

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



Desarrollo de un prototipo de simulador solar para pruebas en paneles fotovoltaicos

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Manuel Alejandro Mora Orozco

Cartago. Septiembre del 2018

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN

**Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

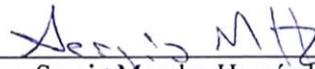
El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado "Desarrollo de un prototipo de simulador solar para pruebas en paneles fotovoltaicos" realizado por el señor Manuel Alejandro Mora Orozco y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



Ing. Carlos Meza Benavides

Profesor lector



Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor lector



Ing. Miguel Hernández Rivera

Profesor asesor

Cartago, 3 de septiembre de 2018

Declaración de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Manuel Alejandro Mora Orozco

Cartago, 3 de septiembre de 2018

Cédula: 3-0429-0849

Resumen

Este proyecto se presenta como un complemento para la investigación y prueba de algoritmos MPPT. La premisa bajo la que se desarrolla este trabajo es la del diseño de una recámara capaz de proveer una irradiancia constante para el desarrollo de pruebas en paneles solares. El proyecto se desarrolló para el Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESLab), el cual se enfoca en actividades relacionadas a la utilización de los sistemas electrónicos para la generación, el procesamiento y el uso eficiente de la energía eléctrica con fuentes renovables y de bajo impacto ambiental. Actualmente el SESLab no dispone de un simulador solar ya que esta clase de tecnología es muy costosa.

El proyecto se dividió en dos grandes etapas: La primera etapa fue el diseño e implementación del simulador solar, la segunda etapa consistió en el diseño de un sistema de pruebas que permitiera definir las características principales del simulador solar. Para el diseño de la recámara se emplearon materiales resistentes al fuego y a altas temperaturas como lo son una armazón de hierro galvanizado y láminas de plyrock. Para la generación de la irradiancia se desarrolló una matriz de 12 halógenos H4 de 100 W alimentados en corriente directa por tres fuentes de computadora de 600 W. Para el control del simulador se utilizó un módulo Arduino Mega 2560, este módulo permite configurar el modo de operación del simulador haciendo que el mismo sea totalmente programable por el usuario.

Para la etapa de pruebas se utilizó un panel solar KC65T de 65 W al cual se le determinó sus curvas V/I y V/P dentro del simulador en distintos modos de operación. Los resultados obtenidos superan las expectativas, el simulador logró una irradiancia máxima de $342.9001 \pm 0.17\%$ W/m² para el modo de luz alta (toda la matriz encendida) y una irradiancia mínima de $160.0013 \pm 0.89\%$ W/m² para el modo de luz alta sin una columna de halógenos (8 halógenos encendidos). Además, un tercer modo de operación denominado como luz baja (toda la matriz encendida en luz baja) generó sombreado parcial sobre el panel solar de modo que se dio la formación de máximos locales en la curva V/P. Cada prueba se realizó cinco veces para obtener la desviación estándar y la incertidumbre tipo A del punto de máxima potencia en cada modo de operación, en promedio, la incertidumbre obtenida para cualquier modo de operación es menor al 3.5%.

Palabras clave: Simulador solar, irradiancia, panel solar, energía renovable, desviación estándar, incertidumbre tipo A.

Abstract

This project represents a complement for MPPT algorithms research and testing. The premise of this work is to design a chamber that is able to provide a constant irradiance for testing solar panels. The project was developed for the Laboratory of Electronic Systems for Sustainability (SESLab); the focus of this laboratory is the utilization of electronic systems for the generation, process and efficient use of electric energy harvested from renewable and low environmental impact sources. Currently this laboratory does not have a solar simulator because this technology is too expensive.

The project was divided into two large stages: the first stage was the design and the implementation of the solar simulator, the second stage consisted in the design of a test system that allowed defining the solar simulator's principal characteristics. To design the chamber fire and high temperature resistant materials were used such as plyrock sheets and a galvanized iron frame. To generate the irradiance a twelve H4 100 W halogen bulb matrix was implemented, three 600 W power supply units feed this matrix. To control the solar simulator an Arduino Mega 2560, this module allows to configure the operation mode of the simulator making the unit fully programmable.

A KC65T 65 W solar panel was used to test the simulator and obtain the I/V and P/V characteristics of the solar panel inside the simulator. Obtained results are beyond expectation, the simulator managed to obtain a maximum irradiance of $342.9001 \pm 0.17\%$ W/m^2 in high beam mode (whole matrix in high beam) and a minimum irradiance of $160.0013 \pm 0.89\%$ W/m^2 in high beam mode but without a column of halogens on. In addition, a third operation mode named low beam mode (whole matrix in low beam) generated partial shading over the panel thus causing maximum power local maxima on the P/V curve. Every test was conducted five times to obtain the standard deviation and type A uncertainty for the maximum power point, the obtained uncertainty is less than 0.5% for every operation mode of the solar simulator.

Key words: solar simulator, irradiance, solar panel, renewable sources, standard deviation, type A uncertainty.

Dedicatoria

A mi familia que ha estado ahí siempre.

Agradecimientos

Al profesor Miguel Hernández por ofrecerme el proyecto y su ayuda en el desarrollo del mismo.

Al profesor Carlos Meza por permitir la realización del proyecto en el SESLab.

A Luis Diego Murillo por la ayuda ofrecida en el desarrollo del proyecto.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

Capítulo 1 Introducción y alcances del proyecto.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Alcances del proyecto.....	2
Capítulo 2 Marco teórico.....	4
2.1 Introducción al funcionamiento de un panel solar.....	4
2.2 Modelado y simulación del panel KC65T.....	8
2.3 Clasificación de los simuladores solares.....	12
2.4 Fuentes de iluminación artificial.....	13
2.5 Fuentes de poder (PSU).....	15
2.6 Breve introducción a los algoritmos MPPT.....	17
2.7 Obtención de la incertidumbre tipo A.....	18
Capítulo 3 Diseño del simulador solar.....	20
3.1 Diseño de la recámara.....	20
3.2 Construcción de la recámara.....	22
3.3 Diseño de la etapa eléctrica del simulador solar.....	27
3.3.1 Manejo del transiente de corriente de los halógenos.....	27
3.3.2 Diseño de la etapa de control de los halógenos.....	30
3.4 Programación del simulador solar.....	33
3.5 Modos básicos de operación del simulador solar.....	36
Capítulo 4 Diseño de la etapa de pruebas del simulador.....	38
4.1 El circuito de pruebas.....	38
4.2 El software: test bench for fotovoltaic panels.....	40
4.3 Manejo de los datos en MATLAB.....	42
Capítulo 5 Presentación de resultados experimentales.....	44
5.1 Resultados experimentales del transitorio de encendido de los halógenos.....	44
5.2 Prueba de temperatura de la recámara.....	45
5.3 Simulador solar con tapa frontal.....	45
5.3.1 Modo de luz alta con el panel a 0 cm de elevación.....	46
5.3.2 Modo de luz alta sin la fuente # 2, con el panel a 0 cm de elevación.....	51
5.3.3 Modo de luz alta, con el panel a 13.5 cm de elevación.....	56

5.3.4 Modo de luz alta sin la fuente # 2, con el panel a 13.5 cm de elevación.....	59
5.3.5 Modo de luz alta, con el panel a 21.5 cm de elevación	62
5.3.6 Modo de luz alta sin la fuente # 2, con el panel a 21.5 cm de elevación.....	65
5.3.7 Modo de luz baja, con el panel a 0 cm de elevación	68
5.3.8 Modo de luz baja, con el panel a 13.5 cm de elevación	71
5.3.9 Modo de luz baja, con el panel a 21.5 cm de elevación	73
5.4 Resumen de resultados: simulador con tapa.....	75
5.5 Simulador solar sin tapa frontal.....	77
5.5.1 Modo de luz alta con el panel a 0 cm de elevación	77
5.5.2 Modo de luz alta sin la fuente # 2, con el panel a 0 cm de elevación.....	79
5.5.3 Modo de luz alta, con el panel a 13.5 cm de elevación	81
5.5.4 Modo de luz alta sin la fuente # 2, con el panel a 13.5 cm de elevación.....	83
5.5.5 Modo de luz alta, con el panel a 21.5 cm de elevación	85
5.5.6 Modo de luz alta sin la fuente # 2, con el panel a 21.5 cm de elevación.....	86
5.5.7 Modo de luz baja, con el panel a 0 cm de elevación	88
5.5.8 Modo de luz baja, con el panel a 13.5 cm de elevación	90
5.5.9 Modo de luz baja, con el panel a 21.5 cm de elevación	91
5.6 Resumen de resultados simulador sellado.....	93
Capítulo 6 Análisis de resultados y ejemplo de aplicación del simulador solar	95
6.1 Termistores NTC para el tratamiento de la corriente del transiente.....	95
6.2 Pruebas de resistencia a la temperatura de la recámara.....	96
6.3 Estabilidad de la irradiancia en el simulador.....	97
6.4 Análisis de la uniformidad de la irradiancia y la alimentación CD de los halógenos	97
6.6 Comparación entre el modelo de LTSpice y los datos experimentales	99
6.7 Diferencia entre la operar el simulador con tapa frontal o sin tapa frontal	100
6.8 Ejemplo de uso del simulador: prueba de algoritmos MPPT	100
Capítulo 7 Conclusiones.....	103
Capítulo 8 Recomendaciones	104
9 Bibliografía.....	107
10 Apéndices	109
10.1 Apéndice A1: Ejemplo de programación, prueba de algoritmos MPPT	109
10.2 Apéndice A2: Ejemplo de programación, Luz alta durante 1 minuto	112

10.3 Apéndice A3: Ejemplo de programación, Luz baja durante 1 minuto	115
10.4 Apéndice A4: Circuito esquemático del simulador solar en EAGLE	117
10.5 Apéndice A5: Manual de usuario del simulador solar	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Modelo electrónico de un elemento fotovoltaico.....	4
Figura 2.2 Curva V/I (Azul) y curva V/P (morado) para un elemento fotovoltaico genérico [8].	5
Figura 2.3 Punto de operación de un módulo fotovoltaico con distintas cargas resistivas. ...	6
Figura 2.4 Curvas V/I (Azul) y curvas V/P (Rojo) para 3 valores distintos de irradiancia....	7
Figura 2.5 Parámetros proporcionados en la hoja de datos del panel KC65T [10].....	8
Figura 2.6 Modelo del panel KC65T.....	10
Figura 2.7 Curvas V/I para el modelo del panel KC65T.....	10
Figura 2.8 Curvas V/P para el modelo del panel KC65T.....	11
Figura 2.9 Comparación entre las curvas V/I del fabricante y las obtenidas en el modelo de LTSpice.....	11
Figura 2.10 Al aumentar la no uniformidad de la irradiancia I_{sc} disminuye y el punto de máxima potencia disminuye.	12
Figura 3.1 Prototipo de simulador solar en 3D.....	20
Figura 3.2 Vista lateral del simulador.	21
Figura 3.3 Vista superior del simulador (Matriz de halógenos observable).....	21
Figura 3.4 Detalle del reflector de luz.	21
Figura 3.5 Reflector estándar de un vehículo con halógenos H4[14].	22
Figura 3.6 Armazón de hierro galvanizado empleando canal para gypsum.....	22
Figura 3.7 Láminas de plyrock acopladas a la armazón.....	23
Figura 3.8 Pared interna del simulador.....	23
Figura 3.9 Estructura unida, en la foto la estructura se encuentra a 180° respecto a su eje central.....	24
Figura 3.10 Detalle de la sub-recámara de las PSU, en la foto la estructura se encuentra a 180° respecto a su eje central.....	24
Figura 3.11 Detalle del reflector de luz rediseñado.....	25
Figura 3.12 Reflector en construcción, se usa lámina de plyrock como base de los angulares.	25
Figura 3.13 Reflector en construcción, terminado al 90%.	26
Figura 3.14 Reflector en construcción desde otro ángulo, terminado al 90%.....	26
Figura 3.15 Recámara finalizada con tapa frontal puesta.....	27
Figura 3.16 Diagrama de un halógeno H4 [22].....	28
Figura 3.17 Circuito equivalente durante el transiente y en estado estable.....	29
Figura 3.18 La matriz de halógenos del simulador, ubicada en el techo del mismo.	30

Figura 3.19 Control individual de un halógeno.....	31
Figura 3.20 Placa de 16 relés de 5 V [24].	31
Figura 3.21 Control de las fuentes de poder.....	33
Figura 3.22 Diagrama de flujos de un programa de control del simulador.	35
Figura 3.23 Modo de operación de luz alta.	36
Figura 3.24 Modo de operación de luz alta sin la fuente # 2.....	37
Figura 3.25 Modo de operación de luz baja.	37
Figura 4.1 Circuito implementado para la etapa de pruebas del simulador.	38
Figura 4.2 (a) Simulador solar sin tapa frontal, (b) simulador solar con tapa frontal.	39
Figura 4.3 GUI del programa.	41
Figura 4.4 Ejemplo de un archivo generado por el software en una prueba real.	42
Figura 4.5 Ejemplo real del importe de datos a MATLAB.....	43
Figura 5.1 (a) Corriente del halógeno sin termistor (b) Corriente del halógeno con termistor.	44
Figura 5.2 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador, halógenos apagados. ..	45
Figura 5.3 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 0 cm de elevación.....	46
Figura 5.4 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 0 cm de elevación.....	47
Figura 5.5 Curvas V/I en modo de luz alta, con panel a 0 cm de elevación.....	48
Figura 5.6 Curvas V/P en modo de luz alta, con panel a 0 cm de elevación.....	49
Figura 5.7 Curvas V/P y V/I a una irradiancia simulada de 343 W/m ²	50
Figura 5.8 Curvas V/I , modelo vs prueba experimental, G = 343 W/m ²	50
Figura 5.9 Curvas V/P , modelo vs prueba experimental, G = 343 W/m ²	51
Figura 5.10 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 0 cm de elevación.	52
Figura 5.11 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 0 cm de elevación.	53
Figura 5.12 Curvas V/I en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 0 cm de elevación.....	53
Figura 5.13 Curvas V/P en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 0 cm de elevación.....	54
Figura 5.14 Curvas V/I , modelo vs prueba experimental, G = 226 W/m ²	55
Figura 5.15 Curvas V/P , modelo vs prueba experimental, G = 226 W/m ²	55
Figura 5.16 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 13.5 cm de elevación.....	56
Figura 5.17 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 13.5 cm de elevación.....	57
Figura 5.18 Curvas V/I en modo de luz alta , con panel a 13.5 cm de elevación.....	57
Figura 5.19 Curvas V/P en modo de luz alta, con panel a 13.5cm de elevación.....	58
Figura 5.20 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 13.5 cm de elevación.	59

Figura 5.21 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 13.5 cm de elevación.	60
Figura 5.22 Curvas V/I en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 13.5 cm de elevación.	60
Figura 5.23 Curvas V/P en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 13.5cm de elevación.	61
Figura 5.24 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 21.5 cm de elevación.	62
Figura 5.25 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 21.5 cm de elevación.	63
Figura 5.26 Curvas V/I en modo de luz alta, con panel a 21.5 cm de elevación.	63
Figura 5.27 Curvas V/P en modo de luz alta, con panel a 21.5 cm de elevación.	64
Figura 5.28 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 21.5 cm de elevación.	65
Figura 5.29 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 21.5 cm de elevación.	66
Figura 5.30 Curvas V/I en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 21.5 cm de elevación.	66
Figura 5.31 Curvas V/P en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 21.5 cm de elevación.	67
Figura 5.32 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 0 cm de elevación.	68
Figura 5.33 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 0 cm de elevación.	69
Figura 5.34 Curvas V/I en modo de luz baja con panel a 0 cm de elevación.	69
Figura 5.35 Curvas V/P en modo de luz baja, con panel a 0 cm de elevación.	70
Figura 5.36 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 13.5 cm de elevación.	71
Figura 5.37 Curvas V/I en modo de luz baja con panel a 13.5 cm de elevación.	71
Figura 5.38 Curvas V/P en modo de luz baja, con panel a 13.5 cm de elevación.	72
Figura 5.39 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 21.5 cm de elevación.	73
Figura 5.40 Curvas V/I en modo de luz baja con panel a 21.5 cm de elevación.	73
Figura 5.41 Curvas V/P en modo de luz baja, con panel a 21.5 cm de elevación.	74
Figura 5.42 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador, halógenos apagados. Sin tapa frontal.	77
Figura 5.43 Irradiancia en función del tiempo (izquierda), temperatura en función del tiempo (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.	78
Figura 5.44 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.	78

Figura 5.45 Irradiancia en función del tiempo (izquierda), temperatura en función del tiempo (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta sin fuente 2, panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.	79
Figura 5.46 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.	80
Figura 5.47 Irradiancia en función del tiempo (izquierda), temperatura en función del tiempo (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	81
Figura 5.48 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	82
Figura 5.49 Irradiancia en función del tiempo (izquierda), temperatura en función del tiempo (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta sin fuente 2, panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	83
Figura 5.50 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	84
Figura 5.51 Irradiancia en función del tiempo (izquierda), temperatura en función del tiempo (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	85
Figura 5.52 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	86
Figura 5.53 Irradiancia en función del tiempo (izquierda), temperatura en función del tiempo (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta sin fuente 2, panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	87
Figura 5.54 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	87
Figura 5.55 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.	88
Figura 5.56 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz baja , panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.	89
Figura 5.57 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	90
Figura 5.58 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	91
Figura 5.59 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	92
Figura 5.60 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	92
Figura 6.1 Corriente sin termistor (rojo) vs corriente con termistor (azul) en función del tiempo.	95
Figura 6.2 Prueba de irradiancia en función del tiempo.	96
Figura 6.3 Comparación entre los modos de luz alta y luz alta sin la fuente #2, simulador con tapa frontal.	97

Figura 6.4 Comparación entre los modos de luz alta y luz alta sin la fuente #2, simulador sin tapa frontal.	98
Figura 6.5 Comparación del modo de luz baja entre el simulador con tapa y sin tapa frontal.	98
Figura 6.6 Ejemplo de una secuencia de prueba de algoritmos MPPT (curvas V/I).....	101
Figura 6.7 Ejemplo de una secuencia de prueba de algoritmos MPPT (curvas V/P).....	101
Figura 8.1 Precio promedio vs potencia de una PSU [29]	104
Figura 8.2 Arquitectura con resistor fijo para eliminar la corriente transiente.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros obtenidos para el modelado del panel KC65T.	9
Tabla 2.2 Índices de calidad para calificar un simulador solar [16].....	13
Tabla 2.3 Distribución t-Student para determinar incertidumbre tipo A en base al número de observaciones, incompleta [25,26,27,28].	19
Tabla 3.1 Conexión de los halógenos a las PSU	32
Tabla 3.2 Variables involucradas en el proceso de programación del simulador solar.....	34
Tabla 4.1 Pruebas realizadas con el simulador.....	40
Tabla 5.1 Resultados de la corrección del transitorio.....	44
Tabla 5.2 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta, con panel a 0 cm de elevación.	48
Tabla 5.3 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 0 cm de elevación.	54
Tabla 5.4 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta, con panel a 13.5 cm de elevación.	58
Tabla 5.5 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 13.5 cm de elevación.	61
Tabla 6.6 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta, con panel a 21.5 cm de elevación.	64
Tabla 5.7 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 21.5 cm de elevación.....	67
Tabla 5.8 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz baja, con panel a 0 cm de elevación.	70
Tabla 5.9 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz baja, con panel a 13.5 cm de elevación.	72
Tabla 5.10 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz baja, con panel a 21.5 cm de elevación.	74
Tabla 5.11 Resumen de resultados del simulador con la tapa frontal.	76
Tabla 5.12 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta, con panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.....	79
Tabla 5.13 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.....	80

Tabla 5.14 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta, con panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	82
Tabla 5.15 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.....	84
Tabla 5.16 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta, con panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	86
Tabla 5.17 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.....	88
Tabla 5.18 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz baja, con panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.	89
Tabla 5.19 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz baja, con panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	91
Tabla 5.20 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz baja, con panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.	93
Tabla 5.21 Resumen de resultados del simulador sin la tapa frontal.	94

Capítulo 1 Introducción y alcances del proyecto

1.1 Introducción

El aprovechamiento de las energías renovables es un tema de alto interés público. Costa Rica en este tema ha sido, a nivel mundial, ejemplo a seguir en cuanto a la generación de energía proveniente de fuentes renovables, logrando alcanzar una producción de energía a partir de fuentes renovables que representó el 98% de la energía consumida en el 2016 [1]. Las fuentes de energía renovable más utilizadas son: energía hidráulica, energía eólica, energía geotérmica y la energía solar.

El proyecto se centra en el tema de la energía solar, la premisa del mismo fue el desarrollo de un dispositivo que capaz de proveer una irradiancia constante para poder efectuar pruebas en módulos fotovoltaicos. La principal aplicación del simulador es la prueba de algoritmos de seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT) de un panel solar. El proyecto se desarrolla para el Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESLab).

La idea de la construcción del simulador nace de un proyecto complementario enfocado en la implementación y prueba de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). En ese proyecto se plantea poner a prueba varios algoritmos en igualdad de condiciones y comparar los resultados. Para el desarrollo de ese proyecto surgió la interrogante de donde probar los algoritmos. De hacerlo a la intemperie esto implicaría que las pruebas efectuadas podrían darse en distintas condiciones ya que se depende totalmente del clima en el momento de efectuarlas y no hay manera de controlar esto. Por otro lado, efectuar las pruebas en un laboratorio y baja igualdad de condiciones implicaría la obtención de resultados más precisos.

Dada esa interrogante se sugiere la construcción de una recámara que provea luz artificial para simular el sol, de esta manera, las pruebas realizadas en esta recamara tendrán siempre las mismas condiciones de irradiancia y temperatura, por lo que al probar por ejemplo algoritmos MPPT se cumplirá la premisa de la igualdad de condiciones entre las pruebas. La recámara a diseñar debía cumplir las siguientes características:

- Proveer un nivel de irradiancia de al menos 200 W/m^2 (nivel de irradiancia del estándar LIC).
- Tener al menos dos modos de operación, uno de máxima irradiancia y otro de mínima irradiancia, tal que se puedan obtener dos puntos de máxima potencia distintos.
- El dispositivo debe estar construido con materiales resistentes a altas temperaturas.
- Los modos de operación deben ser programables por el usuario.
- Se debe proveer el simulador con un manual de operación (manual de usuario)

El enfoque de la solución se dividió en 2 grandes etapas: la primera fue la etapa de diseño y construcción del simulador, la segunda supuso el diseño de un sistema de pruebas para determinar las principales características del simulador solar. Para la etapa de diseño se aplicaron conceptos de electrónica de potencia, mecánica básica y programación. La etapa de pruebas se basó en conocimientos de procesamiento electrónico de potencia, utilización de herramientas de entorno de desarrollo integrado para el procesamiento de los datos y conceptos de estadística básica.

La etapa de diseño del simulador contempló la construcción de la recámara, el diseño de la parte eléctrica y el desarrollo del sistema de control del simulador. La recámara se construyó de manera tal que se logró aislar el panel del ambiente. Otra característica de la recámara es que debió soportar la temperatura generada por una matriz de 12 halógenos de 100 W, en otras palabras, unos 1200 W de energía de la cual la mayoría se convierte en calor. Cada halógeno tiene dos modos de iluminación, luz alta y luz baja, estos son los halógenos que se encuentran en gran cantidad de vehículos.

En cuanto al diseño de la parte eléctrica, se debió considerar que el encendido de un halógeno implica el manejo de una alta corriente transitoria la cual tuvo que corregirse. Diversos estudios demuestran que la resistencia inicial de un halógeno de tungsteno a temperatura ambiente es hasta 10 veces menor a su resistencia en estado estable [2,3,4,5,6,7].

El diseño de la etapa de pruebas proporcionó información suficiente para conocer las características nominales que presentó el simulador solar, tales como, su máxima / mínima irradiancia, el tiempo en que alcanza la máxima irradiancia, la tasa de cambio de la temperatura del panel respecto al tiempo dentro del simulador, así como que tan bien puede sellar la irradiancia dentro del mismo. Además de estas características, fue de gran interés para el proyecto el conocer de manera exhaustiva los puntos de máxima potencia que se pueden lograr dentro del simulador con un panel KC65T (panel para el cual se diseñó el simulador) en cualquiera de sus modos de operación básicos. Para lograr esto se propuso un sistema de pruebas redundantes para obtener la incertidumbre tipo A (método estadístico propuesto por el comité conjunto de guías en metrología para determinar la incertidumbre asociada a pruebas efectuadas en igualdad de condiciones), el promedio y la desviación estándar del punto de máxima potencia al operar el simulador en cualquiera de sus tres modos de operación básica.

1.2 Alcances del proyecto

El principal objetivo del proyecto fue, desarrollar para el SESLab de la Escuela de Ingeniería en Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, un dispositivo programable capaz de simular la irradiancia solar empleando iluminación artificial. Para lograrlo se construyó una recámara con alta resistencia a las altas temperaturas para albergar los halógenos empleados para proveer la iluminación.

Los halógenos fueron alimentados con energía en corriente continua empleando fuentes de poder para computadora, para lograr esto, una etapa de acople fue diseñada para lograr la conexión a las fuentes. Un sistema de control digital programable por el usuario permite controlar el modo de iluminación del simulador.

Para obtener las características más importantes del simulador solar (tales como: los niveles de irradiancia en los distintos modos de operación, el tiempo de estabilización de la irradiancia y la tasa de cambio de la temperatura respecto al tiempo dentro del simulador) se realizaron un total de 110 pruebas.

Capítulo 2 Marco teórico

Este capítulo pretende introducir los conocimientos requeridos para la construcción de un simulador solar desde cero. Se abarcan conceptos de manejo de electrónica de potencia, control digital, estadística y procesamiento electrónico de potencia.

2.1 Introducción al funcionamiento de un panel solar

Desde el punto de vista electrónico, un elemento fotovoltaico se puede modelar como una fuente de corriente dependiente. La corriente entregada por esta fuente es función de la irradiancia solar G (Energía solar incidente por unidad de tiempo [W/m^2]) y de la temperatura de operación. En la figura 2.1 se muestra el modelo matemático completo de un elemento fotovoltaico, se aprecia la fuente de corriente dependiente en paralelo a un diodo (debido a la construcción con materiales p-n) y una resistencia de fuga (R_{sh}), finalmente una resistencia en serie (R_s) que representa la resistencia de los contactos metálicos y las capas de material semiconductor.

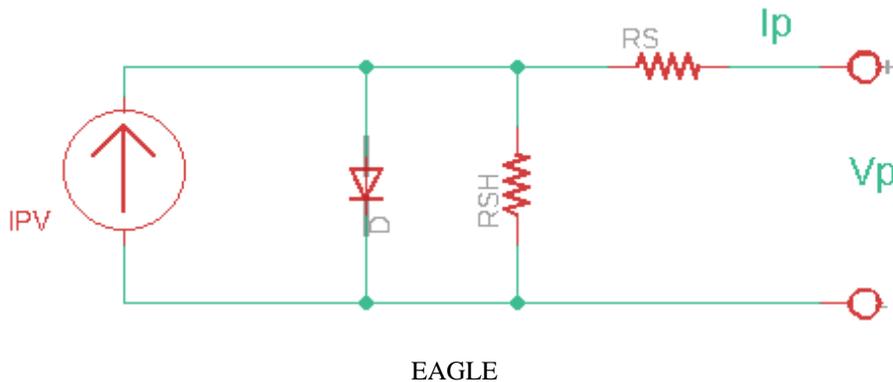


Figura 2.1 Modelo electrónico de un elemento fotovoltaico.

Aplicado leyes básicas de circuitos se obtiene la expresión matemática que representa al modelo de la figura 2.1, esta expresión se establece en la ecuación 2.1. De esta ecuación se obtiene la curva característica (Curva V/I) de un dispositivo fotovoltaico. Esta curva representa uno de los principales medios para describir el comportamiento de estos dispositivos [8].

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{akT}\right) - 1 \right] - \frac{(V+IR_s)}{R_{sh}}, I_{pv} = f(G, T) \quad (2.1)$$

La figura 2.2 representa una curva característica de un módulo genérico probado bajo condiciones de prueba STC (del inglés Standard Test Conditions) que establecen una irradiancia (G) de 1000 W/m^2 y una temperatura de celda de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. En la figura 2.2 no solo se muestra la curva V/I (azul), también se muestra la curva de tensión vs potencia (V/P). Los puntos más relevantes para entender el funcionamiento de un dispositivo fotovoltaico se encuentran marcados en la figura 2.2:

- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): Máxima corriente que entrega el dispositivo, se obtiene al aplicar un cortocircuito en las terminales.
- Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): Máximo voltaje que entrega el dispositivo, se obtiene con las terminales en abierto (sin carga alguna).
- Punto de máxima potencia (P_{mpp}) también conocido como MPP por sus siglas en inglés: Máxima potencia que puede entregar el dispositivo.
- Voltaje de máxima potencia (V_{mpp}) y corriente de máxima potencia (I_{mpp}): Punto de operación en el que se obtiene la máxima potencia de salida.

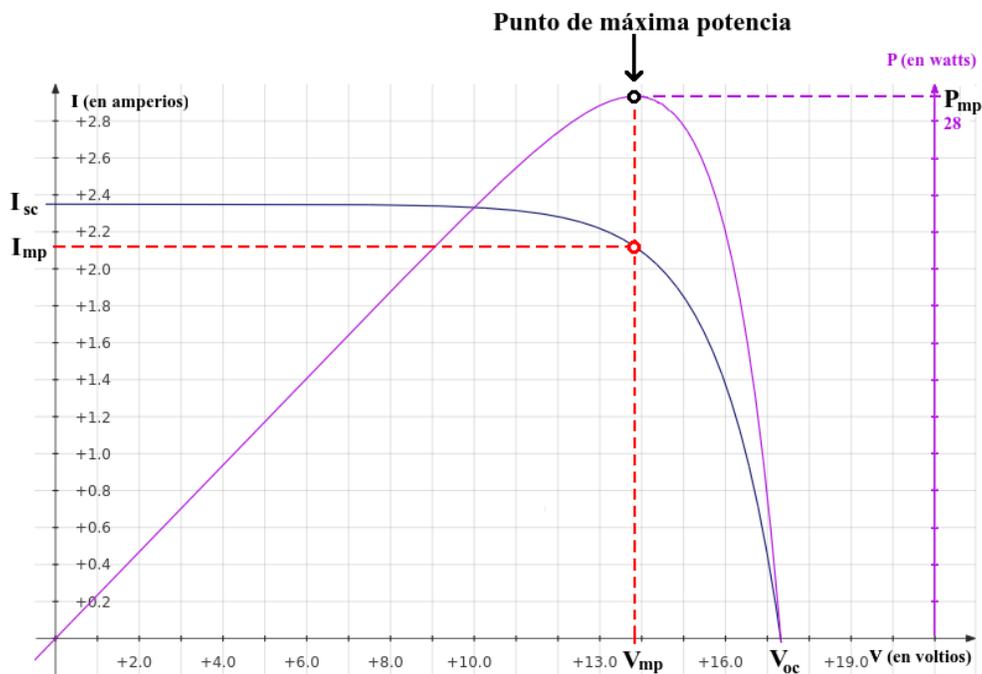
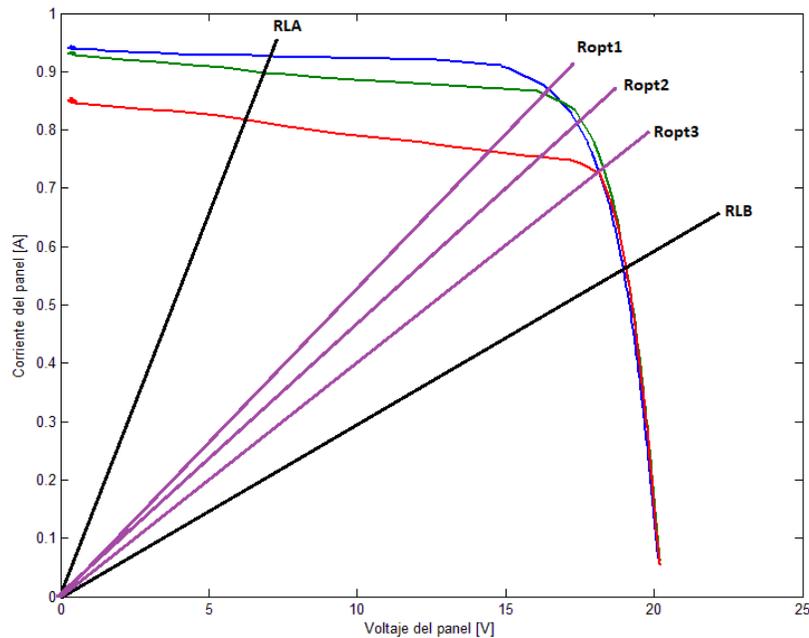


Figura 2.2 Curva V/I (Azul) y curva V/P (morado) para un elemento fotovoltaico genérico [8].

En cuanto a las condiciones de prueba, estas son las que se logran empleando simuladores solares especiales, existen varios tipos de condiciones de prueba estándar:

- Condiciones STC: $G = 1000 \text{ W/m}^2$, temperatura celda: $25 \text{ }^\circ\text{C}$, masa de aire: AM 1.5
- Condiciones PTC: $G = 1000 \text{ W/m}^2$, temperatura ambiental: $20 \text{ }^\circ\text{C}$, masa de aire: AM 1.5, panel a 10 m sobre el nivel del suelo, velocidad del viento: 1 m/s
- Condiciones NOCT: $G = 800 \text{ W/m}^2$, temperatura ambiental: $20 \text{ }^\circ\text{C}$, panel a 45 ° de inclinación, velocidad del viento: 1 m/s
- Condiciones LIC: $G = 200 \text{ W/m}^2$, temperatura celda: $25 \text{ }^\circ\text{C}$, masa de aire: AM 1.5
- Condiciones HTC: 1000 W/m^2 , temperatura celda: $55 \text{ }^\circ\text{C}$, masa de aire: AM 1.5
- Condiciones LTC: 500 W/m^2 , temperatura celda: $15 \text{ }^\circ\text{C}$, masa de aire: AM 1.5

Si las condiciones de prueba son constantes, el punto de operación de un panel fotovoltaico en la curva V/I (y también en la curva V/P) va a depender únicamente de la carga conectada al mismo como se muestra en la figura 2.3, si la impedancia de la carga disminuye (R_{LA} en la figura 2.3) el punto de operación estará cercano a I_{sc} , y la potencia que suministra el módulo cerca de ese punto de operación es baja y puede no satisfacer los requerimientos de potencia de la carga. Ahora, un aumento en la impedancia de la carga (R_{LB}) tendrá un resultado similar solo que el punto de operación será cercano a V_{oc} [9].



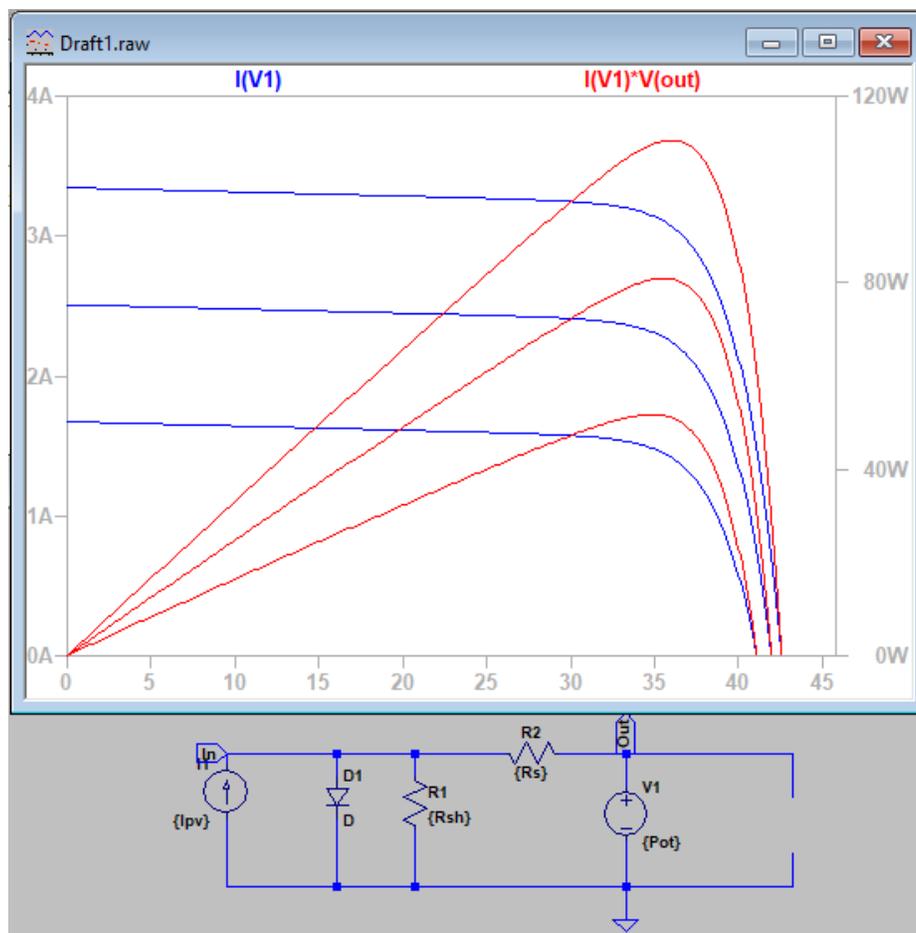
MATLAB

Figura 2.3 Punto de operación de un módulo fotovoltaico con distintas cargas resistivas.

En el punto MPP se da el teorema de la máxima transferencia de potencia, esto ocurre cuando la impedancia de la carga es R_{opt} , la magnitud de esta impedancia está dada por la ecuación 2.2.

$$R_{opt} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (2.2)$$

Entonces, para poder obtener la máxima transferencia de potencia del módulo fotovoltaico hacia la carga, se debe forzar a que la carga sea vista por el panel como R_{opt} . Esta resistencia optima varía en función de la irradiancia y la temperatura. En la figura 2.3 se presentan 3 curvas V/I con 3 distintos valores de irradiancia. Se puede observar que R_{opt} aumenta al disminuir la irradiancia. Ahora, como se puede observar en la figura 2.4, al haber un cambio en las condiciones de irradiancia tanto las curvas V/I como las curvas V/P cambian (a mayor irradiancia mayor potencia). Estas curvas también se ven afectadas por las temperaturas a las que pueda operar el panel fotovoltaico.



LTSpice

Figura 2.4 Curvas V/I (Azul) y curvas V/P (Rojo) para 3 valores distintos de irradiancia.

2.2 Modelado y simulación del panel KC65T

Para poder modelar un circuito como el de la figura 2.4, se requieren los parámetros contemplados en la ecuación 2.1, sin embargo, es común que los fabricantes no proporcionen estos parámetros. Por ejemplo, para el panel solar KC65T su hoja de datos proporciona solo los parámetros de la figura 2.5.

■ Specifications

■ Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (P _{max})	65W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	17.4V
Maximum Power Current (I _{mpp})	3.75A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	21.7V
Short Circuit Current (I _{sc})	3.99A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of V _{oc}	−8.21×10 ^{−2} V/°C
Temperature Coefficient of I _{sc}	1.59×10 ^{−3} A/°C

*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperature 25°C

Figura 2.5 Parámetros proporcionados en la hoja de datos del panel KC65T [10].

El procedimiento para obtener los otros parámetros del circuito equivalente propuesto por Cubas et al [11] se detalla a continuación:

- 1) Estimar el valor de α , también se puede emplear $\alpha = 1.1$ para celdas de silicio, 1.2 para celdas mono cristalinas o 1.3 para poli cristalinas. Nota: α cambia con la irradiancia y la temperatura por lo que considerarlo constante induce un poco de error en el modelo.
- 2) Calcular V_t empleando la ecuación 2.3.
- 3) Calcular R_s con la ecuación 2.4.
- 4) Calcular R_{sh} con la ecuación 2.6.
- 5) Calcular I_0 con la ecuación 2.7.
- 6) Calcular I_{pv} con la ecuación 2.8.

Las ecuaciones para calcular los parámetros se presentan a continuación:

$$V_T = n \frac{kT}{q} \quad (2.3)$$

donde n = número de celdas en serie del panel, k : cte de Boltzmann y q es la carga de un electrón.

$$R_S = A \left(W_{-1}(B \exp(C)) - (D + C) \right) \quad (2.4)$$

donde W_{-1} es la rama negativa de la función W de Lambert y:

$$A = \frac{\alpha V_T}{I_{MPP}}$$

$$B = \frac{V_{MPP}(2I_{MPP} - I_{SC})}{V_{MPP}I_{SC} + V_{OC}(I_{MPP} - I_{SC})}$$

$$C = \frac{(V_{MPP}I_{SC} - V_{OC}I_{MPP})}{V_{MPP}I_{SC} + V_{OC}(I_{MPP} - I_{SC})} - \frac{(2V_{MPP} - V_{OC})}{\alpha V_T} \quad (2.5)$$

$$D = \frac{(V_{MPP} - V_{OC})}{\alpha V_T}$$

$$R_{sh} = \frac{(V_{MPP} - I_{MPP}R_s)(V_{MPP} - R_s(I_{SC} - I_{MPP}) - \alpha V_T)}{(V_{MPP} - I_{MPP}R_s)(I_{SC} - I_{MPP}) - \alpha V_T I_{MPP}} \quad (2.6)$$

$$I_0 = \frac{I_{SC}(R_{sh} + R_s) - V_{OC}}{R_{sh} \exp(V_{OC}/\alpha V_T)} \quad (2.7)$$

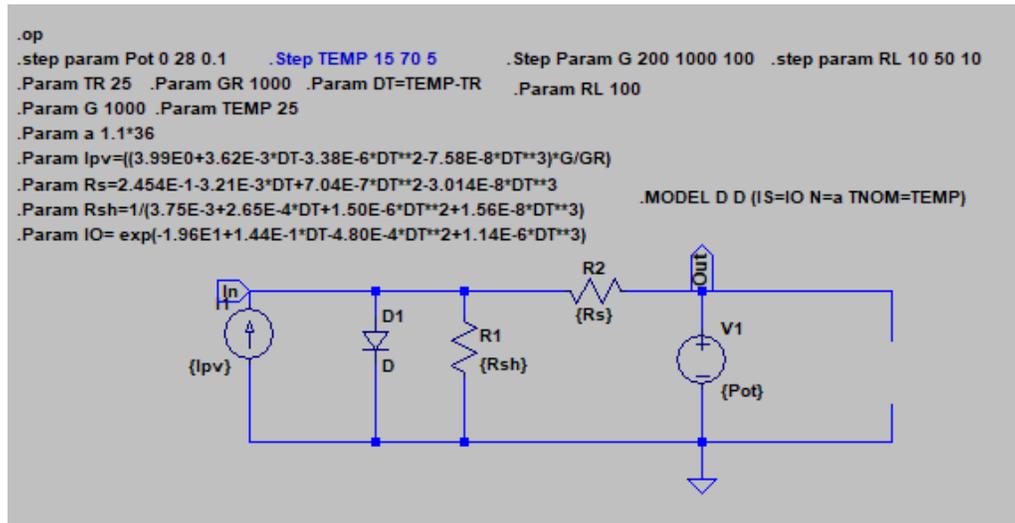
$$I_{PV} = \frac{I_{SC}(R_{sh} + R_s)}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

Como se puede observar, todas las ecuaciones se encuentran en función de parámetros conocidos (o dados por el fabricante, como lo son I_{sc} , V_{oc} , I_{mpp} , V_{mpp}). Al aplicar las ecuaciones se pueden obtener los valores de R_{sh} , R_s , I_0 e I_{pv} para modelar cualquier panel, para el panel KC65T ya existe un modelo dado por Schäfer et al [12]. Los valores se resumen en la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Parámetros obtenidos para el modelado del panel KC65T.

Parámetro (Unidad)	Magnitud
R_{sh} (Ω)	266.56
R_s (Ω)	0.2454
I_{pv} (A)	3.99

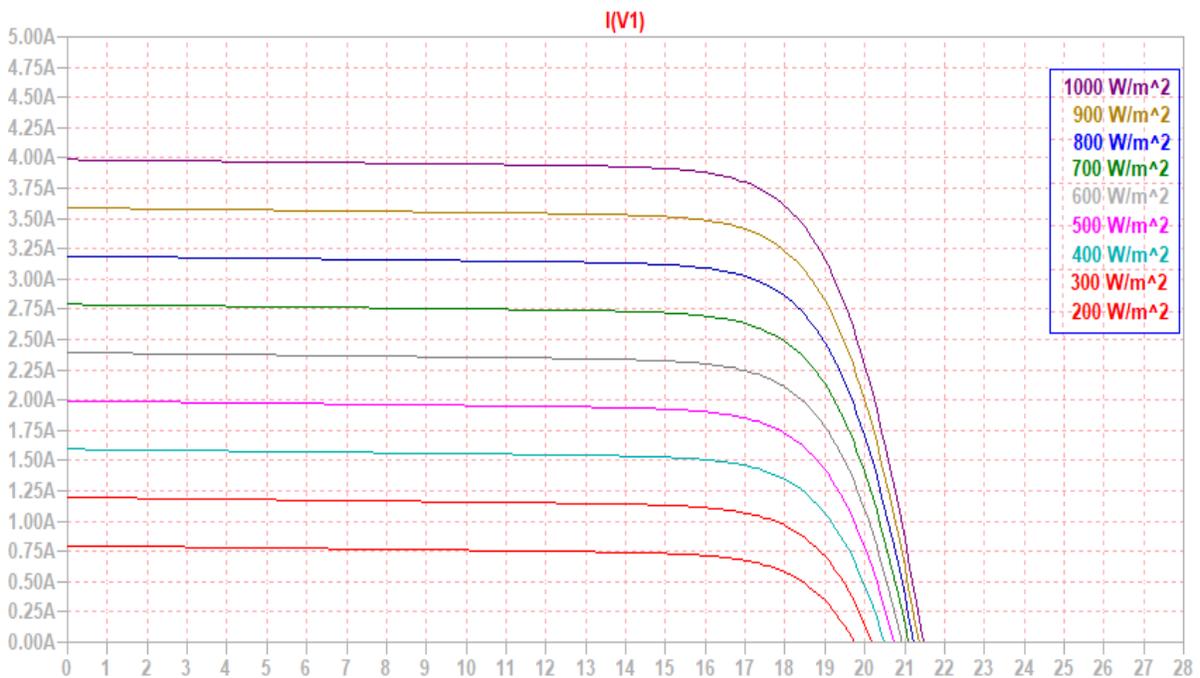
Así, empleando los valores de la tabla 2.1, se procede a desarrollar el modelo del panel KC65T en el entorno de LTSpice, la figura 2.6 muestra el modelo del panel.



LTSpice

Figura 2.6 Modelo del panel KC65T.

Para comprobar la validez del modelo se realiza un barrido de irradiancia desde 200 W/m² hasta 1000 W/m² el cual se contrasta en la figura 2.7 para las curvas V/I equivalentes y en la figura 2.8 para las curvas V/P resultantes.



LTSpice

Figura 2.7 Curvas V/I para el modelo del panel KC65T.

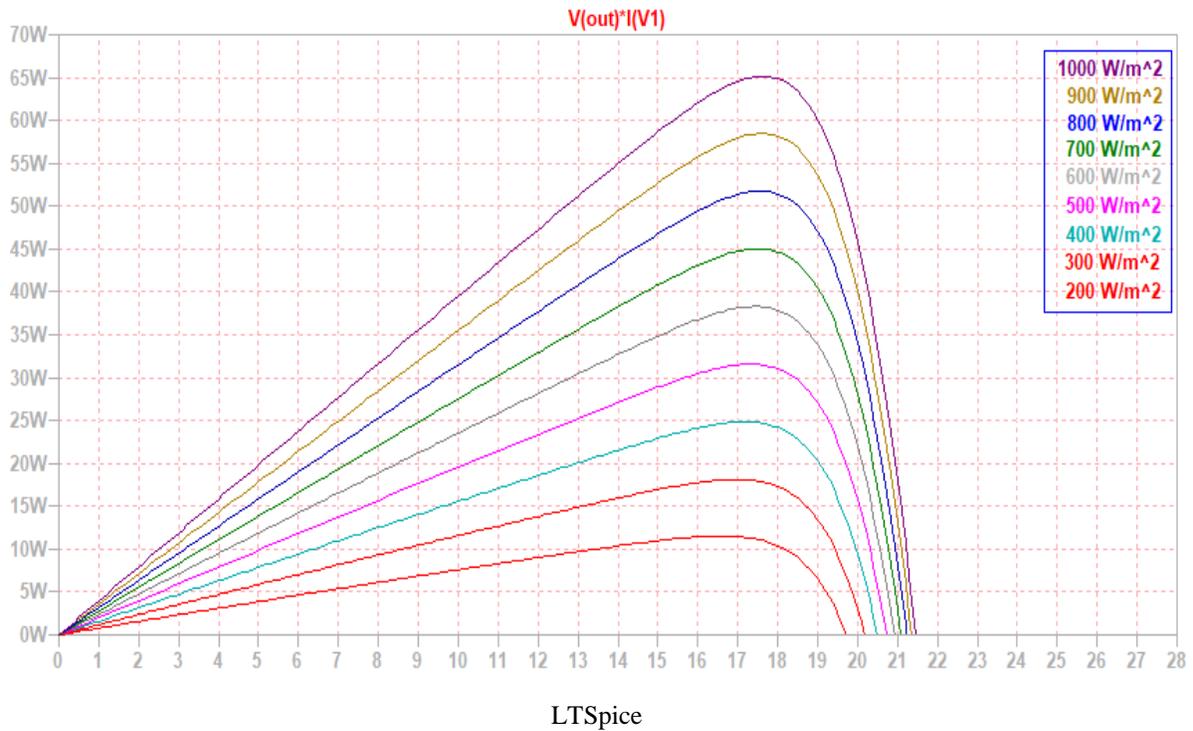
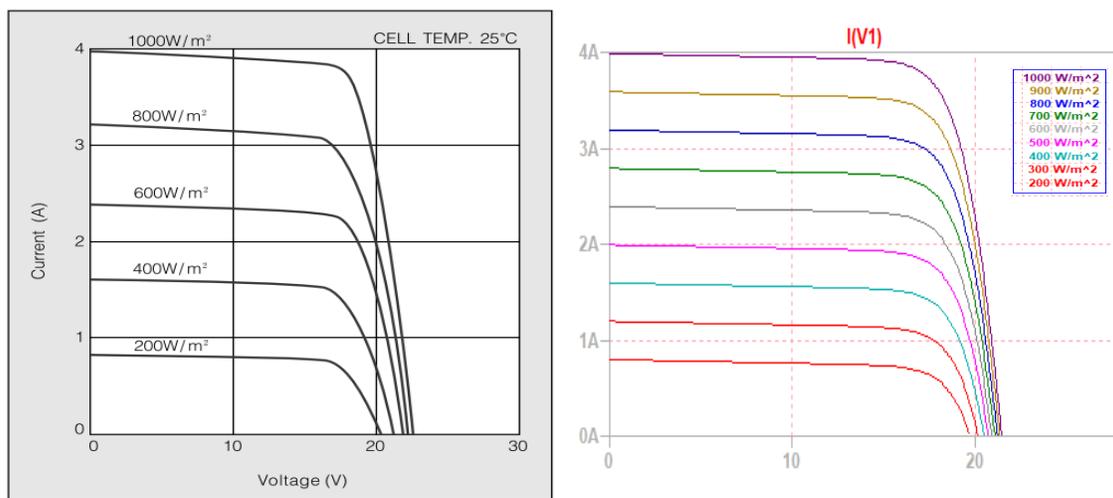


Figura 2.8 Curvas V/P para el modelo del panel KC65T.

La finalidad de este modelo es la obtención de mejor información respecto al panel que la dada por el fabricante. Como se aprecia en a figura 2.8, a 1000 W/m^2 se obtiene un punto de máxima potencia de 65 W a 17.4 V , en la figura 2.7 puede observarse claramente que en ese mismo punto la corriente es de 3.75 A , por lo que el comportamiento del modelo corresponde a los datos proporcionados por el fabricante. Finalmente, a modo de comparación, la figura 2.9 presenta las curvas V/I proporcionadas por el fabricante junto a las curvas V/I obtenidas con el modelo.



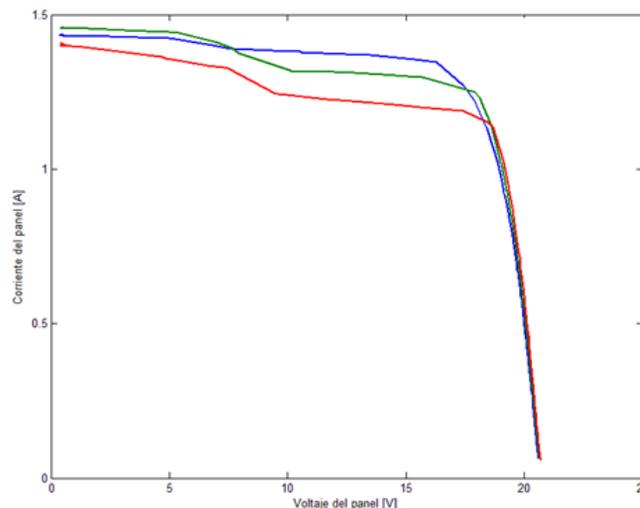
Hoja de datos y LTSpice

Figura 2.9 Comparación entre las curvas V/I del fabricante y las obtenidas en el modelo de LTSpice.

2.3 Clasificación de los simuladores solares

Existe un documento técnico de la comisión europea JRC que establece las guías para la medición de potencia en sistemas fotovoltaicos en la industria [16]. En dicho documento técnico se discuten las características que debe tener un simulador solar, estas se resumen a continuación:

- Irradiancia: debe proveer 1000 W/m^2 , sin embargo, no es la meta de este prototipo
- Duración del pulso: debido al alto nivel de irradiancia, los pulsos deben tener una duración mínima, de entre 2 ms a 10 ms, sin embargo, hay simuladores de pulso largo (esto aplica para el simulador a diseñar).
- Irradiancia espectral de la lámpara: la respuesta de la celda solar depende de la longitud de onda de la luz artificial, en simuladores solares la lámpara mas empleada es de arco de xenón [16,17].
- Uniformidad de la irradiancia en las pruebas: se obtiene a partir de las curvas V/I de los paneles que se prueban en el simulador, si la irradiancia no es uniforme las celdas individuales entregarán distintos valores de corriente, este efecto hace que la corriente I_{sc} disminuya y la forma de la curva se deforme respecto a la forma ideal. Para ilustrar esto, la figura 3.10 muestra un ejemplo en que la uniformidad cambia desde una diferencia de 0%(perfecta) hasta un 15%. El punto de máxima potencia no se ve afectado para valores de no uniformidad menores al 5% [16].



MATLAB

Figura 2.10 Al aumentar la no uniformidad de la irradiancia I_{sc} disminuye y el punto de máxima potencia disminuye.

Por ejemplo, en la figura 2.10, la curva V/I azul representa una baja no uniformidad de la irradiancia, respecto a las curvas verde y rojo. También, al aumentar la no uniformidad de la irradiancia, se da la aparición de máximos locales, en la curva roja se comienza a formar un máximo local a los 10 V.

Finalmente, el estándar IEC-60904-9 incluye tres índices de calidad para la clasificación de los simuladores solares, estos se presentan en la tabla 2.2:

Tabla 2.2 Índices de calidad para calificar un simulador solar [16].

Indicador de calidad	Método	Clasificación		
		A	B	C
No uniformidad de la irradiancia	Monitoreo de la irradiancia en el área de pruebas, comparar valores máximos y mínimos	<2%	<5%	<10%
Calidad del espectro respecto al estándar AM 1.5	Razón de contribución de 6 rangos de longitud de onda (400-500-600-700-800-900-1100)	0.75 A 1.25	0.6 A 1.4	0.4 A 2.0
Estabilidad temporal de la luz	Monitoreo de la irradiancia en una posición fija, determinar su máxima variación	<0.5%	<2%	<10%

2.4 Fuentes de iluminación artificial

La premisa de un simulador solar es poder brindar un espectro de irradiancia cercano al del sol de la manera más uniforme posible. Existen numerosas tecnologías de lámparas en la actualidad y cada una de estas tecnologías varía en su espectro. Pero ahora viene la incógnita, ¿Cuál es el espectro ideal para un simulador solar?

Según la tabla 2.2, un simulador clase A presenta una intensidad relativa de entre 0.75 a 1.25 entre 400 nm y 1100 nm, esto está basado en los rangos de absorción de distintos tipos de celdas fotovoltaicas. Una lámpara de tungsteno convierte solo un 7.1% de su potencia en luz visible [6].

La distribución espectral de una lámpara de tungsteno con una alimentación fija (CD) depende de la temperatura que alcance el filamento, para los halógenos de tungsteno la irradiancia ronda el 0.2 para longitudes de onda de 400 μm , alcanza un máximo de 0.85 a 800 μm y un 0.7% cerca de los 1100 μm [18]. Contrastando esta información con la del cuadro 2.2, un simulador solar con halógenos de tungsteno se encontraría en la clasificación C en el peor de los casos.

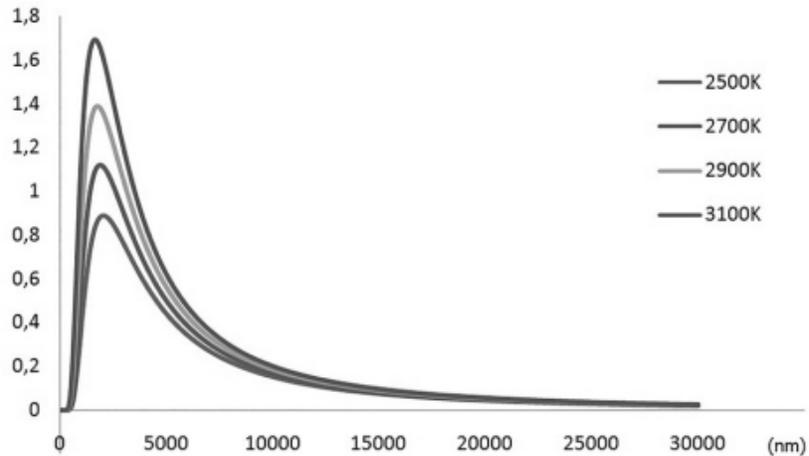


Figura 2.11 Irradiancia de un cuerpo negro a las temperaturas típicas de un filamento de tungsteno [7].

Los filamentos de tungsteno presentan cambios en su temperatura de operación con respecto a la potencia que se les suministre [7]. Esto implica, si se analiza la figura 2.11, que si la corriente que se administra al halógeno fluctúa (como en el caso de la corriente alterna), la temperatura de operación del halógeno fluctuará de igual manera ocasionando cambios en la irradiancia del simulador. Esto ya ha sido demostrado en otros estudios científicos, por ejemplo, Reyes y Meza analizaron la forma de la curva V/I de un panel obtenida por un halógeno alimentado en CD y en CA y encontraron los resultados de la figura 3.13:

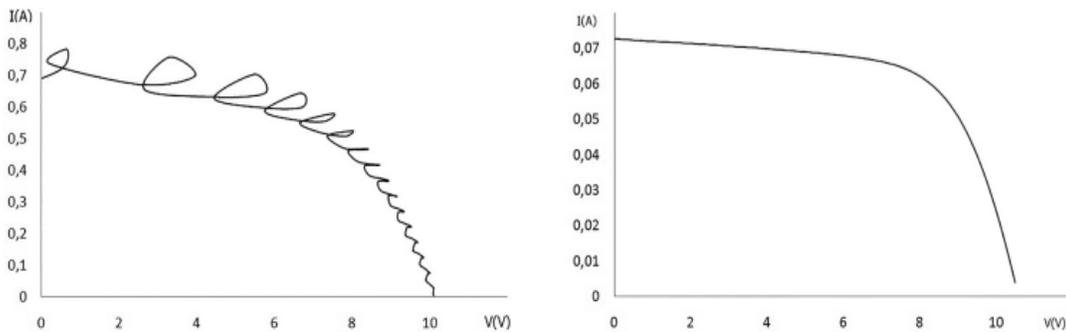


Figura 2.12 (a) Curva V/I obtenida con una fuente de luz de tungsteno alimentada en CA (b) Curva V/I obtenida con una fuente de luz de tungsteno alimentada en CD [7].

Finalmente, es relevante discutir el aspecto de la corriente transitoria de un halógeno. Cada halógeno tiene una resistencia nominal dada por el fabricante (R_{SS}), esta resistencia se puede obtener por la ley de Ohm a partir de los datos de potencia y tensión que consume el halógeno, para un halógeno de 100 W (P) a 12 V (V) se tiene que:

$$I_{SS} = \frac{P}{V} \quad (2.9)$$

$$R_{SS} = \frac{V}{I_{SS}} \quad (2.10)$$

Ahora, la resistencia de un filamento de tungsteno dada en función de su coeficiente de temperatura viene dada por la ecuación 2.11:

$$R_{SS} = R_{REF}(1 + \alpha(T - T_{REF})) \quad (2.11)$$

Donde R_{REF} es la resistencia del filamento a 25 °C, $\alpha = 0.004403$ es el coeficiente de temperatura para el tungsteno [16], T es la temperatura de operación del filamento (aproximadamente 2400 °C) y T_{REF} es la temperatura de referencia, 25 °C. Como R_{SS} se puede obtener a partir de los datos del fabricante, interesa conocer la resistencia del filamento en frío (a 25 °C) por lo que despejando R_{REF} de la ecuación 2.11 se obtiene que:

$$R_{REF} = \frac{R_{SS}}{(1 + \alpha(T - T_{REF}))} \quad (2.12)$$

Sin necesidad de calcular R_{SS} , tomando en cuenta el denominador de la ecuación 2.12 y substituyendo los valores de temperatura y el coeficiente de temperatura se obtiene que para un halógeno de 100 W a 12 V R_{REF} es 11.4 veces más pequeña que la resistencia en estado estable (este valor depende de la temperatura de operación del halógeno), esto implica que la corriente inicial que se solicite a las fuentes al encender los halógenos será demasiado para poder manejarla.

2.5 Fuentes de poder (PSU)

Las fuentes de poder empleadas en las computadoras de escritorio suelen ser muy utilizadas en los ambientes científicos como fuentes de prueba. La razón es muy sencilla, por su bajo costo ofrecen potencias bastante altas, así como varios rieles de tensión. Para poder utilizar una fuente de computadora sin tener una computadora, basta con conectar a tierra la entrada PS_ON la cual corresponde al pin 16 de cualquier PSU ATX de 4 pines, los conectores principales de una fuente se muestran en la figura 2.13.

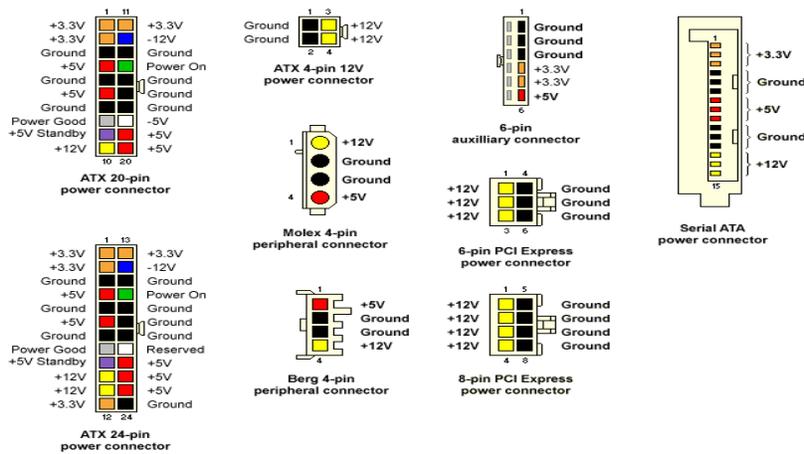


Figura 2.13 Conectores de una PSU [19].

El funcionamiento en sí de la fuente no es de interés del proyecto, lo que más interesa en este caso es su funcionamiento como una fuente CD de alta corriente. Al encender la fuente esta proporciona todos los rieles de voltaje que se aprecian en la figura 3.14. Por ejemplo +12 V, +5 V y +3.3 V entre las tensiones más relevantes, acompañadas a estas tensiones viene un límite de corriente y por lo tanto potencia que se puede extraer de cada una, la figura 3.15 muestra las características de las fuentes empleadas para alimentar el simulador solar.

De esta etiqueta se puede obtener la información más relevante de la fuente, por ejemplo, a +12 V la fuente puede entregar 49 A y a +5V puede entregar 20 A. Esto implica una potencia de 588 W en corriente continua por fuente. Ahora, si se le solicita más corriente de la que puede entregar, la fuente de poder cuenta con circuitos de protección que ocasionarán que se apague para protegerse. La ventaja de este tipo de fuentes es su bajo costo, unos \$53 por una fuente de 600 W.



Figura 2.14 Etiqueta con las características de la PSU [20].

2.6 Breve introducción a los algoritmos MPPT

Para poder obtener la máxima transferencia de potencia del módulo fotovoltaico hacia la carga, se debe forzar a que la carga sea vista por el panel como R_{opt} , o, en otras palabras, se debe hacer un acople dinámico de impedancia entre el módulo y la carga. Para esto se utilizan convertidores CD-CD que proveen un acople de carga tal que se dé la máxima transferencia de potencia [6]. Es muy difícil lograr este acople solo conectando el panel a la carga y aunque esto se lograra, las condiciones climáticas ocasionan que R_{opt} cambie según las magnitudes de irradiancia y/o temperatura en las que esté operando el módulo como en la figura 2.8.

Al existir un cambio en las condiciones de irradiancia el punto MPP será distinto (a mayor irradiancia mayor potencia). El convertidor CD-CD deberá ajustar el valor de impedancia que el módulo observa a un valor cercano a R_{opt} . Para lograr esto se debe implementar un dispositivo que sea capaz de encontrar el punto de máxima potencia (MPP) cada vez que este varia para así hacer que el convertidor responda acorde, este dispositivo se conoce como seguidor de punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés), un seguidor de máxima potencia es la implementación en hardware de un algoritmo de seguimiento del MPP.

En la actualidad se han desarrollado numerosos algoritmos para poder rastrear el MPP en sistemas fotovoltaicos. Por ejemplo, los algoritmos de Conductancia incremental (CI) y perturbación observación (PO) que son altamente utilizados en la actualidad.

El algoritmo de conductancia incremental se basa en el criterio de la primera derivada para localizar el punto MPP. Se puede observar en cualquiera de las curvas P/V que el MPP es el punto en el que la pendiente se hace cero, en términos matemáticos, la derivada de la potencia respecto a la tensión es cero. La potencia del panel se puede obtener a partir de las mediciones de tensión y de corriente ($P=V \times I$) de modo tal que la ecuación 2.13 se debe cumplir en el MPP [23].

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IxV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (2.13)$$

Ahora el término dI/dV se puede aproximar como $\Delta I/\Delta V$. En general, el algoritmo en cada iteración fuerza un voltaje de operación en el módulo fotovoltaico, mide el cambio incremental en la conductancia ($\Delta I/\Delta V$) y lo compara con la conductancia instantánea (I/V), se puede dar uno de estos tres casos:

- $\Delta I/\Delta V = - I/V$ en el MPP
- $\Delta I/\Delta V > - I/V$ a la izquierda del MPP
- $\Delta I/\Delta V < - I/V$ a la derecha del MPP

Al iterar el algoritmo se irá aproximando cada vez más al MPP llegando a converger en el valor deseado del punto de máxima potencia. Ahora, el algoritmo de perturbación observación toma en cuenta que la curva P/V se puede interpretar como 2 regiones, una región a la izquierda del MPP en la que la potencia va en incremento y una región a la derecha del MPP en la que la potencia va en decremento. El método consiste en perturbar el voltaje del módulo fotovoltaico, esta perturbación resulta en un incremento o decremento en la potencia, si un incremento en el voltaje implica un incremento en la potencia esto implica que el punto de operación actual se encuentra a la izquierda del MPP, si el incremento en el voltaje implica un decremento en la potencia entonces el punto de operación está a la derecha del MPP. Al igual que el algoritmo CI, este método es iterativo y se requiere medir tanto la tensión como la corriente del panel para poder implementarlo.

2.7 Obtención de la incertidumbre tipo A

Las incertidumbres en las mediciones se definen como parámetros a asociados a la dispersión de los datos obtenidos de manera experimental. Miranda Martín define la incertidumbre tipo A como un método de la evaluación de la incertidumbre por medio del análisis estadístico de una serie de observaciones efectuadas bajo igualdad de condiciones [25]. Diversas fuentes definen que el número de estas observaciones debe estar entre 5 a 10 para obtener una buena aproximación a la incertidumbre real [25,26,27,28]. Para evaluar la incertidumbre tipo A de una serie de observaciones se procede a obtener primeramente el valor promedio de las medidas con la ecuación 2.14:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k}{n} \quad (2.14)$$

Donde x es la observación (la potencia del panel, por ejemplo) y n es el número de observaciones. Después de obtener el promedio, se procede a obtener la desviación estándar de las observaciones con la ecuación 2.15:

$$s(x) = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\bar{x} - x_k)^2 \right)^{1/2} \quad (2.15)$$

Finalmente, la incertidumbre tipo A (u_A) se obtiene como lo establece la ecuación 2.16 el factor t_v es obtenido de la tabla 2.3:

$$u_A = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} t_v \quad (2.16)$$

Donde v se define como los grados de libertad de la variable aleatoria, $v = n-1$, el factor t_v se obtiene de la tabla 2.3:

Tabla 2.3 Distribución t-Student para determinar incertidumbre tipo A en base al número de observaciones, incompleta [25,26,27,28].

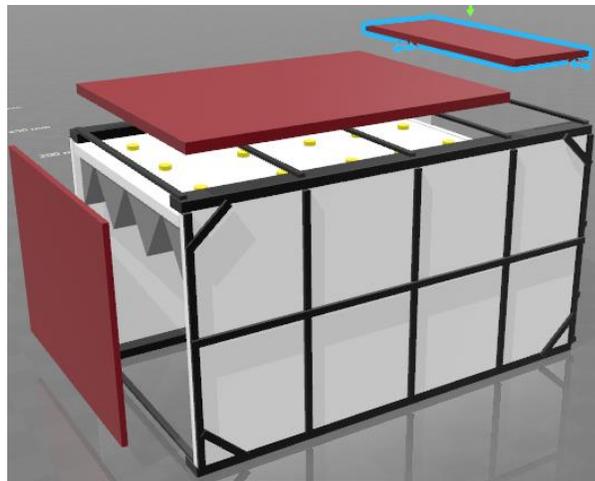
n	v	Nivel de confianza deseado(t_v)					
		99%	98%	95.45%	90%	80%	68%
3	2	9.92	6.96	4.53	2.92	1.89	1.31
4	3	5.84	4.54	3.31	2.35	1.64	1.19
5	4	4.60	3.75	2.87	2.13	1.53	1.13
6	5	4.03	3.36	2.65	2.02	1.48	1.10

Capítulo 3 Diseño del simulador solar

3.1 Diseño de la recámara

Para construir este prototipo de simulador solar se propuso el diseño de la figura 3.1, las dimensiones del mismo son 1.10 m x 0.7 m x 0.5 m (l x a x h), el simulador fue diseñado para alojar un panel de hasta 36 celdas como lo es un panel KC65T, el área interna de la recámara es de 0.56 m². El diseño presenta dos recámaras, una en la que el panel se coloca para las pruebas y otra recámara que alberga las fuentes de alimentación del dispositivo y la circuitería de control.

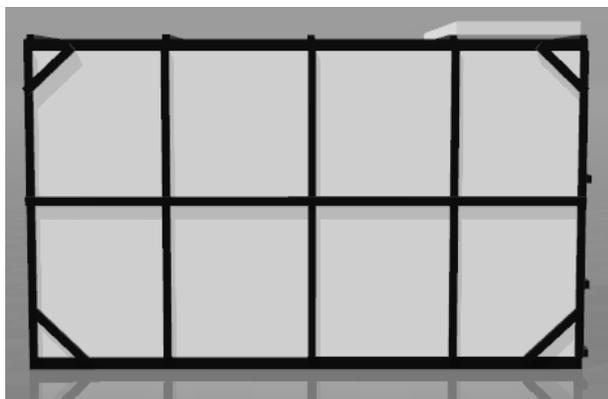
El diseño del simulador está inspirado en un simulador comercial, el Quicksun®600 de endeas [13]. El simulador es cerrado, sin embargo, la tapa frontal (en morado en la figura 3.1) puede quitarse para utilizar el simulador de modo abierto, los halógenos H4 están distribuidos en el techo de la recámara de manera equidistante, cada halógeno cubre un área de 0.0046 m². El simulador presenta 15 halógenos, 3 de estos son repuestos que quedan a disposición del usuario, estos no proporcionan a la irradiancia (son los 3 halógenos de la última fila).



3D Builder

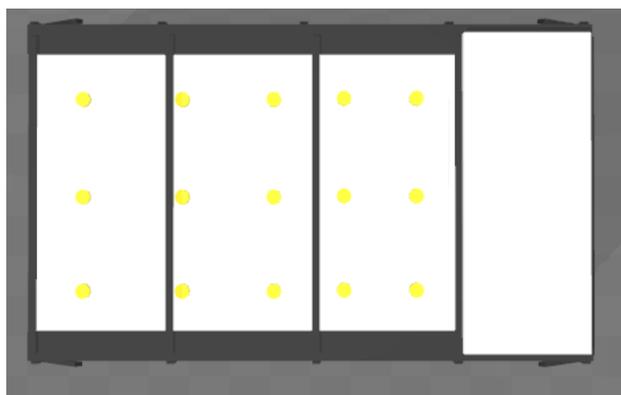
Figura 3.1 Prototipo de simulador solar en 3D.

Las figuras 3.2 y 3.3 muestran en detalle las vistas lateral y superior del simulador respectivamente, finalmente la figura 3.4 presenta el detalle del reflector de luz que se encargará de homogenizar la dispersión de la luz dentro de la recámara haciendo que los haces de luz incidentes en el mismo sean dirigidos hacia el "suelo" del simulador. En la figura 3.3 se puede observar el compartimento que alberga la circuitería del simulador.



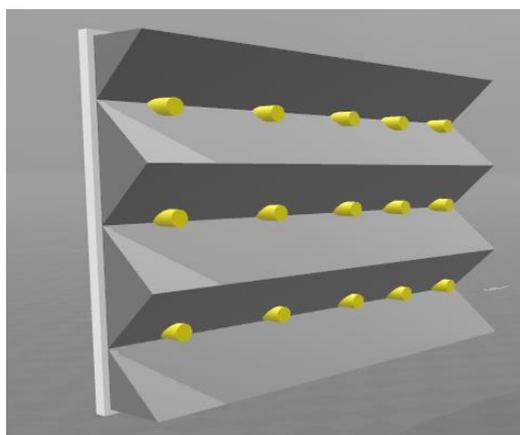
3D Builder

Figura 3.2 Vista lateral del simulador.



3D Builder

Figura 3.3 Vista superior del simulador (Matriz de halógenos observable).



3D Builder

Figura 3.4 Detalle del reflector de luz.

El diseño del reflector de luz está basado en el reflector de un vehículo para el cual se diseñó el halógeno H4. La figura 3.5 muestra el reflector de un halógeno H4 para vehículo y el funcionamiento del mismo tanto en luz alta como en luz baja. Así que, tomando en cuenta esta información, se diseña el reflector de la figura 3.4 el cual consiste de dos laminas metálicas pulidas puestas a un ángulo de 45° respecto a la otra. Este ángulo entre las láminas emula un reflector estándar como el de la figura 3.5.

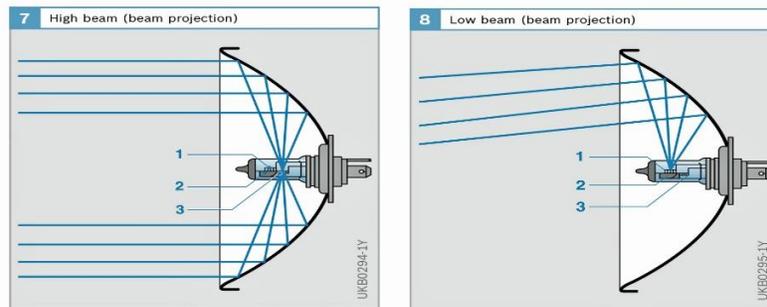


Figura 3.5 Reflector estándar de un vehículo con halógenos H4[14].

3.2 Construcción de la recámara

Para cumplir con la premisa de construir una estructura con resistencia al fuego y a altas temperaturas (cerca de los 350 °C), los materiales empleados en la construcción fueron láminas de plyrock de 6 mm de grosor para las paredes (en blanco en la figura 3.9) y canal para gypsum de hierro galvanizado. Por su parte las láminas de plyrock cuentan con el estándar ANSI/UL263 contra fuego [15]. Para unir la estructura a la armazón de hierro se emplearon tornillos de acero de 3/8 y de 7/16 para la sujeción del resto de la estructura.

La primera etapa de construcción comenzó con la armazón de hierro galvanizado como se aprecia en la figura 3.6:



Figura 3.6 Armazón de hierro galvanizado empleando canal para gypsum.

La segunda etapa consistió en unir las láminas de plyrock a la armazón, estas laminas son las paredes del simulador, se detalla en la figura 3.7 una de las paredes, las láminas se unieron a la armazón utilizando tornillos de acero de 3/8:



Figura 3.7 Láminas de plyrock acopladas a la armazón.

La tercera etapa consistió en unir ambas paredes del simulador, esto se logró empleando dos paredes internas (reforzadas con hierro galvanizado) y 6 columnas de hierro galvanizado en el suelo de la estructura, las paredes internas dan soporte a la estructura mediante el uso de conectores en forma de L, un lado se atornilló a la pared externa y el otro a la pared interna, se detalla en la figura 3.8 una pared interna reforzada:



Figura 3.8 Pared interna del simulador.

Las dos paredes como las de la figura 3.6 se unieron en paralelo formando la estructura que se ve en la figura 3.9:



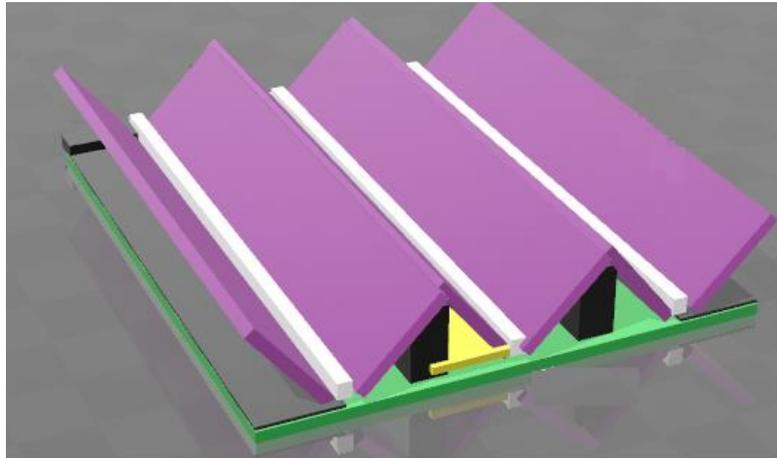
Figura 3.9 Estructura unida, en la foto la estructura se encuentra a 180 ° respecto a su eje central.

La cuarta etapa implicó la construcción de la recámara de la circuitería, en ella se almacenan las tres fuentes de alimentación requeridas para alimentar los halógenos H4, la figura 3.10 detalla esta recámara, las aberturas cuadradas están diseñadas para que las fuentes puedan "respirar":



Figura 3.10 Detalle de la sub-recámara de las PSU, en la foto la estructura se encuentra a 180 ° respecto a su eje central.

La última etapa comprendió la construcción del reflector de los halógenos que se detalla en la figura 3.11, este diseño es un poco más elaborado que el mostrado en la figura 3.4, pero el principio de funcionamiento es el mismo.



3D Builder

Figura 3.11 Detalle del reflector de luz rediseñado.

El reflector es el elemento más importante del simulador ya que es el que logra la distribución uniforme de la irradiancia, las figuras 3.12, 3.13 y 3.14 muestran el proceso de construcción del mismo. Cabe agregar que el reflector de la figura 3.14 no muestra el dispositivo 100% terminado, luego de esa etapa se laminaron los angulares con un material pulido resistente a altas temperaturas (lámina galvanizada pulida).



Figura 3.12 Reflector en construcción, se usa lámina de plyrock como base de los angulares.



Figura 3.13 Reflector en construcción, terminado al 90%.

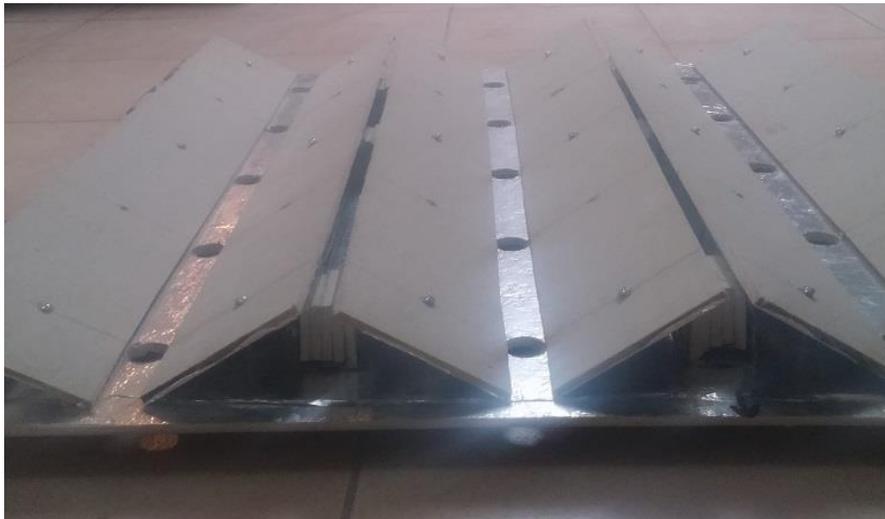


Figura 3.14 Reflector en construcción desde otro ángulo, terminado al 90%.

El reflector una vez laminado se acopló al techo de la recámara, concluyendo la construcción de la carcasa del simulador, la figura 3.15 muestra la carcasa totalmente terminada, es importante notar que se agrega una tapa superior para tapar los halógenos y una tapa frontal para evitar que la irradiancia sea afectada por factores externos (ambas son removibles):



Figura 3.15 Recámara finalizada con tapa frontal puesta.

3.3 Diseño de la etapa eléctrica del simulador solar

3.3.1 Manejo del transiente de corriente de los halógenos

Para comprender el transiente de un halógeno es primero fundamental conocer su construcción. Un halógeno H4 es un dispositivo que posee dos filamentos de tungsteno tal como se muestra en la figura 3.16. El filamento de luz baja tiene un escudo que bloquea la mitad de la luz que emite. El filamento de luz alta no tiene ningún escudo que bloquee la luz. Es por esta razón que los halógenos H4 dispersan la luz como se denota en la figura 3.5. Ahora, estos filamentos se pueden modelar como termistores con coeficiente positivo de temperatura (PTC). Esto quiere decir que entre más se caliente el filamento mayor será su resistencia. La ecuación 2.11 modela este comportamiento.

Ahora, como se determinó en la sección 2.4, la resistencia de estos filamentos a 25 °C es hasta 11 veces menor que su resistencia en estado estable. Los halógenos a emplear son de 100 W a 12 V CD, aplicando las ecuaciones 2.9 y 2.10 se tiene que:

$$I_{ss} = \frac{100 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 8.333 \text{ A}$$

$$R_{ss} = \frac{12 V}{8.333 A} = 1.44 \Omega$$

Esto quiere decir que la resistencia en estado estable es de 1.44Ω , sin embargo, con el filamento a temperatura ambiente la resistencia inicial puede ser tan baja como $131 m\Omega$. Aplicando ley de Ohm, esto implica que la corriente inicial que un halógeno puede intentar obtener de la fuente es:

$$I_T = \frac{12V}{0.131 \Omega} = 92.3 A$$

Si se remite a la figura 2.14, es evidente que una sola fuente no podría suministrar esta clase de corriente durante el transitorio a un halógeno, ahora, si se conectan cuatro halógenos en paralelo a la fuente, la corriente transitoria sería de $369 A$. Esto implica el apagado inmediato de la fuente debido a su protección contra corto-circuito.

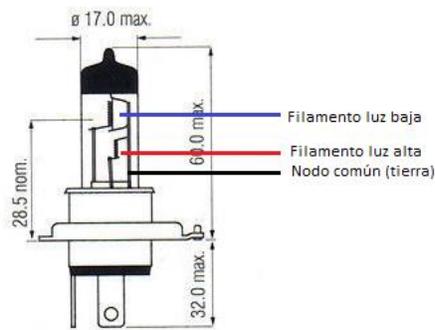


Figura 3.16 Diagrama de un halógeno H4 [22].

Para corregir este fenómeno se propuso la utilización de termistores NTC. Estos dispositivos tienen un comportamiento inverso al del filamento, poseen una resistencia inicial alta y conforme se calientan, debido al efecto Joule del paso de corriente, su resistencia baja hasta que el termistor se comporta como un corto circuito. De esta manera, al utilizar termistores NTC se tendría dos circuitos equivalentes, uno para el transiente y otro para el estado estable como se observa en la figura 3.17.

Para dimensionar el termistor requerido se procedió a determinar la máxima carga que cada fuente puede proporcionar a cada halógeno, ya que se emplearon 12 halógenos de $100 W$ y 3 PSU de $600 W$, esto implica que cada PSU debe proporcionar energía a 4 halógenos y la corriente en estado estable que pueden demandar 4 halógenos es de $33.33 A$.

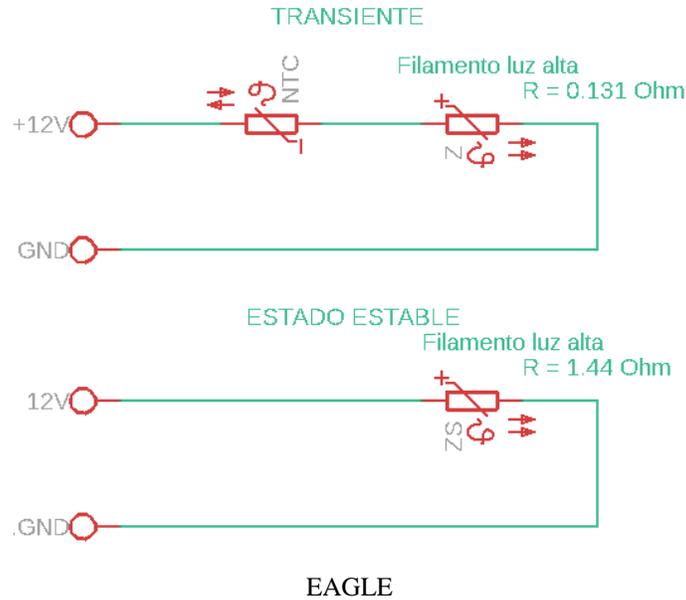


Figura 3.17 Circuito equivalente durante el transiente y en estado estable.

Cada fuente puede proporcionar hasta 49 A por el riel de 12 V. Para dimensionar el termistor NTC, se estableció una corriente máxima de inicio de 42 A por cada PSU. Esto implica un máximo de 10.5 A por halógeno, por lo tanto:

$$I_{max} = 10.5 \text{ A}$$

$$I_{max} = \frac{12 \text{ V}}{NTC + Z} \quad (3.1)$$

Donde la ecuación 3.1 se obtuvo aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff al circuito transiente de la figura 3.16, NTC es el valor buscado del termistor NTC y Z es la impedancia del halógeno de tungsteno a 25 °C (ya determinada). Despejando NTC de la ecuación se obtiene que:

$$NTC = \frac{12 \text{ V}}{I_{max}} - Z \quad (3.2)$$

Al sustituir $I_{max} = 10.5 \text{ A}$ y $Z = 0.131 \Omega$ se obtiene que el termistor requerido es de 1.01Ω a 25 °C. Para satisfacer este requerimiento se emplearán termistores Epcos NTC 1D-21 que presentan una resistencia de 1Ω a 25 °C y una corriente de estado estable máxima de 16 A. Los cálculos anteriores fueron aplicados a un filamento del halógeno, sin embargo, en términos resistivos ambos filamentos son idénticos y aplica la misma matemática.

3.3.2 Diseño de la etapa de control de los halógenos

Ya que los halógenos presentan 2 modos de iluminación (Luz Baja y Luz Alta) la solución propuesta para el control de los mismos fue el empleo de una arquitectura de interruptores controlados por un Arduino. Lo primero a definir en esta etapa de diseño fue el acomodo de la matriz de halógenos:

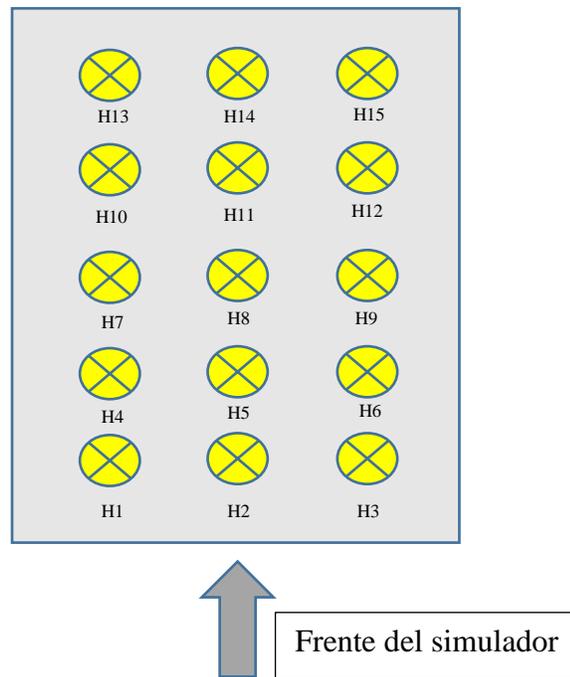
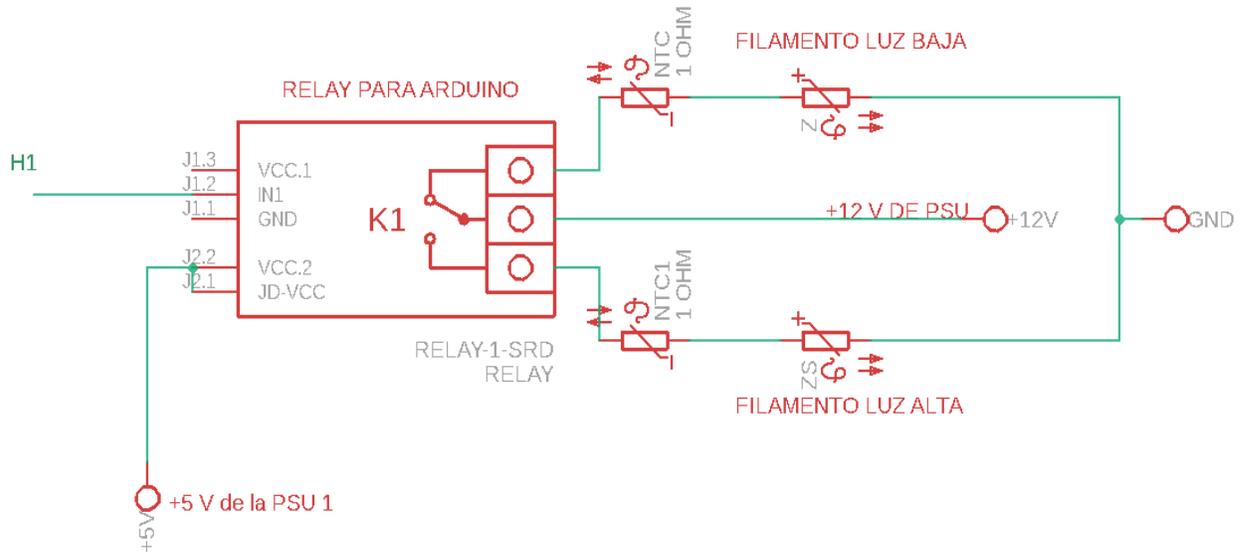


Figura 3.18 La matriz de halógenos del simulador, ubicada en el techo del mismo.

Como se puede apreciar en la figura 3.18, la matriz de halógenos consta de 5 filas y 3 columnas, la fila 5 representa los halógenos de repuesto (no están conectados). La arquitectura diseñada para el control de estos halógenos se presenta en la figura 3.19.

Para simplificar la etapa de diseño se trabajó por halógeno, es decir, el diseño para controlar un halógeno es el mismo que para controlar doce halógenos. La premisa del control de la figura 3.19 es la siguiente: La señal H1 es una señal digital que proviene de un microcontrolador (se utilizó un Arduino Mega 2560 pero podría utilizarse cualquier otro microcontrolador o procesador), si $H1 = 1$ el relé estará en la posición NC (como se muestra en la figura) alimentando al filamento de luz baja. Si $H1 = 0$ el relé se activa a la posición NO dejando de alimentar al filamento de luz baja y alimentando al filamento de luz alta.



EAGLE

Figura 3.19 Control individual de un halógeno.

Ahora, esta arquitectura de control tiene la ventaja de emplear un relé por halógeno lo cual es fundamental para abaratar costos, pero presenta un problema y es que siempre habrá un filamento energizado. Además, cabe destacar que el control total del simulador implica multiplicar la figura 4.18 por 12 halógenos, es decir se requirió de 12 relés para el control de las luces, para esto se empleó una placa de 16 relés para Arduino como la de la figura 3.20:

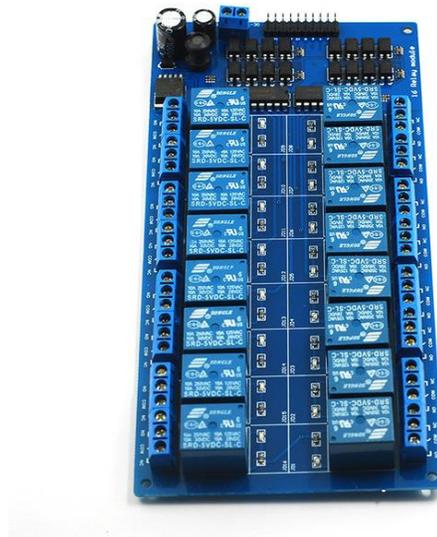


Figura 3.20 Placa de 16 relés de 5 V [24].

Las características de esta placa son las siguientes:

- Alimentación: 12 V CD
- 16 relés activos en bajo (Con señal de control en 0 V)
- Cada relé soporta 10 A a 28 V CD
- 16 entradas de control
- 16 luces LED para indicar el estado de los relés

Como se mencionó no se puede apagar los halógenos de manera individual con esta arquitectura, pero si se pueden apagar los halógenos por columna. Para esto, cada columna de halógenos se conectó a las fuentes de poder de la siguiente manera:

Tabla 3.1 Conexión de los halógenos a las PSU

Fuente de poder	Halógenos conectados
1	H1-H4-H7-H10
2	H2-H5-H8-H11
3	H3-H6-H9-H12

Con esta conexión, se puede controlar el encendido o apagado de cada fuente de poder manipulando la puesta a tierra del pin Power On de la fuente, por lo que pueden apagarse las fuentes 2 y 3 para lograr varios efectos de operación, desafortunadamente apagar la fuente 1 no es viable ya que todos los relés están alimentados por esta fuente. El circuito de control de las fuentes se muestra en la figura 3.21.

Al analizar la figura 3.21 se nota la inclusión de un relé individual para controlar la fuente 1 y un módulo de 4 relés para controlar las fuentes 2 y 3. La razón de esto es la siguiente: cada relé requiere una corriente de hasta 0.1 A para energizarse. Un Arduino no puede alimentar más de un relé, por lo que se optó por emplear el Arduino para energizar al relé de la fuente 1, pero los relés de los halógenos y de las fuentes 2 y 3 se alimentaron con los rieles de 5 V y de 12 V de la fuente 1, ya que requieren mucha energía (12 W para el módulo de 16 relés). Aún con esta limitación, la arquitectura de control de la figura 3.21 permite el apagado de las fuentes 2 y 3 vía programación con lo que se logra un gran número de combinaciones de encendido de halógenos.

Las señales que controlan el encendido/apagado de las fuentes son F1, F2 y F3, si una de estas señales es cero, dicha fuente se enciende, caso contrario, se da el apagado de la misma. Así, teniendo en cuenta la colocación de los termistores NTC como en la figura 3.19, se procedió a diseñar el diagrama general de conexión del simulador solar que se presenta en el apéndice A4.

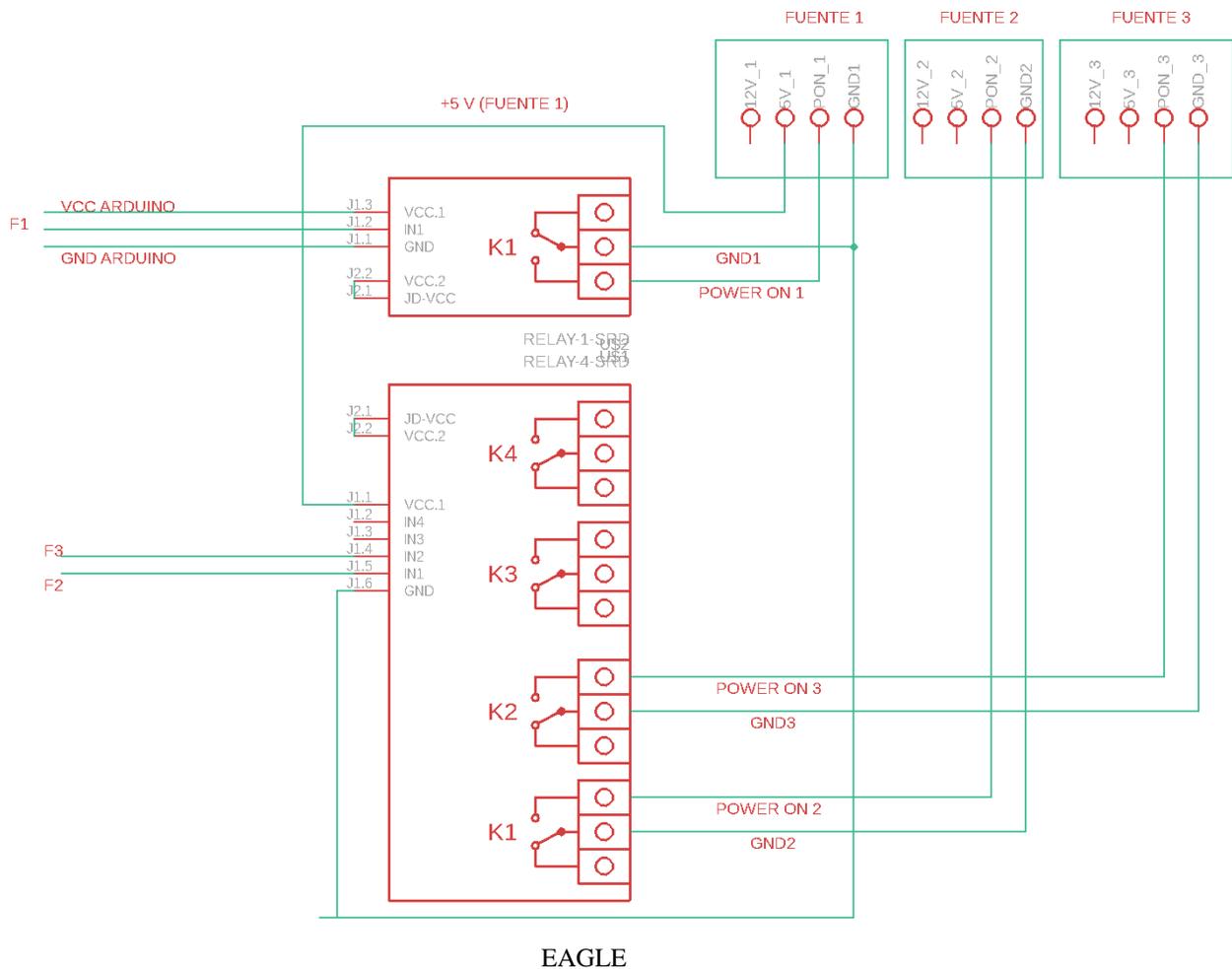


Figura 3.21 Control de las fuentes de poder.

3.4 Programación del simulador solar

La programación del encendido/apagado de las luces se manejó con las variables de la tabla 3.2. La interfaz de programación empleada fue el IDE de Arduino, sin embargo, cualquier entorno de programación compatible con Arduino puede ser empleado para este fin. Para programar el simulador solar se empleó el diagrama de flujo propuesto en la figura 3.22. Este diagrama de flujo representa la estructura básica de la programación del simulador solar. Si se analiza el diagrama de la figura 3.22, se interpreta que el programa del simulador solar consta de etapas, las etapas en azul no son programables, están predefinidas ya que son procesos de inicialización, a continuación, se describe cada una de las etapas del diagrama de flujo.

- Definición de variables y asignación de pines de salida: en esta etapa del programa se definen las variables de la tabla 4.2 y se asignan sus pines de salida, además se definen 2 variables booleanas: RELAY_OFF = 1 y RELAY_ON = 0.
- Proceso de inicialización de los relés: rutina preestablecida que se encarga de iniciar todos los relés en modo apagado, con excepción de Relay_F1 por razones ya discutidas.
- Etapa 1 a n: estas son las etapas que el usuario determina, puede ser solo una, pueden ser 3, pueden ser n etapas, se puede programar el modo de iluminación de cada halógeno de manera individual, así como apagar alguna columna de halógenos, hay muchas combinaciones posibles.
- Tiempo de duración de la etapa: el usuario establece cuánto tiempo durará cada etapa, el tiempo se establece en ms.
- Proceso de apagado del simulador: al terminar la última etapa esta subrutina se encarga del apagado de todos los halógenos automáticamente, el usuario no debe modificarla.

Tabla 3.2 Variables involucradas en el proceso de programación del simulador solar.

Nombre de la variable en la interfaz de programación	Pin de salida en el Arduino Mega 2560	Dispositivo que controla	Efecto de la variable en 1 lógico	Efecto de la variable en 0 lógico
Relay_1	22	Halógeno 1	Luz baja	Luz alta
Relay_2	23	Halógeno 2	Luz baja	Luz alta
Relay_3	24	Halógeno 3	Luz baja	Luz alta
Relay_4	25	Halógeno 4	Luz baja	Luz alta
Relay_5	26	Halógeno 5	Luz baja	Luz alta
Relay_6	27	Halógeno 6	Luz baja	Luz alta
Relay_7	28	Halógeno 7	Luz baja	Luz alta
Relay_8	29	Halógeno 8	Luz baja	Luz alta
Relay_9	30	Halógeno 9	Luz baja	Luz alta
Relay_10	31	Halógeno 10	Luz baja	Luz alta
Relay_11	32	Halógeno 11	Luz baja	Luz alta
Relay_12	33	Halógeno 12	Luz baja	Luz alta
Relay_F1	38	Fuente 1	Fuente apagada	Fuente encendida
Relay_F2	40	Fuente 2	Fuente apagada	Fuente encendida
Relay_F3	42	Fuente 3	Fuente apagada	Fuente encendida

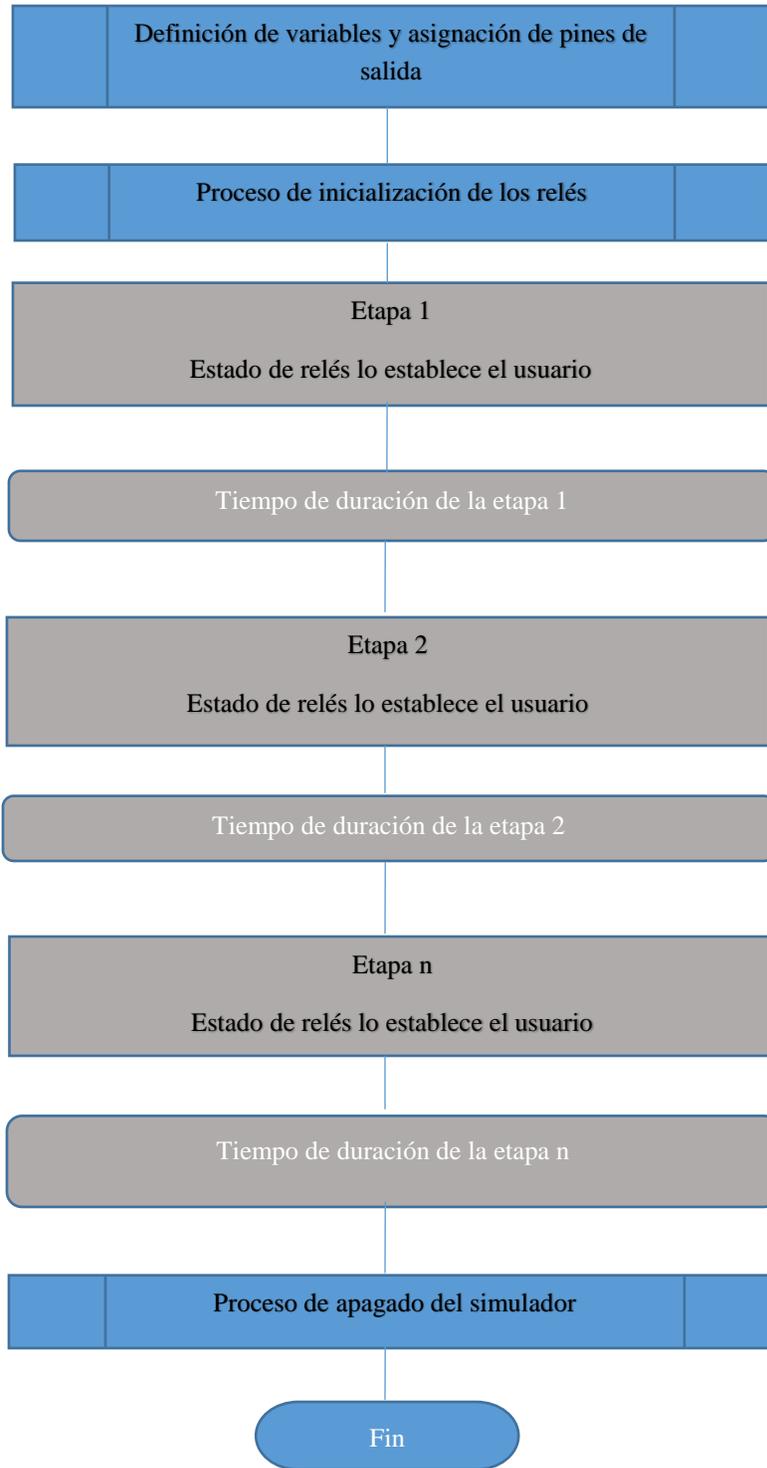


Figura 3.22 Diagrama de flujos de un programa de control del simulador.

En los apéndices 1 a 3 se disponen tres ejemplos de programación del simulador. El primer programa es uno de tres etapas para la prueba de algoritmos MPPT, la primera etapa enciende todos los halógenos en alto durante 45 s, la segunda etapa apaga la fuente 2 para ocasionar una baja en la irradiancia del simulador durante 15 s y finalmente la tercera etapa consiste en enciende todos los halógenos en luz baja durante 45 s. En la sección de resultados experimentales se analizará por qué este programa es ideal para la prueba de algoritmos MPPT. El segundo ejemplo es un programa que enciende todos los halógenos en luz alta durante 45 s, luego apaga el simulador. El tercer programa enciende todos los halógenos en luz baja durante 45 s, luego apaga el simulador.

3.5 Modos básicos de operación del simulador solar

Existen muchas combinaciones en las que el simulador puede operar (576), de todas estas combinaciones se denominaron 3 como los modos básicos de operación, en las ilustraciones que se presentan a continuación, un halógeno en rojo representa que funciona en luz alta, en amarillo en luz baja y en negro apagado, los modos básicos de operación son:

- Modo de luz alta: todos los halógenos programados para operar en luz alta, en este modo se logra la irradiancia máxima del simulador solar. A modo de ilustración se presenta la figura 3.23.

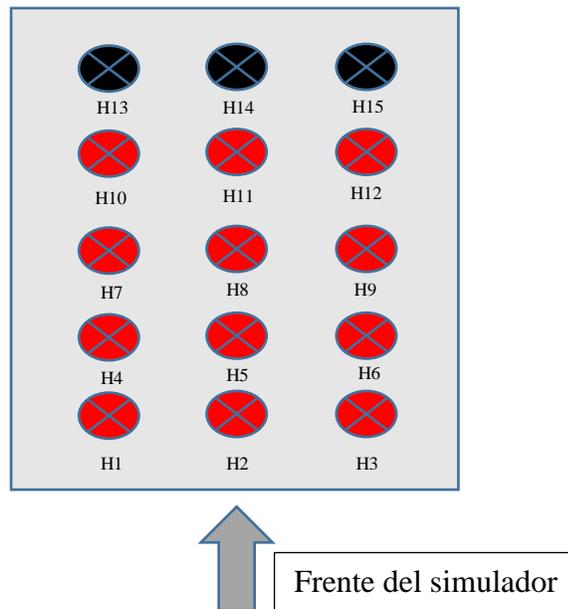


Figura 3.23 Modo de operación de luz alta.

- Modo de luz alta sin la fuente 2: todos los halógenos menos los de la columna 2 programados para operar en luz alta, en este modo se logra la irradiancia mínima del simulador solar. A modo de ilustración se presenta la figura 3.24.

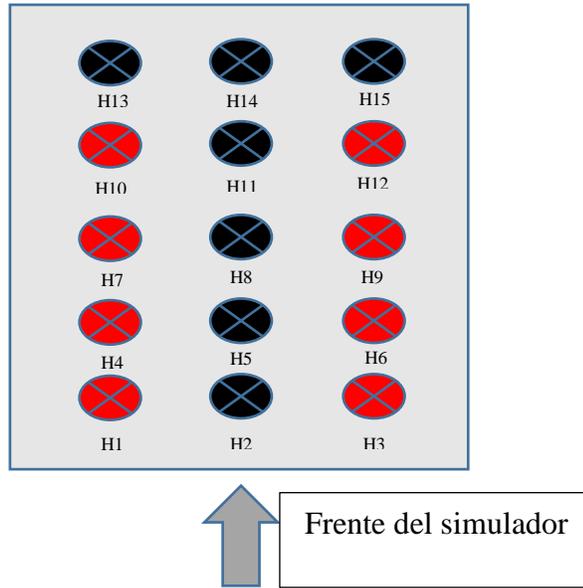


Figura 3.24 Modo de operación de luz alta sin la fuente # 2.

- Modo de luz baja: todos los halógenos programados para operar en luz baja, en este modo se logra una irradiancia que presentó una gran no uniformidad, lo cual genera, sombreado parcial en el panel sin necesidad de tapar el mismo con algún material. A modo de ilustración se presenta la figura 3.25.

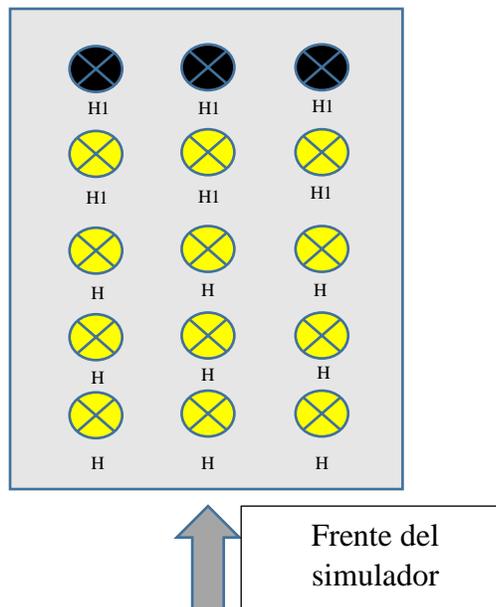


Figura 3.25 Modo de operación de luz baja.

Como se mencionó anteriormente, estos no son los únicos modos de operación del simulador, pero son los que se pusieron a prueba para la obtención de los resultados experimentales. Las combinaciones que el usuario puede crear son 576, sin embargo, probarlas todas es extremadamente demandante.

Capítulo 4 Diseño de la etapa de pruebas del simulador

4.1 El circuito de pruebas

Para el desarrollo de las pruebas se implementó el circuito de la figura 4.1. Este circuito se presenta en diagrama de bloques por simplicidad.

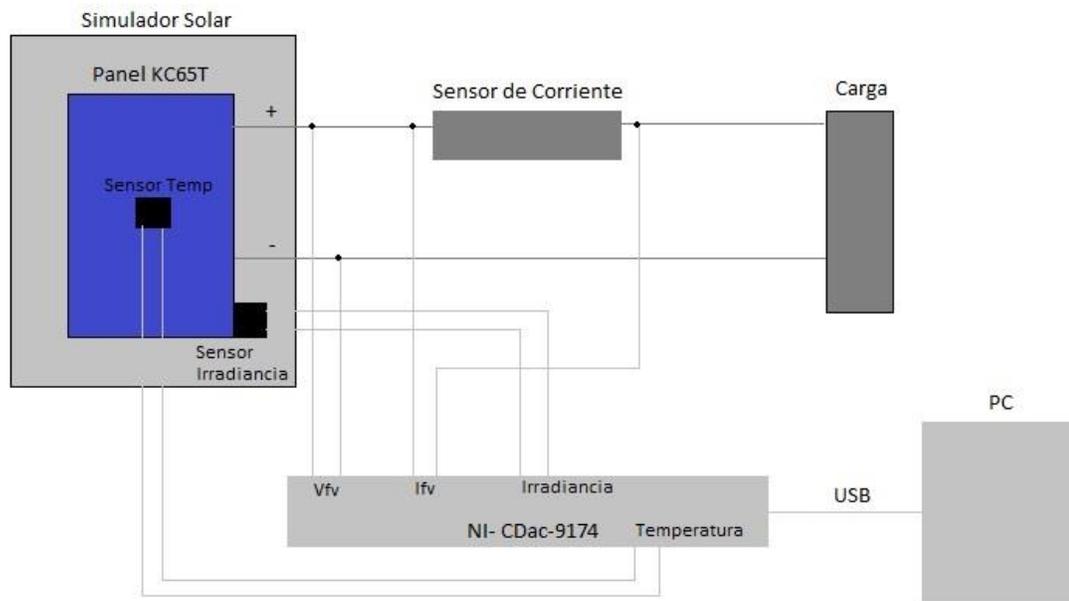


Figura 4.1 Circuito implementado para la etapa de pruebas del simulador.

A continuación, se detalla cada componente del circuito de pruebas:

- Simulador solar: dispositivo diseñado para el proyecto.
- Panel KC65T: panel solar a utilizar en las pruebas, sus características principales se encuentran en la figura 2.5, además se obtuvo el modelo en LTSpice para comparar resultados. El número de serie del panel utilizado es 1085BH0248.
- Sensor de Irradiancia: sensor de irradiancia spektron con sensibilidad de $75 \text{ mV}/1000 \text{ W/m}^2$.
- Sensor de temperatura: sensor de temperatura PT1000
- Sensor de corriente: resistor shunt con una sensibilidad de 7.5 mV/A
- Carga: Potenciómetro de 500Ω a 250 W
- NI-CDac-9174: sistema portable de medición de sensores, programable en LabVIEW
- PC: computador utilizado para la captura de los datos.

La premisa de las pruebas es la siguiente: como se estudió en la sección 2.1, bajo una irradiancia constante, el punto de operación de un panel solar en la curva V/I o V/P dependerá de la carga que se encuentre en sus terminales. Las pruebas consistieron de dos etapas: en la primera etapa se determinó la respuesta en el tiempo de la irradiancia para analizar su tiempo de estabilización, su porcentaje de variación y la tasa de cambio de la temperatura en el panel respecto al tiempo; la segunda etapa consistió en hacer un barrido resistivo en la carga y capturar los datos empleando el equipo NI-CDac-9174. La segunda etapa se repite 5 veces para lograr redundancia en los datos y realizar un estudio estadístico a los mismos tal como se estudió en sección 2.6.

Las pruebas para obtener el punto de máxima potencia y las curvas V/I y V/P del panel fotovoltaico se basan en los modos de operación discutidos en la sección 3.5. Se realizaron un total de 110 pruebas, las mismas se realizaron combinando la altura del panel dentro del simulador con los modos de operación, además de comparar el funcionamiento del panel con o sin la tapa frontal como se muestra en la figura 4.2:

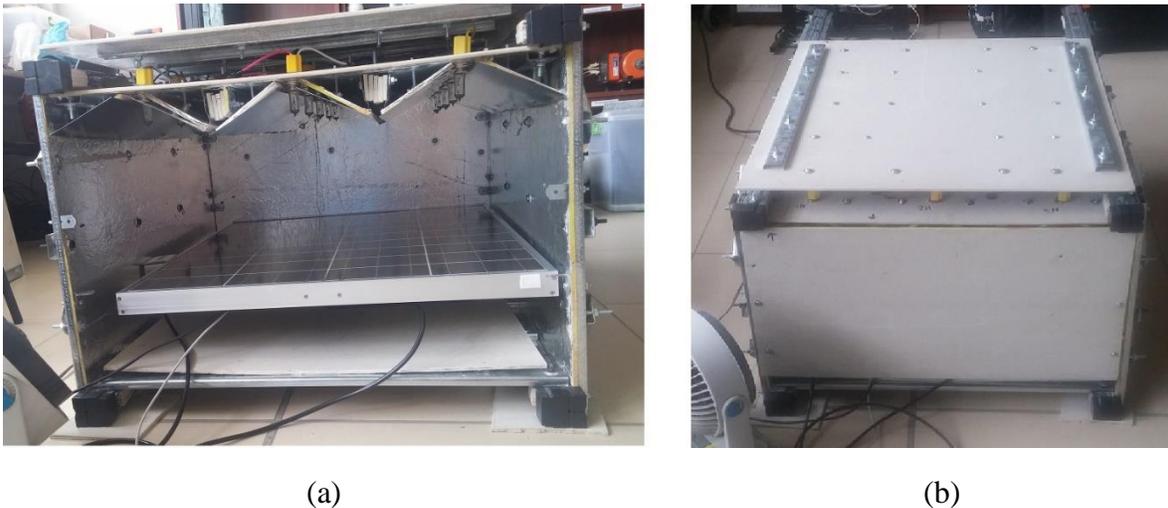


Figura 4.2 (a) Simulador solar sin tapa frontal, (b) simulador solar con tapa frontal.

La lista de pruebas a realizadas se resume en la tabla 4.1, la primera prueba a realizar en cada modo fue siempre la de la irradiancia y la temperatura ya que esta prueba indica la máxima irradiancia de cada modo y el cambio de la temperatura respecto al tiempo que experimenta el panel dentro del simulador. Luego de realizar esta prueba se procedió a realizar las pruebas de los distintos modos de operación y distintas elevaciones dentro del simulador. Todas las pruebas se realizaron para el simulador sellado (con la tapa frontal) y el simulador abierto (sin tapa frontal). La prueba de fuga consistió en medir la irradiancia dentro del simulador con los halógenos apagados para determinar si el simulador es afectado por irradiancia externa.

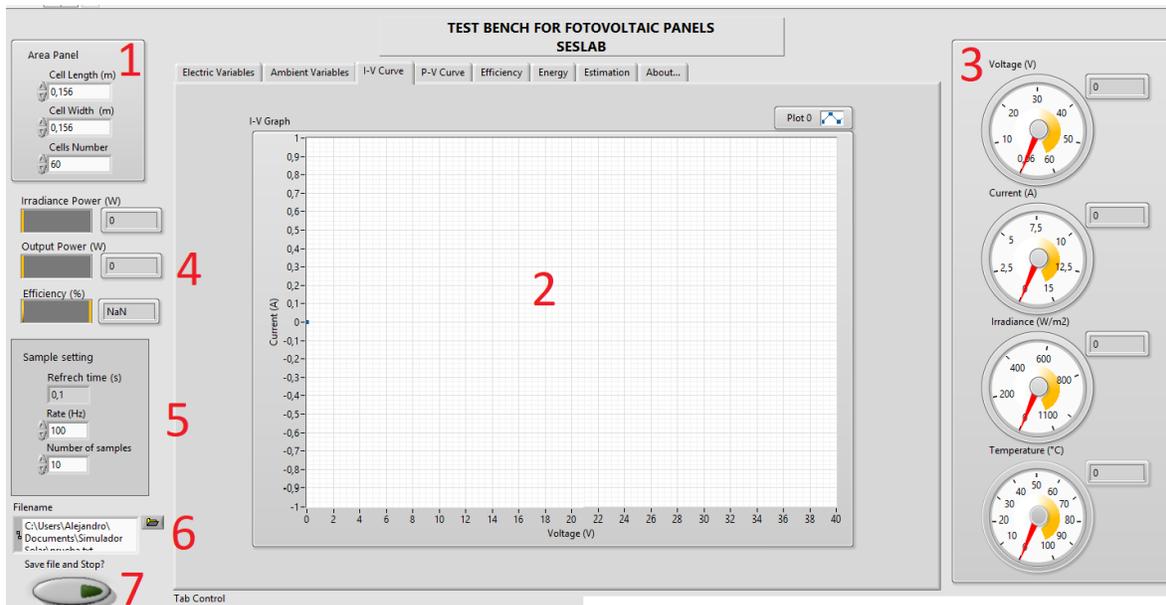
Tabla 4.1 Pruebas realizadas con el simulador.

Modo de prueba	Número de pruebas
Prueba de irradiancia y temperatura*	1
Prueba de fuga de irradiancia	1
Prueba en modo luz alta con panel a 0 cm de elevación	5
Prueba en modo luz alta sin la fuente # 2 con panel a 0 cm de elevación	
Prueba en modo luz baja con panel a 0 cm de elevación	
Prueba en modo luz alta con panel a 13.5 cm de elevación	
Prueba en modo luz alta sin la fuente # 2 con panel a 13.5 cm de elevación	
Prueba en modo luz baja con panel a 13.5 cm de elevación	
Prueba en modo luz alta con panel a 21.5 cm de elevación	
Prueba en modo luz alta sin la fuente # 2 con panel a 21.5 cm de elevación	
Prueba en modo luz baja con panel a 21.5 cm de elevación	

*Esta prueba se realiza para cada modo y elevación distinta

4.2 El software: test bench for fotovoltaic panels

La tarjeta de adquisición NI-CDac-9174 puede programarse en el entorno LabVIEW para el manejo de los datos. Esta labor fue realizada por el estudiante de doctorado el Ing. Luis Diego Murillo. El software desarrollado por el Ing. Murillo es de carácter plug-and-play lo que implica que solo se debe conectar la tarjeta de adquisición y los sensores requeridos para que pueda operar, esto luego de instalar los drivers necesarios en el PC. La interfaz del software se muestra en la figura 4.3.



TEST BENCH FOR FOTOVOLTAIC PANELS

Figura 4.3 GUI del programa.

Cada sección de la figura 4.3 se detalla a continuación:

1. Características de las celdas del panel, su largo y su ancho en metros y el número de celdas, para el KC65T estas son: Largo: 0.083 m, ancho: 0.163 m y numero de celdas es 36.
2. En esta área el software renderiza las gráficas deseadas, tensión del panel, corriente del panel, curva V/I, curva V/P, entre otras.
3. En esta sección se observan en tiempo real el voltaje del panel, la corriente del panel, la irradiancia y la temperatura.
4. En esta sección se observa en tiempo real la potencia de irradiancia, la potencia de salida del panel y su eficiencia.
5. Acá, el usuario determina el tiempo de muestreo deseado, el mínimo es 10 ms y el máximo un segundo. Para las pruebas de irradiancia y temperatura se utiliza 100 ms de tiempo de muestreo y para las pruebas de potencia 33 ms.
6. Directorio en el que se guardarán los datos generados por el software.
7. Botón empleado para detener la ejecución y salvar los datos en un archivo de texto.

Los archivos de texto en los que se guardan los datos de barrido presentan las magnitudes separadas por columnas, la figura 4.4 es un ejemplo real de como almacenan los datos del software:

```

prueba_22.txt - Notepad
File Edit Format View Help
Separator Tab
Decimal_Separator ,
Multi_Headings No
X_Columns One
Time_Pref Relative
Operator Alejandro
Date 2018/06/20
Time 15:14:32,5569925308227539063
***End_of_Header***

Channels 8
Samples 1544 1544 1544 1544 1544 1544 1544 1544
Date 2018/06/20 2018/06/20 2018/06/20 2018/06/20 2018/06/20 2018/06/20 2018/06/20 2018/06/20
Time 15:14:32,5569925308227539063 15:14:32,5569925308227539063 15:14:32,5569925308227539063 15:14:32,5569925308227539063 15:14:32,5569925308227539063 15:14:32,5569925308227539063 15:14:32,5569925308227539063 15:14:32,5569925308227539063
X_Dimension Time Time Time Time Time Time Time Time
X0 0,000000000000000E+0 0,000000000000000E+0 0,000000000000000E+0 0,000000000000000E+0 0,000000000000000E+0 0,000000000000000E+0 0,000000000000000E+0 0,000000000000000E+0
Delta_X 1,000000 1,000000 1,000000 1,000000 1,000000 1,000000 1,000000 1,000000
***End_of_Header***
X_Value Untitled Untitled 1 Untitled 2 Untitled 3 Untitled 4 Untitled 5 Untitled 6 Untitled 7 Comment
0,000000 0,370623 1,039167 53,589811 40,948072 0,385139 1,475595 0,356654 258,798246
1,000000 0,379376 1,038932 53,578121 40,960424 0,394146 1,510431 0,365160 258,738256
2,000000 0,366923 1,038163 53,562718 40,950510 0,380925 1,460189 0,353435 258,547802
3,000000 0,377186 1,038525 53,590368 40,939457 0,391717 1,500782 0,363194 258,639241
4,000000 0,368884 1,038640 53,536553 40,959124 0,383137 1,469386 0,355160 258,665848
5,000000 0,397655 1,038300 53,606513 40,951810 0,412885 1,581405 0,382987 258,581719
6,000000 0,391829 1,038777 53,600760 40,944333 0,407023 1,559121 0,377202 258,701413
7,000000 0,375447 1,038109 53,608183 40,946771 0,389755 1,492767 0,361664 258,534861
8,000000 0,372870 1,038777 53,578121 40,945634 0,387329 1,484309 0,358951 258,701280
9,000000 0,363544 1,038337 53,551770 40,977653 0,377482 1,447285 0,350122 258,588449

```

Figura 4.4 Ejemplo de un archivo generado por el software en una prueba real.

Las columnas están ordenadas de la siguiente manera:

Tiempo, Voltage, Corriente, Irradiancia, Temperatura, Potencia Salida, Eficiencia, Resistencia critica, G estimada.

4.3 Manejo de los datos en MATLAB

Los datos capturados en los archivos de texto generados por el software fueron procesados en MATLAB, esto para facilitar los cálculos de las incertidumbres y las gráficas combinadas de resultados. Para manejar los datos en MATLAB se procedió a importar los datos de los archivos de texto como el de la figura 4.4 al denominado workspace de MATLAB para así poder desarrollar los cálculos necesarios. La figura 4.5 muestra el cómo se realiza este importe de los datos a MATLAB:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	VarName1	v3	i3	ir3	te3	p3	VarName7	VarName8	VarName9
	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER
555	554,000000	0,329549	1,058920	77,576414	27,725044	0,348966	0,965046	0,311212	113,454207
556	555,000000	0,328136	1,058837	77,608146	27,735500	0,347443	0,960442	0,309903	113,444663
557	556,000000	0,329463	1,059417	77,637280	27,716375	0,349038	0,964490	0,310985	113,507945
558	557,000000	0,329625	1,059140	77,662889	27,730678	0,349119	0,964394	0,311220	113,477364
559	558,000000	0,329613	1,059194	77,677425	27,726994	0,349124	0,964229	0,311192	113,483459
560	559,000000	0,328511	1,059339	77,656208	27,735229	0,348004	0,961398	0,310109	113,498462
561	560,000000	0,329286	1,059566	77,604806	27,725802	0,348900	0,964512	0,310775	113,523301
562	561,000000	0,329389	1,059347	77,643342	27,729974	0,348937	0,964135	0,310936	113,499627
563	562,000000	0,329310	1,059571	77,649837	27,744656	0,348927	0,964027	0,310796	113,522734
564	563,000000	0,328675	1,059524	77,653734	27,747582	0,348240	0,962079	0,310210	113,517534
565	564,000000	0,327399	1,059666	77,664992	27,747365	0,346934	0,958332	0,308964	113,532762
566	565,000000	0,329620	1,059488	77,648415	27,735609	0,349229	0,964877	0,311113	113,514361
567	566,000000	0,329343	1,059403	77,676064	27,745794	0,348907	0,963646	0,310877	113,504621
568	567,000000	0,328263	1,059424	77,662456	27,742923	0,347769	0,960672	0,309850	113,507058
569	568,000000	0,328122	1,059557	77,681693	27,742218	0,347664	0,960143	0,309678	113,521395
570	569,000000	0,327712	1,059554	77,636724	27,753758	0,347228	0,959495	0,309292	113,520418
571	570,000000	0,328043	1,059611	77,669631	27,740918	0,347598	0,960110	0,309588	113,527205
572	571,000000	0,328752	1,060079	77,733591	27,747961	0,348503	0,961817	0,310120	113,576955

MATLAB

Figura 4.5 Ejemplo real del importe de datos a MATLAB

En el ejemplo de la figura 4.5 se está procediendo a obtener las curvas V/I, V/P, las incertidumbres de la temperatura del panel y la irradiancia del simulador; debido a esto solo se importan las columnas de voltaje, corriente, irradiancia, temperatura y potencia de salida. Nótese que para trabajar en MATLAB se eligió el uso de nombres de variables sencillas: vx, ix, irx, tex y px en donde x representa el número de prueba. Con los datos importados, se procedió a graficar y obtener las incertidumbres buscadas, utilizando esta herramienta matemática.

Capítulo 5 Presentación de resultados experimentales

La presentación de los resultados experimentales se manejará por medio de gráficas y tablas, se indicará el modo de operación del panel para cada set de datos.

5.1 Resultados experimentales del transitorio de encendido de los halógenos

Para corroborar que el dimensionamiento del termistor NTC fue el adecuado para el uso del simulador, se realizó una prueba para obtener el máximo valor de corriente consumida por los halógenos. Para esta prueba, se conecta cada halógeno a una de las PSU, se alimenta solo el filamento de luz alta, se mide la corriente de estado estable y la máxima corriente. Para medir la corriente se utiliza un resistor shunt de 7.5 mV/A para no dañar el equipo de medición (un multímetro Agilent 34405A). Los resultados se muestran en la figura 5.1 para un halógeno, la tensión en la esquina superior derecha representa el máximo.



Figura 5.1 (a) Corriente del halógeno sin termistor (b) Corriente del halógeno con termistor.

Teniendo en cuenta que el resistor shunt tiene una sensibilidad de 7.5 mV/A la tabla 6.1 resume lo obtenido en esta prueba para un halógeno:

Tabla 5.1 Resultados de la corrección del transitorio.

Estado	Corriente de estado estable	Corriente transitoria
Sin termistor NTC	6.9333 A	20.2667 A
Con termistor NTC	6.8000 A	11.3333 A

Se obtuvo en promedio para los 12 halógenos una corriente transitoria de 11.4425 A con el termistor NTC y una corriente de estado estable promedio de 7.0245 A.

5.2 Prueba de temperatura de la recámara

Para comprobar la resistencia a la temperatura dentro de la recámara, se procedió a realizar una prueba de encendido de los halógenos durante cuatro minutos. Luego de cuatro minutos de operación se procedió a medir la temperatura en varias zonas del simulador empleando un termómetro infrarrojo ETC8380 con una sensibilidad de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $380\text{ }^{\circ}\text{C}$.

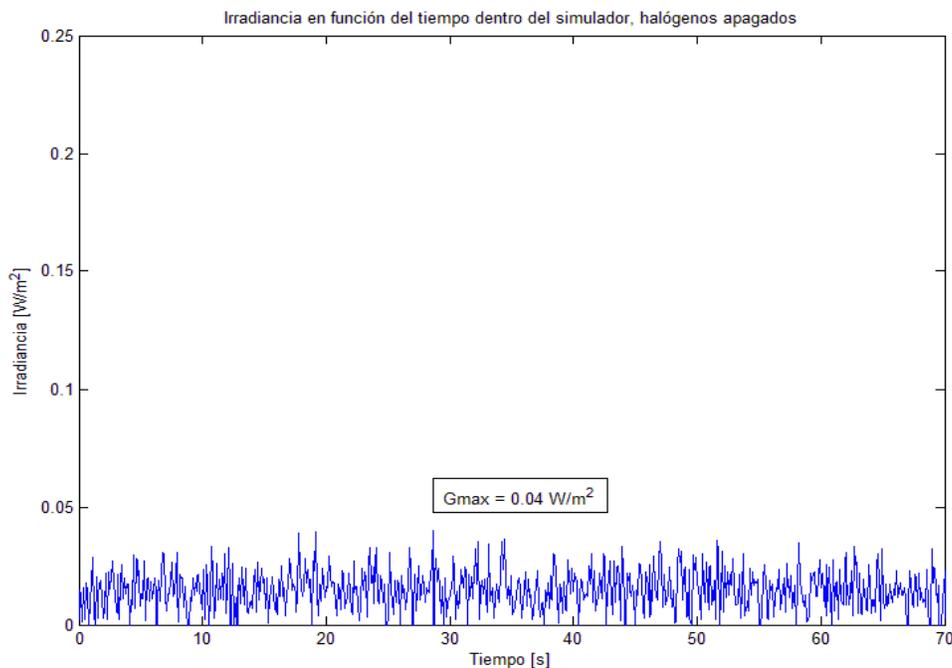
La primera zona en la que se midió la temperatura fue el reflector, en promedio los halógenos alcanzan una temperatura externa de hasta $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, en el reflector la temperatura máxima observable fue de $130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La segunda zona en que se midió la temperatura es la parte superior del simulador. En esa zona la temperatura promedio medida en los termistores NTC fue de $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura en las láminas de plyrock del techo no superaron los $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Finalmente, se midió la temperatura en el compartimento de las fuentes y la circuitería, en promedio la temperatura ronda los $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ en esta zona.

5.3 Simulador solar con tapa frontal

El primer resultado que se procedió a obtener es el sello que proporciona la recámara al simulador, esto es importante para evitar la fuga de irradiancia, así como la intrusión de irradiancia externa que pueda afectar el desempeño del simulador. La figura 5.2 muestra el nivel de irradiancia en función del tiempo dentro del panel totalmente sellado:



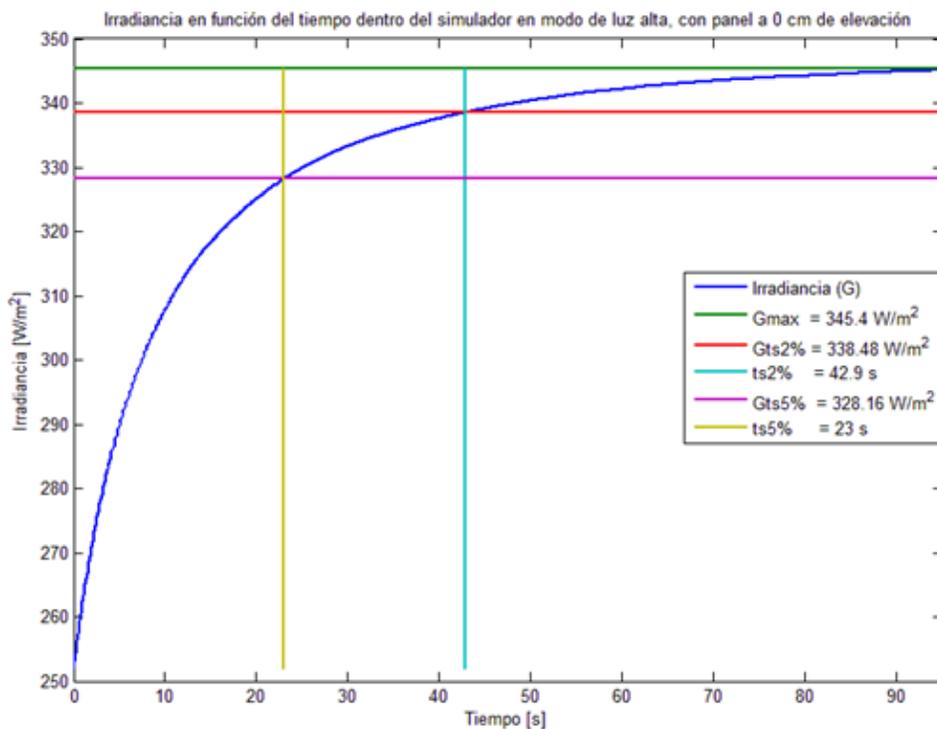
MATLAB

Figura 5.2 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador, halógenos apagados.

Nótese que la máxima irradiancia medida dentro del panel es de 40 mW/m^2 , lo cual demuestra que la recámara presenta un buen sello de irradiancia, el resultado ideal en este caso es 0 W/m^2 , sin embargo, una irradiancia tan baja no afectará las pruebas que se vayan a realizar en el simulador.

5.3.1 Modo de luz alta con el panel a 0 cm de elevación

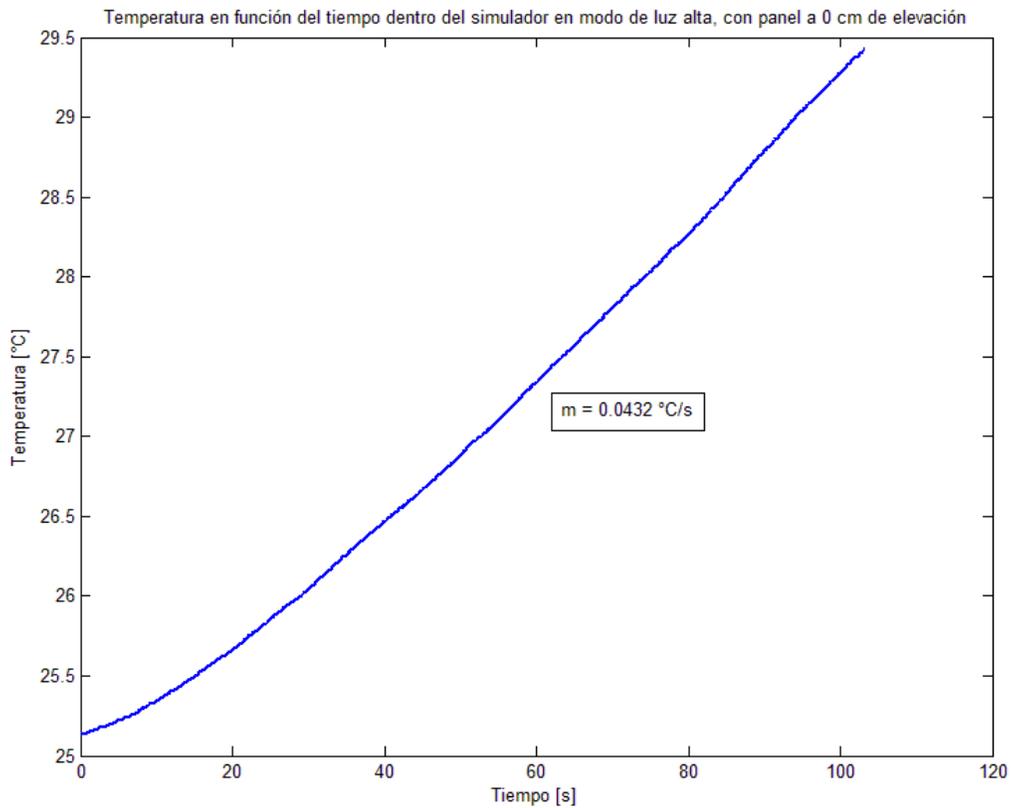
La figura 5.3 muestra la prueba de irradiancia en modo de luz alta, con el panel a 0 cm de elevación dentro del simulador, la gráfica detalla el punto máximo de irradiancia, el punto cuando la irradiancia alcanza el 98% de su valor máximo y el punto cuando la irradiancia alcanza el 95% de su valor máximo, así como los tiempos en que estos valores se alcanzaron.



MATLAB

Figura 5.3 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 0 cm de elevación.

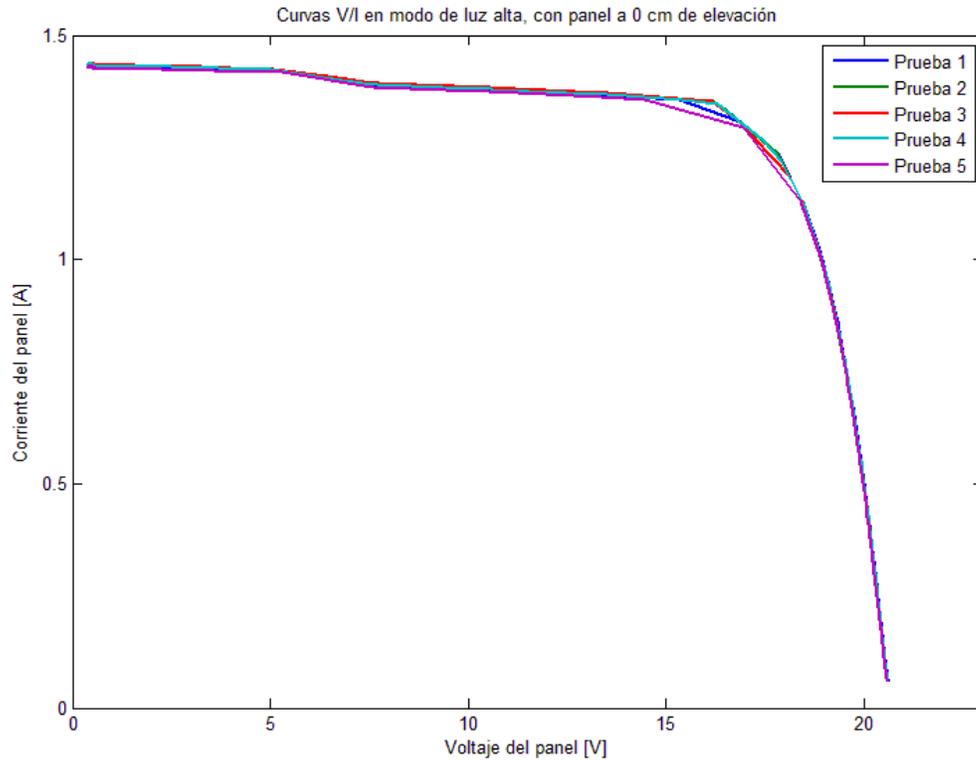
La figura 5.4 muestra los resultados obtenidos para la prueba del cambio de temperatura respecto al tiempo en el panel solar, nótese que la curva se asemeja mucho a una recta, utilizando la función Polyfit de MATLAB, se puede obtener la pendiente de la recta equivalente, esta pendiente representa la derivada de la temperatura respecto al tiempo e indica cuantos grados centígrados se calienta el panel por segundo.



MATLAB

Figura 5.4 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 0 cm de elevación.

Ahora, las curvas V/I y V/P obtenidas con el panel KC65T en este modo de operación se presentan en las figuras 5.5 y 5.6. Los archivos generados por el test bench para obtener estas graficas contienen demasiados puntos y no sería viable intentar incluirlos como tablas en este documento (se habla de en promedio unas 500 muestras por prueba). Los datos de incertidumbre obtenidos se resumen en la tabla 5.2.



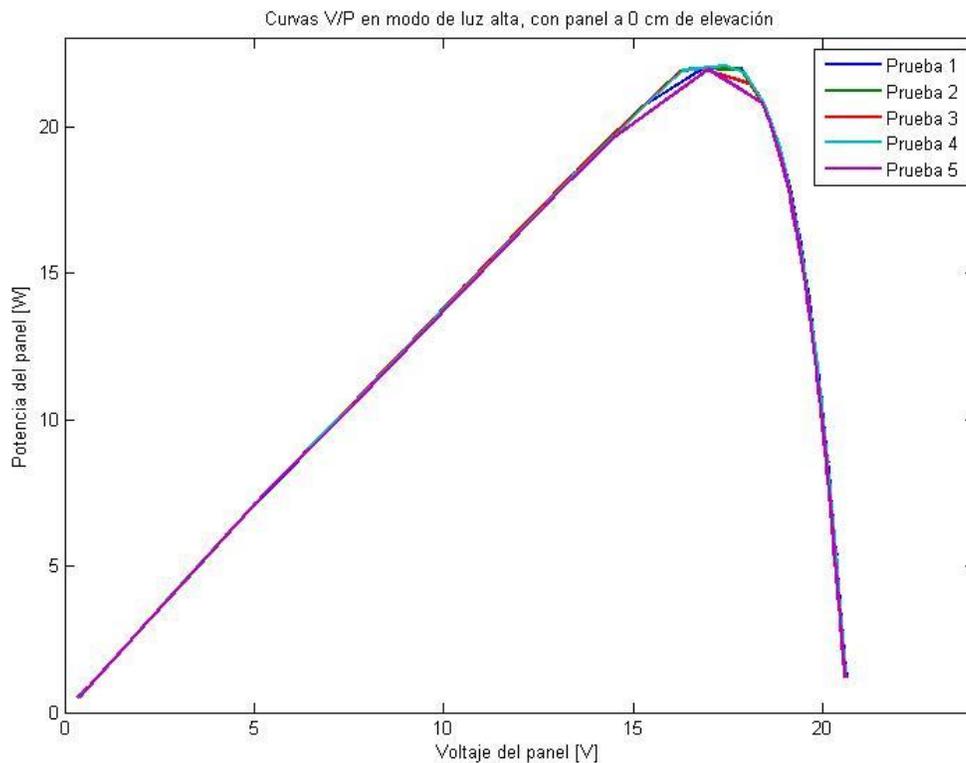
MATLAB

Figura 5.5 Curvas V/I en modo de luz alta, con panel a 0 cm de elevación.

Tabla 5.2 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta, con panel a 0 cm de elevación

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Irradiancia (W/m ²)	342.9001	0.4611	0.5918	342.9001 ± 0.5918	342.9001 ± 0.17%
Temperatura (°C)	27.6116	0.1272	0.1633	27.6116 ± 0.1633	27.6116 ± 0.96%
V _{mpp} (V)	16.8866	0.3291	0.4225	16.8866 ± 0.4225	16.8866 ± 2.5%
I _{mpp} (A)	1.3067	0.0234	0.0301	1.3067 ± 0.0301	1.3067 ± 2.3%
P _{mpp} (W)	22.0172	0.0467	0.0599	22.0172 ± 0.0599	22.0172 ± 0.27%

El modo de interpretar la tabla 5.2 y todas las tablas subsecuentes es el siguiente: los valores finales porcentuales representan la precisión en los datos del promedio de las 5 pruebas, estos valores tienen una exactitud estadística del 95.45%. Debido a esto, se puede concluir por ejemplo que, en modo de luz alta con el panel a 0 cm de elevación se garantiza un punto de máxima potencia de $22.0172 \pm 0.27\% \text{ W}$ en el 95.45% de los casos. La misma garantía aplica para las otras cantidades a excepción de la temperatura ya que esta depende de cuánto tiempo se el panel solar permanezca dentro del simulador. La temperatura se encuentra en estas tablas para demostrar que las pruebas fueron realizadas con un margen de error menor al 1% en la temperatura del panel entre ellas y así poder determinar que la temperatura no es un factor determinante en los resultados obtenidos.



MATLAB

Figura 5.6 Curvas V/P en modo de luz alta, con panel a 0 cm de elevación.

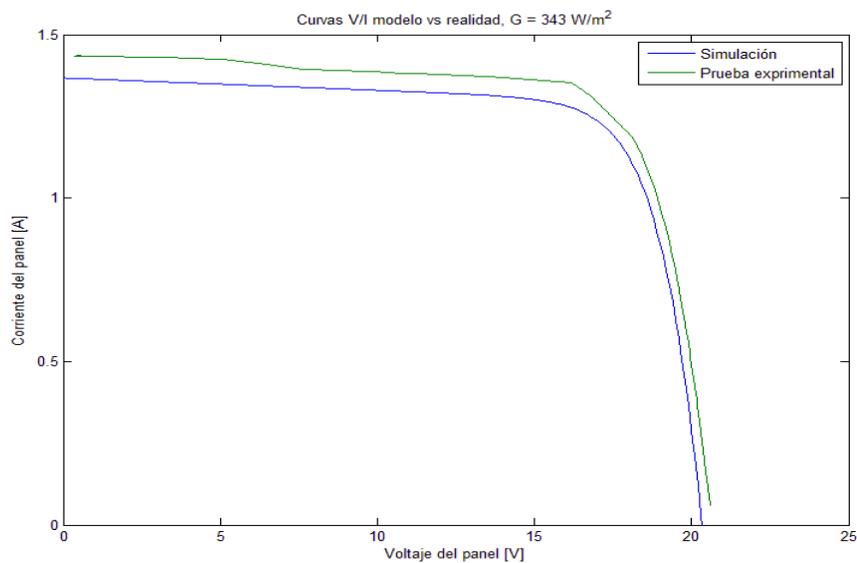
Ahora, un análisis de ingeniería no estaría completo sin una comparación a un ambiente simulado, para esto se obtuvo el modelo del panel KC65T. Primero se procedió a obtener las curvas V/I y V/P para una irradiancia de 343 W/m^2 , la figura 5.7 muestra los resultados del modelo en LTSpice. En el modelo, el punto de máxima potencia obtenido es: $V_{mpp} = 17.1000 \text{ V}$, $I_{mpp} = 1.2292 \text{ A}$ y $P_{mpp} = 21.0199 \text{ W}$ lo cual válida de cierta forma los datos obtenidos en la tabla 6.2, a pesar de que entre los datos existe un error del 4.75 %.



LTSpice

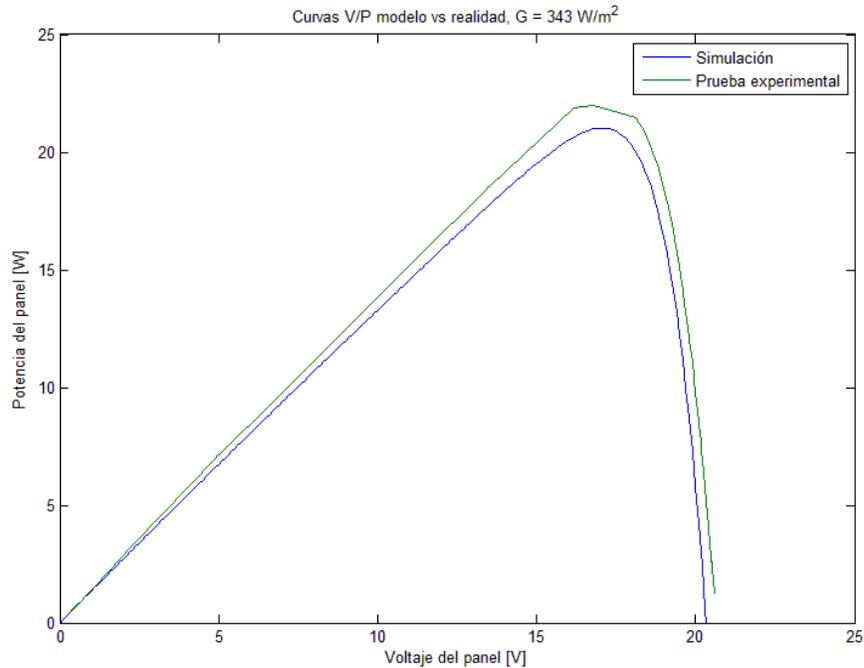
Figura 5.7 Curvas V/P y V/I a una irradiancia simulada de 343 W/m².

La figura 5.8 representa una comparación grafica entre una curva V/I obtenida experimentalmente y la del modelo del panel, la figura 5.9 es una comparación grafica de la curva V/P.



MATLAB

Figura 5.8 Curvas V/I , modelo vs prueba experimental, G = 343 W/m².



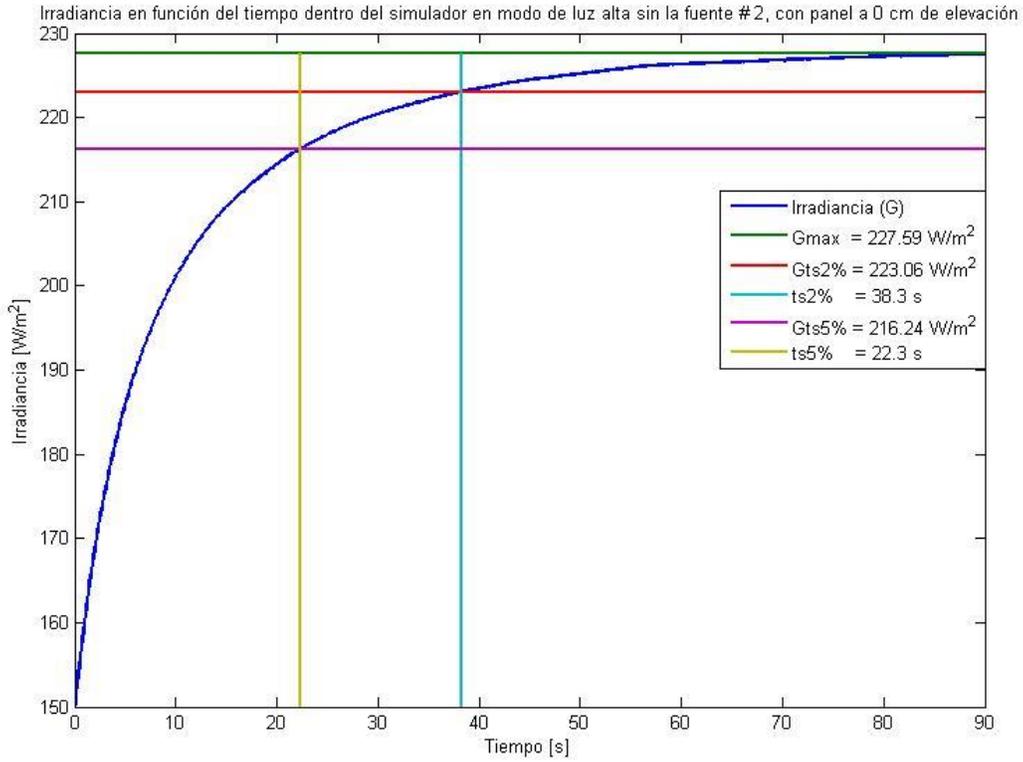
MATLAB

Figura 5.9 Curvas V/P , modelo vs prueba experimental, G = 343 W/m².

5.3.2 Modo de luz alta sin la fuente # 2, con el panel a 0 cm de elevación

La figura 5.10 muestra la prueba de irradiancia obtenida en modo de luz alta sin la fuente 2, Como puede observarse, al apagar la fuente # 2 y eliminar una columna de halógenos la irradiancia se reduce en un 34%.

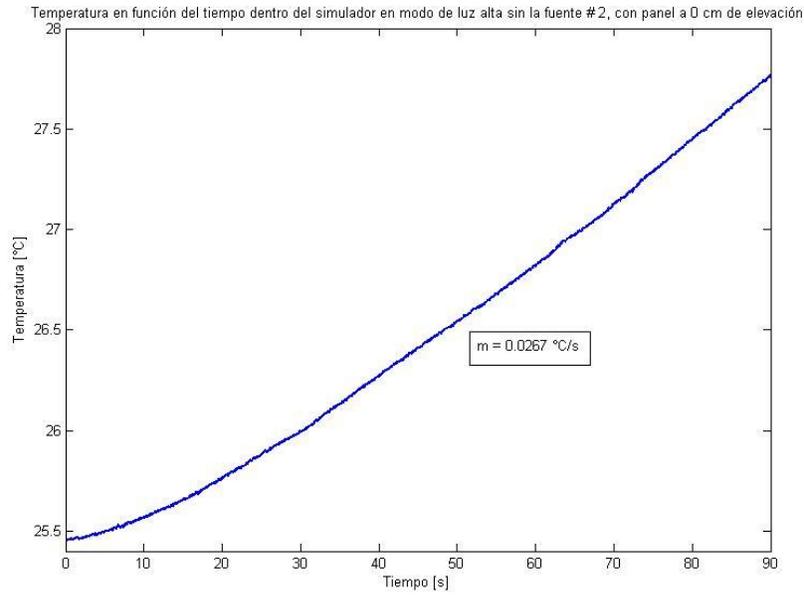
La figura 5.11 representa los resultados obtenidos para la temperatura del panel dentro del simulador en este modo de operación. Nótese que la pendiente de 0.0267 °C/s es un 38 % menor que su equivalente con todos los halógenos en luz alta, por lo que, el panel tardará más en calentarse en este modo.



MATLAB

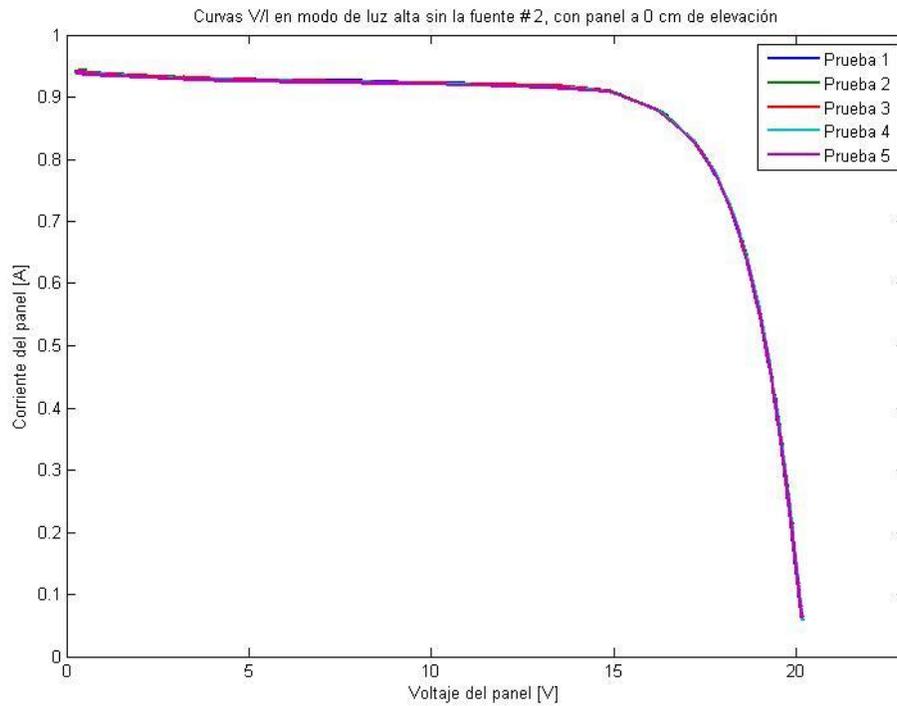
Figura 5.10 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 0 cm de elevación.

En la figura 5.12 se observan las curvas V/I obtenidas para este modo de operación, por otro lado, la figura 5.13 muestra las curvas V/P obtenidas de las 5 pruebas en este modo. Finalmente, la tabla 5.3 resume los datos más relevantes encontrados en este modo de operación.



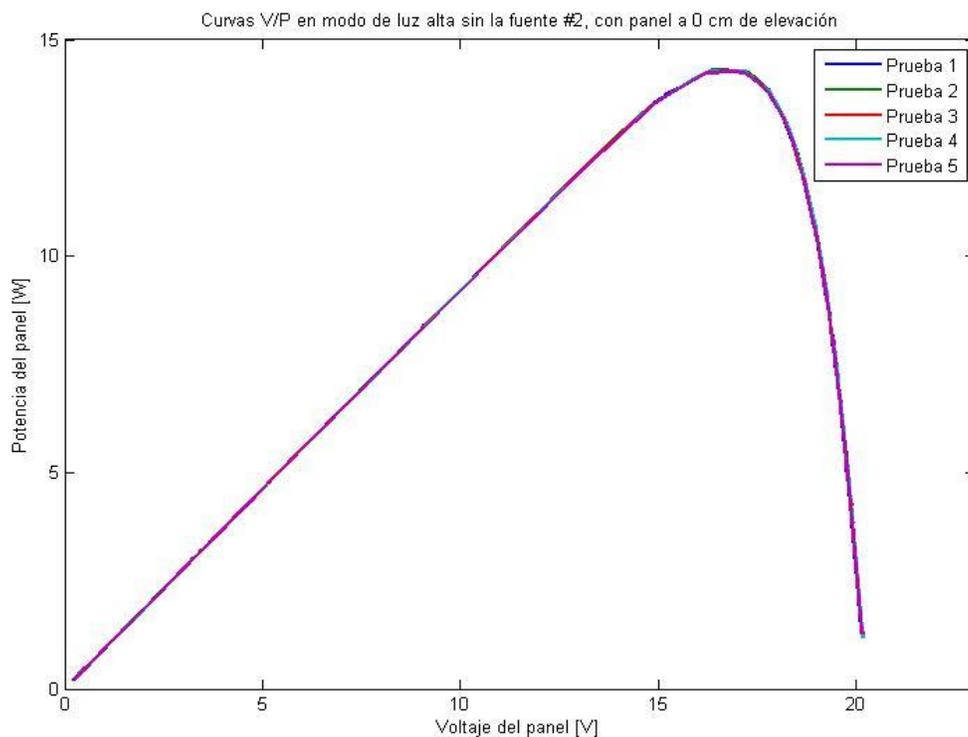
MATLAB

Figura 5.11 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 0 cm de elevación.



MATLAB

Figura 5.12 Curvas V/I en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 0 cm de elevación.



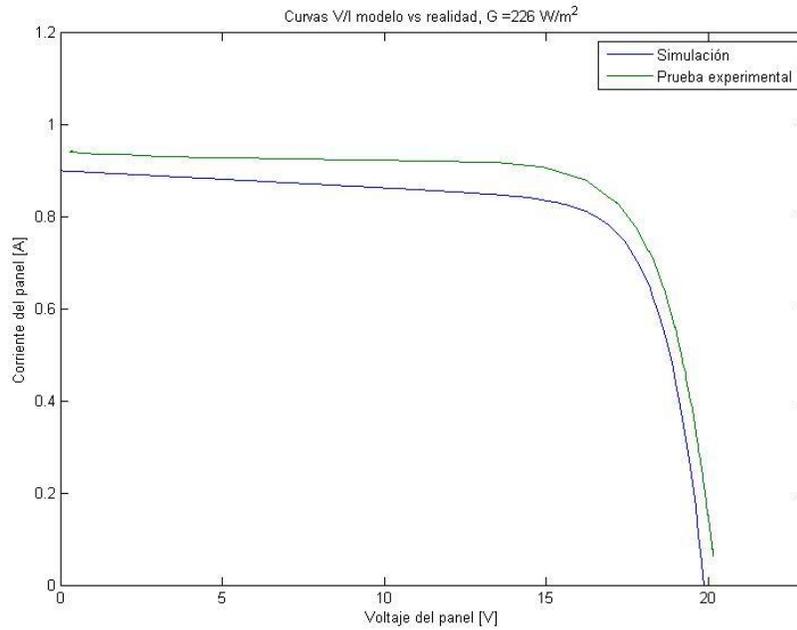
MATLAB

Figura 5.13 Curvas V/P en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 0 cm de elevación.

Tabla 5.3 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 0 cm de elevación.

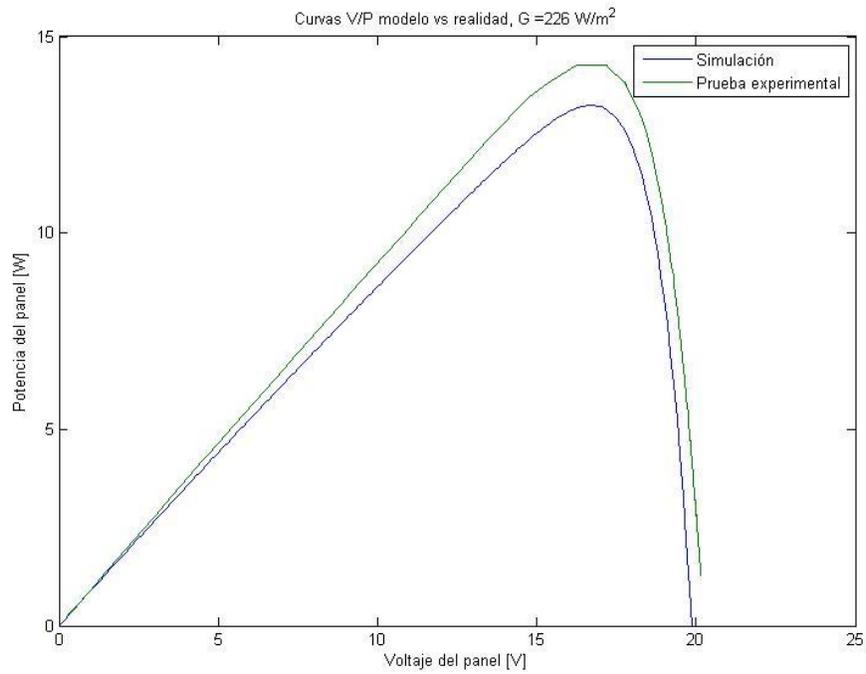
Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Irradiancia (W/m ²)	226.4282	0.2035	0.2612	226.4282 ± 0.2612	226.4282 ± 0.12%
Temperatura (°C)	27.3339	0.0600	0.0770	27.3339 ± 0.0770	27.3339 ± 0.28%
V _{mpp} (V)	16.3746	0.3302	0.4239	16.3746 ± 0.4239	16.3746 ± 2.6%
I _{mpp} (A)	0.8741	0.0168	0.0215	0.8741 ± 0.0215	0.8741 ± 2.4%
P _{mpp} (W)	14.2828	0.0184	0.0235	14.2828 ± 0.0235	14.2828 ± 0.16%

Una vez más, en las figuras 5.14 y 5.15 se comparan los datos obtenidos en la simulación contra los datos experimentales, el porcentaje de error es del 7%.



MATLAB

Figura 5.14 Curvas V/I , modelo vs prueba experimental, $G = 226 \text{ W/m}^2$.

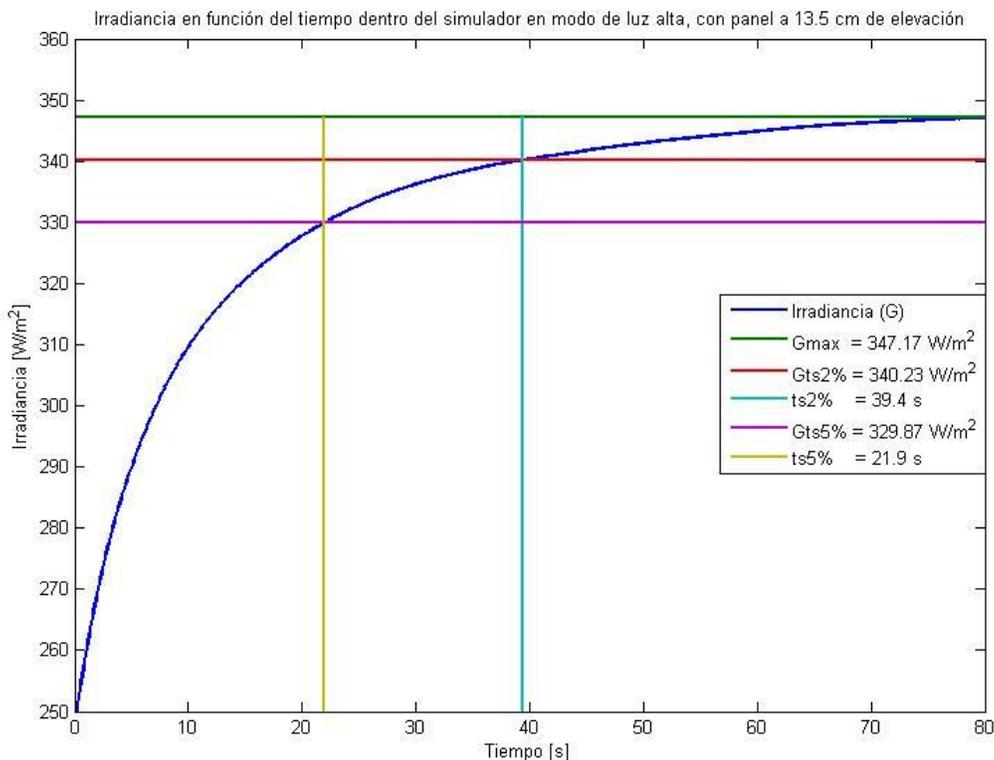


MATLAB

Figura 5.15 Curvas V/P , modelo vs prueba experimental, $G = 226 \text{ W/m}^2$.

5.3.3 Modo de luz alta, con el panel a 13.5 cm de elevación

La figura 5.16 muestra la prueba de irradiancia obtenida en modo de luz alta con el panel elevado a 13.5 cm dentro del simulador. El aumento en la irradiancia es despreciable, 0.57% sobre el panel a 0 cm de elevación.

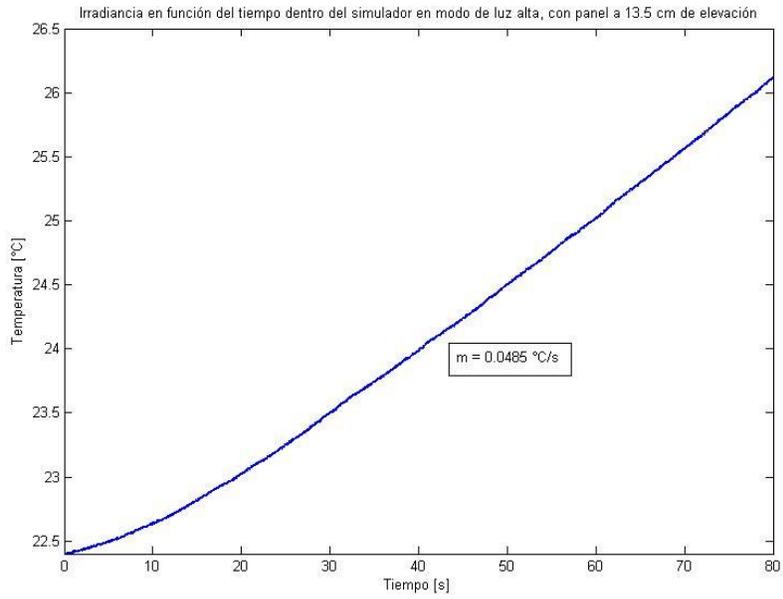


MATLAB

Figura 5.16 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 13.5 cm de elevación.

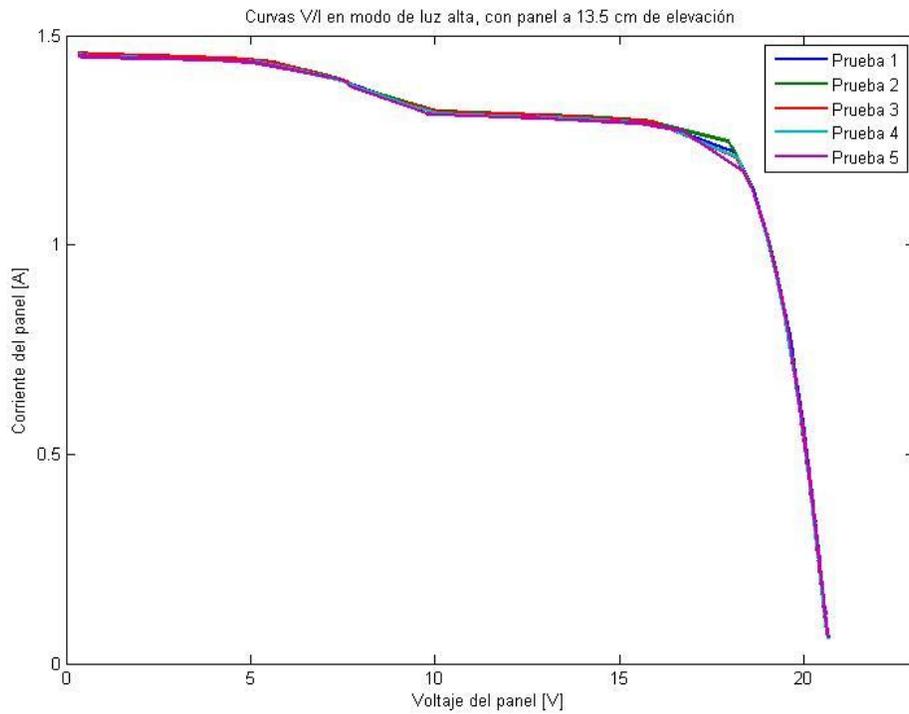
La figura 5.17 representa los resultados obtenidos para la temperatura del panel dentro del simulador en este modo de operación. La pendiente es un 12% mayor que su equivalente con todos los halógenos en luz alta a 0 cm.

En la figura 5.18 se observan las curvas V/I obtenidas para este modo de irradiancia, debido a su forma, se puede intuir que conforme se eleva el panel la no uniformidad de la irradiancia aumenta. Para corroborar esto, la figura 5.19 muestra las curvas V/P obtenidas de las 5 pruebas en este modo. Por la forma de las curvas cerca de los 7 V se puede apreciar que se comienza a formar un máximo local. La tabla 5.4 resume los datos más relevantes encontrados en este modo de operación.



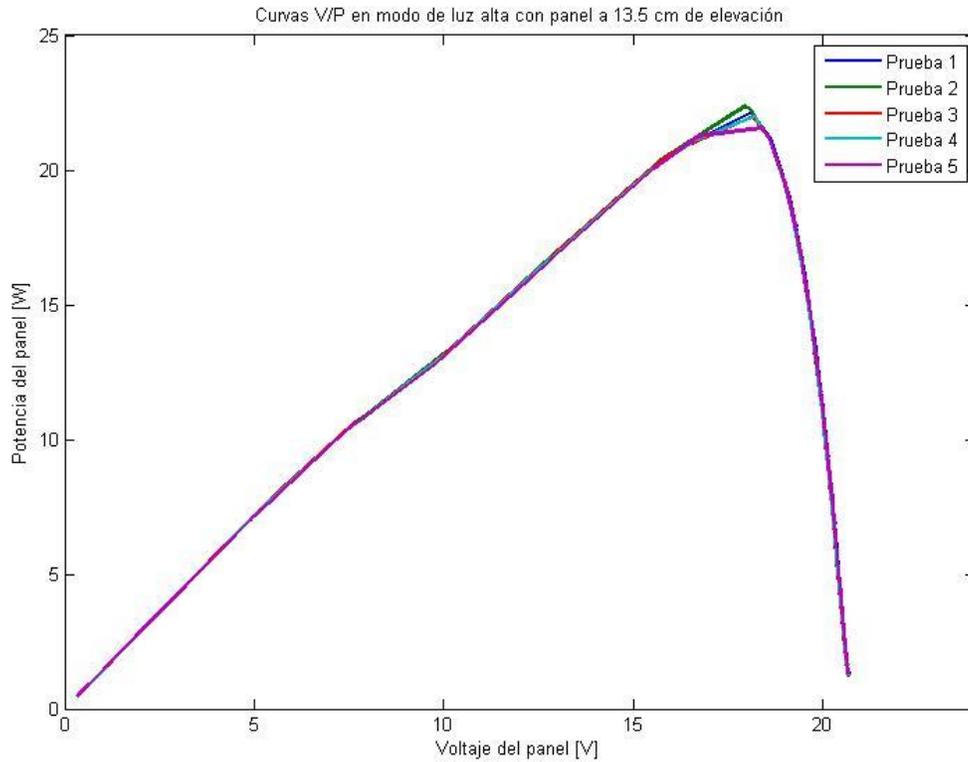
MATLAB

Figura 5.17 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 13.5 cm de elevación.



MATLAB

Figura 5.18 Curvas V/I en modo de luz alta , con panel a 13.5 cm de elevación.



MATLAB

Figura 5.19 Curvas V/P en modo de luz alta, con panel a 13.5cm de elevación.

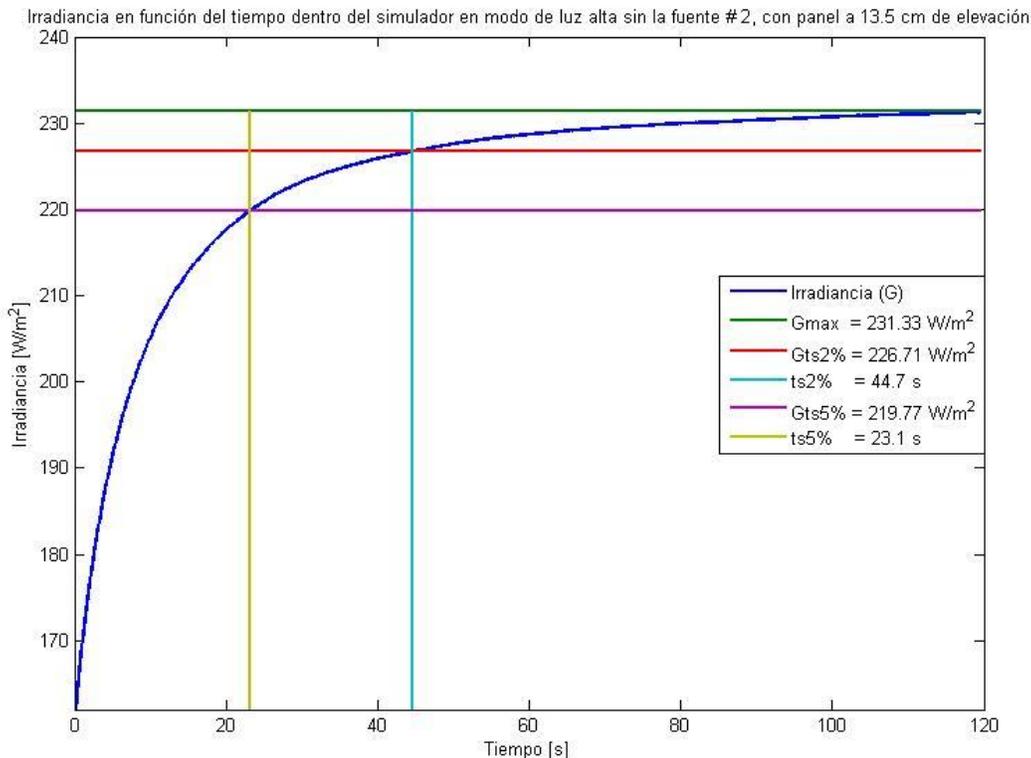
Tabla 5.4 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta, con panel a 13.5 cm de elevación.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Irradiancia (W/m²)	342.3321	0.8207	1.0534	342.3321 ± 1.0534	342.3321 ± 0.47%
Temperatura (°C)	27.6194	0.1182	0.1517	27.6194 ± 0.1517	27.6194 ± 0.55%
V_{mpp} (V)	18.1662	0.1618	0.2078	18.1662 ± 0.2078	18.1662 ± 1.1%
I_{mpp} (A)	1.2103	0.0271	0.0347	1.2103 ± 0.0347	1.2103 ± 2.9%
P_{mpp} (W)	21.9870	0.2984	0.3831	21.9870 ± 0.3831	21.9870 ± 1.7%

Como la irradiancia se mantuvo al mismo nivel que con el panel a 0 cm, no es necesario volver a simular, el error en el punto de máxima potencia es del 4.6 % respecto a la simulación realizada para el panel a 0 cm la cual se realizó con una irradiancia de 342 W/m².

5.3.4 Modo de luz alta sin la fuente # 2, con el panel a 13.5 cm de elevación

La figura 5.20 muestra la prueba de irradiancia en modo de luz alta sin la fuente # 2 con el panel elevado a 13.5 cm dentro del simulador. El aumento en la irradiancia es despreciable, 1.64% respecto a la prueba a 0 cm de elevación en el mismo modo de operación.

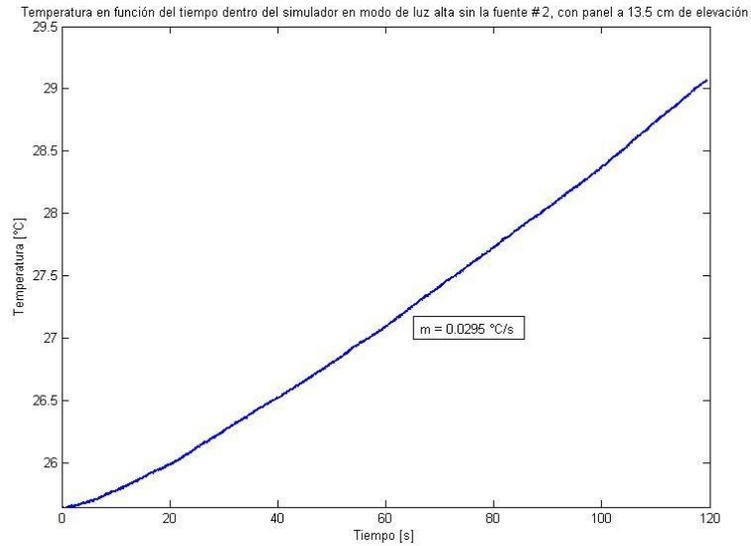


MATLAB

Figura 5.20 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 13.5 cm de elevación.

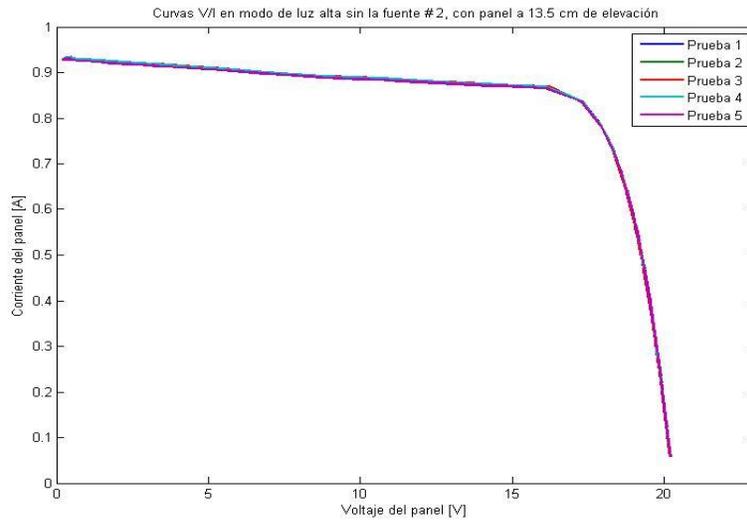
La figura 5.21 representa los resultados obtenidos para la temperatura del panel dentro del simulador en este modo de operación. La pendiente de 0.0295 $^{\circ}\text{C/s}$ es un 6.74% mayor que su equivalente a 0 cm. Esto demuestra que elevar el panel aumenta la temperatura debido a que hay una menor masa de aire entre el panel y los halógenos.

En la figura 5.22 se observan las curvas V/I obtenidas para este modo de operación, la figura 5.23 muestra las curvas V/P equivalentes. Las curvas obtenidas muestran una no uniformidad de la irradiancia muy baja, analizando la figura se puede esperar una muy baja incertidumbre. La tabla 5.5 resume las características encontradas en este modo de operación.



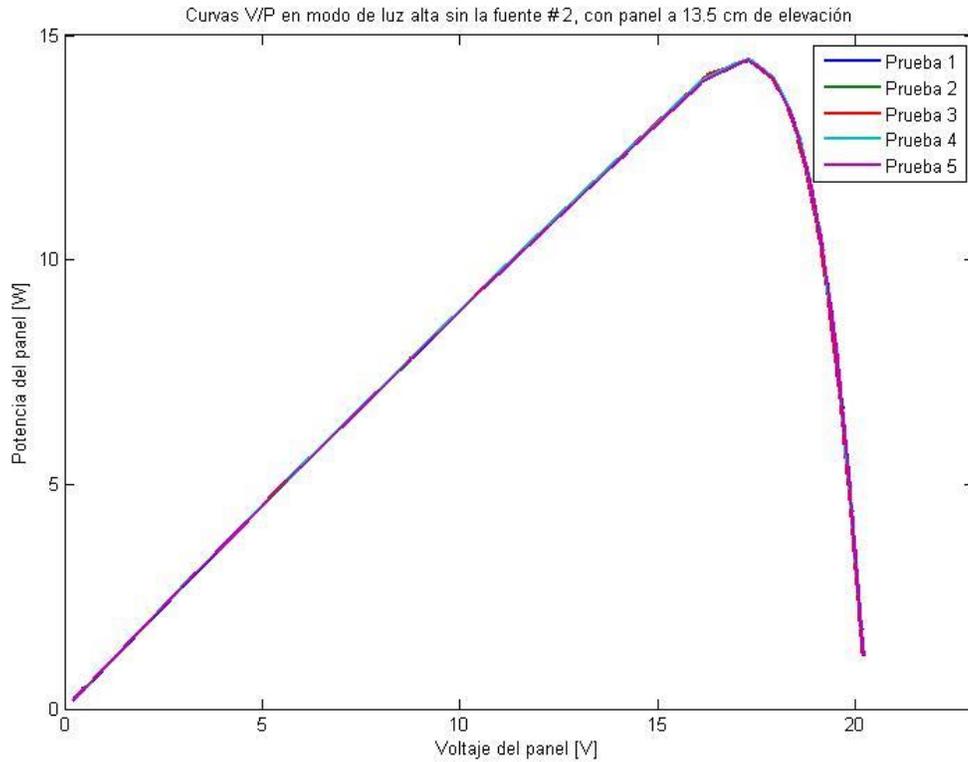
MATLAB

Figura 5.21 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 13.5 cm de elevación.



MATLAB

Figura 5.22 Curvas V/I en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 13.5 cm de elevación.



MATLAB

Figura 5.23 Curvas V/P en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 13.5cm de elevación.

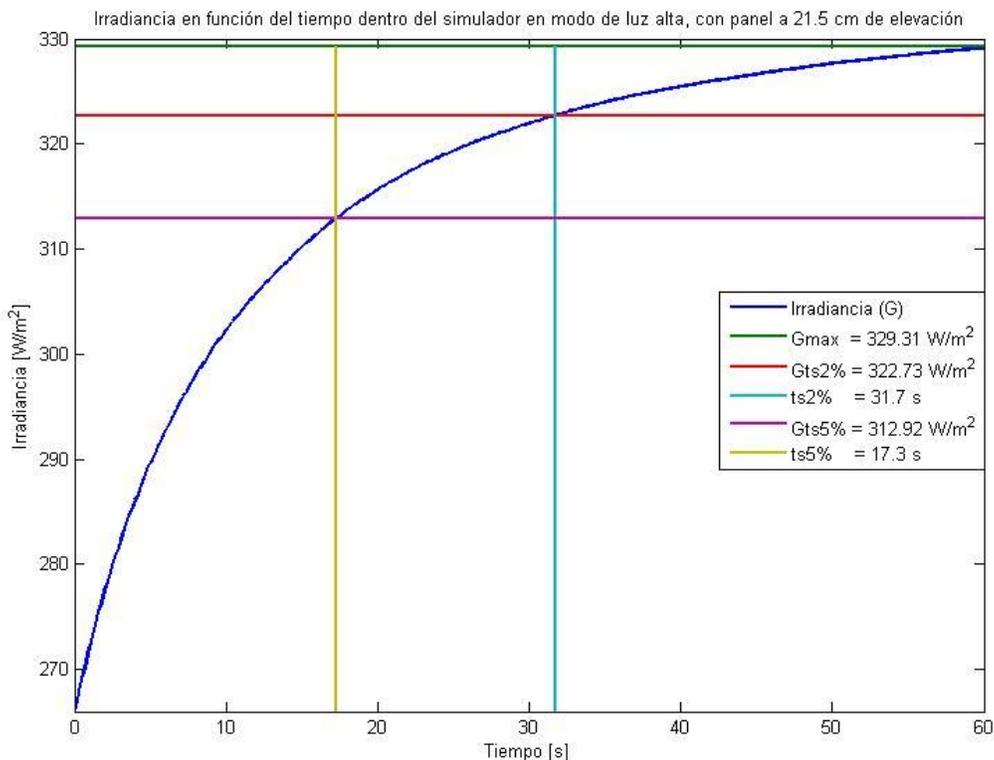
Tabla 5.5 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 13.5 cm de elevación.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Irradiancia (W/m ²)	230.6436	0.8476	1.0879	230.6436 ± 1.0879	230.6436 ± 0.47%
Temperatura (°C)	27.3104	0.0447	0.0574	27.3104 ± 0.0574	27.3104 ± 0.21%
V _{mpp} (V)	17.3064	0.0212	0.0273	17.3064 ± 0.0273	17.3064 ± 0.16%
I _{mpp} (A)	0.8358	0.0011	0.0014	0.8358 ± 0.0014	0.8358 ± 0.17%
P _{mpp} (W)	14.4601	0.0141	0.0181	14.4601 ± 0.0181	14.4601 ± 0.13%

El porcentaje de error respecto a la simulación es de un 7.08% para este modo de operación.

5.3.5 Modo de luz alta, con el panel a 21.5 cm de elevación

La figura 5.24 muestra la prueba de irradiancia en modo de luz alta con el panel elevado a 21.5 cm dentro del simulador. Se encontró una reducción del 5% en los niveles de irradiancia al subir el panel a 21.5 cm.

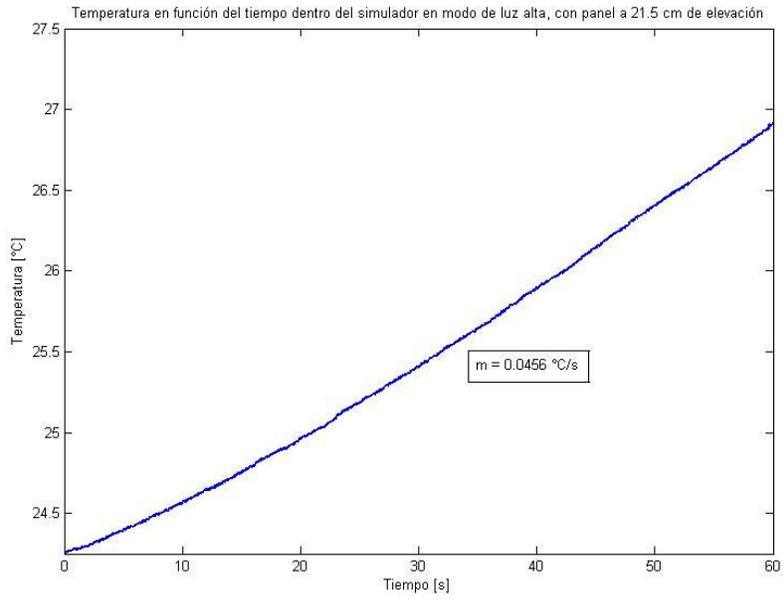


MATLAB

Figura 5.24 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 21.5 cm de elevación.

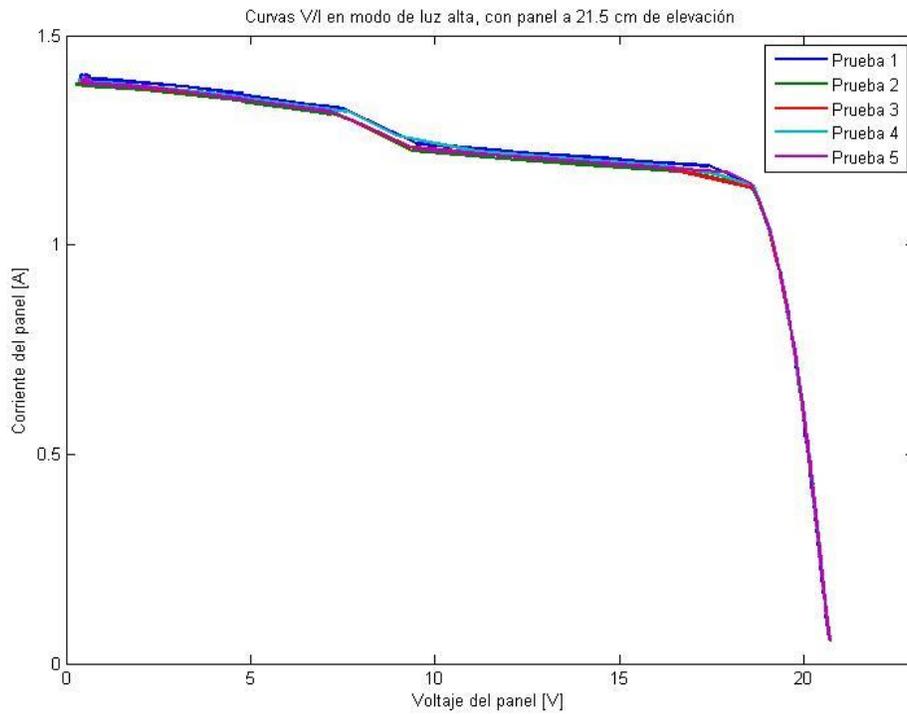
La figura 5.25 representa los resultados obtenidos para la temperatura del panel dentro del simulador en este modo de operación. La pendiente es un 6% menor que su equivalente con todos los halógenos en luz alta a 13.5 cm.

En la figura 5.26 se observan las curvas V/I obtenidas para este modo de operación, la figura 5.27 muestra las curvas V/P obtenidas en este modo. Se espera en la tabla 5.6, valores 5% menores a los obtenidos para la elevación de 13.5 cm.



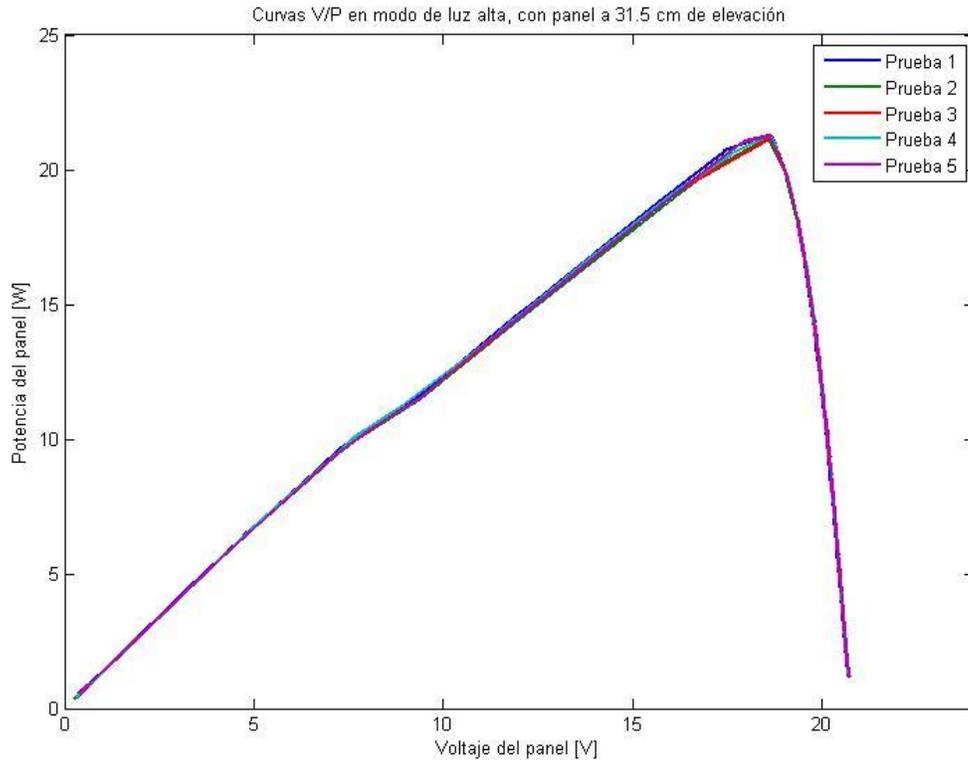
MATLAB

Figura 5.25 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 21.5 cm de elevación.



MATLAB

Figura 5.26 Curvas V/I en modo de luz alta, con panel a 21.5 cm de elevación.



MATLAB

Figura 5.27 Curvas V/P en modo de luz alta, con panel a 21.5 cm de elevación.

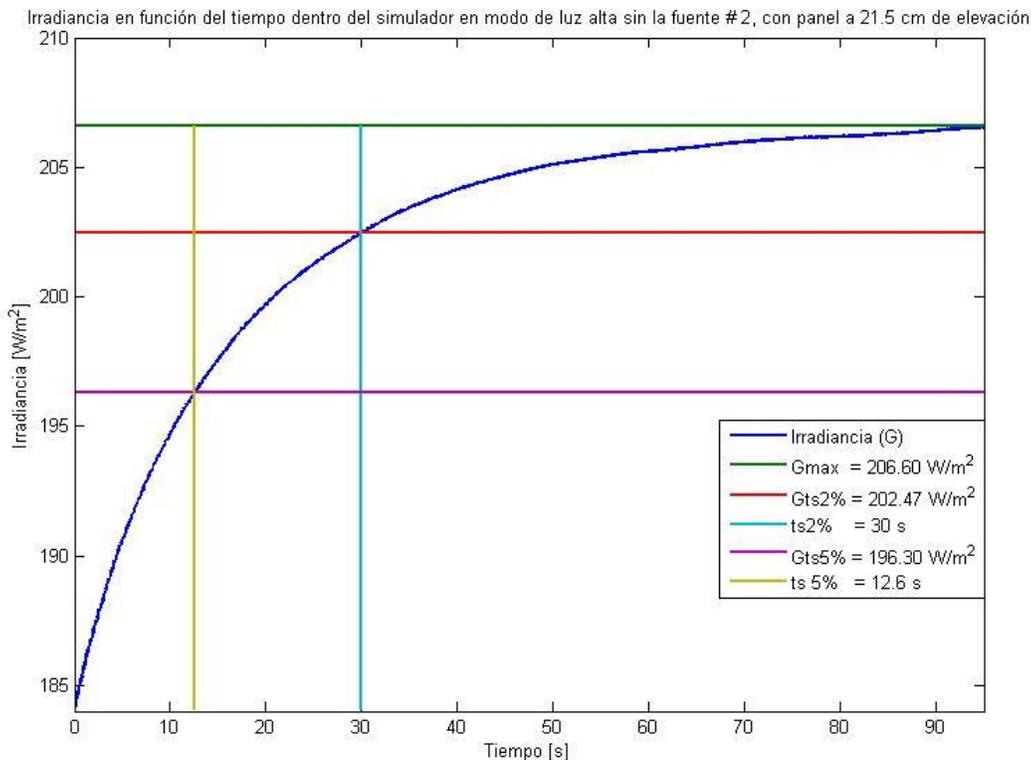
Tabla 5.6 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta, con panel a 21.5 cm de elevación.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Irradiancia (W/m ²)	327.4963	1.6538	2.1226	327.4963 ± 2.1226	327.4963 ± 0.65%
Temperatura (°C)	27.6214	0.0633	0.0812	27.6214 ± 0.0812	27.6214 ± 0.29%
V _{mpp} (V)	18.6331	0.0351	0.0451	18.6331 ± 0.0451	18.6331 ± 0.24%
I _{mpp} (A)	1.1415	0.0024	0.0032	1.1415 ± 0.0032	1.1415 ± 0.28%
P _{mpp} (W)	21.2595	0.0359	0.0462	21.2595 ± 0.0462	21.2595 ± 0.22%

Al simular con una irradiancia de 327 W/m² se encuentra para el modelo: V_{mpp} = 17.000 V, I_{mpp} = 1.1736 A y P_{mpp} = 19.9516 W de potencia para un error del 6.5% entre el modelo y la prueba experimental. Se omiten las comparaciones gráficas.

5.3.6 Modo de luz alta sin la fuente # 2, con el panel a 21.5 cm de elevación

La figura 5.28 muestra la prueba de irradiancia en modo de luz alta con el panel elevado a 21.5 cm dentro del simulador. nuevamente la irradiancia decae a pesar de haber acercado el panel a los halógenos, 10.7% menos respecto a la prueba a 13.5 cm de elevación en el mismo modo de operación.

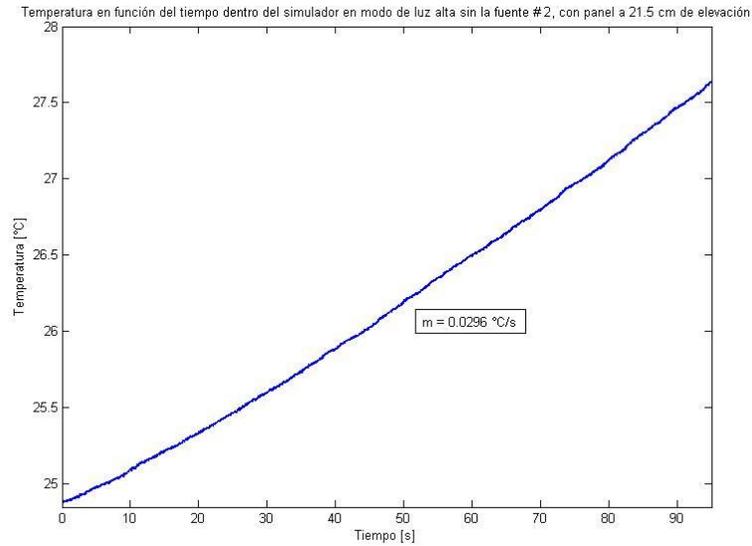


MATLAB

Figura 5.28 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 21.5 cm de elevación.

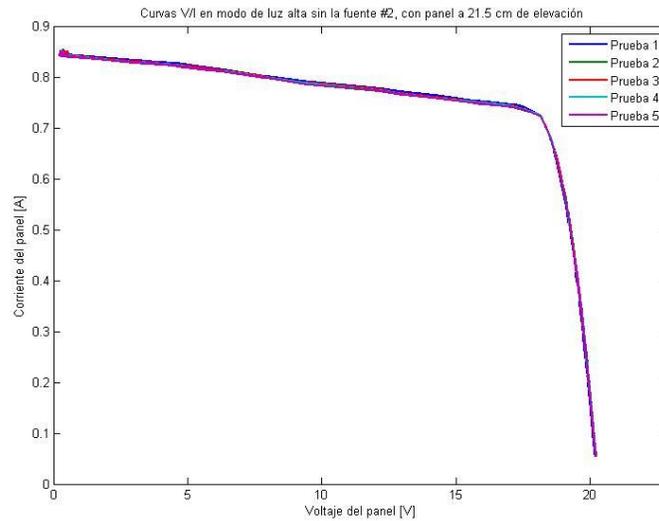
La figura 5.29 representa los resultados obtenidos para la temperatura del panel dentro del simulador en este modo de operación. La pendiente de 0.0296 °C/s es un 0.33% mayor que su equivalente a 13.5 cm, lo cual es esperable.

En la figura 5.30 se observan las curvas V/I obtenidas para este modo de operación. La forma ideal de las curvas se pierde un poco, indicando que ya a esta altura incluso en este modo de operación, comienza a haber diferencias en la distribución de irradiancia. Para confirmar esto, la figura 6.31 muestra las curvas V/P. Una comparación a simple vista respecto a la figura 5.23 confirma que la distribución de irradiancia en este modo no es tan buena como a 0 cm o a 13.5 cm. La tabla 5.7 resume los resultados obtenidos para este modo.



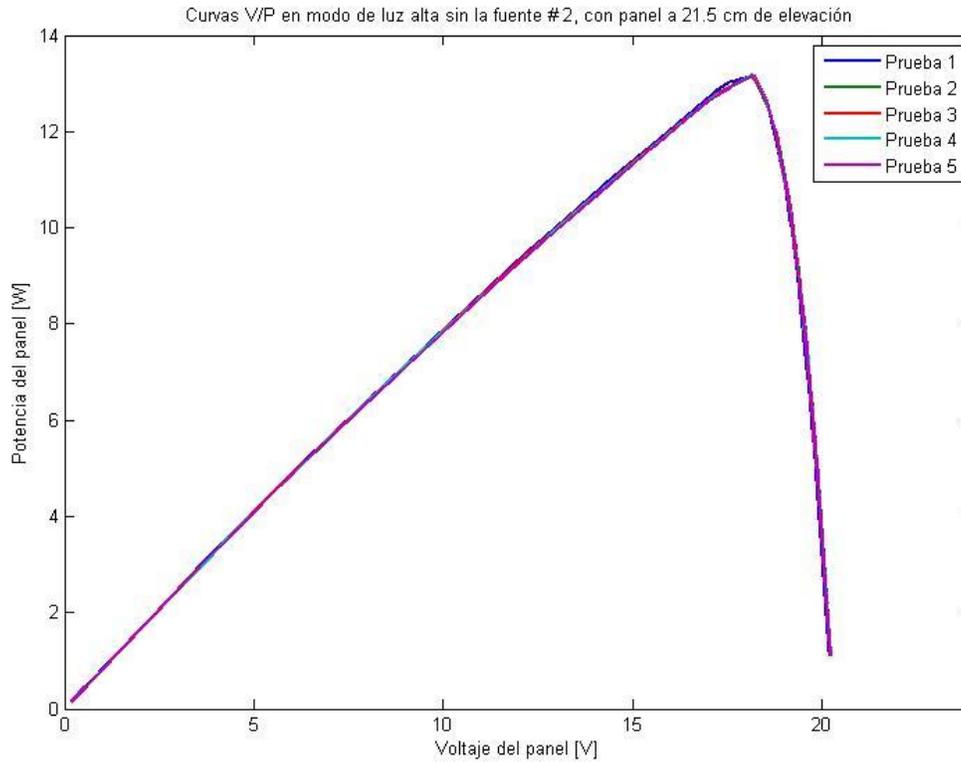
MATLAB

Figura 5.29 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 21.5 cm de elevación.



MATLAB

Figura 5.30 Curvas V/I en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 21.5 cm de elevación.



MATLAB

Figura 5.31 Curvas V/P en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 21.5 cm de elevación.

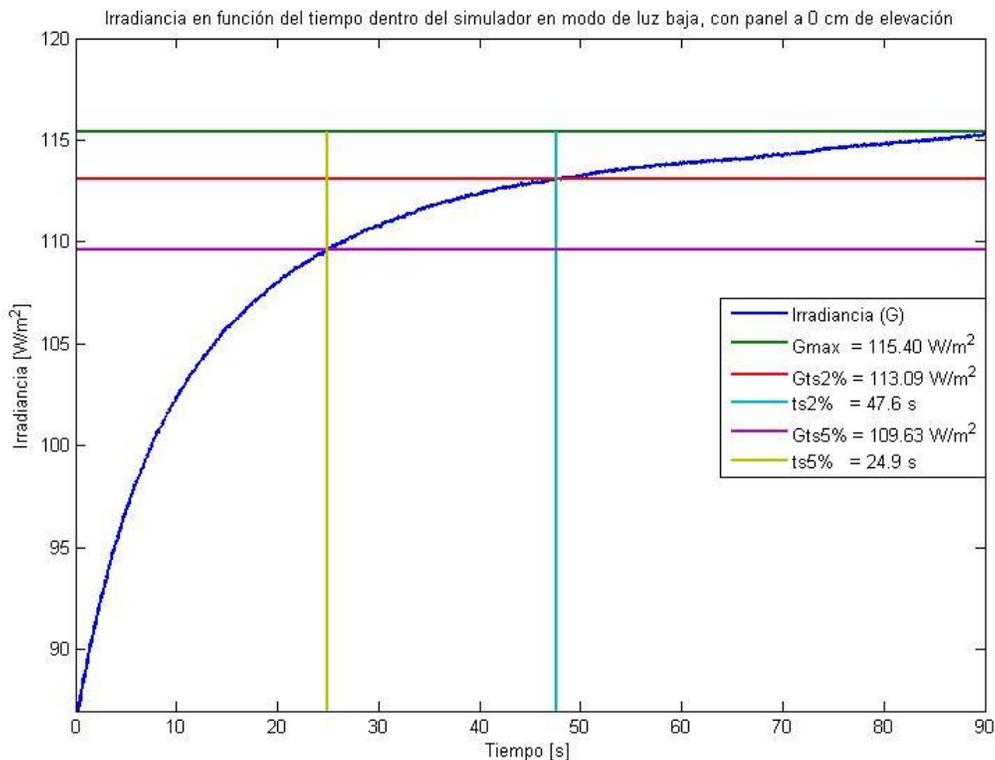
Tabla 5.7 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 21.5 cm de elevación.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Irradiancia (W/m²)	205.3216	0.4335	0.5564	205.3216 ± 0.5564	205.3216 ± 0.27%
Temperatura (°C)	27.3225	0.0433	0.0555	27.3225 ± 0.0555	27.3225 ± 0.20%
V_{mpp} (V)	18.1584	0.0082	0.0106	18.1584 ± 0.0106	18.1584 ± 0.06%
I_{mpp} (A)	0.7259	0.0007	0.0009	0.7259 ± 0.0009	0.7259 ± 0.12%
P_{mpp} (W)	13.1808	0.0117	0.0149	13.1808 ± 0.0149	13.1808 ± 0.11%

Al simular con una irradiancia de 205 W/m² se encuentra para el modelo: V_{mpp} = 16.6000 V, I_{mpp} = 0.71485 A y P_{mpp} = 11.8664 W de potencia para un error del 11 % entre el modelo y la prueba experimental. Se omiten las comparaciones gráficas.

5.3.7 Modo de luz baja, con el panel a 0 cm de elevación

La figura 5.32 muestra la prueba de irradiancia que se obtuvo en modo de luz baja con el panel a 0 cm dentro del simulador. Cabe mencionar que esta es la única grafica de irradiancia que se expondrá en para el modo de luz baja. La razón de esto es la siguiente: como se observa en la figura 4.1, las pruebas se realizan con un solo sensor de irradiancia. En el modo de luz baja la distribución de la irradiancia es extremadamente irregular (en el buen sentido ya que esto provoca sombreado parcial en el panel sin necesidad de cubrir algunas de sus celdas) y por lo tanto la información de un sensor no dice mucho de lo que está ocurriendo en este modo de operación, por lo tanto solo en esta ocasión se dispondrá la gráfica de irradiancia vs tiempo para corroborar que el comportamiento es similar a los modos anteriores, el panel tarda unos 30 s en alcanzar su nivel estable de irradiancia.

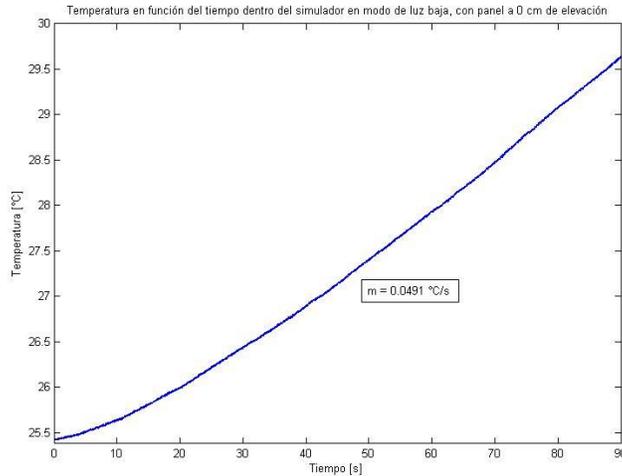


MATLAB

Figura 5.32 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 0 cm de elevación.

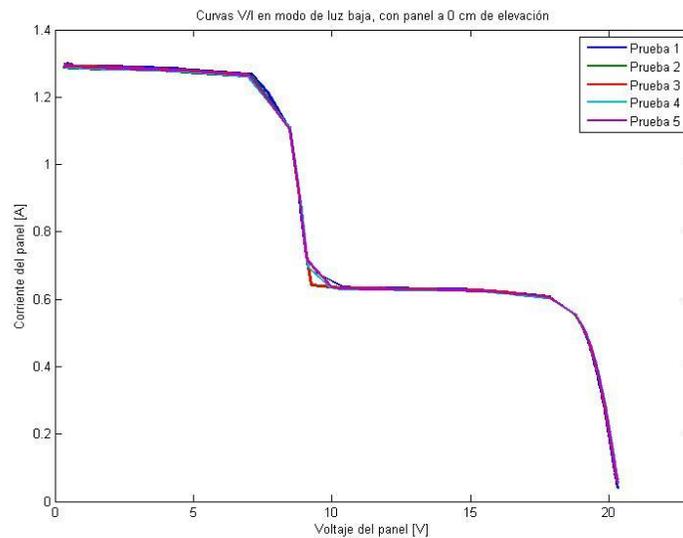
La figura 5.33 representa los resultados obtenidos para la temperatura del panel dentro del simulador en este modo de operación. La pendiente de 0.0491 °C/s. Similar a las pendientes obtenidas en luz alta.

En la figura 5.34 se observan las curvas V/I obtenidas. Acá es donde este modo de operación es interesante de analizar. Lo que está sucediendo con la irradiancia es que es alta en algunas columnas de celdas y baja en otras. Esto ocasiona la formación de máximos locales como se demuestra en la figura 5.35. La tabla 5.8 resume los resultados obtenidos para este modo.



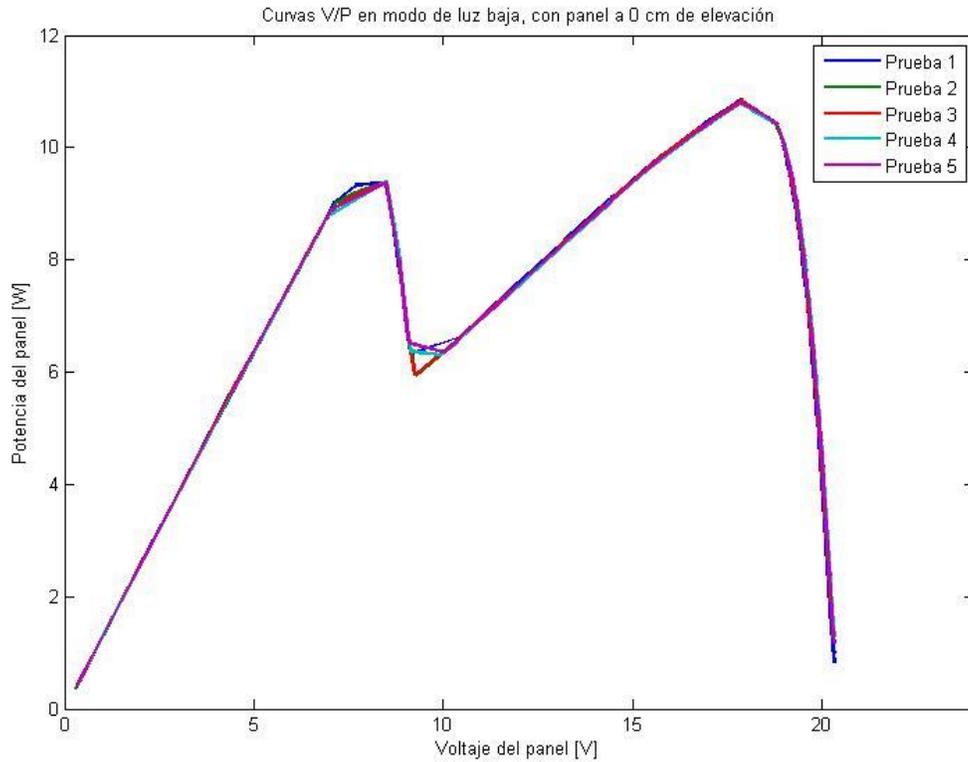
MATLAB

Figura 5.33 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 0 cm de elevación.



MATLAB

Figura 5.34 Curvas V/I en modo de luz baja con panel a 0 cm de elevación.



MATLAB

Figura 5.35 Curvas V/P en modo de luz baja, con panel a 0 cm de elevación.

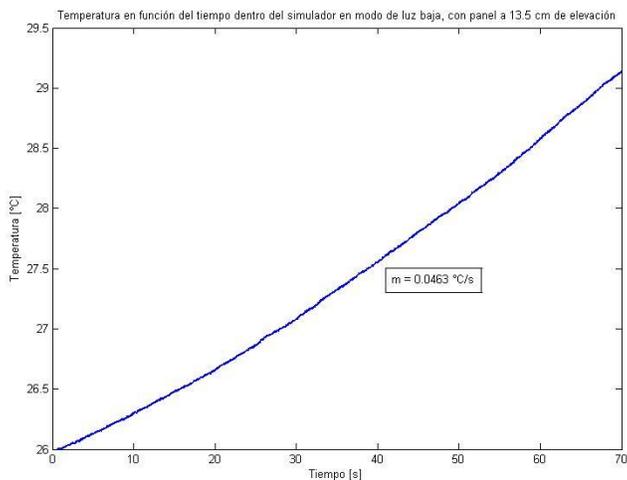
Tabla 5.8 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz baja, con panel a 0 cm de elevación.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Temperatura (°C)	27.4761	0.1707	0.2191	27.4761 ± 0.2191	$27.4761 \pm 0.79\%$
V _{mpp1} (V)	8.4706	0.0117	0.0149	8.4706 ± 0.0149	$8.4706 \pm 0.17\%$
I _{mpp1} (A)	1.1106	0.0027	0.0034	1.1106 ± 0.0034	$1.1106 \pm 0.31\%$
P _{mpp1} (W)	9.4126	0.0184	0.0235	9.4126 ± 0.0235	$9.4126 \pm 0.25\%$
V _{mpp2} (V)	17.8522	0.0367	0.0470	17.8522 ± 0.0470	$17.8522 \pm 0.26\%$
I _{mpp2} (A)	0.6062	0.0008	0.0011	0.6062 ± 0.0011	$0.6062 \pm 0.19\%$
P _{mpp2} (W)	10.8138	0.0334	0.0428	10.8138 ± 0.0428	$10.8138 \pm 0.39\%$

Debido a la arquitectura del modelo del panel (el modelo es una gran celda), no se puede simular un escenario de sombreado parcial.

5.3.8 Modo de luz baja, con el panel a 13.5 cm de elevación

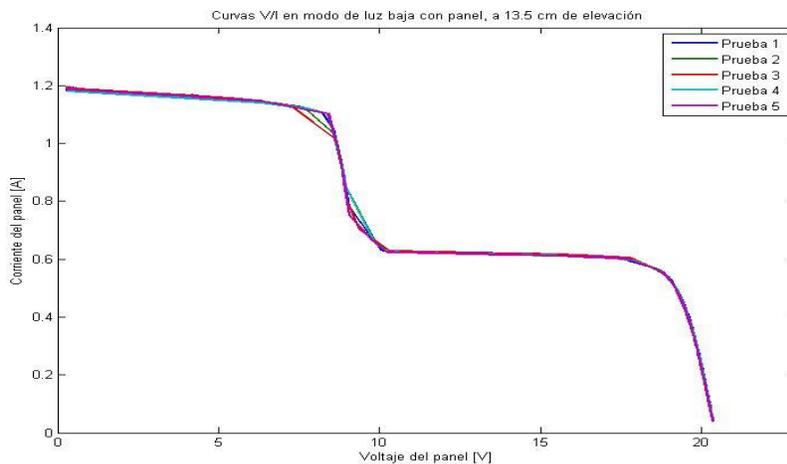
La figura 5.36 representa los resultados obtenidos para la temperatura del panel dentro del simulador en este modo de operación. La pendiente de $0.0463\text{ }^{\circ}\text{C/s}$.



MATLAB

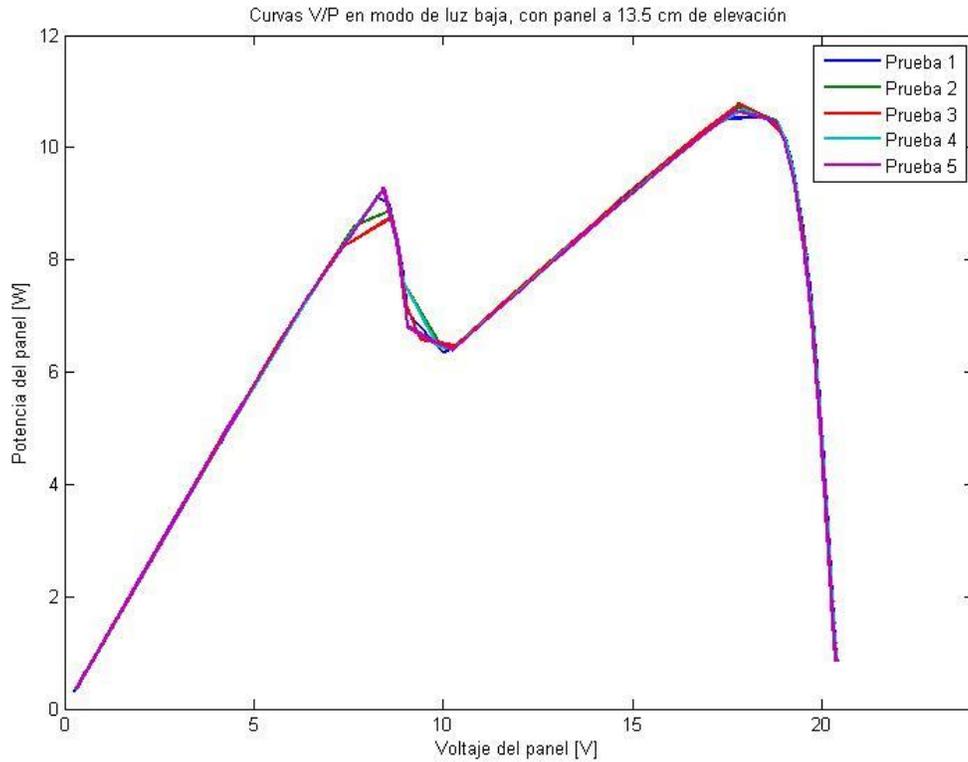
Figura 5.36 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 13.5 cm de elevación.

En la figura 5.37 se observan las curvas V/I que se obtuvieron para este modo de operación, en la figura 5.38 se observan las curvas V/P obtenidas. La tabla 5.9 resume los resultados obtenidos para este modo.



MATLAB

Figura 5.37 Curvas V/I en modo de luz baja con panel a 13.5 cm de elevación.



MATLAB

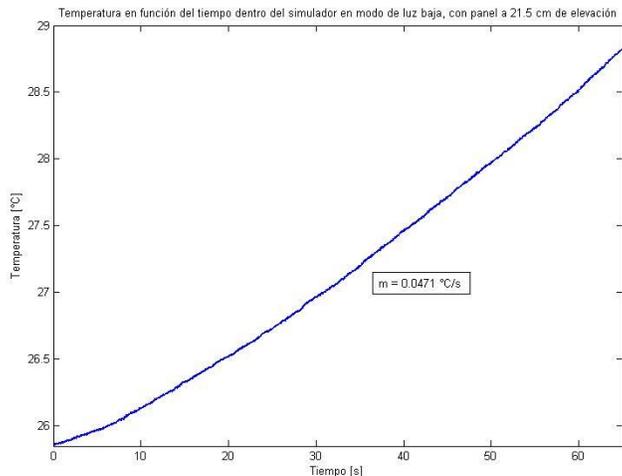
Figura 5.38 Curvas V/P en modo de luz baja, con panel a 13.5 cm de elevación.

Tabla 5.9 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz baja, con panel a 13.5 cm de elevación.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Temperatura (°C)	27.6058	0.0873	0.1120	27.6058 ± 0.1120	$27.6058 \pm 0.41\%$
Vmpp1 (V)	8.4244	0.1640	0.2104	8.4244 ± 0.2104	$8.4244 \pm 2.5\%$
Impp1(A)	1.1019	0.0445	0.0571	1.1019 ± 0.0571	$1.1019 \pm 5.18\%$
Pmpp1 (W)	9.1271	0.2337	0.2999	9.1271 ± 0.2999	$9.1271 \pm 3.28\%$
Vmpp2 (V)	17.7891	0.3207	0.4115	17.7891 ± 0.4115	$17.7891 \pm 2.31\%$
Impp2 (A)	0.6030	0.0145	0.0187	0.6030 ± 0.0187	$0.6030 \pm 3.1\%$
Pmpp2 (W)	10.6900	0.0853	0.1096	10.6900 ± 0.1096	$10.6900 \pm 1\%$

5.3.9 Modo de luz baja, con el panel a 21.5 cm de elevación

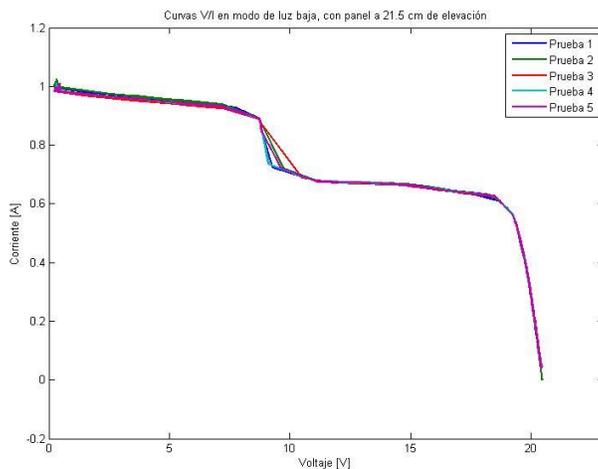
La figura 5.39 representa los resultados obtenidos para la temperatura del panel dentro del simulador en este modo de operación. La pendiente de $0.0471 \text{ }^\circ\text{C/s}$. Aumenta un 2% respecto al modo anterior.



MATLAB

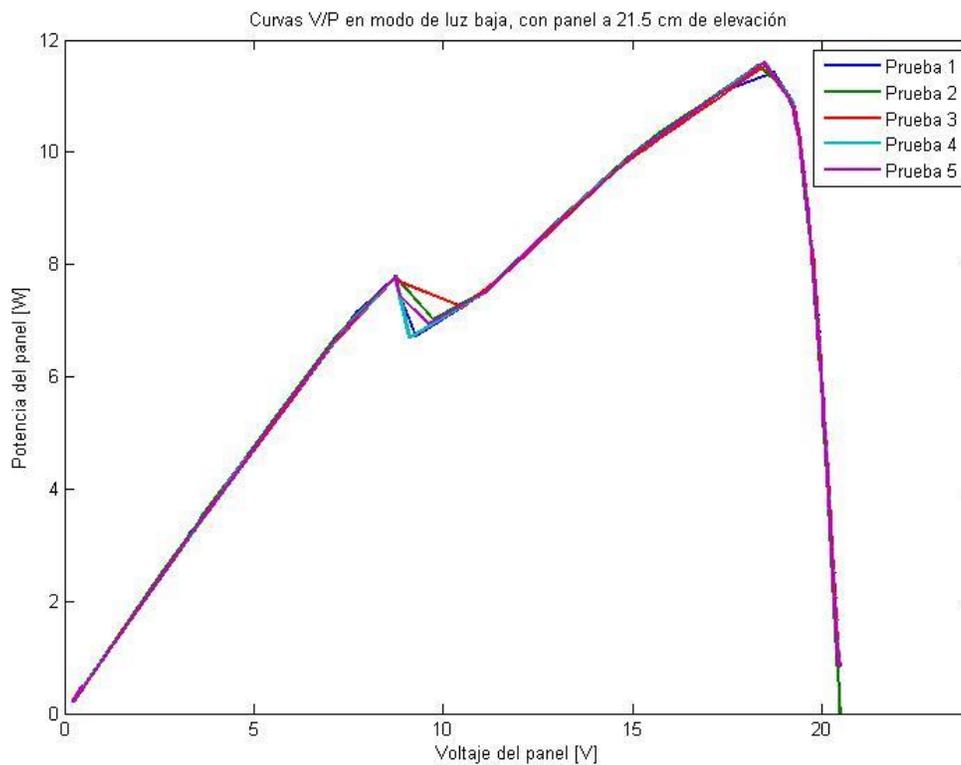
Figura 5.39 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 21.5 cm de elevación.

En la figura 5.40 se observan las curvas V/I que se obtuvieron para este modo de irradiancia, en la figura 5.41 se observan las curvas V/P obtenidas, nótese como a esta altura el primer máximo local comienza a desaparecer, la razón, una irradiancia mejor distribuida respecto a los dos modos anteriores. La tabla 5.10 resume los resultados obtenidos para este modo.



MATLAB

Figura 5.40 Curvas V/I en modo de luz baja con panel a 21.5 cm de elevación.



MATLAB

Figura 5.41 Curvas V/P en modo de luz baja, con panel a 21.5 cm de elevación.

Tabla 5.10 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz baja, con panel a 21.5 cm de elevación.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Temperatura (°C)	27.6176	0.1594	0.2046	27.6176± 0.2046	27.6176± 0.74%
V _{mpp1} (V)	8.7435	0.0064	0.0083	8.7435 ± 0.0083	8.7435± 0.09%
I _{mpp1} (A)	0.8912	0.0008	0.0011	0.8912± 0.0011	0.8912± 0.13%
P _{mpp1} (W)	7.7922	0.0113	0.0143	7.7922 ± 0.0143	7.7922 ± 0.18%
V _{mpp2} (V)	18.4602	0.1587	0.2038	18.4602± 0.2038	17.7891± 0.11%
I _{mpp2} (A)	0.6291	0.0089	0.0115	0.6291 ± 0.0115	0.6291 ± 1.82%
P _{mpp2} (W)	11.5682	0.0764	0.0982	11.5682 ± 0.0982	11.5682 ± 0.85%

Con esta tabla se terminan los resultados obtenidos para las pruebas del simulador sellado en varios modos de operación, para concluir cuál de estos modos es mejor que los otros no solo se debe analizar las formas de las curvas V/I y V/P, también se deben estudiar los datos de las incertidumbres de los puntos de máxima potencia. Después de todo, este simulador solar se desarrolló para realizar pruebas a algoritmos MPPT, es indispensable que los puntos de máxima potencia que se puedan tener con este simulador tengan una incertidumbre asociada muy baja.

5.4 Resumen de resultados: simulador con tapa

La tabla 5.11 representa un resumen de los datos más relevantes de todas las pruebas para el simulador sellado (con tapa frontal), a partir de esta tabla es fácil concluir que modo presentó los mejores resultados, sin embargo, como se mencionó anteriormente, las gráficas presentadas en las secciones anteriores no deben pasarse por alto al tomar la decisión.

La tabla es sencilla de interpretar, leyendo de izquierda a derecha se da el incremento de la altura del panel dentro del simulador, tomando los datos de la tabla en cuenta, el mejor modo para operar el simulador solar con tapa es a la altura estándar (0 cm), el beneficio de subir el panel a los 13.5 cm es mínimo (en promedio 5% mejores resultados). Por otro lado, subir el panel sobre los 13.5 cm trae consecuencias negativas, menos potencia convertida por el panel debido a que la distribución de irradiancia aumenta su no uniformidad.

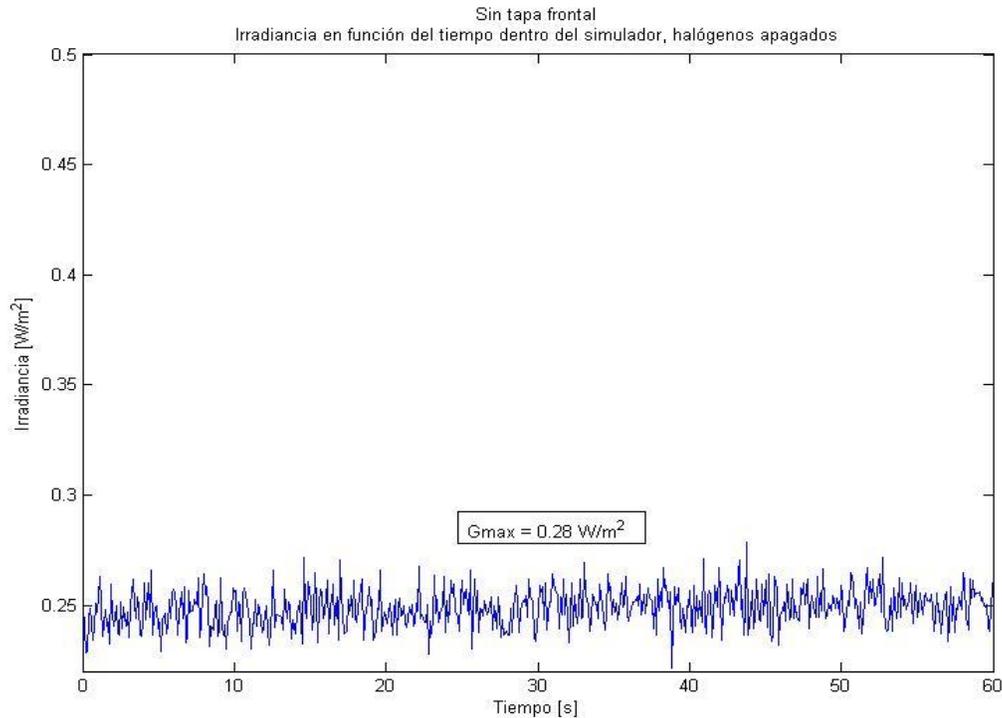
Tabla 5.11 Resumen de resultados del simulador con la tapa frontal.

Modo de Operación	Magnitud (Unidades)	Elevación del panel dentro del simulador		
		0 cm	13.5 cm	21.5 cm
Luz alta	G (W/m ²)	342.9001 ± 0.17 %	342.3321 ± 0.47 %	327.4963 ± 0.65 %
	dT/dt (°C/s)	0.0432	0.0485	0.0456
	V _{mpp} (V)	16.8866 ± 2.5 %	18.1662 ± 1.1 %	18.6331 ± 0.24 %
	I _{mpp} (A)	1.3067 ± 2.3 %	1.2103 ± 2.9 %	1.1415 ± 0.28 %
	P _{mpp} (W)	22.0172 ± 0.27 %	21.9870 ± 1.7 %	21.2595 ± 0.22 %
	V _{mpp2} (V)	-	-	-
	I _{mpp2} (A)	-	-	-
	P _{mpp2} (W)	-	-	-
Luz alta sin la fuente # 2	G (W/m ²)	226.4282 ± 0.12 %	230.6436 ± 0.47 %	205.3216 ± 0.27 %
	dT/dt (°C/s)	0.0267	0.0295	0.0296
	V _{mpp} (V)	16.3746 ± 2.6 %	17.3064 ± 0.16 %	18.1584 ± 0.06 %
	I _{mpp} (A)	0.8741 ± 2.4 %	0.8358 ± 0.17 %	0.7259 ± 0.12 %
	P _{mpp} (W)	14.2828 ± 0.16 %	14.4601 ± 0.13 %	13.1808 ± 0.11 %
	V _{mpp2} (V)	-	-	-
	I _{mpp2} (A)	-	-	-
	P _{mpp2} (W)	-	-	-
Luz baja	G (W/m ²)	-	-	-
	dT/dt (°C/s)	0.0491	0.0463	0.0471
	V _{mpp} (V)	8.4706 ± 0.17 %	8.4244 ± 2.5 %	8.7435 ± 0.09 %
	I _{mpp} (A)	1.1106 ± 0.31 %	1.1019 ± 5.18 %	0.8912 ± 0.13 %
	P _{mpp} (W)	9.4126 ± 0.25 %	9.1271 ± 3.28 %	7.7922 ± 0.18 %
	V _{mpp2} (V)	17.8522 ± 0.26 %	17.7891 ± 2.31 %	17.7891 ± 0.11 %
	I _{mpp2} (A)	0.6062 ± 0.19 %	0.6030 ± 3.1 %	0.6291 ± 1.82 %
	P _{mpp2} (W)	10.8138 ± 0.39 %	10.9600 ± 1 %	11.5682 ± 0.85 %

En promedio, se encontró que, el porcentaje de error entre los puntos de máxima potencia del modelo en LTSPice y los datos experimentales es de 6.74% para este modo de operación.

5.5 Simulador solar sin tapa frontal

Los resultados para el simulador solar operando sin la tapa frontal se presentarán de manera más resumida, la premisa es repetir las pruebas de la sección anterior, pero con el simulador abierto. Se presentan todos los datos, pero las figuras se manejan de una manera más compacta. La primera prueba es la prueba de fuga (figura 5.42), al estar abierto el simulador se espera que se filtre más irradiancia externa que con el simulador sellado.



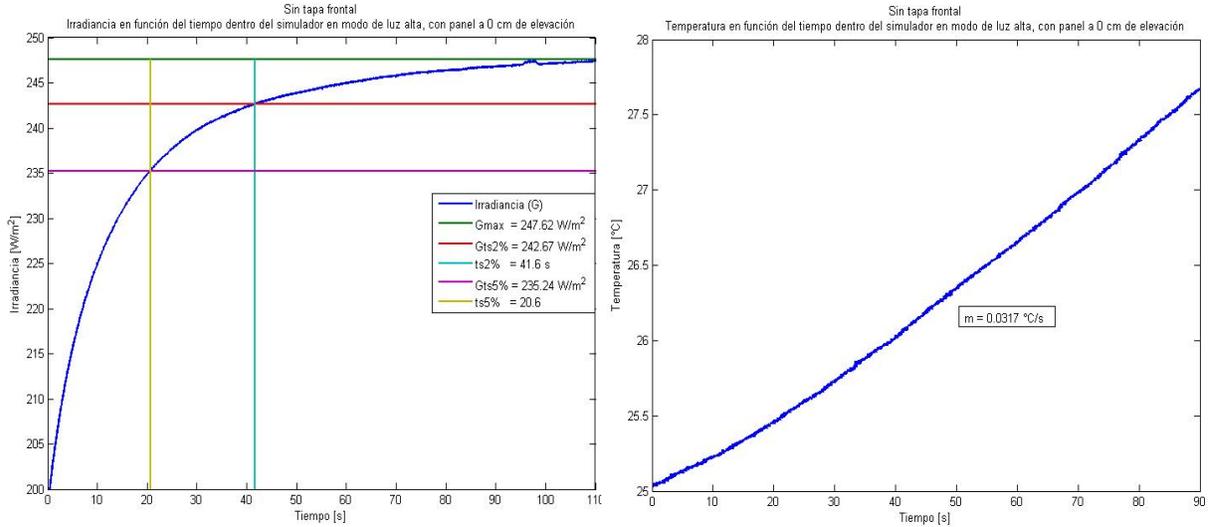
MATLAB

Figura 5.42 Irradiancia en función del tiempo dentro del simulador, halógenos apagados. Sin tapa frontal.

La irradiancia que entra en el simulador sigue siendo despreciable (alrededor de 0.25 W/m^2) por lo que las pruebas que se presentan a continuación pueden considerarse como no afectadas por irradiancia externa.

5.5.1 Modo de luz alta con el panel a 0 cm de elevación

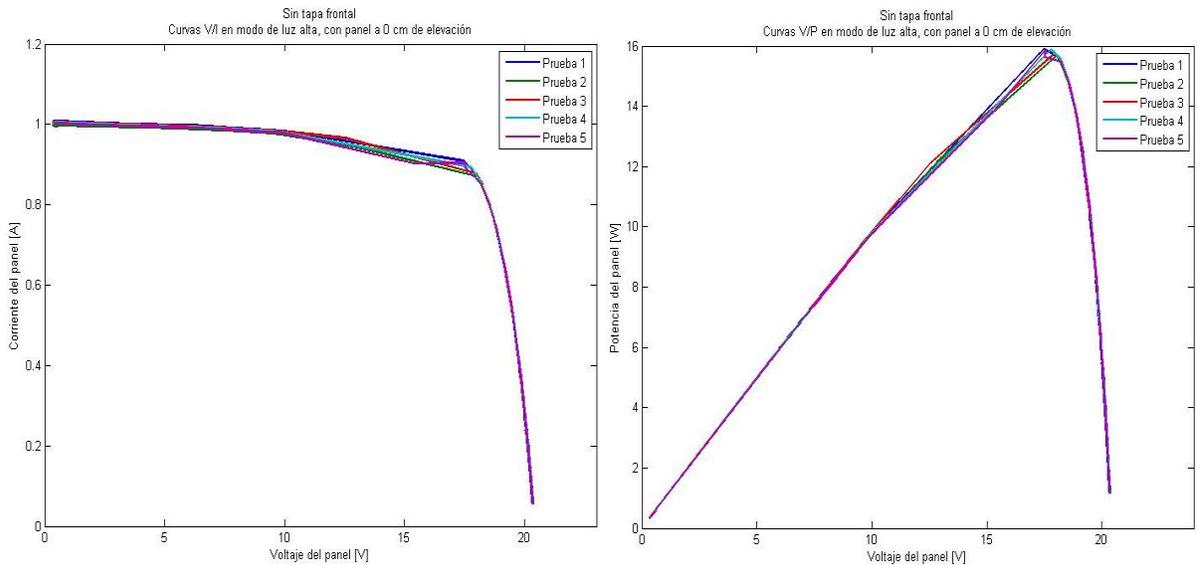
La figura 5.43 muestra la prueba de irradiancia y la prueba de temperatura respecto al tiempo en modo luz alta a 0 cm, la máxima irradiancia es de 247.62 W/m^2 , como contraste, con el simulador sellado se obtuvo un máximo de 345.4 W/m^2 , esto representa una diferencia del 40% más para el simulador sellado. Por otro lado, $dT/dt = 0.0317 \text{ }^\circ\text{C/s}$ en este modo contra $dT/dt = 0.0432 \text{ }^\circ\text{C/s}$ del simulador sellado, esto implica que el panel se calienta un 26.62% menos con el simulador abierto (como es de esperar).



MATLAB

Figura 5.43 Irradiancia en función del tiempo (izquierda), temperatura en función del tiempo (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.

Ahora, las curvas V/I y V/P que se obtuvieron con el panel KC65T en este modo de operación se presentan en la figura 5.44. La tabla 5.12 resume los datos de esta prueba.



MATLAB

Figura 5.44 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.

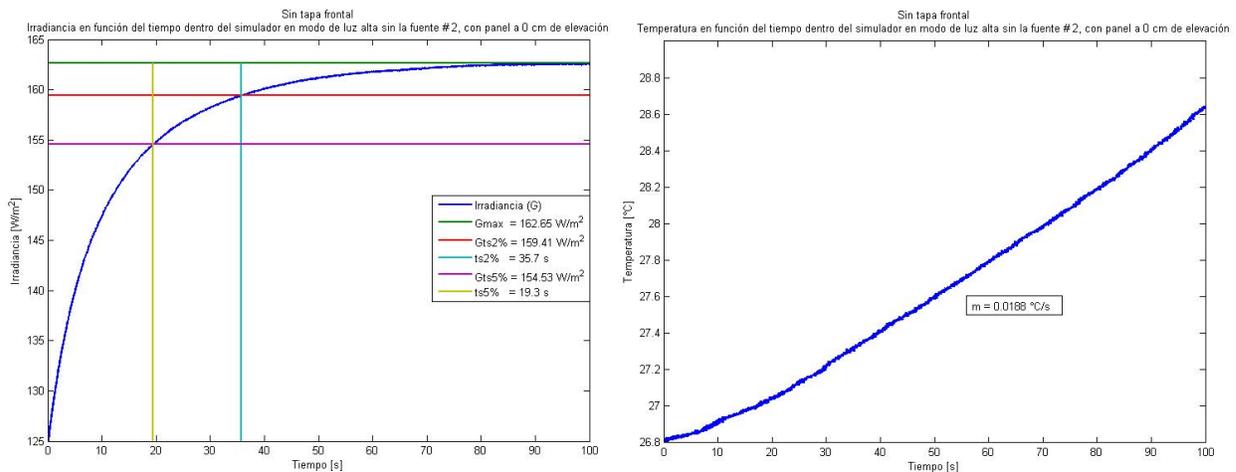
Tabla 5.12 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta, con panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Irradiancia (W/m ²)	244.2847	0.5875	0.7541	244.2847± 0.7541	244.2847± 0.31%
Temperatura (°C)	27.3137	0.1340	0.1720	27.3137± 0.1720	27.3137± 0.63%
V _{mpp} (V)	17.9663	0.2399	0.3080	17.9663± 0.3080	17.9663± 1.7%
I _{mpp} (A)	0.8780	0.0168	0.0215	0.8780± 0.0215	0.8780± 2.4%
P _{mpp} (W)	15.7748	0.0980	0.1257	15.7748± 0.1257	15.7748± 0.80%

Para una irradiancia de 244 W/m², en el modelo de LTSpice, el punto de máxima potencia obtenido es: V_{mpp} = 17.5000 V, I_{mpp} = 0.8599 A y P_{mpp} = 15.0485 W, esto implica un porcentaje de error de 4.8 %, similar al promedio que se ha manejado hasta ahora entre modelo y pruebas experimentales.

5.5.2 Modo de luz alta sin la fuente # 2, con el panel a 0 cm de elevación

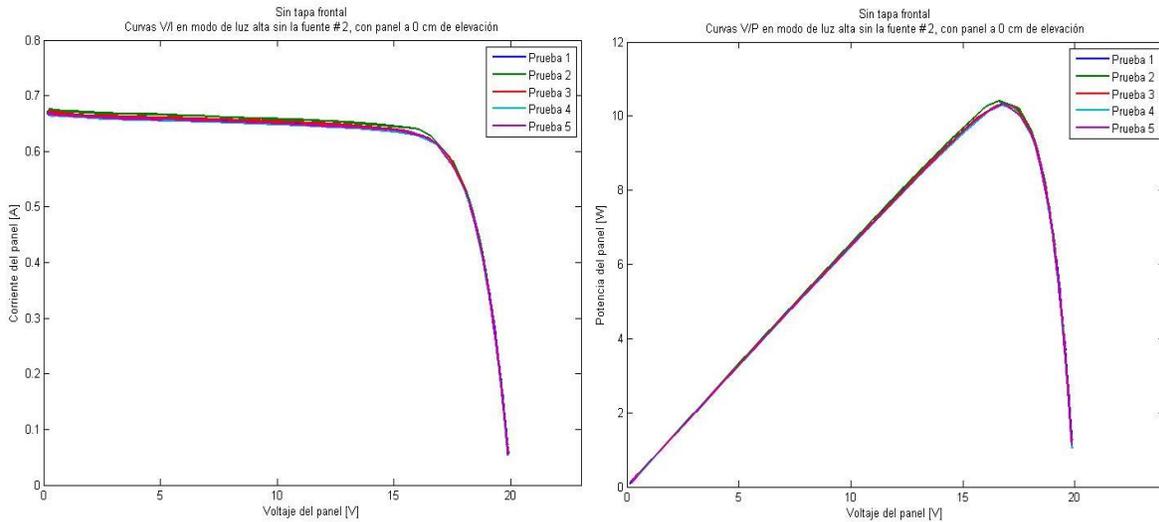
La figura 5.45 muestra la prueba de irradiancia y la prueba de temperatura respecto al tiempo en el modo de luz alta sin la fuente # 2 a 0 cm, la máxima irradiancia que se obtuvo es de 162.65 W/m², con el simulador sellado, se obtuvo 227.59 W/m², esto representa una diferencia del 39% más para el simulador sellado. Por otro lado, dT/dt = 0.0188 °C/s en este modo contra dT/dt = 0.0267 °C/s del simulador sellado, esto implica que el panel se calienta un 30% menos con el simulador abierto.



MATLAB

Figura 5.45 Irradiancia en función del tiempo (izquierda), temperatura en función del tiempo (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta sin fuente 2, panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.

Las curvas V/I y V/P para este modo de operación se presentan en la figura 5.46. La tabla 5.13 resume los datos obtenidos en esta prueba.



MATLAB

Figura 5.46 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.

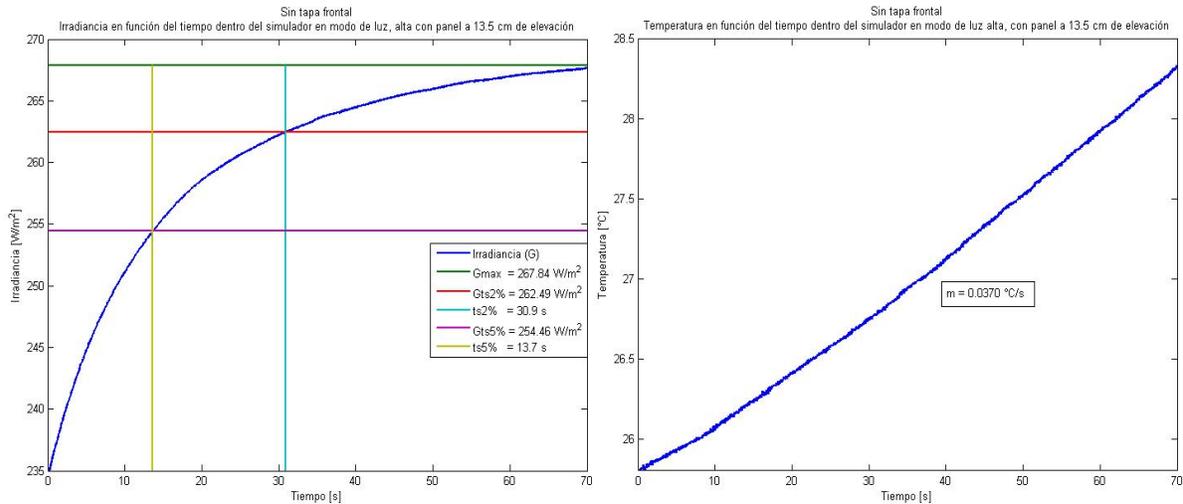
Tabla 5.13 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Irradiancia (W/m²)	160.0013	1.0966	1.4074	160.0013± 1.4074	160.0013± 0.89%
Temperatura (°C)	27.1088	0.0633	0.0812	27.1088± 0.0812	27.1088± 0.30%
V_{mpp} (V)	16.7862	0.1918	0.2462	16.7862± 0.2462	16.7862± 1.5%
I_{mpp} (A)	0.6141	0.0078	0.0100	0.6141± 0.0100	0.6141± 1.64%
P_{mpp} (W)	10.3302	0.0426	0.0545	10.3302± 0.0545	10.3302± 0.53%

Para una irradiancia de 160 W/m², en el modelo de LTSpice, el punto de máxima potencia obtenido es: V_{mpp} = 17.1000 V, I_{mpp} = 0.5435 A y P_{mpp} = 9.2945 W, esto implica un porcentaje de error del 10 %.

5.5.3 Modo de luz alta, con el panel a 13.5 cm de elevación

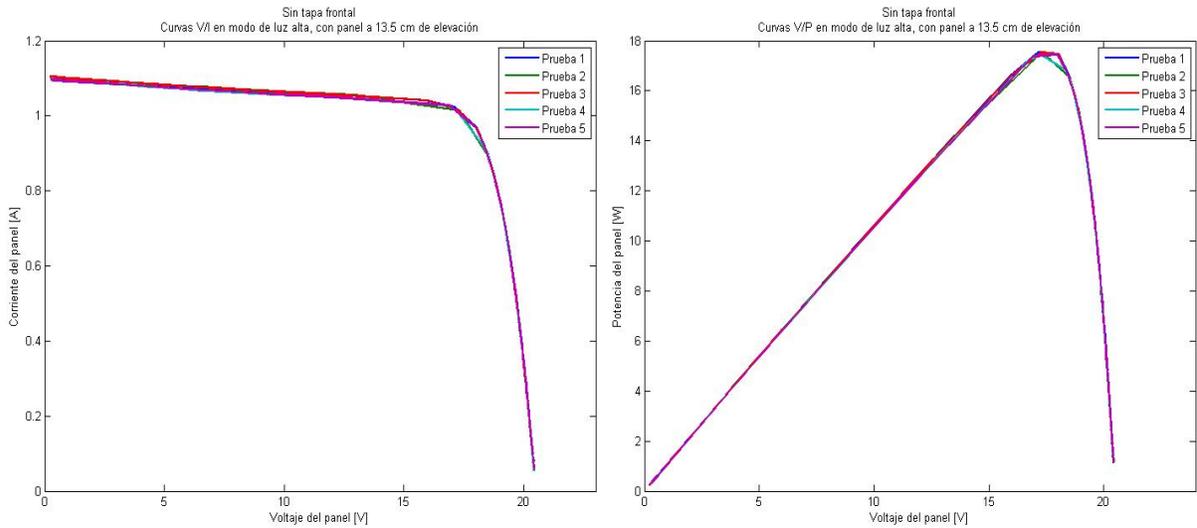
La figura 5.47 muestra la prueba de irradiancia y la prueba de temperatura respecto al tiempo en modo luz alta con el panel a 13.5 cm de elevación, la máxima irradiancia es de 267.84 W/m², con el simulador sellado se obtuvo 347.17 W/m², esto representa una diferencia del 23% más para el simulador sellado. Por otro lado, $dT/dt = 0.0370$ °C/s en este modo contra $dT/dt = 0.0495$ °C/s del simulador sellado, esto implica que el panel se calienta un 25% menos con el simulador abierto.



MATLAB

Figura 5.47 Irradiancia en función del tiempo (izquierda), temperatura en función del tiempo (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Las curvas V/I y V/P para este modo de operación se presentan en la figura 5.48. La tabla 5.14 resume los datos de esta prueba.



MATLAB

Figura 5.48 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

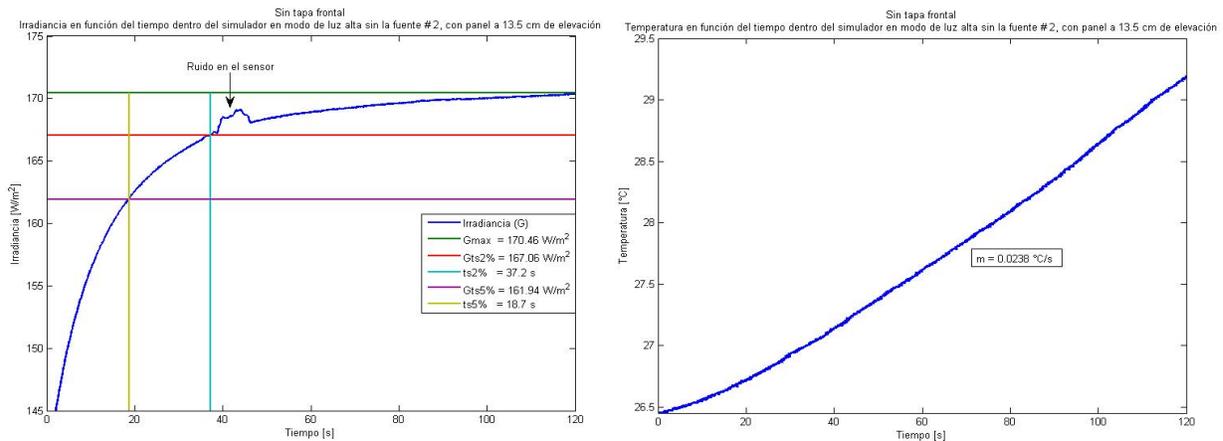
Tabla 5.14 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta, con panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Irradiancia (W/m²)	263.5703	0.9393	1.2056	263.5703± 1.2056	263.5703± 0.46%
Temperatura (°C)	27.2965	0.0371	0.0476	27.2965± 0.0476	27.2965± 0.17%
V_{mpp} (V)	17.2917	0.3388	0.4348	17.2917± 0.4348	17.2917± 2.5%
I_{mpp} (A)	1.0146	0.0205	0.0264	1.0146± 0.0264	1.0146± 2.6%
P_{mpp} (W)	17.5401	0.0541	0.0694	17.5401± 0.0694	17.5401± 0.39%

Para una irradiancia de 264 W/m², en el modelo de LTSpice, el punto de máxima potencia obtenido es: V_{mpp} = 17.6000 V, I_{mpp} = 0.9338 A y P_{mpp} = 16.4342 W, esto implica un porcentaje de error del 6.3 %, dentro de lo esperado.

5.5.4 Modo de luz alta sin la fuente # 2, con el panel a 13.5 cm de elevación

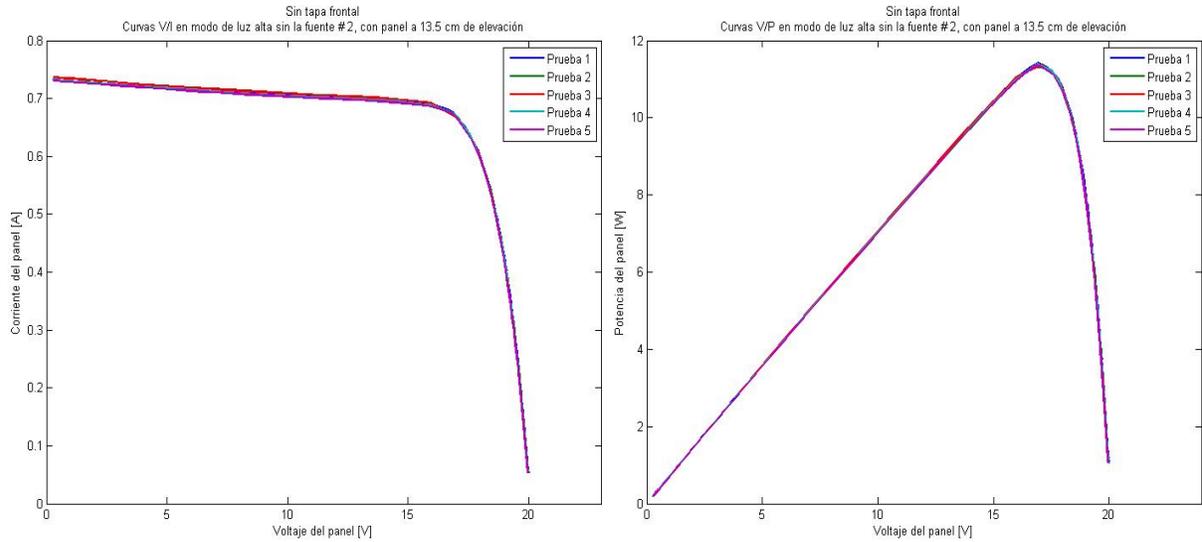
La figura 5.49 muestra la prueba de irradiancia y la prueba de temperatura respecto al tiempo en el modo luz alta sin la fuente 2 con el panel a 13.5 cm, la máxima irradiancia es de 170.46 W/m^2 , con el simulador sellado se obtuvo 231.33 W/m^2 , esto representa una diferencia del 26% más para el simulador sellado. Por otro lado, $dT/dt = 0.0238 \text{ }^\circ\text{C/s}$ en este modo contra $dT/dt = 0.0295 \text{ }^\circ\text{C/s}$ del simulador sellado, esto implica que el panel se calienta un 20% menos con el simulador abierto. Los porcentajes se mantienen dentro del mismo rango que para casos anteriores. En la prueba de irradiancia se detecta un poco de ruido en el sensor, fue la única prueba que presentó esta singularidad.



MATLAB

Figura 5.49 Irradiancia en función del tiempo (izquierda), temperatura en función del tiempo (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta sin fuente 2, panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Las curvas V/I y V/P para este modo de operación se presentan en la figura 5.50. La tabla 5.15 resume los datos de esta prueba.



MATLAB

Figura 5.50 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

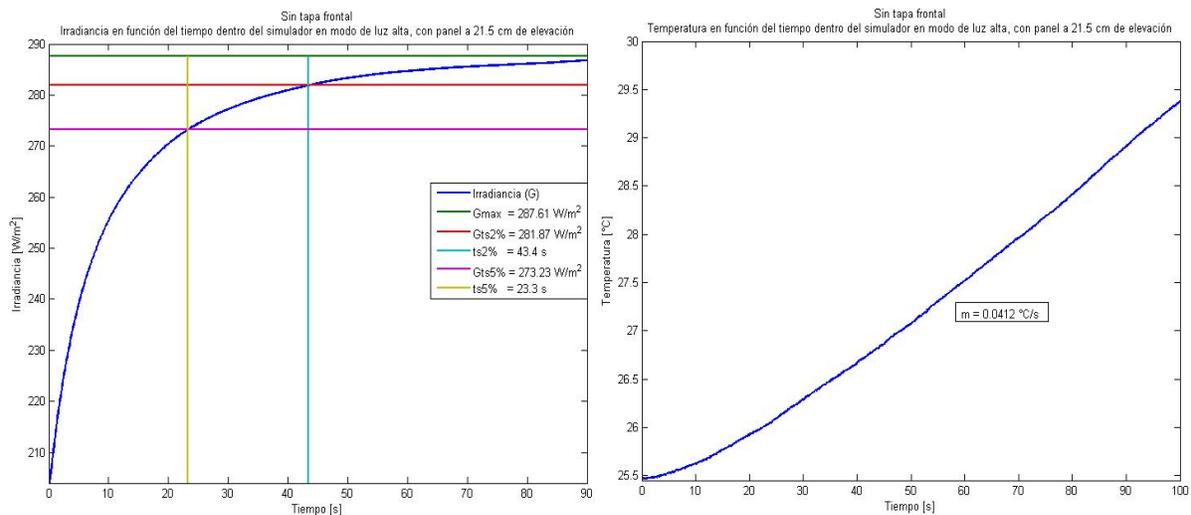
Tabla 5.15 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Irradiancia (W/m²)	169.2137	0.9897	1.2703	169.2137± 1.2703	169.2137± 0.75%
Temperatura (°C)	27.2118	0.0938	0.1204	27.2118± 0.1204	27.2118± 0.44%
V_{mpp} (V)	16.8948	0.1350	0.1733	16.8948± 0.1733	16.8948± 1.03%
I_{mpp} (A)	0.6748	0.0047	0.0060	0.6748± 0.0060	0.6748± 0.89%
P_{mpp} (W)	11.3909	0.0276	0.0792	11.3909± 0.0792	11.3909± 0.69%

Para una irradiancia de 169 W/m², en el modelo de LTSpice, el punto de máxima potencia obtenido es: V_{mpp} = 17.2000 V, I_{mpp} = 0.5758 A y P_{mpp} = 9.9044 W, esto implica un porcentaje de error del 13 %.

5.5.5 Modo de luz alta, con el panel a 21.5 cm de elevación

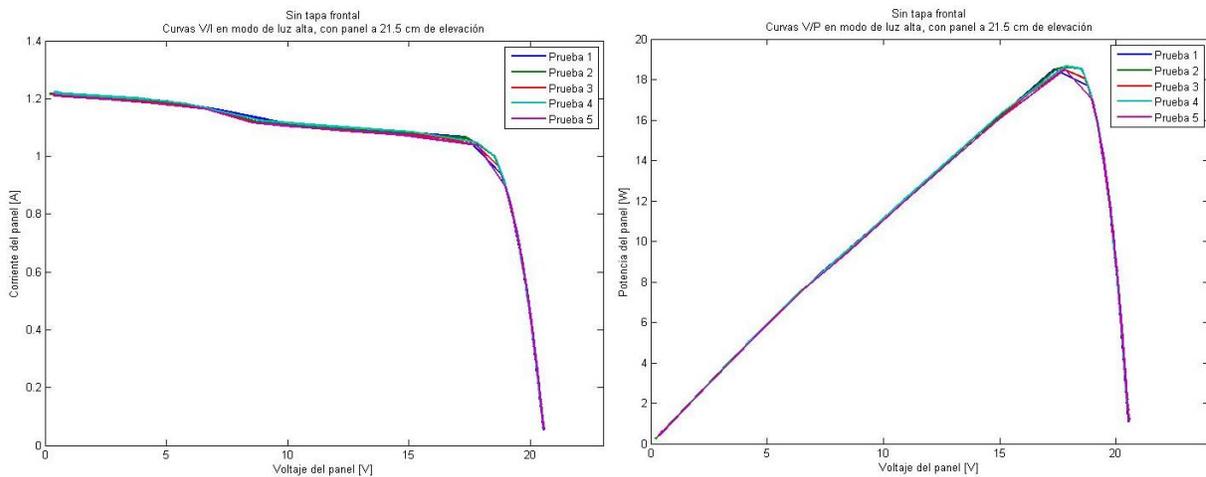
La figura 5.51 muestra la prueba de irradiancia y la prueba de temperatura respecto al tiempo en modo luz alta con el panel a 21.5 cm de elevación, la máxima irradiancia es de 287.61 W/m², con el simulador sellado se obtuvo 329.31 W/m², esto representa una diferencia del 15% más para el simulador sellado. Por otro lado, dT/dt = 0.0412 °C/s en este modo contra dT/dt = 0.0456 °C/s del simulador sellado, esto implica que el panel se calienta un 10% menos con el simulador abierto. A esta altura el cambio de temperatura es muy similar en ambos modos de operación.



MATLAB

Figura 5.51 Irradiancia en función del tiempo (izquierda), temperatura en función del tiempo (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Las curvas V/I y V/P para este modo de operación se presentan en la figura 5.52. La tabla 5.16 resume los datos de esta prueba. Para una irradiancia de 283 W/m², en el modelo de LTSpice, el punto de máxima potencia obtenido es: Vmpp = 17.7000 V, Impp = 1.0030 y Pmpp = 17.7554 W, esto implica un porcentaje de error del 4.15 %, dentro de lo esperado.



MATLAB

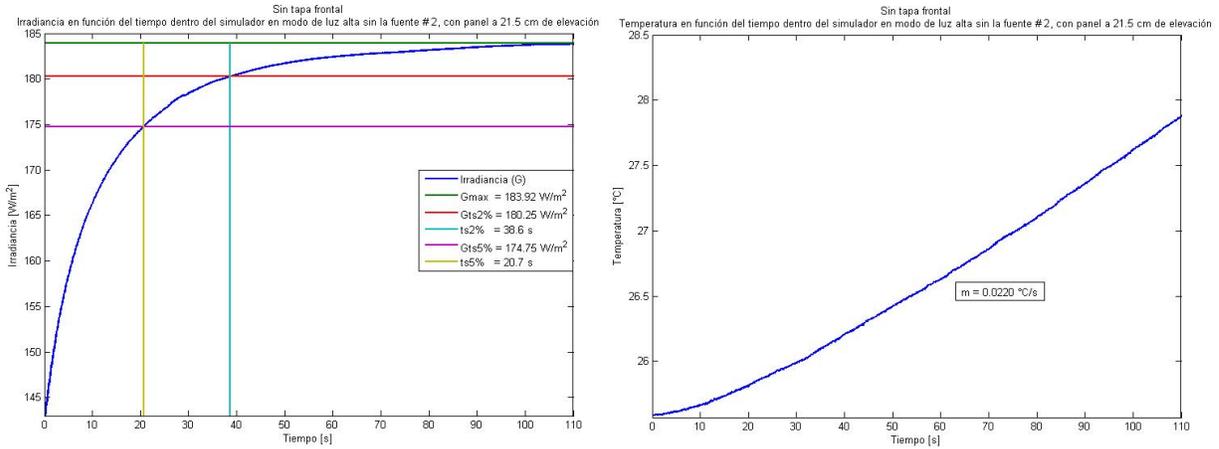
Figura 5.52 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta, panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Tabla 5.16 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta, con panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Irradiancia (W/m ²)	283.2027	1.5588	2.0007	283.2027± 2.0007	283.2027± 0.71%
Temperatura (°C)	27.4645	0.0828	0.1063	27.4645± 0.1063	27.4645± 0.39%
V _{mpp} (V)	17.7785	0.2432	0.3120	17.7785± 0.3120	17.7785± 1.75%
I _{mpp} (A)	1.0480	0.0136	0.0390	1.0480± 0.0390	1.0480± 3.7%
P _{mpp} (W)	18.5249	0.0818	0.2346	18.5249± 0.2346	18.5249± 1.27%

5.5.6 Modo de luz alta sin la fuente # 2, con el panel a 21.5 cm de elevación

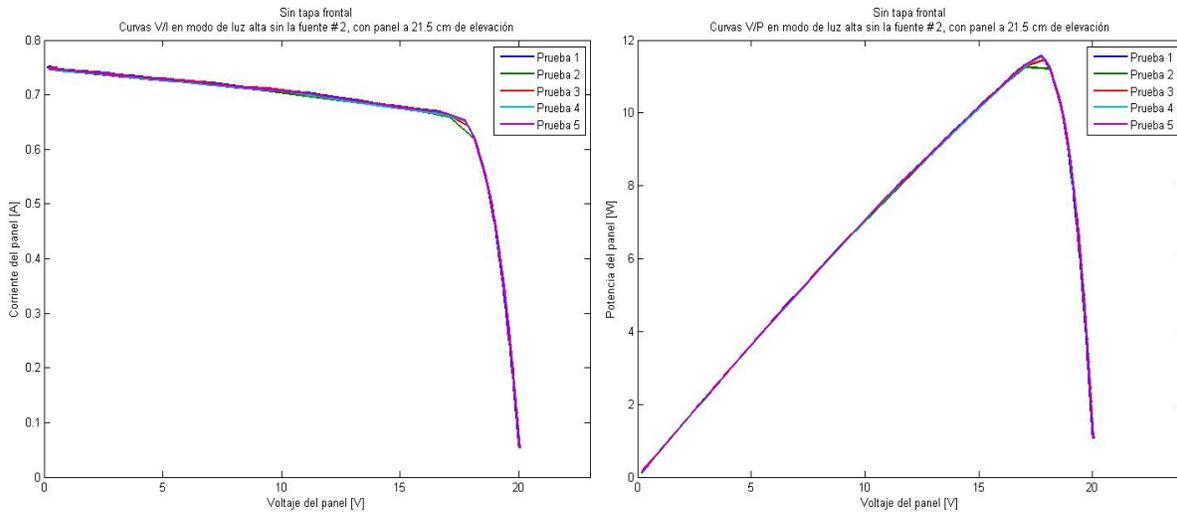
La figura 5.53 muestra la prueba de irradiancia y la prueba de temperatura respecto al tiempo en el modo de luz alta sin la fuente # 2 con el panel a 21.5 cm de elevación, la máxima irradiancia es de 183.92 W/m², con el simulador sellado se obtuvo 206.60 W/m², esto representa una diferencia del 11% más para el simulador sellado. Por otro lado, $dT/dt = 0.0220$ °C/s en este modo contra $dT/dt = 0.0296$ °C/s del simulador sellado, esto implica que el panel se calienta un 26% menos con el simulador abierto.



MATLAB

Figura 5.53 Irradiancia en función del tiempo (izquierda), temperatura en función del tiempo (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta sin fuente 2, panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Las curvas V/I y V/P para este modo de operación se presentan en la figura 5.54. La tabla 5.17 resume los datos de esta prueba.



MATLAB

Figura 5.54 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz alta sin la fuente # 2, panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

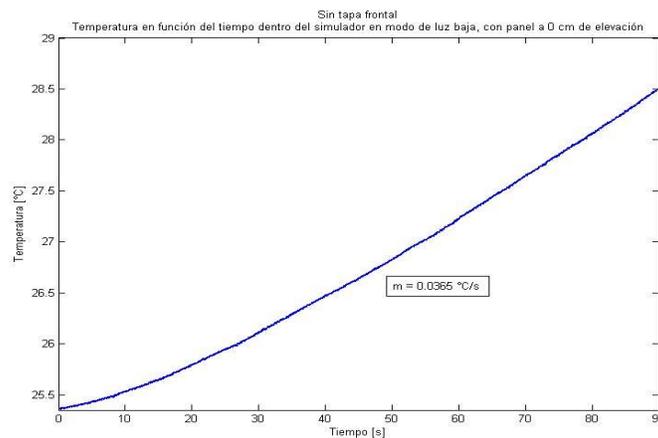
Tabla 5.17 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz alta sin la fuente # 2, con panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Irradiancia (W/m ²)	184.1056	0.6678	0.8571	184.1056± 0.8571	184.1056± 0.47%
Temperatura (°C)	27.2352	0.0844	0.1083	27.2352± 0.1083	27.2352± 0.39%
V _{mpp} (V)	17.7401	0.3393	0.9738	17.7401± 0.9738	17.7401± 5.5%
I _{mpp} (A)	0.6526	0.0072	0.0207	0.6526± 0.0207	0.6526± 3.2%
P _{mpp} (W)	11.5682	0.1352	0.3880	11.5682± 0.3880	11.5682± 3.4%

Para una irradiancia de 184 W/m², en el modelo de LTSpice, el punto de máxima potencia obtenido es: V_{mpp} = 17.3000 V, I_{mpp} = 0.6315 A y P_{mpp} = 10.9253 W, esto implica un porcentaje de error del 5.86 %.

5.5.7 Modo de luz baja, con el panel a 0 cm de elevación

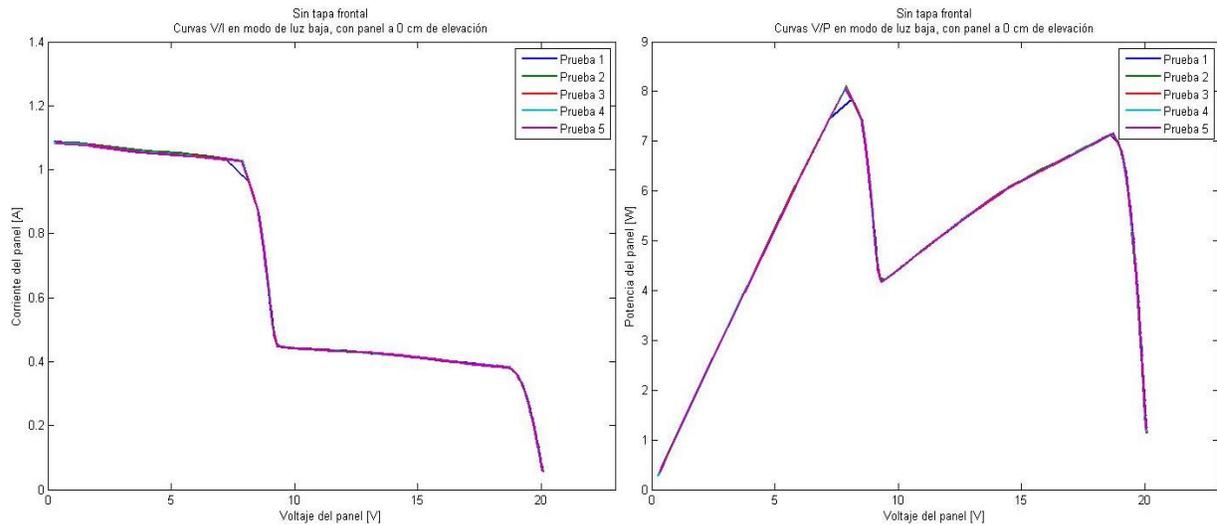
La figura 5.55 muestra la prueba de temperatura respecto al tiempo en modo luz baja con el panel a 0 cm de elevación, nuevamente, al contar con un solo sensor de irradiancia, el valor obtenido de la misma no representa lo que está ocurriendo en este modo de operación, razón por la que se omite la gráfica de irradiancia se omite. Se obtuvo que dT/dt = 0.0365 °C/s contra dT/dt = 0.0491 °C/s del simulador sellado, esto implica que el panel se calienta un 26% menos con el simulador abierto.



MATLAB

Figura 5.55 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.

Las curvas V/I y V/P para este modo de operación se presentan en la figura 5.56. Nuevamente se presenta una irradiancia con una no uniformidad de la irradiancia considerable.



MATLAB

Figura 5.56 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz baja , panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.

La figura 5.56 muestra un cambio interesante respecto a su análogo con el simulador con tapa, cambia de lado el punto máximo definitivo con el otro máximo local, esto debido a una redistribución de la irradiancia cuando el simulador se utiliza sin tapa frontal. La tabla 5.18 resume los resultados de este modo de operación.

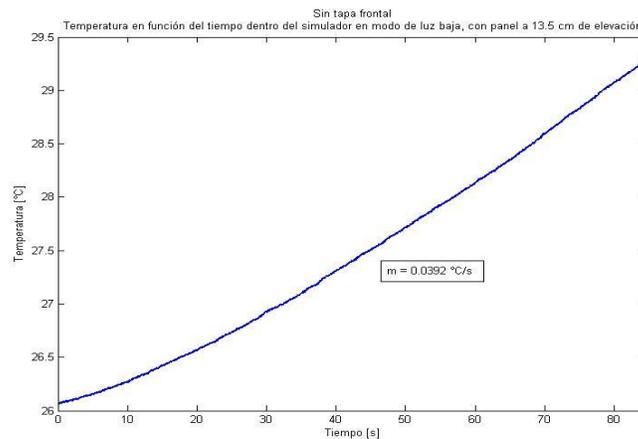
Tabla 5.18 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz baja, con panel a 0 cm de elevación, simulador sin tapa.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Temperatura (°C)	27.5317	0.0807	0.1036	27.5317± 0.1036	27.5317± 0.38%
V _{mpp1} (V)	7.8797	0.1157	0.1484	7.8797± 0.1484	7.8797± 1.88%
I _{mpp1} (A)	1.0257	0.0272	0.0347	1.0257± 0.0347	1.0257± 3.38%
P _{mpp1} (W)	8.0709	0.1048	0.1346	8.0709± 0.1346	8.0709± 1.67%
V _{mpp2} (V)	18.6918	0.2062	0.2646	18.6918± 0.2646	18.6918± 1.41%
I _{mpp2} (A)	0.3824	0.0017	0.0020	0.3824± 0.0020	0.3824± 0.53%
P _{mpp2} (W)	7.1406	0.0488	0.0626	7.1406± 0.0626	7.1406± 0.88%

Debido a la arquitectura empleada en el modelo de LTSpice, no se puede simular un escenario de sombreado parcial en el panel.

5.5.8 Modo de luz baja, con el panel a 13.5 cm de elevación

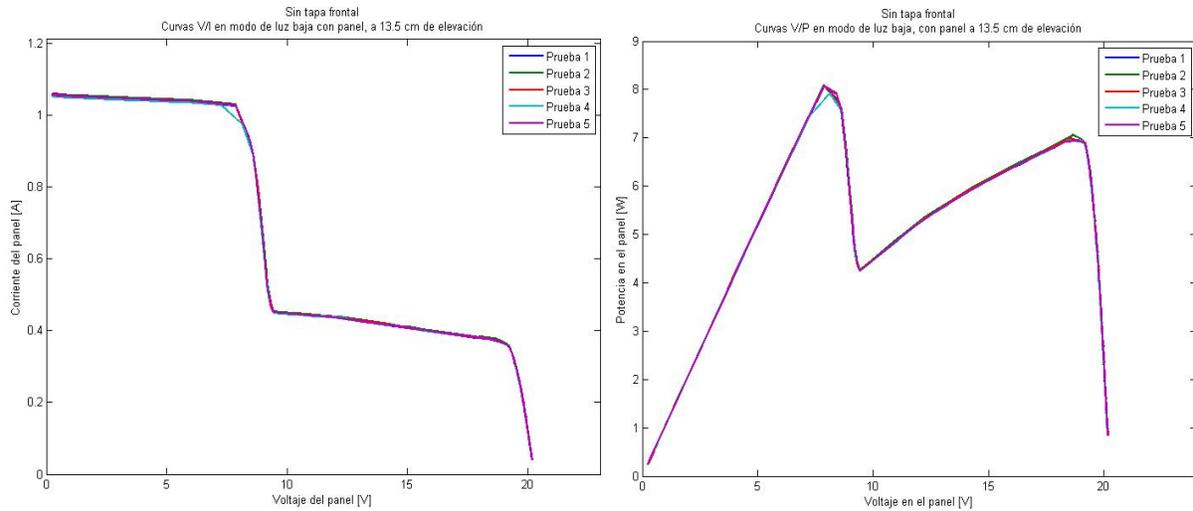
La figura 5.57 muestra la prueba de temperatura respecto al tiempo en modo luz baja con el panel a 13.5 cm de elevación. Se obtuvo que $dT/dt = 0.0392 \text{ }^\circ\text{C/s}$ contra $dT/dt = 0.0463 \text{ }^\circ\text{C/s}$ del simulador sellado, esto implica que el panel se calienta un 15.3% menos con el simulador abierto.



MATLAB

Figura 5.57 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Las curvas V/I y V/P para modo de operación se presentan en la figura 5.58. La tabla 5.19 resume los resultados de este modo de operación.



MATLAB

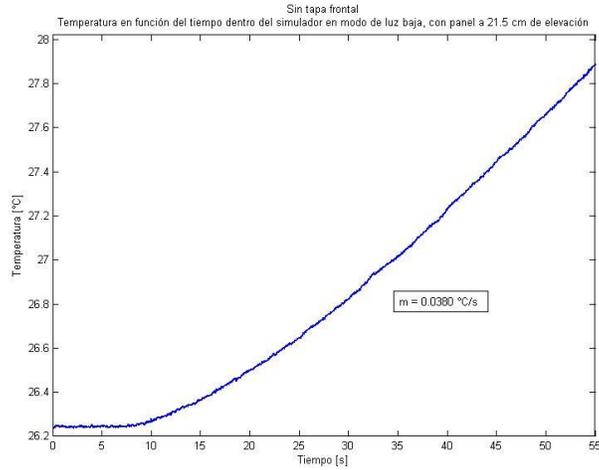
Figura 5.58 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Tabla 5.19 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz baja, con panel a 13.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Temperatura (°C)	27.4265	0.0375	0.0481	27.4265± 0.0481	27.4265± 0.18%
Vmpp1 (V)	7.8626	0.1141	0.1464	7.8626± 0.1464	7.8626± 1.86%
Impp1(A)	1.0279	0.0232	0.0298	1.0279± 0.0298	1.0279± 2.9%
Pmpp1 (W)	8.0848	0.0720	0.0924	8.0848± 0.0924	8.0848± 1.14%
Vmpp2 (V)	18.5663	0.1685	0.2164	18.5663± 0.2164	18.5663± 1.17%
Impp2 (A)	0.3771	0.0043	0.0055	0.3771± 0.0055	0.3771± 1.45%
Pmpp2 (W)	6.9962	0.0428	0.0551	6.9962± 0.0551	6.9962± 0.79%

5.5.9 Modo de luz baja, con el panel a 21.5 cm de elevación

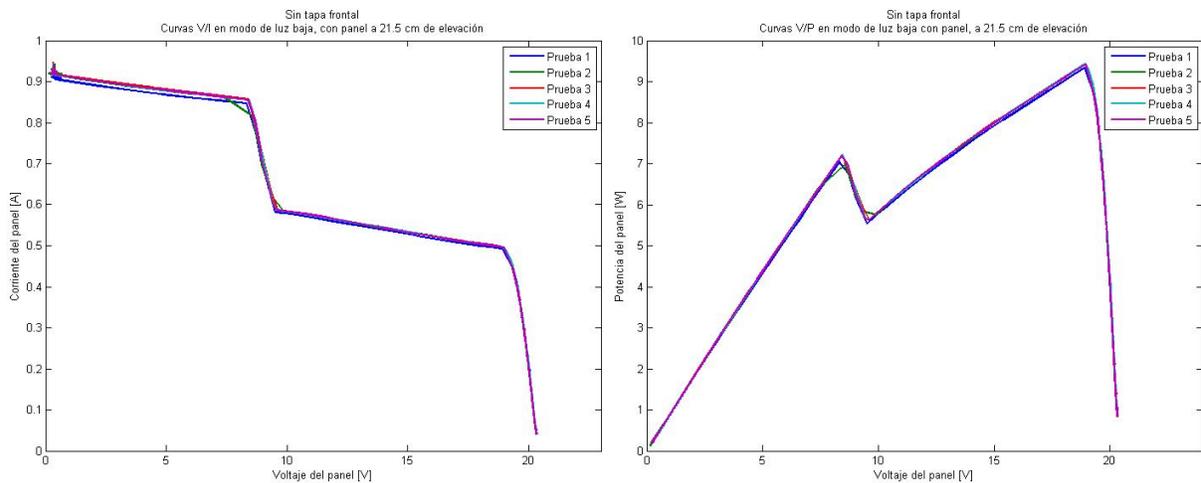
La figura 6.59 muestra la prueba de temperatura respecto al tiempo en modo luz baja con el panel a 21.5 cm de elevación. Se obtuvo que $dT/dt = 0.0380 \text{ }^\circ\text{C/s}$ contra $dT/dt = 0.0471 \text{ }^\circ\text{C/s}$ del simulador sellado, esto implica que el panel se calienta un 19.3% menos con el simulador abierto.



MATLAB

Figura 5.59 Temperatura en función del tiempo dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Las curvas V/I y V/P para este modo de operación se presentan en la figura 5.60. La tabla 5.20 resume los resultados de este modo de operación.



MATLAB

Figura 5.60 Curvas V/I (izquierda), Curvas V/P (derecha), dentro del simulador en modo de luz baja, panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Tabla 5.20 Incertidumbres obtenidas de las pruebas en modo de luz baja, con panel a 21.5 cm de elevación, simulador sin tapa.

Magnitud (Unidad)	Valor promedio	Desviación estándar	Incertidumbre tipo A 95.45%	Valor final	Valor final porcentual
Temperatura (°C)	27.4893	0.0826	0.1060	27.4893± 0.1060	27.4893± 0.39%
Vmpp1 (V)	8.4399	0.0902	0.1159	8.4399± 0.1159	8.4399± 1.37%
Impp1(A)	0.8527	0.0165	0.0212	0.8527± 0.0212	0.8527± 2.49%
Pmpp1 (W)	7.1973	0.1055	0.1356	7.1973± 0.1356	7.1973± 1.89%
Vmpp2 (V)	18.9413	0.0225	0.0290	18.9413± 0.0290	18.9413± 0.15%
Impp2 (A)	0.4974	0.0013	0.0017	0.4974± 0.0017	0.4974± 0.34%
Pmpp2 (W)	9.4229	0.0360	0.0462	9.4229± 0.0462	9.4229± 0.49%

5.6 Resumen de resultados simulador sellado

La tabla 5.21 representa un resumen de los datos más relevantes de todas las pruebas para el simulador operando sin tapa frontal.

En promedio, el porcentaje de error entre los datos del modelo de LTSPice y los datos obtenidos de manera experimental para este modo de operación es de 6.16 %. Tanto para el simulador con tapa como sin tapa.

Tabla 5.21 Resumen de resultados del simulador sin la tapa frontal.

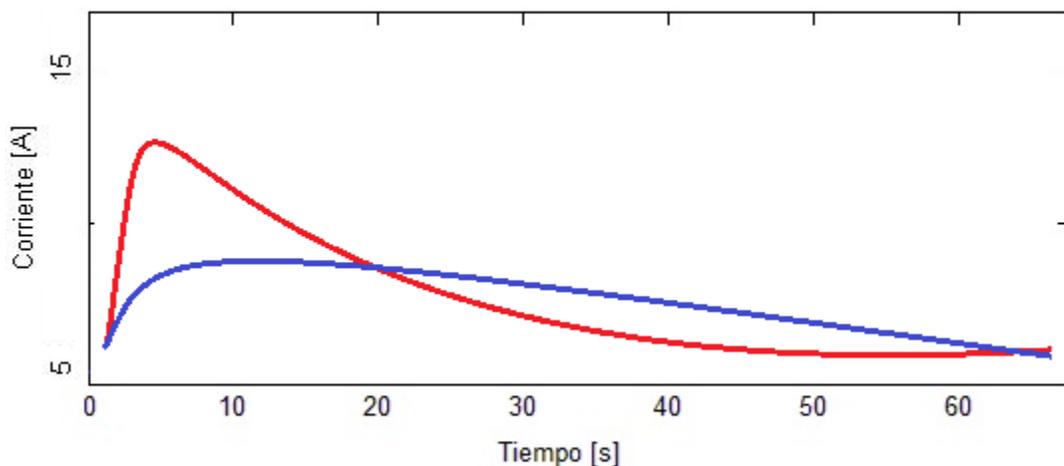
Modo de Operación	Magnitud (Unidades)	Elevación del panel dentro del simulador		
		0 cm	13.5 cm	21.5 cm
Luz alta	G (W/m ²)	244.2847± 0.31%	263.5703± 0.46%	283.2027± 0.71%
	dT/dt (°C/s)	0.0317	0.0370	0.0412
	Vmpp (V)	17.9663± 1.7%	17.2917± 2.5%	17.7785± 1.75%
	Impp(A)	0.8780± 2.4%	1.0146± 2.6%	1.0480± 3.7%
	Pmpp(W)	15.7748± 0.80%	17.5401± 0.39%	18.5249± 1.27%
	Vmpp2 (V)	-	-	-
	Impp2(A)	-	-	-
	Pmpp2(W)	-	-	-
Luz alta sin la fuente # 2	G (W/m ²)	160.0013± 0.89%	169.2137± 0.75%	184.1056± 0.47%
	dT/dt (°C/s)	0.0188	0.0238	0.0220
	Vmpp (V)	16.7862± 1.5%	16.8948± 1.03%	17.7401± 5.5%
	Impp(A)	0.6141± 1.64%	0.6748± 0.89%	0.6526± 3.2%
	Pmpp(W)	10.3302± 0.53%	11.3909± 0.69%	11.5682± 3.4%
	Vmpp2 (V)	-	-	-
	Impp2(A)	-	-	-
	Pmpp2(W)	-	-	-
Luz baja	G (W/m ²)	-	-	-
	dT/dt (°C/s)	0.0365	0.0392	0.0380
	Vmpp (V)	7.8797± 1.88%	7.8626± 1.86%	8.4399± 1.37%
	Impp(A)	1.0257± 3.38%	1.0279± 2.9%	0.8527± 2.49%
	Pmpp(W)	8.0709± 1.67%	8.0848± 1.14%	7.1973± 1.89%
	Vmpp2 (V)	18.6918± 1.41%	18.5663± 1.17%	18.9413± 0.15%
	Impp2(A)	0.3824± 0.53%	0.3771± 1.45%	0.4974± 0.34%
	Pmpp2(W)	7.1406± 0.88%	6.9962± 0.79%	9.4229± 0.49%

Capítulo 6 Análisis de resultados y ejemplo de aplicación del simulador solar

En esta sección se desarrolla el análisis de los datos publicados en el capítulo 5, con estos datos se tiene información suficiente para caracterizar el simulador solar desarrollado. Además, se desarrollará un ejemplo de aplicación del simulador solar, la prueba de algoritmos MPPT.

6.1 Termistores NTC para el tratamiento de la corriente del transiente

El uso de termistores NTC como limitadores de corriente de inicio consiste en ofrecer una resistencia inicial al circuito la cual permita controlar la magnitud de ese transiente. La figura 6.1 muestra un ejemplo grafico de cómo funciona un termistor NTC para limitar la corriente:

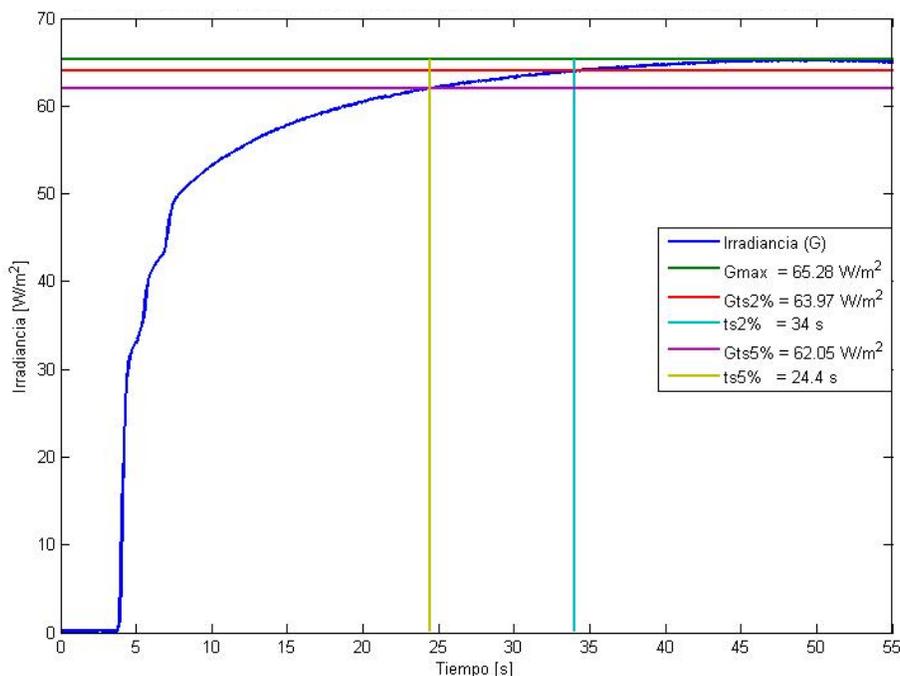


MATLAB

Figura 6.1 Corriente sin termistor (rojo) vs corriente con termistor (azul) en función del tiempo.

Al interpretar la figura 6.1 se puede deducir lo que sucede al utilizar un termistor NTC. En la zona del transiente (los primeros 5 segundos) la magnitud de la corriente es menor para el circuito con el termistor NTC, sin embargo, la corriente tarda más en estabilizarse a su valor estable. Además de ese retardo en el tiempo de estabilización de la corriente, se debe considerar que, el termistor aún en estado estable consume potencia (aunque esta es muy poca, unos 400 mW) por lo que la corriente de estado estable será menor al emplear el termistor.

Por esta razón, en la tabla 5.1 la corriente de estado estable empleando el termistor fue un 2% menor que la del halógeno sin este elemento de protección. El tiempo de estabilización de la corriente mayor en el termistor es también la razón por la que la irradiancia tomó en promedio 35 segundos para estabilizarse durante el desarrollo de las pruebas. En otras palabras, los termistores son la razón del comportamiento de la irradiancia como la de la figura 6.2.



MATLAB

Figura 6.2 Prueba de irradiancia en función del tiempo.

La figura 6.2 se diferencia de las pruebas de la sección 5 en que está se realizó desde que los halógenos se encontraban apagados, cerca de los 5 segundos se encendieron los halógenos y se tomó el tiempo requerido para que la irradiancia se estabilice. Todas las pruebas de irradiancia presentadas en la sección 5 fueron tomadas después de 15 segundos de operación para apreciar mejor el efecto inducido por los termistores NTC.

6.2 Pruebas de resistencia a la temperatura de la recámara

Las pruebas de temperatura en la recámara demostraron que, en el interior de la misma, en el reflector, se alcanzaron temperaturas de hasta 130 °C. Para los termistores NTC se encontró una temperatura de 105 °C de operación en estado estable. La integridad de la recámara no se vio afectada por estas temperaturas dado que los materiales empleados están diseñados para estos escenarios [15]. Lo que el usuario de simulador debe tomar en cuenta es que al usar el modo sin tapa frontal debe tomar las precauciones del caso.

6.3 Estabilidad de la irradiancia en el simulador

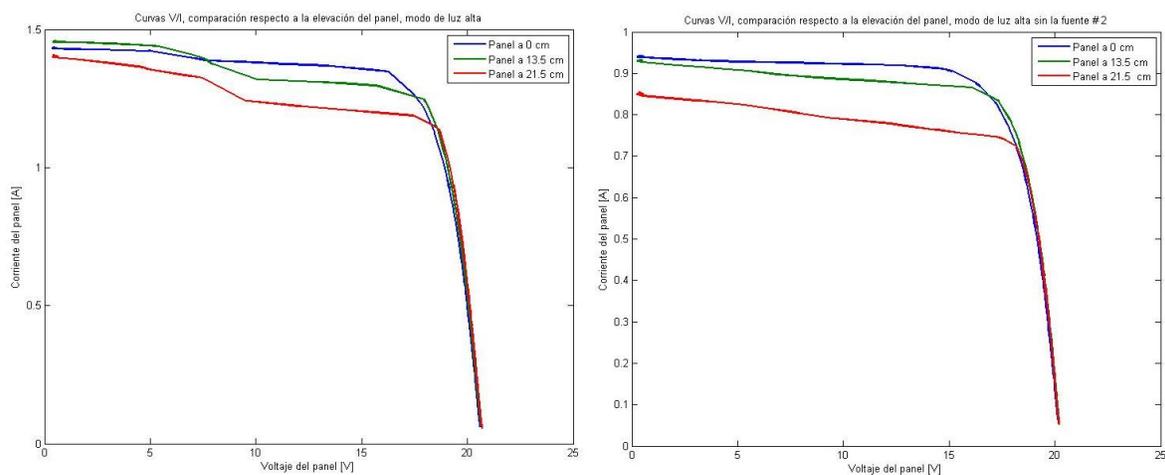
Las tablas 5.11 y 5.21 resumen los datos más relevantes obtenidos durante las 110 pruebas realizadas. La estabilidad de la irradiancia se mantuvo siempre bajo el 1%, esto una vez que, al simulador se le proporciona un tiempo de 35 segundos para estabilizar su nivel de irradiancia.

Lo que esto implica es que el simulador desarrollado tiene una variación muy baja de la irradiancia entrando en la clasificación B de la tabla 2.2 de los índices de calidad para un simulador solar. Desafortunadamente, no se pudo medir de manera directa la calidad del espectro ni la no uniformidad de la irradiancia, por lo que, en estos ámbitos, no se puede asegurar con certeza como se desempeña el simulador solar.

Sin embargo, para el indicador de calidad de la no uniformidad de la irradiancia, es posible analizando las curvas V/I y V/P obtenidas intuir si la irradiancia presenta una distribución uniforme o presenta cierto nivel de no uniformidad.

6.4 Análisis de la uniformidad de la irradiancia y la alimentación CD de los halógenos

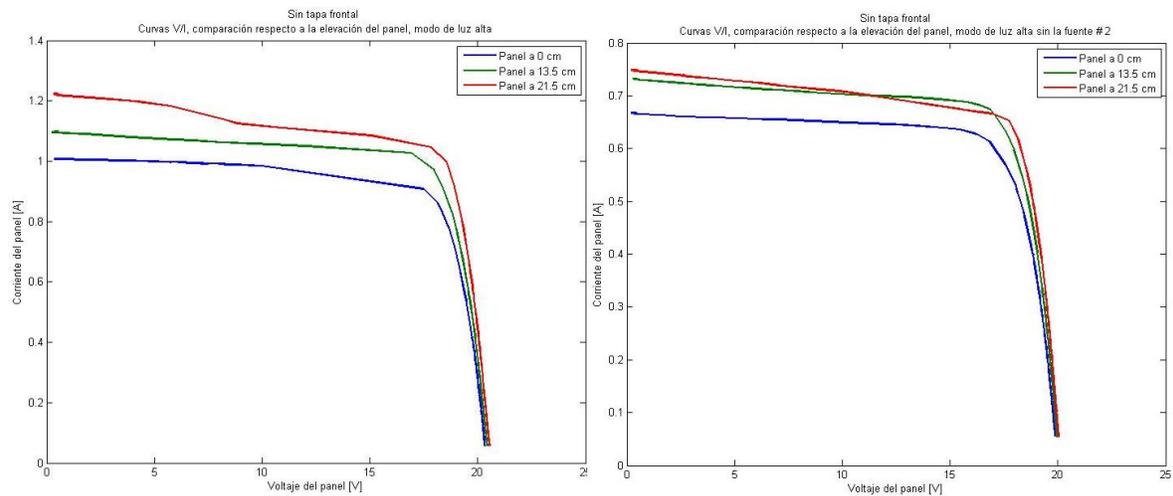
La forma de las curvas V/I y V/P obtenidas en las pruebas permiten obtener información de cómo se distribuye la irradiancia para cada modo de operación. En el capítulo 5 de este documento se presentaron los resultados obtenidos para todos los modos en que se probó el simulador. En general, se encontró que el modo de luz alta a pesar de permitir obtener la máxima irradiancia, presenta un cierto nivel de no uniformidad en la misma. El modo de luz alta sin la fuente # 2 en contraste, presenta una no uniformidad de la irradiancia muy baja. La figura 6.3 presenta una comparación entre estos dos modos de operación (curvas V/I) para el simulador con la tapa frontal puesta y con el panel a distintas elevaciones:



MATLAB

Figura 6.3 Comparación entre los modos de luz alta y luz alta sin la fuente #2, simulador con tapa frontal.

En el caso del simulador operando sin la tapa frontal el modo de luz alta presenta una mejor distribución de la irradiancia a excepción de la elevación a 21.5 cm como se aprecia en la figura 6.4.

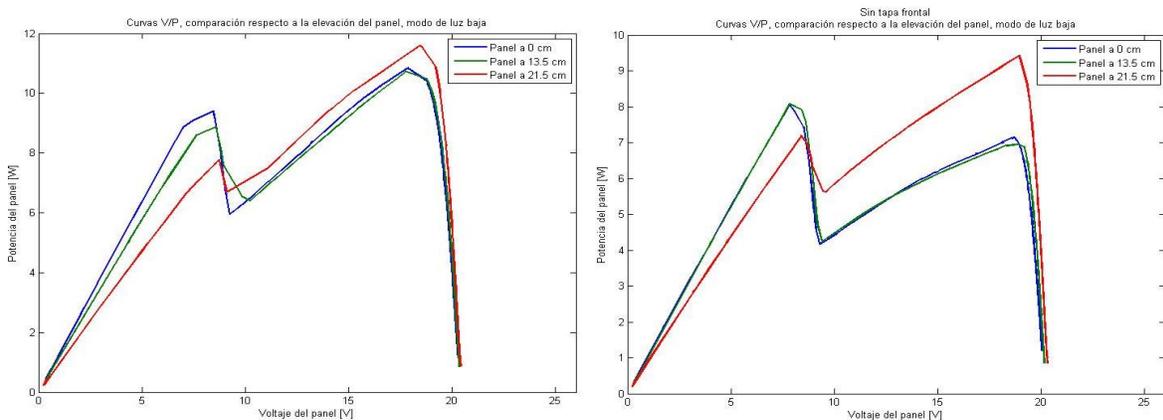


MATLAB

Figura 6.4 Comparación entre los modos de luz alta y luz alta sin la fuente #2, simulador sin tapa frontal.

Analizando esta situación se determina que el simulador sin la tapa frontal presenta la mejor distribución de la irradiancia, sin embargo, los niveles de irradiancia obtenidos son mejores al utilizarlo de esta manera.

Se encontró que la no uniformidad de la irradiancia en el modo de luz baja es muy alta, ocasionando la formación de máximos locales en las curvas V/P, la razón de esta mala distribución de la uniformidad es la forma en que operan los halógenos H4 en luz baja, como se mostró en la figura 3.5. La posición de los máximos locales varía dependiendo si se usa el simulador con la tapa frontal o sin esta (a excepción de la elevación a 21.5 cm), como se ilustra en la figura 6.5.



MATLAB

Figura 6.5 Comparación del modo de luz baja entre el simulador con tapa y sin tapa frontal.

Respecto al beneficio de la utilización de la alimentación CD para generar la irradiancia, este se puede demostrar en cualquiera de las curvas V/I y V/P obtenidas. Ninguna curva presentó ruido debido a cambios en la irradiancia, además, la estabilización de la irradiancia obtenida fue siempre menor al 1% en todas las pruebas.

6.6 Comparación entre el modelo de LTSpice y los datos experimentales

La tabla 6.1 resume los porcentajes de error obtenidos para el punto de máxima potencia entre el modelo implementado en LTSpice y los datos obtenidos en las pruebas de luz alta y luz alta sin la fuente # 2.

Tabla 6.1 Comparación entre el modelo de LTSpice y los datos experimentales.

Modo de Operación	Magnitud (Unidades)	Elevación del panel dentro del simulador		
		0 cm	13.5 cm	21.5 cm
Luz Alta Con tapa frontal	P_{MPPExp} (W)	22.0172	21.9870	21.2595
	$P_{MPPModelo}$ (W)	21.0199	21.0199	19.9516
	% Error (%)	4.75	4.6	6.5
Luz Alta sin la fuente #2 Con tapa frontal	P_{MPPExp} (W)	14.2828	14.4601	13.1808
	$P_{MPPModelo}$ (W)	13.2469	13.4362	11.8664
	% Error (%)	7.8	7.08	11
Luz Alta Sin tapa frontal	P_{MPPExp} (W)	15.7748	17.5401	18.5249
	$P_{MPPModelo}$ (W)	15.0485	16.4342	17.7554
	% Error (%)	4.8	6.3	4.15
Luz Alta sin la fuente #2 Sin tapa frontal	P_{MPPExp} (W)	10.3302	11.3909	11.5682
	$P_{MPPModelo}$ (W)	9.2945	9.9044	10.9253
	% Error (%)	10	13	5.86

Al analizar estos porcentajes de error se deben tener en cuenta tres factores: 1) El modelo es ideal y no considera que la eficiencia del panel real puede ser más alta o más baja. 2) El panel tiene una incertidumbre asociada a su eficiencia, para el panel utilizado el fabricante establece una incertidumbre de +10% / -5% [10]. 3) La eficiencia del panel es menor para escenarios de baja irradiancia, el fabricante establece hasta un 6% menor. Por lo tanto, tomando estas consideraciones en cuenta, se puede establecer que el modelo valida los resultados que se obtuvieron en las pruebas experimentales, ya que en términos generales el porcentaje de error ronda el 6%.

6.7 Diferencia entre la operar el simulador con tapa frontal o sin tapa frontal

Al comparar los modos de operación con tapa (sellado) y sin tapa, no se puede determinar que uno sea mejor que el otro. Cada modo tiene sus ventajas y desventajas, por ejemplo, las ventajas del modo de operación con el simulador sellado son:

- Se obtiene la máxima irradiancia y el máximo punto de máxima potencia posible.
- No es necesario elevar el panel dentro del simulador.

Entre las desventajas de este modo se encuentran:

- El panel se calienta en promedio un 23% más rápido respecto al simulador sin tapa.
- El modo de luz alta presenta una leve no uniformidad de la distribución de la irradiancia

Para el modo de operación con el simulador sin tapa las principales ventajas son:

- Se obtiene la mejor distribución de irradiancia a excepción del panel elevado a 21.5 cm
- El panel tarda más tiempo en calentarse.

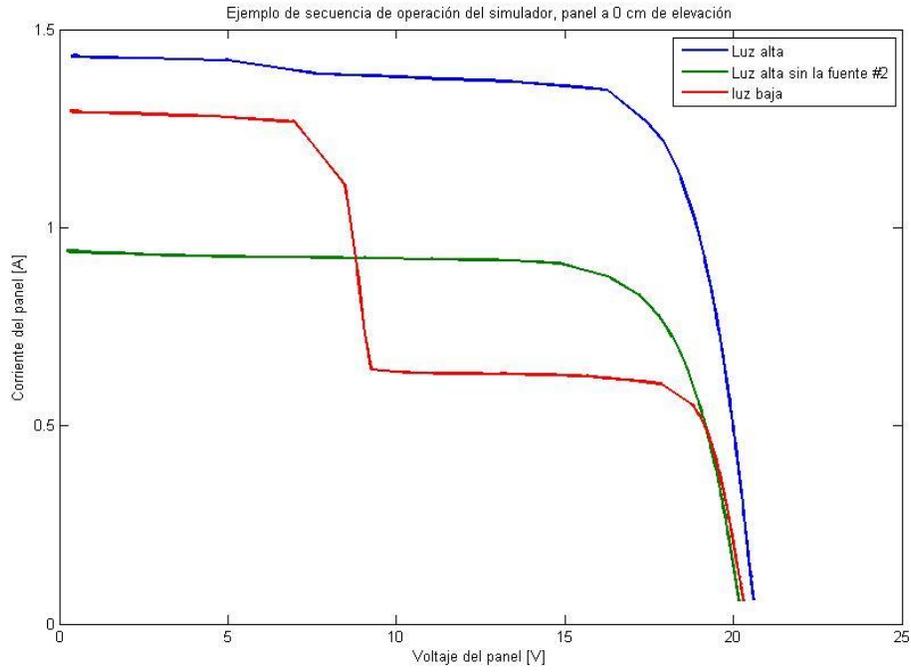
6.8 Ejemplo de uso del simulador: prueba de algoritmos MPPT

Como se indicó, la razón para el desarrollo de este proyecto es la de la prueba de algoritmos MPPT. Como se estudió en el marco teórico, un algoritmo MPPT es un programa desarrollado para buscar el punto de máxima potencia posible para la operación del panel solar.

Una comparación entre algoritmos MPPT tiene como objetivo determinar en qué aspectos un algoritmo es mejor que otro, una combinación de los 3 modos de operación básicos del simulador solar podría proporcionar información relevante de cómo se comporta un algoritmo MPPT, por ejemplo:

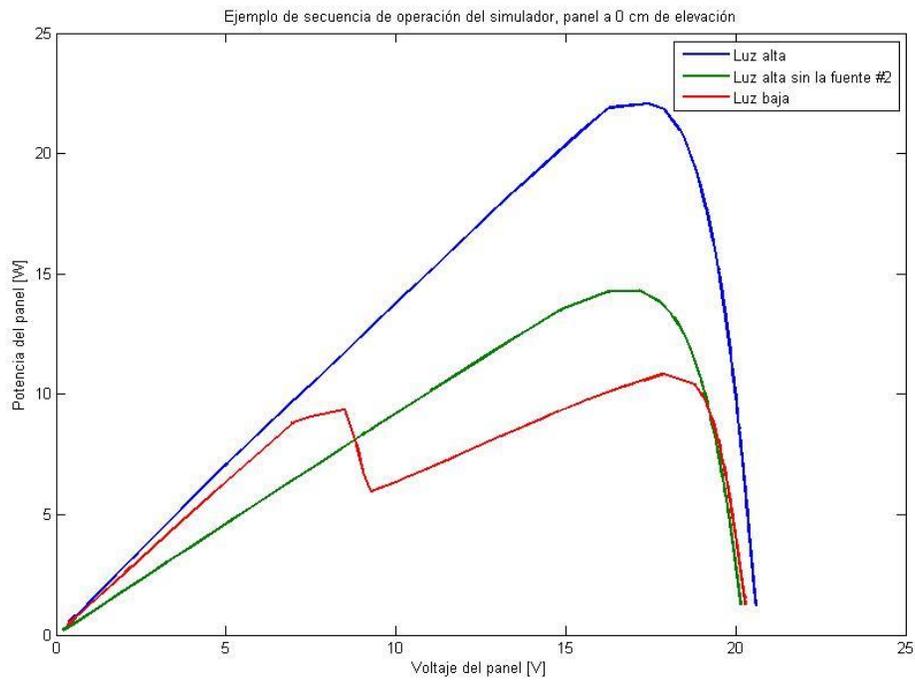
- La potencia a la cual converge el algoritmo (idealmente al punto de máxima potencia)
- La velocidad a la que el algoritmo converge.
- Como se comporta el algoritmo en condiciones de sombreado parcial (a cuál máximo local converge y si siempre converge al mismo).

Las figuras 6.6 y 6.7 son un ejemplo de cómo se puede programar el simulador solar para responder estas interrogantes, en el apéndice 3 se puede encontrar el código para generar este modo de operación.



MATLAB

Figura 6.6 Ejemplo de una secuencia de prueba de algoritmos MPPT (curvas V/I).



MATLAB

Figura 6.7 Ejemplo de una secuencia de prueba de algoritmos MPPT (curvas V/P)

En esta secuencia de ejemplo, primeramente, se comienza con el modo de luz alta operando durante al menos 40 s (para que la irradiancia alcance su máximo), en este punto se puede medir si el algoritmo está convergiendo o no en el punto de máxima potencia (el cual ya se conoce con una incertidumbre del 0.27% (ver tabla 6.10 modo luz alta @ 0cm). Luego el simulador apaga la fuente #2, como ya pasó el tiempo de calentamiento, en este modo se puede operar durante unos 10 s, es en este momento del cambio que se puede estudiar la velocidad de convergencia del algoritmo MPPT. Finalmente, el simulador pasa a operar al modo de luz baja, en este modo se puede determinar a cuál de los máximos locales tiende el algoritmo. El ejemplo ilustrado en las figuras 6.59 y 6.60 se basa en el simulador operando con el panel a 0 cm y la tapa frontal puesta (sellado).

Los modos de operación estudiados no son los únicos en los que puede operar el simulador, como se tiene una matriz de 12 halógenos con 2 modos de operación, se cuentan con al menos 144 combinaciones posibles que el usuario puede emplear, a esto se le agrega el hecho de que las fuentes 2 y 3 pueden apagarse para apagar alguna columna de halógenos.

Finalmente cabe aclarar que los resultados de incertidumbre de las tensiones, corrientes y puntos de máxima potencia obtenidos en las tablas 5.11 y 5.21 aplican solamente para el panel KC65T con número serial: 1085BH0248 y utilizando el equipo de medición mostrado en la figura 4.1.

Capítulo 7 Conclusiones

La recámara construida demostró ser capaz de soportar las temperaturas de operación del simulador solar. La máxima temperatura medida fue de 130 °C, este nivel de temperatura se concentró en el reflector de los halógenos H4. Los termistores alcanzaron una temperatura máxima de 105 °C.

La etapa de acople diseñada a partir de termistores NTC permitió el control de la corriente transiente de los halógenos, reduciendo la corriente inicial en un 80%. Sin embargo, esta solución es la responsable del comportamiento de "carga" de la irradiancia.

La estabilidad de la irradiancia del simulador diseñado se mantuvo por debajo del 1% en todas las pruebas, lo que significa que los niveles de irradiancia obtenidos presentan muy poca variabilidad.

La no uniformidad de la irradiancia del simulador es muy baja al operarlo sin la tapa frontal, en modo de luz alta y con el panel a una altura no mayor de 13.5 cm. Al operar el simulador solar con la tapa frontal en modo de luz alta la no uniformidad aumenta afectando las curvas V/I y V/P que se puedan obtener.

La no uniformidad de la irradiancia del simulador en modo de luz baja es considerable sin importar si se utiliza el simulador con la tapa frontal o sin esta. Esta variación en la uniformidad permite al simulador emular escenarios de sombreado parcial sin necesidad de tapar físicamente las celdas del panel solar.

Operar el simulador sin la tapa frontal permite obtener curvas con una buena uniformidad de la irradiancia, con un cambio de la temperatura del panel respecto al tiempo 23% más bajo que con el simulador con la tapa frontal, esto a cambio de una reducción del 30 % en los niveles de irradiancia.

Se obtuvo en promedio un 6% de porcentaje de error entre los datos experimentales y los datos generados por el modelo del panel en LTSpice. Este porcentaje se encuentra dentro del rango de incertidumbre del panel solar y por lo tanto validan las pruebas realizadas en este proyecto.

Capítulo 8 Recomendaciones

En el estado actual el simulador solar diseñado presenta las siguientes limitaciones:

1. El nivel máximo de irradiancia es de $342.9001 \pm 0.17 \%$ W/m²
2. Se requiere de un tiempo de estabilización (aproximadamente 35 s) para que la irradiancia alcance su valor máximo
3. En operación, la fuente 1 debe permanecer encendida siempre
4. No se puede apagar una fuente e intentar encenderla poco tiempo después si no se cambia el modo de operación de los halógenos.
5. El simulador solo soporta paneles de hasta 36 celdas en la recámara

Para mejorar el nivel de máxima irradiancia se podría duplicar el número de halógenos en la matriz, sin embargo, hacer esto implica el empleo de fuentes de poder de al menos 1000 W cada una. Sin embargo, esto debe considerar que el precio de las PSU se dispara al aumentar su potencia, como se muestra en la figura 8.1. Otra consideración a tomar es el aumento de temperatura, si se toman los datos de las figuras 5.11 y 5.21 y se estudia la relación temperatura/cantidad de halógenos se puede discernir que el aumento puede no ser lineal. Si el factor dT/dt aumenta considerablemente entonces se deben tomar medidas a la hora de realizar las pruebas, por ejemplo, permitir unos 45 s para que la irradiancia alcance su máximo antes de meter el panel solar al simulador y también realizar la toma de datos en el menor tiempo posible.

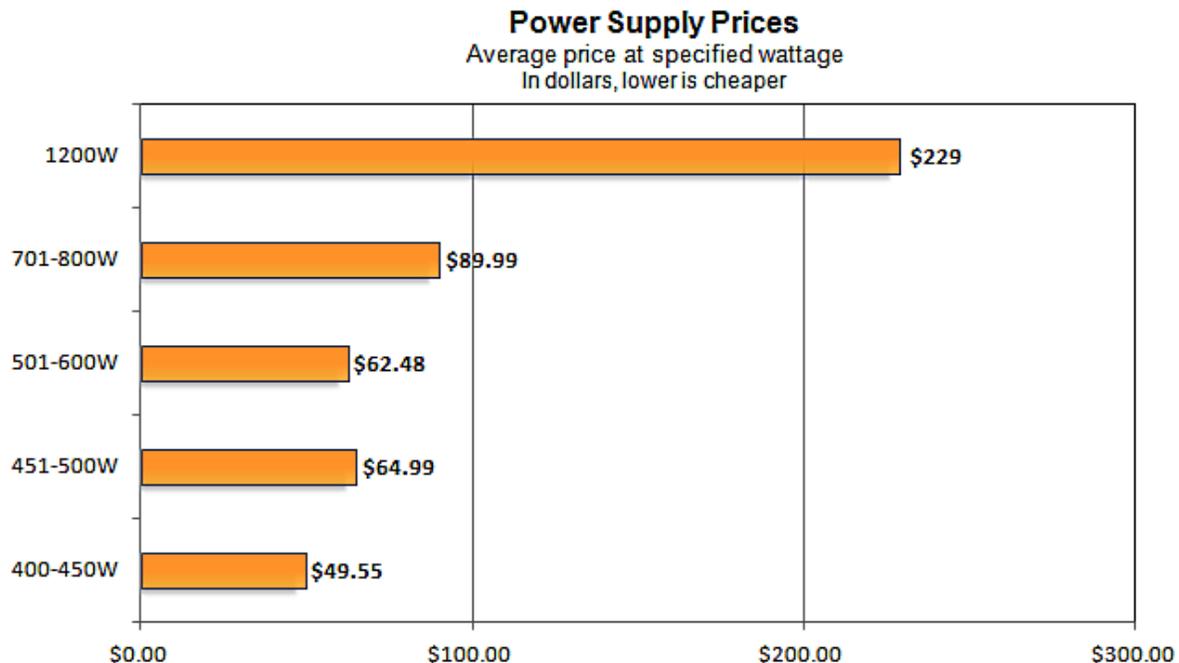
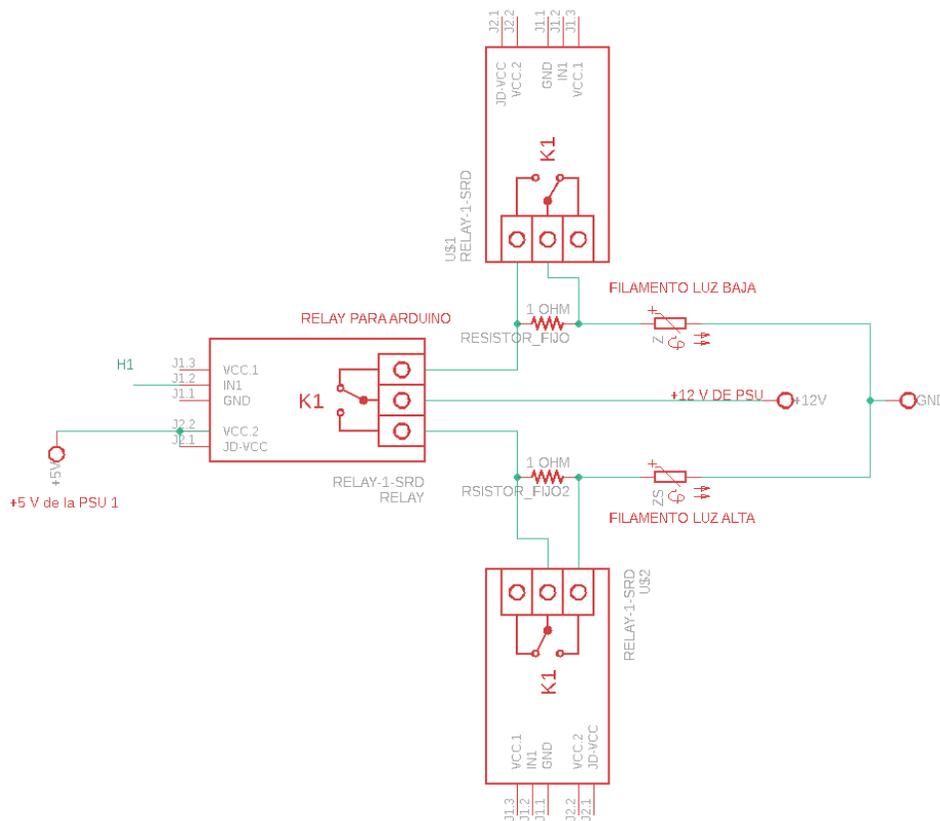


Figura 8.1 Precio promedio vs potencia de una PSU [29] .

El punto 2 y el punto 4 son limitaciones de los termistores NTC empleados para evitar el transiente de corriente de los halógenos. Básicamente el termistor al calentarse va bajando su resistencia hasta el punto en que puede considerarse un corto-circuito, sin embargo, esto toma tiempo, eso se ve reflejado en cada curva de irradiancia en función del tiempo presentada en la sección 3. El punto 4 lo que implica es que, si el simulador se encuentra por ejemplo trabajando en modo de luz alta y se procede a apagar una fuente en una segunda etapa, para encenderla se debe hacer en modo de luz baja. En caso de no hacerlo así, la fuente se puede apagar.

Esto se debe a que el termistor puede estar aún caliente, por lo tanto, es casi un corto circuito y el transiente del halógeno se puede dar en este caso. Una rutina de programación como la diseñada para probar algoritmos MPPT (punto 6.8) no se ve afectada por este problema. Debido a esto, se recomienda emplear otro tipo de control de transiente en caso de que se desee hacer cambios rápidos de luminosidad. Por ejemplo, el propuesto en la figura 8.2, este tipo de control implica el uso de una resistencia fija como limitante de la corriente transiente. Esta arquitectura requiere de una programación un poco más compleja que la actual, esto debido a que se debe programar el relé paralelo a la resistencia fija para ponerla en corto una vez transcurrido el transiente:



EAGLE

Figura 8.2 Arquitectura con resistor fijo para eliminar la corriente transiente.

La solución al punto 5 es rediseñar la recámara para que pueda albergar paneles solares de hasta 72 celdas, estos son el estándar actual. Hacer eso implica extrapolar todo lo desarrollado en este reporte, debido a que el área pasa de 0.56 m^2 a 2 m^2 , se debe triplicar la cantidad de halógenos a utilizar. Es decir, emplear al menos 36 halógenos (alimentados por 3 fuentes de 1200 W) distribuidos en un área de 2 m^2 . La parte más importante del simulador es el reflector, utilizar un diseño similar al desarrollado para este proyecto implicará una buena distribución de la irradiancia dentro del simulador.

Respecto a la programación del simulador, es recomendable el desarrollo de un GUI más amigable con el usuario. En el estado actual del mismo se debe programar en el IDE de arduino y se debe tener un grado de conocimiento de programación básica. Como se indicó anteriormente el controlador puede ser cambiado por cualquier dispositivo programable que sea compatible con las salidas digitales de arduino (una raspberry pi por ejemplo).

Finalmente, los datos de las incertidumbres contenidos en este reporte son muy dependientes de las condiciones de prueba. Por ejemplo, se encontró que si la temperatura al momento de medición es 1 grado mayor a la temperatura empleada en las pruebas la incertidumbre aumenta a un 2% en el punto de máxima potencia, aún en estas condiciones la incertidumbre es baja.

9 Bibliografía

- [1] La Vanguardia (2017). "Costa Rica a punto de conseguir el 100% de toda su energía de fuentes renovables". Artículo en línea. Recuperado de: <http://www.lavanguardia.com/economia/20170104/413093838923/costa-rica-energia-renovables-2016.html>
- [2] Excelsys Technologies (2016). "Driving Halogen Lamps". Artículo en línea. Recuperado de: https://www.excelsys.com/wp-content/uploads/2016/07/AN1604_Driving_Halogen_Lamps.pdf
- [3] Freescale Semiconductor (2013). "Lamp inrush current computation tool for optimal extreme switch usage". Artículo en línea. Recuperado de: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4049.pdf>
- [4] Pasco Scientific (N.I). "Temperature and resistivity for tungsten". Artículo en línea. Recuperado de: http://physics.usask.ca/~bzulkosk/Lab_Manuals/EP354/ep354_thermal-radiation-lab_Tungsten-Temp-Resistivity.pdf
- [5] B. Kovacevic (1997). "Driving halogen lamps". Artículo en línea. Recuperado de: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Driving%20Halogen%20Lamps.pdf>
- [6] USHIO (N.I). "Halogen lamps technical specifications". Artículo en línea. Recuperado de: <https://www.ushio.com/files/manual/halogentechnicalspecs.pdf>
- [7] W. Reyes, C. Meza. (2014). "Discusión y evaluación de fuentes de luz artificial para la caracterización de dispositivos fotovoltaicos". Tecnología en Mragha. Edición especial Movilidad Estudiantil 2014. Pág 31-40.
- [8] SESLab, "Características Eléctricas de un módulo". Artículo en línea. Recuperado de: http://seslab.org/fotovoltaico/131_caractersticas_elctricas_de_un_mdulo.html
- [9] S.Kolsi, H.Samet, M. Ben Amar. (2014). "Design Analysis of DC-DC Converters Connected to a Photovoltaic Generator and Controlled by MPPT for Optimal Energy Transfer throughout a Clear Day". Journal of Power and Energy Engineering. Publicado en línea.
- [10] Kyocera Corporation(N.I). "KC65T". En línea. Recuperado de: <https://www.kyocerasolar.com/dealers/product-center/archives/spec-sheets/KC65T.pdf>
- [11] J.Cubas, S. Pindado, C. De Manuel (2014). "Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function". Artículo en línea. Recuperado de: www.mdpi.com/1996-1073/7/7/4098/pdf
- [12] M.Shafer, D.Kammen, N.Kebir, D.Philipp (2014). "Innovating Energy Acces for remote areas: discovering untapped resources". University of Berkeley. Publicado por: Deutshe Nationalbibliothek. Pág 127
- [13] Endeas (2018). "Quick sun 600". En línea. Recuperado de: <https://www.endeas.fi/quicksun-600/>
- [14] R. Atwell (2011). "Bosh H4". En línea. Recuperado de: <http://www.ratwell.com/technical/BoschH4.html>
- [15] Plycem (2016). "Fire Resistance ratings – ANSI/UL263". En línea. Recuperado de: <https://www.plycem.com/contenido/wp-content/uploads/2016/10/Certificacion-Resistencia-al-fuego.pdf>
- [16] European Comission Joint Research Centre Institute for Energy (2010). "Guidelines for PV Power Measurement in Industry". Artículo en línea. Recuperado de: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC57794/eur-24359-en.pdf>
- [17] Newport Fotonic Solutions (2018). "Technical Note: Simulation of solar irradiation". En línea. Recuperado de: <https://www.newport.com/n/simulation-of-solar-irradiation>
- [18] ZEISS Microscopy, M Davidson (N.I). "Tungsten-Haogen Incandescent Lamps". Artículo en línea. Recuperado de: <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>
- [19] Technology UK (2011). "The Power Supply Unit". En línea. Recuperado de: <http://www.technologyuk.net/computing/computer-systems/power-supply-unit.shtml>
- [20] EVGA (2018). "600W Bronze Power Supply". En línea. Recuperado de: <https://latam.evga.com/articles/00772/>

- [21] EETech Media (N.I). "Chapter 12- Physics of Conductors and Insulators". Artículo en línea. Recuperado de: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-12/temperature-coefficient-resistance/>
- [22] Citrade Ltd. (2018). "Halogen Bulb H4 12V 100/90 W". En línea. Recuperado de: <http://www.cit-ltd.co.uk/product-eng-4276-Halogen-Bulb-H4-P43t-Rainbow-12V-100-90W.html>
- [23] A. Abd el Motaleb. "Maximum Power Point tracking in Photovoltaic Systems". Tesis de Maestría. Universidad de Sevilla.
- [24] Microjpm (2018). "16 Channel 5V Relay Module SainSmart". En línea. Recuperado de: <https://www.microjpm.com/products/a16-channel-5v-relay-module-sainsmart/>
- [25] J. Miranda (2014). "Evaluación de la incertidumbre en datos experimentales". Artículo en línea. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/266099498_EVALUACION_DE_LA_INCERTIDUMBRE_EN_DATOS_EXPERIMENTALES
- [26] Comité Conjunto de Guías en Metrología (2009). "Evaluación de datos de medición Guía para la expresión de la incertidumbre de medida". Artículo en línea. Recuperado de: <http://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>
- [27] H. Rubio (2015). "Introducción a la incertidumbre de medidas". Material de clase. En línea. Recuperado de: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/diseno-mecanico-1/material_clase/introduccion-a-la-incertidumbre-de-medidas/view
- [28] M. Pérez (2012). "Estimación de incertidumbres Guía GUM". Artículo en línea. Recuperado de: https://www.uv.es/meliaj/Docencia/WebComplementarios/GuiaGUM_e_medida.pdf
- [29] J. Hruska (2012). "Is it worth investing in a high efficiency power supply?". Artículo en línea. Recuperado de: <https://www.extremetech.com/extreme/143029-empowered-can-high-efficiency-power-supplies-cut-your-electricity-bill>

10 Apéndices

10.1 Apéndice A1: Ejemplo de programación, prueba de algoritmos MPPT

//Acá se definen las variables booleanas a utilizar en el programa

```
#define RELAY_ON 0 //Los módulos de relés de Arduino son activos en bajo
```

```
#define RELAY_OFF 1
```

//Acá se define la asignación de pines, los relés 1 al 12 representan los halógenos, F1 a F3 son las fuentes de poder

```
#define Relay_1 22
```

```
#define Relay_2 23
```

```
#define Relay_3 24
```

```
#define Relay_4 25
```

```
#define Relay_5 26
```

```
#define Relay_6 27
```

```
#define Relay_7 28
```

```
#define Relay_8 29
```

```
#define Relay_9 30
```

```
#define Relay_10 31
```

```
#define Relay_11 32
```

```
#define Relay_12 33
```

```
#define Relay_F1 38
```

```
#define Relay_F2 40
```

```
#define Relay_F3 42
```

//Se programa el simulador solar en el void setup para que el programa solo se ejecute una vez

```
void setup() {
```

```
    //Se inicializan los relés para que se encuentren apagados al momento de un reset
```

```
    digitalWrite(Relay_1, RELAY_OFF);
```

```
    digitalWrite(Relay_2, RELAY_OFF);
```

```
    digitalWrite(Relay_3, RELAY_OFF);
```

```
    digitalWrite(Relay_4, RELAY_OFF);
```

```
    digitalWrite(Relay_5, RELAY_OFF);
```

```
    digitalWrite(Relay_6, RELAY_OFF);
```

```
    digitalWrite(Relay_7, RELAY_OFF);
```

```
    digitalWrite(Relay_8, RELAY_OFF);
```

```
    digitalWrite(Relay_9, RELAY_OFF);
```

```
    digitalWrite(Relay_10, RELAY_OFF);
```

```
    digitalWrite(Relay_11, RELAY_OFF);
```

```

digitalWrite(Relay_12, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_13, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_14, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_15, RELAY_OFF);
//IMPORTANE: LA FUENTE 1 SIEMPRE SE INICIA ENCENDIDA YA QUE ES LA QUE ALIMENTA A LOS RELÉS
digitalWrite(Relay_F1 , RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_OFF);

//Luego de inicializar los relés. se procede a establecer a los pines como salidas
pinMode(Relay_1, OUTPUT);
pinMode(Relay_2, OUTPUT);
pinMode(Relay_3, OUTPUT);
pinMode(Relay_4, OUTPUT);
pinMode(Relay_5, OUTPUT);
pinMode(Relay_6, OUTPUT);
pinMode(Relay_7, OUTPUT);
pinMode(Relay_8, OUTPUT);
pinMode(Relay_9, OUTPUT);
pinMode(Relay_10, OUTPUT);
pinMode(Relay_11, OUTPUT);
pinMode(Relay_12, OUTPUT);
pinMode(Relay_13, OUTPUT);
pinMode(Relay_14, OUTPUT);
pinMode(Relay_15, OUTPUT);
pinMode(Relay_F1 , OUTPUT);
pinMode(Relay_F2 , OUTPUT);
pinMode(Relay_F3 , OUTPUT);

//ETAPA 1: Modo de luz alta
delay(150);          //Se toma un tiempo de 150 ms entre el encendido de cada fuente, ya la fuente 1 se había encendido ahora se
                    //encienden 2 y 3
digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_ON);
delay(150);
digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_ON);

//Se define el estado de los halógenos, RELAY_ON = Luz Alta
digitalWrite(Relay_1, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_2, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_3, RELAY_ON);

```

```

digitalWrite(Relay_4, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_5, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_6, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_7, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_8, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_9, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_10, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_11, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_12, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_13, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_14, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_15, RELAY_ON);

delay (45000);      //ACA SE DEFINE EL TIEMPO DE LA ETAPA 1 EN ms

//ETAPA 2: Modo de luz alta sin la fuente # 2

digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);      //NOTA, COMO ANTERIORMENTE SE DEFINIERON LOS HALOGENOS EN ALTA
//NO ES NECESARIO VOLVER A DEFINIRLOS PARA ESTA SEGUNDA ETAPA

delay (15000);      //ACA SE DEFINE EL TIEMPO DE LA ETAPA 2 EN ms

//ETAPA 3: Modo de luz baja

//Se define el estado de los halógenos, RELAY_OFF = Luz baja

digitalWrite(Relay_1, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_2, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_3, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_4, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_5, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_6, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_7, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_8, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_9, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_10, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_11, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_12, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_13, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_14, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_15, RELAY_OFF);

//Se vuelve a encender la fuente # 2

digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_ON);

```

```

    delay(45000);          //ACA SE DEFINE EL TIEMPO DE LA ETAPA 3 EN ms
//ETAPA n: si el usuario desea agregar más etapas lo puede hacer a partir de este punto

//PROCESO DE APAGADO
digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);
delay(1500);
digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_OFF);
delay(1500);
digitalWrite(Relay_F1 , RELAY_OFF); //LA FUENTE 1 SIEMPRE DEBE APAGARSE AL FINAL
}
//NO PROGRAMAR EN EL VOID LOOP PARA EVITAR QUE EL SIMULADOR PUEDA QUEDAR EN UN CICLO DE ENCENDIDO
void loop() {}

```

10.2 Apéndice A2: Ejemplo de programación, Luz alta durante 1 minuto

```

//Acá se definen las variables booleanas a utilizar en el programa
#define RELAY_ON 0 //Los módulos de relés de Arduino son activos en bajo
#define RELAY_OFF 1

//Acá se define la asignación de pines, los relés 1 al 12 representan los halógenos, F1 a F3 son las fuentes de poder
#define Relay_1 22
#define Relay_2 23
#define Relay_3 24
#define Relay_4 25
#define Relay_5 26
#define Relay_6 27
#define Relay_7 28
#define Relay_8 29
#define Relay_9 30
#define Relay_10 31
#define Relay_11 32
#define Relay_12 33
#define Relay_F1 38
#define Relay_F2 40
#define Relay_F3 42

//Se programa el simulador solar en el void setup para que el programa solo se ejecute una vez
void setup() {
    //Se inicializan los relés para que se encuentren apagados al momento de un reset

```

```

digitalWrite(Relay_1, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_2, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_3, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_4, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_5, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_6, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_7, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_8, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_9, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_10, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_11, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_12, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_13, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_14, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_15, RELAY_OFF);

//IMPORTANE: LA FUENTE 1 SIEMPRE SE INICIA ENCENDIDA YA QUE ES LA QUE ALIMENTA A LOS RELÉS

digitalWrite(Relay_F1 , RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_OFF);

//Luego de inicializar los relés. se procede a establecer a los pines como salidas

pinMode(Relay_1, OUTPUT);
pinMode(Relay_2, OUTPUT);
pinMode(Relay_3, OUTPUT);
pinMode(Relay_4, OUTPUT);
pinMode(Relay_5, OUTPUT);
pinMode(Relay_6, OUTPUT);
pinMode(Relay_7, OUTPUT);
pinMode(Relay_8, OUTPUT);
pinMode(Relay_9, OUTPUT);
pinMode(Relay_10, OUTPUT);
pinMode(Relay_11, OUTPUT);
pinMode(Relay_12, OUTPUT);
pinMode(Relay_13, OUTPUT);
pinMode(Relay_14, OUTPUT);
pinMode(Relay_15, OUTPUT);
pinMode(Relay_F1 , OUTPUT);

```

```

pinMode(Relay_F2 , OUTPUT);
pinMode(Relay_F3 , OUTPUT);

//ETAPA 1: Modo de luz alta

delay(150);          //Se toma un tiempo de 150 ms entre el encendido de cada fuente, ya la fuente 1 se había encendido ahora se
                    //encienden 2 y 3

digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_ON);

delay(150);

digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_ON);

//Se define el estado de los halógenos, RELAY_ON = Luz Alta

digitalWrite(Relay_1, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_2, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_3, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_4, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_5, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_6, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_7, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_8, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_9, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_10, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_11, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_12, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_13, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_14, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_15, RELAY_ON);

delay (60000);      //ACA SE DEFINE EL TIEMPO DE LA ETAPA 1 EN ms

//PROCESO DE APAGADO

digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);

delay(1500);

digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_OFF);

delay(1500);

digitalWrite(Relay_F1 , RELAY_OFF); //LA FUENTE 1 SIEMPRE DEBE APAGARSE AL FINAL
}

//NO PROGRAMAR EN EL VOID LOOP PARA EVITAR QUE EL SIMULADOR PUEDA QUEDAR EN UN CICLO DE ENCENDIDO
void loop() {}

```

10.3 Apéndice A3: Ejemplo de programación, Luz baja durante 1 minuto

```
//Acá se definen las variables booleanas a utilizar en el programa
#define RELAY_ON 0 //Los módulos de relés de Arduino son activos en bajo
#define RELAY_OFF 1

//Acá se define la asignación de pines, los relés 1 al 12 representan los halógenos, F1 a F3 son las fuentes de poder
#define Relay_1 22
#define Relay_2 23
#define Relay_3 24
#define Relay_4 25
#define Relay_5 26
#define Relay_6 27
#define Relay_7 28
#define Relay_8 29
#define Relay_9 30
#define Relay_10 31
#define Relay_11 32
#define Relay_12 33
#define Relay_F1 38
#define Relay_F2 40
#define Relay_F3 42

//Se programa el simulador solar en el void setup para que el programa solo se ejecute una vez
void setup() {

  //Se inicializan los relés para que se encuentren apagados al momento de un reset
  digitalWrite(Relay_1, RELAY_OFF);
  digitalWrite(Relay_2, RELAY_OFF);
  digitalWrite(Relay_3, RELAY_OFF);
  digitalWrite(Relay_4, RELAY_OFF);
  digitalWrite(Relay_5, RELAY_OFF);
  digitalWrite(Relay_6, RELAY_OFF);
  digitalWrite(Relay_7, RELAY_OFF);
  digitalWrite(Relay_8, RELAY_OFF);
  digitalWrite(Relay_9, RELAY_OFF);
  digitalWrite(Relay_10, RELAY_OFF);
  digitalWrite(Relay_11, RELAY_OFF);
  digitalWrite(Relay_12, RELAY_OFF);
  digitalWrite(Relay_13, RELAY_OFF);
```

```

digitalWrite(Relay_14, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_15, RELAY_OFF);
//IMPORTANE: LA FUENTE 1 SIEMPRE SE INICIA ENCENDIDA YA QUE ES LA QUE ALIMENTA A LOS RELÉS
digitalWrite(Relay_F1 , RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_OFF);

//Luego de inicializar los relés. se procede a establecer a los pines como salidas
pinMode(Relay_1, OUTPUT);
pinMode(Relay_2, OUTPUT);
pinMode(Relay_3, OUTPUT);
pinMode(Relay_4, OUTPUT);
pinMode(Relay_5, OUTPUT);
pinMode(Relay_6, OUTPUT);
pinMode(Relay_7, OUTPUT);
pinMode(Relay_8, OUTPUT);
pinMode(Relay_9, OUTPUT);
pinMode(Relay_10, OUTPUT);
pinMode(Relay_11, OUTPUT);
pinMode(Relay_12, OUTPUT);
pinMode(Relay_13, OUTPUT);
pinMode(Relay_14, OUTPUT);
pinMode(Relay_15, OUTPUT);
pinMode(Relay_F1 , OUTPUT);
pinMode(Relay_F2 , OUTPUT);
pinMode(Relay_F3 , OUTPUT);

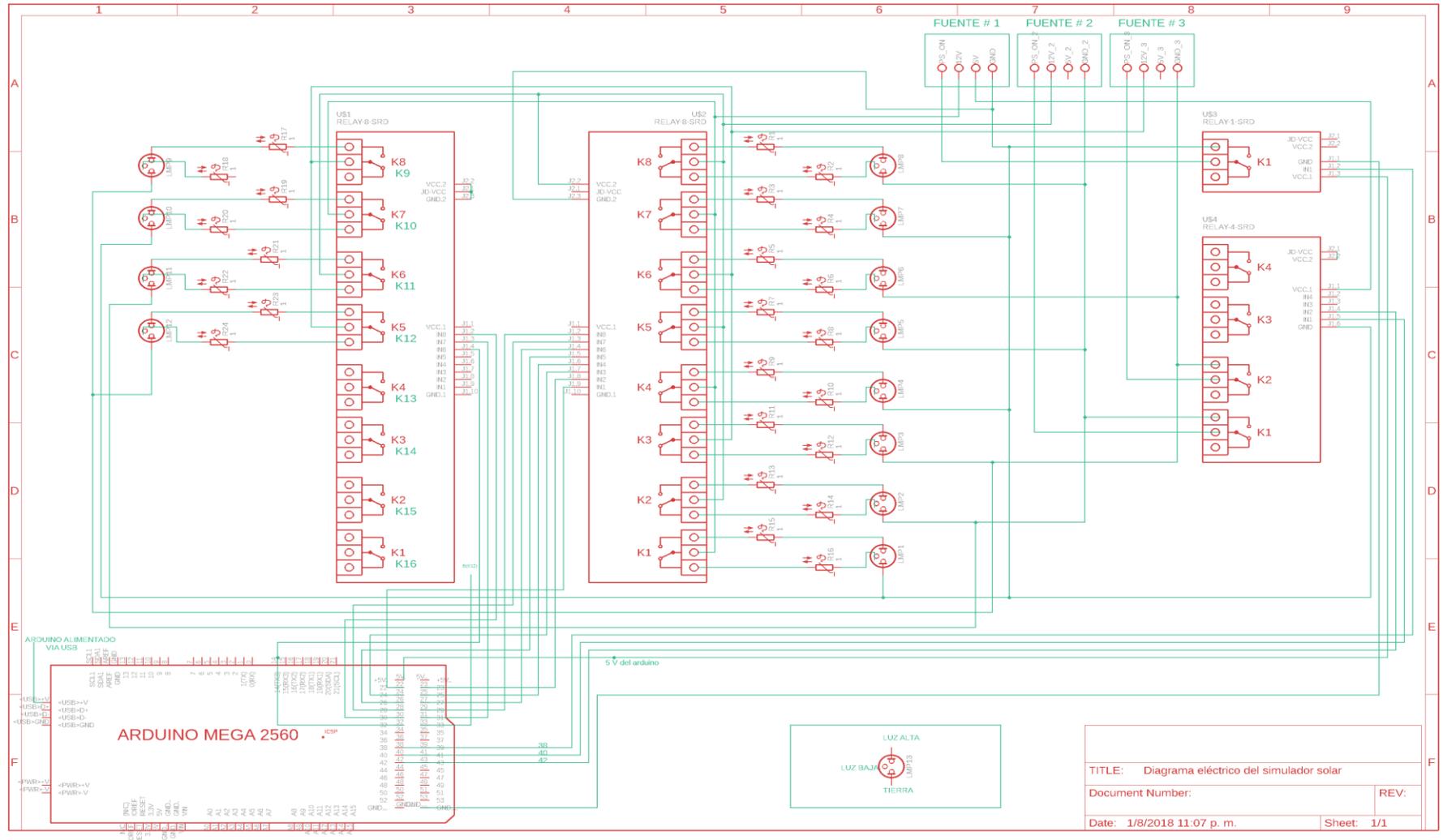
//ETAPA 1: Modo de luz baja, no es necesario redefinir el estado de los halógenos ya que están iniciados en baja
delay (60000);      //ACA SE DEFINE EL TIEMPO DE LA ETAPA 1 EN ms

//PROCESO DE APAGADO
digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);
delay(1500);
digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_OFF);
delay(1500);
digitalWrite(Relay_F1 , RELAY_OFF); //LA FUENTE 1 SIEMPRE DEBE APAGARSE AL FINAL
}

//NO PROGRAMAR EN EL VOID LOOP PARA EVITAR QUE EL SIMULADOR PUEDA QUEDAR EN UN CICLO DE ENCENDIDO
void loop() {}

```

10.4 Apéndice A4: Circuito esquemático del simulador solar en EAGLE

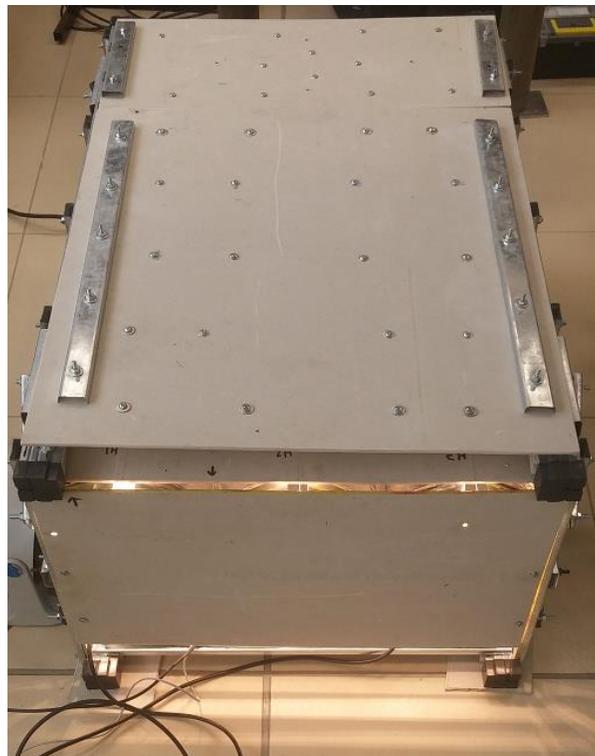


10.5 Apéndice A5: Manual de usuario del simulador solar

MANUAL DE USUARIO

PROTOTIPO DE SIMULADOR SOLAR

SESLab



CONTENIDOS

Descripción del simulador solar

Características eléctricas del simulador solar

Modos de operación del simulador solar

Programación del simulador solar

Guía de uso del simulador

Instrucciones de armado/desarmado y cambio de halógenos

Hoja de datos del simulador solar bajo pruebas con panel KC65T

Solución de problemas

Descripción del simulador solar

Este prototipo de simulador solar es un dispositivo de generación de irradiancia en un entorno cerrado. Para proveer la irradiancia se utiliza una matriz de halógenos H4 de tungsteno de 100W @ 12 V CD. La figura 1 representa el ordenamiento de esta matriz:

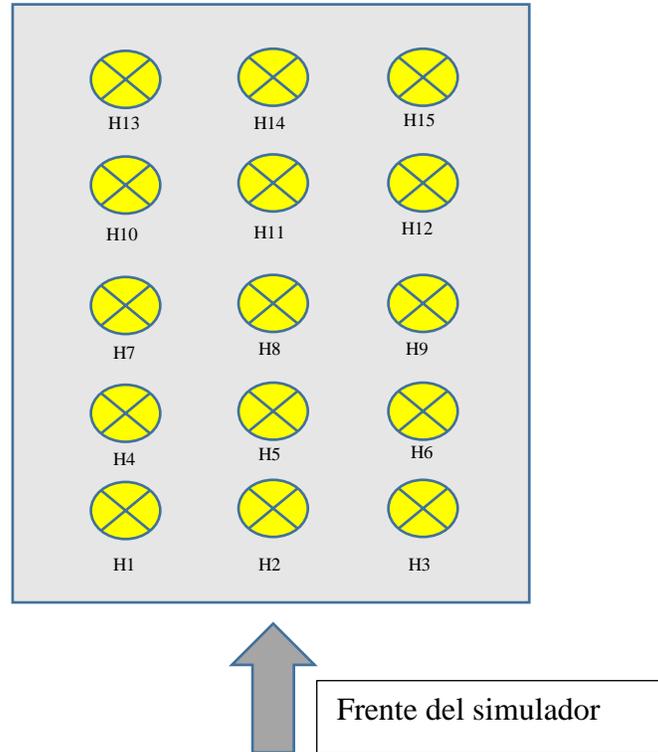


Figura 1 Matriz de halógenos del simulador, ubicada en el techo del mismo

El diseño del simulador se ilustra en la figura 2, las dimensiones del mismo son: 1.10 m x 0.7 m x 0.5 m (l x a x h), el simulador está diseñado para alojar un panel de hasta 36 celdas como lo es un KC65T, el área interna de la recámara es de 0.56 m². El diseño presenta dos recámaras, una en la que el panel se coloca para las pruebas y otra recámara que alberga las fuentes de alimentación del dispositivo y la circuitería de control.

El simulador es cerrado, pero puede operarse sin la tapa frontal, los halógenos H4 están distribuidos en el techo de la recámara de manera equidistante, cada halógeno cubre un área de 0.0046 m². El simulador presenta 15 halógenos, 3 de estos son repuestos que quedan a disposición del usuario, estos no proporcionan a la irradiancia (son los 3 halógenos de la última fila, H13, H14 y H15).

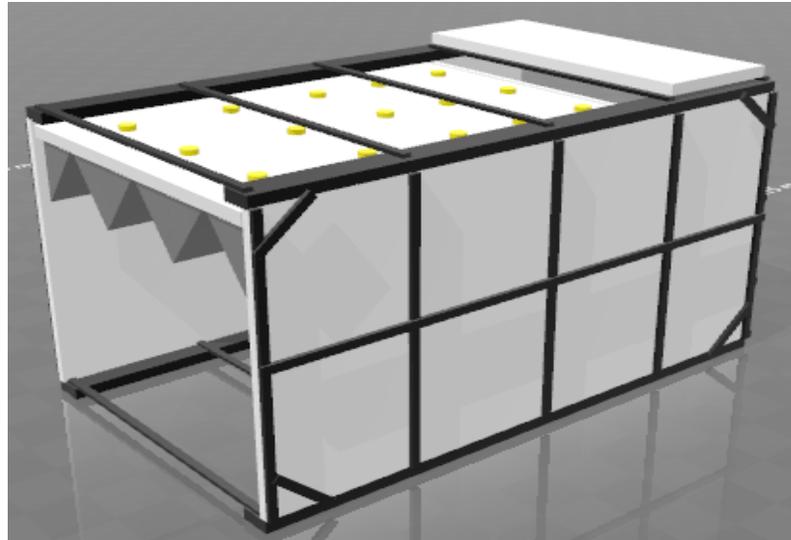


Figura 2. Diseño exterior del simulador

Las figuras 3 y 4 muestran el detalle de las vistas lateral y superior del simulador respectivamente, finalmente en la figura 5 se presenta el detalle del reflector de luz que se encargará de homogenizar la dispersión de la luz dentro de la recámara haciendo que los haces de luz incidentes en el mismo sean dirigidos hacia el "suelo" del simulador. En la figura 4 se puede observar después de la matriz de halógenos el compartimento de la circuitería del simulador.

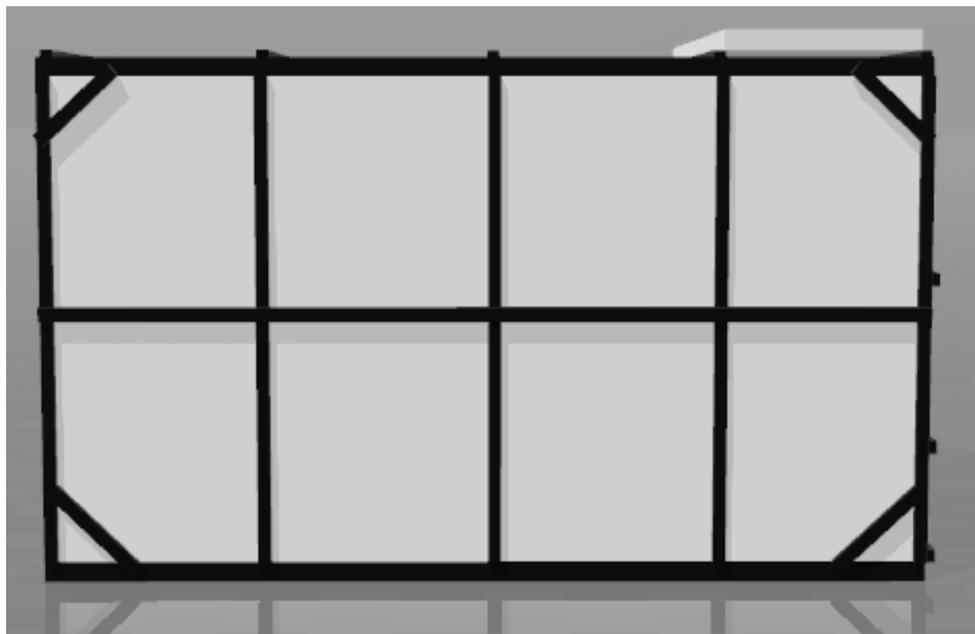


Figura 3. Vista lateral del simulador

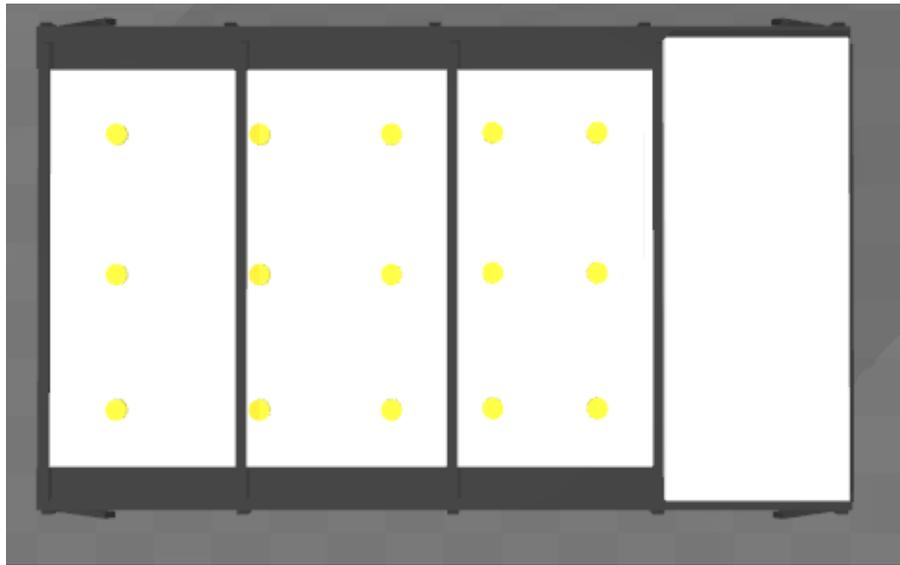


Figura 4. Vista superior del simulador (Matriz de halógenos observable)

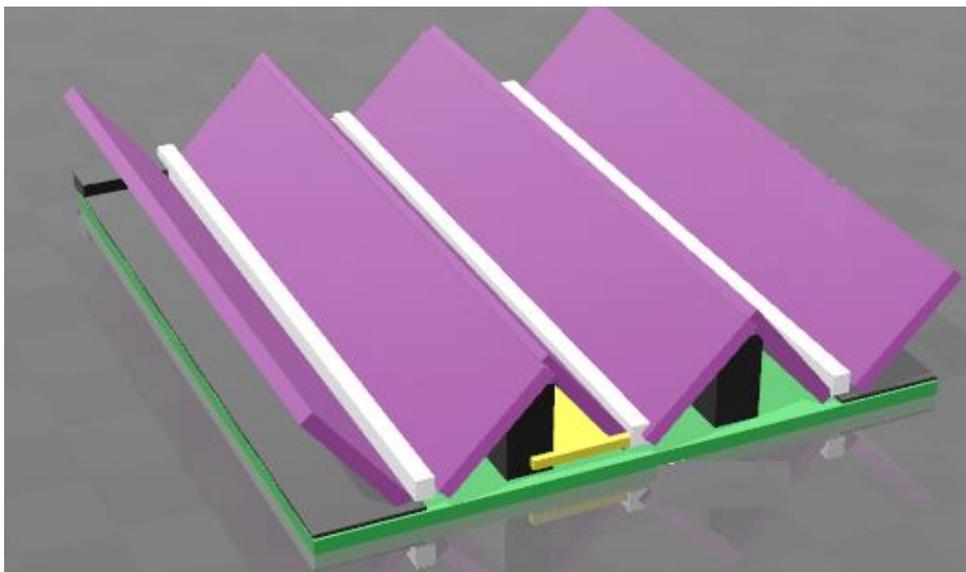


Figura 5. Detalle del reflector de luz

El diseño del reflector de luz está basado en el reflector de un vehículo para el cual se diseñó el halógeno H4. la figura 6 por ejemplo muestra el reflector de un halógeno H4 para un vehículo y el funcionamiento del mismo tanto en luz alta como en luz baja. Así que, tomando en cuenta esta información, se diseña el reflector de la figura 5 el cual consiste de dos laminas

metálicas pulidas(morado) puestas a un ángulo de 45° respecto a la otra. Este ángulo entre las láminas emula un reflector estándar como el de la figura 4.5.

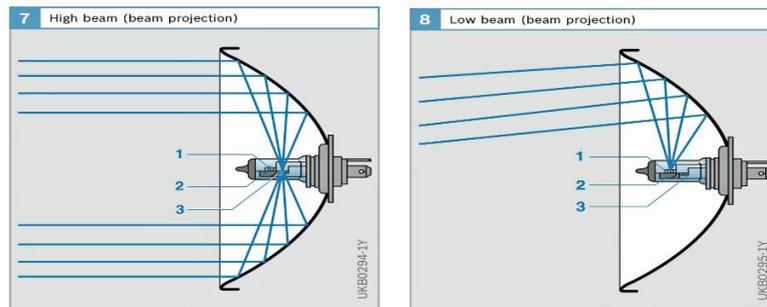


Figura 6. Reflector estándar de un vehículo con halógenos H4[14].

La estructura cuenta con resistencia al fuego y a la alta temperatura, los materiales empleados en la construcción fueron láminas de plyrock de 6 mm de grosor para las paredes (en blanco en la figura 3.9) y canal para gypsum de hierro galvanizado. Por su parte las láminas de plyrock cuentan ANSI/UL263 contra fuego. Para unir la estructura a la armazón de hierro se emplearon tornillos de acero de 3/8 para unir las láminas de plyrock a la armazón de hierro y de 7/16 para la sujeción del resto de la estructura. La figura 7 muestra en detalle la armazón de hierro sin las paredes de plyrock, la figura 8 muestra las láminas de plyrock atornilladas a la armazón y la figura 9 muestra el simulador armado.



Figura 7. Armazón de hierro galvanizado empleando canal para gypsum



Figura 8. Láminas de plyrock acopladas a la armazón

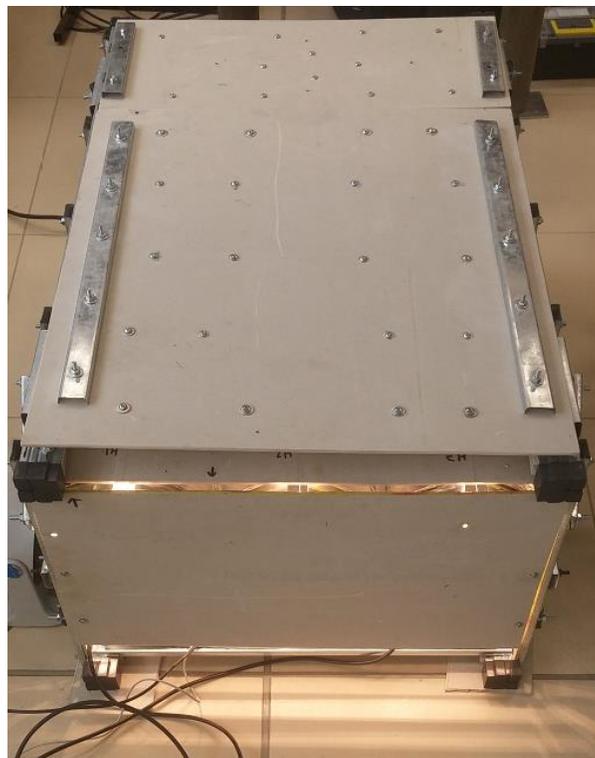


Figura 9. Simulador armado y en funcionamiento

Características eléctricas del simulador solar

La arquitectura empleada para el control de los halógenos se presenta en la figura 10. Para simplificar la etapa de diseño se trabaja por halógeno, es decir, el diseño para controlar un halógeno será el mismo que para controlar doce halógenos solo aumentando el hardware necesario. La premisa del control de la figura 10 es la siguiente: La señal H1 es una señal digital que proviene de un microcontrolador (se utiliza un Arduino Mega 2560 pero podría utilizarse cualquier otro microcontrolador o procesador), si $H1 = 1$ el relé estará en la posición NC (como se muestra en la figura) alimentando al filamento de luz baja. Si $H1 = 0$ el relé se activa a la posición NO dejando de alimentar al filamento de luz baja y alimentando al filamento de luz alta.

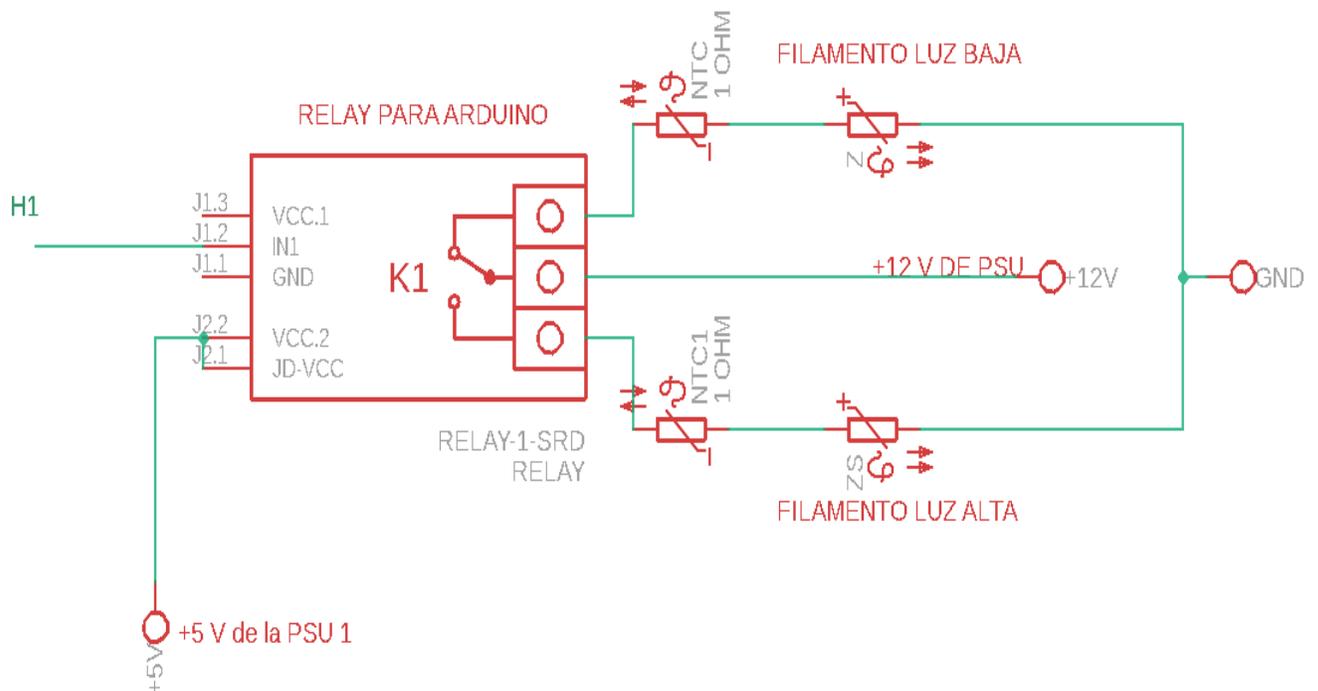


Figura 10. Control individual de un halógeno

Ahora, esta arquitectura de control tiene la ventaja de emplear un relé por halógeno por lo que siempre habrá un filamento energizado. Además, cabe destacar que el control total del simulador implica multiplicar la figura 10 por 12, es decir se requieren de 12 relés para el control de las luces, para esto se emplea una placa de 16 relés para Arduino como la de la figura 11:

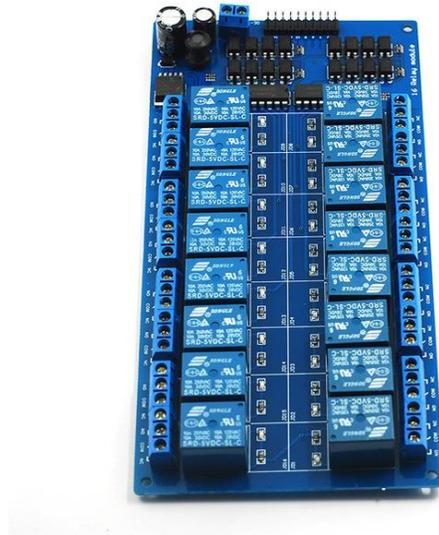


Figura 11. Placa de 16 relés de 5 V

Las características de esta placa son las siguientes:

- Alimentación: 12 V CD
- 16 relés activos en bajo (Con señal de control en 0 V)
- Cada relé soporta 10 A a 28 V CD
- 16 entradas de control
- 16 luces LED para indicar la activación de los relés

Como se mencionó anteriormente, esta arquitectura tiene la desventaja de no poder apagar los halógenos de manera individual, pero si se podría apagar los halógenos por columna. Esto implica que cada columna de halógenos se encuentre alimentada a una de las fuentes de poder de la siguiente manera:

Tabla 1 Conexión de los halógenos a las PSU

Fuente de poder	Halógenos conectados
1	H1-H4-H7-H10
2	H2-H5-H8-H11
3	H3-H6-H9-H12

Ahora, se puede controlar el encendido o apagado de cada fuente de poder manipulando la puesta a tierra del pin Power On de la fuente, por lo que podrían apagarse las fuentes 2 y 3 para lograr varios efectos de operación, desafortunadamente apagar la fuente 1 no es viable ya que todos los relés están alimentados por esta fuente. El circuito de control de las fuentes se muestra en la figura 12.

En la figura 12 lo primero que se nota es la inclusión de un relé individual para controlar la fuente 1 y un módulo de 4 relés para controlar las fuentes 2 y 3. Cada relé requiere una corriente de hasta 0.1 A para energizarse. Un Arduino no puede alimentar más de un relé, por lo que se opta por emplear el Arduino para energizar al relé de la fuente 1, pero los relés de los halógenos y de las fuentes 2 y 3 se alimentan con los rieles de la fuente 1 ya que requieren mucha energía (12 W para el módulo de 16 relés). Aún con esta limitación, la arquitectura de control de la figura 12 permite el apagado de las fuentes 2 y 3 vía programación por lo que permite un gran número de combinaciones de encendido de halógenos.

Las señales que controlan el encendido/apagado de las fuentes son F1, F2 y F3, si una de estas señales es cero, dicha fuente se enciende, caso contrario, se da el apagado de la misma. El diagrama eléctrico de todo el simulador se presenta en la figura 13.

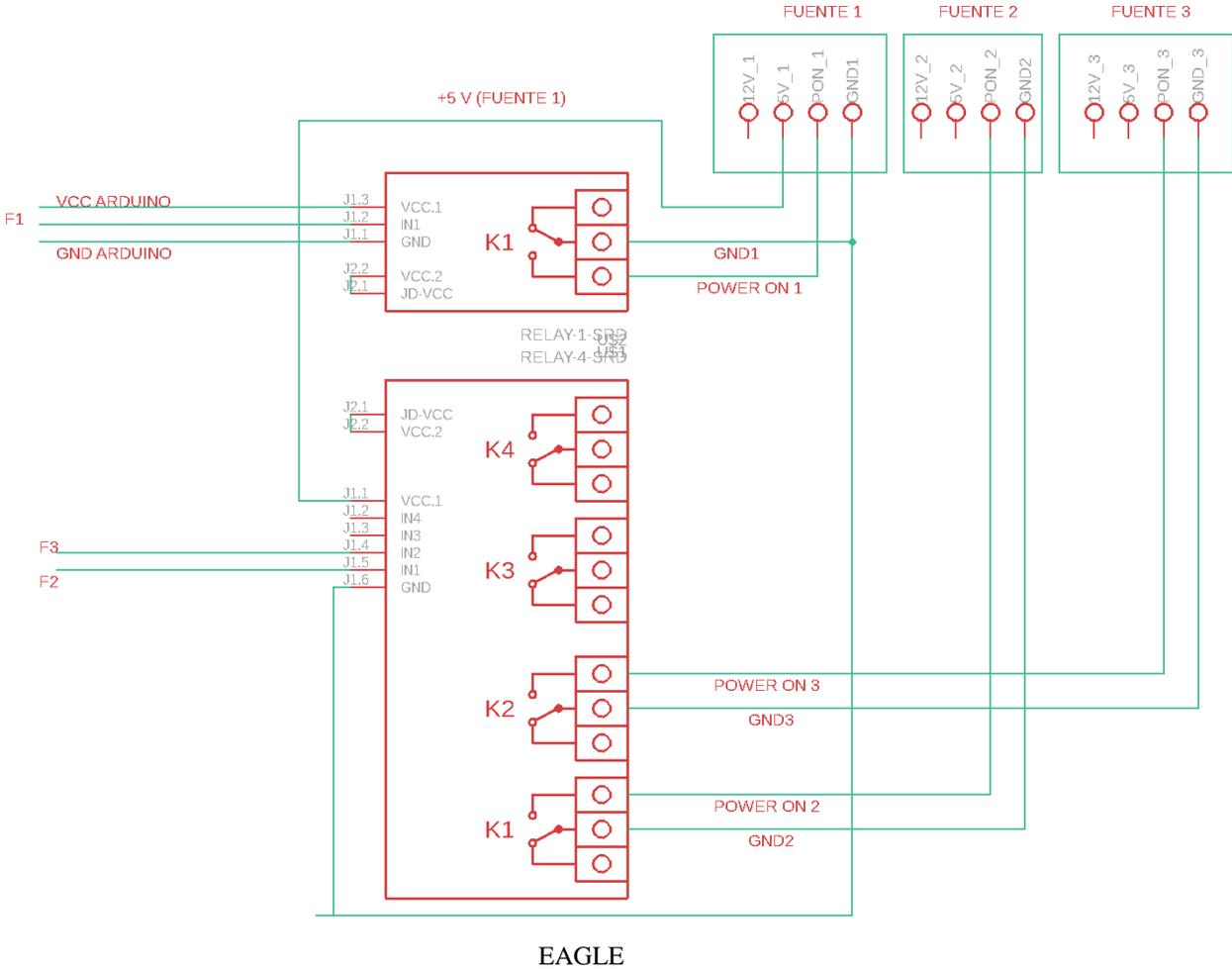


Figura 12 Control de las fuentes de poder

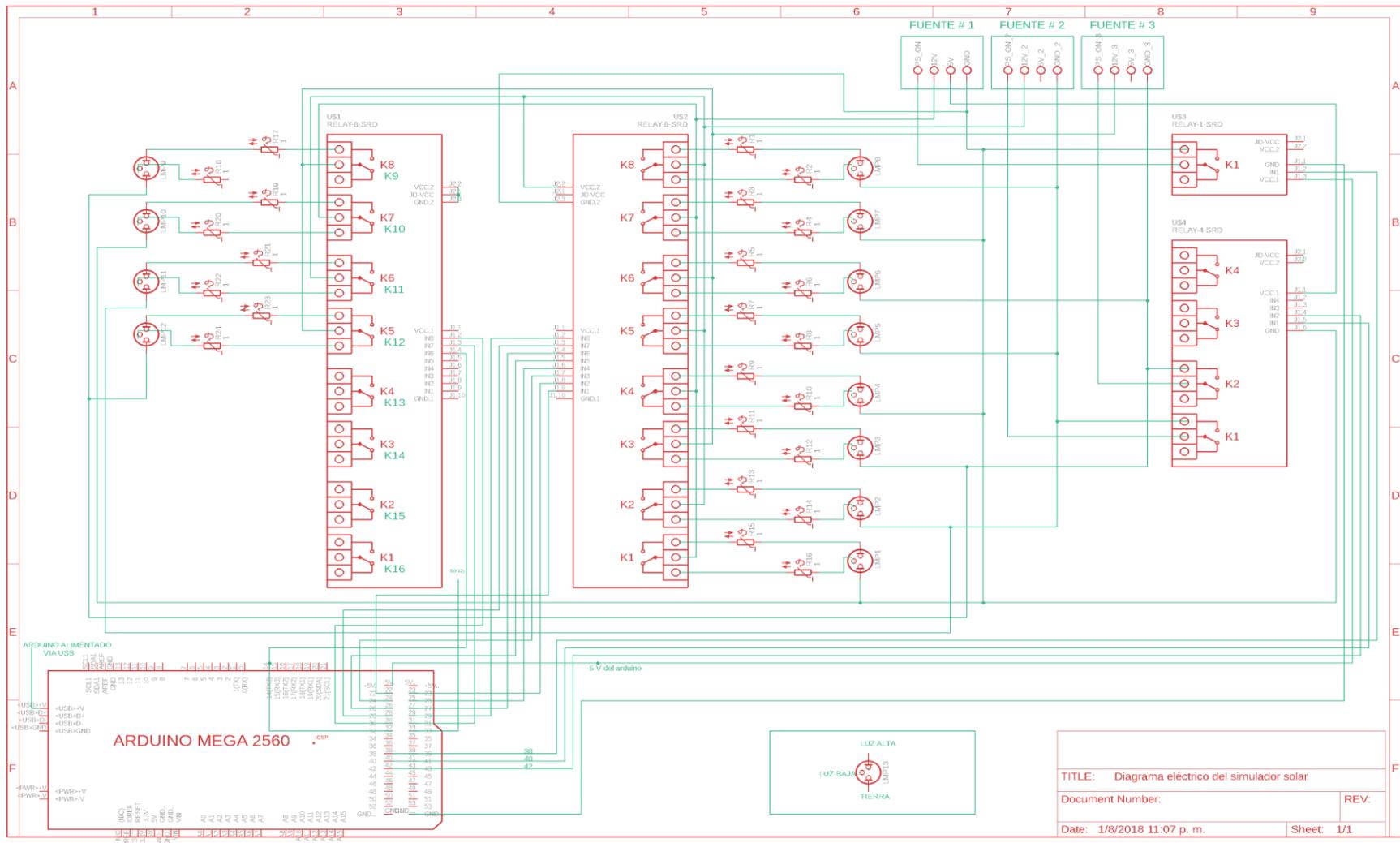


Figura 13 Diagrama eléctrico del simulador solar

Modos de operación del simulador solar

Existen muchas combinaciones en las que el simulador puede operar (576 combinaciones), de todas estas combinaciones se denominarán 3 como los modos básicos de operación, en las ilustraciones que se presentarán a continuación, un halógeno en rojo representa que funciona en luz alta, en amarillo en luz baja y en negro apagado, los modos básicos de operación son:

- Modo de luz alta: todos los halógenos programados para operar en luz alta, en este modo se logra la irradiancia máxima del simulador solar. A modo de ilustración se presenta la figura 14.

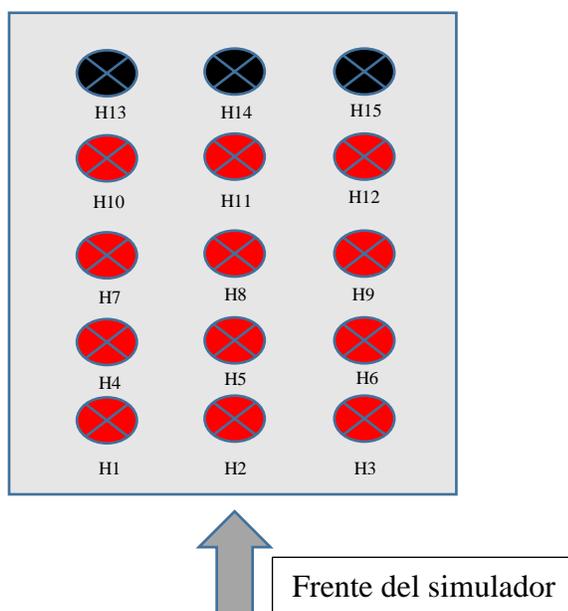


Figura 14 Modo de operación de luz alta

- Modo de luz alta sin la fuente 2: todos los halógenos menos los de la columna 2 programados para operar en luz alta, en este modo se logra la irradiancia mínima del simulador solar. A modo de ilustración se presenta la figura 15.

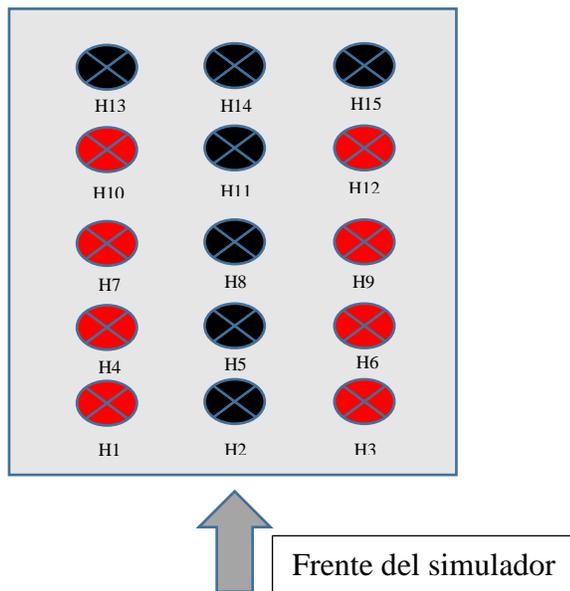


Figura 15 Modo de operación de luz alta sin la fuente # 2

- Modo de luz baja: todos los halógenos programados para operar en luz baja, en este modo se logra irradiancia tan mal distribuida que genera sombreado parcial en el panel. A modo de ilustración se presenta la figura 16.

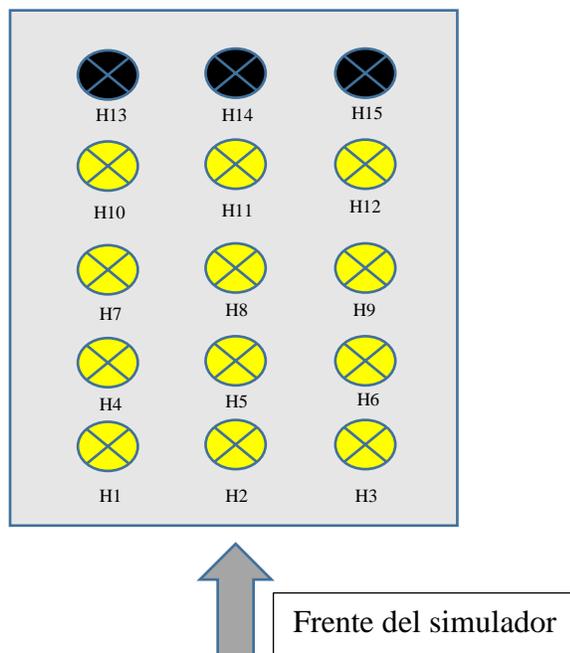


Figura 16 Modo de operación de luz baja

Programación del simulador solar

La programación del encendido/apagado de las luces se maneja con las variables de la tabla 2. La interfaz de programación empleada es la IDE de Arduino, sin embargo, cualquier entorno de programación compatible con Arduino puede ser empleado. Para programar el simulador solar se emplea el diagrama de flujos de la figura 17. Este diagrama de flujos representa la estructura básica de la programación del simulador solar y es muy sencillo de comprender y de implementar.

Si se analiza el diagrama de la figura 17, se interpreta que el programa del simulador solar consta de etapas, las etapas en azul no son programables, están predefinidas ya que son procesos de inicialización, ahora se debe proceder a describir cada una de las etapas del diagrama de flujo.

- Definición de variables y asignación de pines de salida: en esta etapa del programa se definen las variables de la tabla 4.2 y se asignan sus pines de salida, además se definen 2 variables booleanas: RELAY_OFF = 1 y RELAY_ON = 0.
- Proceso de inicialización de los relés: rutina preestablecida que se encarga de iniciar todos los relés en modo apagado, con excepción de Relay_F1 por razones ya discutidas.
- Etapa 1 a n: estas son las etapas que el usuario determina, puede ser solo una, pueden ser 3, pueden ser n etapas, se puede programar el modo de iluminación de cada halógeno de manera individual, así como apagar alguna columna de halógenos, hay muchas combinaciones posibles.
- Tiempo de duración de la etapa: el usuario establece cuánto tiempo durará cada etapa, el tiempo se establece en ms.
- Proceso de apagado del simulador: al terminar la última etapa esta subrutina se encarga del apagado de todos los halógenos automáticamente, el usuario no debe modificarla.

Tabla 2 Variables involucradas en el proceso de programación del simulador solar

Nombre de la variable en la interfaz de programación	Pin de salida en el Arduino Mega 2560	Dispositivo que controla	Efecto de la variable en 1 lógico	Efecto de la variable en 0 lógico
Relay_1	22	Halógeno 1	Luz baja	Luz alta
Relay_2	23	Halógeno 2	Luz baja	Luz alta
Relay_3	24	Halógeno 3	Luz baja	Luz alta
Relay_4	25	Halógeno 4	Luz baja	Luz alta
Relay_5	26	Halógeno 5	Luz baja	Luz alta
Relay_6	27	Halógeno 6	Luz baja	Luz alta
Relay_7	28	Halógeno 7	Luz baja	Luz alta
Relay_8	29	Halógeno 8	Luz baja	Luz alta
Relay_9	30	Halógeno 9	Luz baja	Luz alta
Relay_10	31	Halógeno 10	Luz baja	Luz alta
Relay_11	32	Halógeno 11	Luz baja	Luz alta
Relay_12	33	Halógeno 12	Luz baja	Luz alta
Relay_F1	38	Fuente 1	Fuente apagada	Fuente encendida
Relay_F2	40	Fuente 2	Fuente apagada	Fuente encendida
Relay_F3	42	Fuente 3	Fuente apagada	Fuente encendida

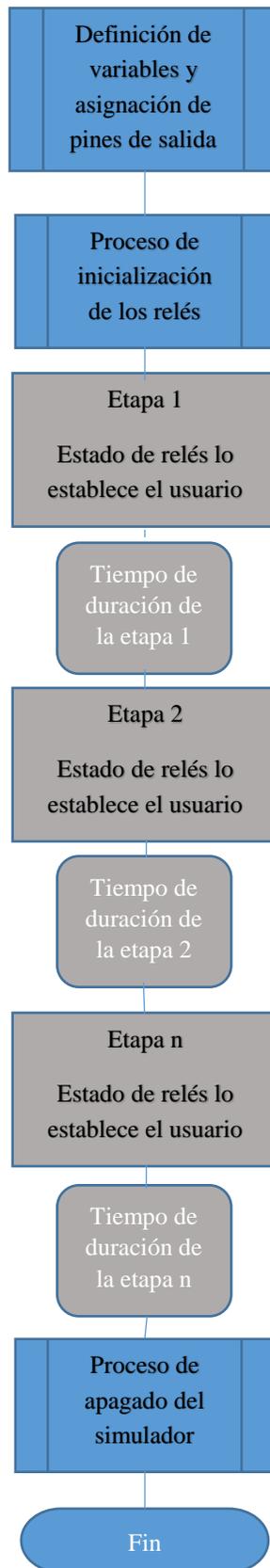


Figura 17 Diagrama de flujos de un programa de control del simulador

A continuación, se presentan ejemplos de programación en el lenguaje de Arduino:

- 1) Secuencia: Etapa 1: Modo luz alta por 45 s, Etapa 2: Modo luz alta sin la fuente 2 por 15 s, Etapa 3: Modo luz baja por 45 s.

```
//Acá se definen las variables booleanas a utilizar en el programa
#define RELAY_ON 0 //Los módulos de relés de Arduino son activos en bajo
#define RELAY_OFF 1

//Acá se define la asignación de pines, los relés 1 al 12 representan los halógenos, F1 a F3 son las fuentes de poder
#define Relay_1 22
#define Relay_2 23
#define Relay_3 24
#define Relay_4 25
#define Relay_5 26
#define Relay_6 27
#define Relay_7 28
#define Relay_8 29
#define Relay_9 30
#define Relay_10 31
#define Relay_11 32
#define Relay_12 33
#define Relay_F1 38
#define Relay_F2 40
#define Relay_F3 42

//Se programa el simulador solar en el void setup para que el programa solo se ejecute una vez
void setup() {
    //Se inicializan los relés para que se encuentren apagados al momento de un reset
    digitalWrite(Relay_1, RELAY_OFF);
    digitalWrite(Relay_2, RELAY_OFF);
    digitalWrite(Relay_3, RELAY_OFF);
    digitalWrite(Relay_4, RELAY_OFF);
    digitalWrite(Relay_5, RELAY_OFF);
    digitalWrite(Relay_6, RELAY_OFF);
    digitalWrite(Relay_7, RELAY_OFF);
    digitalWrite(Relay_8, RELAY_OFF);
    digitalWrite(Relay_9, RELAY_OFF);
    digitalWrite(Relay_10, RELAY_OFF);
    digitalWrite(Relay_11, RELAY_OFF);
```

```

digitalWrite(Relay_12, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_13, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_14, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_15, RELAY_OFF);
//IMPORTANE: LA FUENTE 1 SIEMPRE SE INICIA ENCENDIDA YA QUE ES LA QUE ALIMENTA A LOS RELÉS
digitalWrite(Relay_F1 , RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_OFF);

//Luego de inicializar los relés. se procede a establecer a los pines como salidas
pinMode(Relay_1, OUTPUT);
pinMode(Relay_2, OUTPUT);
pinMode(Relay_3, OUTPUT);
pinMode(Relay_4, OUTPUT);
pinMode(Relay_5, OUTPUT);
pinMode(Relay_6, OUTPUT);
pinMode(Relay_7, OUTPUT);
pinMode(Relay_8, OUTPUT);
pinMode(Relay_9, OUTPUT);
pinMode(Relay_10, OUTPUT);
pinMode(Relay_11, OUTPUT);
pinMode(Relay_12, OUTPUT);
pinMode(Relay_13, OUTPUT);
pinMode(Relay_14, OUTPUT);
pinMode(Relay_15, OUTPUT);
pinMode(Relay_F1 , OUTPUT);
pinMode(Relay_F2 , OUTPUT);
pinMode(Relay_F3 , OUTPUT);

//ETAPA 1: Modo de luz alta
delay(150);          //Se toma un tiempo de 150 ms entre el encendido de cada fuente, ya la fuente 1 se había encendido ahora se
                    //encienden 2 y 3
digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_ON);
delay(150);
digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_ON);

//Se define el estado de los halógenos, RELAY_ON = Luz Alta
digitalWrite(Relay_1, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_2, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_3, RELAY_ON);

```

```

digitalWrite(Relay_4, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_5, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_6, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_7, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_8, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_9, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_10, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_11, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_12, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_13, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_14, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_15, RELAY_ON);

delay (45000);      //ACA SE DEFINE EL TIEMPO DE LA ETAPA 1 EN ms

//ETAPA 2: Modo de luz alta sin la fuente # 2

digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);      //NOTA, COMO ANTERIORMENTE SE DEFINIERON LOS HALOGENOS EN ALTA
//NO ES NECESARIO VOLVER A DEFINIRLOS PARA ESTA SEGUNDA ETAPA

delay (15000);      //ACA SE DEFINE EL TIEMPO DE LA ETAPA 2 EN ms

//ETAPA 3: Modo de luz baja

//Se define el estado de los halógenos, RELAY_OFF = Luz baja

digitalWrite(Relay_1, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_2, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_3, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_4, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_5, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_6, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_7, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_8, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_9, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_10, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_11, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_12, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_13, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_14, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_15, RELAY_OFF);

//Se vuelve a encender la fuente # 2

digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_ON);

```

```

delay(45000);          //ACA SE DEFINE EL TIEMPO DE LA ETAPA 3 EN ms
//ETAPA n: si el usuario desea agregar más etapas lo puede hacer a partir de este punto

//PROCESO DE APAGADO

digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);

delay(1500);

digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_OFF);

delay(1500);

digitalWrite(Relay_F1 , RELAY_OFF); //LA FUENTE 1 SIEMPRE DEBE APAGARSE AL FINAL
}

//NO PROGRAMAR EN EL VOID LOOP PARA EVITAR QUE EL SIMULADOR PUEDA QUEDAR EN UN CICLO DE ENCENDIDO
void loop() {}

```

2) Modo luz alta durante 1 minuto:

```

//Acá se definen las variables booleanas a utilizar en el programa
#define RELAY_ON 0    //Los módulos de relés de Arduino son activos en bajo
#define RELAY_OFF 1

//Acá se define la asignación de pines, los relés 1 al 12 representan los halógenos, F1 a F3 son las fuentes de poder

#define Relay_1 22
#define Relay_2 23
#define Relay_3 24
#define Relay_4 25
#define Relay_5 26
#define Relay_6 27
#define Relay_7 28
#define Relay_8 29
#define Relay_9 30
#define Relay_10 31
#define Relay_11 32
#define Relay_12 33
#define Relay_F1 38
#define Relay_F2 40
#define Relay_F3 42

//Se programa el simulador solar en el void setup para que el programa solo se ejecute una vez
void setup() {

//Se inicializan los relés para que se encuentren apagados al momento de un reset

```

```
digitalWrite(Relay_1, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_2, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_3, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_4, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_5, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_6, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_7, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_8, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_9, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_10, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_11, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_12, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_13, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_14, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_15, RELAY_OFF);

//IMPORTANE: LA FUENTE 1 SIEMPRE SE INICIA ENCENDIDA YA QUE ES LA QUE ALIMENTA A LOS RELÉS
digitalWrite(Relay_F1 , RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_OFF);

//Luego de inicializar los relés. se procede a establecer a los pines como salidas
pinMode(Relay_1, OUTPUT);
pinMode(Relay_2, OUTPUT);
pinMode(Relay_3, OUTPUT);
pinMode(Relay_4, OUTPUT);
pinMode(Relay_5, OUTPUT);
pinMode(Relay_6, OUTPUT);
pinMode(Relay_7, OUTPUT);
pinMode(Relay_8, OUTPUT);
pinMode(Relay_9, OUTPUT);
pinMode(Relay_10, OUTPUT);
pinMode(Relay_11, OUTPUT);
pinMode(Relay_12, OUTPUT);
pinMode(Relay_13, OUTPUT);
pinMode(Relay_14, OUTPUT);
pinMode(Relay_15, OUTPUT);
pinMode(Relay_F1 , OUTPUT);
```

```

pinMode(Relay_F2 , OUTPUT);
pinMode(Relay_F3 , OUTPUT);

//ETAPA 1: Modo de luz alta

delay(150);          //Se toma un tiempo de 150 ms entre el encendido de cada fuente, ya la fuente 1 se había encendido ahora se
                    //encienden 2 y 3

digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_ON);

delay(150);

digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_ON);

//Se define el estado de los halógenos, RELAY_ON = Luz Alta

digitalWrite(Relay_1, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_2, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_3, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_4, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_5, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_6, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_7, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_8, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_9, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_10, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_11, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_12, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_13, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_14, RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_15, RELAY_ON);

delay (60000);      //ACA SE DEFINE EL TIEMPO DE LA ETAPA 1 EN ms

//PROCESO DE APAGADO

digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);

delay(1500);

digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_OFF);

delay(1500);

digitalWrite(Relay_F1 , RELAY_OFF); //LA FUENTE 1 SIEMPRE DEBE APAGARSE AL FINAL
}

//NO PROGRAMAR EN EL VOID LOOP PARA EVITAR QUE EL SIMULADOR PUEDA QUEDAR EN UN CICLO DE ENCENDIDO
void loop() {}

```

3) Modo luz baja durante 1 minuto:

```

//Acá se definen las variables booleanas a utilizar en el programa
#define RELAY_ON 0 //Los módulos de relés de Arduino son activos en bajo
#define RELAY_OFF 1

//Acá se define la asignación de pines, los relés 1 al 12 representan los halógenos, F1 a F3 son las fuentes de poder
#define Relay_1 22
#define Relay_2 23
#define Relay_3 24
#define Relay_4 25
#define Relay_5 26
#define Relay_6 27
#define Relay_7 28
#define Relay_8 29
#define Relay_9 30
#define Relay_10 31
#define Relay_11 32
#define Relay_12 33
#define Relay_F1 38
#define Relay_F2 40
#define Relay_F3 42

//Se programa el simulador solar en el void setup para que el programa solo se ejecute una vez
void setup() {
//Se inicializan los relés para que se encuentren apagados al momento de un reset
digitalWrite(Relay_1, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_2, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_3, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_4, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_5, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_6, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_7, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_8, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_9, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_10, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_11, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_12, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_13, RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_14, RELAY_OFF);

```

```

digitalWrite(Relay_15, RELAY_OFF);

//IMPORTANE: LA FUENTE 1 SIEMPRE SE INICIA ENCENDIDA YA QUE ES LA QUE ALIMENTA A LOS RELÉS
digitalWrite(Relay_F1 , RELAY_ON);
digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);
digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_OFF);

//Luego de inicializar los relés. se procede a establecer a los pines como salidas
pinMode(Relay_1, OUTPUT);
pinMode(Relay_2, OUTPUT);
pinMode(Relay_3, OUTPUT);
pinMode(Relay_4, OUTPUT);
pinMode(Relay_5, OUTPUT);
pinMode(Relay_6, OUTPUT);
pinMode(Relay_7, OUTPUT);
pinMode(Relay_8, OUTPUT);
pinMode(Relay_9, OUTPUT);
pinMode(Relay_10, OUTPUT);
pinMode(Relay_11, OUTPUT);
pinMode(Relay_12, OUTPUT);
pinMode(Relay_13, OUTPUT);
pinMode(Relay_14, OUTPUT);
pinMode(Relay_15, OUTPUT);
pinMode(Relay_F1 , OUTPUT);
pinMode(Relay_F2 , OUTPUT);
pinMode(Relay_F3 , OUTPUT);

//ETAPA 1: Modo de luz baja, no es necesario redefinir el estado de los halógenos ya que están iniciados en baja
delay (60000); //ACA SE DEFINE EL TIEMPO DE LA ETAPA 1 EN ms

//PROCESO DE APAGADO
digitalWrite(Relay_F2 , RELAY_OFF);
delay(1500);
digitalWrite(Relay_F3 , RELAY_OFF);
delay(1500);
digitalWrite(Relay_F1 , RELAY_OFF); //LA FUENTE 1 SIEMPRE DEBE APAGARSE AL FINAL
}

//NO PROGRAMAR EN EL VOID LOOP PARA EVITAR QUE EL SIMULADOR PUEDA QUEDAR EN UN CICLO DE ENCENDIDO
void loop() {}

```

Guía de uso del simulador

A continuación, se definen una serie de pasos para la utilización del simulador solar. Usted requiere de un computador personal para poder programar el simulador.

- 1) Ingrese al siguiente link para poder descargar el IDE de Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- 2) Dependiendo de su sistema operativo descargue el paquete del IDE de Arduino y ejecute el instalador como se muestra en la figura 18, también puede optar por algún otro entorno de desarrollo que sea compatible con Arduino:

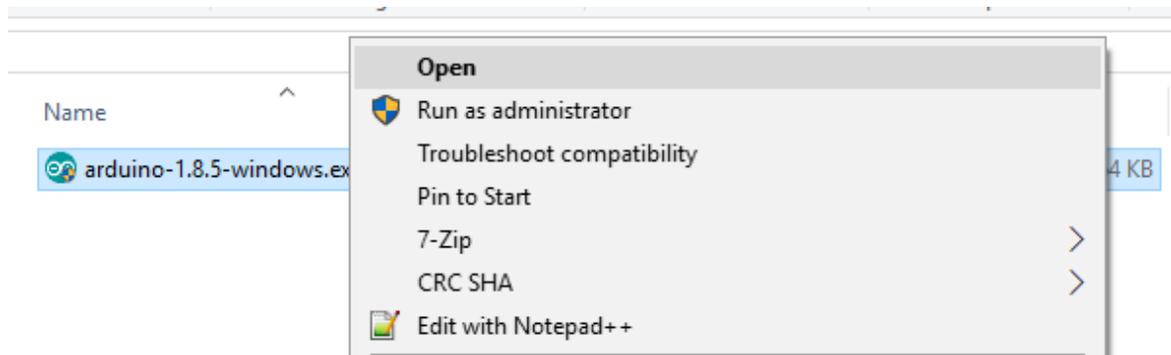


Figura 18. Paquete de instalación del IDE de Arduino

- 3) Una vez que ha instalado el programa proceda a ejecutarlo, la interfaz del IDE de Arduino se muestra en la figura 19.

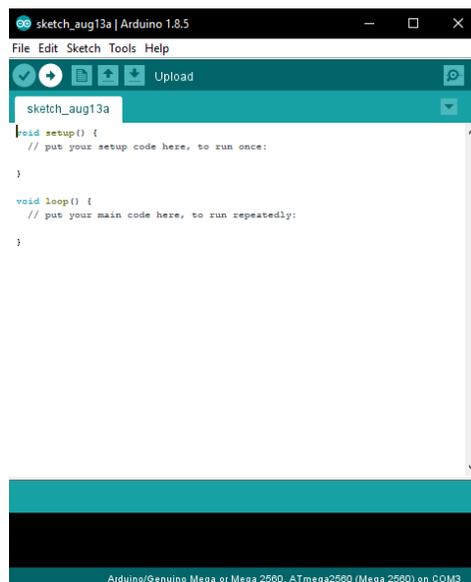


Figura 19. IDE de Arduino

- 4) Lo primero que se debe hacer es seleccionar como módulo al Arduino Mega 2560 como se muestra en la figura 20.

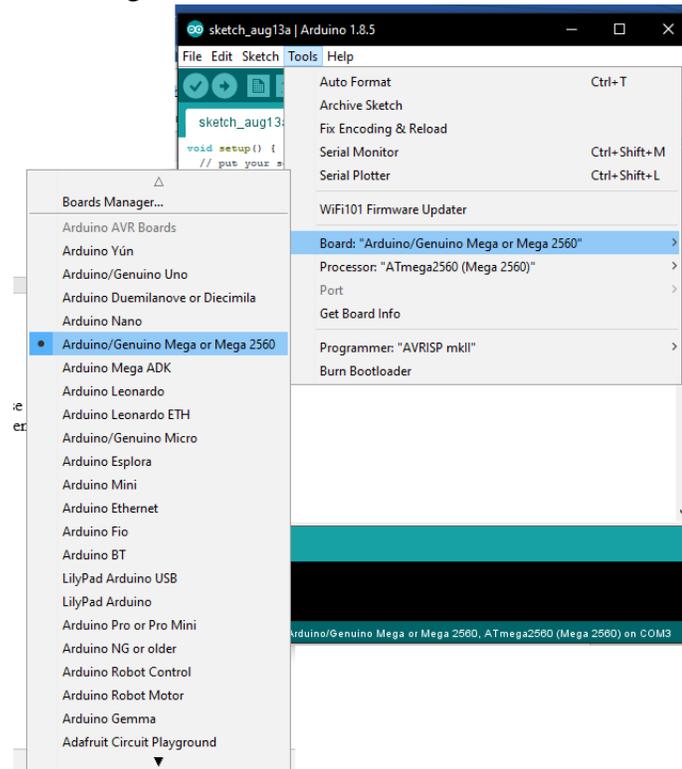


Figura 19. Seleccionar el módulo Arduino/Genuino Mega o Mega 2560

- 5) Empleando la guía de programación proporcionada en la sección anterior proceda a elaborar el código de control del simulador solar. Puede usar como base cualquiera de los códigos de ejemplo.
- 6) Una vez que tenga su código digitado en el IDE, proceda a verificar el mismo, presionando el boton de check como se muestra en la figura 20.

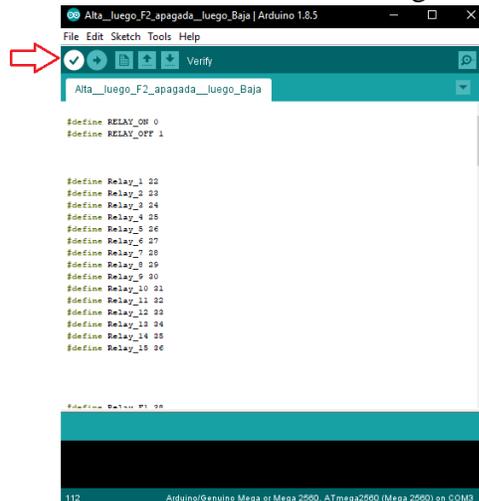


Figura 20. Verificación del código

- 7) Si el código está bien redactado y pasa la prueba es hora de programar el Arduino, pero antes asegúrese que las 3 fuentes de poder que alimentan al simulador solar se encuentren apagadas (las fuentes se ubican en la parte trasera del simulador), para esto solo desconéctelas del toma o apáguelas utilizando el interruptor que se encuentra en la parte de atrás de cada una (para mayor facilidad, se recomienda conectar a una regleta las 3 fuentes y usar el interruptor de la regleta para encender/apagar). La figura 21 muestra la ubicación de las fuentes:

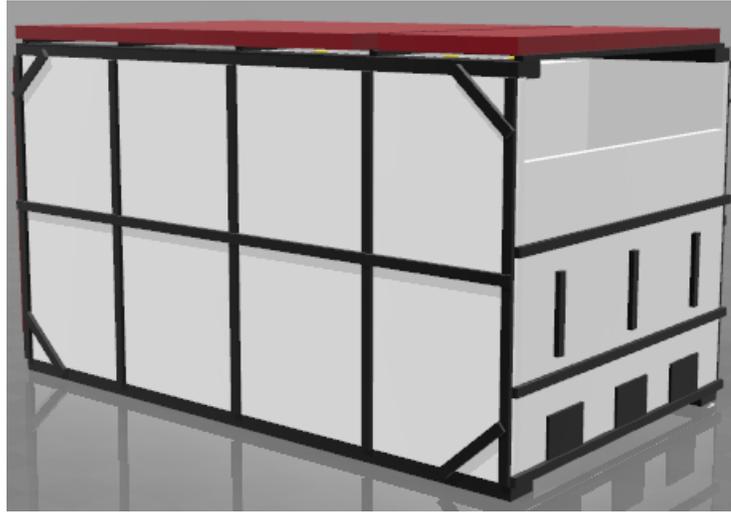


Figura 21. Ubicación de las fuentes en la parte trasera del simulador

- 8) Con las fuentes apagadas retorne al IDE de Arduino, conecte el Arduino Mega 2560 a su computador usando el cable USB del Arduino, luego proceda a programar el dispositivo presionando el botón de upload que se encuentra al lado del botón del check presentado en la figura 20.
- 9) Cuando el Arduino termine de programar puede si así lo desea desconectar el Arduino de su computadora. El Arduino debe ser alimentado para que el simulador funcione. Puede usar su computador o un cargador USB de celular para esto.
- 10) Una vez alimentado el Arduino puede encender las proceda a encender las fuentes. El simulador deberá ahora ejecutar la rutina programada, verifique que sea así.
- 11) Si la rutina se ejecutó correctamente, proceda a remover la tapa frontal del simulador como se muestra en la figura 22:

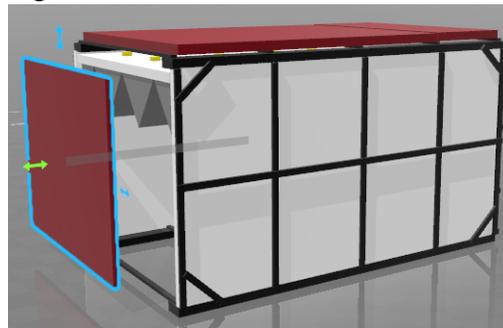


Figura 22. Remueva la tapa frontal para meter el panel solar a la recámara del simulador

- 12) Proceda a introducir el panel solar, los sensores que requiera y realice sus pruebas. Para reiniciar el simulador puede utilizar una regleta en la que conecte el arduino y las fuentes. Apagando y encendiendo la regleta puede reiniciar la rutina del arduino. La otra opción es el botón de reset del arduino.

Instrucciones de armado/desarmado y cambio de halógenos

El cambio de halógenos se puede realizar siguiendo los siguientes pasos:

- 1) Remueva las 3 tapas del simulador como se muestra en la figura 23, las tapas no están atornilladas:

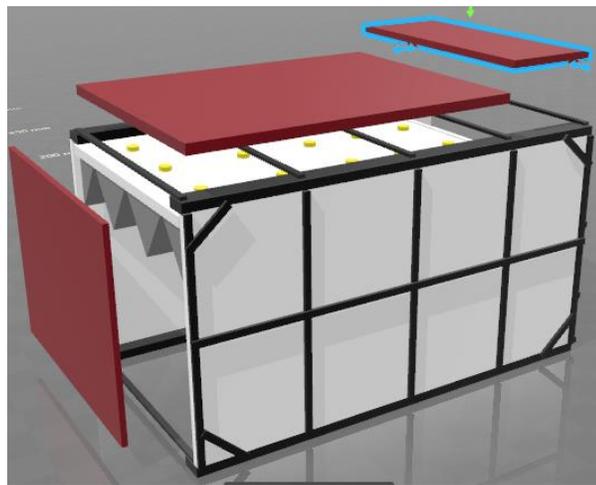


Figura 22. Remoción de las tres tapas del simulador

- 2) El sistema de sujeción de los halógenos consiste de 2 puntos. a) El halógeno está sujeto a presión por las láminas del reflector. b) El halógeno está sujeto por el socket que lo conecta a los cables. Así que para remover un halógeno primero remueva el socket del halógeno. Luego proceda a aflojar los tornillos de 3/8 que están a ambos lados de los halógenos (tienen una marca negra) como se muestra en la figura 23.

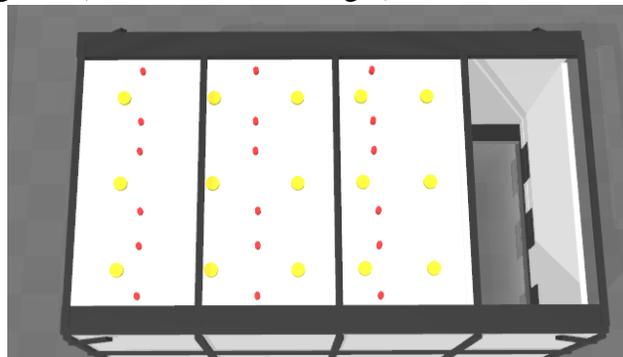


Figura 22. Tornillos de 3/8 a aflojar para el cambio de halógeno

- 3) Los tornillos los debe aflojar por columnas, es decir, si el halógeno dañado es H1 solo requiere remover los tornillos de la columna a la que corresponde H1. Una vez que aflojó los tornillos las láminas del reflector podrán ceder lo suficiente para sacar el halógeno dañado y sustituir por uno nuevo.

Se recomienda cambiar los halógenos cada 35 horas de uso del simulador.

Si por alguna razón requiere desarmar el simulador, se debe proceder quitando primero todo el techo (10 tornillos de 7/16 sostienen el techo del simulador a las paredes del mismo, estos se encuentran en los extremos del mismo). El techo del simulador es el que se presenta en la figura 23:

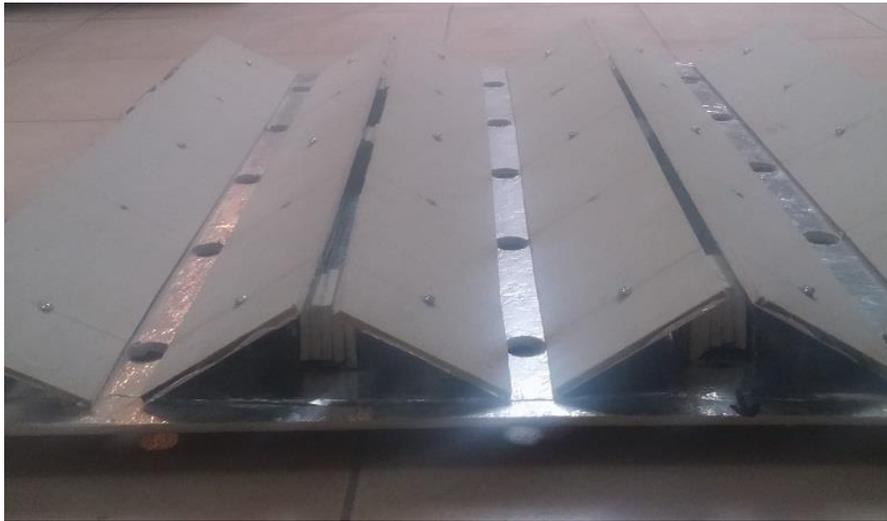


Figura 23. Techo del simulador

Al quitar el techo se tendrá una estructura como la de la figura 24, con quitar las paredes internas que unen a los dos paneles laterales se contará con la estructura desarmada.



Figura 24. Simulador sin el techo

Hoja de datos del simulador solar bajo pruebas con panel KC65T

Utilizando los 3 modos de operación básica del simulador se utilizó un panel solar KC65T con número serial: 1085BH0248 para realizar distintas pruebas. Las pruebas involucran el estudio del comportamiento del simulador con o sin tapa frontal, y elevando el panel solar a distintas alturas. Los resultados obtenidos se resumen en las tablas 3 y 4:

Tabla 3 Resumen de resultados del simulador con la tapa frontal

Modo de Operación	Magnitud (Unidades)	Elevación del panel dentro del simulador		
		0 cm	13.5 cm	21.5 cm
Luz alta	G (W/m ²)	342.9001 ± 0.17 %	342.3321 ± 0.47 %	327.4963 ± 0.65 %
	dT/dt (°C/s)	0.0432	0.0485	0.0456
	V _{mpp} (V)	16.8866 ± 2.5 %	18.1662 ± 1.1 %	18.6331 ± 0.24 %
	I _{mpp} (A)	1.3067 ± 2.3 %	1.2103 ± 2.9 %	1.1415 ± 0.28 %
	P _{mpp} (W)	22.0172 ± 0.27 %	21.9870 ± 1.7 %	21.2595 ± 0.22 %
	V _{mpp2} (V)	-	-	-
	I _{mpp2} (A)	-	-	-
	P _{mpp2} (W)	-	-	-
Luz alta sin la fuente # 2	G (W/m ²)	226.4282 ± 0.12 %	230.6436 ± 0.47 %	205.3216 ± 0.27 %
	dT/dt (°C/s)	0.0267	0.0295	0.0296
	V _{mpp} (V)	16.3746 ± 2.6 %	17.3064 ± 0.16 %	18.1584 ± 0.06 %
	I _{mpp} (A)	0.8741 ± 2.4 %	0.8358 ± 0.17 %	0.7259 ± 0.12 %
	P _{mpp} (W)	14.2828 ± 0.16 %	14.4601 ± 0.13 %	13.1808 ± 0.11 %
	V _{mpp2} (V)	-	-	-
	I _{mpp2} (A)	-	-	-
	P _{mpp2} (W)	-	-	-
Luz baja	G (W/m ²)	-	-	-
	dT/dt (°C/s)	0.0491	0.0463	0.0471
	V _{mpp} (V)	8.4706 ± 0.17 %	8.4244 ± 2.5 %	8.7435 ± 0.09 %
	I _{mpp} (A)	1.1106 ± 0.31 %	1.1019 ± 5.18 %	0.8912 ± 0.13 %
	P _{mpp} (W)	9.4126 ± 0.25 %	9.1271 ± 3.28 %	7.7922 ± 0.18 %
	V _{mpp2} (V)	17.8522 ± 0.26 %	17.7891 ± 2.31 %	17.7891 ± 0.11 %
	I _{mpp2} (A)	0.6062 ± 0.19 %	0.6030 ± 3.1 %	0.6291 ± 1.82 %
	P _{mpp2} (W)	10.8138 ± 0.39 %	10.9600 ± 1 %	11.5682 ± 0.85 %

Tabla 4 Resumen de resultados del simulador sin la tapa frontal

Modo de Operación	Magnitud (Unidades)	Elevación del panel dentro del simulador		
		0 cm	13.5 cm	21.5 cm
Luz alta	G (W/m ²)	244.2847± 0.31%	263.5703± 0.46%	283.2027± 0.71%
	dT/dt (°C/s)	0.0317	0.0370	0.0412
	V _{mpp} (V)	17.9663± 1.7%	17.2917± 2.5%	17.7785± 1.75%
	I _{mpp} (A)	0.8780± 2.4%	1.0146± 2.6%	1.0480± 3.7%
	P _{mpp} (W)	15.7748± 0.80%	17.5401± 0.39%	18.5249± 1.27%
	V _{mpp2} (V)	-	-	-
	I _{mpp2} (A)	-	-	-
	P _{mpp2} (W)	-	-	-
Luz alta sin la fuente # 2	G (W/m ²)	160.0013± 0.89%	169.2137± 0.75%	184.1056± 0.47%
	dT/dt (°C/s)	0.0188	0.0238	0.0220
	V _{mpp} (V)	16.7862± 1.5%	16.8948± 1.03%	17.7401± 5.5%
	I _{mpp} (A)	0.6141± 1.64%	0.6748± 0.89%	0.6526± 3.2%
	P _{mpp} (W)	10.3302± 0.53%	11.3909± 0.69%	11.5682± 3.4%
	V _{mpp2} (V)	-	-	-
	I _{mpp2} (A)	-	-	-
	P _{mpp2} (W)	-	-	-
Luz baja	G (W/m ²)	-	-	-
	dT/dt (°C/s)	0.0365	0.0392	0.0380
	V _{mpp} (V)	7.8797± 1.88%	7.8626± 1.86%	8.4399± 1.37%
	I _{mpp} (A)	1.0257± 3.38%	1.0279± 2.9%	0.8527± 2.49%
	P _{mpp} (W)	8.0709± 1.67%	8.0848± 1.14%	7.1973± 1.89%
	V _{mpp2} (V)	18.6918± 1.41%	18.5663± 1.17%	18.9413± 0.15%
	I _{mpp2} (A)	0.3824± 0.53%	0.3771± 1.45%	0.4974± 0.34%
	P _{mpp2} (W)	7.1406± 0.88%	6.9962± 0.79%	9.4229± 0.49%

Donde V_{mppx} es el voltaje obtenido en el punto de máxima potencia, I_{mppx} es la corriente obtenida en el punto de máxima potencia y P_{mppx} es el punto de máxima potencia. El modo de luz baja genera sombreado parcial dentro del simulador por lo que en este modo existen 2 puntos de máxima potencia (máximos locales). Los datos se expresan con su incertidumbre.

En el estado actual el simulador solar diseñado presenta las siguientes limitaciones:

1. El nivel máximo de irradiancia es de $342.9001 \pm 0.17 \%$ W/m²
2. Se requiere de un tiempo de estabilización (aproximadamente 30 s) para que la irradiancia alcance su valor máximo
3. En operación, la fuente 1 debe permanecer encendida siempre
4. No se puede apagar una fuente e intentar encenderla poco tiempo después si no se cambia el modo de operación de los halógenos.

Para mejorar el nivel de máxima irradiancia se podría duplicar el número de halógenos en la matriz, sin embargo, hacer esto implica el empleo de fuentes de poder de al menos 1000 W cada una y la temperatura dentro del simulador puede empeorar.

El punto 2 y el punto 4 son limitaciones de los termistores NTC empleados para evitar el transiente de corriente de los halógenos. Básicamente el termistor al calentarse va bajando su resistencia hasta el punto en que puede considerarse un corto-circuito, sin embargo, esto toma tiempo, eso se ve reflejado en cada curva de irradiancia en función del tiempo presentada en la sección 3. El punto 4 lo que implica es que, si el simulador se encuentra por ejemplo trabajando en modo de luz alta y se procede a apagar una fuente en una segunda etapa, para encenderla se debe hacer en modo de luz baja. En caso de no hacerlo así, la fuente se puede apagar. Esto se debe a que el termistor puede estar aún caliente, por lo tanto, es casi un corto circuito y el transiente del halógeno se puede dar en este caso. Una rutina de programación como la diseñada para probar algoritmos MPPT no se ve afectada por este problema. Debido a esto, se recomienda emplear otro tipo de control de transiente en caso de que se desee hacer cambios rápidos de luminosidad.