico empleando tecnicas de inteligencia artificial. xxxv, 225-233.
- Andujar Marquez, J. M. (2009). Sistema para la generacion automatica de curvas I-V, P-V y monitorizacion de modulos fotovoltaicos. xxv *Jornadas de Automatica*.
- Arno Krenzinger, A. J. (2016). Aparato para medir curvas caracteristicas de modulos fotovoltaicos con radiacion natural. *Energia Solar Fotovoltaica*., 1-2.
- CIEMAT. (2009). Fundamentos dimensionado y aplicaciones de la energia solar fotovoltaica. *CIEMAT*.
- D'Ambros, D. (2016). RESISTOR: definición, símbolos, unidad, múltiplos y potencia disipada,. *Electronicageneralent1*.
- Electricaplicada. (2015). Cables y alambres electricos. *Electricaplicada*.
- Fernandez Ferichola, J. (2009). *Caracterizacion de modulos fotovoltaicos con dispositivo portatil*. Madrid, españa: Universidad carlos III de madrid.
- Fonseca, R. M. (2012). *Análisis del Comportamiento de Módulos Fotovoltaicos. Diagnostico, Modelado Matemático de Curvas I-V y P-V, y construcción de Prototipo de Trazador de Curvas I-V*. Instituto politecnico de braganca.
- fonseca, R. m. (2013). *Análisis del comportamiento de módulos fotovoltaicos. Diagnóstico, modelado matemático de curvas I-V y P-V, y construcción de prototipo de trazador de curvas I-V*. . Braganca: IPB.
- Gonzalo Navia, J. P. (2015). Medicion experimental de la eficiencia de un modulo fotovoltaico. *Investigacion y desarrollo*, 49-64.

- Guzman, M. (19 de mayo de 2017). *blogspot*. Obtenido de Capacitores: <http://cfmguzman.blogspot.com/2017/05/capacitores.html>
- IESCAMP. (2017). Applications of Arduino uno. *myArdunio*.
- III, T. W. (1983). *A high current-voltage curve tracer employing a capacitive load*. Lexington, MA: Solar cells.
- Israel Blanco Sardinero, J. A.-M. (2012). *Instalacion solar fotovoltaica conectada a red sobre la azotea de una nave industrial*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- J. Muñoz, E. L. (2008). Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays. *ELSEVIER*, 5-8.
- Javier Muñoz, E. L. (2013). Design of a twin capacitive load and its application to the outdoor rating of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics*.
- Jimmy E. Quiroz, J. S. (2000). *In-situ module-level I-V tracers for novel PV monitoring*. albuquerque: sandia national laboratories.
- King, D., & W. E. Boyson, J. A. (2005). Photovoltaic Array Performance Model. *Sandia Report*.
- Knaupp, W. (2010). Power rating of photovoltaic modules from outdoor measurements. *Zentrum fur Sonnenenergie und Wasserstoff-Forsch.*
- lorenzo, E. (2011). *Engineering of photovoltaic system*. IES-UPM.
- M.A.Muñoz, P. C. (2011). Medicion encampo de la potencia maxima entregada por paneles fotovoltaicos bajo condiciones estandar de medida. *congreso iberico de agroingenieria*, 1-3.
- Magallanes, C. (2017). Funcionamiento de un breaker (interruptor electrico). *fisicaelectrica*.
- Maocho, F. (2014). Interruotores, pulsadores, conmutadores y reles utilizados en electronica. *Curso de arduino*.
- Marion, B. (s.f.). Performance parameters for grid connected PV systems. *National Renewable Energy Laboratory*.
- Microsoft. (2016). *Excel y VBA*. Obtenido de Excel y VBA: <https://excelyvba.com/curso-de-excel-avanzado/>

- Renovetec. (4 de agosto de 2018). *Energiza*. Obtenido de Energiza:
<http://www.energiza.org/solar-fotovoltaica/22-solar-fotovoltaica/627-paneles-fotovoltaicos-concepto-y-tipos>
- Riley, C. W. (2015). *An autonomous online I-V tracer for PV monitoring applications*. tennessee: Master Theses.
- Rivera, N. R. (2014). *Medicion de la eficiencia energetica de los paneles solares de silicio*.
- S. Berberkic, P. M. (2010). *Design of a Monitoring and test system for PV based Renewable Energy System*. Spain: International Conference on Renewable Energies and Power Quality.
- Sanchez, M. M. (2012). *Influencia de la temperatura en el generador fotovoltaico*.
- Sci., J. B. (202). Methodology for photovoltaic modules characterization and shading effects analysis. *Journal of the brazilian society of mechanical sciences.*, 1-3.
- SCIENCE19. (22 de 06 de 2017). *SCIENCE19.COM*. Obtenido de SCIENCE19.COM: <https://es.science19.com/advantages-of-using-electrolytic-capacitors-2623>
- Solarweb. (s.f.). Obtenido de <http://www.solarweb.net/forosolar/aspectos-tecnicos/10763-medidor-curvas-vi.html>
- Solarweb.net. (2011). Diodos de potencia. *Solarweb.net*.
- Technosun. (s.f.). Obtenido de www.technosun.com/es/principal/productos-tecnologico., R. d. (s.f.). *handle Capacitores*. Obtenido de conexion de capacitores.
- Valladolid, U. d. (s.f.). *Curso provincial de energias renovables, energia solar fotovoltaica*. Valladolid.
- Victor Messina Lopez, L. D. (2016). Efectos de la temperatura en la eficiencia de un modulo fotovoltaico. *Sistemas experimentales*, 65-77.
- visitor, R. g. (2015). Calculos y aplicaciones con resistencias. *electronica.es*.
- WNGINEERING, P. (s.f.). Obtenido de <http://www.pv-engineering.de/en/pvpm.htm>
- Xiaochen Wang, P. G. (2008). Una revisión de los modelos de pronóstico de energía. *Energy Procedia*, 770-778.

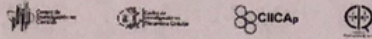


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Sustentabilidad Energética



Cuernavaca, Morelos, a 06 de diciembre de 2018.

DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS
DIRECTORA INTERINA DEL CIICAP
PRESENTE

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada **Caracterografo para sistemas fotovoltaicos** que presenta el alumno **Gerardo Barrera Huerta**, para obtener el título de **Maestría en Sustentabilidad Energética**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. ÁLVARO ZAMUDIO LARA	Aprobado	
DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO	Aprobado	
DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE	Aprobado	
DR. GILBERTO ANZUETO SÁNCHEZ	Aprobado	
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

DSJ*MLGE/nmc.

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209.
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 6212 / correo: merle.garcia@uaem.mx

**UA
EM**

Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023