



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – SOLAR FOTOVOLTAICA

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL Y
CARACTERIZACIÓN PARA UN SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
INTERCONECTADO A LA RED ELÉCTRICA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
M.I. JORGELI RIQUELME ARIZMENDI

TUTOR PRINCIPAL
DR. SEBASTIAN PATHIYAMATTOM JOSEPH, IER-UNAM

COMITÉ TUTOR
DR. SERGIO ALBERTO GAMBOA SÁNCHEZ, IER-UNAM
DR. AARÓN SÁNCHEZ JUÁREZ, IER-UNAM
DR. JUAN REYES REYES, CENIDET-TECNM
DR. JOEL MOREIRA ACOSTA, UNICACH

TEMIXCO MORELOS, JUNIO DE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. AARÓN SÁNCHEZ JUÁREZ
Secretario: DR. SERGIO ALBERTO GAMBOA SÁNCHEZ
Vocal: DR. SEBASTIAN PATHIYAMATTOM JOSEPH
1^{er}. Suplente: DR. JUAN REYES REYES
2^{do}. Suplente: DR. JOEL MOREIRA ACOSTA

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES - UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. SEBASTIAN PATHIYAMATTOM JOSEPH

FIRMA

*A mis padres,
Josefina y José*

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Sebastian Joseph Pathiyamattom por confiar en mí y por su invaluable apoyo y orientación en la dirección de éste proyecto.

Agradezco también a mis padres que creyeron y me hicieron creer en mí, impulsándome con mucho ánimo en cada una de las metas que me he propuesto, éste logro también es de ellos.

Agradezco profundamente a mi esposa Deyanira y a mis hijos José Miguel, Ana Karen y Jorgeli, que durante mis estudios en licenciatura y maestría como ahora en la realización del doctorado, soportaron y comprendieron mi ausencia puesto que el tiempo dedicado a mi formación debió haber sido para ellos.

Gracias a José Campos, José Ortega y Sergio Gamboa, que con su amplia experiencia enriquecieron con consejos e ideas los alcances de este proyecto; y a mis hermanos y amigos que disfrutaban mis logros tanto como yo y que de una u otra forma me apoyaron en el desarrollo de mis metas, gracias; pero sobre todo a Dios por permitirme culminar éste proyecto...

Agradezco al proyecto CONACYT 236978 y al proyecto DGAPA-UNAM IN106516 por el apoyo otorgado para la realización de éste proyecto.

Gracias también al Instituto Tecnológico de Zacatepec por el apoyo brindado para la realización de éste posgrado.

Contenido

Glosario	i
Índice de figuras y tablas.....	iii
Objetivos	ix
Objetivo General	ix
Objetivos específicos.....	ix
Resumen.....	x
Justificación	xi
Hipótesis.....	xii
Capítulo 1 Introducción a las energías renovables	1
1.1 Aspectos generales de las energías renovables.....	1
1.2 Los sistemas de medición de curvas corriente voltaje (I-V) y potencial corriente (E-I).....	1
1.3 La tecnología fotovoltaica (FV) y la de celda de combustible (FC).....	3
1.3.1 La tecnología fotovoltaica.....	3
1.3.2 La celda de combustible.....	9
1.4 Sistemas Híbridos.....	14
1.5 La importancia de la medición en la investigación científica.....	16
1.5.1 Instrumentación y control.....	18
1.6 Elementos básicos y ventajas de un sistema de control.....	22
1.6.1. Sistema de control de Lazo Abierto	22
1.6.2. Sistema de control de Lazo Cerrado.....	23
1.6.3. Sistemas de control de datos discretos.....	23
1.6.4. Sistemas controlados por computadora	24
1.7 Descripción general de la integración hardware-software para medición y control.....	24
1.8 Caracterización eléctrica	26
1.9 Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica.....	26
1.10 Sistemas de adquisición de datos	27
Capítulo 2 Conceptualización y selección de los componentes a utilizar y su función en el prototipo.....	29

2.1.	Conceptos, componentes y parámetros eléctricos a medir	29
2.2.	El proceso de medición con dispositivos electrónicos.....	29
2.2.1.	Convertidores de señal analógica a digital.....	29
2.2.2.	Sensor y transductor.....	30
2.3.	Componentes y parámetros a medir.....	32
2.3.1	Medición de voltaje.....	33
2.3.2	Medición de corriente.....	35
2.3.3	Calculo de potencia, factor de forma y eficiencia.....	37
2.3.4	Medición de temperatura.....	39
2.3.5	Medición de Irradiancia	41
2.4.	El microcontrolador PIC18F4550 como interface entre el ordenador y el prototipo de medición.....	42
2.4.1.	Función que realiza el microcontrolador en el sistema de medición	45
2.5.	El condensador como resistencia variable.....	45
2.6.	El relevador como medio de conmutación.....	50
2.7.	El mosfet como resistencia variable.....	53
2.8.	El convertidor digital analógico DAC.....	60
2.9.	Programa del microcontrolador.....	62
2.10.	Interfaz con la pc.....	64
2.11.	El programa de control.....	66
2.11.1.	Algoritmo y diagrama de flujo.....	66
2.11.2.	Pantalla principal del programa de control.....	69
2.11.3.	Configuración del tipo de medición.....	70
2.11.4.	El archivo generado.....	71
Capítulo 3	Integración de componentes y desarrollo del prototipo.....	73
3.1.	El prototipo en su forma general.....	73
3.2.	Etapas de selección de tecnología a analizar.....	74
3.3.	Selección manual y automática de rango de medición.....	76
3.4.	Etapas de medición de voltaje y protección contra inversión de polaridad.....	79
5.7.1.	Etapas de medición de voltaje.....	79
5.7.2.	Etapas de protección contra inversión de polaridad.....	82
3.5.	Etapas de medición de corriente.....	83

3.6.	Etapa de medición de temperatura e irradiancia.	88
3.7.	Diseño de la placa de circuito impreso.	91
3.7.1.	Etapa de control y de potencia.	93
3.7.2.	Calculo de las pistas.	95
3.7.3.	Desarrollo de un prototipo para caracterización de celdas fotovoltaicas y celdas de combustible de tipo experimental.	96
Capítulo 4	Consideraciones generales de las mediciones realizadas.....	97
4.1.	Caracterización de módulos fotovoltaicos.....	97
4.1.1.	Consideraciones generales de las mediciones realizadas.....	98
4.1.2.	Caracterización de módulos fotovoltaicos.....	98
4.1.3.	Efecto de las sombras en los módulos fotovoltaicos.....	99
4.2.	Caracterización de la celda de combustible tipo PEM.....	102
4.2.1.	Consideraciones generales de la celda de combustible y las mediciones realizadas. 103	
4.3.	Caracterización del sistema de medición basado en la integración hardware-software. 106	
Capítulo 5	Experimentación y resultados.....	109
5.7.1.	El proceso de selección del tipo de módulo a analizar.	109
5.7.2.	Análisis del proceso de protección contra inversión de polaridad.	110
5.7.3.	Curvas I-V de módulos fotovoltaicos.....	111
5.3.1.	Caracterización de módulo fotovoltaico SILIKEN SLK60P6L.....	111
5.3.2.	Caracterización de módulo fotovoltaico KYOCERA KC80-01.....	112
5.3.3.	Caracterización de módulo fotovoltaico KYOCERA KC125TM.	113
5.3.4.	Caracterización de módulo fotovoltaico SOLARTEC S60PC 250.....	114
5.3.5.	Caracterización de módulo fotovoltaico ERDM MM6-130.	115
5.3.6.	Medición de curvas I-V y P-V de módulos de diferentes marcas y potencias.....	116
5.7.4.	Comparación entre la medición obtenida con el prototipo de medición y la medición obtenida con un equipo comercial.....	118
5.7.5.	Pérdidas por efecto de las sombras en módulos FV.	120
5.7.6.	Curvas E-I de módulos de celdas de combustible.	124
5.7.7.	Pruebas realizadas con el prototipo para caracterización de celdas experimentales.125	
5.7.1	Celda fotovoltaica comercial con concentrador de espejos.	126
5.7.2.	Celda con concentrador a base de lente.....	128

5.7.3.	Celda de bioalcohol obtenida a partir de residuos de agave.....	130
5.7.4.	Kit didáctico de celda de combustible.....	132
5.7.5.	Celdas de combustible experimentales de bioalcohol.....	133
5.7.6.	Celdas de combustible experimentales de bioetanol.....	134
Capítulo 6	Conclusiones	137
	Trabajo a futuro.	138
	Referencias Bibliográficas	139

Glosario

Sener,	Secretaría de energía
SFV,	Sistema Fotovoltaico
FC,	Fuell Cell, Celda de combustible
SPI,	Serial Periferical Interface
I ² C,	Inter-Integrated Circuit
USB,	Universal Serial Bus
MMtep	Mil Millones de Toneladas de Petróleo Equivalente
A.M.	Masa de aire (Air, Mass)
R _s	Resistencia serie
R _p	Resistencia paralelo
R _{sh}	Resistencia shunt
G	Irradiancia
I-V	Corriente Voltaje
P-V	Potencia Voltaje
STC	Condiciones Estándar de Prueba (Standard Test Conditions)
NOCT	Condiciones Normales de Prueba (Normal Test Conditions)
V	Voltaje
V _{oc}	Voltaje a circuito abierto
V _m	Voltaje en el punto de máxima potencia
P	Potencia
P _{máx}	Potencia máxima
I	Corriente eléctrica
I _{sc}	Corriente de corto circuito
I _m	Corriente en el punto de P _{máx}
I _D	Corriente del diodo
I _{ph}	Corriente fotogenerada
F.F.	Factor de forma
η	Eficiencia
W, kW, mW	Watt, kilo watt, mili watt
j	Densidad de corriente
Stack,	Apilamiento de celdas interconectadas
PEMFC	Celda de combustible de membrana de intercambio protónico
MEA	Ensamble membrana electrodo
SHGEE	Sistemas híbridos de generación de energía eléctrica
DAQ's	Sistemas de adquisición de datos
μC, μP	Microcontrolador, Microprocesador
CPU	Unidad central de proceso
Bit,	Dígito binario
GPIB	Bus de interfaz de propósito general
ADC	Convertidor Analógico-Digital
DAC	Convertidor Digital-Analógico
V _{ref} ,	Voltaje de referencia

BCD	Decimal codificado en binario
On,Off	Encendido, Apagado
TONC	Temperatura de operación nominal de la celda
MOSFET	Transistor de efecto de campo de semiconductor de metal óxido
V_{GS}	Voltaje de compuerta fuente
V_{DS}	Voltaje drenador a fuente
V_T	Voltaje de trabajo
r_{DS}	Resistencia drenador fuente
VCL	Librería de componentes visuales
GUI	Interfaz gráfica de usuario
RA0	Bit 0 del puerto A
Micra	1×10^{-6} metros
Matlab	Software matemático
Simulink	entorno de programación visual, que funciona sobre Matlab

Índice de figuras y tablas

<i>Fig. 1.2.1 Modelos de trazadores I-V de módulos fotovoltaicos en el mercado.</i>	2
<i>Fig. 1.2.2 Integración de equipos comerciales para la estimación de la curva de potencia en celdas de combustible.</i>	2
<i>Fig. 1.3.1.1 Componentes de la radiación solar.</i>	3
<i>Fig. 1.3.1.2 Espectro luminoso de la luz solar.</i>	4
<i>Fig. 1.3.1.3 Efecto fotoeléctrico.</i>	4
<i>Fig. 1.3.1.4 Esquema de una celda fotovoltaica.</i>	5
<i>Fig. 1.3.1.5 Característica I-V de una celda fotovoltaica iluminada.</i>	5
<i>Fig. 1.3.1.6 Modelo eléctrico de una celda fotovoltaica: (a) ideal, (b) real.</i>	6
<i>Fig. 1.3.1.6 Influencia de la resistencia (a) serie y (b) paralelo de una celda solar.</i>	6
<i>Fig. 1.3.1.7 Interconexión de celdas en serie.</i>	7
<i>Fig. 1.3.1.8 Integración de un módulo o panel solar.</i>	8
<i>Fig. 1.3.1.9 Curva I-V típica de un módulo fotovoltaico.</i>	8
<i>Fig. 1.3.2.1 Esquema de funcionamiento de una pila de combustible. ^[13]</i>	9
<i>Fig. 1.3.2.2 Perfil característico de una celda de combustible con las pérdidas relacionadas con la intensidad. ^[14]</i>	11
<i>Fig. 1.3.2.4 Curva de polarización típica de una (a) monocelda, (b) stack.</i>	12
<i>Fig. 1.3.2.5 Principales aplicaciones y rangos de potencia de los diferentes tipos de celdas de combustible. ^[17]</i>	13
<i>Fig. 1.3.2.6 Elementos que conforman una monocelda de combustible tipo PEM.</i>	14
<i>Fig. 1.3.2.7 Apilamiento de varias celdas de combustible en serie formando una pila (stack).</i>	14
<i>Fig. 1.4.1 Sistema híbrido de generación de energía mediante diferentes tecnologías.</i>	15
<i>Fig. 1.4.2 Ejemplo de sistema de generación basado en tecnología fotovoltaica con interconexión a la red eléctrica.</i>	15
<i>Fig. 1.5.1 Capacidad de integración de un circuito integrado programable.</i>	17
<i>Fig. 1.5.2 Componentes considerados en un sistema de medida y componentes de un instrumento electrónico.</i>	17
<i>Fig. 1.5.1.1 El ruido en los sistemas digitales.</i>	18
<i>Fig. 1.5.1.2 Esquema de un optoacoplador y diagrama de aislamiento galvánico con optoacoplador.</i>	19
<i>Fig. 1.5.1.3 Conversión analógica a digital.</i>	19
<i>Fig. 1.5.1.4 Unidad mínima de memoria y distribución de información digital en una memoria.</i>	20
<i>Fig. 1.5.1.5 Tipos de procesamiento de señales.</i>	20
<i>Fig. 1.5.1.6 Tipos de representación de información.</i>	21
<i>Fig. 1.5.1.7 Representación de un sistema embebido.</i>	21
<i>Fig. 1.5.1.8 Áreas de aplicación de instrumentación y control.</i>	21
<i>Fig. 1.6.1 Descripción simplificada de un sistema de control.</i>	22
<i>Fig. 1.6.1.1 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo abierto.</i>	23
<i>Fig. 1.6.2.1 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado.</i>	23
<i>Fig. 1.7.1 Esquema general del sistema de caracterización del sistema híbrido de generación de energía basado en energía fotovoltaica y celdas de combustible.</i>	25
<i>Fig. 1.7.2 Etapas por bloques del sistema de medición y control.</i>	25
<i>Fig. 1.8.1 El término “resolución” en sistemas digitales.</i>	26
<i>Fig. 1.9.1 Componentes de un sistema híbrido con interconexión a la red.</i>	27

Fig. 1.10.1	Los sistemas modernos de medición con interfaz a la computadora.	28
Fig. 2.2.1.1	Ilustración del termino resolución.	30
Fig. 2.2.2.1	Clasificación de sensores.	31
Fig. 2.3.1	Parámetros eléctricos de una celda fotovoltaica y de una celda de combustible.	32
Fig. 2.3.1.1	Módulo FV con divisor de voltaje.	34
Fig. 2.3.1.2	Amplificador operacional (a) Símbolo y partes constitutivas; (b) Configuración del amplificador operacional como seguidor de voltaje.	34
Fig. 2.3.1.3	Conexión del amplificador operacional como seguidor de voltaje.	35
Fig. 2.3.2.1	Modo usual de medición de la corriente de corto circuito de un panel solar.	35
Fig. 2.3.2.2	(a) Configuración de pines del sensor de corriente ACS712; (b) forma y encapsulado 8 LEAD SOIC Suffix LC e integración en el circuito impreso.	36
Fig. 2.3.2.3	Comportamiento del sensor ACS712 con respecto a la temperatura.	36
Fig. 2.3.3.1	Celda solar conectada a un receptor.	37
Fig. 2.3.3.2	Características I-V y P-V de una celda solar.	37
Fig. 2.3.4.1	(a) Característica I-V de una celda FV en función de la temperatura; (b) Variación porcentual del voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de corto circuito (I_{sc}) y la potencia máxima ($P_{máx}$) de la celda FV con respecto a la temperatura.	40
Fig. 2.3.5.1	Característica I-V de una celda solar en función de la irradiancia.	41
Fig. 2.3.5.2	Instrumentos para medir la irradiancia.	42
Fig. 2.4.1	Microcontrolador PIC 18F4550, (a) Configuración de pines; (b) Vista superior.	43
Fig. 2.4.2	Esquema de bloques internos del microcontrolador.	43
Fig. 2.4.3	Modo de conexión del microcontrolador PIC18F4550.	44
Fig. 2.4.4	Configuración del pre-escalador dependiendo del cristal utilizado.	44
Fig. 2.5.1	Pares de datos corriente-voltaje en módulos FV y FC.	45
Fig. 2.5.1	Capacitor o condensador (a) Símbolo; (b) apariencia.	46
Fig. 2.5.2	Modo de conexión de capacitor para ser usado como resistencia variable.	47
Fig. 2.5.3	Comportamiento de la carga del capacitor.	49
Fig. 2.6.1	Relevador electromagnético, (a) Circuito de control digital; (b) Partes que lo integran.	50
Fig. 2.6.2	Sistema de control para función auto-rango en el sistema de medición.	50
Fig. 2.6.3	Diagrama de flujo de la función de auto rango del sistema de medición.	51
Fig. 2.6.4	Pack de relevadores.	52
Fig. 2.6.5	Capacitores utilizados e interconectados entre sí.	52
Fig. 2.7.1	Símbolos y estructura física de los mosfet de enriquecimiento tipo N y P.	53
Fig. 2.7.2	Funcionamiento del NMOS con (a) $V_{DS} \neq 0$, (b) Con $V_{GS} = 0$ o $0 < V_{GS} \leq V_T$ e $I_D = 0$ aunque varíe V_{DS} .	54
Fig. 2.7.3	Cuando $V_{GS} \geq V_T$, $I_D > 0$ al variar V_{DS} .	55
Fig. 2.7.4	Regiones de funcionamiento de un mosfet canal n cuando $V_{GS} \geq V_T$.	55
Fig. 2.7.5	Utilización de un mosfet como resistencia variable.	55
Fig. 2.7.6	Curva de salida y característica de transferencia de un mosfet de canal n.	56
Fig. 2.7.7	Característica de transferencia linealizada del mosfet de canal n en fuente común.	57
Fig. 2.7.8	Modos de operación del mosfet.	58
Fig. 2.7.8	Símbolo y encapsulado del Mosfet IRFP 460.	59
Fig. 2.7.9	Mosfet controlado por voltaje a la compuerta.	60
Fig. 2.7.10	Disposición de dos mosfet en paralelo IRFP 460.	60
Fig. 2.8.1	Funcionamiento del convertidor digital a analógico DAC.	61
Fig. 2.8.2	Interfaz SPI del MCP4921 (a) diagrama de tiempos; (b) modo de operación.	61
Fig. 2.8.3	Bus SPI (a) un maestro y un esclavo; (b) un maestro y tres esclavos.	61
Fig. 2.8.4	Convertidor Digital a Analógico conectado a la compuerta del mosfet.	62

<i>Fig. 2.8.5 Convertidor digital analógico DAC utilizado y código computacional correspondiente.</i>	62
<i>Fig. 2.9.1 Diagrama de flujo de operación del microcontrolador.</i>	64
<i>Fig. 2.10.1 Configuración de pines del puerto usb en sus diferentes modalidades.</i>	65
<i>Fig. 2.10.2 Código computacional correspondiente a l vendor ID y al product ID.</i>	65
<i>Fig. 2.11.1.1 Diagrama de flujo de operación del programa de la pc.</i>	68
<i>Fig. 2.11.2.1 Interfaz de usuario del programa de control para caracterización de módulos.</i>	69
<i>Fig. 2.11.3.1 Modos de medición (a) Medición continua; (b) Medición de curva I-V.</i>	71
<i>Fig. 2.11.4.1 Archivo generado abierto desde el block de notas de Windows.</i>	71
<i>Fig. 3.1.1 Esquema general donde se visualiza el área de injerencia del prototipo de medición y control.</i>	73
<i>Fig. 3.1.2 Diagrama de bloques del proyecto.</i>	74
<i>Fig. 3.2.1 Parte de la interfaz de programa mediante la cual se lleva a cabo la selección del tipo de módulo a analizar.</i>	74
<i>Fig. 3.2.2 Selector de módulos de diferentes tecnologías.</i>	75
<i>Fig. 3.2.3 Bloque correspondiente a la etapa de selección de tecnología.</i>	75
<i>Fig. 3.2.4 Interacción entre la interfaz del programa de control y el hardware basado en relevador y electrónica para selección de tecnología a medir.</i>	76
<i>Fig. 3.3.1 Diagrama de flujo de la función de auto rango.</i>	77
<i>Fig. 3.3.2 Selección manual de rango de medición.</i>	78
<i>Fig. 3.3.3 Modelo de un divisor de tensión.</i>	78
<i>Fig.3.3.4 Diagrama de bloques del sistema de auto-rango.</i>	79
<i>Fig. 3.4.1.1 Divisor de tensión circuito eléctrico y formula.</i>	79
<i>Fig. 3.4.1.2 Doble divisor de tensión, seleccionable (a) circuito eléctrico (b) circuito impreso.</i>	80
<i>Fig. 3.4.1.3 Esquemático de modo de medición de voltaje de módulos FV o FC.</i>	81
<i>Fig. 3.4.2.1 Sistema de protección contra inversión de polaridad.</i>	82
<i>Fig. 3.5.1 Comportamiento eléctrico de una celda solar en iluminación.</i>	83
<i>Fig. 3.5.2 Etapa de potencia del sistema de medición.</i>	84
<i>Fig. 3.5.3 Interconexión entre el sensor de corriente y el microcontrolador.</i>	84
<i>Fig. 3.5.5 Representación del mosfet como resistencia variable en las terminales del módulo.</i>	85
<i>Fig. 3.5.6 Diagrama de bloques de función del mosfet como resistencia variable</i>	85
<i>Fig. 3.5.7 Características de (a) salida y (b) de transferencia del mosfet IRFP460.</i>	86
<i>Fig. 3.5.8 Voltaje de compuerta V_{GS} controlado por voltaje del DAC.</i>	86
<i>Fig. 3.5.9 Ubicación del componente visual en el programa de control para variación de R_{DS} y modo de utilización.</i>	87
<i>Fig. 3.5.10 El DAC como parte importante en el proceso de variación de R_{DS}.</i>	87
<i>Fig. 3.5.11 Importancia del relevador para cortocircuitar terminales de la celda FV.</i>	87
<i>Fig. 3.6.1 Configuración interna y configuración de pines del sensor de temperatura LM335.</i>	88
<i>Fig. 3.6.2 Conexión del sensor de temperatura y del código computacional correspondiente.</i>	89
<i>Fig. 3.6.3 Conexión de la salida del sensor hacia el convertidor A/D interno del microcontrolador</i>	90
<i>Fig. 3.6.4 Parte del programa de control donde se introduce el valor de la constante del sensor de irradiancia.</i>	91
<i>Fig. 3.6.5 Despliegado de temperatura e irradiancia en el programa de control.</i>	92
<i>Fig. 3.7.1.1 Distribución de las etapas que conforman el circuito electrónico del sistema de caracterización.</i>	93

<i>Fig. 3.7.1.2 Circuito impreso de la etapa de control.</i>	94
<i>Fig. 3.7.1.3 Circuito electrónico de la etapa de potencia.</i>	94
<i>Fig. 4.2.1.4 Sistema de medición de curvas I-V y E-I de celdas experimentales.</i>	96
<i>Fig. 4.1.1.1 Mapa del sitio donde se llevaron a cabo las mediciones para caracterización de los módulos fotovoltaicos.</i>	98
<i>Fig. 4.1.2.1 Curva I-V obtenida con el prototipo de medición.</i>	99
<i>Fig. 4.1.3.1 Módulo fotovoltaico con una celda solar sometida a sombreado.</i>	99
<i>Fig. 4.1.3.2 Efecto de la trayectoria de la corriente en un módulo fotovoltaico con una celda sometida a efecto de sombreado.</i>	100
<i>Fig. 4.1.3.3 Comportamiento I-V y P-V de tres módulos fotovoltaicos con una línea de celdas sombreadas.</i>	100
<i>Fig. 4.1.3.4 Representación de los valores de potencia que se pueden obtener en un módulo fotovoltaico sometido a sombreado.</i>	101
<i>Fig. 4.2.1 Prototipo del sistema de caracterización de celdas experimentales</i>	102
<i>Fig. 4.2.1.1 Celda de combustible tipo PEM de 1.2 kW.</i>	103
<i>Fig. 4.2.1.2 Dispositivos que integran el módulo NEXA.</i>	103
<i>Fig. 4.2.1.3 Características del stack a diferentes temperaturas.</i>	104
<i>Fig. 4.2.1.4 Medida de la resistencia interna equivalente.</i>	104
<i>Fig. 4.2.1.5 Resistencia interna en función de la corriente en el stack..</i>	105
<i>Fig. 4.2.1.6 Curva E-I de una celda de combustible.</i>	106
<i>Fig. 5.1.1 Relevador doble utilizado para la selección de tecnología a caracterizar.</i>	110
<i>Fig. 5.2.1 Modo de operación del proceso de protección contra inversión de polaridad.</i>	110
<i>Fig. 5.3.1.1 Curva I-V y P-V del módulo SILIKEN SLK60P6L</i>	111
<i>Fig. 5.3.2.1 Curva I-V y P-V del módulo KYOCERA KC80-01.</i>	112
<i>Fig. 5.3.3.1 Curva I-V y P-V del módulo KYOCERA KC125TM.</i>	113
<i>Fig. 5.3.4.1 Curva I-V y P-V del módulo SOLARTEC S60PC-250.</i>	114
<i>Fig. 5.3.5.1 Curva I-V y P-V del módulo ERDM MM6-130.</i>	115
<i>Fig. 5.3.5.2 Comportamiento de la curva I-V y P-V del módulo ERDM MM6-130 con diferentes condiciones de irradiancia y temperatura graficadas en Microcal Origin a partir de los datos generados por el programa de control.</i>	116
<i>Fig. 5.3.6.1 Curva I-V de tres módulos fotovoltaicos de distintos modelos conectados en serie.</i>	117
<i>Fig. 5.4.1 Curva I-V de un módulo fotovoltaico obtenida con el prototipo de medición.</i>	118
<i>Fig. 5.4.2 Comparación entre la curva I-V obtenida con el equipo comercial (rojo) y con el prototipo construido en este proyecto (negro).</i>	119
<i>Fig. 5.5.1 Comportamiento I-V y P-V de módulo fotovoltaico SILIKEN 250W SLK60P6L sometido a condiciones de sombreado.</i>	120
<i>Fig. 5.5.2 Medición de un módulo fotovoltaico Policristalino Su-Kam de 320W (a) descubierto, (b) con celdas sombreadas.</i>	121
<i>Fig. 5.5.3 Medición de un módulo fotovoltaico Policristalino SuKam de 320W con celdas sombreadas.</i>	121
<i>Fig. 5.5.4 Medición del módulo fotovoltaico con 4 celdas sombreadas(a) modo de sombreado; (b) grafico obtenido.</i>	122
<i>Fig. 5.5.5 Medición del módulo fotovoltaico con 9 celdas sombreadas(a) modo de sombreado; (b) grafico obtenido.</i>	123
<i>Fig. 5.5.6 Medición del módulo fotovoltaico con varias celdas sombreadas en modo diagonal (a) modo de sombreado; (b) grafico obtenido.</i>	124
<i>Fig. 5.6.1 (a) Curva E-I de una celda de combustible con comportamiento en corto circuito total, 10, 20 y 30%; (b) parte del programa de control donde se considera el valor máximo de corto circuito a considerar para protección de la celda.</i>	125
<i>Fig. 5.7.1.1 Celda solar con concentrador de 4 espejos.</i>	126

<i>Fig. 5.7.1.2 Primera medición de una celda fotovoltaica con concentrador de espejos.</i>	126
<i>Fig. 5.7.1.3 Segunda medición de una celda fotovoltaica con concentrador de espejos.</i>	127
<i>Fig. 5.7.1.4 Grafica en Origin correspondiente a (a) la figura 5.3.10.2; (b) la figura 5.3.10.3</i>	127
<i>Fig. 5.7.2.1 Celda solar de concentración a base de lente.</i>	127
<i>Fig. 5.7.2.2 Primera medición realizada a celda solar con concentrador a base de lente.</i>	128
<i>Fig. 5.7.2.3 Segunda medición realizada a celda solar con concentrador a base de lente.</i>	129
<i>Fig. 5.7.2.4 Grafica en Origin correspondiente a los datos mostrados en la imagen de la figura 5.7.2.3</i>	129
<i>Fig. 5.7.3.1 Graficas obtenidas de la caracterización de una celda de combustible experimental de bioalcohol.</i>	130
<i>Fig. 5.7.3.2 Celda experimental de bioalcohol fijándola por un tiempo determinado en el punto de máxima potencia.</i>	131
<i>Fig. 5.7.3.3 Celda experimental de bioalcohol correspondiente a los datos de la figura 5.7.3.2(b) graficada en origin.</i>	131
<i>Fig. 5.7.4.1 Celda de combustible tipo PEM de kit didáctico.</i>	132
<i>Fig. 5.7.4.2 Datos obtenidos de la Celda de combustible tipo PEM de kit didáctico con diferentes condiciones de operación procesados en Origin.</i>	133
<i>Fig. 5.7.5.1 Datos obtenidos de la Celda de bioalcohol procesados en Origin.</i>	134
<i>Fig. 5.7.6.1 Datos obtenidos de la Celda de bioetanol procesados en Origin.</i>	135
<i>Fig. 5.7.6.2 Celda de bioetanol sometida a condiciones de irradiancia y fijada en el punto de máxima potencia (a) comportamiento del voltaje, corriente y potencia; (b) curva potencial-corriente (E-I).</i>	135
<i>Fig. 5.7.6.3 (a) Prueba con la celda de combustible de bioetanol. (b) curva potencial-corriente (E-I) mostrada en la figura 5.5.6.2(b) graficada en Origin.</i>	136
<i>Tabla 1.3.1.1 Estado de la tecnología fotovoltaica.</i>	8
<i>Tabla 1.3.2.1 Principales tipos y características de las celdas de combustible. ^{[15][16]}</i>	12
<i>Tabla. 2.7.1 Modelos equivalentes lineales del mosfet de canal N en fuente común.</i>	57
<i>Tabla. 2.7.2 Modelo circuital y analítico del NMOS.</i>	58
<i>Tabla 4.1 Datos de placa de Módulos caracterizados con el prototipo de medición.</i>	97
<i>Tabla 5.3.2.1 Datos de placa y obtenidos del módulo FV KC80-01.</i>	112
<i>Tabla 5.3.3.1 Datos de placa y obtenidos del módulo FV KC125TM.</i>	113
<i>Tabla 5.3.4.1 Datos de placa y obtenidos del módulo FV S60PC 250.</i>	114
<i>Tabla 5.3.5.1 Datos de placa y obtenidos del módulo FV MM6-130.</i>	115
<i>Tabla 5.3.5.2 Datos de placa y obtenidos del módulo FV MM6-130 con diferentes niveles de irradiancia.</i>	116
<i>Tabla 5.4.1 Datos de placa y obtenidos del módulo FV SLK60P6L.</i>	118
<i>Tabla 5.4.2 Comparación de datos obtenidos con el equipo de medición comercial marca solmetric y el prototipo.</i>	120
<i>Tabla 5.5.1 Datos de placa del módulo ERDM MM6-130 sometido a sombreado.</i>	122
<i>Tabla 5.7.1.1 Datos obtenidos de Celda FV comercial con concentrador de 4 espejos irradiancia $G=503.4 \text{ W/m}^2$</i>	126
<i>Tabla 5.7.2.1 Datos obtenidos de Celda FV comercial con concentrador a base de lente irradiancia $G = 434 \text{ W/m}^2$</i>	129
<i>Tabla 5.7.4.1 Prueba correspondiente a la figura 5.7.4.2(a)</i>	133
<i>Tabla 5.7.4.2 Prueba correspondiente a la figura 5.5.4.2(b)</i>	133
<i>Tabla 5.7.6.1 Prueba correspondiente a la figura 55.6.2</i>	135

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un equipo de prueba y medición basado en la integración hardware-software para llevar a cabo la caracterización y control de variables que intervienen en un sistema integral de generación de energía basado en tecnología fotovoltaica y celda de combustible.

Objetivos específicos

1. Diseñar y construir un circuito electrónico de monitoreo y control de potencia, basado en computadora para medición de variables físicas y eléctricas de un sistema híbrido de generación de energía.
2. Desarrollar un programa computacional para el control del circuito electrónico de medición.
3. Llevar a cabo la caracterización del equipo de medición y control.
4. Llevar a cabo la caracterización de módulos fotovoltaicos en diversas condiciones de irradiancia y sometidos a sombreado.
5. Comparación entre las mediciones obtenidas con este proyecto y las obtenidas con equipos comerciales diseñados para este fin.
6. Llevar a cabo la caracterización eléctrica de celdas de combustible.

Resumen

Se presenta el diseño de un prototipo de instrumento de medición en tiempo real de curvas corriente voltaje de celdas fotovoltaicas y celdas de combustible para su aplicación a sistemas híbridos de generación de energía interconectados a la red. Es una integración hardware-software que contempla el diseño del circuito electrónico de control, el circuito electrónico de potencia y el circuito electrónico de comunicación con un ordenador mediante el puerto USB. El circuito de control y comunicación está basado en el uso de un microcontrolador. El diseño también contempla el desarrollo de dos programas, el primero es para el microcontrolador, que llevará a cabo las funciones de medición de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia; el segundo se encargara de definir el modo de medición, los intervalos de medición, las funciones de presentación, almacenamiento y análisis de datos.

Entre las características principales que presenta el prototipo es la portabilidad, ya que se puede llevar a cualquier sitio para realizar mediciones in situ, otra característica es la de llevar a cabo mediciones de curvas tanto de celdas fotovoltaicas como de celdas de combustible así como también tener el control total del proceso de medición, esto mediante la variación de las condiciones del experimento. Aunado a todo lo anterior, la sencillez operacional en la realización de las mediciones es sin duda uno de los aspectos más importantes ya que no se requiere personal calificado para su uso, instalación o configuración.

Para la obtención de las curvas corriente voltaje se presentan dos maneras de variar la resistencia eléctrica en las terminales de la celda, mediante el uso de un capacitor como resistencia variable y el uso de un mosfet de donde se deduce la importancia de éste último componente elegido como resistencia variable.

Se presentan curvas obtenidas con el prototipo de medición a diferentes tipos de módulos, tanto fotovoltaicos como de celdas de combustible y las ventajas que presenta con respecto a los sistemas de medición comerciales.

Justificación

En el ámbito de la investigación, es necesario contar con equipos o sistemas complejos de medición e incluso especializados para algún área de investigación en particular, esto ocasiona que los recursos que se destinan para la realización de proyectos de investigación en muchos de los casos no son suficientes o en algunas ocasiones no pueden llevarse a cabo por falta de disponibilidad de sistemas de medición adecuados. En el mejor de los casos, los equipos de medición se compran a costos muy elevados y llegan con demasiada demora. El tiempo que tarda en llegar un equipo de medición atrasa la realización de experimentos lo que trae consigo un retraso en la obtención de resultados, en la elaboración de informes, artículos, tesis, etc.

El proyecto que se presenta pretende realizar la caracterización eléctrica de un sistema híbrido de producción de electricidad basado en tecnología fotovoltaica (FV) y celda de combustible (FC) con un grado de precisión aceptable que permita al experimentador tener una primera aproximación sobre la potencia eléctrica que puede generar una celda determinada.

El hecho de que este sistema de medición sea desarrollado en el Instituto de Energías Renovables, nos permitirá contar con una herramienta capaz de amoldarse a cualquier proceso donde se requiera medir parámetros eléctricos y físicos, utilizando una computadora personal como controlador del sistema de medición. El uso de la PC nos permitirá grandes beneficios como la medición de un proceso por largos intervalos de tiempo, almacenar y procesar información para su visualización en tiempo real, generar gráficos y reportes de manera automática entre otras muchas posibilidades.

El acoplamiento entre un sistema fotovoltaico y un sistema basado en celda de combustible involucra diferentes y variadas magnitudes físicas que deben ser monitoreadas para analizar el comportamiento del sistema híbrido en general. Para fines de investigación, la información obtenida de este tipo de sistemas puede servir para modificar las topologías de acoplamiento entre sistemas diferentes y estimar la eficiencia del sistema integral.

Hipótesis

El proceso de caracterización eléctrica de sistemas fotovoltaicos y de celdas de combustible se puede llevar a cabo mediante la obtención de la curva corriente voltaje (I-V) y la curva potencial corriente (E-I) respectivamente. Estas curvas son pares de datos de corriente y voltaje obtenidos mediante un proceso de medición en el mismo instante de tiempo, para ello, la técnica que se presenta en este proyecto es la de medir corriente y voltaje para diferentes resistencias eléctricas conectadas al generador, esto se puede lograr utilizando resistencias fijas o mediante una resistencia eléctrica variable; para ésta última se puede considerar un dispositivo electrónico de potencia, específicamente con un tiristor se puede trabajar en su zona activa que es la zona donde la resistencia interna entre las terminales drenador y fuente (R_{DS}) es proporcional en algún grado al nivel del voltaje aplicado en su terminal de compuerta (V_{GS}), para ello es importante implementar un control de voltaje aplicado a la compuerta del tiristor, la resolución de éste último determina la cantidad de datos que se pueden obtener. Además, es importante considerar que la temperatura del tiristor se incrementara a medida que se incrementa la corriente que circula a través de él.

El desarrollo de un instrumento de medición a la medida es en cierta forma una ventaja, ya que se elimina la interconexión de dispositivos y se hace más fácil el proceso de medición, los sistemas modernos de medición nos permiten contar con una amplia gama de posibilidades que benefician los procesos de medición que se llevan a cabo en el ámbito de la investigación, el sistema que se desarrolla será controlado a través de una computadora cuya interconexión se llevara a cabo a través del puerto USB (Bus Serie Universal).

Capítulo 1

Introducción a las energías renovables

1.1 Aspectos generales de las energías renovables

Los problemas ambientales ocasionados por la contaminación, principalmente por la combustión de los productos derivados del petróleo, están obligando a las administraciones y a los gobiernos a tomar medidas, y de hecho, estos productos contaminantes están siendo ya desplazados por los que se denominan "fuentes de energía limpias y renovables", entre ellos el Sol.

La energía solar es una de las dos energías renovables más explotadas en la actualidad. Gracias al esfuerzo técnico, se ha llegado a rentabilizar bastante las instalaciones dedicadas a este tipo de aprovechamiento energético, por lo que su número se ha multiplicado en los últimos años. Este gran impulso que se está dando en muchos países a las instalaciones de energía solar, está originando mayores necesidades de técnicos capacitados para su diseño, montaje y mantenimiento, y por consiguiente, la necesidad de conocimientos técnicos y de reglamentaciones y normativas adecuadas y acorde a esta necesidad.

1.2 Los sistemas de medición de curvas corriente voltaje (I-V) y potencial corriente (E-I).

Una de las principales barreras para la investigación científica en los países en desarrollo es la falta de instrumentación e instalaciones. En el caso de la energía solar, los instrumentos de monitoreo comercial son caros y generalmente están fuera del límite del presupuesto de los científicos locales. Para el caso de la energía de hidrógeno, se requieren instrumentos aún más especializados que incluyen programas de costo muy elevado y la necesidad de personal calificado para la instalación y configuración, éstos últimos también generan costos.

El monitoreo de sistemas a largo plazo ha sido una iniciativa de investigación casi exclusivamente de países de Norte América y Europa. Se han diseñado e instalado Campos de Medición en Exterior para monitorear el rendimiento de los sistemas bajo condiciones de operación a largo plazo.

Existen en el mundo muchas empresas dedicadas a la generación de instrumentos de medición de curvas I-V entre las cuales se encuentran: TECHNOSUN, TRITEC, HT Instruments (fig. 1.2.1), PCE products, etcétera pero con prestaciones similares que miden únicamente un tipo de tecnología de generación, para el caso de los mencionados anteriormente es tecnología fotovoltaica.



Fig. 1.2.1 Modelos de trazadores I-V de módulos fotovoltaicos en el mercado.

Estos instrumentos ya se encuentran en el mercado internacional y tienen grandes prestaciones, sin embargo, cada una de éstas prestaciones tienen costos adicionales por lo que en muchos de los casos es imposible su adquisición.

Una de las razones de la realización de éste proyecto es precisamente el elevado costo de los instrumentos de medición comerciales que oscila entre los €5,000.00 a los €20,000.00.

Para el caso de obtención de curvas potencial corriente (E-I) de celdas de combustible, actualmente se llevan a cabo experimentaciones para estimar la generación de potencia eléctrica en celdas de combustible de baja potencia, para ello se utilizan racks de equipos especializados como el que se muestra en la imagen de figura 1.2.2.



Fig. 1.2.2 Integración de equipos comerciales para la estimación de la curva de potencia en celdas de combustible.

Contar con equipos de este tipo implica la inversión de varias decenas de miles de dólares, lo que implica un gasto exorbitante para muchas dependencias académicas y de investigación. Adicionalmente implica la contratación de personal calificado para la instalación de los equipos, curso sobre el uso de los equipos, gastos programados de mantenimientos y licencias de software según sea el caso.

1.3 La tecnología fotovoltaica (FV) y la de celda de combustible (FC)

1.3.1 La tecnología fotovoltaica.

La radiación solar en la superficie de la tierra.

La intensidad o potencia de la radiación solar (Irradiancia) que llega hasta la Tierra depende del espesor de la capa atmosférica que tiene que atravesar antes de alcanzar la superficie terrestre, y de la densidad de componentes moleculares y partículas en suspensión que encuentra en su camino.

La masa de aire (AM, air mass) y la turbiedad son dos factores que a nivel atmosférico influyen en la intensidad con que la radiación solar incide finalmente en la superficie terrestre.

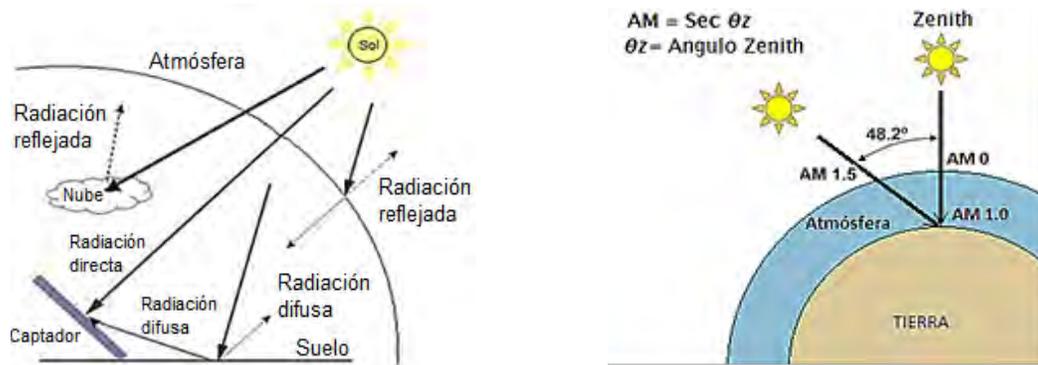
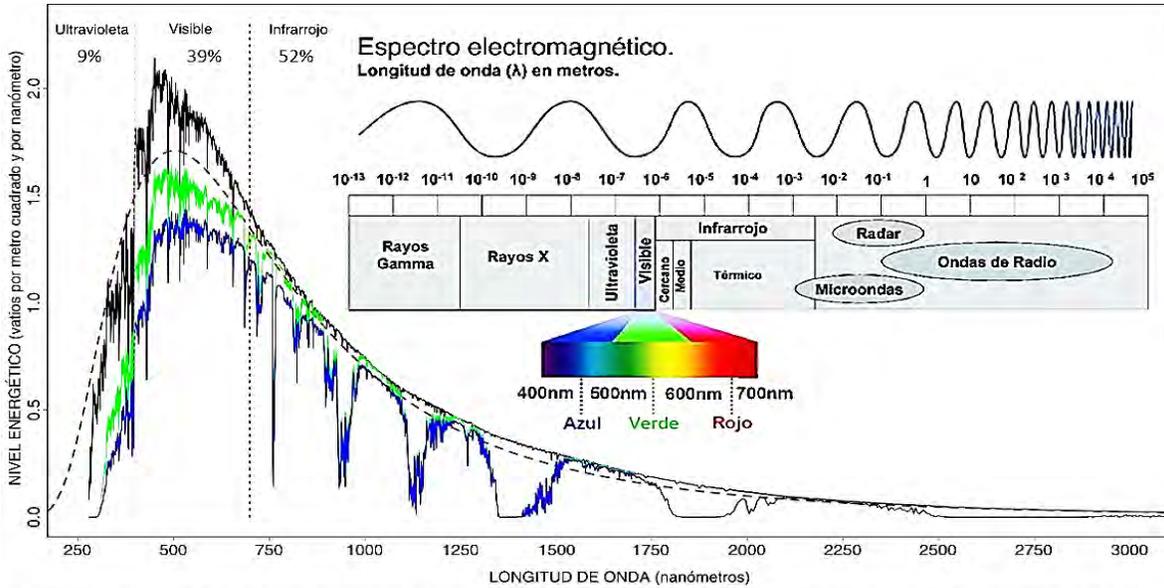


Fig. 1.3.1.1 Componentes de la radiación solar.

La luz, sea ésta de origen solar o generada por un foco incandescente o fluorescente, se encuentra formada por un conjunto de radiaciones electromagnéticas de muy alta frecuencia, agrupadas dentro de un cierto rango llamado **espectro luminoso**.



Espectro solar medido bajo tres diferentes **masas de aire** (longitud relativa de la atmósfera que han de atravesar los rayos).

Fig. 1.3.1.2 Espectro luminoso de la luz solar.

Las ondas de baja frecuencia del espectro solar (infrarrojo) proporcionan calor, las de alta frecuencia (ultravioleta) hacen posible el proceso de fotosíntesis o el bronceado de la piel. Entre estos dos extremos se encuentran las frecuencias que forman la parte visible de la luz solar. La intensidad de la radiación luminosa varía con la frecuencia.

El efecto fotoeléctrico.

Se define como efecto fotoeléctrico a la aparición de una corriente eléctrica en ciertos materiales cuando estos se ven iluminados por radiación electromagnética, sin que sea necesaria la intervención de ningún efecto mecánico o físico.

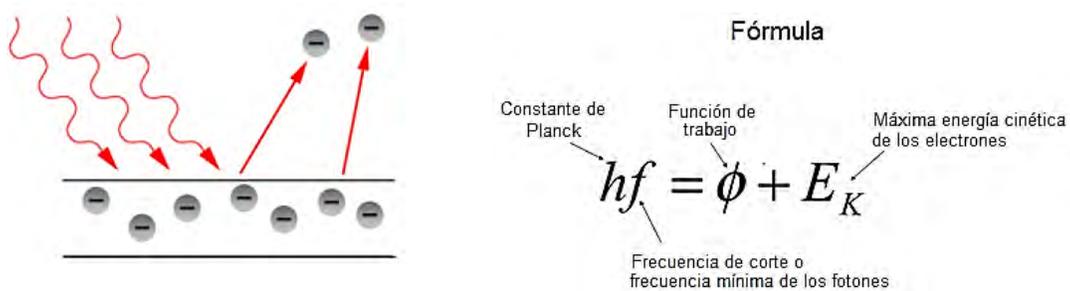


Fig. 1.3.1.3 Efecto fotoeléctrico.

Las celdas fotovoltaicas.

Las celdas fotovoltaicas son los dispositivos que permiten la conversión de la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones), mediante lo que se conoce como **efecto fotovoltaico**.

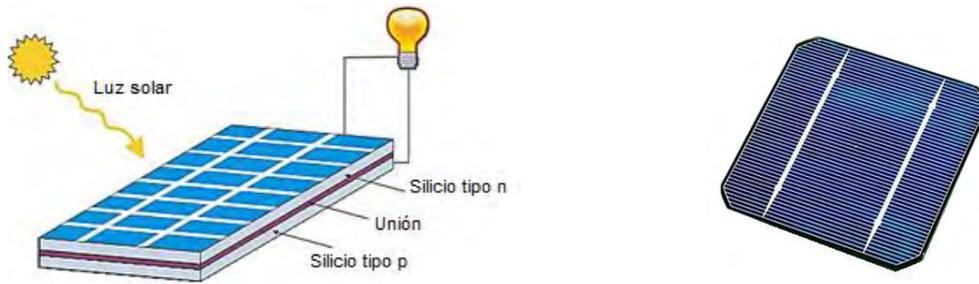


Fig. 1.3.1.4 Esquema de una celda fotovoltaica

Una celda fotovoltaica es una unión P-N con la particularidad de que si no está iluminada se comporta como un diodo y por tanto, la corriente es la determinada por el modelo matemático de Shockley. En cambio, al estar iluminada, a la corriente determinada por el modelo matemático de Shockley (I_D), se le tiene que sumar otra corriente, la corriente fotogenerada (I_{ph}) [19,20]

Considerando, la corriente del diodo como:

$$I_D = I_0 \left(\frac{e^{qV_0}}{nkT} - 1 \right) \quad \text{Ec. 1.1}$$

la corriente en el diodo sujeto a iluminación está dada por:

$$I = I_D - I_{ph} \quad \text{Ec. 1.2}$$

De donde se obtiene:

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) - I_{ph} \quad \text{Ec. 1.3}$$

I_{ph} = Corriente fotogenerada

I_D = Corriente del diodo

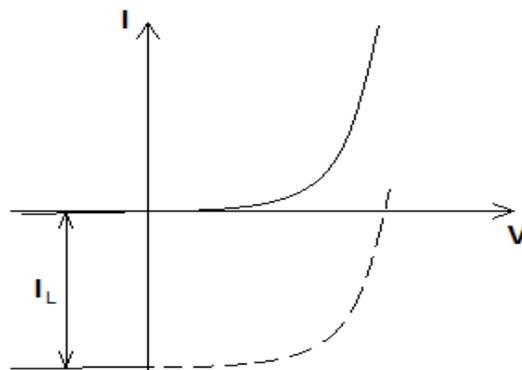


Fig. 1.3.1.5 Característica I-V de una celda fotovoltaica iluminada.

Tomando $I=0$ en la ecuación 1.3 obtenemos el valor del voltaje a circuito abierto V_{oc} :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad \text{Ec. 1.4}$$

En el modelo eléctrico real se tienen en cuenta la resistencia serie, R_s , y la resistencia shunt, R_{sh} . La resistencia serie es debida a la resistencia de carga del material semiconductor, a los contactos metálicos y a las interconexiones y resistencias de contacto entre los contactos metálicos y el semiconductor. La resistencia *shunt* se debe a las no idealidades y a las impurezas cerca de la unión P-N^[31-33].

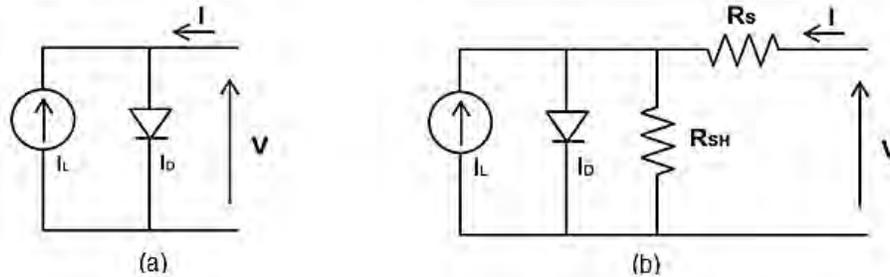


Fig. 1.3.1.6 Modelo eléctrico de una celda fotovoltaica: (a) ideal, (b) real

Ambas resistencias reducen las prestaciones de la célula y en presencia de ellas, el comportamiento de la curva I-V de la célula solar es el siguiente^[19]:

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+IR_s}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad \text{Ec. 1.5}$$

Observando el modelo eléctrico, se deduce que cada una de estas celdas fotovoltaicas se caracteriza por una tensión entre sus terminales de conexión y por una intensidad de corriente.

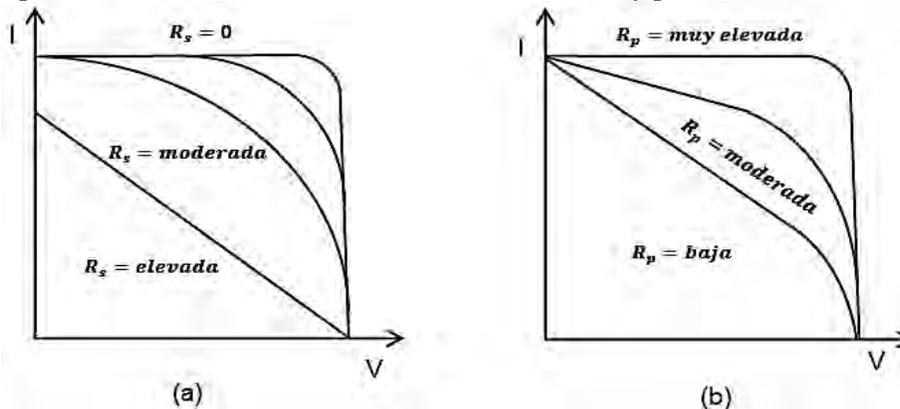


Fig. 1.3.1.6 Influencia de la resistencia (a) serie y (b) paralelo de una celda solar.

También se puede tener un referente de la irradiación solar con el valor de corriente de corto circuito medido por el trazador de curva I-V, si se tiene en cuenta la relación mostrada en la ecuación (1.6), donde $E_s(\lambda)$ es la intensidad de luz en función de la longitud de onda y $SR(\lambda)$ es la respuesta espectral de la celda fotovoltaica como indica Emery^[34].

$$I_{sc} = \int_0^{\infty} E_s(\lambda)SR(\lambda)d\lambda \quad \text{Ec. 1.6}$$

La conversión directa de energía solar a electricidad por medio de celdas fotovoltaicas está surgiendo como uno de los principales contendientes para la producción de potencia verde de la siguiente generación. La tecnología fotovoltaica está rápidamente desarrollándose basada en nuevos materiales y enfoques de *deposición*. En la actualidad, los sistemas fotovoltaicos predominantemente están basados en silicio cristalino y policristalino y está creciendo más allá de 40% por año con producción rápidamente acercándose a 3 GW por año con sistemas fotovoltaicos proporcionando menos del 1% de energía usada en el mundo. El incremento de la eficiencia de la celda y la reducción del costo de fabricación son parámetros críticos para alcanzar costos razonables de sistemas fotovoltaicos. Persiste la idea de incrementar la eficiencia al usar celdas multiuniones o dispositivos híbridos organizados a nivel de nanoescala. Los dispositivos basados en obleas de silicio, simple o policristalino, han sido nombrados tecnología fotovoltaica de “primera generación”. Estos son dispositivos simples de una unión que están limitados por consideraciones termodinámicas a una eficiencia de conversión de potencia máxima de aproximadamente 31% bajo luz solar directa, masa de aire (AM) 1.5. Celdas y módulos solares son usualmente caracterizados de acuerdo a la norma IEC bajo condiciones de prueba estándar, lo cual corresponde a 100 mW/cm² de irradiación directa perpendicular bajo un espectro global de $AM=1.5$ a 25°C de temperatura de la celda. Esto significa que una celda solar de silicio ideal operando bajo luz solar directa convierte aproximadamente 30% de la radiación solar en potencia eléctrica, aunque las celdas actuales sufren de pérdidas parásitas. ^[1,2,3]

El módulo o panel fotovoltaico.

Las celdas solares se ensamblan de manera adecuada para formar una única estructura que es sólida y manejable: el panel fotovoltaico. La integración de varias celdas permite incrementar el voltaje (al conectarse en serie) o la corriente (al conectarse en paralelo) ambos casos traen como consecuencia un incremento en la potencia.

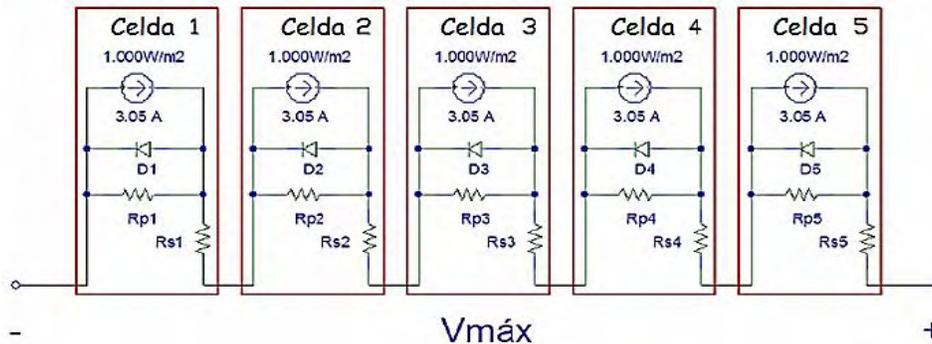


Fig. 1.3.1.7 Interconexión de celdas en serie.

El número de celdas en un panel y por ende, el voltaje de salida, depende de la estructura cristalina del semiconductor utilizado. Los más utilizados están formados por 40-80 celdas conectadas eléctricamente en serie, con una superficie que oscila entre 0.8m² a 2m². Las celdas están ensambladas entre un estrato superior de cristal y un estrato inferior de material plástico.

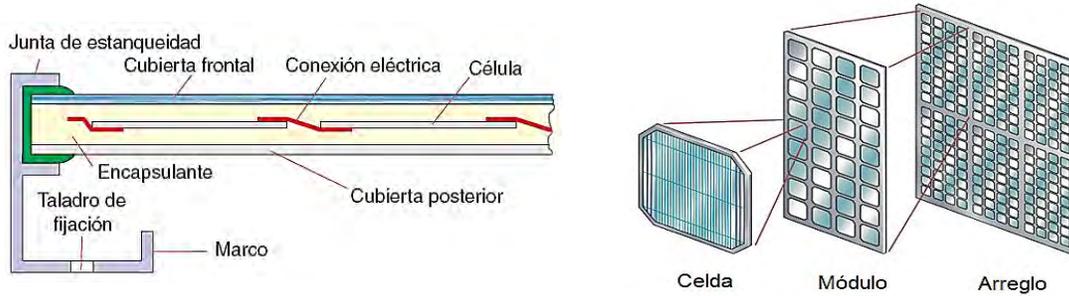


Fig. 1.3.1.8 Integración de un módulo o panel solar.

El comportamiento eléctrico de un módulo fotovoltaico se encuentra definido en una gráfica que corresponde a una curva corriente-voltaje (curva I-V) en la que se puede observar los parámetros eléctricos más importantes del módulo entre los que se encuentran, el voltaje a circuito abierto, la corriente de cortocircuito y la potencia máxima.

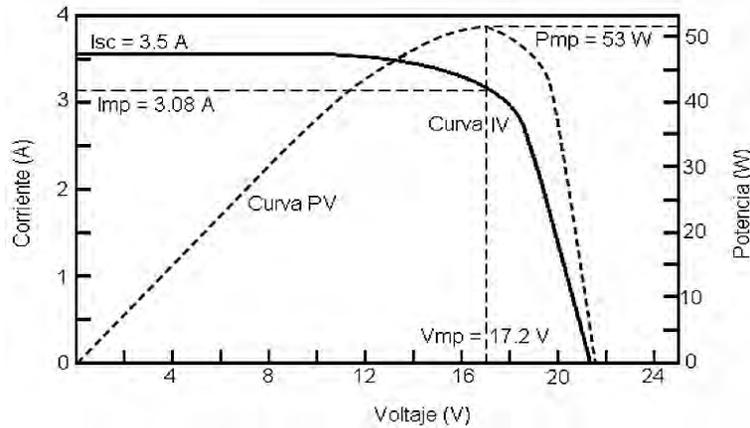


Fig. 1.3.1.9 Curva I-V típica de un módulo fotovoltaico.

Es importante mencionar que cada módulo cuenta con datos de placa proporcionados por el fabricante, estos datos se obtienen manteniendo condiciones definidas de irradiancia y temperatura. A estas condiciones se le conocen como condiciones estándares de prueba (STC, *Standard Test Conditions*), que son: irradiancia de $1,000\text{W/m}^2$, Masa de aire = 1.5 y una temperatura del módulo de $25\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabla 1.3.1.1 Estado de la tecnología fotovoltaica.

Diseño de homo unión		Estatus
Tipo de Tecnología	<ul style="list-style-type: none"> *Silicio monocristalino (gruesa) *Silicio policristalino (gruesa) *Silicio amorfo (película delgada) Películas delgadas monocristalinas *Arsenuro de Galio (GaAs) 	<ul style="list-style-type: none"> Disponible comercialmente Disponible aplicaciones espaciales y concentración
Diseño de hetero unión		Estatus
Tipo de Tecnología	<ul style="list-style-type: none"> Películas delgadas policristalinas: *Cobre-Indio-Diselenio *Telenuro de Cadmio 	<ul style="list-style-type: none"> Disponibles comercialmente

	Diseño de union multiple	Estatus
Tipo de Tecnología	a-SiC/a-Si a-Si/a-Si a-Si/a-SiGe a-Si/poli-Si a-Si/CuInSe ₂ GaAs/GaSb	Desarrollo experimental y disponibilidad comercial
Configuración de módulos	Módulos Planos Módulos con concentrador	Disponible comercialmente Disponible comercialmente

1.3.2 La celda de combustible.

La celda de combustible es un dispositivo que se alimenta, en el ánodo, con un combustible (hidrógeno preferentemente) y en el cátodo, con oxígeno o aire. La reacción electroquímica global da como resultado la producción de agua y la generación de corriente eléctrica. Las celdas de combustible son dispositivos capaces de convertir directamente la energía química que contiene un combustible en energía eléctrica.

El funcionamiento de una celda de combustible se basa en la reacción de combinación de combustible y comburente, en forma de iones, a través de un electrolito, tal y como se describe en la figura 1.3.2.1. La celda de combustible se alimenta de forma continua con combustible y oxidante, a diferencia de los sistemas de baterías comunes. Gracias a esta diferencia, tenemos la ventaja de que en las pilas de combustible ni los electrodos ni el electrolito son consumidos durante la reacción.

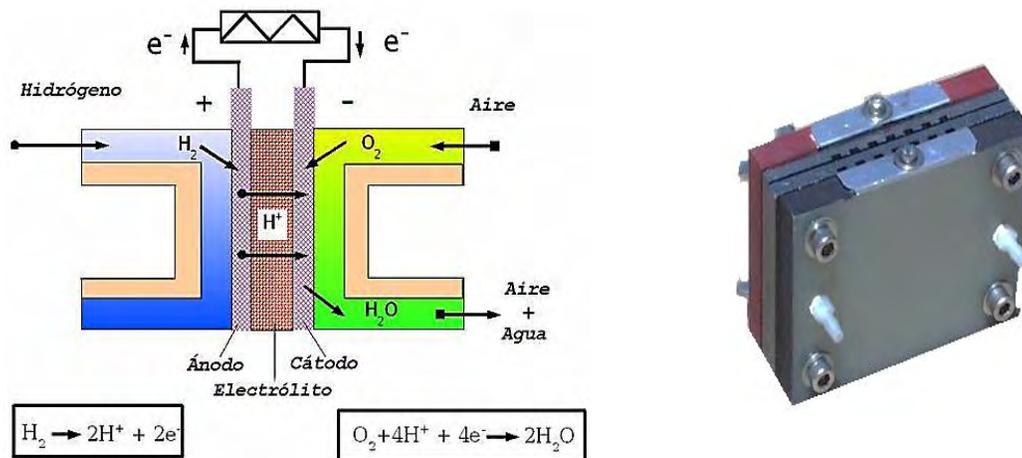


Fig. 1.3.2.1 Esquema de funcionamiento de una pila de combustible. ^[13]

Aunque la celda de combustible tiene componentes y características similares a los de una batería, difieren en ciertos aspectos: mientras que una batería se considera como un dispositivo que almacena energía y que deja de suministrarla al consumirse los reactantes, la celda de combustible es un dispositivo que procesa energía y la entrega de manera continua mientras los reactivos sean suministrados a la celda.

Como elementos de salida, las pilas de combustible producen electricidad en corriente continua y diferentes elementos de desecho según el combustible usado, normalmente dióxido de carbono y agua en forma gaseosa, que son expulsados al ambiente o utilizados en otros procesos.

Los elementos principales que forman las pilas de combustible son, tal y como se muestran en la figura 1.3.2.1:

- **Una sustancia electrolítica.** Tiene la función de permitir el paso de los iones producidos en la reacción anódica hacia el cátodo, cerrando así el circuito eléctrico. Existen electrolitos de varios tipos, tanto líquidos como sólidos, según el tipo de celda de combustible.
- **Dos electrodos, ánodo y cátodo.** También llamados Catalyst Layer (CL), compuestos porosos, normalmente con base de carbono sobre los cuales se deposita un metal cuya función es de catalizador de la reacción. Es importante que la superficie específica del catalizador sea la mayor posible para facilitar la reacción de separación de las moléculas en iones, liberando así electrones. Debido a ello se utilizan catalizadores con partículas de un diámetro de algunos nanómetros.
- **Zona de difusión del gas (Backing Layer o Gas Diffusion Layer, GDL).** Cumple una función estructural y está formada por un material poroso, normalmente carbón. Permite el paso de las sustancias que alimentan a la celda, ayudando a distribuirlos de forma uniforme y a eliminar los productos de la reacción.
- Otros elementos importantes son los **colectores** de la corriente eléctrica (normalmente de acero o grafito), las juntas aislantes de sellado, los elementos estructurales de cierre de la celda de combustible, los tanques de almacenamiento de combustible o las bombas y compresiones necesarios para bombear el combustible, entre otros.

El potencial de Nernst es el equivalente a la “fuerza electromotriz” o “potencial de celda” de una pila, que es la diferencia de potencial que se observa en una pila en circuito abierto.

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad \text{Ec. 1.7}$$

El rendimiento de las células de combustible, a diferencia de los motores de combustión (interna y externa) no está limitado por el ciclo de Carnot ya que no siguen un ciclo termodinámico. Por lo tanto, su rendimiento es muy alto en comparación, al convertir energía química en eléctrica directamente.

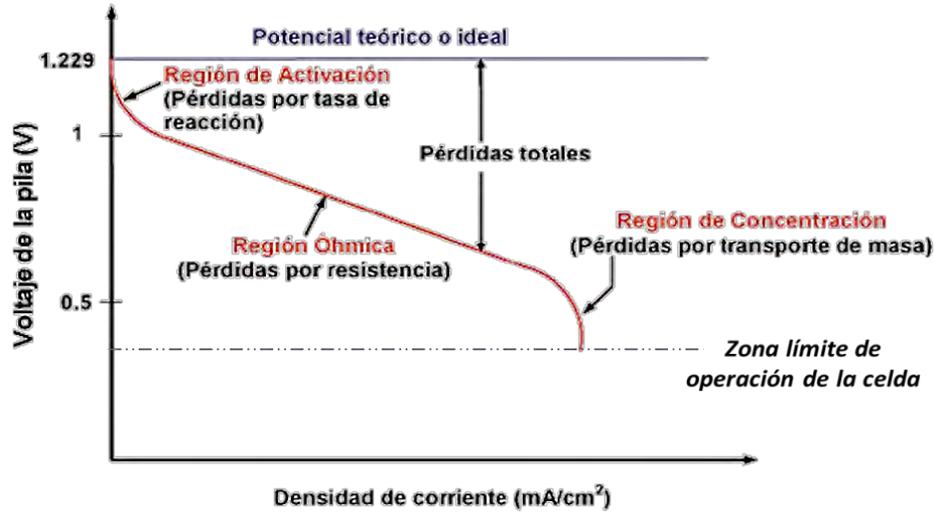


Fig. 1.3.2.2 Perfil característico de una celda de combustible con las pérdidas relacionadas con la intensidad. ^[14]

La diferencia de potencial en los electrodos de la pila decrece cuando existe corriente. Por conveniencia, el rendimiento de una pila de combustible se expresa a menudo en términos del cociente entre el voltaje ideal y el voltaje real (con el que opera la pila de combustible), siendo este último menor que el primero debido a las pérdidas óhmicas y a las asociadas con mecanismos de polarización dentro de la pila. La expresión de la eficiencia de la pila de combustible es la siguiente:

$$\eta = \frac{\Delta W_{elec}}{\Delta H_{reac}} = \frac{V_{reac} \cdot I \cdot t}{V_{ideal} \cdot I \cdot t} = \frac{V_{real}}{V_{ideal}} = \eta_{ideal} \quad Ec. 1.8$$

donde:

W_{elec} , es la energía eléctrica necesaria para liberar los electrones

H_{reac} , es la energía química que interviene en la reacción

V_{real} , es el voltaje medido en las terminales de la celda en condiciones normales de funcionamiento

V_{ideal} , es el voltaje teórico calculado sin considerar pérdidas

I , es la corriente que circula por el circuito

Cuando un stack se diseña para una aplicación dada, los datos del diseño vienen impuestos por los requerimientos de la aplicación a la cual se va a entregar la energía eléctrica que se produzca, tales como el voltaje y la potencia, quedando fijada la corriente a generar por la ecuación,

$$I_{Total} = \frac{P}{V_{Total}} \quad Ec. 1.9$$

donde: P es la potencia, V_{Total} es el voltaje de la pila, e I_{Total} es la corriente total. En el proceso de apilamiento en serie de las celdas, el voltaje total de la pila es la suma de todos los voltajes individuales, o el producto del voltaje promedio por el número total de celdas,

$$V_{Total} = \sum_{i=1}^{N_{celdas}} V_i = \bar{V} \cdot N_{celdas} \quad Ec. 1.10$$

mientras que el área activa de electrodo se puede calcular como,

$$A_{Electrodo} = \frac{I_{Total}}{j} \quad \text{Ec. 1.11}$$

donde j es la densidad de corriente, cuyo valor normalmente oscila entre $0.3 - 0.5 \text{ A/cm}^2$.

De forma general, el potencial de la pila y la densidad de corriente no son parámetros independientes, sino que están relacionados a través de la curva de polarización. Estas curvas normalmente se determinan de forma experimental en bancos de ensayos demandando a la pila diferentes potencias empleando para ello cargas electrónicas dinámicas. Un ejemplo de curva de polarización tanto para una monocelda como para un stack se muestra en las gráficas de la siguiente figura,

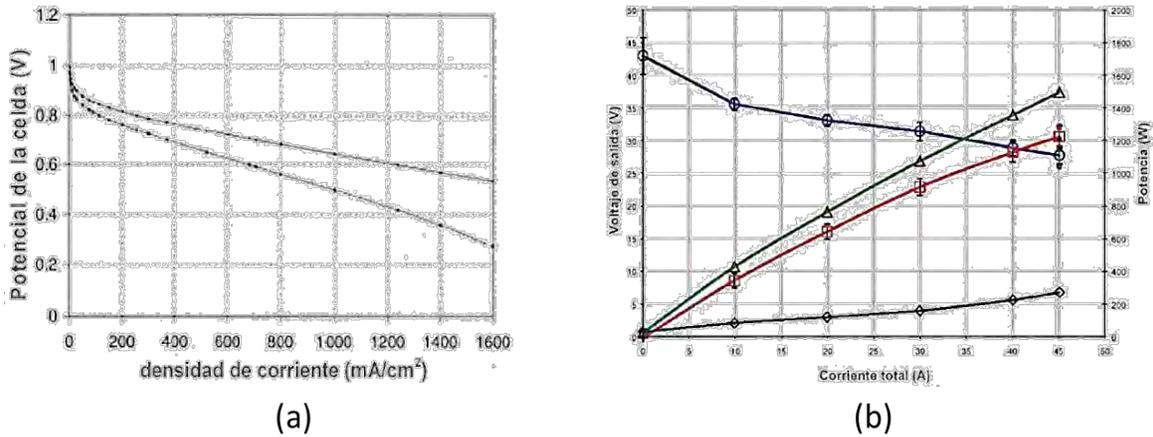


Fig. 1.3.2.4 Curva de polarización típica de una (a) monocelda, (b) stack

Si una celda de combustible es operada a una temperatura elevada, el perfil de la gráfica de voltaje versus densidad de corriente, cambia. Este perfil es obtenido con valores en estado estable, es decir, cada punto es graficado cuando la celda de combustible alcanza su estado estable de operación.

Tabla 1.3.2.1 Principales tipos y características de las celdas de combustible. [15][16]

Tipo	Electrolito	Ion	T (°C)	Canalizador	Combustible	Oxidante	Eficiencia Eléctrica (%)
PEMFC	Membrana	H ⁺	70-100	Pt	H ₂ , Gas	O ₂ , Aire	40-60
	Polimérica						
AFC	Hidróxido de potasio (KOH)	OH ⁻	60-120	Pt/Pd, Ni	H ₂ , Gas puro	O ₂	60
PAFC	Ácido fosfórico	H ⁺	160-200	Pt	H ₂ , Gas	O ₂ , Aire	40-50

	(H ₃ CO ₄)						
MCFC	Carbonato de Litio o Potasio	CO ₃ ²⁻	600-700	Ni	H ₂ , Gas	O ₂ , Aire	45-55
SOFC	Oxido de circonio	O ²⁻	800-1000	-	H ₂ , Gas	O ₂ , Aire	45-60
DMFC	Membrana polimérica	H ⁺	50-120	Pt, Pt-Ru	Metanol, Liq.	O ₂ , Aire	20-40

Al conjunto de la sustancia electrolítica, la zona de difusión del gas y los electrodos se denomina ensamble membrana-electrodo (Membrane Electrode Assembly MEA) y se considera la parte principal de todo el sistema de la pila de combustible^[16]. En la figura siguiente se sintetiza los principales rangos de funcionamiento y aplicaciones de los distintos tipos de pilas de combustible que se han mencionado.

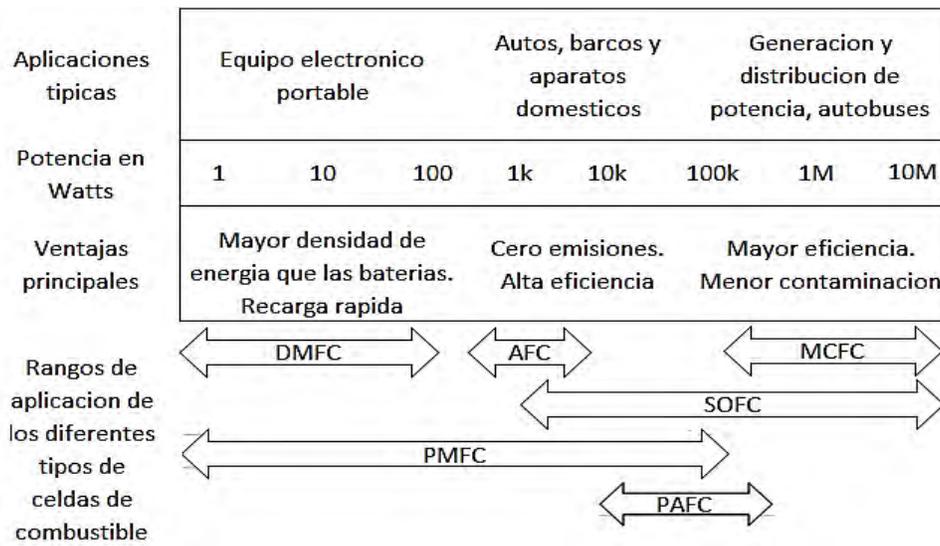


Fig. 1.3.2.5 Principales aplicaciones y rangos de potencia de los diferentes tipos de celdas de combustible.^[17]

Cabe hacer mención que los electrolitos acuosos están limitados para operar hasta 200°C, esto debido a la presión del vapor de agua y a una rápida degradación a altas temperaturas.

Este proyecto contempla la caracterización de celdas de combustible de tipo de membrana de intercambio protónico (PEM) de diferentes potencias, sin embargo, no es específico para este tipo de celda, dado que se encarga de medir parámetros eléctricos, puede ser conectado a cualquier otro tipo de celda.

Como se muestra en la figura siguiente, una pila de combustible tipo PEM está compuesta por varios elementos, los cuales deben de estar diseñados y optimizados para que se favorezca el desarrollo de los fenómenos físicos y químicos en el sistema.

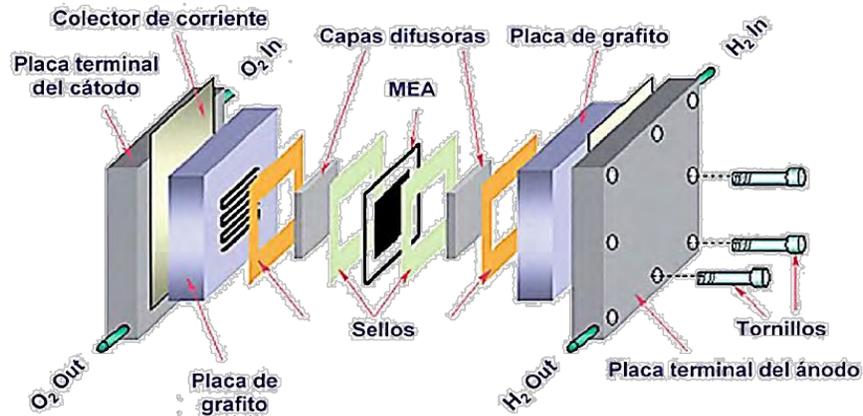


Fig. 1.3.2.6 Elementos que conforman una monocelda de combustible tipo PEM.

Aunque el sistema global de la pila incluya equipos auxiliares de suministro de reactantes, gestión de calor y control, en este proyecto se analizarán solo las características eléctricas de estos dispositivos.

Cuando se requieren valores en corriente mayores a los proporcionados por las monoceldas, se lleva a cabo la integración de una cantidad calculada de monoceldas conectadas en serie generando lo que se conoce como stack.

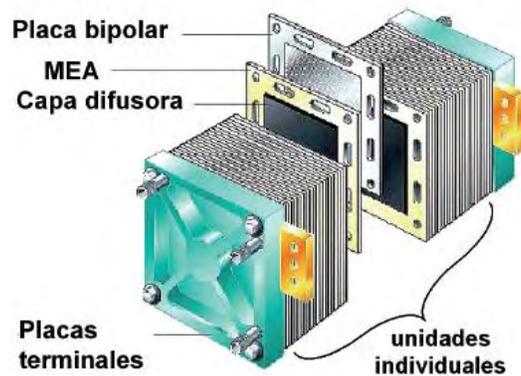


Fig. 1.3.2.7 Apilamiento de varias celdas de combustible en serie formando una pila (stack).

1.4 Sistemas Híbridos

El objetivo de la generación híbrida es integrar en un mismo sistema todas las opciones de energía potencialmente utilizables en un determinado lugar. Se estudian desde el punto de vista de máxima competitividad y seleccionando el sistema que mayor rendimiento proporcione al usuario.

Los mejores resultados se consiguen trabajando simultáneamente en el diseño y readaptación de maquinaria existente. Los resultados que se consiguen en los lugares donde el costo de la

energía es alto son realmente asombrosos si trabajamos simultáneamente en generación/almacenamiento/consumo.

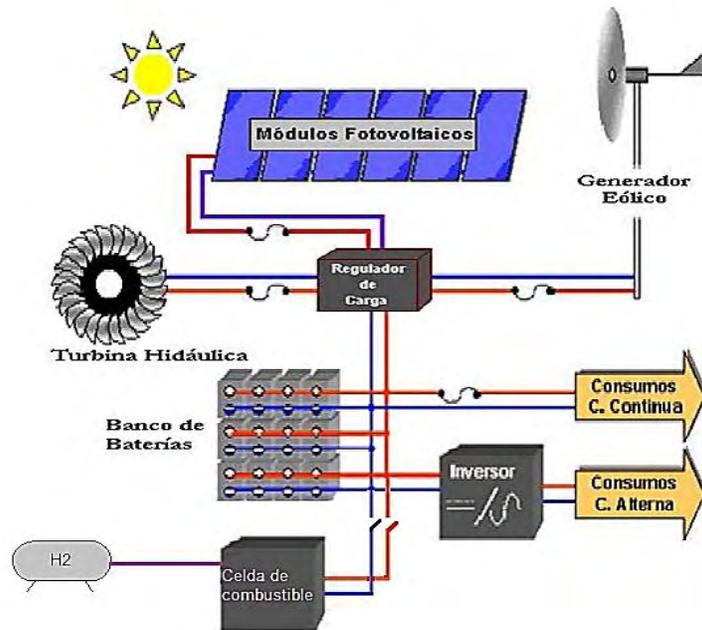


Fig. 1.4.1 Sistema híbrido de generación de energía mediante diferentes tecnologías.

Dentro de estas tecnologías, la integración de distintas fuentes energéticas reviste una especial importancia, primero, desde la perspectiva técnica que permite la integración de distintos equipos de generación eléctrica garantizando una mayor confiabilidad del suministro energético, ante un recurso energético bastante aleatorio, y reduciendo las interrupciones ante la carencia o ausencia de uno de ellos. Segundo, desde el aspecto económico, la integración de distintas fuentes energéticas permite una reducción importante de los costos totales de los equipos de generación, aún en comparación con estrategias convencionales de electrificación que dependen de un único recurso energético a lo largo de la vida útil del sistema.

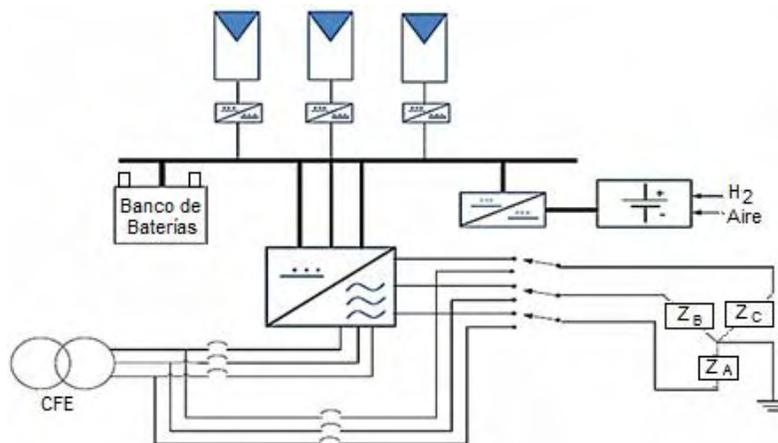


Fig. 1.4.2 Ejemplo de sistema de generación basado en tecnología fotovoltaica con interconexión a la red eléctrica.

Estas tecnologías de integración denominadas Sistemas Híbridos de Generación Eléctrica - SHGEE - serán decisorias en las estrategias futuras de producción eléctrica no solo a nivel rural, sino también a nivel urbano.

La razón más común para la introducción de un sistema híbrido es la posibilidad de generar energía eléctrica cuando el nivel de insolación es bajo, aprovechando el hidrógeno almacenado. En este caso un sistema híbrido donde las dos fuentes son el servicio eléctrico domiciliario y el FV (con banco de baterías conectado a un inversor) permitirá extender las horas de servicio diarias.

En la integración del sistema híbrido de generación de energía eléctrica basado en tecnología solar fotovoltaica y energía de hidrógeno, intervienen diferentes dispositivos cuya función es de gran importancia, ya que sin ellos no se podría llevar a cabo el acoplamiento ni garantizar la energía suministrada a las cargas instaladas. Entre los dispositivos eléctricos más importantes se consideran los siguientes: Arreglo fotovoltaico, celdas de combustible, sistemas de almacenamiento de energía, controladores de carga e inversores.

1.5 La importancia de la medición en la investigación científica

El proceso de medición generalmente requiere el uso de un instrumento como medio físico para determinar la magnitud de una variable. ^[9]

La tecnología actual de semiconductores permite, por un lado, tener mayor precisión en las medidas y, por otro lado, incluir algún tipo de “inteligencia” a los transductores. Ejemplos de estos segundos son los microcontroladores (MCUs o ICs), Procesadores Digitales de Señal (DSP's), Circuitos integrados para aplicaciones específicas (ASIC's) y Field-Programmable Gate Array (FPGA's), aunque los primeros están más destinados a tareas de instrumentación y control. Algunas tecnologías son capaces de integrar todo (sensor + inteligencia) en un único encapsulado (integración monolítica), generando así los llamados sensores inteligentes (o 'smart sensors'). Todo ello permite el desarrollo de Sistemas de Adquisición de Datos (DAQ's) con muy buenas prestaciones y de forma rápida. Se usan ampliamente en tareas como la medición de parámetros y el control de sistemas. ^[7]

Hoy en día, el uso de sistemas digitales para analizar/procesar las señales está muy extendido. Esto es debido a las múltiples ventajas que presentan: bajo costo, mayor precisión, facilidad de implementación, etc. El uso de microcontroladores (μC) o microprocesadores (μP) es común en muchas industrias para el control de procesos. ^[8]

Ejemplos son la industria alimenticia, del papel, textil, químicas; así como también en la automatización de procesos, centros e instituciones de investigación, etc.

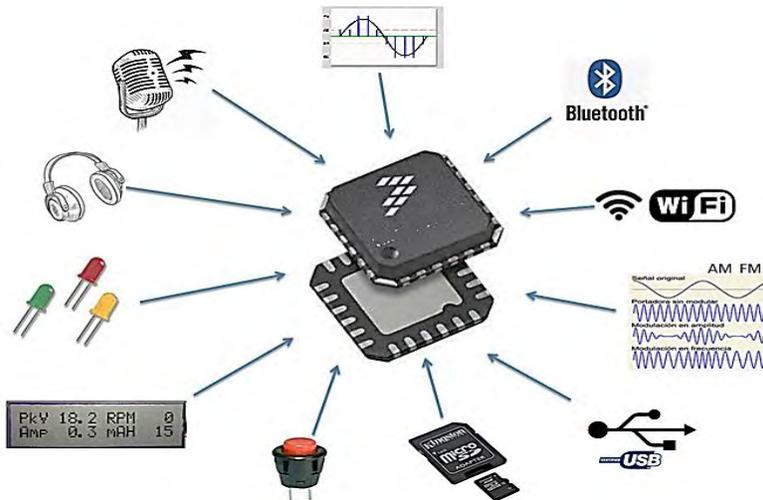


Fig. 1.5.1 Capacidad de integración de un circuito integrado programable.

Concepto de medida.

Proceso empírico y objetivo mediante el cual se asignan números a las propiedades de los objetos o sucesos del mundo real, de forma que las relaciones entre los números describan las relaciones entre las propiedades de los objetos o sucesos.

Instrumento electrónico.

Aparato de cualquier complejidad, destinado a efectuar medidas de alguna magnitud física, y a presentar y/o registrar los resultados de tal medida, realizando todo este proceso con la ayuda de circuitos electrónicos.

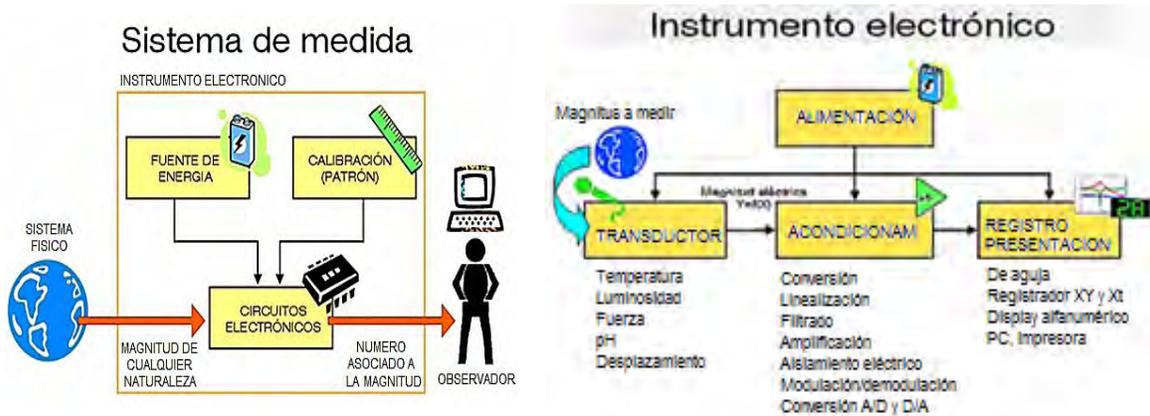


Fig. 1.5.2 Componentes considerados en un sistema de medida y componentes de un instrumento electrónico.

Instrumentación electrónica.

Disciplina que trata de la concepción, construcción y uso de los instrumentos electrónicos, teniendo como base la conjugación de diferentes sistemas tecnológicos soportados en áreas como la electrónica, metrología, tecnologías computacionales y diseño.

1.5.1 Instrumentación y control.

La Instrumentación y Control, como especialidad de Ingeniería, es aquella parte de la ingeniería que es responsable de definir el nivel de automatización de cualquier planta de proceso e instalación industrial, la instrumentación de campo y el sistema de control para un buen funcionamiento del proceso, dentro de la seguridad para los equipos y personas, de acuerdo a la planificación y dentro de los costos establecidos y manteniendo la calidad.

Es una especialidad de la ingeniería que combina, a su vez, distintas ramas, entre las que destacan: sistemas de control, automatización, electrónica e informática. Su principal aplicación y propósito es el análisis, diseño y automatización de procesos de manufactura de la mayor parte de las áreas industriales: petróleo y gas, generación de energía eléctrica, textil, alimentaria, automovilística, procesos de investigación, etc. En otras palabras, la instrumentación es la ventana a la realidad de lo que está sucediendo en determinado proceso, lo cual servirá para determinar si el mismo va encaminado hacia donde deseamos, y de no ser así, podremos usar la instrumentación para actuar sobre algunos parámetros del sistema y proceder de forma correctiva.

Los beneficios de la utilización de sistemas digitales en la instrumentación electrónica son:

- Inmunidad
- Aislamiento galvánico
- Organización y manejo de secuencias de medida
- Almacenamiento de información
- Procesamiento de señales medidas
- Calibración automática
- Presentaciones inteligentes
- Flexibilidad en el diseño y manipulación del sistema de medida
- Facilidad en la transmisión de señales y en el control remoto
- Campo de aplicación

Inmunidad.

Una de las ventajas de esta característica es la insensibilidad al ruido proporcionada, en general, por los sistemas digitales.

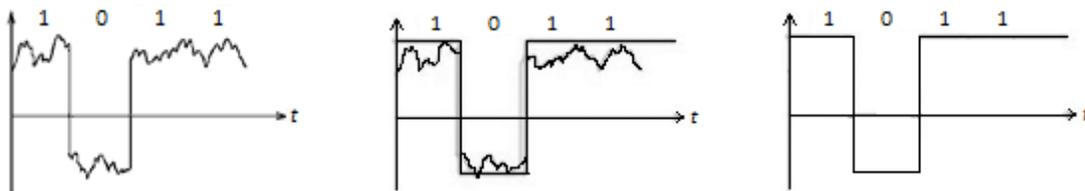


Fig. 1.5.1.1 El ruido en los sistemas digitales.

Por la misma razón anterior, otra ventaja consiste en la insensibilidad a las variaciones o pérdidas de amplitud (una vez convertidas las señales a digitales).

Aislamiento galvánico.

Con técnicas analógicas, este tipo de aislamiento se realiza mediante transformadores. Con técnicas digitales, podemos utilizar optoacopladores. Estos componentes presentan diversas ventajas, una de ellas es que son más rápidos que los transformadores; además, los circuitos acoplados pueden tener referencias de tensión diferentes.

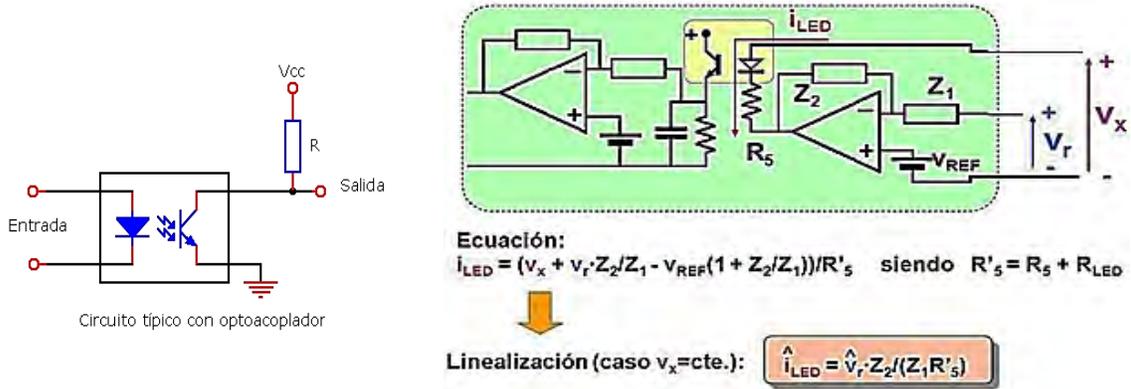


Fig. 1.5.1.2 Esquema de un optoacoplador y diagrama de aislamiento galvánico con optoacoplador.

Una de las características importantes de este tipo de dispositivos es que permite el acoplamiento entre sistemas de potencia y sistemas de control.

Organización y manejo de secuencias de medida.

La capacidad de sincronización y control de operaciones de un sistema digital permite poder programar de forma muy versátil cualquier secuencia de medida.

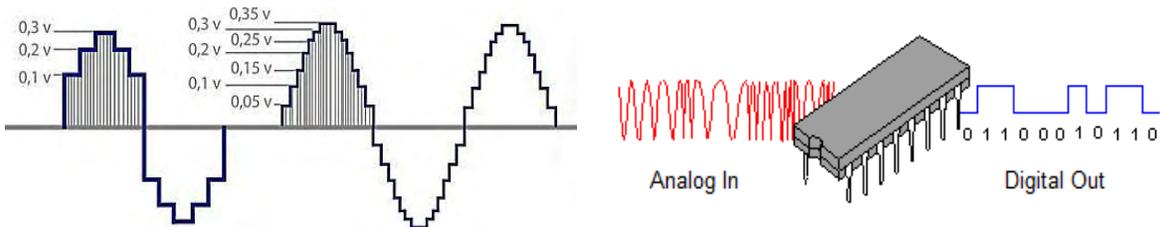


Fig. 1.5.1.3 Conversión analógica a digital.

Almacenamiento de información.

Los distintos tipos de memoria existentes en sistemas digitales, permite el almacenamiento de información diversa en diferentes tipos: constantes, tablas, programas, etc. [23]



Fig. 1.5.1.4 Unidad mínima de memoria y distribución de información digital en una memoria.

Procesamiento de las señales medidas.

Una de las mayores virtudes de los sistemas digitales es su capacidad de procesado de la información. Como ejemplos de procesado de las señales, se puede mencionar: combinar las medidas de varios parámetros diferentes, extraer medidas de un conjunto, calcular correlaciones entre señales.

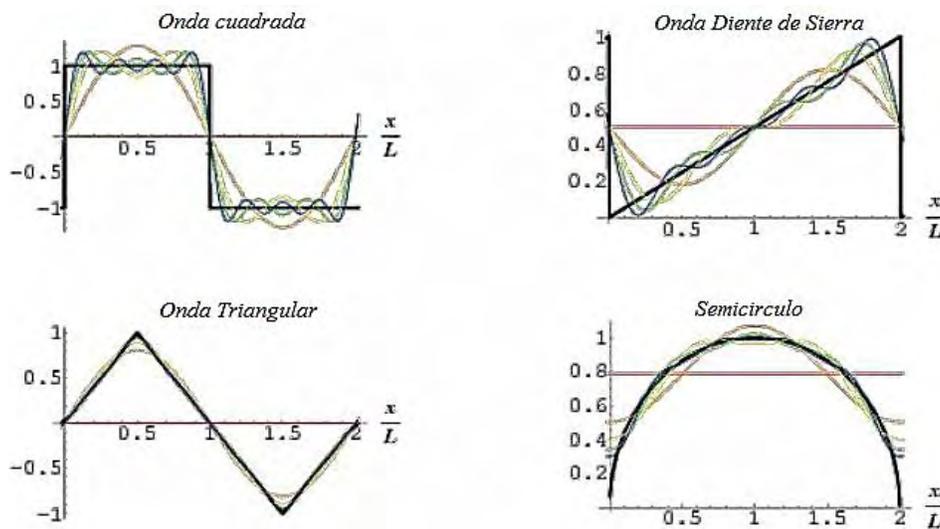


Fig. 1.5.1.5 Tipos de procesamiento de señales.

Calibración automática.

Una utilidad bastante extendida en sistemas digitales consiste en la realización de autocalibración tanto del instrumento de medición como del sensor que se lleva a cabo es de forma relativamente sencilla.

Presentaciones inteligentes.

La capacidad en cuanto a la presentación de los resultados obtenidos por el sistema digital es muy importante, pudiéndose adaptar a diferentes tipos de pantallas y organizar la presentación de datos de forma muy versátil.

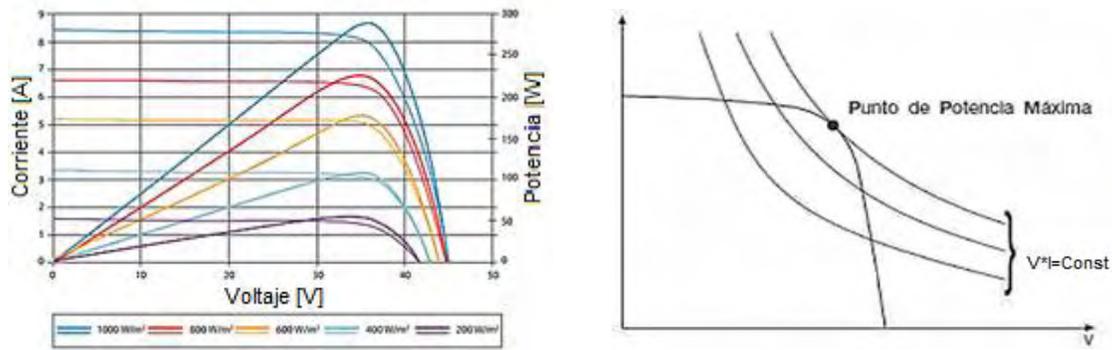


Fig. 1.5.1.6 Tipos de representación de información.

Flexibilidad en el diseño y manipulación del sistema de medida.

Los microcontroladores combinan una unidad de procesado, varios tipos y tamaños de memoria, un reloj oscilador, distintas opciones de entrada/salida (E/S), todo en un mismo chip.

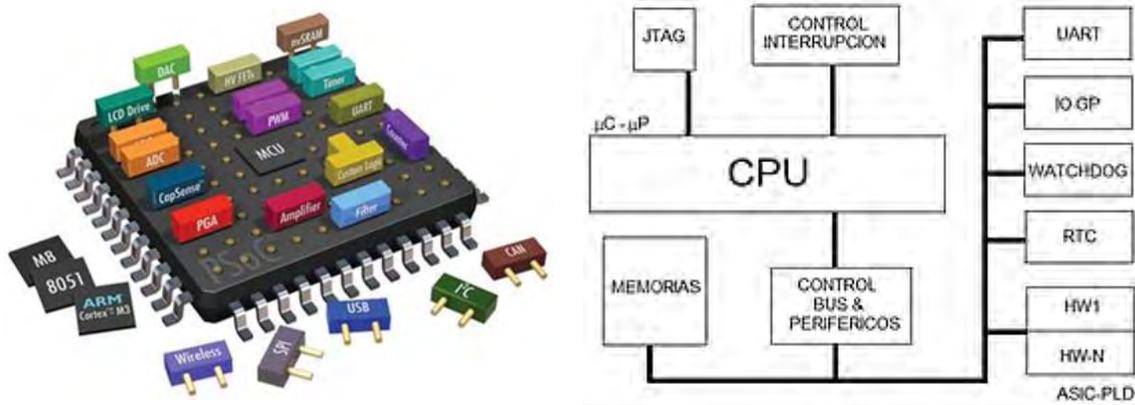


Fig. 1.5.1.7 Representación de un sistema embebido.

Esto proporciona flexibilidad para la confección de numerosos sistemas embebidos, así como sistemas de adquisición de datos, lo que hace disminuir el costo de otros sistemas que requerirían otro tipo de componentes para construir la misma solución.

Facilidad en la transmisión de señales y en el control remoto.

Los microcontroladores suelen incorporar módulos para el control de las comunicaciones con dispositivos externos. Esto permite una mayor facilidad en el tratamiento de las comunicaciones, sin necesidad de usar otros elementos externos. Típicamente, suelen incluir interfaces para comunicaciones SPI (Serial Peripheral Interface) e I²C (Inter-Integrated Circuit).

Campo de aplicación.

El campo de aplicación de la instrumentación electrónica se considera principalmente en los procesos industriales y en la investigación y desarrollo tecnológico y las ventajas que representa son principalmente económicas:

- Mejores productos
- Menor precio de costo
- Menor tiempo de operación
- Mayor seguridad del personal y equipo
- Más información en proyectos de investigación

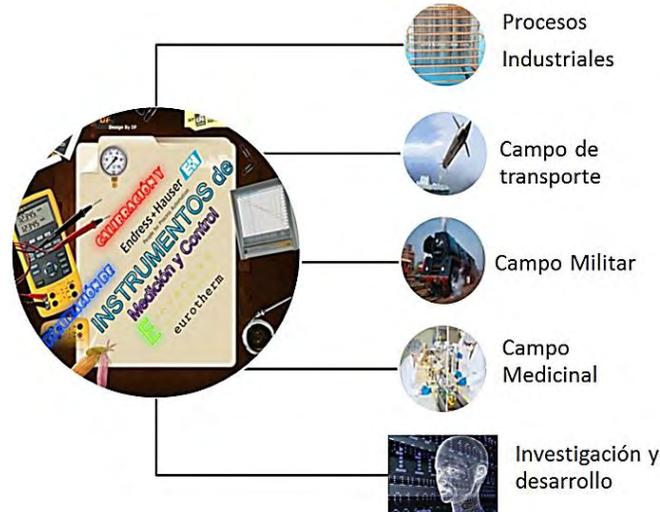


Fig. 1.5.1.8 Áreas de aplicación de instrumentación y control.

1.6 Elementos básicos y ventajas de un sistema de control

Un sistema de control está formado por subsistemas y procesos (o plantas) unidos con el fin de controlar las salidas de dichos procesos. ^[10]

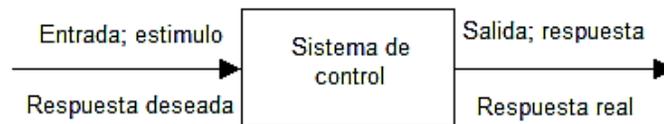


Fig. 1.6.1 Descripción simplificada de un sistema de control.

1.6.1. Sistema de control de Lazo Abierto

La característica distintiva de un sistema de control de lazo abierto es que no puede compensar ninguna perturbación que se suma a la señal de actuación del controlador (perturbación 1).

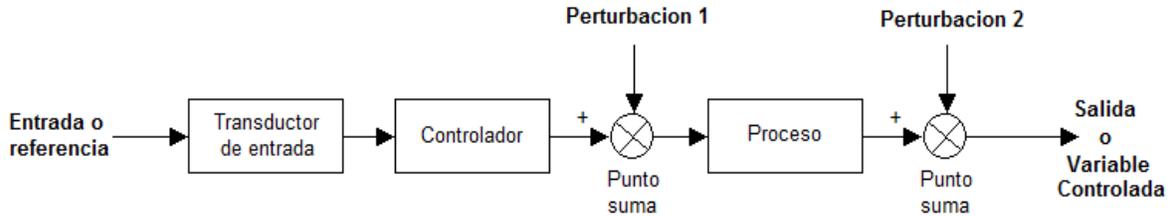


Fig. 1.6.1.1 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo abierto.

1.6.2. Sistema de control de Lazo Cerrado

El sistema en lazo cerrado compensa perturbaciones al medir la respuesta de salida, alimentando esa medida a una trayectoria de realimentación y comparando esa respuesta con la entrada en el punto suma. SI hay alguna diferencia entre las dos respuestas, el sistema acciona el proceso, por medio de una señal de actuación para hacer la corrección. Si no existe diferencia, el sistema no acciona el proceso puesto que la respuesta del proceso ya es la respuesta deseada.

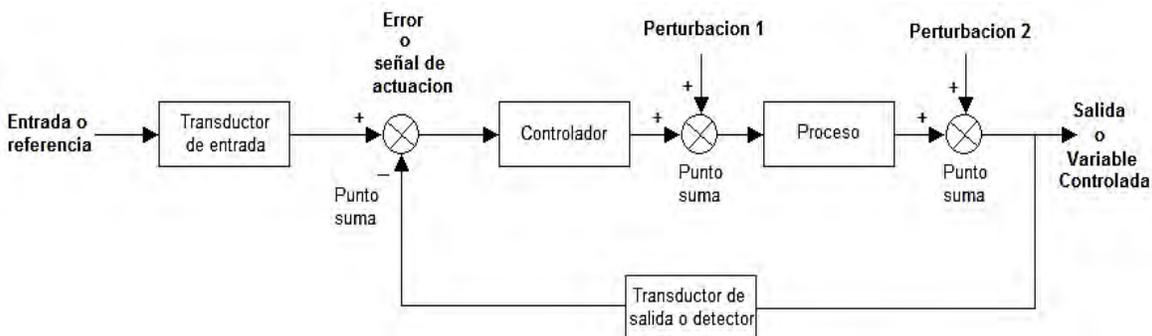


Fig. 1.6.2.1 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado.

En un sistema de control de lazo cerrado el transductor de entrada convierte la forma de entrada a la forma empleada por el controlador. Un transductor de salida, o detector, mide la respuesta de salida y la convierte también a una forma de entrada empleada por el controlador.

1.6.3. Sistemas de control de datos discretos.

En años recientes, el análisis y diseño de sistemas de control de datos discretos y digitales ha experimentado avances muy importantes. Estos sistemas han ganado mucha popularidad e importancia en la industria debido, en parte, a los progresos realizados en computadoras digitales de control, en microprocesadores y procesadores digitales de señal.

Los sistemas de control de datos discretos y digitales difieren de los sistemas continuos o analógicos en que las señales en una o más partes de ellos se encuentran en forma de trenes de pulsos o códigos numéricos. Los términos *sistemas de control de datos muestreados*, *sistemas de control de datos discretos* y *sistemas de control digital* se emplean de manera vaga e intercambiable en la literatura. ^[11]

El objetivo de un sistema de control es obtener una salida, es decir una respuesta que coincida con la que pretende el operador pero sin que intervenga directamente sobre el sistema. Para ello el operador se sirve de unas entradas, denominadas consignas o variables de control, que le permiten especificar la respuesta deseada de la planta. A partir de estas señales, el sistema de control genera las denominadas señales de mando que son las que actúan sobre el proceso con objeto de modificar la salida del proceso.

1.6.4. Sistemas controlados por computadora

En diversos sistemas modernos, el controlador (o compensador) es una computadora digital. La ventaja de usar una computadora es que muchos lazos pueden ser controlados o compensados por la misma computadora por medio de tiempo compartido. Además, en el software más que en el hardware, se pueden hacer cualquier ajuste a los parámetros compensadores necesarios para obtener una respuesta deseada.

El tipo de controlador a usar se debe decidir con base en la naturaleza del proceso y las condiciones operacionales, incluyendo consideraciones tales como seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad, precisión, peso y tamaño.

Hoy en día, los controladores se encuentran considerados en muchos de los sistemas de instrumentación virtual y programas o lenguajes computacionales con la finalidad de reducir el tamaño, costo y trabajo en el desarrollo de sistemas de medición y control. Éstos controladores se encuentran en forma de librerías, disponibles para simulación y control en tiempo real.

1.7 Descripción general de la integración hardware-software para medición y control.

El presente proyecto, como se ha mencionado con anterioridad, llevara a cabo la integración de diferentes tecnologías de generación de energía eléctrica, asimismo, llevara a cabo la medición de parámetros eléctricos para caracterizar módulos solares y celdas de combustible.

Para llevar a cabo la caracterización de celdas solares y celdas de combustible es necesaria la integración de diferentes tecnologías entre las cuales se encuentran:

- Tecnología basada en electrónica digital
- Tecnología basada en electrónica de potencia
- Tecnología basada en electrónica analógica
- Tecnología basada en electrónica microprogramable
- Tecnología basada en diseño de interfaces y software

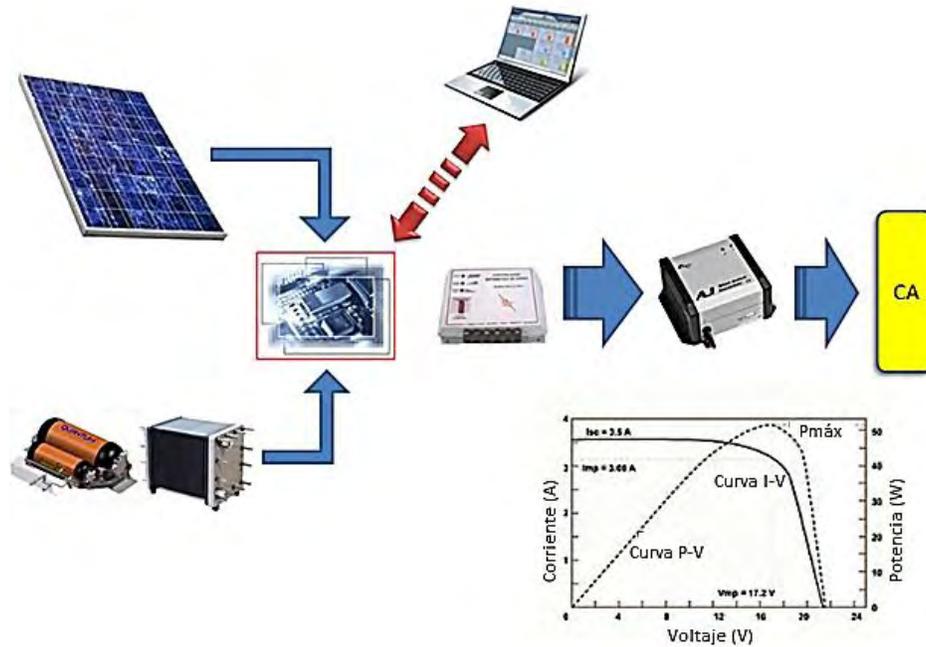


Fig. 1.7.1 Esquema general del sistema de caracterización del sistema híbrido de generación de energía basado en energía fotovoltaica y celdas de combustible.

El presente prototipo considera varias etapas y funciones entre las que se encuentra:

- Etapa de interconexión módulos solares o celdas de combustible
- Etapa de potencia
- Etapa de conexión de sensores
- Etapa de acondicionamiento de señal
- Etapa de control digital del proceso de medición
- Etapa de interfaz hacia la computadora (aquí se considera el puerto usb y el programa de control)

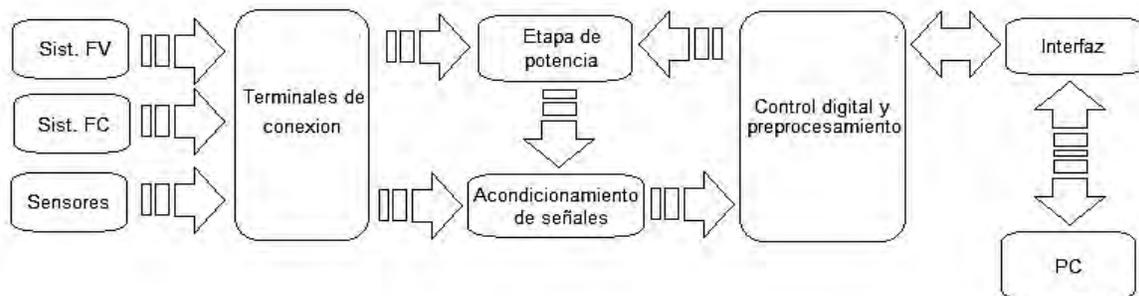


Fig. 1.7.2 Etapas por bloques del sistema de medición y control.

El presente proyecto muestra los beneficios que se pueden obtener mediante la integración de diferentes sistemas entre los que se contemplan sistemas eléctricos, electrónicos, de potencia, digitales, programación estructurada, diseño, etc., en uno solo capaz de llevar a cabo acciones especializadas para una o varias áreas determinadas de la ciencia, específicamente en la realización de sistemas de medición y control que traen como beneficio

la obtención de un mayor número de experimentos y la obtención mejores resultados en la etapa de experimentación en las diferentes áreas de la ciencia y la tecnología.

1.8 Caracterización eléctrica

La caracterización eléctrica de dispositivos implica el uso de sistemas de medición y control especializados que, interconectados entre si permiten mediante un ordenador, obtener parámetros eléctricos de las muestras a analizar sometidos a condiciones físicas variables.

El proceso que presenta este proyecto considera el uso de dispositivos electrónicos con características especiales para llevar a cabo la obtención de información mediante la medición de parámetros eléctricos en este caso de celdas solares o celdas de combustible.

La precisión en la medición es prescindible, ante lo cual, se utilizan convertidores analógico-digital (ADC) y digital-analógico (DAC) con una resolución tal que, combinada con sistemas de sofisticados de acondicionamiento de señal, brindan información confiable en tiempo real, misma que puede ser procesada, graficada y almacenada.

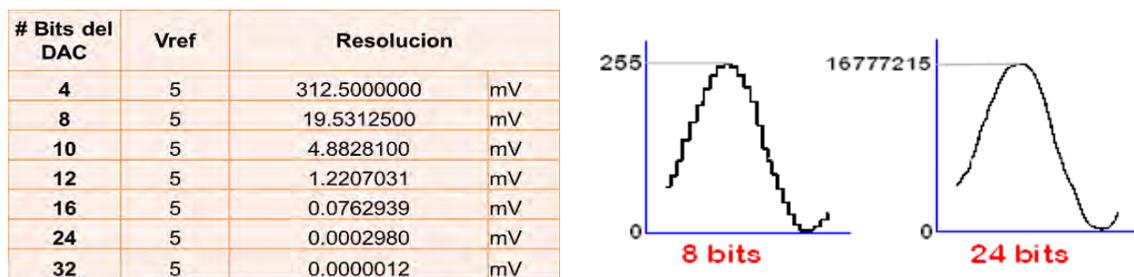


Fig. 1.8.1 El término “resolución” en sistemas digitales.

Mediante técnicas especializadas, se puede incrementar aún mas la resolucion de los sistemas de medición, algunas de ellas se consideran en éste proyecto y se explicaran en capítulos posteriores.

1.9 Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica

Mediante un dispositivo electrónico de potencia, denominado **inversor**, podemos acondicionar la potencia eléctrica obtenida del campo fotovoltaico y modificarla de manera que sea igual que la que circula por las líneas de baja tensión que alimentan nuestras viviendas, industrias y servicios. Así, al conectar la salida del inversor a la red eléctrica, se inyecta esa potencia para que pueda ser consumida que lo demande en ese momento, convirtiéndonos en productores de energía eléctrica y obteniendo unos beneficios económicos.

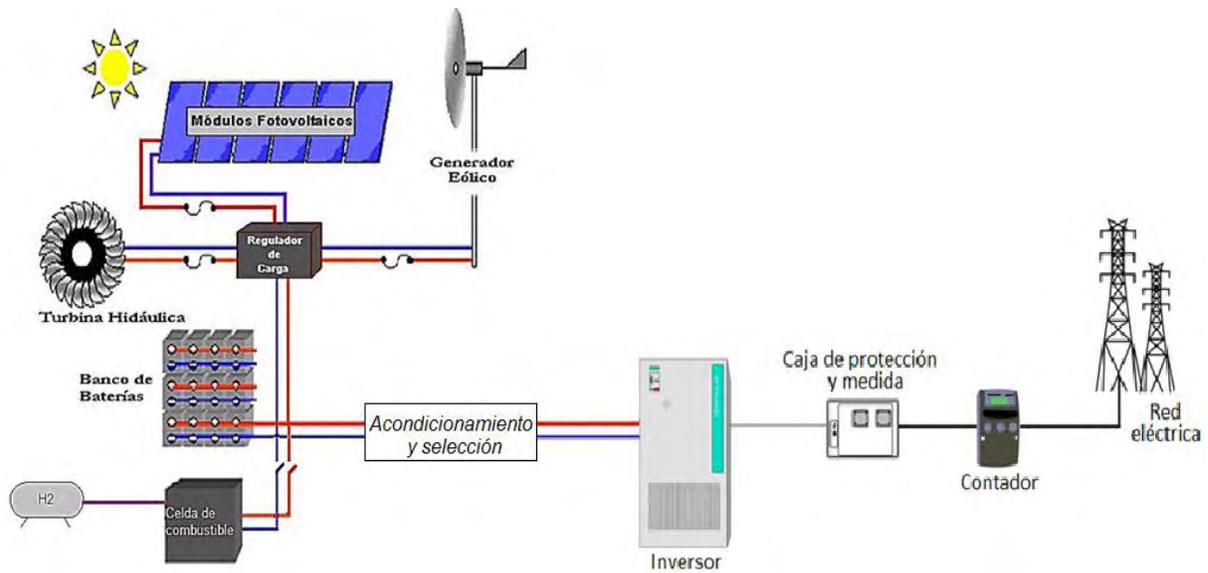


Fig. 1.9.1 Componentes de un sistema híbrido con interconexión a la red.

Para cuantificar la cantidad de energía generada se considera el uso de un contador bidireccional mediante el cual se mide la energía producida y la energía consumida y la diferencia se factura a la compañía eléctrica correspondiente. Este tipo de actividad está regulada y primada, existiendo un marco legal estable para esta actividad. Ante esto, este proyecto solo considera la caracterización de un sistema híbrido basado en tecnología fotovoltaica y celdas de combustible sin llegar al inversor.

1.10 Sistemas de adquisición de datos

En la actualidad, la mayoría de las actividades que se llevan a cabo en las diferentes áreas de procesos iniciaron primeramente a nivel laboratorio, esto es, realización de investigación en todos los ámbitos de la ingeniería ante lo cual siempre ha sido necesaria la utilización de instrumentos de medición y control.

Las nuevas tecnologías en el ámbito de la medición incluyen aparatos electrónicos tan versátiles que cuentan con interconexión a la pc por medios alámbricos e inalámbricos, utilizando diferentes tipos de comunicación entre las cuales se encuentran la comunicación paralela, comunicación serie (a través de puertos COM basados en protocolos RS232, GPIB, USB, I²C, etc.), por medios inalámbricos basados en tecnología wifi, bluetooth, infrarrojo, etc.

El proceso de adquisición de datos consiste en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en señales eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar, para ello se requiere de una etapa de acondicionamiento que adecúa la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación digital.



Fig. 1.10.1 Los sistemas modernos de medición con interfaz a la computadora.

La idea general de este proyecto es implementar un sistema electrónico de medición con interfaz a la computadora que permita llevar a cabo la recolección de información de variables físicas que intervienen en un sistema o proceso. Parte de la importancia radica en que será un sistema de medición con capacidades modificables, adaptables a cualquier proceso y con rangos de medición que abarcan la mayoría de las necesidades en los centros de investigación.

Específicamente, el sistema de medición debe ser capaz de obtener información de parámetros eléctricos y físicos a los que se encuentran las celdas solares y celdas de combustible en operación.

Capítulo 2

Conceptualización y selección de los componentes a utilizar y su función en el prototipo.

2.1. Conceptos, componentes y parámetros eléctricos a medir

Como se ha mencionado, la integración hardware-software implica el diseño de un sistema embebido, que para este caso implica la elaboración de un circuito electrónico de medición y control con interfaz a la computadora mediante un programa de control diseñado expreso para el control de la tarjeta electrónica. Los componentes y/o dispositivos electrónicos y los conceptos básicos de un sistema de medición y control son la parte esencial de este capítulo.

2.2. El proceso de medición con dispositivos electrónicos.

Es el proceso mediante el cual se lleva a cabo la comparación de una magnitud física con un patrón previamente establecido. Para el caso de mediciones eléctricas, son los métodos, cálculos y dispositivos que se llevan a cabo para determinar la cantidad de determinada magnitud.

2.2.1. Convertidores de señal analógica a digital.

Dado que en este proyecto todas las magnitudes físicas a medir son del tipo eléctricas y analógicas, es necesario contar con un dispositivo de conversión analógica a digital A/D, esto se lleva a cabo mediante el uso de un convertidor analógico-digital ADC. Para nuestro caso utilizaremos un convertidor de 10 bits de resolución. La precisión con que se obtiene la información obtenida depende directamente de la resolución del convertidor según la siguiente ecuación:

$$Resolucion = \frac{V_{ref}}{2^n} \quad Ec. 2.1$$

Donde, n = número de bits del convertidor. De modo que, mientras mayor sea el valor de n mayor resolución se tiene en la medición. De acuerdo a la siguiente tabla y considerando un voltaje de referencia (V_{ref}) de 5V (como es el caso para el convertidor considerado) se tiene:

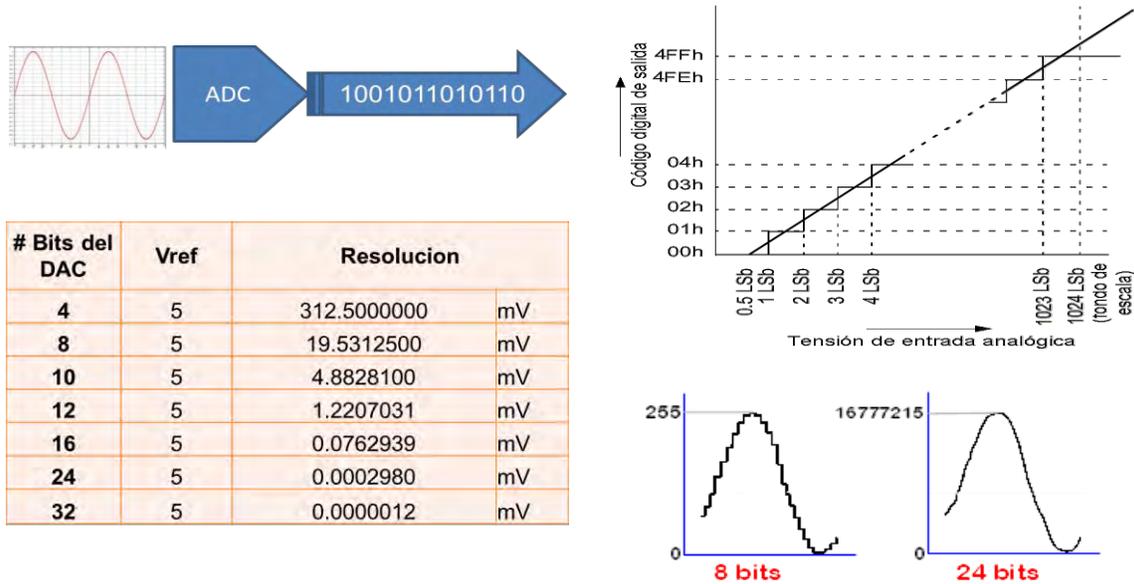


Fig. 2.2.1.1 Ilustración del termino resolución.

Para el caso de este proyecto, dado que se considera la utilización de un convertidor de 10 bits de resolución se tiene un valor mínimo de voltaje de:

$$V = \frac{V_{ref}}{2^n} = \frac{5}{2^{10}} \quad Ec. 2.2$$

Por lo que,

$$V = \frac{5}{1,024} = 0.00488 V = 4.88mV$$

Este valor de resolución permite obtener valores aceptables en cuanto a precisión dado que los voltajes que se medirán se encuentran en el rango de 0 a 500 V.

2.2.2. Sensor y transductor.

Un sensor es un dispositivo que convierte un parámetro físico a otro tipo de parámetro, ya sea físico o eléctrico. Es el elemento que se encuentra en contacto directo con la magnitud a medir. Un transductor es un dispositivo que cuenta con un sensor mediante el cual proporciona una cuantificación del parámetro físico que se desea medir, es decir, la señal (eléctrica) de salida de un transductor es proporcional a la señal de entrada.

Con la finalidad de simplificar la terminología a utilizar durante el resto de este informe, consideraremos a todos los transductores como sensores. De acuerdo al principio de funcionamiento, existen dos tipos de transductores: activos y pasivos.

Los sensores **activos** son aquellos capaces de generar su propia energía de salida. Los sensores **pasivos** son aquellos que necesitan el aporte de energía externa para su funcionamiento.

De acuerdo al tipo de señal eléctrica que generan, los sensores se clasifican en: analógicos, digitales y temporales.

Los sensores de tipo **analógico** transforman una magnitud física a una señal de salida de tipo eléctrica generalmente proporcional a la magnitud que se está midiendo. Los sensores de tipo **digital** son aquellos que brindan una señal discreta en la salida, generalmente codificada en BCD.

Los sensores **temporales** son aquellos que proporcionan a su salida señales eléctricas en las que la información está asociada al parámetro tiempo.

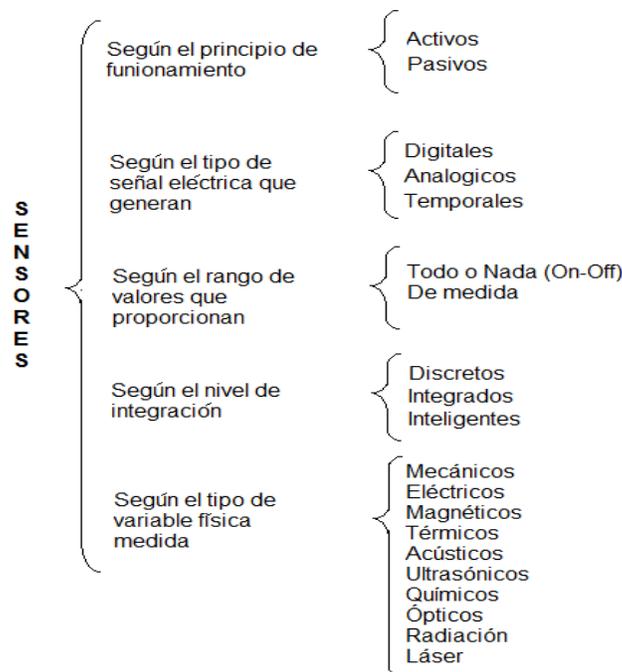


Fig. 2.2.2.1 Clasificación de sensores

De acuerdo al rango de valores que proporcionan, los sensores se clasifican en: Todo o nada y de medida. Los sensores **Todo o Nada (On-Off)**, son aquellos que solo poseen dos estados, y que, estos estados, únicamente están separados por un valor umbral de la variable monitoreada. Los sensores **de medida** son sensores analógicos proporcionan un valor de voltaje o corriente, donde la señal más común utilizada en aplicaciones industriales es un circuito de corriente de 2 hilos y 4-20 mA y voltajes de 0-10 Volts.

De acuerdo al nivel de integración, los sensores se clasifican en: discretos, integrados e inteligentes. Los sensores **discretos** son aquellos en el que el circuito de acondicionamiento se realiza mediante componentes electrónicos separados e interconectados entre sí. El sensor **integrado** es aquel en el cual el elemento sensor y el acondicionador se encuentran construidos en un único circuito integrado monolítico híbrido. El **sensor inteligente** es aquel que realiza por lo menos una de las siguientes funciones:

- Cálculos numéricos,
- Comunicación en red,
- Autocalibración y autodiagnóstico,
- Múltiples medidas con identificación

2.3. Componentes y parámetros a medir.

En un sistema híbrido basado en tecnología fotovoltaica y celda de combustible, los parámetros eléctricos a medir para poder caracterizar eléctricamente la eficiencia del sistema son los siguientes:

En el módulo fotovoltaico:

- Voltaje desde el circuito abierto hasta el corto circuito
- Corriente desde el circuito abierto hasta el corto circuito
- Potencia desde el circuito abierto hasta el corto circuito
- Temperatura
- Irradiancia

En la celda de combustible:

- Potencial
- Corriente
- Temperatura
- Humedad

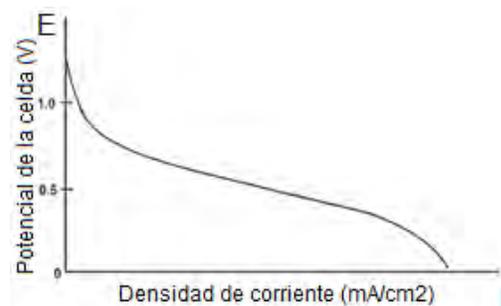
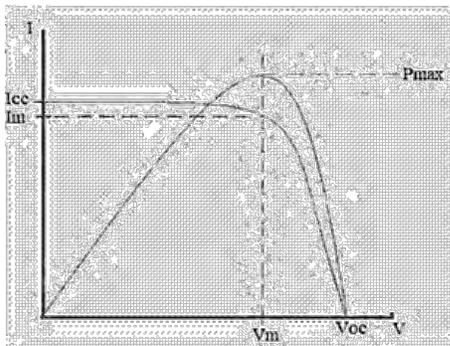


Fig. 2.3.1 Parámetros eléctricos de una celda fotovoltaica y de una celda de combustible.

Corriente de cortocircuito (I_{cc} notación española, I_{sc} notación internacional): es la máxima corriente que producirá el dispositivo bajo unas condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondientes a un voltaje igual a cero.

Voltaje de circuito abierto (V_{ca} notación española, V_{oc} notación internacional): Es el máximo voltaje del dispositivo bajo ciertas condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondientes a una corriente igual a cero.

Potencia máxima (P_{max}): Es la máxima potencia que producirá el dispositivo en condiciones determinadas de iluminación y temperatura, correspondiente al par máximo corriente voltaje (I-V).

Corriente en el punto de máxima potencia (I_{pmp}): Es el valor de la corriente para P_{max} en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura. En este proyecto denominaremos a esta corriente como I_m .

Voltaje en el punto de máxima potencia (V_{pmp}): Es el valor de voltaje para P_{max} en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura. En este proyecto denominaremos a esta corriente como V_m .

Factor de forma (F.F.): Es el valor correspondiente al cociente entre P_{max} y el producto de I_{sc} x V_{oc} . Puede venir expresado en tanto por ciento o tanto por 1, siendo el valor 100% el que corresponderá a un hipotético perfil de cuadrado, no real.

$$F. F. = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad Ec. 2.3$$

Nos da una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico, siendo éste tanto mejor cuánto más alto sea su factor de forma.

Eficiencia (η): Es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida por un panel, cuando una celda solar está conectada a un circuito eléctrico. Este término se calcula usando la relación del punto de potencia máxima, $P_{m\acute{a}x}$, dividido entre la luz que llega a la celda, irradiancia (G , en W/m^2), bajo condiciones estándar de prueba (STC) y el área superficial de la celda solar (A_c en m^2).

$$\eta = \frac{P_m}{G * A_c} \quad Ec. 2.4$$

2.3.1 Medición de voltaje

Para llevar a cabo la medición de voltaje se toma en cuenta primeramente el rango de voltajes a medir, esto es debido a que los paneles solares a caracterizar pueden ser de diferentes capacidades, marcas, número de celdas, etc. En este proyecto, la manera de medir el voltaje del módulo fotovoltaico o de celda de combustible es mediante la realización de un divisor de tensión a base de resistencias eléctricas. Una característica importante a considerar en la selección de las resistencias es la tolerancia que estas presentan en su valor óhmico.

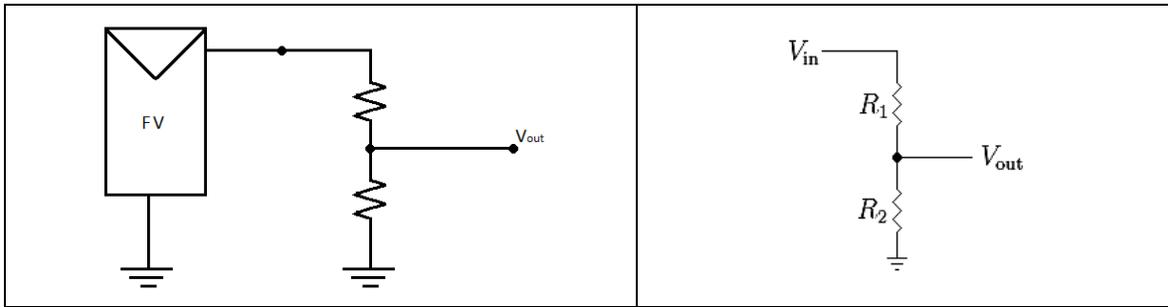


Fig. 2.3.1.1 Módulo FV con divisor de voltaje.

De la figura anterior se tiene:

$$V_{out} = I * R_2 \quad \text{Ec. 2.5}$$

desglosando,

$$I = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} \quad \text{Ec. 2.6}$$

finalmente,

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \right) \quad \text{Ec. 2.7}$$

Con este sistema de medición se pretende medir paneles de hasta 500V en corriente directa, y dado que la etapa de conversión de señal soporta solamente 5V, se acondiciona la señal de entrada utilizando un divisor de tensión.

Aunado a esto, para acondicionar de una manera más efectiva la señal de voltaje de entrada a la etapa de conversión de señal, se ha optado por utilizar un amplificador operacional en su configuración de seguidor de voltaje. Seguidor de voltaje, es aquel circuito que proporciona a la salida la misma tensión que a la entrada pero con más corriente, lo que permite reducir las pérdidas por caída de tensión.



Fig. 2.3.1.2 Amplificador operacional (a) Símbolo y partes constitutivas; (b) Configuración del amplificador operacional como seguidor de voltaje.

Entre las características más importantes aplicadas en este proyecto se encuentran las siguientes:

- Se usa como un buffer, para eliminar efectos de carga o para adaptar impedancias (conectar un dispositivo con gran impedancia a otro con baja impedancia y viceversa)
- Como la tensión en las dos patillas de entradas es igual: $V_{out} = V_{in}$
- Tiene una impedancia de entrada infinita: $Z_{in} = \infty$

Presenta la ventaja de que la impedancia de entrada es muy grande, la de salida prácticamente nula, y puede ser útil para medir la tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña que no afecte apenas a la medición.

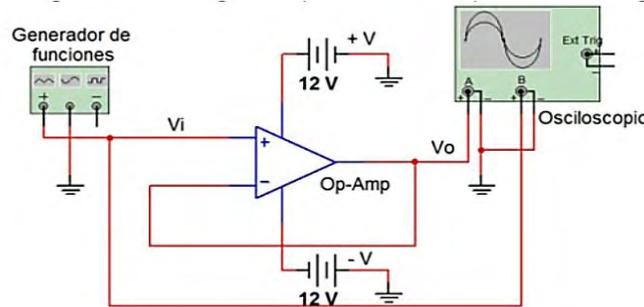


Fig. 2.3.1.3 Conexión del amplificador operacional como seguidor de voltaje.

Como se ha mencionado con anterioridad, se contempla la función de auto-rango, lo cual se lleva a cabo utilizando un relevador electromagnético que se presentara en un punto posterior.

2.3.2 Medición de corriente

La corriente eléctrica (I) que proporcionan los módulos fotovoltaicos y las celdas de combustible es un parámetro muy importante para llevar a cabo una adecuada caracterización eléctrica. El modo usual para medir la corriente en los sistemas fotovoltaicos o celdas de combustible es el que se muestra en la siguiente figura.

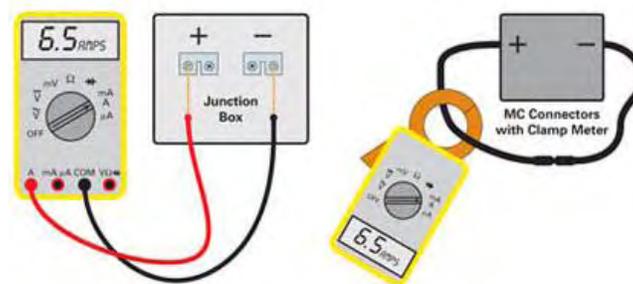


Fig. 2.3.2.1 Modo usual de medición de la corriente de corto circuito de un panel solar.

Una tarea de este proyecto es que lleve a cabo la medición de corriente de manera automática, para ello, se ha considerado la utilización de un sensor cuyas características permitan la obtención del valor de la corriente con cierto grado de precisión.

El sensor utilizado para llevar a cabo la medición de corriente es el ACS712, que nos permite tener un voltaje de salida proporcional a la corriente.

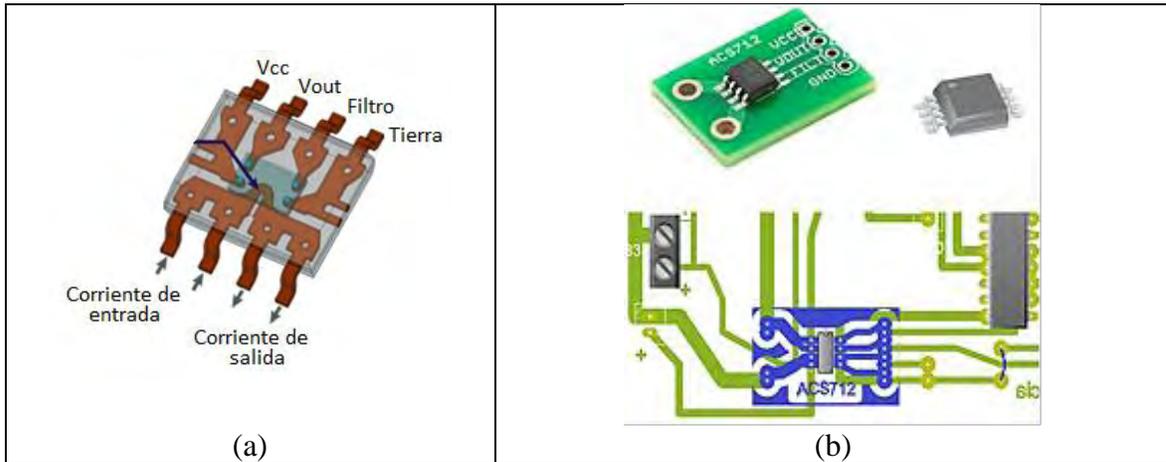


Fig. 2.3.2.2 (a) Configuración de pines del sensor de corriente ACS712; (b) forma y encapsulado 8 LEAD SOIC Suffix LC e integración en el circuito impreso.

El ACS712 es un sensor de corriente de la empresa Allegro Microsystems teóricamente basado en efecto Hall (usa el campo magnético de la corriente a sensar) que entrega un voltaje lineal proporcional a la corriente que fluye a través de sus terminales.

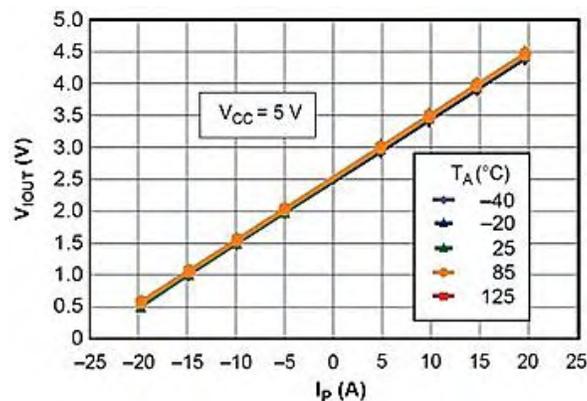


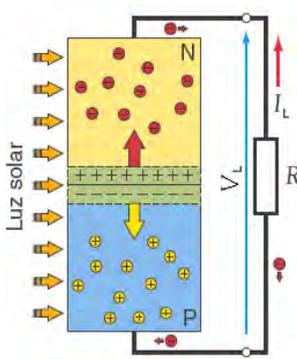
Fig. 2.3.2.3 Comportamiento del sensor ACS712 con respecto a la temperatura

El comportamiento térmico del sensor ACS712 ante la cantidad de corriente que mide lo hace un dispositivo ideal para este tipo de aplicaciones en las que el incremento de temperatura es un factor latente.

Dado que el diseño del circuito impreso es parte esencial de este proyecto, el ancho de las pistas en la tarjeta tienen la capacidad de soportar sin problema corrientes del doble máximo permitido por el sensor.

2.3.3 Cálculo de potencia, factor de forma y eficiencia

Entre los parámetros que se desean conocer de un módulo sea fotovoltaico o de celda de combustible, el más importante es sin duda el valor de la potencia eléctrica ya que con base a este valor se dimensionan los diferentes dispositivos. La potencia máxima que entrega el dispositivo en determinadas condiciones de irradiancia y temperatura corresponde al par máximo I-V.



R : Resistencia del receptor [Ω]
 I_L : Intensidad de corriente suministrada por la celda [A]
 V_L : Tensión en el receptor conectado a la celda [V]

Fig. 2.3.3.1 Celda solar conectada a un receptor.

$$V_L = I_L * R \tag{Ec. 2.8}$$

La siguiente figura representa las características I-V y P-V de una celda solar con irradiancia y temperatura constantes. Sobre la característica I-V se sitúa el punto de trabajo de la celda, por ejemplo el punto B, donde la corriente aportada por la celda I_L y la resistencia R del receptor, fijan el valor de la tensión V_L , de acuerdo con la ley de Ohm. Es importante resaltar que es el valor de esta resistencia R y el valor de la corriente de la celda I_L los que imponen el punto de trabajo de dicha celda.

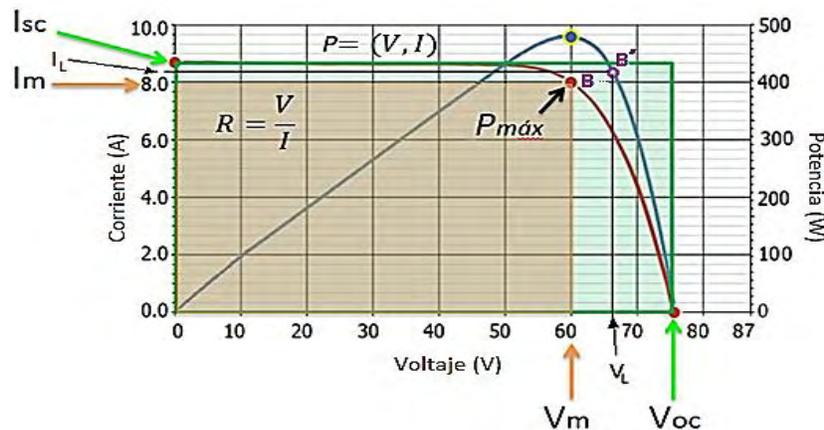


Fig. 2.3.3.2 Características I-V y P-V de una celda solar

Para el punto de acoplamiento de la carga L, se tiene:

$$P_L = V_L * I_L \tag{Ec. 2.9}$$

P_L : Potencia entregada por la celda [W]

V_L : Tensión en el receptor conectado a la celda [V]

I_L : Intensidad de corriente entregada por la celda [A]

La potencia P_L entregada por la celda se representa en la característica P-V por el punto B'.

La **potencia máxima** $P_{m\acute{a}x}$ es el punto de la característica I-V en el que la potencia entregada por la celda es máxima. Este punto, representado por A en la figura 2.3.3.2, tiene su correspondiente punto A' en la característica P-V de la celda. Se cumple que:

$$P_{max} = V_{mpp} * I_{mpp} \quad Ec. 2.10$$

P_{max} : Potencia máxima de la celda [W]

V_{mpp} : Voltaje a máxima potencia [V]

I_{mpp} : Corriente a máxima potencia [A]

Este producto es la potencia máxima que la celda es capaz de suministrar a un receptor, está representado en la figura 2.3.3.2 por el área del rectángulo con vértice en P_{max} y siempre es inferior al área del rectángulo representado por la corriente de cortocircuito I_{sc} y la tensión de circuito abierto V_{oc} . El cociente entre ambas áreas se denomina factor de forma (FF).

El **factor de forma FF** siempre es inferior a la unidad. Es un indicador de la calidad de la celda que será mejor cuanto más cerca esté FF de la unidad. También es llamado factor de relleno.

$$F.F. = \frac{V_{mpp} * I_{mpp}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad Ec. 2.11$$

Donde,

FF : Factor de forma (adimensional)

P_{max} : Potencia máxima [W]

I_{sc} : Corriente de corto circuito [A]

V_{oc} : Voltaje a circuito abierto [V]

En este proyecto, la medición de la potencia y el Factor de Forma se llevan a cabo de manera indirecta, esto es, tomando como base los datos obtenidos de Voltaje y Corriente se aplican las formulas correspondientes.

La **eficiencia η** , también denominada rendimiento de conversión, indica el porcentaje de energía solar recibida sobre la superficie de la celda que se convierte en energía eléctrica. Se calcula con el cociente entre la potencia eléctrica máxima, $P_{m\acute{a}x}$, y el producto del área superficial de la celda, A_c , por la irradiancia incidente G en condiciones estándar de medida (CEM):

$$\eta = \frac{P_{max}}{G * A_c} * 100 \quad Ec. 2.12$$

η : Eficiencia o rendimiento de conversión

$P_{m\acute{a}x}$: Potencia máxima [W]

G : Irradiancia en condiciones estándares de medida CEM (1000 W/m²)

A_c : Área superficial de la celda

La eficiencia es el parámetro más común para comparar el rendimiento de una celda solar con otra. La eficiencia de conversión se define como el cociente entre la potencia de salida que suministra la celda y la potencia de la radiación que la misma absorbe., esto es:

$$\eta = \frac{I_m * V_m}{P_{in}} = \frac{I_{sc} * V_{oc}}{P_{in}} * F.F. \quad \text{Ec. 2.13}$$

La potencia máxima especificada en condiciones estándar de medida (STC, Standard Test Conditions) también se denomina **potencia pico** de la celda.

2.3.4 Medición de temperatura

Influencia de la temperatura en celdas fotovoltaicas.

Las condiciones de funcionamiento de una celda solar en aplicaciones terrestres son variables, con valores de irradiancia que normalmente van de 0 a 1,000 W/m² y soportando temperaturas de trabajo que pueden alcanzar 50°C por encima de la temperatura ambiente, por lo que es importante conocer cómo afectan estas condiciones de trabajo al comportamiento de la celda solar.

La figura 2.3.4.1 (a) muestra el efecto de la temperatura de la celda sobre la característica I–V. Se puede ver que la tensión de circuito abierto disminuye considerablemente cuando aumenta la temperatura. La intensidad de cortocircuito aumenta cuando se incrementa la temperatura, aunque la variación es muy pequeña y a efectos prácticos se considera constante. Es evidente que si la tensión de la celda disminuye cuando aumenta la temperatura y la intensidad prácticamente se mantiene constante, la potencia entregada por la celda, producto de la tensión por la intensidad, disminuirá cuando aumente la temperatura.

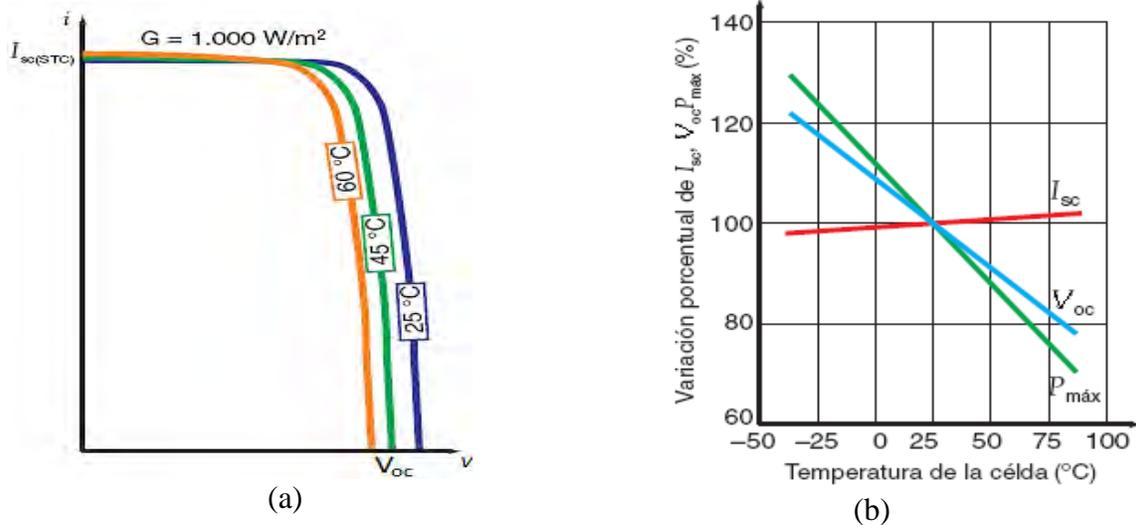


Fig. 2.3.4.1 (a) Característica I-V de una celda FV en función de la temperatura; (b) Variación porcentual del voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de corto circuito (I_{sc}) y la potencia máxima ($P_{m\acute{a}x}$) de la celda FV con respecto a la temperatura.

La figura 2.3.4.1 (b) muestra la variación porcentual con la temperatura de la tensión de circuito abierto, la intensidad de cortocircuito y la potencia máxima de una celda solar. Se aprecia que la potencia máxima es inferior al 90 % con temperaturas de la celda próximas a 50°C, valor que se puede alcanzar con una temperatura ambiente de 30°C. La temperatura de una celda, que forma parte de un módulo fotovoltaico, alcanza unos 20°C por encima de la temperatura ambiente, pero en condiciones de mala disipación del calor, como las que se dan cuando los módulos que contienen las celdas se integran en fachadas, la temperatura de la celda puede alcanzar valores superiores a 75°C que reduce la potencia por debajo del 80%.

La temperatura de trabajo de una celda solar depende de la temperatura ambiente y de la irradiancia. Aproximadamente se calcula con la fórmula:

$$T_c = T_a + G \cdot \frac{T_{ONC} - 20}{800} \tag{Ec. 2.14}$$

T_c : Temperatura de trabajo de la celda [°C]

T_a : Temperatura ambiente [°C]

T_{ONC} : Temperatura de operación nominal de la celda [°C]

G : Irradiancia [W/m^2]

El valor de la temperatura de operación nominal de la celda (T_{ONC}) es un parámetro que se obtiene de las hojas de características de los módulos fotovoltaicos, toma valores que van de 43 a 49°C y si no se dispone de él se puede tomar 45°C como un valor razonable.

Influencia de la temperatura en celdas de combustible.

Hay dos características que impactan en las celdas de combustible y son: temperatura de operación y tiempo de vida, las cuales influyen en el comportamiento de la celda y en las

propiedades fisicoquímicas y termomecánicas de todos los materiales usados (electrodos, electrolitos, interconexiones, colectores de corriente).

En lo que respecta a la temperatura de operación de una celda de combustible, es considerada como uno de los factores físicos de vital importancia, ya que repercute en el tipo de combustible que puede emplearse, por ejemplo, en las celdas de baja temperatura con electrolitos acuosos, el combustible que predomina es el hidrógeno, en cambio en las celdas de alta temperatura existe más diversidad en el uso de combustibles, esto fundamentalmente se debe a que se pueden emplear debido a su inherente rapidez en la cinética de reacción y a una menor necesidad de actividad catalizadora en reacciones a altas temperaturas.

La celda de combustible que se trabajara en este proyecto es una celda de intercambio protónico, cuya temperatura de trabajo es de 50 a 80 °C.

2.3.5 Medición de Irradiancia

Las condiciones de funcionamiento de una celda solar en aplicaciones terrestres son variables, con valores de irradiancia que normalmente van de 0 a 1,000 W/m² y soportando temperaturas de trabajo que pueden alcanzar 50°C por encima de la temperatura ambiente. Es importante conocer cómo afecta esta condición de trabajo al comportamiento de la celda solar.

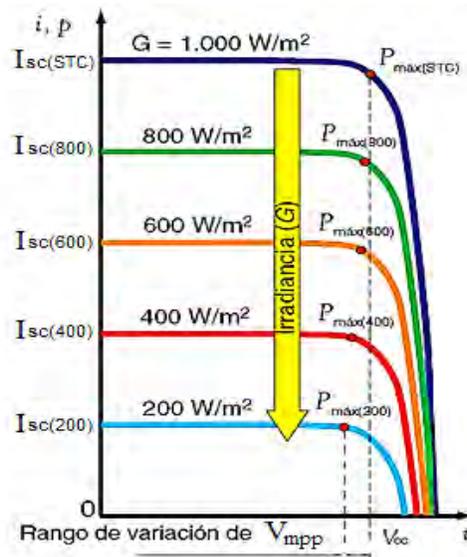


Fig. 2.3.5.1 Característica I-V de una celda solar en función de la irradiancia.

La figura 2.3.5.1 muestra el efecto de la irradiancia en la característica I-V de una celda solar. Como se puede ver, la intensidad de cortocircuito I_{sc} , varía con la irradiancia, siendo esta variación lineal, de acuerdo con la expresión:

$$I_{sc(G)} = G \cdot \frac{I_{sc(STC)}}{1,000} \quad \text{Ec. 2.15}$$

donde,

$I_{sc(G)}$: Corriente de corto circuito para una irradiancia G [A]

$I_{sc(STC)}$: Corriente de corto circuito en condiciones STC [A]

G : Irradiancia [W/m^2]

La tensión de circuito abierto V_{oc} , varía muy poco con la irradiancia, como se puede ver en la figura 2.3.5.1, los valores de V_{oc} para diferentes irradiancias se agrupan en una zona muy pequeña sobre el eje de abscisas, por lo tanto, a efectos prácticos, se puede considerar como constante. La potencia eléctrica de una celda solar será mayor o menor en función de la irradiancia de la radiación solar. La figura 2.3.5.1 tiene marcados los puntos de funcionamiento de máxima potencia, $P_{máx}$, para cada valor de irradiancia.



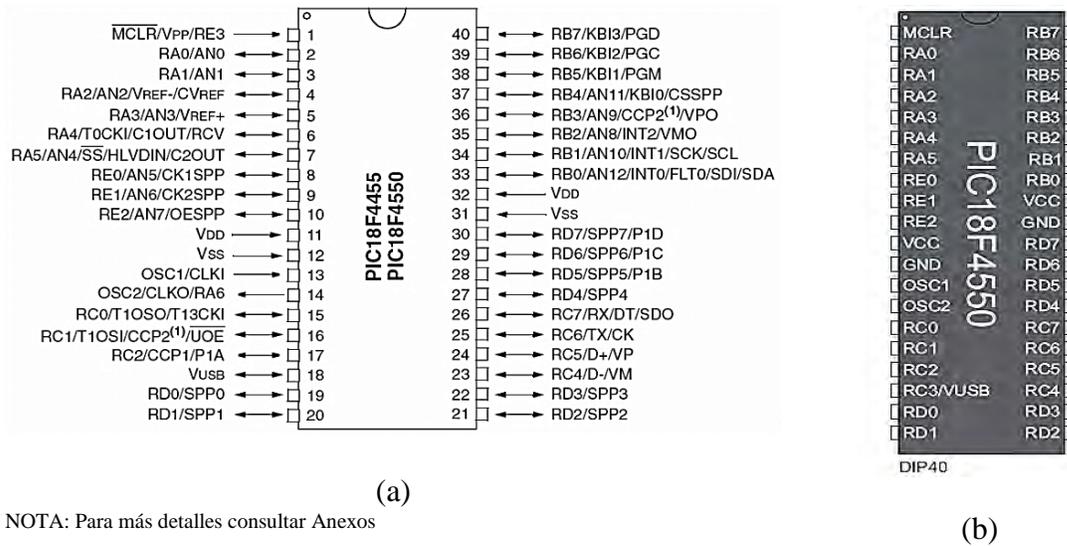
Fig. 2.3.5.2 Instrumentos para medir la irradiancia.

Para el caso de medición de la irradiancia, se ha considerado la versatilidad del sistema de medición de poder instalar cualquier tipo de sensor de irradiancia, una celda calibrada o un piranómetro, esto se considera en el programa de control del sistema de medición introduciendo únicamente el valor de la constante del instrumento a una irradiancia de un sol, es decir, $1,000 W/m^2$.

2.4. El microcontrolador PIC18F4550 como interface entre el ordenador y el prototipo de medición.

Para llevar a cabo el control del proceso de medición y la comunicación entre el sistema de medición y la computadora se considera un microcontrolador del tipo PIC18F4550, cuyas cualidades más importantes permiten tener las siguientes prestaciones:

- Puertos de E/S Digitales configurables
- Puerto de Entradas analógicas
- Protocolo de comunicación I²C, SPI, RS232,
- Protocolo de comunicación USB
- Módulo convertidor Analógico - Digital (A/D) de 10 bits



NOTA: Para más detalles consultar Anexos

Fig. 2.4.1 Microcontrolador PIC 18F4550, (a) Configuración de pines; (b) Vista superior

Unos de los aspectos importantes que se debe tener en cuenta al programar el microcontrolador son los fusibles, en los que entre otras cosas se define la velocidad de trabajo del PIC.

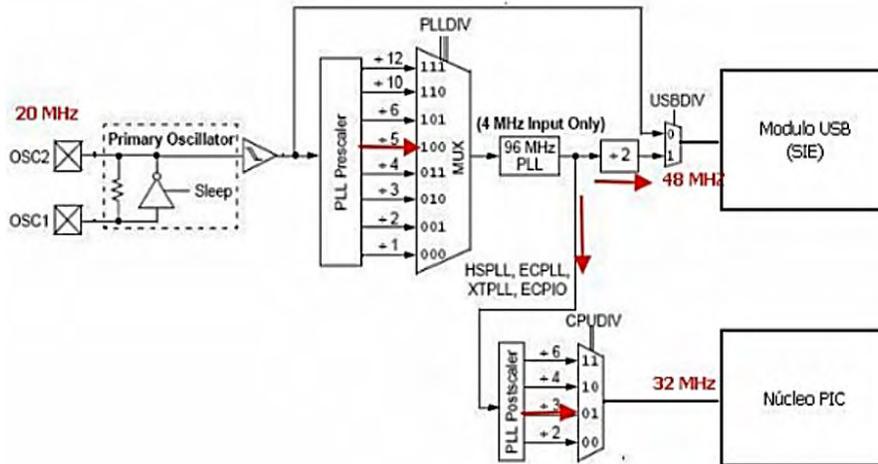


Fig. 2.4.2 Esquema de bloques internos del microcontrolador.

Una característica que es necesario considerar en un PIC con interfaz USB, es que para que dicho módulo funcione la frecuencia de reloj en la entrada de dicho módulo debe de ser de 48 MHz, para conseguir dicha frecuencia se dispone de un multiplicador con pre-escalador y post-escalador. A la entrada del multiplicador se debe tener una frecuencia fija de 4 MHz. En la figura de abajo se muestra como configurar el pre-escalador del PLL cuando en nuestro circuito tenemos un cristal de 20 MHz.

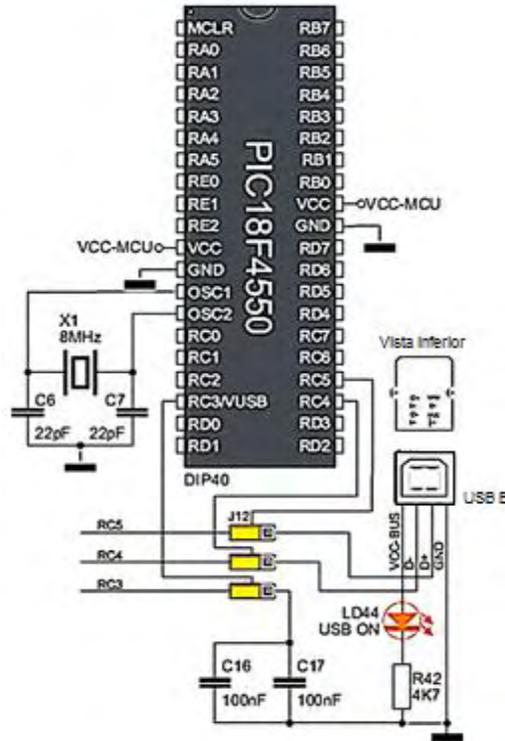
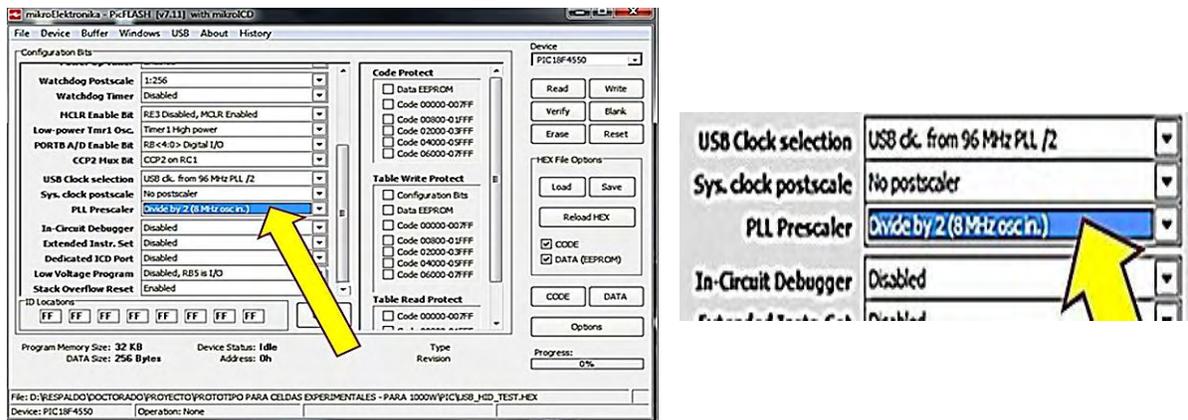


Fig. 2.4.3 Modo de conexión del microcontrolador PIC18F4550

Como se ve en la figura 2.4.2, en este caso el pre-escalador divide los 20 MHz por 5 para obtener los 4MHz requeridos a la entrada del PLL, este a su vez produce 96 MHz en su salida los cuales se distribuyen por un lado al módulo USB, dividiendo previamente la frecuencia por 2 para obtener los 48 Mz a la entrada del módulo por el otro lado alimenta el post-divisor del PLL, para poder elegir la frecuencia de trabajo del núcleo del micro, en este caso divide por tres por lo que se tiene 32 MHz para alimentar al "core" del PIC.



2.4.4 Configuración del pre-escalador dependiendo del cristal utilizado.

Para el caso particular de este proyecto, el cristal utilizado es de 8MHz, por lo que, para cargar el programa al microcontrolador mediante el software correspondiente (PicFLASH), el PLL Prescaler se configura en modo de divisor entre dos (divided by 2).

Un microcontrolador es un dispositivo electrónico programable cuya función a realizar radica en el programa contenido en su memoria; existen varios métodos y software para llevar a cabo la programación de éste dispositivo por lo que en éste tema solo se mencionarán los aspectos generales y el algoritmo de las funciones a realizar.

2.4.1. Función que realiza el microcontrolador en el sistema de medición

Es el componente más importante en el sistema de medición, las funciones que lleva a cabo se enumeran a continuación:

- Permite establecer comunicación entre el ordenador (PC) y el circuito electrónico del sistema de medición mediante la interfaz USB.
- Recibe las señales provenientes de los diversos sensores (temperatura, corriente e irradiancia).
- A través de éste dispositivo se tiene el control del voltaje del convertidor D/A
- Envía señales de control hacia los diferentes actuadores del sistema de medición (relevadores).
- Realiza un preprocesamiento de información antes de enviarla al ordenador.
- Controla la ganancia de los amplificadores operacionales

2.5. El condensador como resistencia variable

En una celda solar y en una celda de combustible, los parámetros eléctricos de gran importancia son la curva I-V y E-I respectivamente. Estas curvas son una serie de pares de datos de corriente y voltaje (V,I) que denotan entre otras cosas la potencia máxima ($P=V*I$) que se puede obtener de dicha celda.

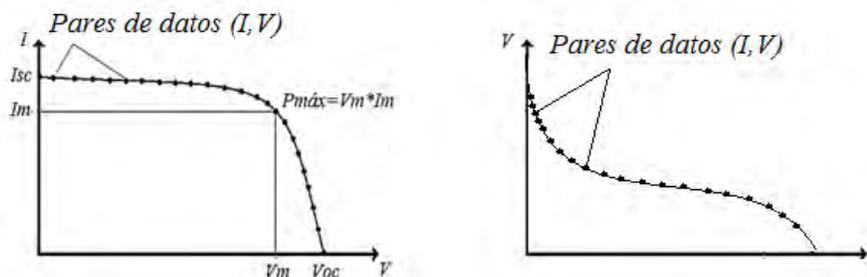


Fig. 2.5.1 Pares de datos corriente-voltaje en módulos FV y FC.

Una manera de obtener esta serie de pares de datos es variando la resistencia entre las terminales de la celda (o módulo) desde una resistencia cero hasta una resistencia infinita, o viceversa. Esto se puede realizar de diferentes formas, una de ellas es mediante el uso de un condensador o capacitor, que es un dispositivo formado por un par de conductores

generalmente separados por un material dieléctrico. Al someterlo a una diferencia de potencial V , adquiere una determinada carga. A esta propiedad se le denomina capacitancia. La capacitancia posee una unidad de medida en el Sistema Internacional (S.I.) de Farad [F], esto significa que al someter el dispositivo a una diferencia de potencial de 1 Volt adquiere una carga de 1 Coulomb. Esto equivale a una capacitancia de 1 F.

Existen diferentes tipos de capacitores de los cuales utilizaremos un tipo específico para llevar a cabo el proceso de variación de la resistencia en las terminales de una celda ya sea fotovoltaica o de combustible.

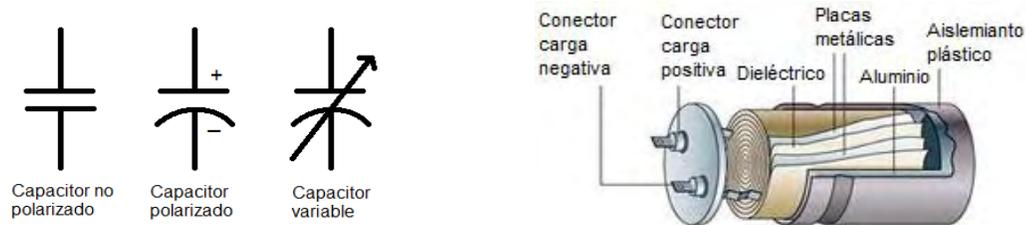


Fig. 2.5.1 Capacitor o condensador (a) Símbolo; (b) apariencia

El capacitor utilizado es del tipo electrolítico, que es un tipo de condensador que usa un líquido iónico conductor como una de sus placas. Típicamente con más capacidad por unidad de volumen que otros tipos de condensadores, son valiosos en circuitos eléctricos con relativa alta corriente y baja frecuencia.

Este capacitor se logra utilizando un dieléctrico especial. La capacidad de un capacitor tiene la siguiente fórmula:

$$C = \frac{E \cdot A}{d} \quad \text{Ec. 2.16}$$

donde:

C : Capacitancia

E : Constante dieléctrica

A : Superficie

d : Separación de las placas

El capacitor electrolítico es un elemento polarizado, por lo que sus terminales no pueden ser invertidas. Generalmente el signo de polaridad viene indicado en el cuerpo del capacitor.

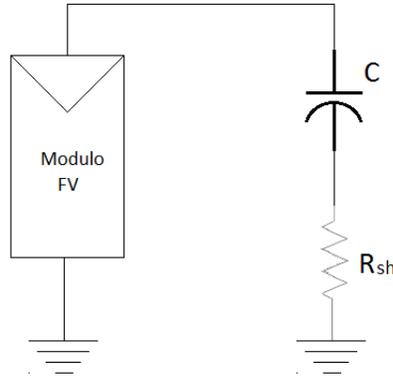


Fig. 2.5.2 Modo de conexión de capacitor para ser usado como resistencia variable.

Para llegar a la expresión que describe la carga y descarga de un condensador se enuncian las siguientes formulas básicas:

Por ley de Ohm:	Por definición de capacitancia:	Por definición de intensidad de corriente:	La constante de tiempo:
$V_R = I \cdot R$	$V_C = \frac{Q}{C}$	$I = \frac{dQ}{dt}$	$\tau = R \cdot C$

La siguiente expresión muestra la carga de un capacitor,

$$V_{(t)} = V_0 e^{-t/\tau} \quad \text{Ec. 2.17}$$

se puede considerar al circuito RC como un lazo cerrado. Posteriormente se aplica la segunda ley de Kirchhoff,

$$V_C - V_R = 0 \quad \text{Ec. 2.18}$$

ya que ΔV del capacitor actúa como fuente, y la resistencia genera una caída de potencial, se tiene:

$$V_R = V_C \quad \text{Ec. 2.19}$$

aplicando,

$$IR = \frac{Q}{C} \quad \text{Ec. 2.20}$$

se reemplaza pero con el signo negativo ya que la intensidad de corriente va disminuyendo con el tiempo:

$$-\frac{dQ}{dt} R = \frac{Q}{C} \quad \text{Ec. 2.21}$$

despejando,

$$\frac{dQ}{Q} = -\frac{dt}{RC} \quad \text{Ec. 2.22}$$

integrando los respectivos límites de integración en ambos lados,

$$\int_{Q_0}^{Q(t)} \frac{1}{Q} dQ = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt \quad \text{Ec. 2.23}$$

donde $Q(t=0) = Q_0$

$$\ln(Q(t)) - \ln(Q_0) = \ln\left(\frac{Q(t)}{Q_0}\right) = -\frac{t}{RC} \quad \text{Ec. 2.24}$$

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = e^{-t/RC} \quad \text{Ec. 2.25}$$

$$Q(t) = Q_0 e^{-t/RC} \quad \text{Ec. 2.26}$$

dividiendo entre C se tiene,

$$\frac{Q(t)}{C} = \frac{Q_0 e^{-t/RC}}{C} \quad \text{Ec. 2.27}$$

si $V_c = Q/C$,

$$V(t) = V_0 e^{-t/RC} \quad \text{Ec. 2.28}$$

Dado que $\tau = RC$, esta última expresión es igual a la expresión de la ecuación 2.20.

Debido a esto y a que los conductores eléctricos por si mismos tienen una resistencia pequeña y que solo nos interesa el tiempo de carga del capacitor, la fórmula para la carga del capacitor se puede expresar de la siguiente manera:

$$V(t) = V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad \text{Ec. 2.29}$$

Considerando la ecuación del circuito:

$$iR + \frac{q}{C} - V_m = 0 \quad \text{Ec. 2.30}$$

Si $i = dq/dt$,

$$R \frac{dq}{dt} = V_m - \frac{q}{C} \quad \text{Ec. 2.31}$$

$$\int_0^q \frac{dq}{CV_m - q} = \frac{1}{RC} \int_0^t dt \quad \text{Ec. 2.32}$$

$$q = CV_m \left(1 - e^{-t/RC}\right) \quad \text{Ec. 2.33}$$

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{V_m}{R} e^{-t/RC} \quad \text{Ec. 2.34}$$

El producto $RC = \tau$ se llama constante de tiempo o tiempo de relajación.

$$\frac{t}{RC} = 5 \quad \text{Ec. 2.35}$$

Al cabo de cinco constantes de tiempo, la función $e^{-5} = 0,0067$, solo queda un 0,6 % de I_0 y se considera que ha terminado el régimen transitorio y el circuito pasa al estado o régimen permanente (estacionario). Por tanto, para que alcance el régimen estacionario se requiere un tiempo:

$$t = 5 * R * C \text{ segundos}$$

Si R es muy pequeña, del orden de $m\Omega$, el termino $R*C$ es muy pequeño.

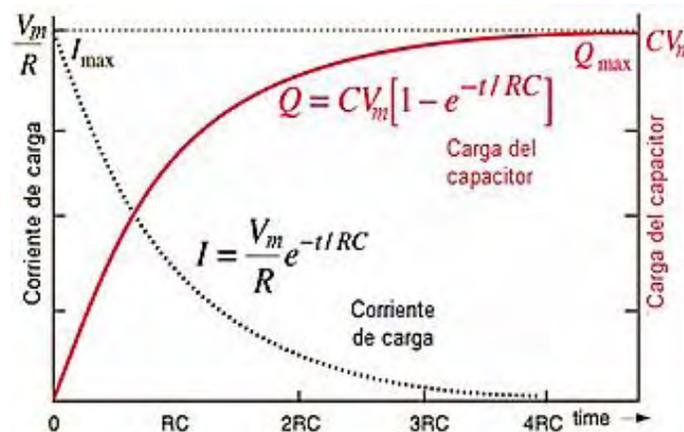


Fig. 2.5.3 Comportamiento de la carga del capacitor.

Es importante mencionar que, se realizó un diseño de sistema de medición a base de capacitor y otro a base del mosfet como resistencia variable de los cuales. Para el caso de capacitor como resistencia variable se tiene que es necesario calcular el tiempo de barrido de la curva para diferentes condiciones de sol, el tiempo de barrido depende del valor del capacitor, de V_{oc} y de I_{sc} , por este motivo el tiempo de barrido no es fijo, si no que se calcula antes de cada muestreo de curva.

El valor del capacitor requerido por el sistema se obtiene a través de:

$$V_{oc} = \frac{I_{sc}}{C} * T_{barrido} \tag{Ec. 2.36}$$

de la ecuación 2.35, se obtiene:

$$C = \frac{I_{sc}}{V_{oc}} * T_{barrido} \tag{Ec. 2.37}$$

La ecuación 2.36 indica que, para cada módulo es necesario el cálculo de un capacitor específico por lo que, con base a los resultados y prestaciones presentadas por cada uno de ellos, se optó por considerar a el mosfet como resistencia variable para el diseño del sistema de medición.

2.6. El relevador como medio de conmutación.

El relé o relevador es un dispositivo electromecánico que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.

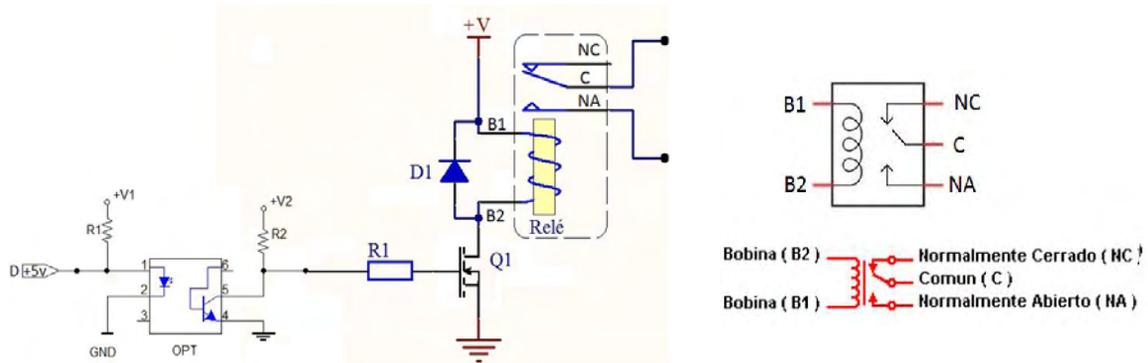


Fig. 2.6.1 Relevador electromagnético, (a) Circuito de control digital; (b) Partes que lo integran.

En el presente sistema de medición se ha considerado la utilización de tres relevadores para la realización de las siguientes funciones:

- Selección del tipo de tecnología a caracterizar, puede ser fotovoltaica o celda de combustible
- Selección automática de rango de medición de voltaje.
- Realización de un corto circuito en las terminales del capacitor para provocar la descarga del capacitor al utilizar un capacitor como resistencia variable.

De acuerdo al primer y segundo caso, para activar el relevador se utiliza un mosfet.

En la figura anterior, se muestra la forma en que se lleva a cabo el encendido y apagado del relevador utilizando un transistor MOSFET de canal N. Para la función de selección de tecnología a analizar y la función de auto-rango del sistema de medición. Se considera un relevador de 12V @ 10A.

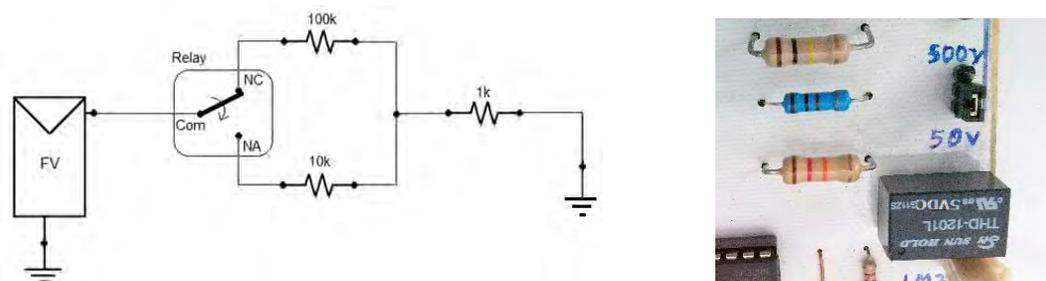


Fig. 2.6.2 Sistema de control para función auto-rango en el sistema de medición.

A diferencia de los transistores bipolares, los MOSFET's son dispositivos que se activan por voltaje, no con corriente. En este proyecto, una de las funciones que realizan el mosfet es la de interruptor electrónico accionado por voltaje.

La función de auto-rango como la mayoría de las funciones que se llevan a cabo dentro de este sistema de medición y control, están comandadas por el programa de control como se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

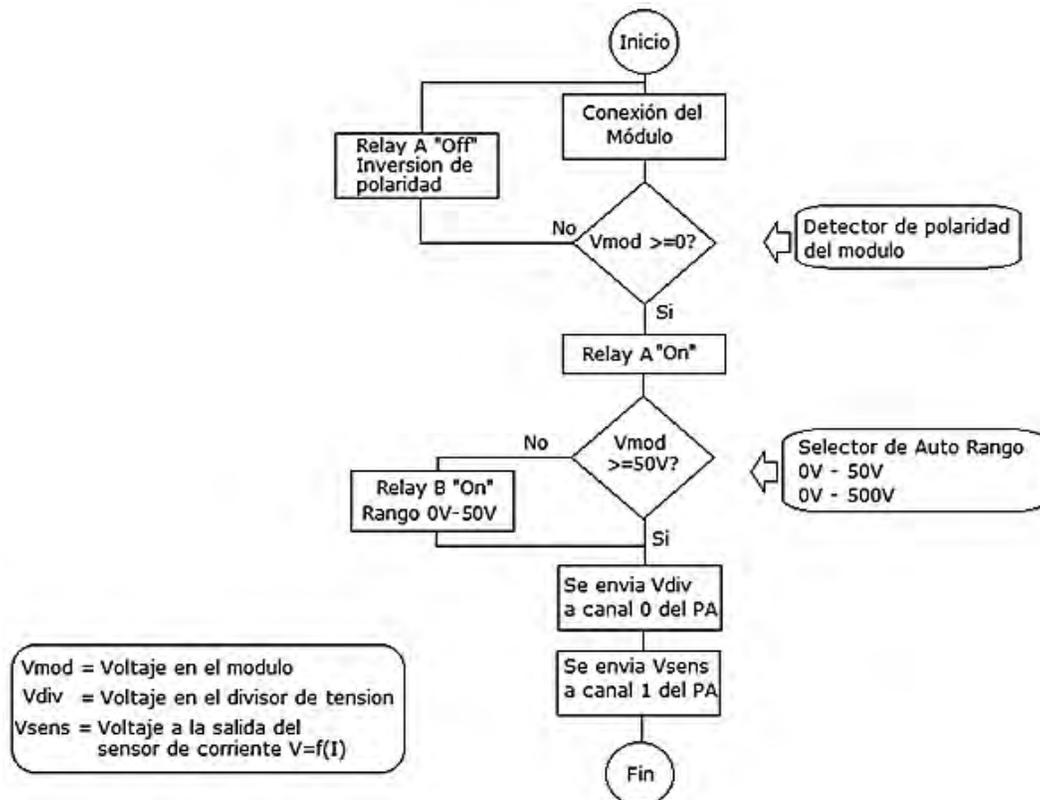


Fig. 2.6.3 Diagrama de flujo de la función de auto rango del sistema de medición.

Con la finalidad de separar las etapas de control de las etapas de potencia, el proyecto en general se ha dividido en diferentes partes, de las cuales una de ellas corresponde a la integración de los diferentes relevadores (fig. 2.6.4).

Otra función que realiza el relevador es la de generar un corto circuito en las terminales del capacitor con la finalidad de provocar su descarga, dado que, el proceso de carga del mismo servirá para generar un barrido de resistencias desde resistencia cero hasta una resistencia muy grande mediante el cual se obtendrán pares de datos de voltaje y de corriente cuyo comportamiento definen la potencia que genera el módulo a analizar. Es importante mencionar que para llevar a cabo la descarga del capacitor, y dado que se considera la medición de potencias de módulos fotovoltaicos de hasta 1kW, se considera la utilización de un capacitor con un gas inerte en su interior que funciona como un eliminador de arcos eléctricos.

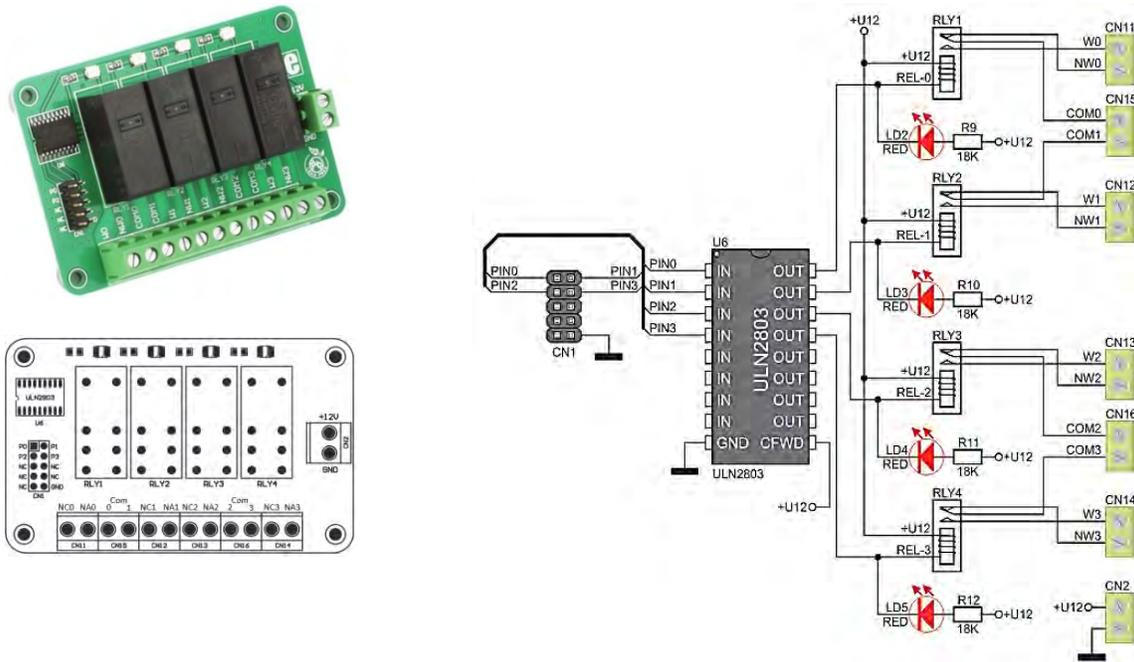


Fig. 2.6.4 Pack de relevadores.

Considerando una distancia total de 4m en los conductores calibre 12 (4.25 m² área total, Tabla 8 de la NOM) que conectan a la celda solar con el sistema de medición, calculamos la resistencia con base a la NOM 001-SEDE 2012. La resistencia total es de: R=0.026Ω.

La capacitancia total considerada está conformada por dos capacitores de 5,000μF a 50V, ambos se interconectan entre sí en serie, por lo que la capacitancia total es de: 2,500 μF

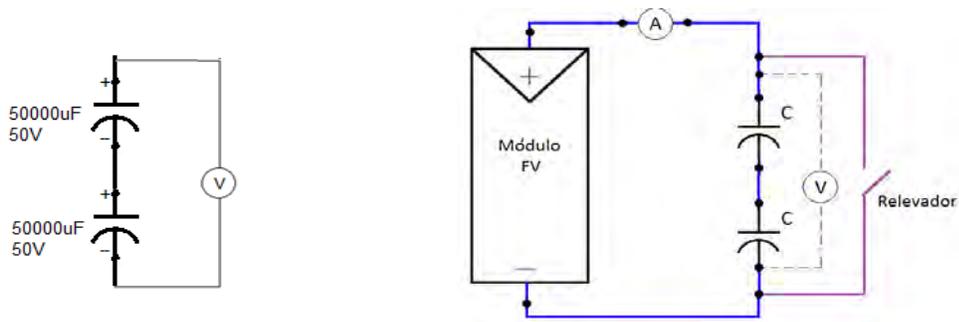


Fig. 2.6.5 Capacitores utilizados e interconectados entre sí.

Conexión en serie de dos capacitores para incrementar el rango de voltajes de medición.

$$V_T = V_1 + V_2 \tag{Ec. 2.38}$$

$$V_1 + V_2 = 100V$$

La capacitancia total está dada por:

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} \quad \text{Ec. 2.39}$$

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = 2,500\mu F$$

Por lo tanto,

$$\tau = (0.026\Omega) * (2500 \times 10^{-6}F) = 0.000065s$$

si se requieren 5 τ para llegar casi a la carga máxima del capacitor, entonces el tiempo de carga es de:

$$t = 0.000325 \text{ segundos}$$

Dado que una medición tarda 3.2 μ s, con este sistema de medición en 0.325ms se pueden obtener hasta 101 pares de datos de corriente y voltaje.

Ventajas y desventajas de la utilización del capacitor como resistencia variable:

VENTAJAS

- Se incrementa el rango de voltajes que se pueden medir con el sistema de medición mediante la adición de capacitancias en serie.
- Se reducen los efectos indeseados por causas de calentamiento.
- El valor de corto circuito está muy cercano al valor real, ya que al descargar el capacitor las terminales se unen, logrando así obtener el valor de la corriente de corto circuito I_{sc} .

DESVENTAJAS

- Requiere de un dispositivo que realice el corto circuito en las terminales del capacitor, para esto se ha considerado el uso de un relevador electromecánico.
- El sistema de medición debe medir más rápido que el tiempo de carga del capacitor y dado que el tiempo de carga depende de la capacitancia, para la adición de más capacitores se debe reconfigurar el proceso de medición.
- La variación en el valor de las corrientes de los módulos a analizar ocasionan la reconfiguración del sistema de medición para cada medición.

2.7. El mosfet como resistencia variable

El MOSFET es un Transistor de Efecto de Campo de Metal Oxido Semiconductor y se trata de un dispositivo electrónico de potencia controlado por tensión. Se encuentra conformado por tres terminales que son: Compuerta o gatillo (Gate, G), drenador (Drain, D) y fuente (Source, S). Existen dos tipos principales de mosfet y son: mosfet tipo N y el mosfet tipo P.

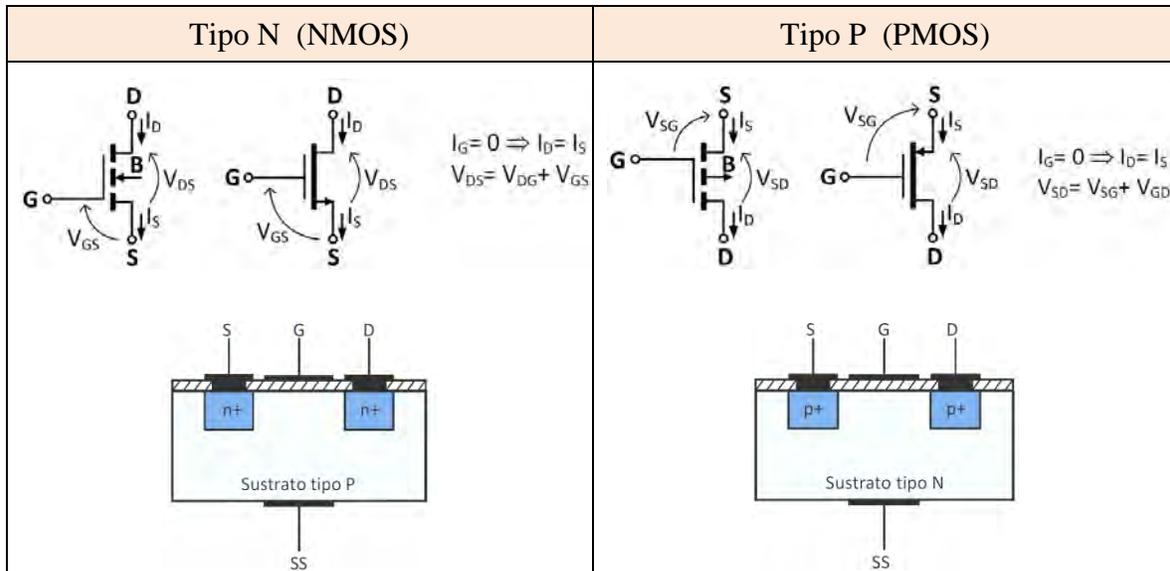


Fig. 2.7.1 Símbolos y estructura física de los mosfet de enriquecimiento tipo N y P.

El potencial mínimo requerido para que el canal se forme se le conoce como voltaje de umbral o voltaje threshold (V_{TH}) que es comúnmente representado por V_T .

Si $V_{GS} < V_T$, no hay canal inducido, y aunque se aplique tensión entre D y S, no circulara corriente puesto que la unión drenador-sustrato se encuentra polarizada en inversa (Fig. 2.7.2).

Cuando ya existe canal inducido y V_{DS} va aumentando, el canal se contrae por el lado del drenador (Fig. 2.7.3) ya que la diferencia de potencial puerta-canal es baja y la zona de transición más ancha. La corriente aumenta más lentamente si V_{DS} sigue aumentando. De hecho, el canal llegara a estrangularse en un punto (Fig. 2.7.3), alcanzándose la condición de saturación mínima cuando la diferencia de potencial entre la puerta y el canal en el extremo del drenador se reduce hasta igualarse a V_T . Se cumple entonces que $V_{GDsat.min.} = V_T = V_{GS} - V_{Dsat.min.}$, con lo que $V_{DSsat.min} = V_{GS} - V_T$, valor que marca el límite entre las **zonas óhmica y de saturación**.

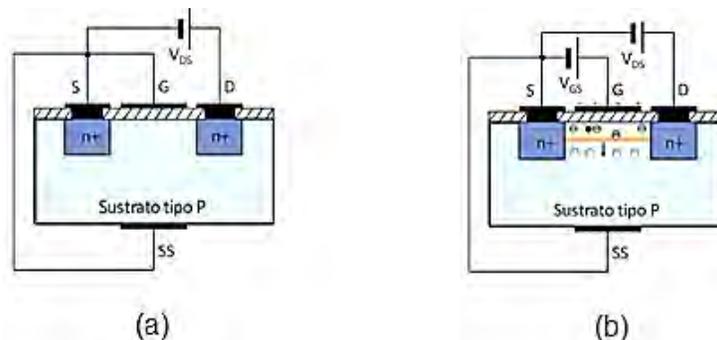


Fig. 2.7.2 Funcionamiento del NMOS con (a) $V_{DS} \neq 0$, (b) Con $V_{GS} = 0$ o $0 < V_{GS} \leq V_T$ e $I_D = 0$ aunque varíe V_{DS} .

Es decir, siempre que exista canal el dispositivo se encontrara en *región óhmica* y presentara baja resistencia.

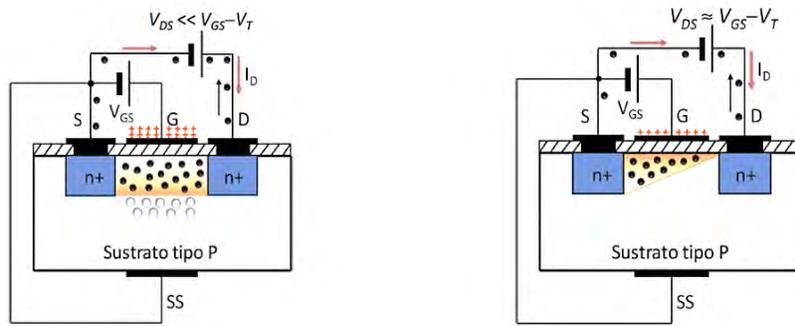


Fig. 2.7.3 Cuando $V_{GS} \geq V_T$, $I_D > 0$ al variar V_{DS} .

Cuando el canal se interrumpe o estrangula, el dispositivo estará en la *región de saturación*. La siguiente figura muestra la evolución de la corriente I_D con V_{DS} para un valor de $V_{GS} > V_T$.

$V_{DS} \geq V_{GS} - V_T \Rightarrow$ Región de saturación

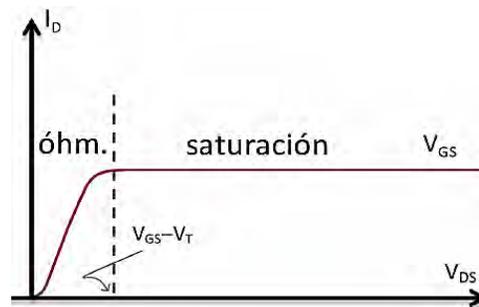


Fig. 2.7.4 Regiones de funcionamiento de un mosfet canal n cuando $V_{GS} \geq V_T$

La utilización de un mosfet como resistencia variable de nuestro sistema, hace prescindible un análisis detallado de su funcionamiento. Dado que el mosfet a utilizar es del tipo canal N, nos avocaremos a realizar el análisis solo para este tipo de mosfet.

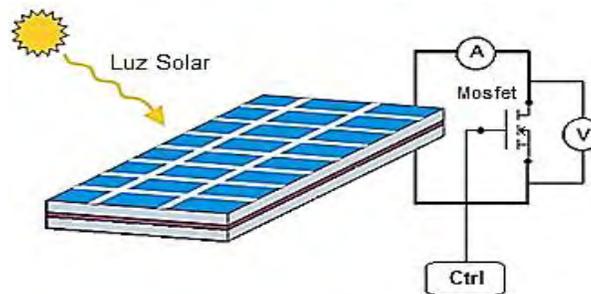


Fig. 2.7.5 Utilización de un mosfet como resistencia variable.

Para un mosfet NMOS con conexión en fuente común, donde la terminal de fuente es común a la señal de entrada (V_{GS}) y la señal de salida (I_D y V_{DS}), las curvas características de salida se obtienen al representar como varía I_D al aumentar V_{DS} , para diferentes valores de V_{GS} , es decir, $I_D = f(V_{DS})$ donde V_{GS} es constante.

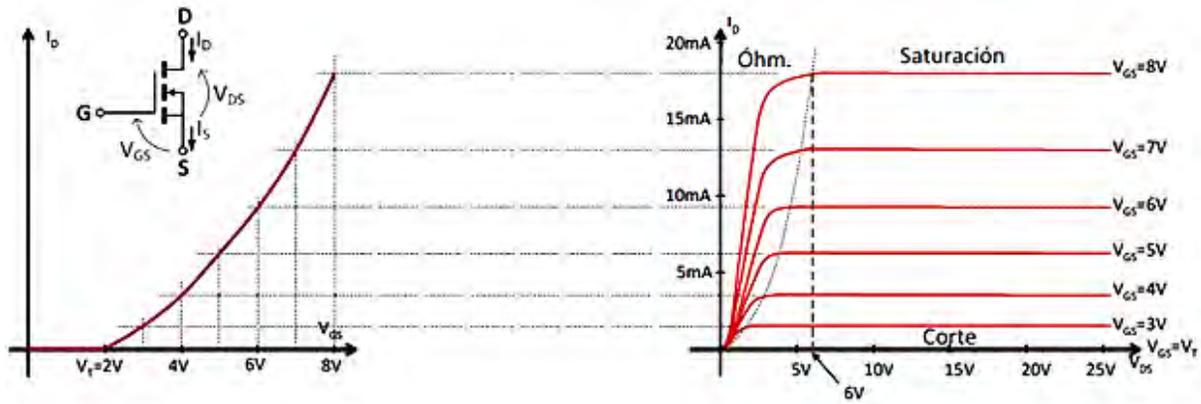


Fig. 2.7.6 Curva de salida y característica de transferencia de un mosfet de canal n.

Si $V_{GS} \leq V_T$, el mosfet estará en la *región de corte* y la corriente $I_D = 0$.

Si $V_{GS} \geq V_T$, el mosfet estará en conducción y se pueden presentar dos casos.

- a) Si $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$, el transistor estará en la **región de saturación** y la corriente será constante para un valor determinado por V_{GS} . La corriente puede determinarse de forma aproximada por $I_D = f(V_{GS})$ para $V_{DSsat} = cte$, y dado que corresponde a una parábola con vértice en V_T siendo k el parámetro de transconductancia del NMOS, que se mide en mA/V^2 :

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2 \tag{Ec. 2.40}$$

- b) Si $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$, el mosfet estará en la **región óhmica** de forma que al aumentar V_{DS} también lo hacen la corriente y la resistencia del canal. El valor de la resistencia del canal r_{ds} en la zona óhmica puede aproximarse mediante cálculo por una característica de salida linealizada.

$$r_{DS} = \frac{V_{DSsat.min}}{k(V_{GS}-V_T)^2} = \frac{V_{GS}-V_T}{k(V_{GS}-V_T)^2} = \frac{1}{k(V_{GS}-V_T)} \tag{Ec. 2.41}$$

por lo que, despejando:

$$r_{DS} = \frac{V_{GS}-V_T}{I_D} \tag{Ec. 2.42}$$

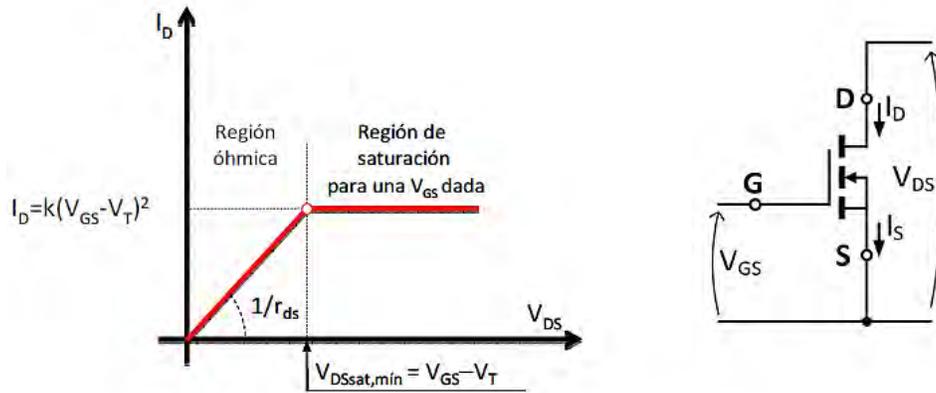


Fig. 2.7.7 Característica de transferencia linealizada del mosfet de canal n en fuente común.

Dado que el mosfet utilizado es del tipo canal N, en la siguiente tabla se presentan las condiciones para las diferentes formas de funcionamiento del mosfet canal n (NMOS), y los respectivos modelos circuitales equivalentes.

Tabla. 2.7.1 Modelos equivalentes lineales del mosfet de canal N en fuente común.

Condición	Zona de funcionamiento	Modelo equivalente
$V_{GS} \leq V_T > 0;$ $V_{DS} > 0$	CORTE: $I_D = I_S = 0$ Útil en conmutación	
$V_{GS} \geq V_T > 0;$ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$	SATURACION: $I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$ Útil en aplicaciones analógicas	
$V_{GS} \geq V_T > 0;$ $0 \leq V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$	ÓHMICA: $r_{DS} = \frac{1}{k(V_{GS} - V_T)}$ Útil en conmutación y como resistencia variable	

El análisis del NMOS considera dos tipos de funcionamiento: corte y conducción. En lo correspondiente a conducción se consideran dos regiones: región óhmica y región de saturación. Utilizando el método analítico se determina la región de funcionamiento, y se sustituye el dispositivo por el modelo circuitual lineal correspondiente.

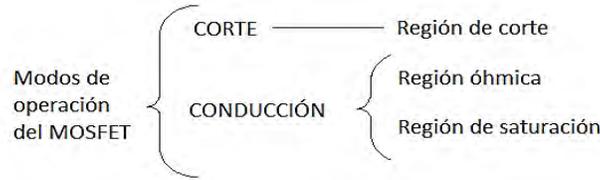


Fig. 2.7.8 Modos de operación del mosfet

La resistencia en estado activo $R_{DS(enc)}$ del mosfet entre la conexión de drenaje y la fuente aumenta rápidamente conforme al voltaje nominal de bloqueo del dispositivo. En un área por unidad, la resistencia del estado activo como función del voltaje nominal de bloqueo (BV_{DSS}) se expresa como:

$$r_{DS(enc)} = k * B * V_{DSS}^{2.5-2.7} \quad Ec. 2.40$$

Donde k es una constante que depende de la geometría del dispositivo. Por eso, solo están disponibles con voltajes nominales pequeños, los cuales tienen una baja resistencia del estado activo y, por tanto, pérdidas de conducción pequeñas. [5]

Tabla. 2.7.2 Modelo circuital y analítico del NMOS.

<p>NMOS en Corte</p>		<p>Si $V_i = V_L \Rightarrow V_{GS} \leq V_T$ Corte</p> <p>Como $I_D = 0 \Rightarrow V_o = V_{DD}$</p>
<p>NMOS en Óhmica</p>		$r_{DS} = \frac{1}{k(V_{GS} - V_T)} = \frac{1}{k(V_{DD} - V_T)}$ $\Rightarrow I_D = \frac{V_{DD}}{R_D + r_{ds}}$ $V_o = V_{DS} = I_D * R_{DS} = \frac{V_{DD} * R_{DS}}{R_D * r_{DS}}$ $= \frac{V_{DD}}{R_D k(V_{DD} - V_T) + 1}$ <p>Si $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T = V_{DD} - V_T$ Óhmica</p>
<p>NMOS en Saturación</p>		$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2 = k(V_{DD} - V_T)^2$ $V_o = V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$ $V_o = V_{DD} - k R_D (V_{DD} - V_T)^2$ <p>Si $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T = V_{DD} - V_T$ Saturación</p>

El mosfet utilizado es el IRFP 460. Cuenta con una resistencia interna en estado activo de $27\text{ m}\Omega$ y, con la finalidad de minimizar lo mayor posible la resistencia de la carga, se dispone de dos mosfet en paralelo con lo cual la resistencia mínima se reduce a la mitad, logrando así medir en lo mejor posible el valor de la corriente de corto circuito I_{sc} de la celda.

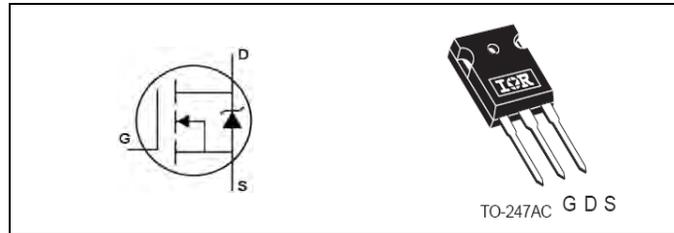


Fig. 2.7.8 Símbolo y encapsulado del Mosfet IRFP 460.

Ventajas y desventajas de la utilización de un mosfet como carga variable:

VENTAJAS

- Fijar por tiempo indefinido el valor de la resistencia interna, lo que nos permite tomar el par de datos correspondiente al valor de la resistencia en ese punto.
- Con la finalidad de hacer más precisa la medición, se puede considerar la realización de mediciones en el mismo punto con la finalidad de promediar.
- Se pueden realizar mediciones en tiempos controlados, pueden ser muy cortos (del orden de milisegundos) o tan largos como sea requerido.
- Se puede obtener fácilmente el valor de circuito abierto, corto circuito y el valor del voltaje en el punto donde se desee.
- Es posible modificar el sentido de la medición, ya sea de V_{oc} a I_{sc} o viceversa.
- Se puede hacer una compensación por incremento de temperatura dado que la ficha técnica del mosfet considera las gráficas correspondientes.
- Es de tamaño recudido comparado con el tamaño del arreglo de capacitores para soportar 500V.

DESVENTAJAS

- El mosfet siempre presenta una resistencia, y aunque se mínima, incide en el valor de la corriente de corto circuito.
- Para corrientes por encima de los 10 Amperes, la medición de corriente a mínima resistencia (que no es precisamente el corto circuito) I_{sc} se debe realizar de manera muy rápida, ya que para grandes valores de corriente varía el comportamiento resistivo del mosfet debido a que presenta calentamiento, para evitar esto es necesaria la utilización de un sistema de disipación de calor con ventilación forzada.

De las desventajas anteriores, es importante mencionar que calentamiento se puede compensar incluyendo la curva de regresión correspondiente a la temperatura vs corriente del mosfet en el programa de medición.

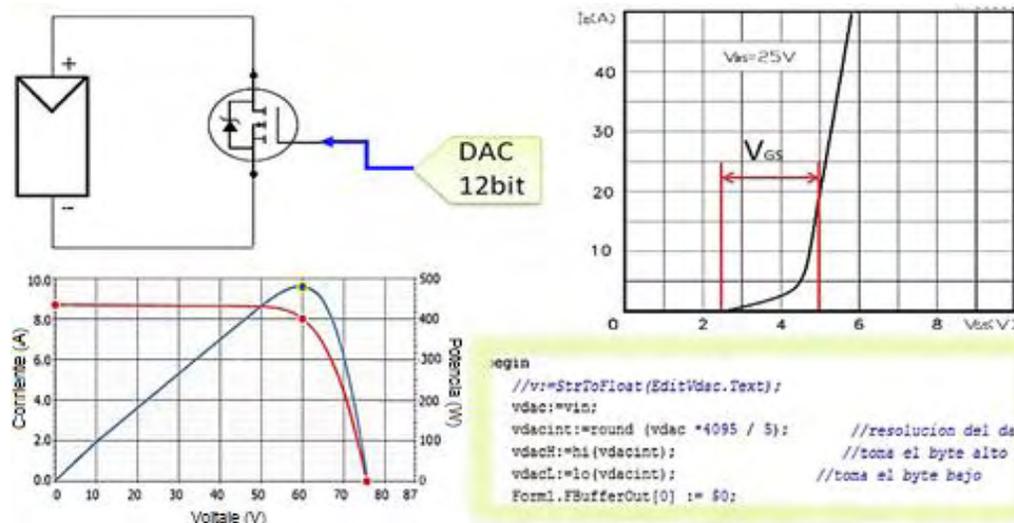


Fig. 2.7.9 Mosfet controlado por voltaje a la compuerta.

Puesto que su resistencia de estado activo tiene un coeficiente de temperatura positivo, los MOSFET se pueden conectar fácilmente en paralelo. Esto causa que el dispositivo que conduce la corriente más allá se caliente y de este modo lo obliga a compartir de manera igualitaria su corriente con los demás mosfet en paralelo. [5]

El calentamiento que sufre el mosfet al circular corriente a través de él, es un fenómeno que puede causar errores principalmente en la estimación de la corriente de corto circuito ante lo cual, se ha dispuesto de la utilización de dos mosfet conectados en paralelo.

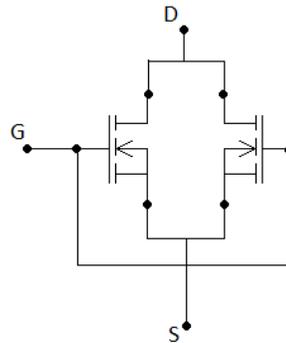


Fig. 2.7.10 Disposición de dos mosfet en paralelo IRFP 460

Es importante mencionar que los mosfet se encuentran fijos en un disipador de calor lo que reduce limitaciones por efecto de calentamiento.

2.8. El convertidor digital analógico DAC

Un convertidor digital-analógico DAC es un dispositivo electrónico mediante el cual, a partir de un valor binario o discreto, se obtiene una señal del tipo analógica, cuya resolución depende directamente de la cantidad de bits que maneja dicho convertidor.

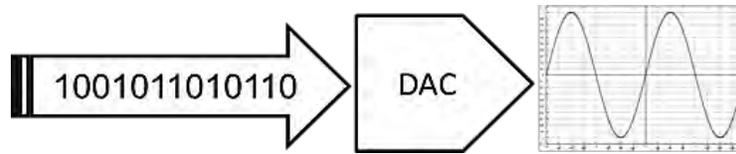


Fig. 2.8.1 Funcionamiento del convertidor digital a analógico DAC

El DAC considerado es el MCP4921, es un convertidor de tipo serial, con interfaz de comunicación SPI, que permite la realización de altas tasas de transferencia de datos. El bus de interfaz de periféricos serie o bus SPI es un estándar para controlar casi cualquier dispositivo electrónico digital que acepte un flujo de bits serie regulado por un reloj (comunicación sincrónica).

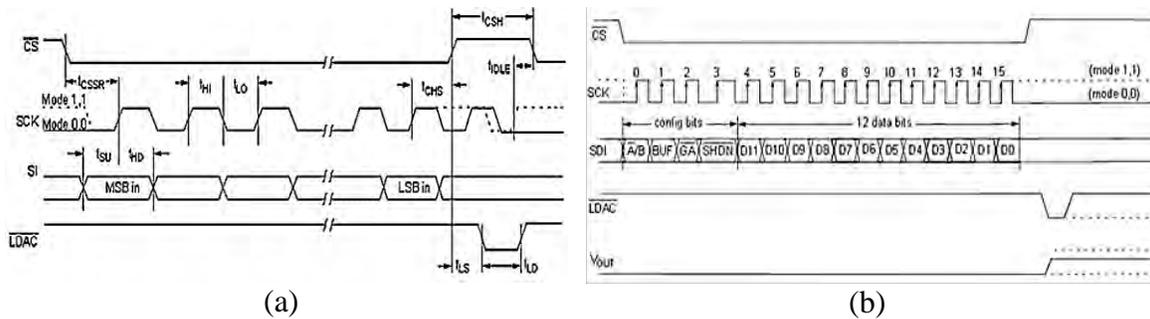


Fig. 2.8.2 Interfaz SPI del MCP4921 (a) diagrama de tiempos; (b) modo de operación

La figura 2.8.2 muestra el diagrama de tiempos del DAC MCP4921 dado que cuenta con interfaz de comunicación SPI. Las rutinas de control correspondiente al diagrama de tiempos y modo de operación del SPI del DAC se encuentran consideradas en el programa del microcontrolador.

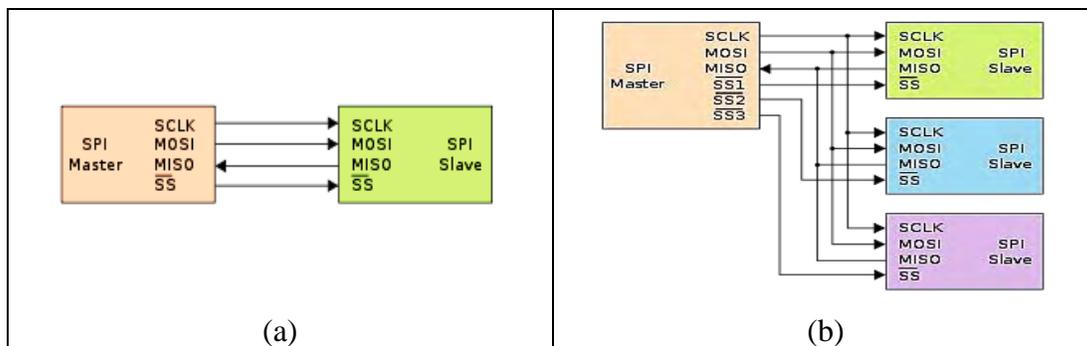


Fig. 2.8.3 Bus SPI (a) un maestro y un esclavo; (b) un maestro y tres esclavos

Como se ha mencionado, una variación en la compuerta del mosfet provoca un cambio en su resistencia interna lo que nos provee de una resistencia eléctrica variable controlada por tensión.

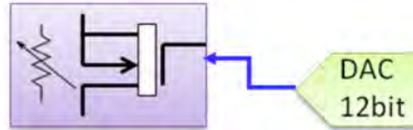


Fig. 2.8.4 Convertidor Digital a Analógico conectado a la compuerta del mosfet.

En este proyecto, la variación del voltaje en la compuerta del mosfet se lleva a cabo mediante el uso de un convertidor digital analógico de 12 bits de resolución, lo que permite obtener hasta 4,096 valores de resistencia entre las terminales D y S del mosfet.

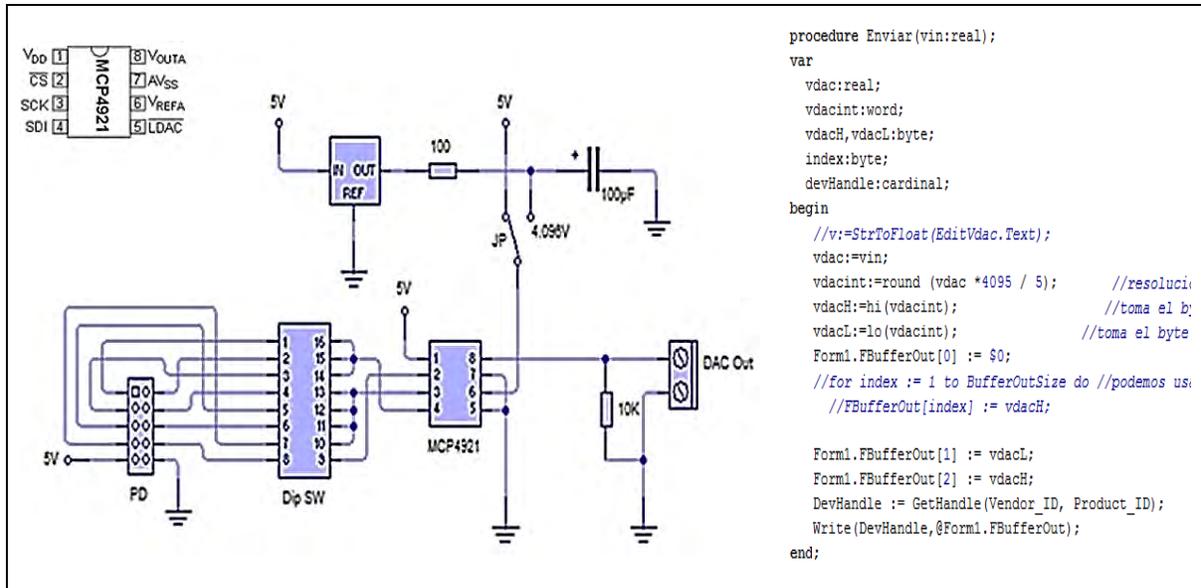


Fig. 2.8.5 Convertidor digital analógico DAC utilizado y código computacional correspondiente. El voltaje de compuerta es un valor que debe considerarse al momento de la selección del mosfet a utilizar, ya que con el DAC utilizado solo puede obtener 5V como máximo.

2.9. Programa del microcontrolador

El funcionamiento de este proyecto considera la comunicación entre un sistema embebido y una computadora, lo que implica establecer protocolos de comunicación diseñados con base a las necesidades de cada actividad.

Entre las actividades que desarrolla el presente proyecto se encuentran las siguientes:

- Lectura de voltajes analógicos provenientes de las diferentes partes del sistema de caracterización.
- Procesamiento de información discreta.
- Intercomunicación con la computadora personal vía puerto USB.
- Generación del protocolo SPI para manipulación del convertidor digital a analógico MSP 4921.

- Manipulación de salidas digitales para activación de relevadores dentro del sistema de medición.

Algoritmo del programa del microcontrolador.

A continuación se presenta el algoritmo correspondiente al modo de operación del programa del microcontrolador.

1. Inicio
2. Inicia bucle de medición
3. Inicialización de variables y contadores
4. Inicia proceso de comunicación con el puerto USB de la computadora
5. Espera petición desde la PC
6. Recibe petición de la PC y el valor del voltaje de compuerta que se requiere para la saturación de la compuerta del mosfet.
7. Envía el valor binario correspondiente al voltaje analógico solicitado desde la PC. Este valor lo envía vía SPI a través del puerto D para manipular al convertidor digital analógico.
8. Mide y almacena los valores de V (voltaje) e I (corriente).
9. Mide y almacena valores de Temperatura, Irradiancia y Humedad.
10. Proceso alterno, espera instrucción para enviar y recibir información a través de puerto USB con la PC.
11. Espera solicitud desde la PC.
12. Envía hacia la PC valores de las variables de voltaje, corriente, temperatura, irradiancia y humedad.
13. Regresa al paso 2.
14. Fin.

El diagrama de flujo queda definido como se muestra a continuación.

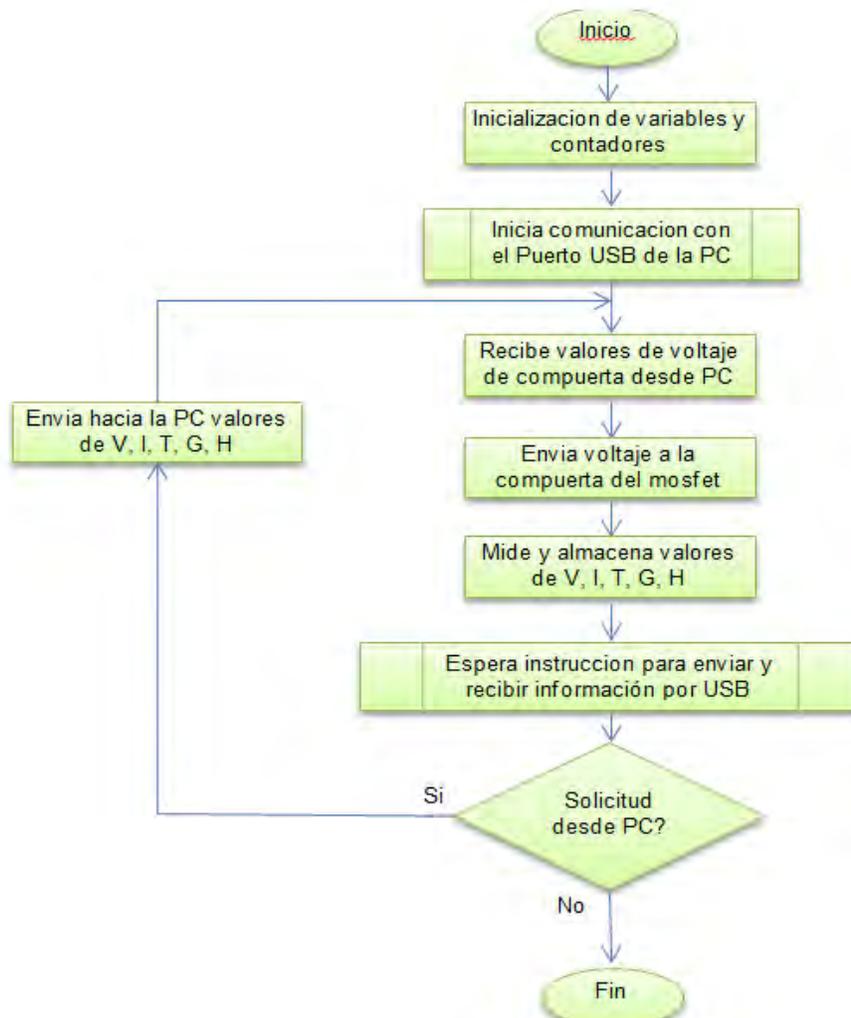


Fig. 2.9.1 Diagrama de flujo de operación del microcontrolador.

Es importante mencionar que, el microcontrolador es el medio de comunicación entre las diferentes etapas que integran el sistema de medición y el ordenador desde el que se llevara a cabo el proceso de caracterización de módulos FV o FC.

2.10. Interfaz con la pc

La funcionalidad de este sistema de medición y control basa gran parte de su funcionamiento en el uso de un ordenador o computadora. Ante esto, se presenta la interfaz entre el usuario y el sistema de caracterización cuyas partes principales son:

- Puerto USB.
- Programa de comunicación y control desde la pc.

Interfaz de conexión a la PC, puerto USB.

El puerto USB (Universal Serial Bus) es una interfaz física que se encuentra formada por cuatro hilos dos para la alimentación 5v (Rojo) GND (Negro) y dos para datos D+ (verde) y D- (Blanco) Lo del signo + y - es porque es una señal diferencial cuyo valor depende de la velocidad del bus (3,3v para low-speed y 400mV para high-speed).

Los conectores se les denomina de tipo A, de tipo B y mini.

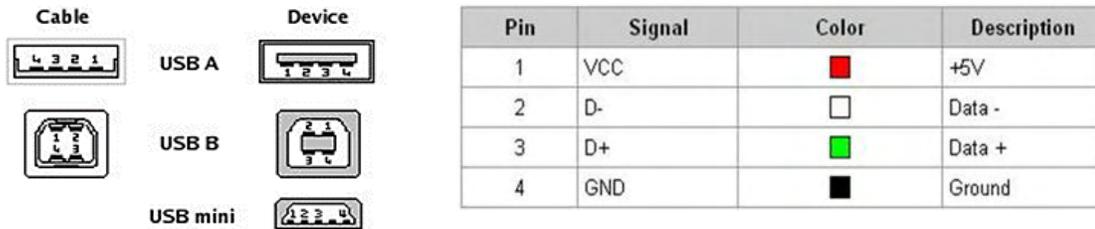


Fig. 2.10.1 Configuración de pines del puerto usb en sus diferentes modalidades.

La información correspondiente a estructura y características del puerto USB se da a conocer detalladamente en el apéndice USB.

El Vendor ID (VID) y el Product ID (PID) son dos números de 16 bits representados en Hexadecimal, si utilizamos la clase CDC (Communications Device Class) de CCS para la comunicación USB estos valores los podemos modificar en el archivo correspondiente.

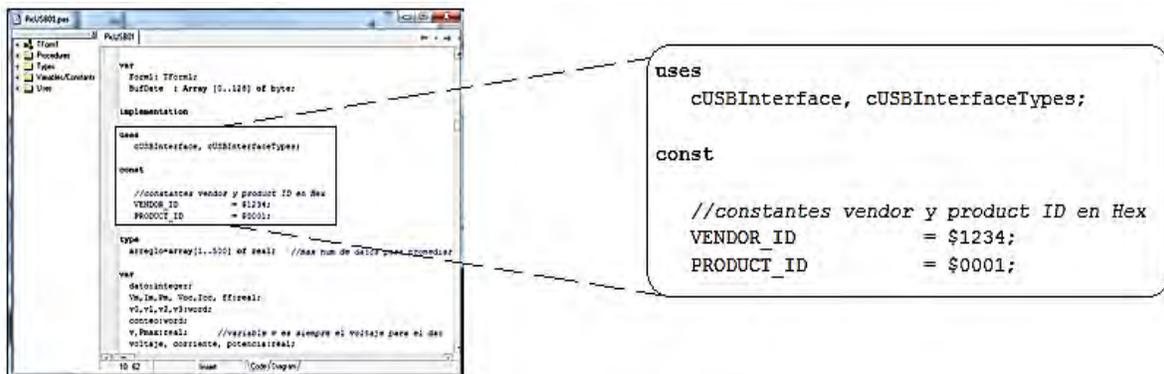


Fig. 2.10.2 Código computacional correspondiente a l vendor ID y al product ID.

La especificación USB provee de propiedades y funciones que pueden ser utilizadas por los dispositivos que tengan características similares. Por ejemplo, un teclado y un ratón por sus características pertenecerán a la misma clase la llamada Human Interface Device (HID), ahora bien si se diseña el firmware de un dispositivo con las especificaciones exige esta clase se beneficiarán de esas propiedades y funciones comunes a la clase, una ventaja de utilizar esta clase es que no es necesario instalar ningún driver para el dispositivo ya que el sistema operativo utilizará uno genérico para todos.

2.11. El programa de control.

La ingeniería de software, incluye el análisis previo de la situación, el diseño del proyecto, el desarrollo del software, las pruebas necesarias para confirmar su correcto funcionamiento y la implementación del sistema.

El software utilizado para la realización del programa de control es Delphi, en su versión 6, es un lenguaje de programación para ambientes visuales, nativo de Turbo Pascal, basa la mayor parte de su funcionamiento en el desarrollo de aplicaciones conformada por componentes visuales, ordenados por categorías o librerías (VCL, *visual component library*) que permiten una programación fluida y estructurada lo que ahorra trabajo tiempo el desarrollar aplicaciones.

El programa de control de la pc es sin duda una parte esencial en este proyecto, es el medio por el cual se tiene el control del proceso de medición con el sistema de caracterización desarrollado. La interfaz de usuario (GUI) lo convierte en un sistema de medición fácil de manipular, con una buena apreciación de resultados y con grandes funcionalidades que brindan beneficios adicionales en el desarrollo de la medición.

Entre las ventajas que se tienen con el desarrollo de este software se enlistan las siguientes:

- Interfaz de usuario de fácil acceso a las funciones de medición y control.
- Visualización en tiempo real de los parámetros eléctricos y físicos del módulo a analizar.
- Selección del tipo de tecnología a analizar.
- Configuración automática por hardware y mediante software de la etapa de potencia del circuito en rango de 0 a 50V o 0 a 500V según sea el caso de la medición.
- Promediar determinado número de mediciones antes de mostrar o desplegarla en pantalla.
- Modo de medición continua que permite visualizar en modo de animación en tiempo real el comportamiento de la curva corriente voltaje de la celda en cuestión.
- Mostrar el valor de la temperatura del módulo y la irradiancia a la que se encuentra expuesto el módulo FV o de celda de combustible.
- Calculo de variables eléctricas como potencia, energía, eficiencia y factor de forma.
- Función de almacenamiento de información en archivo con formato CSV (valores separados por comas, Comma Separated Value).
- Función de variación manual, mediante el ratón de la pc, de la resistencia de carga (mosfet) en las terminales de la celda.
- Protección por hardware de inversión de polaridad con indicador led.

2.11.1. Algoritmo y diagrama de flujo.

Para llevar a cabo el proceso de medición desde la computadora personal se tiene el siguiente algoritmo y diagrama de flujo del programa de control.

Algoritmo del programa de control

1. Inicio del programa
2. Se inicializan variables y contadores a cero.
3. Se verifica si el hardware de medición se encuentra conectado al puerto USB. En caso afirmativo continuar con el siguiente paso de lo contrario saltar al paso 19.
4. Se establece automáticamente la función de autorango.
5. Se selecciona el tipo de tecnología a caracterizar.
6. Se selecciona el tipo de medición a realizar.
7. Espera a que se presione el botón de inicio del proceso de medición. Al presionar salta al siguiente paso.
8. Se incrementan contadores $i=i+1$,
9. Se obtiene $V[i]$, $I[i]$ y se calcula $P[i]$.
10. Se despliegan valores y graficas de $V[i]$, $I[i]$ y $P[i]$ y se almacenan en archivo.
11. Se comparan valores de V_m , I_m y P_m con $V[i]$, $I[i]$ y $P[i]$ y posteriormente se actualizan.
12. Se comparan valores de V_{oc} , e I_{sc} con $V[i]$ e $I[i]$ y posteriormente se actualizan.
13. Se obtiene y despliega el valor y las gráficas correspondientes de temperatura e irradiancia según sea el tipo de tecnología.
14. Se incrementa el valor de $V_G = V_G + \Delta V_G$ para iniciar con la saturación controlada del mosfet
15. Si $V_G < V_{Gm\acute{a}x}$ regresa al punto 8.
16. Se mide y despliega los valores de temperatura, humedad e irradiancia.
17. Se calcula el factor de forma (FF) y eficiencia y se despliega en pantalla.
18. Fin del programa.

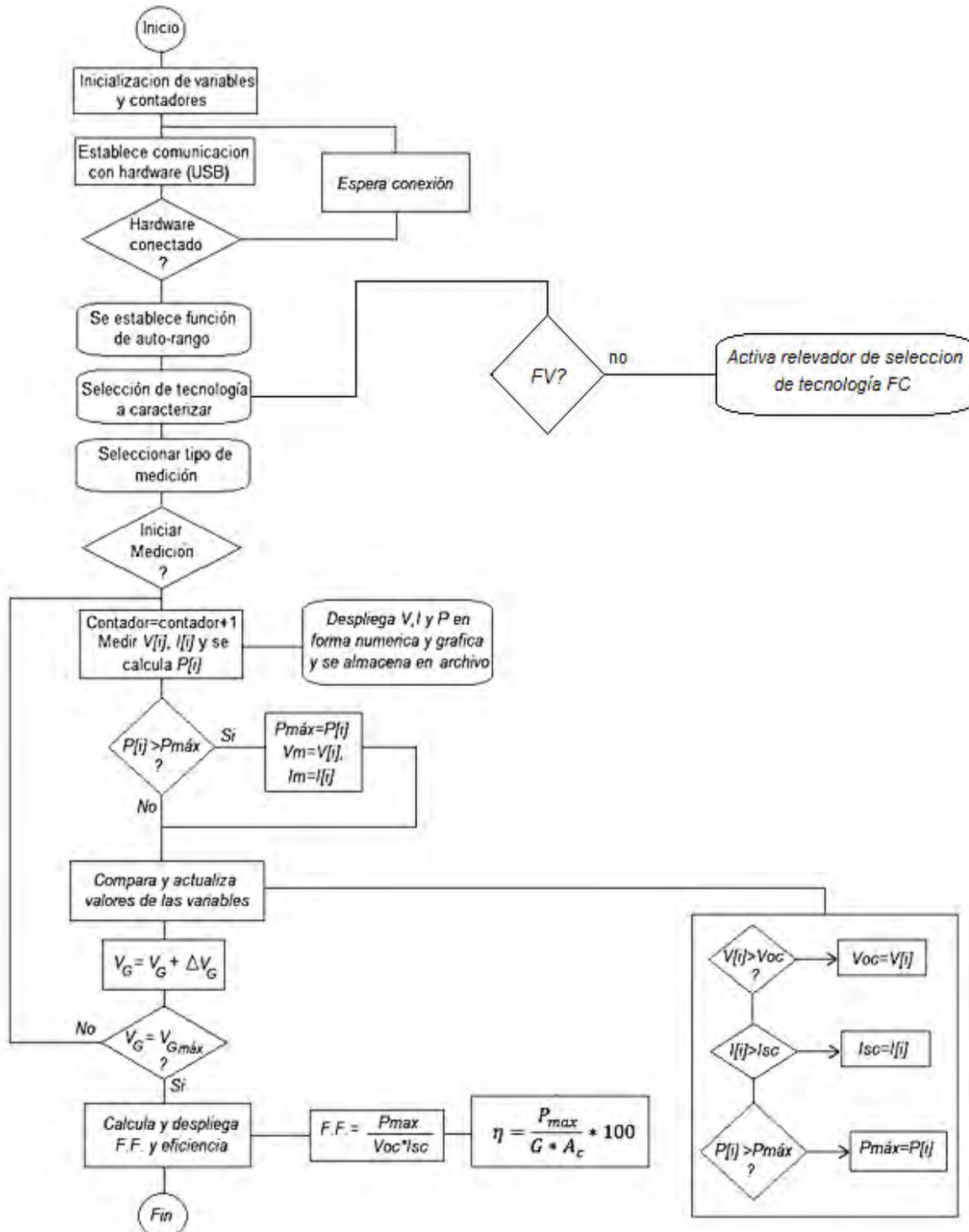


Fig. 2.11.1.1 Diagrama de flujo de operación del programa de la pc.

2.11.2. Pantalla principal del programa de control.

La interfaz gráfica de usuario (GUI, graphical user interface) del programa de control permite configurar la medición y tener una buena y ágil apreciación de los cambios que se generan en el transcurso del experimento. El programa está diseñado considerando un factor importante en la ingeniería de software, la facilidad de uso, que es el esfuerzo necesario para aprender, operar y preparar los datos de entrada de un programa e interpretar su salida.

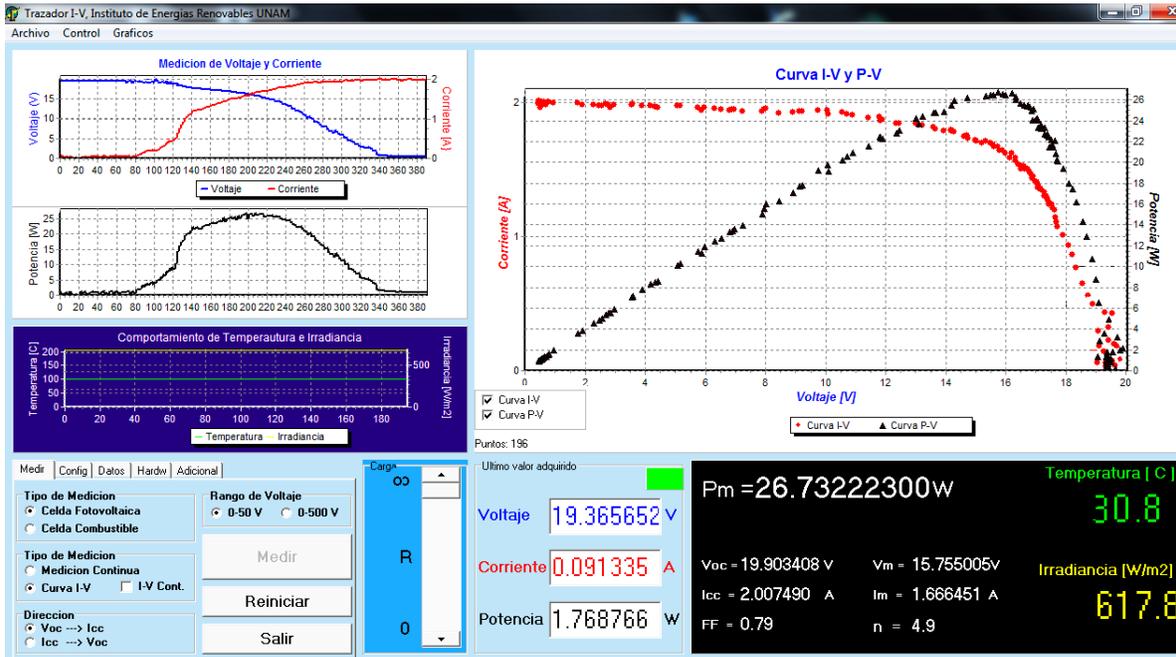


Fig. 2.11.2.1 Interfaz de usuario del programa de control para caracterización de módulos.

La información que muestra el programa de control es la siguiente:

- Gráfica de la curva I-V y P-V.
- Gráfica del comportamiento del voltaje y la corriente durante el transcurso de la medición.
- Gráfica del comportamiento de la potencia en el transcurso de la medición.
- Gráfica del comportamiento de la temperatura e irradiancia en el transcurso de la medición.
- Bloque para configuración del proceso de medición, en este se determina el tipo de medición, tipo de tecnología a analizar, sentido de la medición, la constante del sensor de irradiancia y algunas otras configuraciones adicionales.
- Bloque de control para la variación de la resistencia eléctrica de carga en las terminales del módulo a analizar.
- Bloque de visualización de los parámetros eléctricos obtenidos en tiempo real.
- Bloque de visualización de los parámetros eléctricos de interés como son:
 - ⇒ Potencia máxima del módulo.
 - ⇒ Voltaje a circuito abierto.
 - ⇒ Corriente de corto circuito.
 - ⇒ Voltaje a máxima potencia.

- ⇒ Corriente a máxima potencia.
- ⇒ Factor de forma.
- ⇒ Eficiencia.
- ⇒ Temperatura.
- ⇒ Irradiancia.
- Indicación de estado de conexión del circuito electrónico (hardware).

Con la finalidad de reducir el error en las mediciones, la rutina de adquisición en el programa de control considera una técnica que consiste en la toma de diferentes mediciones en el mismo punto y realizar el promedio de las mismas. El valor medio, se aproxima tanto más al valor verdadero de la magnitud cuanto mayor sea el número de medidas, ya que los errores aleatorios de cada medida se van compensando unos con otros.

$$x = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_i^n x_i}{n} \quad \text{Ec. 2.43}$$

Sin embargo, en la práctica, no debe pasarse de un cierto número de medidas. En general, es suficiente con 10, e incluso podrían bastar 4 o 5. El programa de control tiene la versatilidad de elegir la cantidad de valores a promediar.

2.11.3. Configuración del tipo de medición.

En lo que se refiere al tipo de medición que se puede realizar con ese sistema de caracterización, se tienen los siguientes casos:

- **Medición continua**, en el que se muestra el comportamiento en tiempo real del módulo a ciertas condiciones variables de irradiancia, temperatura y carga eléctrica. La presentación de la información obtenida se observa en tiempo real de manera numérica y gráfica. En este modo de medición, el valor de la resistencia de carga se puede variar de manera manual con la finalidad de observar el comportamiento de los demás parámetros eléctricos.
- **Obtención de la curva I-V**, en este modo de medición, el control de la resistencia de carga se lleva a cabo de manera automática, el programa de control es el encargado de modificar el valor de esta resistencia de carga con la finalidad de obtener los parámetros eléctricos requeridos.

En la figura 2.11.3.1(a) se muestra el modo de medición continua en la cual se manipula el valor de la resistencia de carga en las terminales del módulo a analizar. Se observa en la esquina superior izquierda la gráfica correspondiente al comportamiento del voltaje (azul) y la corriente (rojo) durante el proceso de medición.

En la figura 2.11.3.1 (b) se muestra el modo de medición de curva I-V en la que la variación de la carga se lleva a cabo de manera automática, en este modo, al iniciar la medición, el valor de la resistencia de carga se posiciona en el valor de máxima resistencia (∞) con fines de protección contra daños por sobrecalentamiento del mosfet.

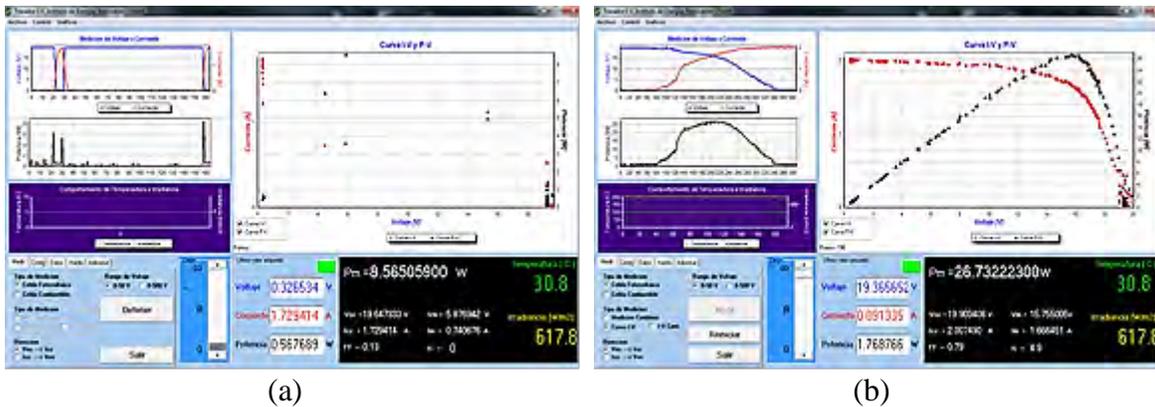


Fig. 2.11.3.1 Modos de medición (a) Medición continua; (b) Medición de curva I-V

El modo de medición continua ofrece además una ventaja adicional que es la de fijar por tiempo indefinido el valor de la resistencia de carga con la finalidad de observar el comportamiento de la celda en condiciones determinadas, como por ejemplo, en el punto de máxima potencia.

2.11.4. El archivo generado.

Todos los valores obtenidos durante el proceso de medición se almacenan en un archivo en formato CSV (*Comma Separated Values*), el formato del archivo generado brinda la posibilidad de exportar la información a hojas de cálculo.

La distribución de la información en el archivo de control consta de dos partes principales: el encabezado y los datos.

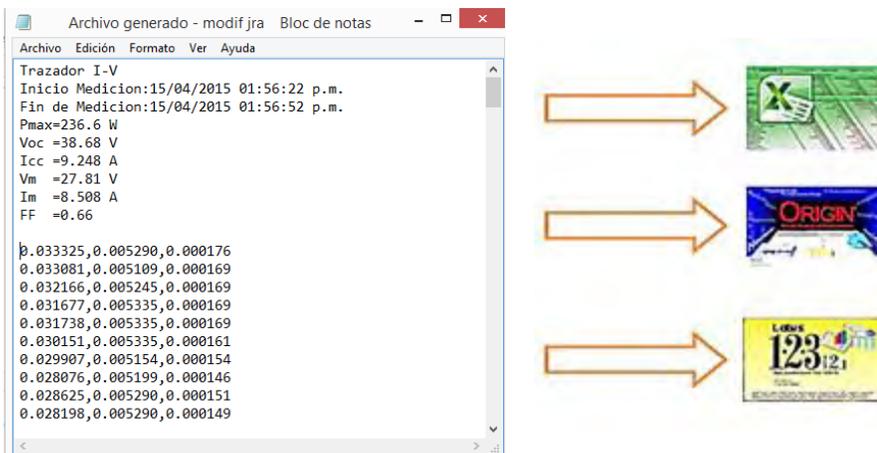


Fig. 2.11.4.1 Archivo generado abierto desde el block de notas de windows

El encabezado contiene un extracto de los valores más importantes del proceso de caracterización; entre estos valores se encuentran:

- Inicio de la medición (fecha y hora).
- Fin de la medición (fecha y hora).
- Potencia máxima.
- Voltaje a circuito abierto.
- Corriente de corto circuito.
- Voltaje a máxima potencia.
- Corriente a máxima potencia.
- Factor de Forma.
- Eficiencia.
- Irradiancia.
- Temperatura.

La parte de datos se encuentra después del encabezado y contiene, de manera secuencial los siguientes valores separados por coma: Voltaje, Corriente y Potencia

Debido a que se ha considerado la característica de facilidad y/o simplicidad de uso, la interfaz gráfica de usuario (GUI, graphical user interface) del software de control contiene solamente las funciones básicas del proceso de caracterización, ante esto, la facilidad de exportar los datos a otro software tal como hoja de cálculo o procesamiento de información, se convierte en una ventaja adicional y muy útil para el experimentador que desee realizar algún análisis de datos más exhaustivo.

Capítulo 3

Integración de componentes y desarrollo del prototipo

El desarrollo de sistemas de instrumentación electrónica basados en PC requiere la integración de diferentes dispositivos que, trabajando en conjunto, realizan las funciones requeridas por el desarrollador. Esta integración implica el uso de dispositivos electrónicos basados en diferentes tecnologías, tales como tecnología TTL (Lógica de Transistor a Transistor), CMOS (Semiconductor de Metal Oxido Complementario) así como también topologías de circuitos integrados analógicos, circuitos que permiten la creación de interfaces de comunicación, conversiones de señal, acondicionamiento de señales, circuitos digitales de memoria y dispositivos que cuentan con un procesador para la programación de las funciones a realizar, estos últimos son también conocidos como circuitos microprogramables MCU's.

3.1. El prototipo en su forma general.

Un sistema híbrido de generación de energía permite conmutar entre las diferentes tecnologías para alimentar de manera ininterrumpida a una carga instalada.

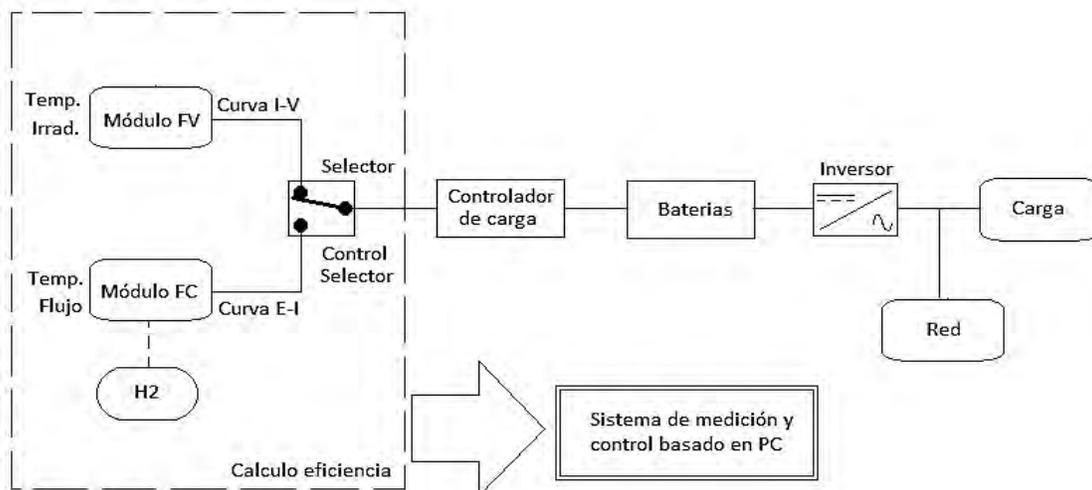


Fig. 3.1.1 Esquema general donde se visualiza el área de injerencia del prototipo de medición y control

El diagrama de bloques del prototipo en general se presenta a continuación.

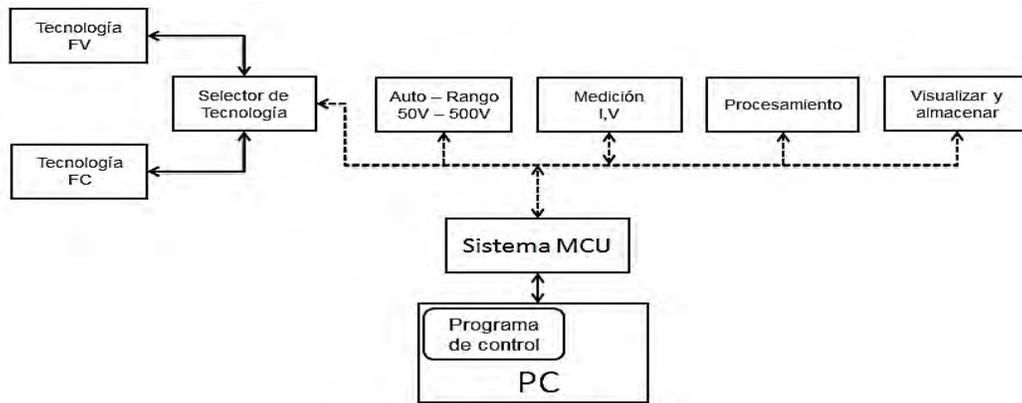


Fig. 3.1.2 Diagrama de bloques del proyecto.

En este proyecto, es de gran importancia la correcta conjunción de los dispositivos electrónicos que lo conforman, ya que debe tener la capacidad de controlar potencia eléctrica que de no ser tratada adecuadamente podría dañar al sistema electrónico o a la computadora que es el medio de operación por el usuario.

De acuerdo a la figura 3.1.2, las etapas principales que considera este sistema de medición son:

- Etapa de selección de tecnología a analizar
- Etapa de selección manual y automática de rango de medición
- Etapa de medición de voltaje y protección contra inversión de polaridad.
- Etapa de medición de corriente
- Etapa de medición de temperatura e irradiancia

3.2. Etapa de selección de tecnología a analizar.

La selección de la tecnología a analizar se lleva a cabo desde el programa de control de la PC, la tecnología seleccionada por default es la tecnología fotovoltaica.

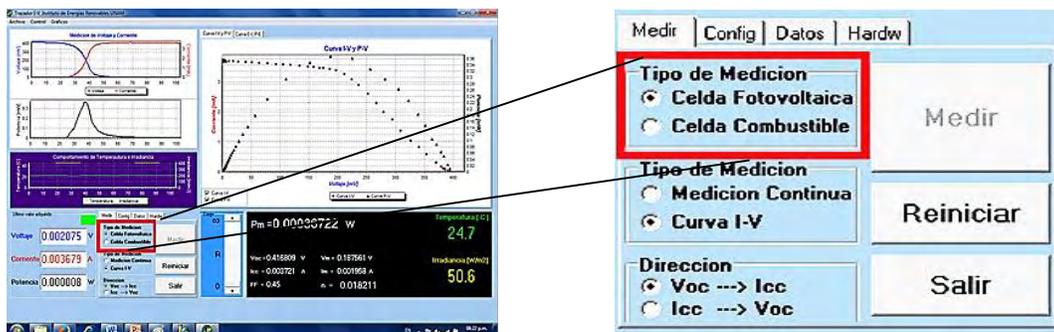


Fig. 3.2.1 Parte de la interfaz de programa mediante la cual se lleva a cabo la selección del tipo de módulo a analizar.

El sistema de caracterización tiene la particularidad de medir o caracterizar tanto módulos fotovoltaicos como módulos basados en celdas de combustible. Esta selección se lleva a cabo mediante el uso, como ya se ha mencionado con anterioridad, de un relevador doble.

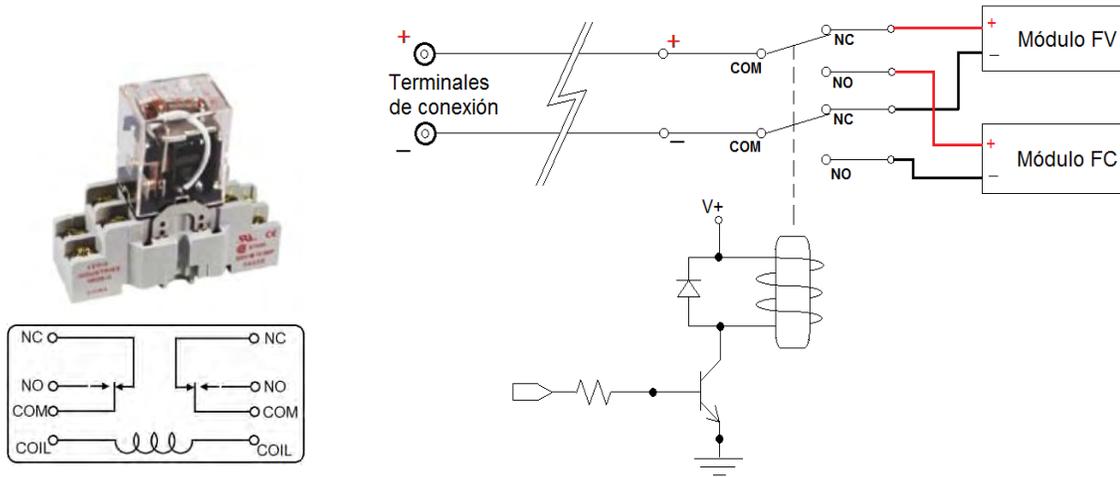


Fig. 3.2.2 Selector de módulos de diferentes tecnologías.

La selección del tipo de módulo a analizar es un proceso que se lleva a cabo al principio de la medición, esta acción configura los ejes del gráfico y reinicia variables a utilizar. El diseño en bloques del sistema de control de esta etapa se presenta a continuación.

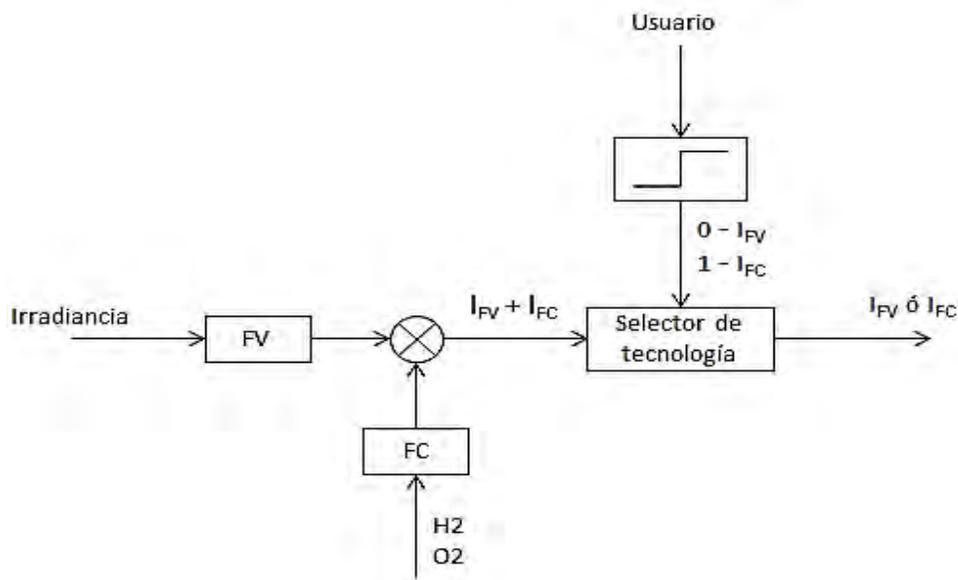


Fig. 3.2.3 Bloque correspondiente a la etapa de selección de tecnología.

Este bloque corresponde por su naturaleza a un sistema de control de lazo abierto, ya que este proceso es comandado directamente por el usuario desde el programa de control.

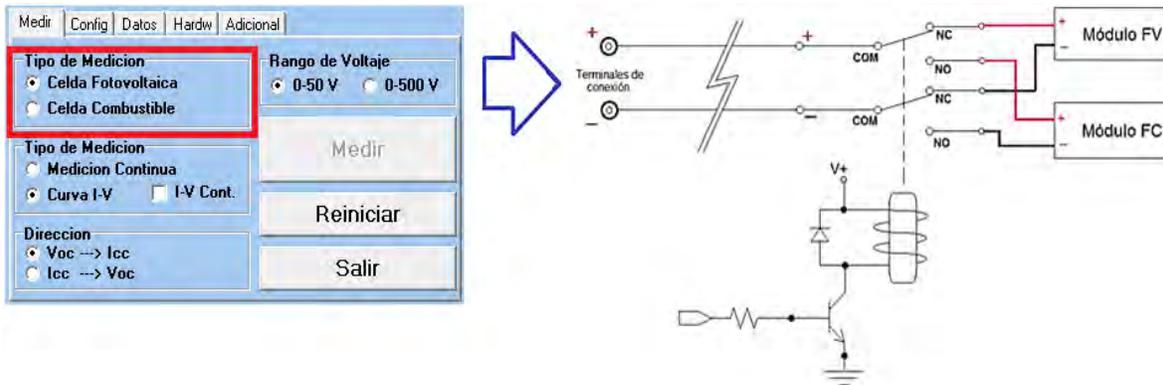


Fig. 3.2.4 Interacción entre la interfaz del programa de control y el hardware basado en relevador y electrónica para selección de tecnología a medir.

La selección de la tecnología es un proceso que se lleva a cabo en tiempo real, es decir, la reacción de los sistemas electromecánicos que intervienen en este proceso es inmediato.

3.3. Selección manual y automática de rango de medición.

Para incrementar las capacidades con que cuenta este proyecto se ha considerado, como en la mayoría de los instrumentos comerciales, la implementación de una función de selección de rango de medida, lo que permite la posibilidad de ampliar el rango de caracterización tanto de módulos o celdas con voltajes menores a 50V como voltajes de 500V.

El proceso de selección de rango se lleva a cabo de manera automática, aunque también es posible realizarlo de manera manual siempre y cuando el sistema de protección lo permita; la selección manual del rango de medición se encuentra considerada en el programa de control.

Considerando a V_{div} como el voltaje proveniente del divisor de tensión y a V_{PB1} como el voltaje proveniente de la computadora después del análisis correspondiente, el sistema electrónico de activación del relevador de selección de rango V_{ar} se determina mediante la expresión siguiente:

$$V_{div} > 50 \rightarrow V_{div} = "1" ; \quad \text{Rango: } 0 < V_{div} < 500$$

$$V_{div} \leq 50 \rightarrow V_{div} = "0" ; \quad \text{Rango: } 0 < V_{div} < 50$$

Para prevenir problemas con la etapa de auto rango y por normatividad, el valor por default de esta etapa es el rango de 0-500V y el algoritmo correspondiente está definido de la siguiente manera:

Algoritmo

1. Inicio de la etapa de auto rango
2. Verificación del voltaje del módulo
3. Si el voltaje es mayor que 45.45V saltar al paso 6
4. Si el voltaje es menor que o igual que 45.45V, activar el relevador para cambiar el rango a 0 a 50V
5. Si existe entrada del usuario (manual) para cambiar el rango a 0 a 500V desactivar relevador de auto rango.
6. Desactivación del control de auto rango.
7. Fin de la etapa de auto rango.

Es importante destacar el paso 6, la desactivación se tiene que realizar debido a que durante el proceso de medición, el voltaje del módulo sufrirá modificación conforme se satura la compuerta del mosfet. Esta modificación podría disparar el relevador mientras se realiza el barrido para la obtención de la curva I-V, de modo que, aun cuando se pretenda modificar manualmente el valor del rango no sea posible.

El diagrama de flujo correspondiente a este segmento queda definido como se muestra en la figura 3.3.1:

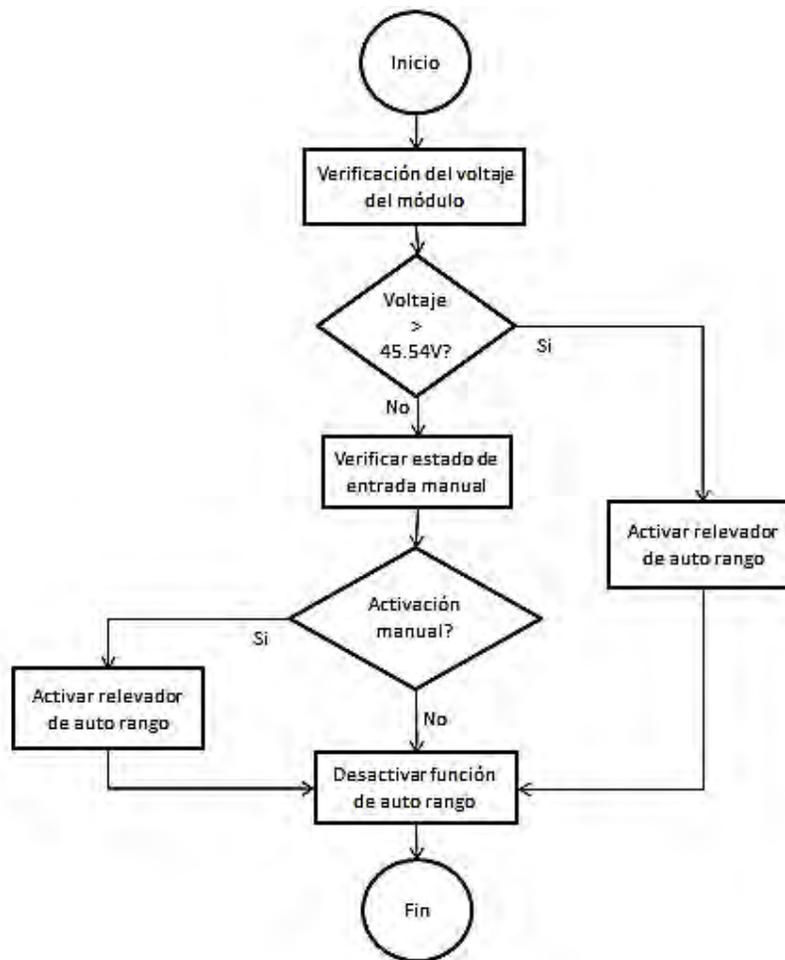


Fig. 3.3.1 Diagrama de flujo de la función de auto rango.

El valor de referencia es de 4.545 V dado que es el voltaje máximo en R_2 correspondiente a un voltaje del módulo de 50V.



Fig. 3.3.2 Selección manual de rango de medición.

Es importante resaltar que, por razones de seguridad del sistema electrónico de caracterización, el control manual solo se utilizara para cambiar el rango de 0-50V a 0-500V.

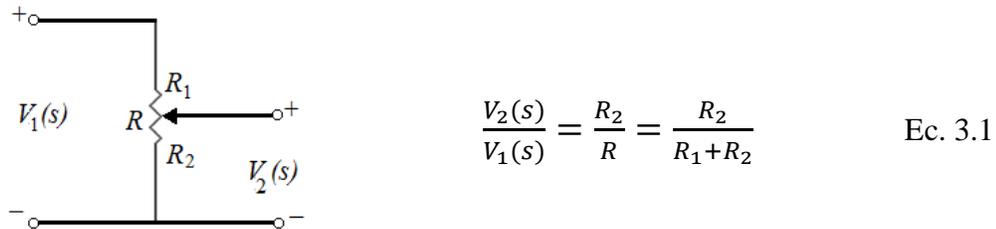


Fig. 3.3.3 Modelo de un divisor de tensión.

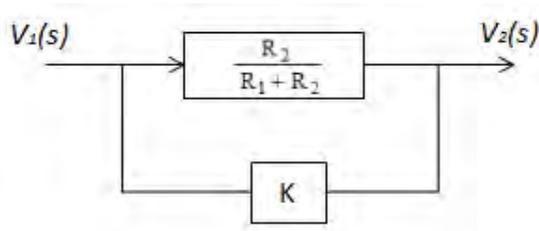
Las resistencias de 10 k Ω y la de 100 k Ω son las que definen el valor de la división del voltaje, el valor de la potencia de las resistencias se determina mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad ; \quad P = I^2 R \quad \text{Ec. 3.2}$$

Tomando en cuenta que al seleccionar el rango de 0 – 50V entra en operación la resistencia de 10 k Ω , y que para seleccionar el rango de 0 – 500V entra en operación la resistencia de 100 k Ω ; de este modo, analizando cada caso se tiene:

<p>Considerando una resistencia de 10 kΩ</p> $R_T = R_1 + R_2 = 10k\Omega + 1k\Omega = 11k\Omega$ $I = \frac{V}{R} = \frac{50V}{11,000\Omega} = 0.00454 A$ $P = I^2 R = (0.00454 A)^2 * (1,000\Omega)$ $P = 20.7 mW$	<p>Considerando una resistencia de 100 kΩ</p> $R_T = R_1 + R_2 = 100k\Omega + 1k\Omega = 101k\Omega$ $I = \frac{V}{R} = \frac{500V}{101,000\Omega} = 0.00495 A$ $P = I^2 R = (0.00495 A)^2 * (1,000 \Omega)$ $P = 24.5 mW$
--	--

Los resistores utilizados para llevar a cabo esta función de divisor de tensión tienen una capacidad de disipación de potencia de 1W, por lo que son idóneas para este fin.



$$G(s) = \frac{H(s)}{1 + H(s)G(s)}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2}}{1 + \frac{R_2 K}{R_1 + R_2}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2(1 + k)}$$

Fig.3.3.4 Diagrama de bloques del sistema de auto-rango.

El valor de la resistencia R_1 depende del voltaje de salida del divisor de tensión, en el diagrama de bloques se representa con la literal K ; es importante mencionar que el voltaje obtenido mediante el divisor de tensión es utilizado para otra función importante como lo es la detección de inversión de polaridad del módulo.

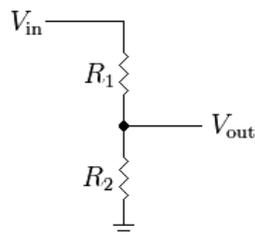
La selección del rango de medición es un proceso muy importante, ya que de no considerarlo podría provocar un malfuncionamiento del sistema de caracterización o incluso dañarlo permanentemente.

3.4. Etapa de medición de voltaje y protección contra inversión de polaridad.

La medición de voltaje se lleva a cabo en el divisor de voltaje, la salida del divisor de voltaje se encuentra conectada al canal 0 del puerto A del microcontrolador RA0 como ha sido especificado en el capítulo 2.

5.7.1. Etapa de medición de voltaje

Con este sistema de medición se pretende medir paneles de hasta 500V en corriente directa, y dado que la etapa de conversión de señal soporta solamente 5V, se acondiciona la señal de entrada utilizando un divisor de voltaje.



$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \right) \quad Ec. 3.3$$

Fig. 3.4.1.1 Divisor de tensión circuito eléctrico y formula.

Para reducir el error generado debido al rango seleccionado para la división de tensión, este sistema de medición considera dos rangos seleccionables, estos rangos de voltaje son: 0 a 50V y 0 a 500 V.

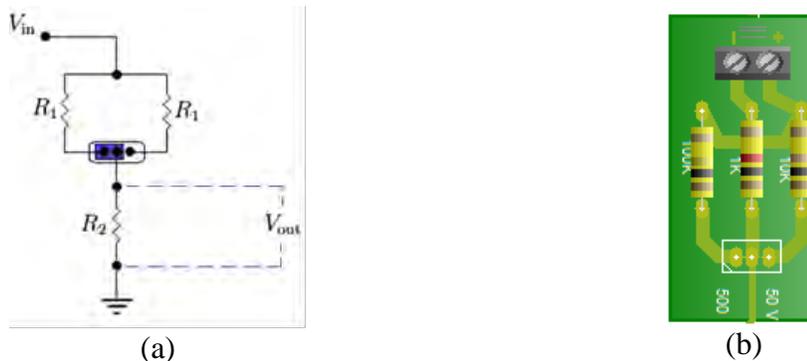


Fig. 3.4.1.2 Doble divisor de tensión, seleccionable (a) circuito eléctrico (b) circuito impreso.

Por lo que, para el primer caso, si se considera un rango de medida de 0 a 50V_{cd}, tenemos que el voltaje máximo que ingresara a la etapa de conversión será de:

$$V_{out} = 50V \left(\frac{1000\Omega}{(10000\Omega + 1000\Omega)} \right) = 4.545V$$

Caso análogo, para poder medir en el rango de voltaje de 0 a 500V se tiene:

$$V_{out} = 500V \left(\frac{1000\Omega}{(100000\Omega + 1000\Omega)} \right) = 4.95 V$$

Ambos resultados quedan dentro del rango de medida del convertidor de señal analógica a digital, que como mencionamos anteriormente es de 0 a 5V_{cd}, sin embargo, la razón por la que se ha decidido considerar dos rangos de voltaje seleccionables es para minimizar al máximo el error de escala. Es decir, no es conveniente utilizar el rango de 0 a 500V para medir, por ejemplo, 20 V, debido a que el error producido en este caso es mayor al que se produciría si utilizáramos el rango de escala de 0 a 50V, esto aun utilizando el mismo convertidor analógico digital que en este caso es de 10 bit.

Para verificar esto, se realiza la siguiente prueba con un voltaje de 20V.

Considerando a la variable “cuentas” como el número decimal correspondiente al número binario obtenido por el convertidor analógico digital.

- | | |
|---------------------------------|------------------------------------|
| $V_{in} = 20 V$ | Para un convertidor A/D de 10 bit: |
| $R_1 = 10 k\Omega, 100 k\Omega$ | Resolución = 4.88 mV |
| $R_2 = 1 k\Omega$ | |
| Resolución = 10 Bit | |
| $V_{m\acute{a}x} = 50V$ | |

Para el rango de 0 a 50 V tenemos que $R_1=10 k\Omega$:

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{1,000\Omega}{(10,000\Omega + 1,000\Omega)} \right) = V_{in}/11 \rightarrow \text{Divisor} = 11$$

Para este caso:

$$V_{out} = \frac{20V}{11} = 1.82V$$

Se convierte este valor de 1.82V, a un número binario de 10 bits

cuentas = $1.82 / 0.00488 = 372.57 \approx \underline{373}$

Al recalcular: $373 * 0.00488 * 11 = 20.023$

El error relativo es: $e = \frac{(20.023-20)}{20} \cdot 100 = 0.115 \approx \mathbf{0.12\%}$

Ahora, considerando el rango de 0 a 500 V se tiene que $R_1=100 \text{ k}\Omega$:

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{1,000\Omega}{(100,000\Omega + 1,000\Omega)} \right) = \frac{V_{in}}{101} \rightarrow \text{Divisor} = 101$$

Para este caso:

$$V_{out} = 20V / 101 = 0.198 V$$

Se convierte este valor de 0.198V, a un número binario de 10 bits:

cuentas = $0.198V / 0.00488V = 40.578 \approx \underline{41}$

Al recalcular: $41 * 0.00488 * 101 = 20.208$

Para este caso, el error relativo es: $e = \frac{(20.208-20)}{20} \cdot 100 = \mathbf{1.04\%}$

La diferencia entre los errores calculados es de casi el 900% entre ellos de aquí la importancia de contar con un rango opcional que nos permita incrementar la precisión en la medición. El divisor de voltaje es una buena solución para reducir el voltaje de entrada a niveles que la etapa de conversión acepta, pero si consideramos la corriente con la que sale el voltaje del divisor tenemos que,

$$I = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} \tag{Ec. 3.4}$$

Para $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $V_{in} = 50V$ tenemos:

$$I = \frac{50V}{10,000\Omega + 1,000\Omega} = \frac{50V}{11,000\Omega} = 0.04546A = 4.546mA$$

Para $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $V_{in} = 500V$ tenemos:

$$I = \frac{500V}{100,000\Omega + 1,000\Omega} = \frac{500V}{101,000\Omega} = 0.00495 = 4.95mA$$

El voltaje reducido se hace pasar por un amplificador operacional para reforzar su valor y se conecta al canal cero del puerto A (RA0) del microcontrolador. La tolerancia de los resistores utilizados para la realización del divisor es de 1%.

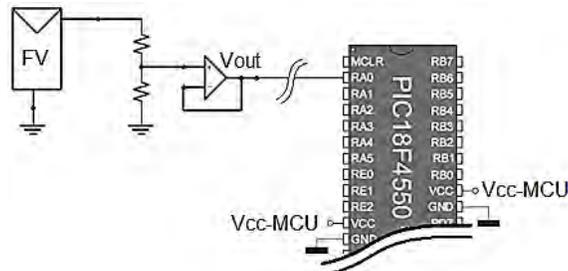


Fig. 3.4.1.3 Esquemático de modo de medición de voltaje de módulos FV o FC.

Nota: Para más información acerca del amplificador operacional consultar Anexo correspondiente.

5.7.2. Etapa de protección contra inversión de polaridad

El proyecto de medición cuenta con una etapa de protección contra inversión de polaridad en la conexión de los módulos, esta protección “abre” (desconecta) la línea principal del circuito electrónico de potencia lo que provoca un aislamiento completo entre el circuito electrónico del sistema de medición y los módulos a interconectar.

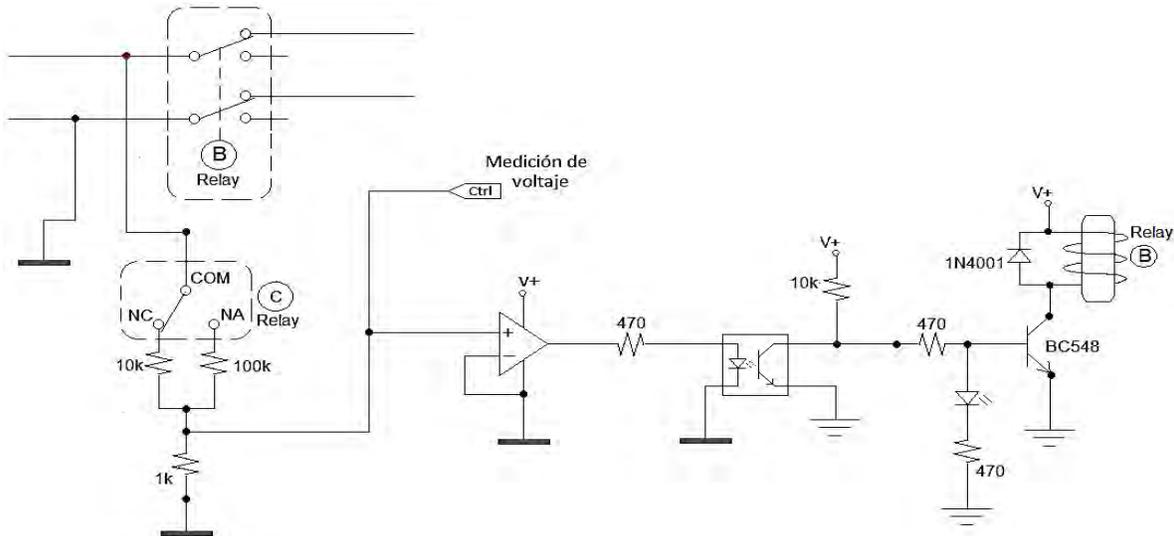


Fig. 3.4.2.1 Sistema de protección contra inversión de polaridad.

En la figura 3.4.2.1, se muestra esquemáticamente el circuito electrónico de control de la protección contra inversión de polaridad, en él se aprecian las siguientes consideraciones:

- El punto donde se obtiene el voltaje para determinación de inversión de polaridad se realiza desde el divisor de voltaje, esto nos permite definir el voltaje máximo que se suministra al optoacoplador, que para estos casos es de 5V máximo.

- Dado que tiene una impedancia de entrada muy elevada, el amplificador operacional evita que la medición de voltaje en R_2 sea afectada por la conexión del optoacoplador.
- La tierra del módulo a caracterizar está separada de la tierra del circuito electrónico de control. Esto evita cualquier problema que se pudiese suscitar en el caso de una inversión de polaridad. Una vez que el voltaje ha sido analizado y verificada la correcta conexión del módulo, se cierran los contactos del relevador lo que conecta la tierra del módulo con la del circuito de medición y control.

Este sistema de protección es muy similar al utilizado en el sistema de selección del tipo de celda, tiene gran importancia ya que, de no existir, al presentarse una inversión en las terminales donde se conectan las celdas al circuito de medición podría dañar seriamente los componentes electrónicos del sistema de medición incluso a la computadora.

3.5. Etapa de medición de corriente

Gran parte del proceso de medición tiene relación con el valor de la corriente de cada uno de los sistemas a caracterizar, una vez que se lleva a cabo la conexión de los módulos y es verificada su polaridad, la corriente generada pasa a la etapa de potencia para su posterior manipulación.

El comportamiento eléctrico de la celda solar en condiciones de iluminación, considerando la corriente fotogenerada (I_{PH}) y dado que el comportamiento de la corriente de la celda es similar a la corriente a través del diodo se tiene que,

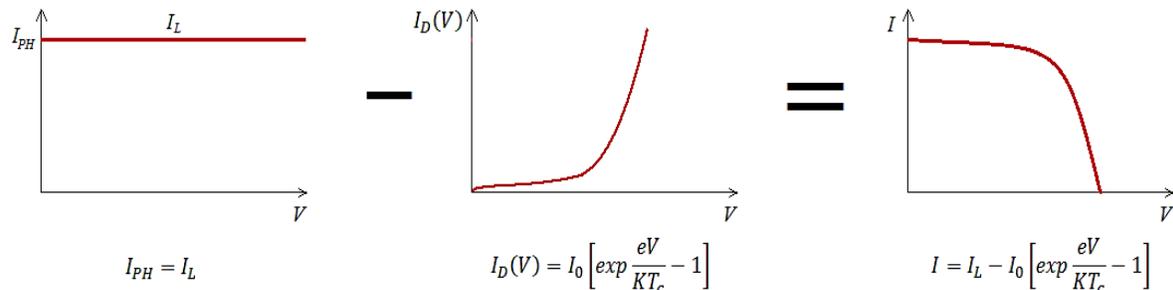


Fig. 3.5.1 Comportamiento eléctrico de una celda solar en iluminación.

Este sistema de caracterización tiene la capacidad de medir hasta 1 kW y de acuerdo a los dispositivos utilizados en el diseño, el voltaje máximo que puede medir es de 500 V y la corriente máxima es de 30 A, pero la relación de potencia máxima medida se tiene a los 55V@18A.

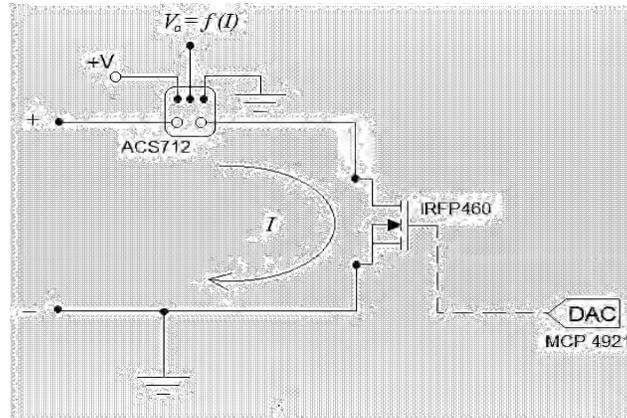


Fig. 3.5.2 Etapa de potencia del sistema de medición.

En esta etapa, la corriente a analizar pasa por el sensor de corriente ACS712, y dado que es un sensor del tipo de efecto Hall, no existen caídas de tensión adicionales debido a que la resistencia interna del mosfet R_{DS} llevara a cabo la función de resistencia variable, analizando el circuito simplificado de un módulo a caracterizar:

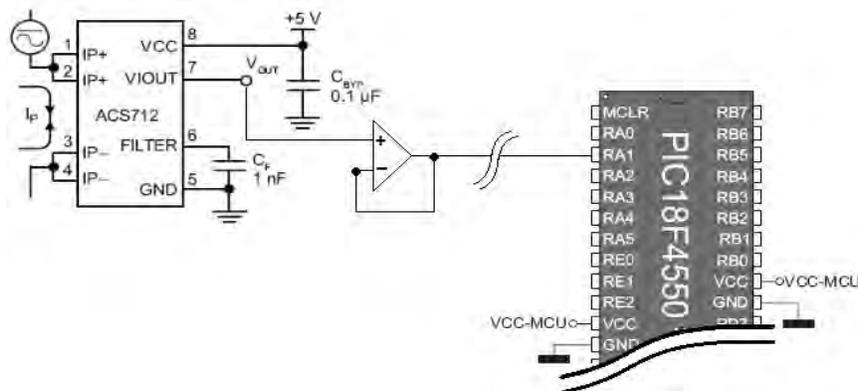


Fig. 3.5.3 Interconexión entre el sensor de corriente y el microcontrolador.

La serie ACS712 contempla tres versiones o modelos en las cuales se consideran tres rangos de corriente a medir, 5, 20 y 30A y por consiguiente la relación de la entrada contra la salida que entregan dichos sensores (sensibilidad). Para el caso del sensor de 30 A, la relación de salida es de 66mV/A.

Part Number	T_A (°C)	Optimized Range, I_p (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
ACS712ELCTR-05B-T	-40 to 85	±5	185
ACS712ELCTR-20A-T	-40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-T	-40 to 85	±30	66

Fig. 3.5.4 Rangos de trabajo y sensibilidad del ACS712

La obtención de la curva I-V implica la variación de una carga eléctrica en las terminales del módulo, como se ha comentado, la variación de esta resistencia se realiza mediante la manipulación del mosfet de potencia.

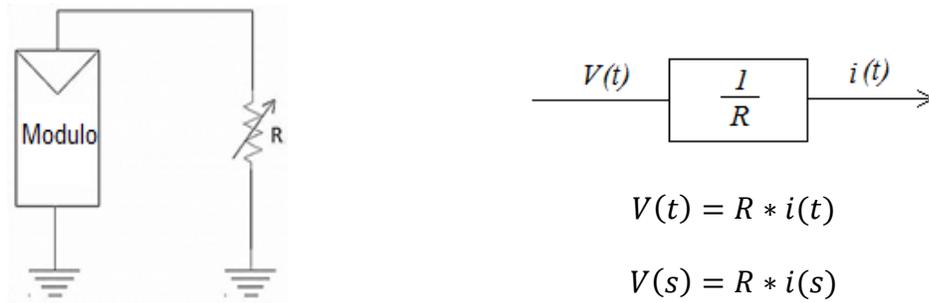


Fig. 3.5.5 Representación del mosfet como resistencia variable en las terminales del módulo.

Considerando que la resistencia R es la resistencia en las terminales *Drain* y *Source* del mosfet (R_{DS}) se tiene que,

$$R_{DS} = \frac{V_{GS} - V_T}{I_D} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Por lo que se obtiene:

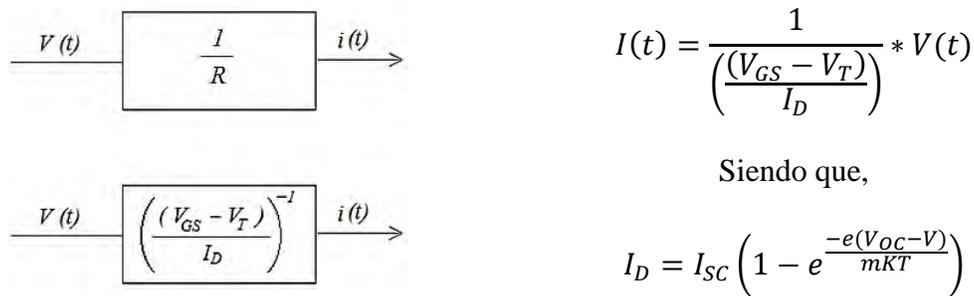


Fig. 3.5.6 Diagrama de bloques de función del mosfet como resistencia variable

La función de transferencia de este sistema queda de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{i(s)}{V(s)} = \frac{1}{R} \quad \text{Ec. 3.6}$$

de aquí que:

$$i(t) = L^{-1} \left[\frac{V(s)}{R} \right] = \frac{1}{R} V(t) \quad \text{Ec. 3.7}$$

R_{DS} depende del tipo de mosfet a utilizar, para el caso de este proyecto se considera un comportamiento de R_{DS} definido por los valores de V_{GS} como se ilustra en la figura 3.5.6.

Para el caso del mosfet IRFP460 en particular, el voltaje de compuerta V_{GS} necesario para llevar la resistencia R_{DS} desde su mínimo valor hasta su valor máximo es de 2.5 a 5V, considerando que la corriente máxima que soporta es de 18A.

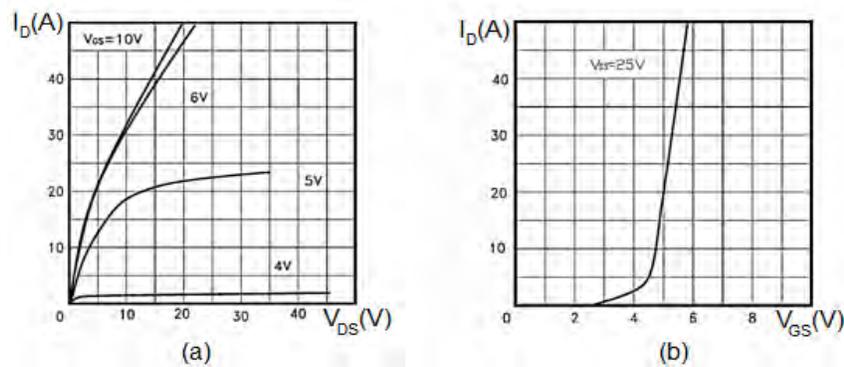


Fig. 3.5.7 Características de (a) salida y (b) de transferencia del mosfet IRFP460

Es importante mencionar que, dado el comportamiento del IRFP460 y la necesidad de tener un control total del proceso de medición, se utiliza un DAC para aplicar voltajes controlados a la compuerta de modo que se puede obtener suficientes valores para graficar de manera adecuada los pares de datos de voltaje y corriente.



Fig. 3.5.8 Voltaje de compuerta V_{GS} controlado por voltaje del DAC.

Si consideramos que la cantidad de valores que se pueden obtener del DAC son 4096 y, que solo serán útiles la mitad (de 2.5 a 5V), se espera obtener máximo 2048 valores. Esta cantidad de valores es muy grande, dada la experiencia que se tiene en el ámbito de la medición de curvas I-V, en la mayoría de los casos es suficiente con menos de 100 puntos diferentes.

La mayoría de los sistemas comerciales de medición de curvas I-V llevan a cabo interpolaciones o funciones matemáticas para definir la curva I-V a partir de una pequeña cantidad de datos obtenidos; este proyecto no funciona de esa manera, a diferencia de la mayoría de los equipos de medición comerciales, todos los datos que se muestran en la gráfica de potencia y en el archivo generado, son obtenidos mediante la medición directa.

Dado que todo el proceso de control de la medición se lleva a cabo desde la computadora, la función de variación de R_{DS} se encuentra contemplada tanto en el programa del microcontrolador como en el programa de control desde la PC. En lo que respecta al programa de control, se ha considerado la utilización de un componente visual manipulable de modo que, al variar su posición o valor interno, variara el valor del voltaje del DAC (V_{DAC}).

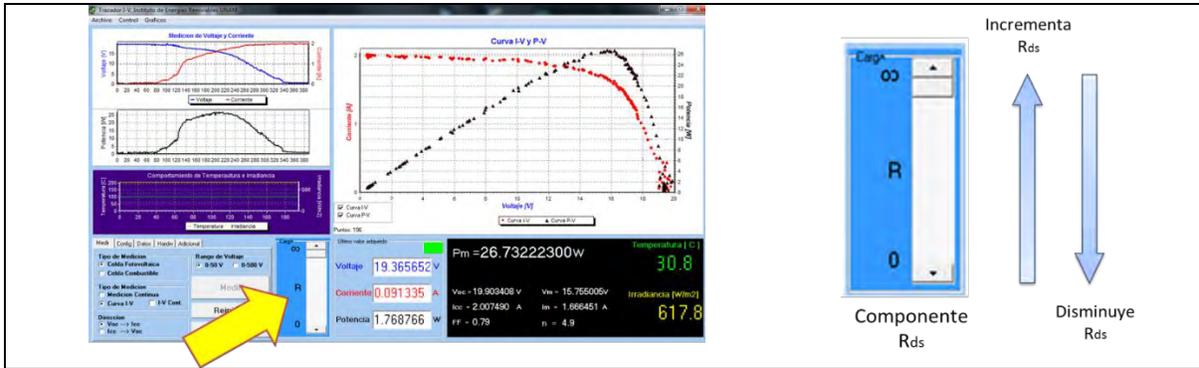


Fig. 3.5.9 Ubicación del componente visual en el programa de control para variación de R_{DS} y modo de utilización.

El código de programa que atiende la función de variación de resistencia se encuentra diseñado de manera tal que el valor de la resistencia varía instantáneamente en función del cambio en el valor del componente visual al final de cada desplazamiento.

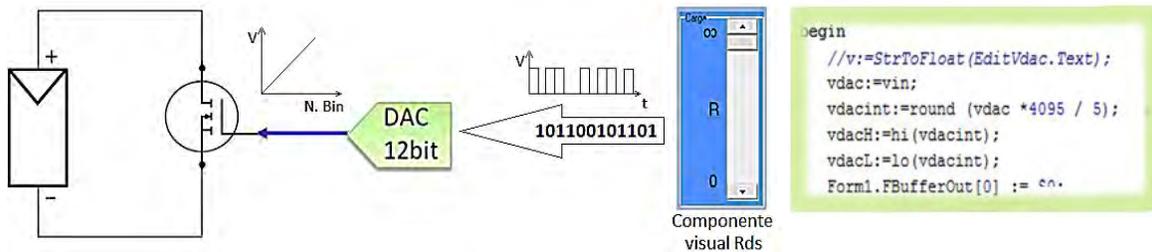


Fig. 3.5.10 El DAC como parte importante en el proceso de variación de R_{DS} .

El control total del proceso de medición implica una gama de posibilidades a desarrollar, entre ellas se encuentra la operación manual o automática del proceso de medición, por lo tanto, el funcionamiento de variación de R_{DS} dependerá del proceso de medición que se lleve a cabo, ya sea medición continua u obtención de curva I-V (o E-I según sea el caso).

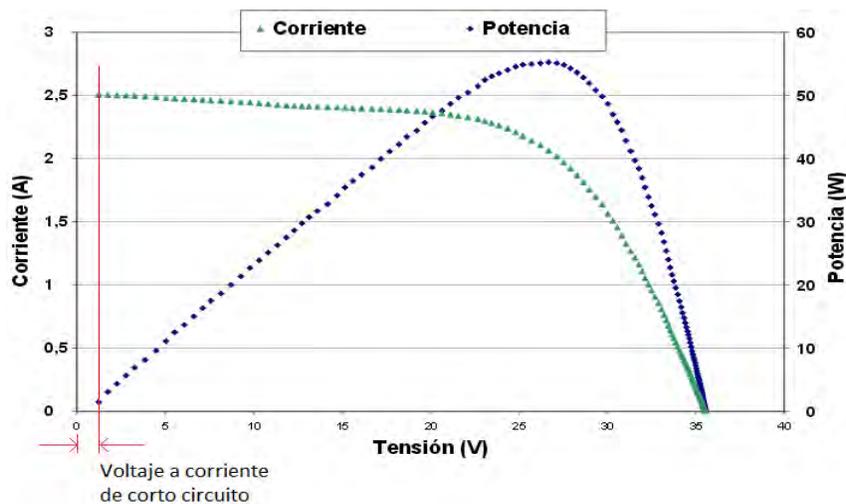


Fig. 3.5.11 Importancia del relevador para cortocircuitar terminales de la celda FV.

Como ya ha sido mencionado con anterioridad, el mosfet cuenta con una resistencia interna mínima, que no permite la obtención de la medición de la corriente de corto circuito I_{cc} , dado que al considerar valores elevados de corriente (10A en adelante), la caída de tensión en las terminales D y S se eleva con base a la relación de la ley de Ohm: $V = I * R$.

De tal modo que, mientras mayor sea la corriente de corto circuito menos es la posibilidad de obtener el valor de la corriente de corto circuito real, ésta es una de las razones por la cual se conectaron dos mosfet de potencia en paralelo.

3.6. Etapa de medición de temperatura e irradiancia.

El valor de la potencia y eficiencia de un sistema de generación de energía a partir de fuentes renovables tiene como parte fundamental las condiciones climáticas y/o físicas del entorno, ante esto, es necesario contemplar estos valores dentro del análisis de eficiencia del sistema.

Medición de la temperatura.

La medición de la temperatura es sin duda una actividad importante para efectos de caracterización eléctrica de módulos solares y de celdas de combustible, para llevar a cabo la medición de la temperatura en este proyecto, se ha dispuesto de un sensor LM335.

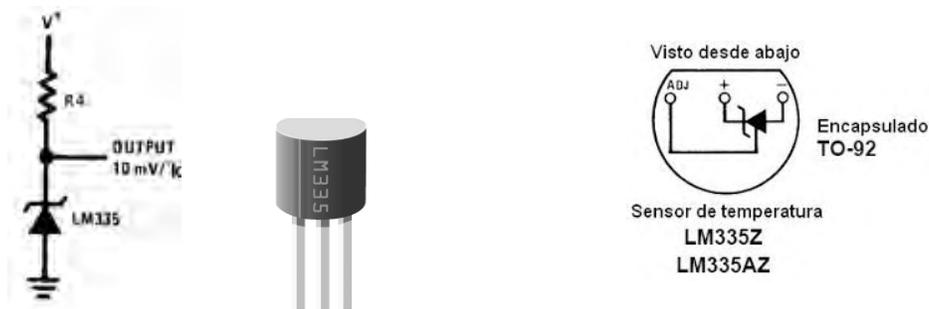


Fig. 3.6.1 Configuración interna y configuración de pines del sensor de temperatura LM335.

Es importante mencionar que, el valor de la temperatura afecta tanto en la tecnología fotovoltaica como a la de celda de combustible.

La salida del sensor de temperatura es proporcional con una sensibilidad de 10mV/°K, de modo que para estandarizar unidades, se lleva a cabo la siguiente operación:

$$Temp. [^{\circ}C] = \frac{10mV}{^{\circ}K} \cdot Temp[^{\circ}K] \quad Ec. 3.8$$

$$Temp. [^{\circ}C] = \frac{V_{LM335}}{\frac{10mV}{^{\circ}K}} = V_{LM335} * 100 - 273.15$$

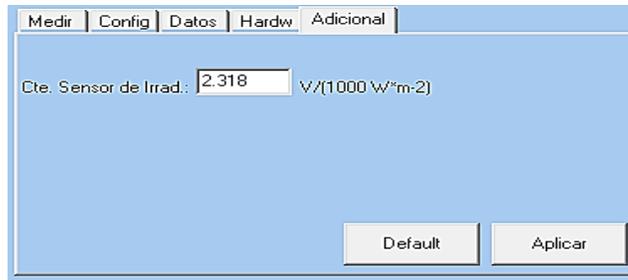


Fig. 3.6.4 Parte del programa de control donde se introduce el valor de la constante del sensor de irradiancia.

Este proyecto cuenta con una celda solar calibrada para llevar a cabo la medición de irradiancia. Es una celda de silicio policristalino con las siguientes características:

Tabla 3.6.1 Características de la celda calibrada que funciona como sensor de irradiancia.

Voltaje a circuito abierto V_{oc}	1.7V	Corriente de corto circuito I_{sc}	70mA
Voltaje a máxima potencia V_m	0.8V	Corriente a máxima potencia I_m	65mA
Potencia Máxima P_{max}	0.52W	Factor de forma F.F.	0.56
Eficiencia η	0.14	Área de captación A	5cm ²

En caso de que se deseara trabajar con otro equipo de medición de irradiancia, solo basta con introducir el valor de la constante del instrumento en la caja de diálogo mostrada en la figura 3.6.4.

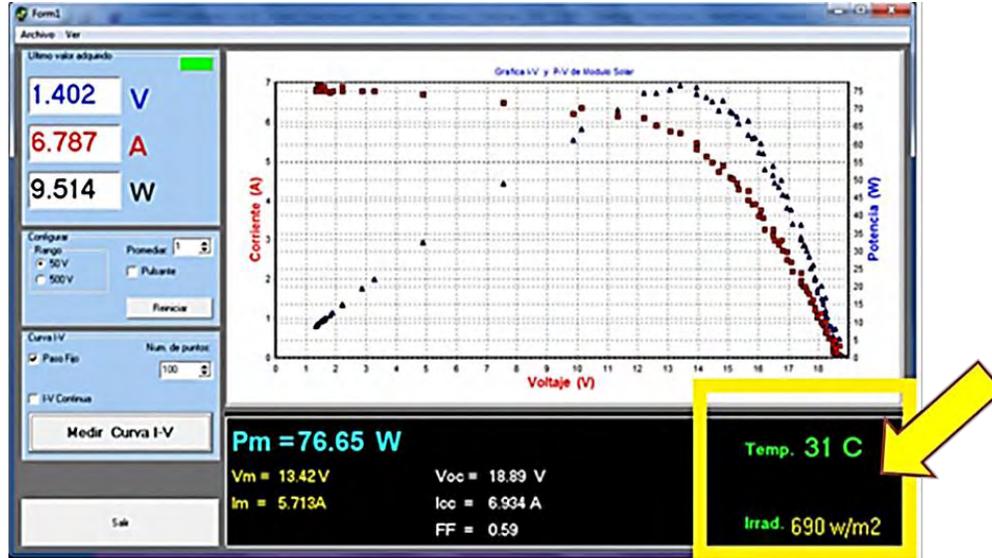


Fig. 3.6.5 Despliegado de temperatura e irradiancia en el programa de control.

Como trabajo adicional, se considera como oportunidad de mejora la implementación del circuito electrónico y el código computacional correspondiente para la conexión de diferentes tipos de sensor de temperatura entre los cuales se encuentran los termopares, RTD, etc.

3.7. Diseño de la placa de circuito impreso.

Un circuito impreso, básicamente, tiene la función de conectar eléctricamente un determinado grupo de componentes eléctricos y/o electrónicos de un determinado sistema. La elaboración de los circuitos impresos de las diferentes etapas que conforman el sistema de medición se llevó a cabo utilizando una herramienta computacional especializada para este fin. El software utilizado es el PCB Wizard, Ver. 3.5 Pro.

Entre las consideraciones más importantes a la hora de realizar un circuito impreso se encuentran:

- El espesor de la pista o track.
- La corriente que conducirá la pista.
- La temperatura por encima de la temperatura ambiente máxima que ha de soportar.
- El ancho de la pista.
- La separación mínima entre pistas de acuerdo al voltaje que han de conducir.
- La separación mínima entre sus componentes de acuerdo a la función que realizan, corriente y voltaje que trabajan.

El espesor de la pista.

Las pistas de circuitos tienen una altura ya definida y “estándar”, todos múltiplos de la unidad *Onzas por pie cuadrado*, que es como decir que tiene una altura de 35 Micras, así que:

- 1 Onza/Pie² es igual a 35 Micras de espesor.
- 2 Oz/Pie² pues 70 Micras de espesor.
- Oz/Pie pues 105 Micras de espesor.

Para el caso de este proyecto y debido a la disponibilidad, el espesor del cobre de la pista es de 35µm.

La corriente que conducirá la pista.

Dado que es un proyecto que consta de etapas de control y de potencia, trabajara tanto con circuitos electrónicos que operan con bajas corrientes así como también con circuitos electrónicos de potencia capaces de manipular más de 15 Amperes.

La temperatura máxima de operación de las pistas.

No es lo mismo permitir que la pista este a 20°C sobre la temperatura ambiente o 40°C, dependerá de la utilidad del circuito que estemos diseñando y además cuanta más potencia disipada en forma de calor más consumirá nuestro circuito así que normalmente se aplica un coeficiente térmico de 10°C sobre la temperatura ambiente.

El ancho de la pista

El ancho de una pista depende directamente de la corriente y de otros factores como la temperatura por encima de la temperatura ambiente, si es de una sola capa o de varias capas (aunque esta última solo se hace en fábricas especializadas).

La fórmula para calcular el ancho de una pista es la siguiente:

$$Ancho = \frac{Area}{Alto * 1.378} \quad Ec. 3.9$$

donde el área viene definida por esta otra fórmula.

$$Area = \left[\frac{I}{(k1 * \Delta T^{k2})} \right]^{\frac{1}{k3}} \quad Ec. 3.10$$

donde:

I = Máxima corriente que va a soportar nuestra pista [A].

ΔT = Diferencia de temperatura que vamos a permitir entre el aire y la pista [°C].

$K1$, $K2$ y $K3$ = Son constantes para el cálculo y tiene distintos valores dependiendo si la pista que calculamos es interna o externa.

Una pista es interna es la que no se puede ver y se encuentra entre las dos caras de la PCB, cuando se encuentra entre dos láminas de aislante, por ejemplo en PCB con más de dos caras. Una pista externa es la que se encuentra en alguna de las caras visibles de la PCB, como puede ser el anverso o el reverso.

Las medidas son imperiales, por lo tanto el ancho de la pista es en milésimas de pulgada y el área en milésimas de pulgada al cuadrado.

1mm = 39.4 milésimas de pulgada.

Tabla 3.7.1 Consideraciones de la constante K para diferentes modelos de pistas

Pista externa (Anverso o reverso)	Pista Interna
K1 = 0,0647	K1 = 0,0150
K2 = 0,4281	K2 = 0,5453
K3 = 0,6732	K3 = 0,7349

La fórmula resultante considerando las dos anteriores queda de la siguiente manera:

$$Ancho = \frac{\left[\frac{I}{(k1 * \Delta T^{k2})} \right]^{\frac{1}{k3}}}{Alto * 1.378} \quad Ec. 3.11$$

Si consideramos que se realizaran solo placas de circuito impreso PCB's con pistas externas, podemos aclarar la formula como:

$$Ancho = \frac{\left[\frac{I}{(0.0647 * \Delta T^{0.4281})} \right]^{1.485442662}}{Alto * 1.378} \quad Ec. 3.12$$

Es importante que quede claro que la temperatura inicial no es la del ambiente que circunda al PCB sino la temperatura de trabajo del material mismo.

El cálculo se basa en la aplicación del estándar general para el diseño de circuitos impresos ANSI-IPC 2221 desarrollado por la IPC (Association connecting electronics industries).

3.7.1. Etapa de control y de potencia.

Las etapas de control y de potencia son las etapas principales de este proyecto, la primera se encarga de gobernar las actividades de comunicación, conversión de señales y control de los dispositivos de potencia; la segunda etapa se encarga de manipular las elevadas corrientes y voltajes provenientes de los módulos FV y FC del sistema híbrido a caracterizar.

Con la finalidad de brindar protección al sistema de control, específicamente a la computadora personal desde donde se desea manipular este proyecto, el circuito electrónico se encuentra distribuido de la siguiente manera.

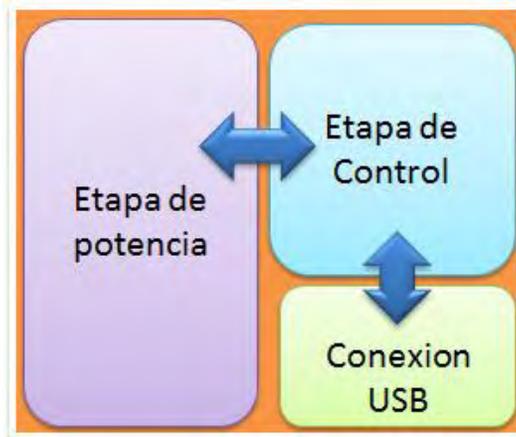


Fig. 3.7.1.1 Distribución de las etapas que conforman el circuito electrónico del sistema de caracterización.

El circuito de control se encuentra integrado por diversos circuitos electrónicos entre los cuales destaca el microcontrolador (MCU). Las funciones que realiza son:

- Recibe los voltajes provenientes de los diferentes sensores
- Establece la comunicación con la computadora
- Procesa información y manipula a los dispositivos de potencia para realizar las actividades que permitan la obtención de las curvas de eficiencia de los módulos a analizar.
- Detecta inversión de polaridad en las terminales de los módulos.
- Envía la señal para la selección de la tecnología a caracterizar.

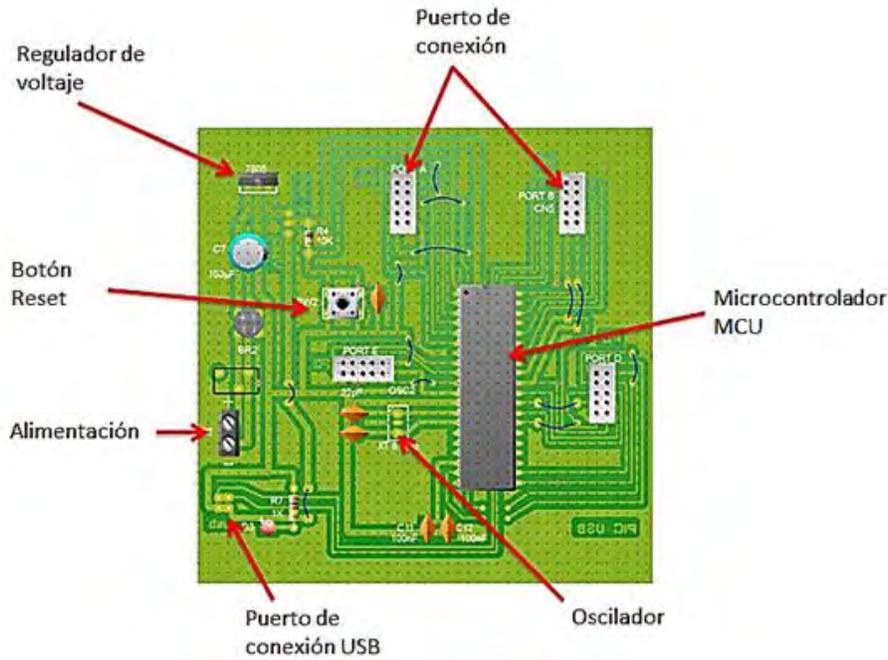


Fig. 3.7.1.2 Circuito impreso de la etapa de control.

El circuito de potencia se encarga de contener los dispositivos de electrónica de potencia que interactúan directamente con las corrientes y voltajes de los módulos a caracterizar. Asimismo, se encargan de manipular a los relevadores contenidos en el proyecto cuya función brinda las posibilidades previamente mencionadas.

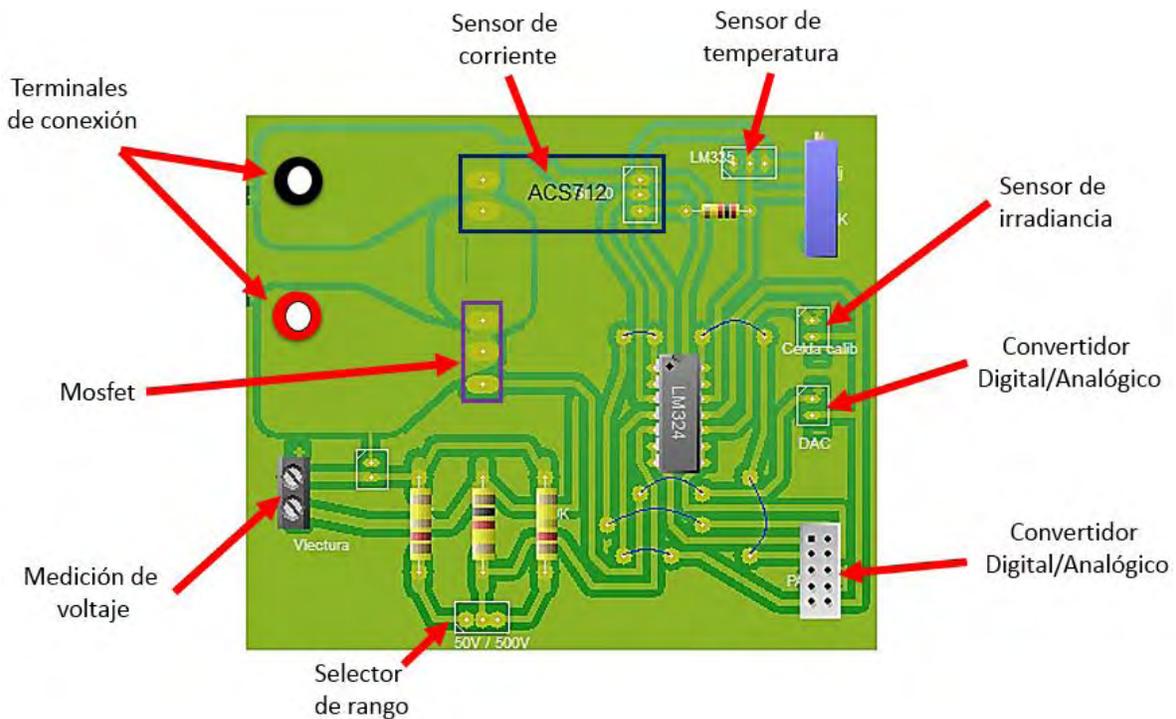


Fig. 3.7.1.3 Circuito electrónico de la etapa de potencia

Con la finalidad de evitar efectos capacitivos e inductivos producto de circuitos de alta potencia, se debe han distribuido por separado las etapas de control y de potencia. Se conoce que la capacitancia para placas paralelas viene expresada de la forma:

Capacitancia para placas paralelas

$$C = \epsilon_0 \frac{\epsilon_r A}{d} \quad \text{Ec. 3.13}$$

donde:

ϵ_0 : constante dieléctrica del vacío

ϵ_r : constante dieléctrica o permitividad relativa del material dieléctrico entre las placas.

A : el área efectiva de las placas

d : distancia entre las placas o espesor del dieléctrico

También se ha considerado evitar el efecto de capacitancias parasitas evitando el paralelismo entre pistas en lo mayor posible.

3.7.2. Cálculo de las pistas.

El cálculo de las pistas implica conocer la cantidad de corriente que circulara a través de ellas y la variación de la temperatura máxima a la que se considera someter el circuito impreso. Para el caso de este proyecto, solo consideraremos el cálculo de las pistas para la etapa de potencia, que es donde se considera la mayor afectación por efectos de calentamiento, corriente y potencia.

3.7.2.1. Para el bloque de control.

El bloque de control se encuentra conformado por circuitos electrónicos de baja potencia, por lo que las corrientes máximas no exceden los 20 mA. Dado que se han considerado las recomendaciones emitidas por la norma ANSI-IPC 2221 y que las cantidades de corriente que se manejan son mínimas, se obviara en este punto el cálculo del ancho de la pista.

3.7.2.2. Para el bloque de potencia.

El bloque de potencia contempla el paso de una corriente máxima de 18A. Ante esto, considerando una placa de cobre de 1onza/pie² (1) y una variación de temperatura de 10°C, el cálculo del ancho de la pista que pasa por el mosfet queda definida por:

$$\text{Ancho} = \frac{\left[\frac{I}{(0.0647 * \Delta T^{0.4281})} \right]^{1.485442662}}{\text{Alto} * 1.378} = \frac{\left[\frac{18}{(0.0647 * 10^{0.4281})} \right]^{1.485442662}}{1 * 1.378}$$

$$\text{Ancho} = 717.47 \text{ mil} \approx 18.21 \text{ mm}$$

La separación mínima entre 2 pistas adyacentes debe de ser 0.8 mm, lo que garantiza un buen aislamiento eléctrico de hasta 180 volts, en condiciones normales. Para el caso de las pistas que conducen el voltaje del módulo a caracterizar, la separación es de 2cm.

3.7.3. Desarrollo de un prototipo para caracterización de celdas fotovoltaicas y celdas de combustible de tipo experimental.

En el instituto donde se realizó este proyecto, se lleva a cabo la elaboración de celdas fotovoltaicas y celdas de combustible ambas de tipo experimental, es decir, celdas que generan voltajes y corrientes muy pequeños por lo que las potencias que se pueden obtener con estos dispositivos es de unas cuantas decimas de Watt. Ante esto, y con base a la idea original, se ha diseñado un sistema de medición que permite caracterizar celdas fotovoltaicas y celdas de combustible de baja potencia fabricadas a nivel laboratorio.

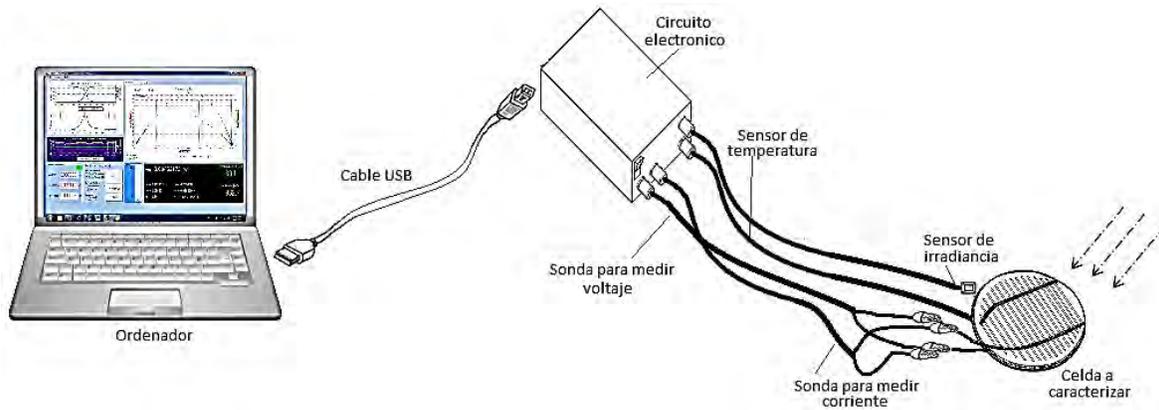


Fig. 4.2.1.4 Sistema de medición de curvas I-V y E-I de celdas experimentales.

El sistema de medición opera mediante la técnica de las 4 puntas o sonda Kelvin, esto es, cuenta con una sonda mediante la cual se mide corriente y una sonda por separado que permite medir el valor del voltaje (o potencial cuando se trata de celdas de combustible). La figura siguiente muestra el sistema terminado cuyas características se mencionan a continuación.

De acuerdo a los resultados obtenidos se tiene un prototipo con las siguientes características:

- Consumo de potencia: 0.47W
- Rango de voltaje: 0-5V
- Resolución (V): 4.88 mV
- Rango de corriente: 0-500mA
- Resolución (A): 95 μ A
- Sensibilidad (voltaje): 1V/V
- Sensibilidad (corriente): 50mA/V
- Repetitividad: 96%
- Frecuencia: 0.47kHz
- Rango de temperatura: 0-90°C
- Sensor de irradiancia: 2.318 V/1000W/m²
- Rango de irradiancia: (definido por el sensor utilizado)
- Potencia máxima de medición: 2W

Capítulo 4

Consideraciones generales de las mediciones realizadas.

Una herramienta importante en el diseño y construcción de cualquier dispositivo es contar con un modelo matemático del sistema, esto nos permite tener en cuenta los parámetros que determinan el funcionamiento sistema. La celda solar puede modelarse por medio del circuito equivalente mostrado en la figura 3, empleando las leyes de teoría de circuitos se obtiene el siguiente modelo matemático para la celda solar ^[4]:

$$I = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{A_0 k_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

Para efectos de estudio, se han llevado a cabo una serie de mediciones a diferentes tipos de módulos para verificar el correcto funcionamiento del sistema de caracterización, iniciando con la medición de curvas de potencia de módulos fotovoltaicos y de celda de combustible y finalizando con la comparación de curvas obtenidas a un módulo con celdas sombreadas.

4.1. Caracterización de módulos fotovoltaicos.

Se han llevado a cabo la caracterización de módulos fotovoltaicos de diferentes marcas y potencias, obteniendo las curvas I-V, P-V, factor de forma y eficiencias.

Tabla 4.1 Datos de placa de Módulos caracterizados con el prototipo de medición.

Marca	Modelo	Potencia [W _P]	V _{oc} [V]	I _{sc} [A]	V _m [V]	I _m [A]
KYOCERA	KC80-01	80	21.5	4.97	16.9	4.73
KYOCERA	KC125TM	125	21.7	8.0	17.4	7.20
KYOCERA	KC130TM	130	21.9	8.02	17.6	7.39
SOLARTEC	S36PC-145	145	22.61	8.11	19.01	7.63
SOLARTEC	S60PC-250	250	37.85	8.65	30.12	8.30
SILIKEN	SLK60P6L	250	37.1	8.91	29.8	8.39
ERDM	MM6-130	130	21.63	8.90	17.08	7.64

También se han interconectado diferentes módulos en serie y paralelo con la finalidad de observar el comportamiento de los mismos. Los datos de placa de los módulos fotovoltaicos analizados se presentan en la siguiente tabla 4.1.

Es necesario recordar que los datos de placa de los módulos fotovoltaicos son mediciones realizadas en condiciones estándares de prueba STC, estas pruebas se realizan a nivel laboratorio estableciendo, de manera controlada, una irradiancia G de $1,000\text{W}/\text{m}^2$, masa de aire A.M. 1.5 y una temperatura de 20°C .

4.1.1. Consideraciones generales de las mediciones realizadas.

Los valores que se presentaron fueron medidos en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM ubicado en la ciudad de Temixco Morelos, México. Coordenadas: Lat. 18.839 N , Long. 99.235 O en diferentes condiciones de irradiancia y temperatura.



Fig. 4.1.1.1 Mapa del sitio donde se llevaron a cabo las mediciones para caracterización de los módulos fotovoltaicos.

La información considerada como base de la irradiancia fue tomada de la estación colorimétrica que se puede obtener directamente de la página web del Instituto.

4.1.2. Caracterización de módulos fotovoltaicos.

Para verificar el funcionamiento de este prototipo de medición, se llevaron a cabo la caracterización de diferentes módulos. A continuación se muestra el modo de presentación de la información obtenida de uno de ellos.

Es importante mencionar que todos los valores presentados tanto numéricamente como de manera gráfica son obtenidos mediante la realización de mediciones directas, es decir, no han

sido sometidos a ningún tratamiento matemático de ajuste. Los datos almacenados en el archivo generado corresponden a los puntos mostrados en la gráfica correspondiente.

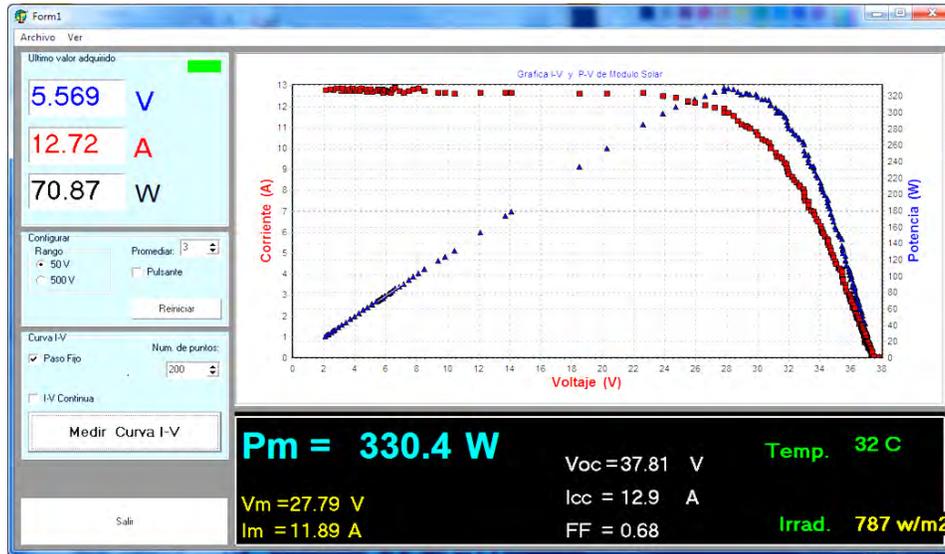


Fig. 4.1.2.1 Curva I-V obtenida con el prototipo de medición.

El análisis de resultados de las mediciones realizadas a los diferentes módulos se presentan en el capítulo 5.

Las figuras anteriores son imágenes capturadas del programa de control en operación, el procesamiento de los datos en otros programas computacionales especializados se presentaran en la capítulo 5.

4.1.3. Efecto de las sombras en los módulos fotovoltaicos.

Claro está que un módulo fotovoltaico necesita de luz solar para generar potencia eléctrica, existen situaciones en las que por algún motivo el módulo ya instalado es susceptible a sombras derivadas por postes, árboles o cualquier otro objeto que impide el paso de luz hacia una de sus celdas, este sombreado reduce en gran cantidad la potencia generada por el módulo.

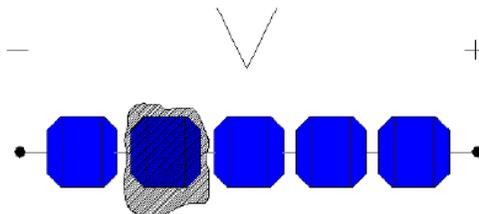


Fig. 4.1.3.1 Módulo fotovoltaico con una celda solar sometida a sombreado.

En un panel fotovoltaico, si una celda no recibe incidencia solar, perderá el voltaje fotogenerado, pero continuara teniendo la corriente de la cadena, gracias al hecho de que se encuentran conectadas en serie con el resto de las celdas operativas.

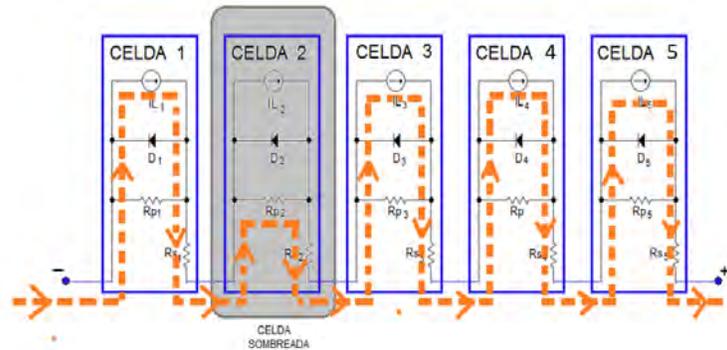


Fig. 4.1.3.2 Efecto de la trayectoria de la corriente en un módulo fotovoltaico con una celda sometida a efecto de sombreado.

Al no tener voltaje generado internamente, la celda no puede producir energía, en lugar de eso, actúa como carga, produciendo una pérdida local y calor.

Medición de módulos con área sombreada.

La caracterización de módulos fotovoltaicos sometidos a sombra se realizó utilizando como objeto generador de sombra un cartón que se pegó mediante cinta adhesiva con la finalidad de evitar cualquier probable infiltración de luz a la celda que se necesita sombrear.

De acuerdo con estudios realizados en el estado del arte, se presentan resultados de módulos sometidos a sombreado donde se han obtenido los siguientes patrones de curvas características.

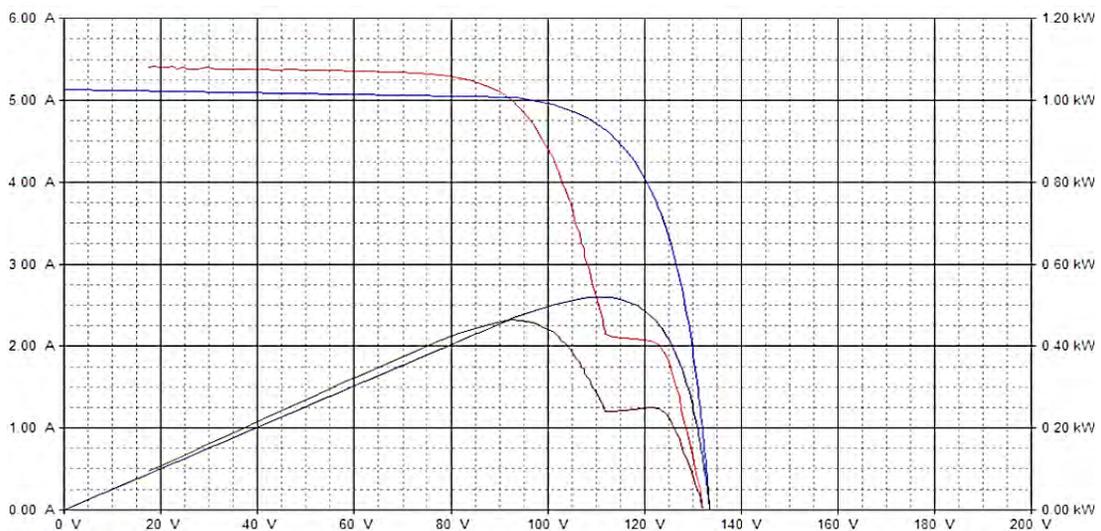


Fig. 4.1.3.3 Comportamiento I-V y P-V de tres módulos fotovoltaicos con una línea de celdas sombreadas.

Para la realización de pruebas experimentales relacionadas con el comportamiento de los módulos sometidos a condiciones de sombreado, se ha utilizado un módulo fotovoltaico marca SILIKEN de 250W de potencia pico y un módulo fotovoltaico Policristalino marca SuKam de 320Wp.

Pérdidas relacionadas con el sombreado.

La pérdida de corriente no es proporcional a la zona sombreada, y puede pasar desapercibida si es una zona pequeña de sombreado suave. Sin embargo, si hay más celdas sombreadas más allá del límite crítico, la curva I-V baja el voltaje de funcionamiento de la cadena haciendo que la corriente caiga a cero, perdiéndose así toda la energía de la celda. Es evidente que la curva I-V de un módulo FV se ve afectada por las sombras, dependiendo del área sombreada y la radiación recibida en dicha área.

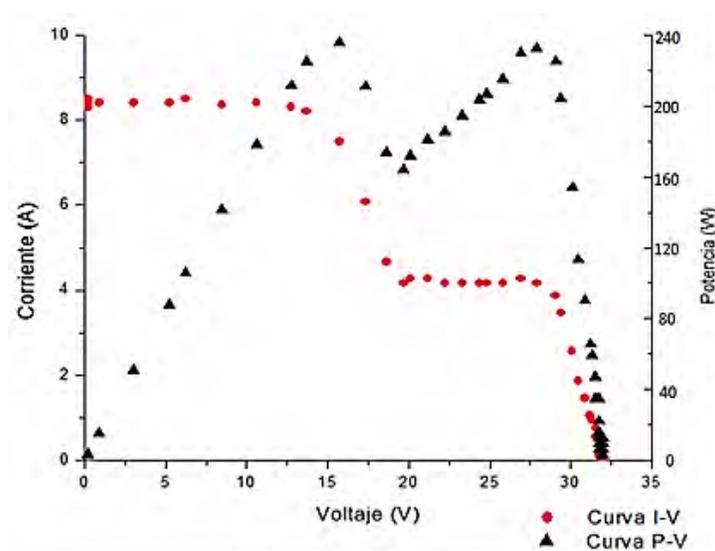


Fig. 4.1.3.4 Representación de los valores de potencia que se pueden obtener en un módulo fotovoltaico sometido a sombreado.

Otro factor que determina la afectación de las sombras en los módulos fotovoltaicos y por lo tanto la curva característica I-V es la configuración de las conexiones eléctricas entre las celdas y los diodos de bypass. Los diodos de bypass están instalados en los módulos para prevenir el consumo de energía cuando las celdas están sombreadas o dañadas, estos diodos también tienen la función de prevenir que las celdas no trabajen cerca de la zona de avalancha.

4.2. Caracterización de la celda de combustible tipo PEM.

La versatilidad de este proyecto tiene que ver con la caracterización de módulos fotovoltaicos y módulos de celdas de combustible. En este apartado se considera la utilización de un módulo de celda de combustible comercial de membrana de intercambio protónico (PEM). Existen varios métodos para llevar a cabo la caracterización eléctrica de celdas de combustible, algunos de ellos permiten la obtención de modelos mediante el uso de instrumentación electrónica y software especializados tales como Matlab/Simulink^[24].

La caracterización de las celdas de combustible es de gran interés ya que permite conocer el comportamiento de las celdas de combustible en régimen transitorio y permite conocer la respuesta del dispositivo ante perturbaciones que pudieran ocurrir durante su operación. Esta respuesta genera información importante para el diseño y la construcción de sistemas de acondicionamiento de potencia eficientes y la formulación de estrategias de control^[25,26,27,28].

Un subproducto de este proyecto es la modificación a los componentes electrónicos del prototipo, sin afectar la estructura o idea original, esto con la finalidad de medir celdas fotovoltaicas o de combustible de tipo experimental, es decir, de baja potencia. Este subproducto es una necesidad en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM en el cual se fabrican ambos tipos de celdas experimentales del cual se presentaran pruebas de su funcionamiento en el capítulo posterior.

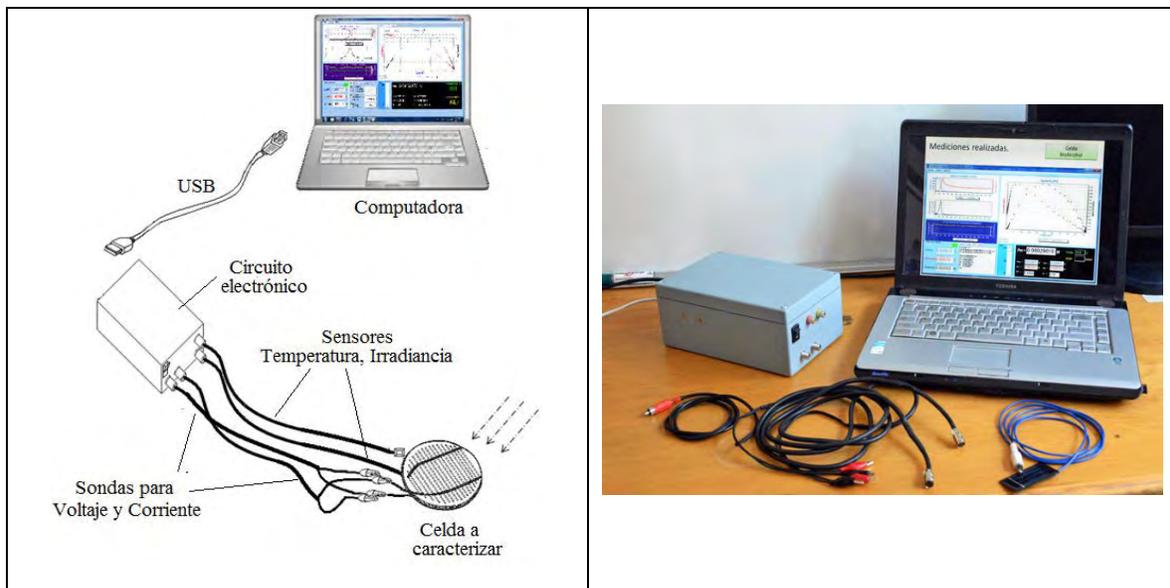


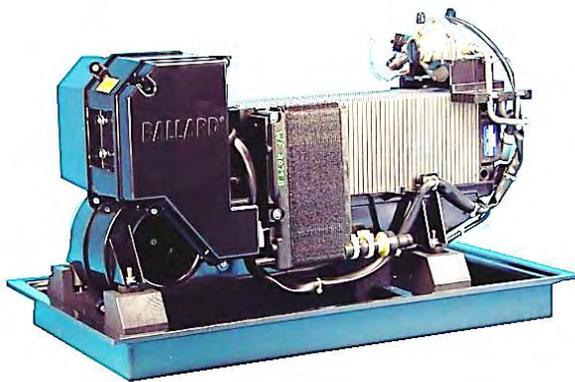
Fig. 4.2.1 Prototipo del sistema de caracterización de celdas experimentales

En general, es un prototipo de muy bajo costo comparado con equipos comerciales que se utilizan para este fin ya que está basado en la utilización de componentes electrónicos comerciales. El prototipo en su forma general se presenta en la figura 4.2.1.

4.2.1. Consideraciones generales de la celda de combustible y las mediciones realizadas.

La celda de combustible que se ha utilizado como parte sustancial de este proyecto es de tipo de membrana de intercambio protónico (PEM) de 1.2kW de potencia perteneciente al grupo de hidrogeno del Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

La pila Nexa consta de 47 celdas. Cada una consta de una parte de ánodo, membrana y cátodo de 110 cm². El sistema dispone de una humidificación auto regulable, además de un sistema de enfriamiento por disipación haciendo uso de corriente de aire forzada mediante un ventilador.



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Funcionamiento:

Potencia neta nominal	1200 W
Rango tensión CC	22 a 50 V
Voltaje nominal	26 V
Intensidad nominal	46 A

Combustible:

Pureza	≥ 99,99% H ₂ (vol)
Presión de suministro	0.7 a 17 bar
Consumo	≤ 18.5 SLPM(870 l/h)

Emisiones:

Agua	≤ 870 ml/h máximo
Ruido	≤ 72 dBA a 1m

Datos físicos:

Largo x ancho x alto	56 x 25 x 33 cm
Peso	13 kg

Fig. 4.2.1.1 Celda de combustible tipo PEM de 1.2 kW.

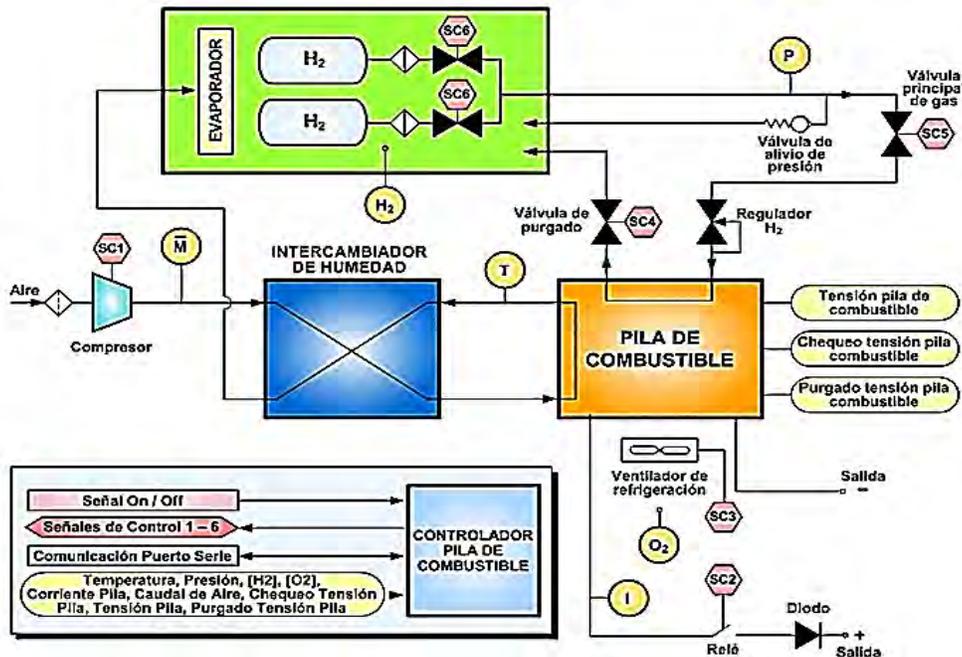


Fig. 4.2.1.2 Dispositivos que integran el módulo NEXA.

El Nexa convierte el hidrógeno y oxígeno (del aire) en hasta 1200 Watts de energía eléctrica en corriente continua no regulada. Los únicos residuos son agua y calor. Todos los componentes auxiliares necesarios están integrados en este módulo: compresor de aire, turbina de refrigeración, humidificador, válvula de purgado, regulador de presión y control mediante microprocesador.

El módulo Nexa (Ballard Power Systems Inc.), [29] es un sistema de pila de combustible que está totalmente automatizado. En la siguiente figura se indican los diferentes dispositivos que integran este sistema. Es importante mencionar que, dadas las características del prototipo de medición, la corriente máxima que puede analizar es de 20 Amperes.

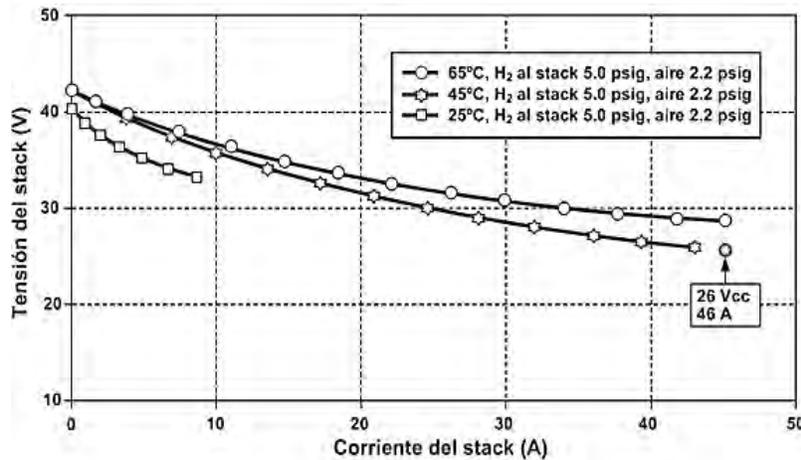


Fig. 4.2.1.3 Características del stack a diferentes temperaturas.

Los valores máximos experimentales obtenidos son de 16 Amperes, por lo que no tiene la capacidad de medir la corriente de 46 A que maneja este módulo, solo se llevó a cabo la medición del valor del potencial a circuito abierto de donde se obtuvo la gráfica mostrada en la figura 4.2.1.3. Para estudiar las características de la resistencia interna equivalente utilizamos el circuito de la siguiente figura:

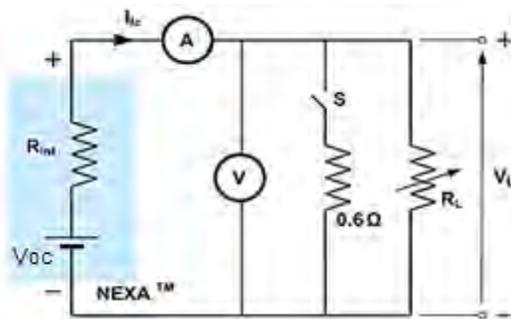


Fig. 4.2.1.4 Medida de la resistencia interna equivalente.

En este circuito, V_{oc} es la tensión en circuito abierto, I_{fc} es la corriente de salida del módulo, R_L es la resistencia de carga y V_L es la tensión de salida del módulo cuando se conecta la carga. La resistencia de 0.6Ω se conecta y desconecta frecuentemente mediante el interruptor

S, para mantener la temperatura del stack en los niveles deseados para efectuar las mediciones. Ajustando la carga, obtenemos diferentes tensiones de salida del módulo. La resistencia interna equivalente puede ser calculada mediante la expresión:

$$R_{in} = \frac{V_{oc} - V_L}{I_{fc}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Al conectar la carga, la tensión de salida, V_L , es siempre inferior a la tensión en circuito abierto, V_{oc} , porque aparecen algunas caídas de tensión, producidas por pérdidas de activación, pérdidas óhmicas y pérdidas de concentración. En consecuencia, aparecen las resistencias equivalentes de activación, óhmica y de concentración, respectivamente.

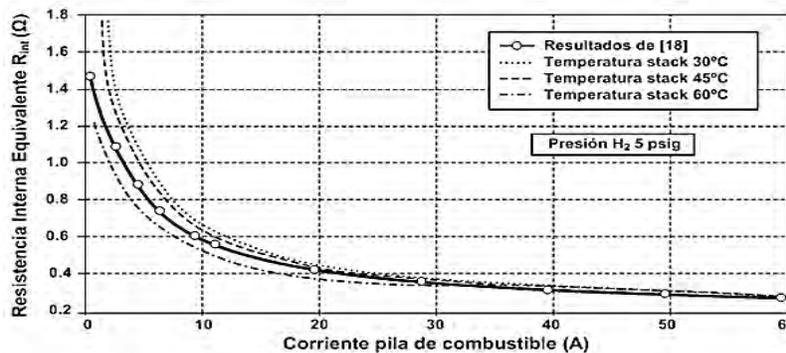


Fig. 4.2.1.5 Resistencia interna en función de la corriente en el stack..

En relación al hidrógeno consumido, este procede desde un sistema de almacenamiento presurizado, y se inyecta con unas condiciones iniciales de 12.7 bars. Cuando el hidrógeno se consume por el sistema de pila de combustible, su presión decrece, tal y como se puede observar en la figura 4.2.1.5. La tasa de consumo de hidrógeno es proporcional a la densidad de corriente, como se puede observar en la figura 4.2.1.5, de acuerdo a la primera Ley de Faraday. En una de pila de combustible, la variación de la energía libre de Gibbs viene definida como se expresa en la siguiente ecuación ^[30],

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad \text{Ec. 4.2}$$

El término $T \cdot \Delta S$ corresponde al calor liberado al exterior por el sistema de pila de combustible. En este sentido, en la figura 4.2.1.5 se puede observar la temperatura ambiente, la temperatura del stack, la temperatura de salida del aire para el enfriamiento y el caudal de aire para el enfriamiento

Para observar el funcionamiento del sistema de medición, se han realizado mediciones a celdas experimentales con la finalidad de observar el comportamiento tanto del sistema de caracterización como de los diferentes módulos de celdas de combustible.

La figura 4.2.1.4 muestra el comportamiento típico de una curva potencial-corriente (E-I) de una celda combustible. Se hace evidente el comportamiento inestable del potencial cuando se acerca al valor de la corriente de corto circuito, esta inestabilidad es un defecto común presente en los diferentes tipos de celdas de combustible.

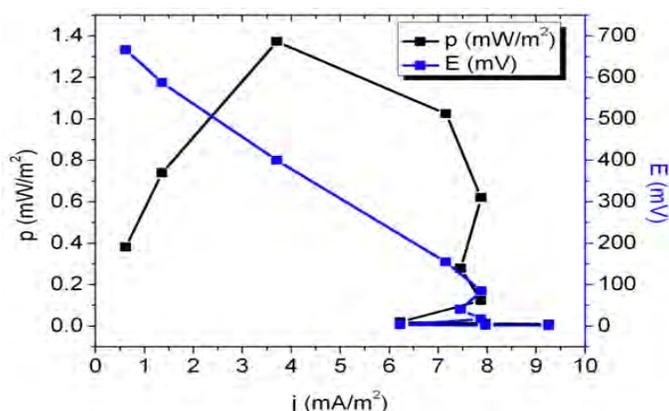


Fig. 4.2.1.6 Curva E-I de una celda de combustible.

Es necesario considerar que los elementos importantes de una celda de combustible (como la membrana) se deterioran o dañan permanentemente si las terminales se someten a corto circuito total. Ante esto, es recomendable que al variar la carga en las terminales del circuito no se llegue al corto circuito total ($R_L = 0\Omega$), sino dejar un valor mínimo de resistencia tal que contemple la mayor parte de la forma de onda que proporciona una corriente estable, en la figura 4.2.1.2 este valor corresponde a un potencial de 90mV y una densidad de corriente de $7.9\text{mA}/\text{cm}^2$.

En el estado del arte se recomienda no someter la celda de combustible a más del 70% del cortocircuito, sin embargo, el programa de control puede configurarse de acuerdo al tipo de celda que se desea caracterizar.

4.3. Caracterización del sistema de medición basado en la integración hardware-software.

El sistema electrónico para caracterización de celdas cuenta con las siguientes especificaciones:

Especificaciones eléctricas

Alimentación : Batería de 12 volts 3.7 A-h
 Consumo en operación : 12V, 0.67A
 Consumo en reposo : 12V, 0.0715A

Especificaciones técnicas del prototipo

Manejo : Sistema portable
 Control : Por software
 Interfaz de comunicación : USB
 Temperatura de operación : 75 °C máx

Especificaciones de medición

Canales de medición	: 4
Tiempo entre mediciones	: 1.2 ms
Rango de voltajes	: Seleccionable: (a) 0-50 Vcd, (b) 0 – 500 Vcd
Rango de corriente	: 0 – 15 A
Resolución	: 4.88mV (rango de 0 a 50V), 0.488V (rango de 0 a 500V)
Rango de temperatura	: 0 – 100 °C definida por el sensor
Rango de irradiancia	: > 1,000 W/m ² (depende del sensor utilizado)
Sensibilidad (Voltaje)	: Rango 0-50V →100mV/V; Rango 0-500V →10mV/V
Sensibilidad (Corriente)	: 66mV/A

Especificaciones físicas

Dimensiones	: 35cm x 25cm x 15cm
Peso	: 0.85 kg
Terminal de conexión	: Jack Banana Ø6mm / Conector tipo MC-4

Capítulo 5

Experimentación y resultados

En éste capítulo, a diferencia del capítulo anterior en el que se muestra el modo en el que se llevan a cabo los diferentes procesos del sistema de medición, se presentan mediciones realizadas a diferentes módulos tanto fotovoltaicos como de celdas de combustible, asimismo, se muestran gráficos obtenidos directamente del sistema de medición en comparación con los datos graficados en hojas de cálculo, específicamente Origin. También se muestra una comparativa de una medición realizada con éste prototipo de medición y un trazador I-V comercial.

En el proceso de obtención de curvas se realizaron pruebas para la utilización de un capacitor como resistencia variable pero, aunque se obtuvieron curvas características de algunas muestras, el proceso de medición era muy cambiante ya que el tiempo de medición dependía de la corriente, esto obligaba a la modificación de parámetros entre cada medición por lo que no se obtuvo un control total del proceso de medición y de los componentes que integran la tarjeta electrónica. Ante esto, se optó por buscar otra manera de llevar a cabo el barrido de pares de datos de voltaje y corriente de manera controlada para la obtención de la curva correspondiente en los módulos a analizar, esto se logró con la utilización de un dispositivo electrónico de potencia (mosfet) como resistencia variable.

5.7.1. El proceso de selección del tipo de módulo a analizar.

El proceso de selección de tecnología a analizar (fotovoltaica o celda de combustible) se lleva a cabo de manera satisfactoria mediante la utilización de un relevador doble y realiza varias funciones entre las que se encuentran:

- Manipula el relevador electromecánico para seleccionar físicamente el módulo.
- Ajustar el modo de visualización de las mediciones obtenidas.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, esta acción de selección se realiza mediante el software de control desde la PC.

El cambio del tipo de módulo tiene una respuesta de 0.125 segundos lo que es suficiente para dar tiempo al inicio de cualquier tipo de medición, sea curva I-V o medición continua.

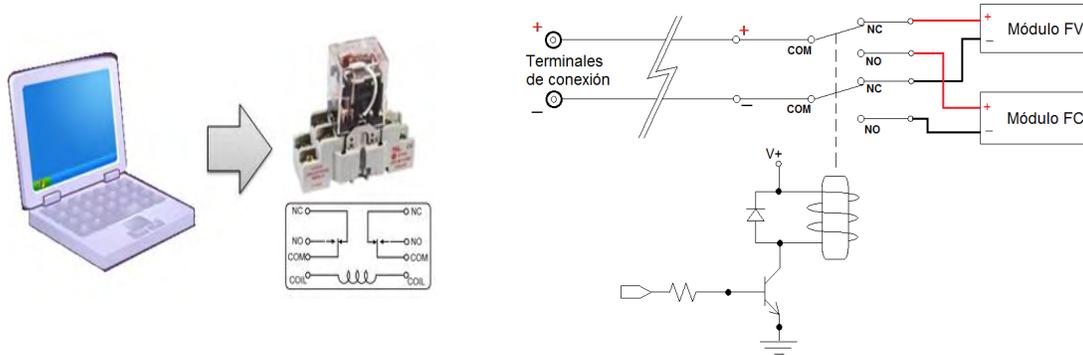


Fig. 5.1.1 Relevador doble utilizado para la selección de tecnología a caracterizar.

La corriente utilizada para la manipulación de los diferentes relevadores se provee desde una fuente de 12V que forma parte del sistema de medición.

5.7.2. Análisis del proceso de protección contra inversión de polaridad.

El sistema de protección contra inversión de polaridad se encuentra contenido en la etapa de potencia del prototipo y el proceso que lleva a cabo es proteger al circuito electrónico de control, ya que este último está diseñado a partir de un convertidor analógico digital contenido en un microcontrolador por lo cual solamente procesa voltajes positivos en su entrada.

El tiempo de reacción está determinado por el circuito de detección diseñado a partir de amplificadores operacionales en configuración de comparador de voltaje. El circuito de protección es independiente del programa de control por lo que opera sin influencia de la computadora el microcontrolador, así, el tiempo de reacción del relevador encargado en este proceso es de máximo 0.035s.

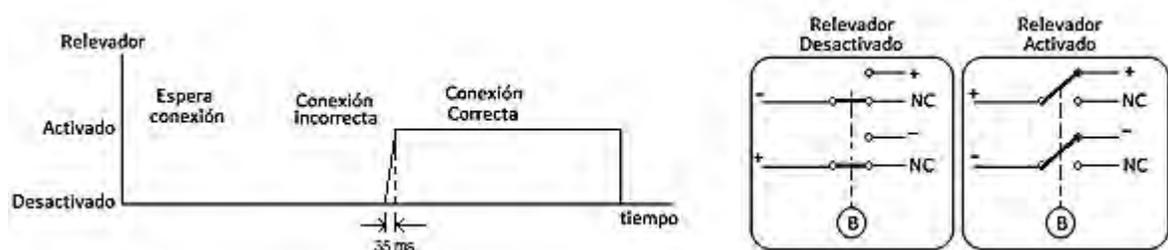


Fig. 5.2.1 Modo de operación del proceso de protección contra inversión de polaridad.

Al inicio del proceso de caracterización, el relevador de protección se encuentra desactivado, esto mantiene desconectado el módulo a caracterizar del sistema de control. En caso de que se lleve a cabo una medición incorrecta (polarización invertida), este sistema permanecerá

desactivado. Solo se activara cuando la polarización sea la adecuada. La energía consumida por esta etapa de protección es suministrada por una fuente externa, ante esto, no se producen errores en la medición por caídas de tensión o perturbaciones en el sistema.

5.7.3. Curvas I-V de módulos fotovoltaicos.

Las curvas I-V obtenidas a partir de la utilización de este prototipo se muestran a continuación, en las que se pueden observar los diferentes valores en tiempo real de lo que sucede con los parámetros eléctricos del módulo (ya sea fotovoltaico o celda de combustible) y con las condiciones físicas a las que se encuentra sometido.

5.3.1. Caracterización de módulo fotovoltaico SILIKEN SLK60P6L.

Tabla 5.3.1.1 Datos de placa y obtenidos del módulo FV *SLK60P6L*.

Módulo Fotovoltaico							
Marca: SILIKEN	Modelo: SLK60P6L	Potencia: 250W					
Tipo: Silicio Policristalino	N. Celdas: 60	Área: 1.62 m ²					
Datos Obtenidos							
Irradiancia: 908 W/m ²	$P_{m\acute{a}x}$	V_{oc}	I_{sc}	V_m	I_m	F.F.	Efic.
Temp _{Amb.} : 29 °C	[W _p]	[V]	[A]	[V]	[A]		[%]
Datos de placa (STC)	250	37.1	8.91	29.8	8.39	0.756	15.4
Datos obtenidos	205.14	38.0	8.5	27.7	7.75	0.635	13.9

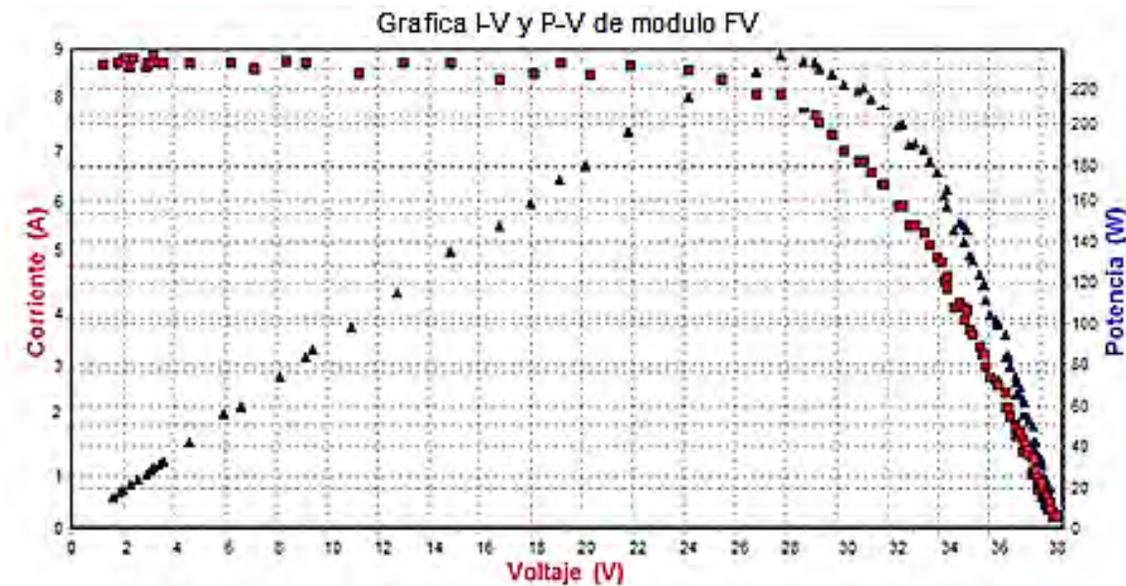


Fig. 5.3.1.1 Curva I-V y P-V del módulo SILIKEN SLK60P6L

El tiempo de realización de este grafico es de 0.65 segundos. Este tiempo depende de la cantidad de mediciones a promediar, para este caso particular se han realizado y promediado 5 mediciones por cada punto.

Según la tabla anterior, los datos de placa corresponden a la caracterización de este módulo en condiciones estándares de prueba (STC) que es, como ya se ha mencionado, una irradiancia de $1,000\text{W/m}^2$, masa de aire de 1.5 y una temperatura de 20°C .

5.3.2. Caracterización de módulo fotovoltaico KYOCERA KC80-01.

Tabla 5.3.2.1 Datos de placa y obtenidos del módulo FV **KC80-01**.

Módulo Fotovoltaico							
Marca: KYOCERA	Modelo: KC80-01	Potencia: 80 W					
Tipo: Silicio Policristalino	N. Celdas: 36	Área: 1.62 m^2					
Datos Obtenidos							
Irradiancia: 784 W/m^2	$P_{\text{máx}}$	V_{oc}	I_{sc}	V_{m}	I_{m}	F.F.	Efic.
Temp _{Amb.} : 30°C	[W _p]	[V]	[A]	[V]	[A]		[%]
Datos de placa (STC)	80	21.5	4.97	16.9	4.73	--	14
Datos obtenidos	54.9	19.2	4.54	13.9	3.95	0.63	10.9

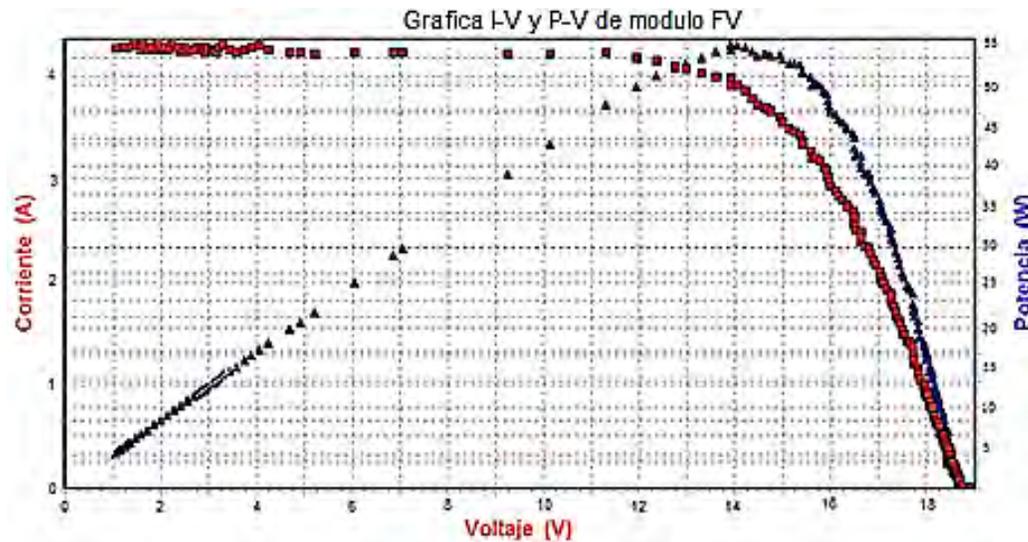


Fig. 5.3.2.1 Curva I-V y P-V del módulo KYOCERA KC80-01

La cantidad de puntos a graficar está determinado por el usuario. Dado que uno de los objetivos de este proyecto es la de visualizar el comportamiento eléctrico de un módulo o celda, el programa de control cuenta con una opción de acumular una mayor cantidad de puntos en un rango determinado de voltajes, esto permite generar una mayor cantidad de puntos de modo que la curva I-V quede mejor definida.

5.3.3. Caracterización de módulo fotovoltaico KYOCERA KC125TM.

Tabla 5.3.3.1 Datos de placa y obtenidos del módulo FV *KC125TM*.

Módulo Fotovoltaico							
Marca: KYOCERA	Modelo: KC125TM		Potencia: 125 W				
Tipo: Silicio Policristalino	N. Celdas: 36		Área: 1.44 m ²				
Datos Obtenidos							
Irradiancia: 867 W/m ²	P _{máx}	V _{oc}	I _{sc}	V _m	I _m	F.F.	Efic.
Temp _{Amb.} : 30 °C	[W _p]	[V]	[A]	[V]	[A]		[%]
Datos de placa (STC)	125	21.7	8.0	17.4	7.20	--	16
Datos obtenidos	109.6	22.2	7.65	15.4	7.12	0.65	9.1

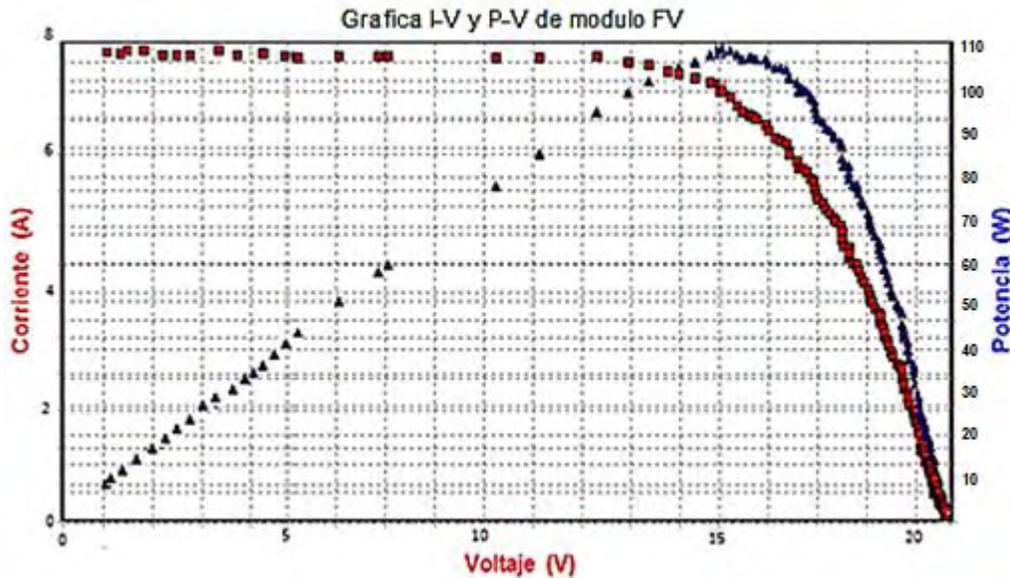


Fig. 5.3.3.1 Curva I-V y P-V del módulo KYOCERA KC125TM.

Grafico capturado directamente en pantalla por el programa de control.

El valor de la eficiencia de conversión de este tipo de módulo fotovoltaico proporcionado por el fabricante en la hoja de especificaciones es de 16%. En esta medición, el valor de la eficiencia se encuentra muy lejos del valor a condiciones estándares de prueba. El V_{oc} medido es mayor al descrito en los datos de placa, el error obtenido en esta medición es:

$$e(\%) = \frac{abs(22.2 - 21.7)}{22.2} = 2.25\%$$

Uno de los factores que se puede considerar en esta medición es el valor de la temperatura del módulo.

5.3.4. Caracterización de módulo fotovoltaico SOLARTEC S60PC 250.

Tabla 5.3.4.1 Datos de placa y obtenidos del módulo FV S60PC 250.

Módulo Fotovoltaico							
Marca: SOLARTEC	Modelo: S60PC 250	Potencia: 250 W					
Tipo: Silicio Policristalino	N. Celdas: 60	Área: 1.63 m ²					
Datos Obtenidos							
Irradiancia: 910 W/m ²	P _{máx}	V _{oc}	I _{sc}	V _m	I _m	F.F.	Efic.
Temp _{Amb.} : 30 °C	[W _p]	[V]	[A]	[V]	[A]		[%]
Datos de placa (STC)	250	37.85	8.65	30.12	8.30	--	15.29
Datos obtenidos	208	36.5	7.9	28.1	7.4	0.72	13.9

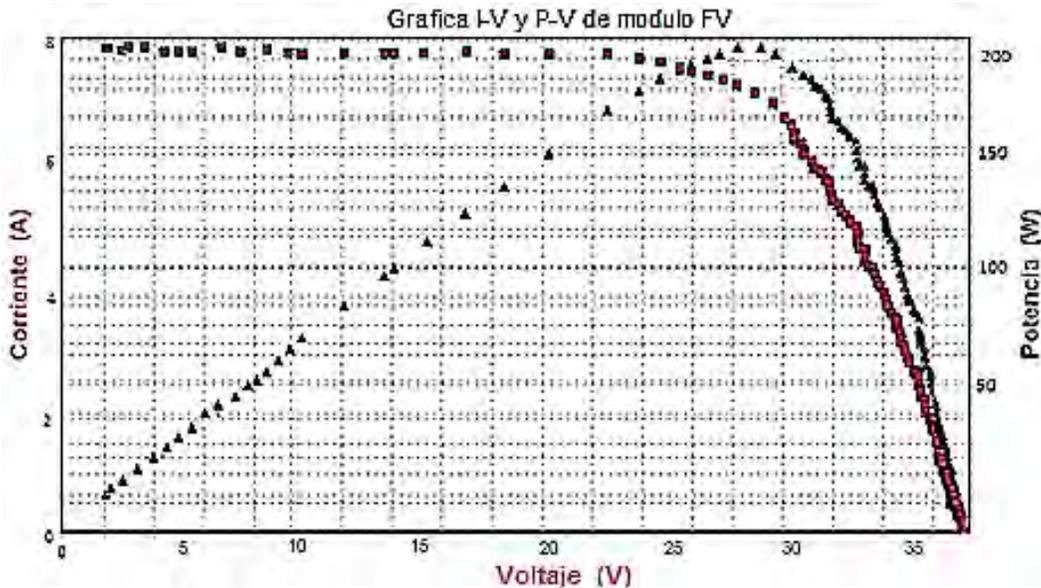


Fig. 5.3.4.1 Curva I-V y P-V del módulo SOLARTEC S60PC-250.

La figura anterior muestra el gráfico capturado directamente en pantalla por el programa de control.

La irradiancia existente durante el desarrollo de la medición fue muy favorable ya que se pudo verificar los datos obtenidos con respecto a los datos de placa del módulo, las pequeñas variaciones hacen referencia sin duda a la influencia del incremento de la temperatura con respecto a las condiciones STC.

5.3.5. Caracterización de módulo fotovoltaico ERDM MM6-130.

Tabla 5.3.5.1 Datos de placa y obtenidos del módulo FV MM6-130.

Módulo Fotovoltaico							
Marca: ERDM	Modelo: MM6-130		Potencia: 130 W				
Tipo: Silicio Policristalino			N. Celdas: 36		Área: 1.62 m ²		
Datos Obtenidos							
Irradiancia: 617 W/m ²	P _{máx}	V _{oc}	I _{sc}	V _m	I _m	F.F.	Efic.
Temp _{Amb.} : 32 °C	[W _p]	[V]	[A]	[V]	[A]		[%]
Datos de placa (STC)	130	21.63	2.00	17.08	7.64	--	15.29
Datos obtenidos	26.73	19.90	1.98	15.76	1.67	0.79	4.9

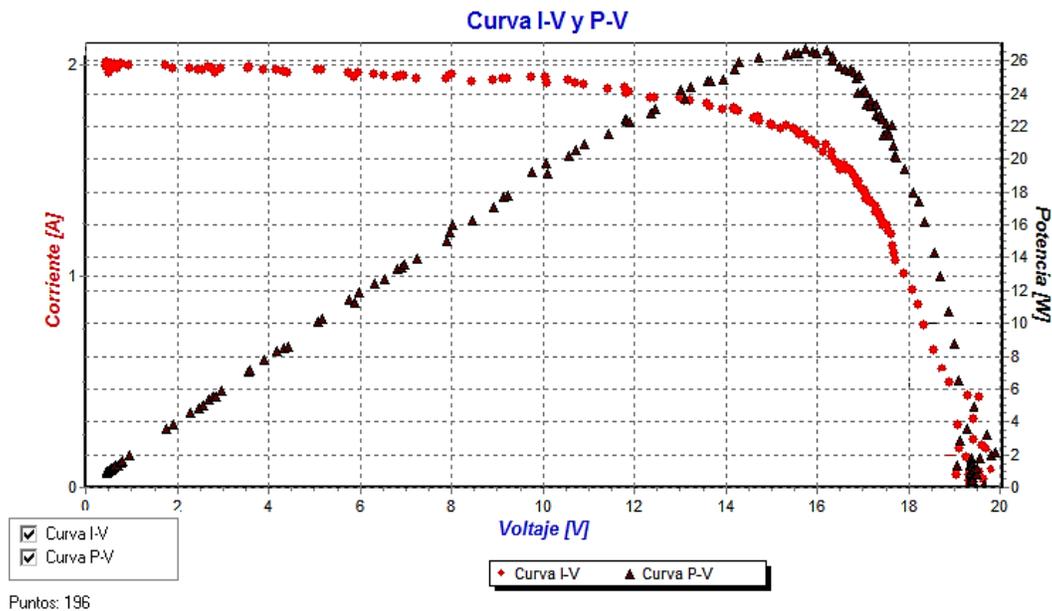


Fig. 5.3.5.1 Curva I-V y P-V del módulo ERDM MM6-130.

La prueba realizada a este módulo se llevó a cabo a las 8:20 am del día 23 de febrero de 2015 en las siguientes coordenadas: Latitud 18.55°N, Longitud 99.23°O, elevación 901 msnm, con una radiación solar muy baja debido a la hora del día.

Es evidente el pobre desempeño del módulo debido a la poca irradiancia y el ángulo de incidencia de la radiación solar.

Con este mismo módulo se llevaron a cabo más mediciones en diferentes condiciones de irradiancia y temperatura con la finalidad de observar su comportamiento y de donde derivaron los resultados que se muestran en la tabla 5.3.5.2 y en las figuras 5.3.5.2.

Tabla 5.3.5.2 Datos de placa y obtenidos del módulo FV MM6-130 con diferentes niveles de irradiancia.

Módulo Fotovoltaico								
Marca:	ERDM	Modelo:	MM6-130	Potencia:	130 W			
Tipo:	Silicio Policristalino	N. Celdas:	36	Área:	1.62 m ²			
Datos Obtenidos								
Temp _{Amb.} :	32 °C	P _{máx} [W _p]	V _{oc} [V]	I _{sc} [A]	V _m [V]	I _m [A]	F.F.	Efic. [%]
Irradiancia:	467 W/m ²	41.71	17.9	3.22	15.24	2.50	0.66	5.5
Irradiancia:	846 W/m ²	80.6	18.1	6.74	13.17	6.25	0.67	5.9
Irradiancia:	931 W/m ²	85.30	18.35	7.42	12.83	6.81	0.64	5.6

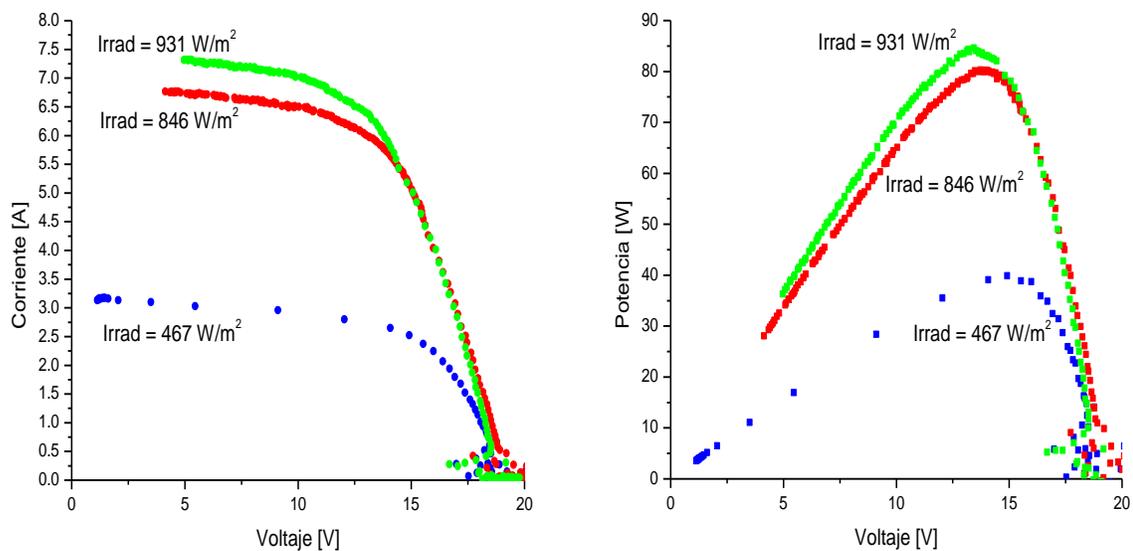


Fig. 5.3.5.2 Comportamiento de la curva I-V y P-V del módulo ERDM MM6-130 con diferentes condiciones de irradiancia y temperatura graficadas en Microcal Origin a partir de los datos generados por el programa de control.

En la figura anterior se observa un comportamiento errático en cierto valor de voltaje derivado del comportamiento del mosfet.

5.3.6. Medición de curvas I-V y P-V de módulos de diferentes marcas y potencias.

Con la finalidad de observar el comportamiento del error de tipo, conocido como *mismatch*, se interconectaron 3 módulos de diferente modelo y tecnología en serie, los módulos considerados en este experimento tienen las siguientes características:

Módulo 1							
Marca y Modelo: SILIKEN SLK60P6L	Potencia: 250W						
Tipo: Silicio Policristalino	N. Celdas: 60			Área: 1.62 m ²			
	$P_{m\acute{a}x}$ [W _p]	V_{oc} [V]	I_{sc} [A]	V_m [V]	I_m [A]	F.F.	Efic. [%]
Datos de placa (STC)	250	37.1	8.91	29.8	8.39	0.756	15.4

Módulo 2							
Marca y Modelo: KYOCERA KC125TM	Potencia: 125W						
Tipo: Silicio Policristalino	N. Celdas: 36			Área: 1.44 m ²			
	$P_{m\acute{a}x}$ [W _p]	V_{oc} [V]	I_{sc} [A]	V_m [V]	I_m [A]	F.F.	Efic. [%]
Datos de placa (STC)	125	21.7	8.0	17.4	7.20	--	16

Módulo 3							
Marca y Modelo: SOLARTEC S60PC 250	Potencia: 250 W						
Tipo: Silicio Policristalino	N. Celdas: 60			Área: 1.63 m ²			
	$P_{m\acute{a}x}$ [W _p]	V_{oc} [V]	I_{sc} [A]	V_m [V]	I_m [A]	F.F.	Efic. [%]
Datos de placa (STC)	250	37.85	8.65	30.12	8.30	--	15.29

Se interconectan los módulos en serie y se obtienen los siguientes resultados en el programa de control.

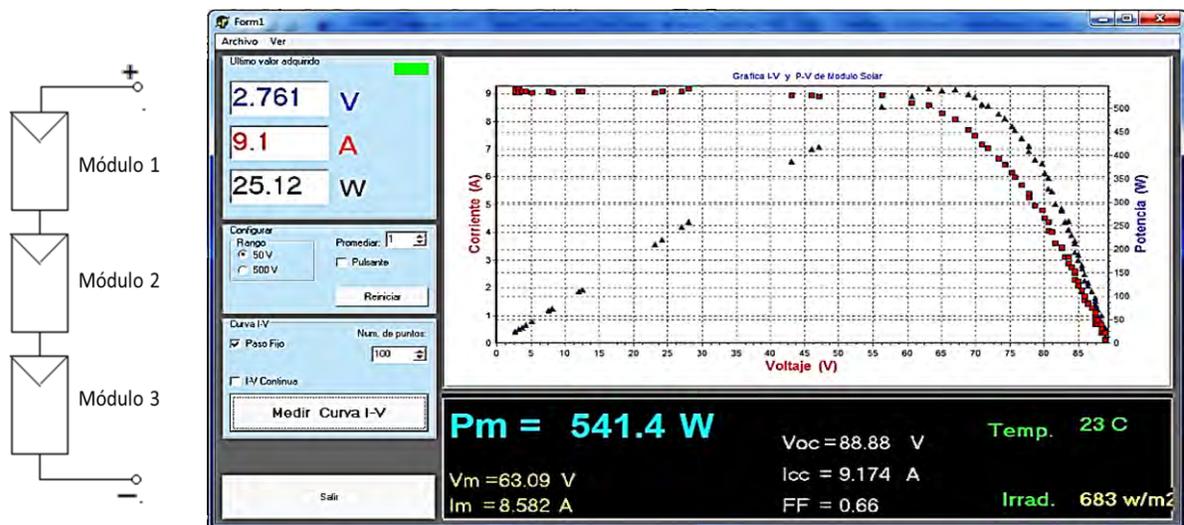


Fig. 5.3.6.1 Curva I-V de tres módulos fotovoltaicos de distintos modelos conectados en serie.

La medición se llevó a cabo el día 19 de Septiembre de 2014 a las 13:40 hrs. Latitud 18° 50' 23'' y Longitud 99° 14' 07'' con una irradiancia de 890 W/m², temperatura ambiente de 32°C.

5.7.4. Comparación entre la medición obtenida con el prototipo de medición y la medición obtenida con un equipo comercial.

Con la finalidad de validar los resultados obtenidos con el sistema de caracterización de módulos, se llevó a cabo la medición de un módulo marca SILIKEN modelo SLK60P6L de 250W de potencia pico con las características mostradas en la tabla 5.3.7.1.

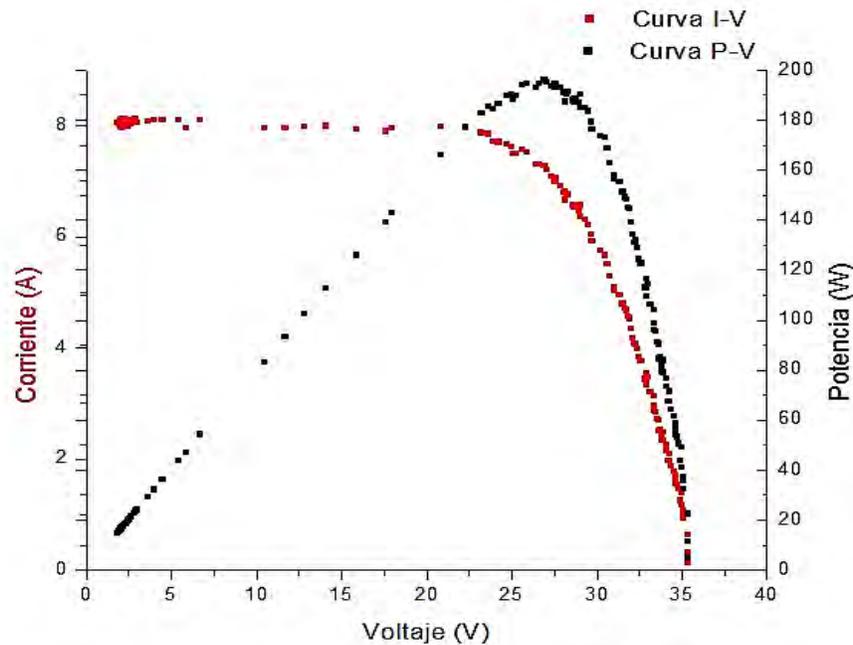


Fig. 5.4.1 Curva I-V de un módulo fotovoltaico obtenida con el prototipo de medición.

Tabla 5.4.1 Datos de placa y obtenidos del módulo FV **SLK60P6L**

Marca y Modelo: SILIKEN SLK60P6L		Potencia: 250 W					
Tipo: Silicio Policristalino		N. Celdas: 60		Área: 1.62 m ²			
	P _{máx}	V _{oc}	I _{sc}	V _m	I _m	F.F.	Efic.
Datos de placa (STC)	250 W _p	37.1 V	8.91 A	29.8 V	8.39 A	--	15.4%

La medición se llevó a cabo a las 12:38 hrs del día 27 de Marzo de 2014, con una irradiancia de 860W/m² y una temperatura ambiente de 31 °C en las instalaciones del Instituto de Energías Renovables de la UNAM ubicado en la Cd. de Temixco Morelos, coordenadas Latitud 18° 50' 23'' y Longitud 99° 14' 07''.

Este último módulo fotovoltaico se caracterizó también con un sistema de medición comercial que es un trazador de curvas con las siguientes características:

- Marca: Solmetric
- Modelo: PV Analyzer PVA-600
- Grafica curvas: I-V y P-V
- Entrada Máxima: 600V, 20A

La curva característica obtenida con el sistema de medición comercial se muestra en la siguiente gráfica (rojo) a la par con los datos obtenidos con el prototipo de caracterización (negro):

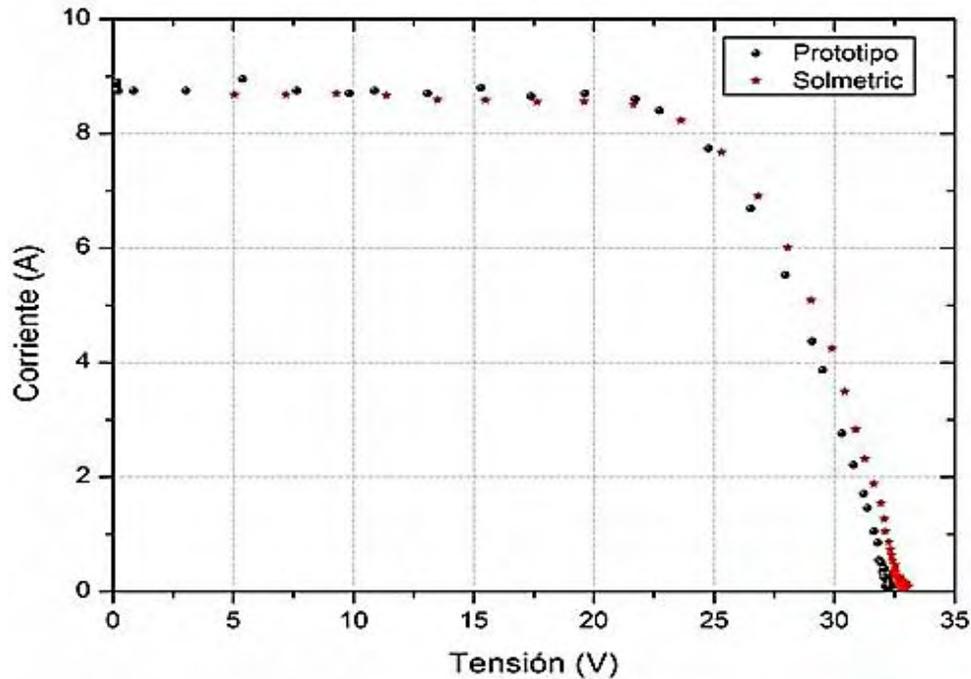


Fig. 5.4.2 Comparación entre la curva I-V obtenida con el equipo comercial (rojo) y con el prototipo construido en este proyecto (negro).

Los datos obtenidos fueron:

- Mediante el sistema de medición marca **SOLMETRIC**.
 V_{oc} : 32.53V V_m : 24.30V $P_{m\acute{a}x}$: 188.32W
 I_{sc} : 8.80A I_m : 7.75A F.F.: 0.658 η = 13.5%
- Mediante el **PROTOTIPO** diseñado.
 V_{oc} : 32.46V V_m : 24.90V $P_{m\acute{a}x}$: 193.72W
 I_{sc} : 8.82A I_m : 7.78A F.F.: 0.677 η = 13.9%

Si realizamos un análisis de error de la eficiencia obtenida con el prototipo y la obtenida con el Trazador comercial, se tiene:

$$\%e = \frac{(X_2 - X_1)}{X_1} \cdot 100$$

Tabla 5.4.2 Comparación de datos obtenidos con el equipo de medición comercial marca solmetric y el prototipo.

Parámetro	Solmetric	Prototipo	Error [%]
V_{oc}	32.53 V	32.46 V	-0.22
I_{sc}	8.80 A	8.82 A	0.23
V_m	24.3 V	24.9 V	2.47
I_m	7.75 A	7.78 A	0.39
$P_{m\acute{a}x}$	188.3 W	193.7 W	2.87
η	13.5 %	13.9% W	2.96

De todos estos errores mostrados, el error más significativo es el que corresponde al valor de la eficiencia, resultado de tener un error significativo en el valor de la potencia. Al analizar más a fondo, se observa que estos errores se derivan directamente del error del voltaje a máxima potencia (V_m). Sin embargo, este error es mínimo considerando la diferencia en costos entre los equipos de medición comparados, que es de más del 1,000%.

5.7.5. Pérdidas por efecto de las sombras en módulos FV.

Utilizando el módulo fotovoltaico marca SILIKEN de 250W de potencia pico, se realiza una medición con la particularidad de que se sombrea una parte del módulo y debido a este procedimiento se obtiene el siguiente comportamiento.

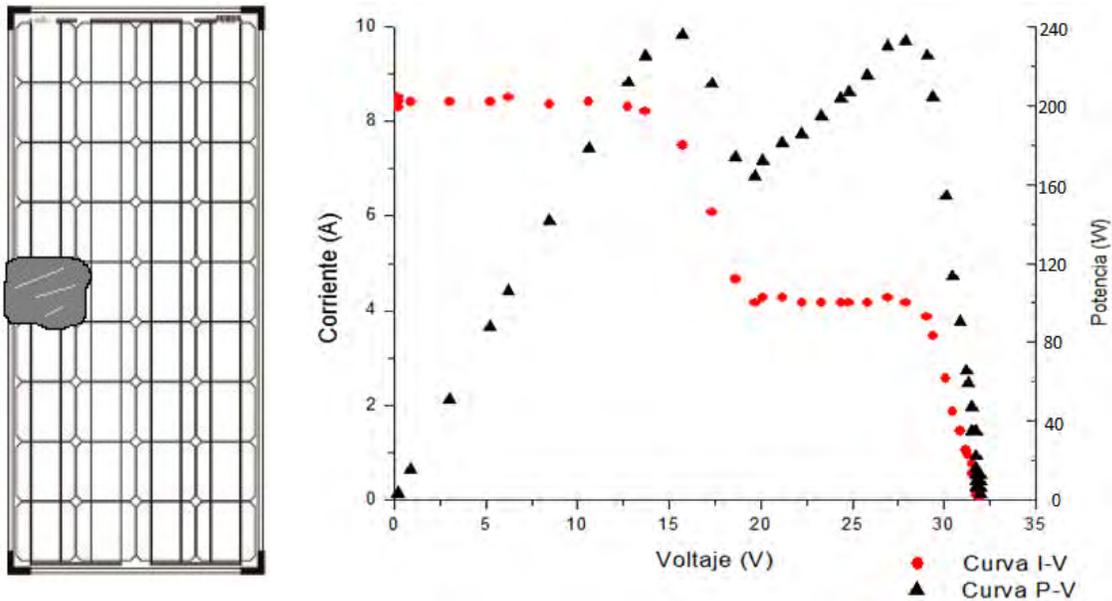


Fig. 5.5.1 Comportamiento I-V y P-V de módulo fotovoltaico SILIKEN 250W SLK60P6L sometido a condiciones de sombreado.

El patrón de la curva I-V obtenida en la caracterización de un módulo sometido a sombra tiene una forma característica, en la cual la forma de onda de la curva I-V sufre deformación de manera que se forma una especie de escalón, en la cual se aprecian dos puntos que aparentan ser los puntos de máxima potencia. Derivado de estos resultados, en la figura anterior se hace evidente que con este prototipo de medición es posible analizar el comportamiento de la curva I-V de un módulo fotovoltaico en diferentes condiciones de sombreado.

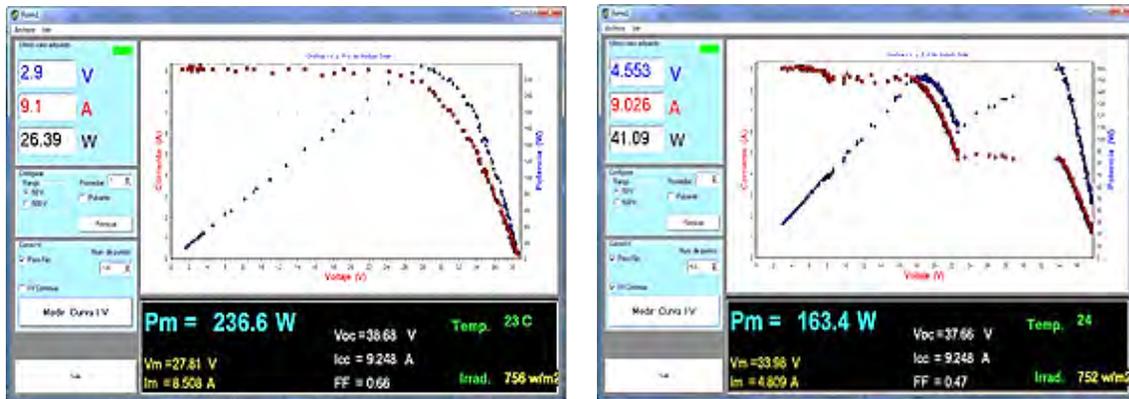


Fig. 5.5.2 Medición de un módulo fotovoltaico Policristalino Su-Kam de 320W (a) descubierto, (b) con celdas sombreadas.

La medición se llevó a cabo el día 19 de Septiembre de 2014 a las 13:30 hrs en las siguientes coordenadas: Latitud 18° 50' 23'' y Longitud 99° 14' 07''.

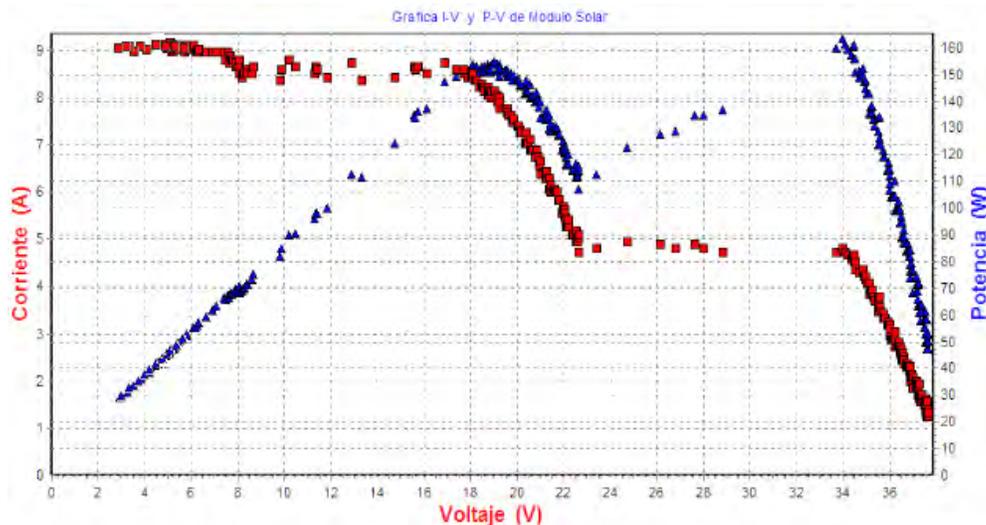


Fig. 5.5.3 Medición de un módulo fotovoltaico Policristalino SuKam de 320W con celdas sombreadas.

Es evidente la pérdida de potencia en los diferentes casos de medición de curvas I-V de módulos fotovoltaicos sometidos a condiciones de sombreado de alguna de sus celdas. Para estos casos en general, la pérdida de potencia se puede estimar en un 30%.

Se realizaron mediciones a un módulo fotovoltaico sombreando más de una celda en diferentes configuraciones, el sombreado se llevó a cabo con un pedazo de cartón recortado de manera que sombre el ancho de varias celdas sin afectar las celdas adyacentes, el espesor del cartón impide totalmente el paso de luz a las celdas seleccionadas. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 5.5.1 Datos de placa del módulo **ERDM MM6-130** sometido a sombreado.

Marca y Modelo: ERDM MM6-130		Potencia: 130 W		Área: 1.62 m ²			
Tipo: Silicio Policristalino		N. Celdas: 36					
Irradiancia: 837 [W/m ²]	P _{máx} [W _p]	V _{oc} [V]	I _{sc} [A]	V _m [V]	I _m [A]	F.F.	Efic. [%]
Temp. Ambiente: 23°C	130	21.63	8.00	17.08	7.64	--	15.29
Datos de placa (STC)							

Prueba con 4 celdas sombreadas.

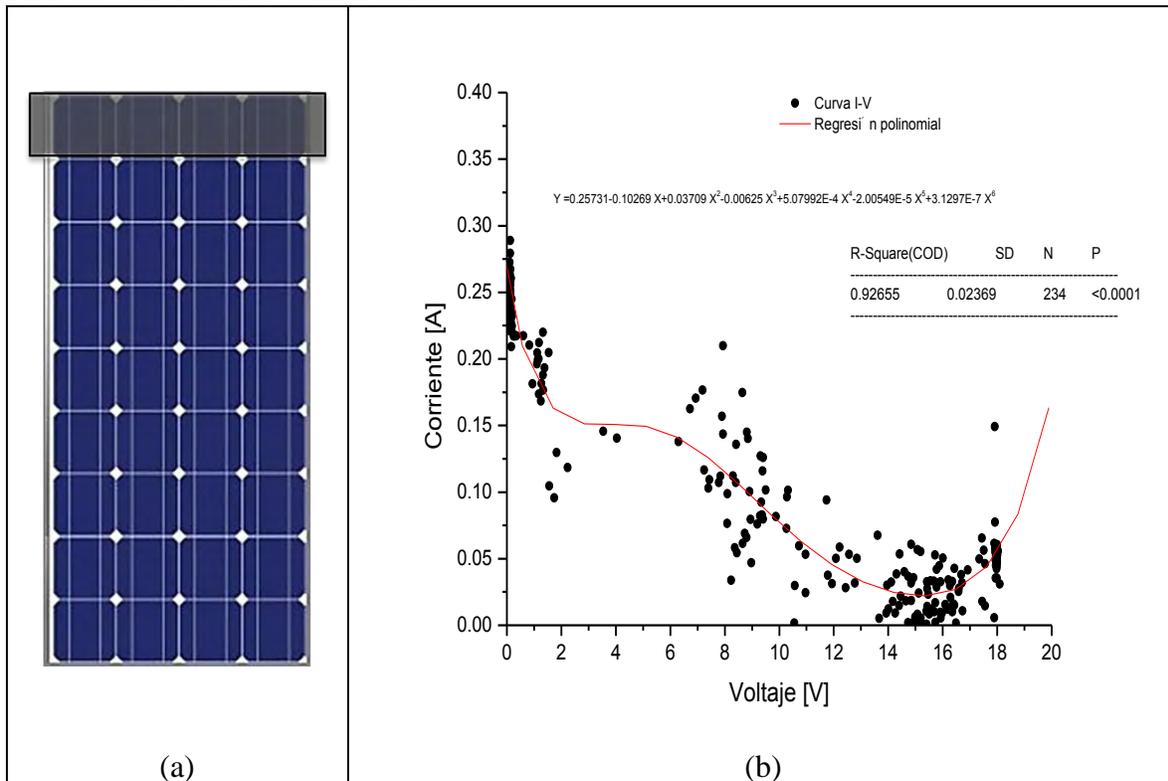
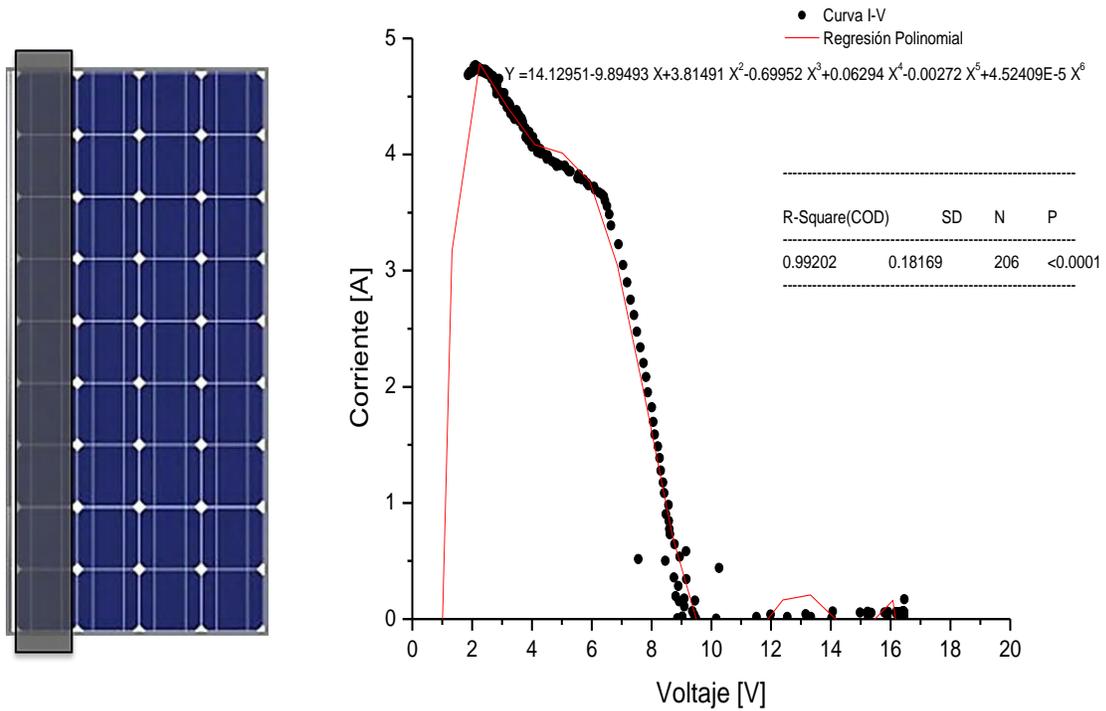


Fig. 5.5.4 Medición del módulo fotovoltaico con 4 celdas sombreadas(a) modo de sombreado; (b) grafico obtenido.

De acuerdo a la figura 5.3.8.4, el valor de la tensión se mantiene en sus valores máximos pero el valor de la corriente es casi nula con respecto a los datos de placa que presenta el módulo. Este comportamiento tiene que ver con la disposición de los diodos de bypass con que cuenta el módulo FV.

Prueba con 9 celdas sombreadas.



(a)

(b)

Fig. 5.5.5 Medición del módulo fotovoltaico con 9 celdas sombreadas(a) modo de sombreado; (b) gráfico obtenido.

De acuerdo a la figura 5.3.8.5, el valor de la corriente se encuentra en sus máximos valores con respecto a la irradiancia incidente contrapuesto con el valor de la tensión que decae considerablemente con respecto a los valores de placa.

Prueba con celdas sombreadas en diagonal.

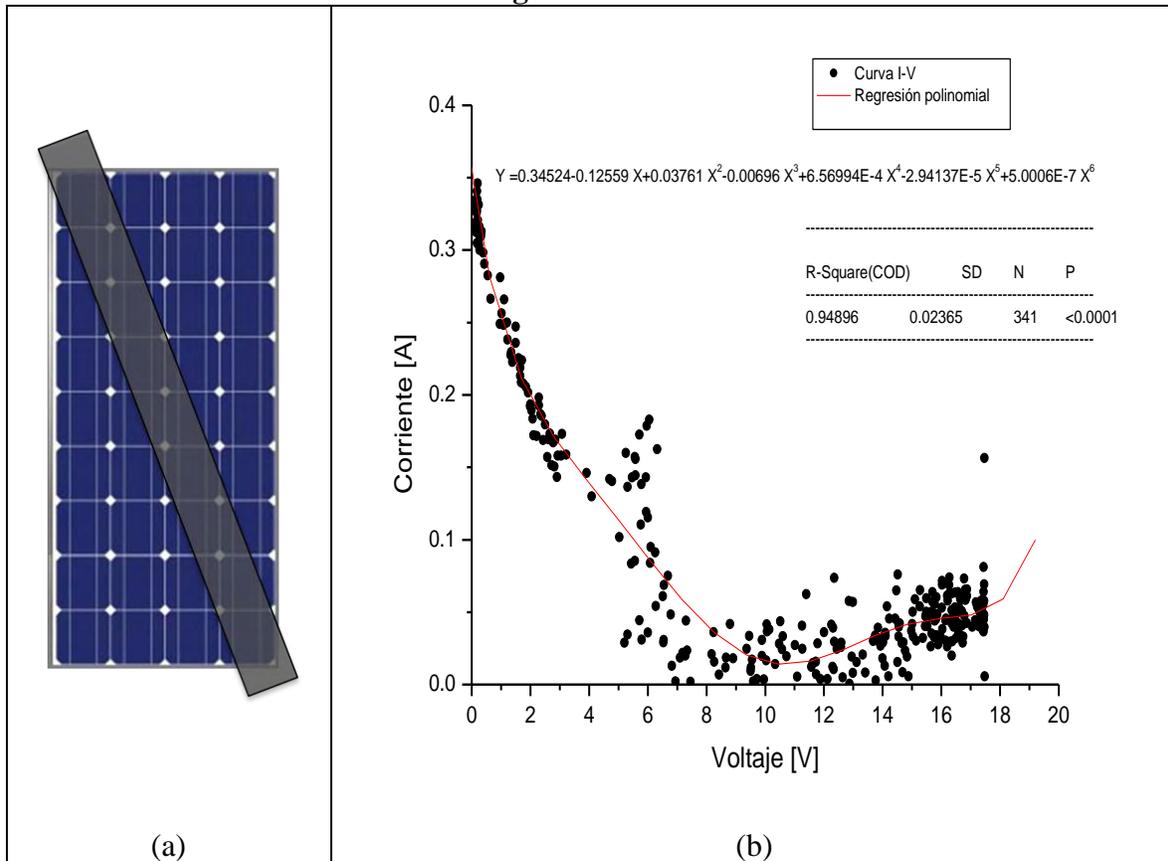


Fig. 5.5.6 Medición del módulo fotovoltaico con varias celdas sombreadas en modo diagonal (a) modo de sombreado; (b) grafico obtenido.

En este caso, el hecho de sombrear celdas de cada columna provoca una pérdida de potencia generada por cada columna de celdas, en este caso, la pérdida de potencia es casi total.

5.7.6. Curvas E-I de módulos de celdas de combustible.

La caracterización de celdas de combustible contempla ciertas configuraciones adicionales en el programa de control, entre las cuales se considera protección contra corto circuito total, esto se refiere, a que la celda solo puede someterse al 70% del corto circuito o dicho de otra manera, el voltaje mínimo al que se debe llevar a la celda no debe ser menor al 30% del V_{oc} .

Esta consideración aplica solo para la caracterización de tecnología de celda de combustible, se lleva a cabo automáticamente por parte del programa de control cuando se modifica la tecnología a caracterizar. Por default permite llegar solamente hasta el 30% del V_{oc} , pero este valor se puede modificar de acuerdo a las necesidades del experimento o si se conocen las características de la celda que se ha de caracterizar.

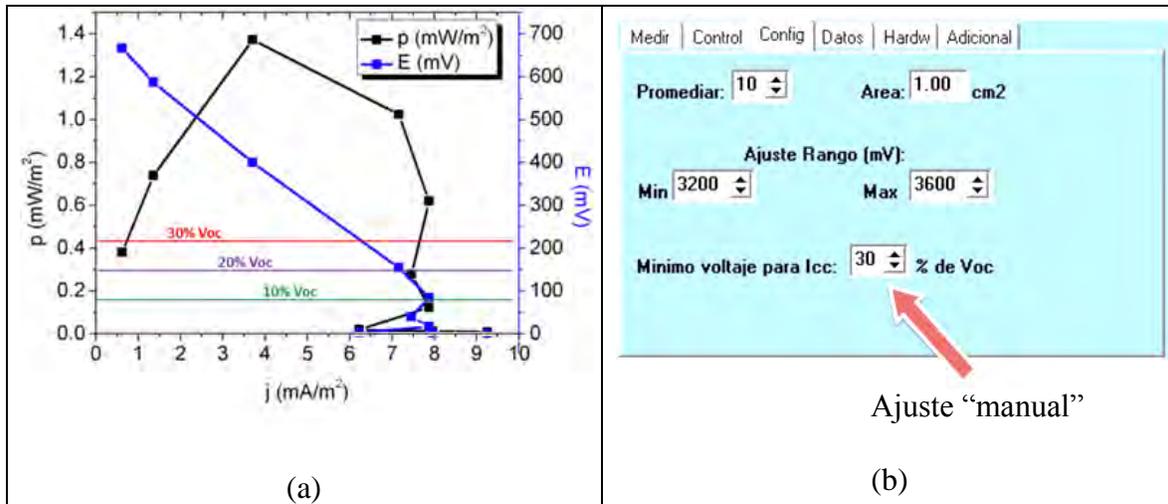


Fig. 5.6.1 (a) Curva E-I de una celda de combustible con comportamiento en corto circuito total, 10, 20 y 30%; (b) parte del programa de control donde se considera el valor máximo de corto circuito a considerar para protección de la celda.

En la figura anterior, el valor de voltaje se pudo considerar hasta el 10% de V_{oc} , un valor de porcentaje menor arrojaría información errónea derivada de la inestabilidad de la celda.

5.7.7. Pruebas realizadas con el prototipo para caracterización de celdas experimentales.

Entre los productos de este proyecto, se desarrolló un sistema de caracterización de celdas de baja potencia con el cual, se llevaron a cabo mediciones de celdas fotovoltaicas y celdas de combustible tanto comerciales como experimentales con la finalidad de observar tanto el comportamiento de la celda como del sistema de medición.

Entre la información obtenida se presentan las gráficas y los correspondientes datos característicos para cada uno de los casos. Sin embargo, dado que algunas de las celdas experimentales fueron realizadas a nivel laboratorio y se encuentran en proceso de patentes, solo se expondrán los datos de las mediciones obtenidas así como sus gráficas sin hacer mención detallada de la tecnología utilizada.

5.7.1 Celda fotovoltaica comercial con concentrador de espejos.

Se trata de una celda fotovoltaica comercial con 1cm^2 de área, con concentrados a base de 4 espejos con características definidas de 3cm^2 cada uno, el módulo se encuentra cubierto con una carcasa de aluminio.



Fig. 5.7.1.1 Celda solar con concentrador de 4 espejos.

Se realizaron mediciones con diferentes condiciones de irradiancia de las cuales mencionamos dos en particular. La primera con una irradiancia de 504 W/m^2 y la segunda con una irradiancia de 901 W/m^2 , ambas se realizaron con exposición directa al sol.

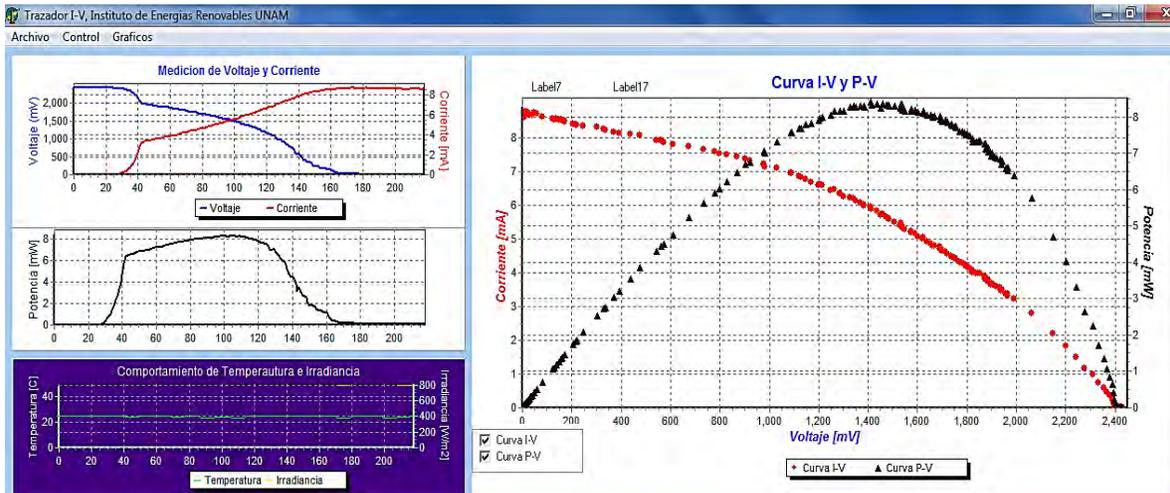


Fig. 5.7.1.2 Primera medición de una celda fotovoltaica con concentrador de espejos.

Los datos obtenidos en esta prueba se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.7.1.1 Datos obtenidos de Celda FV comercial con concentrador de 4 espejos irradiancia $G=503.4\text{ W/m}^2$

$P_{\text{máx}} = 8.41\text{ mW}$	$\eta = 9.9\%$		
$V_{\text{oc}} = 2.43\text{ V}$	$I_{\text{sc}} = 0.00878\text{ A}$	$\text{Temp.} = 30.6\text{ }^\circ\text{C}$	$\text{Irrad.} = 503.4\text{ W/m}^2$
$V_{\text{m}} = 1.412\text{ V}$	$I_{\text{m}} = 0.00595\text{ A}$	$A_{\text{celda}} = 1\text{ cm}^2$	$\text{F.F.} = 0.58$

Se realiza la prueba con la misma celda pero con condiciones de irradiancia más favorables que en la prueba anterior y se obtiene la siguiente gráfica.

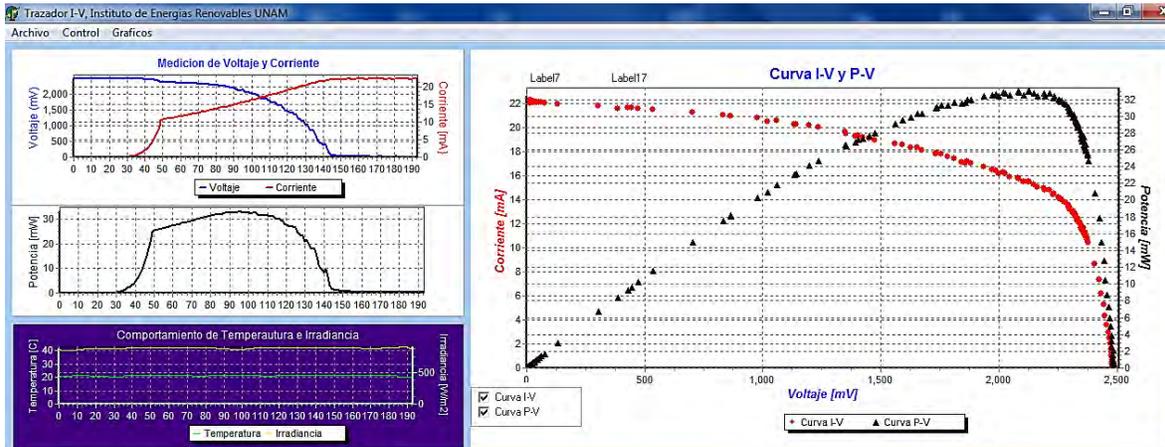


Fig. 5.7.1.3 Segunda medición de una celda fotovoltaica con concentrador de espejos.

Tabla 5.7.1.2 Datos obtenidos de Celda FV comercial con concentrador de 4 espejos irradiancia $G=910.0 \text{ W/m}^2$

$P_{\text{máx}} = 32.94 \text{ mW}$	$\eta = 33\%$		
$V_{\text{oc}} = 2.49 \text{ V}$	$I_{\text{sc}} = 0.0222 \text{ A}$	Temp. = $21.3 \text{ }^\circ\text{C}$	Irrad. = 910.0 W/m^2
$V_{\text{m}} = 2.127 \text{ V}$	$I_{\text{m}} = 0.0154 \text{ A}$	Acelda = 1cm^2	F.F. = 0.85

Con la finalidad de verificar el funcionamiento del programa de control con respecto a la etapa de visualización grafica de resultados, se muestran en la figura 5.5.1.3 los valores obtenidos en formato CSV graficados en un software de hoja de cálculo, para este caso se utilizó Origin versión 7.

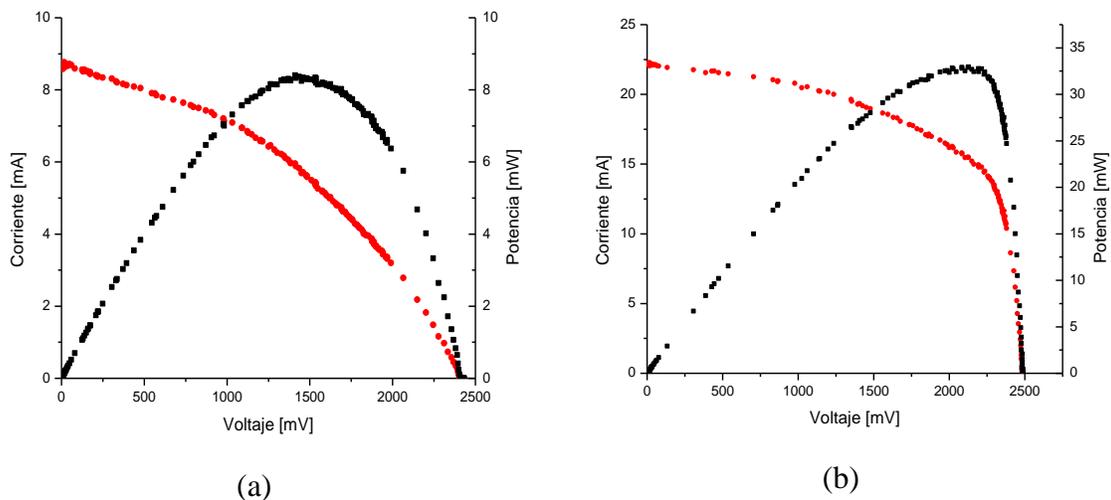


Fig. 5.7.1.4 Grafica en Origin correspondiente a (a) la figura 5.3.10.2; (b) la figura 5.3.10.3

El valor de eficiencia es muy elevado debido a que la celda consta de 4 espejos que enfocan o concentran la irradiancia hacia el interior de la celda. Prácticamente, se multiplica el valor

de la irradiancia que llega a la celda. Las pruebas realizadas a este tipo de celda hacen evidente el incremento en la eficiencia de conversión de energía de la celda analizada. Por otro lado, la carcasa de aluminio mantiene la temperatura de la celda durante el proceso de medición y retarda el calentamiento indeseado en la celda.

5.7.2. Celda con concentrador a base de lente.

En éste tipo de celda, la lente enfoca y amplifica el valor de la irradiancia hacia la celda contenida en su interior. Consta entre sus parte principales una celda solar, una lente y un disipador de calor que permite mantener una temperatura constante en la celda lo que trae como beneficio la reducción de errores en la medición por causa del calentamiento resultado de la exposición directa a la fuente de luz.

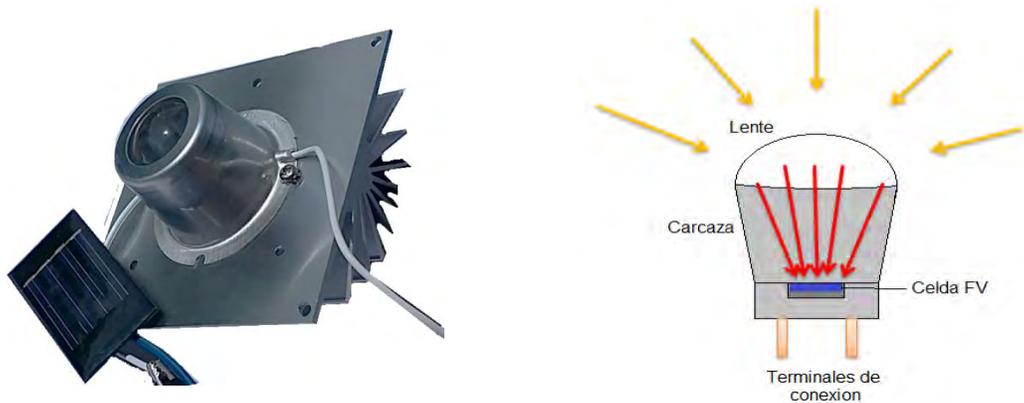


Fig. 5.7.2.1 Celda solar de concentración a base de lente.

Durante el experimento, las condiciones climáticas no fueron muy estables lo que ayudó a obtener diversas mediciones con diferentes valores de irradiancia, de donde se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación.

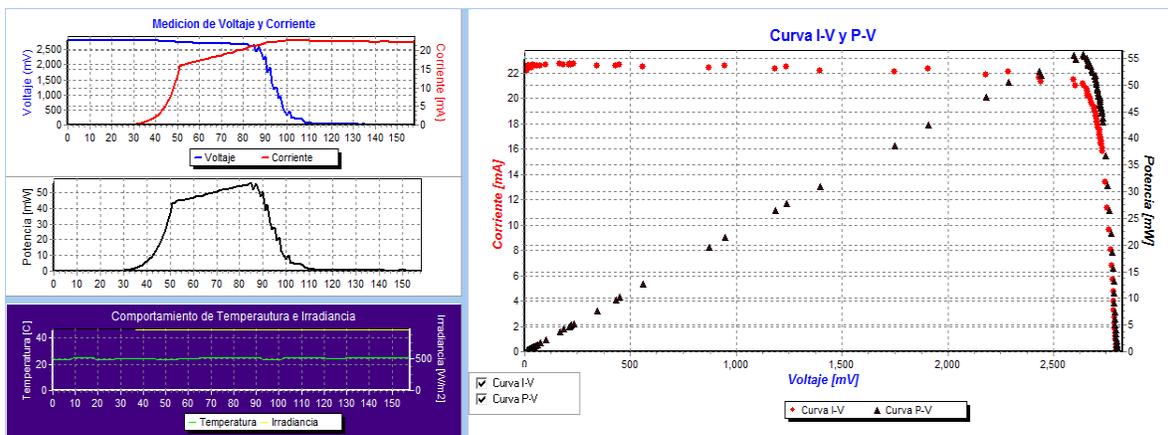


Fig. 5.7.2.2 Primera medición realizada a celda solar con concentrador a base de lente.

Tabla 5.7.2.1 Datos obtenidos de Celda FV comercial con concentrador a base de lente irradiancia $G = 434 \text{ W/m}^2$

$P_{\text{máx}} = 55.72 \text{ mW}$		$\eta = 24\%$	
$V_{\text{oc}} = 2.80 \text{ V}$	$I_{\text{sc}} = 0.0227 \text{ A}$	$\text{Temp.} = 21.8 \text{ }^\circ\text{C}$	$\text{Irrad.} = 434 \text{ W/m}^2$
$V_{\text{m}} = 2.64 \text{ V}$	$I_{\text{m}} = 0.0211 \text{ A}$	$A_{\text{celda}} = 1\text{cm}^2$	$\text{F.F.} = 0.84$

Se realiza la prueba con la misma celda pero con condiciones de irradiancia más favorables.

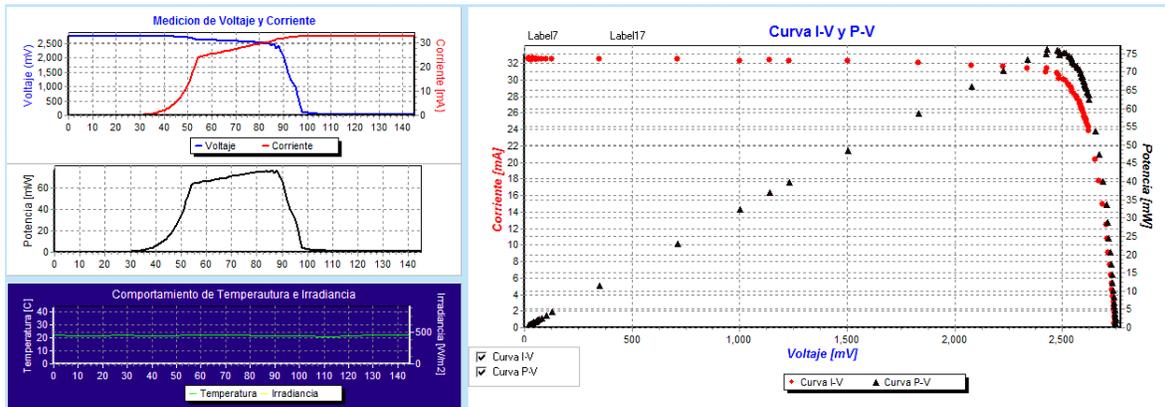


Fig. 5.7.2.3 Segunda medición realizada a celda solar con concentrador a base de lente.

Tabla 5.7.2.2 Datos obtenidos de Celda FV comercial con concentrador a base de lente irradiancia $G = 939.5 \text{ W/m}^2$

$P_{\text{máx}} = 76.2 \text{ mW}$		$\eta = 63\%$	
$V_{\text{oc}} = 2.75 \text{ V}$	$I_{\text{sc}} = 0.0326 \text{ A}$	$\text{Temp.} = 24.2 \text{ }^\circ\text{C}$	$\text{Irrad.} = 939.5 \text{ W/m}^2$
$V_{\text{m}} = 2.43 \text{ V}$	$I_{\text{m}} = 0.0314 \text{ A}$	$A_{\text{celda}} = 1\text{cm}^2$	$\text{F.F.} = 0.88$

Graficando los datos en software de cálculo Origin, se tiene:

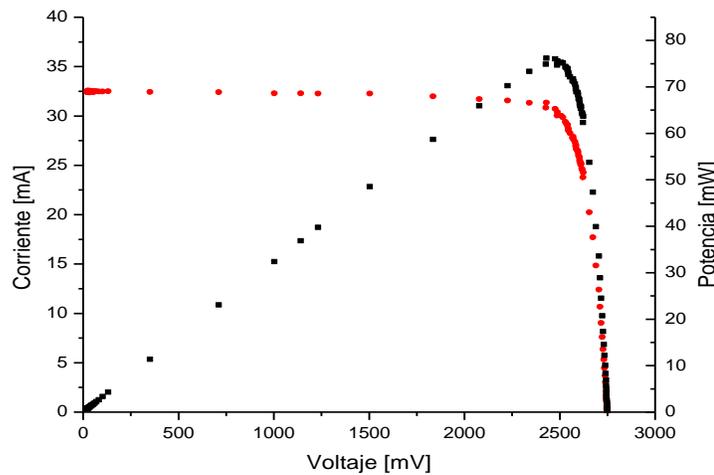


Fig. 5.7.2.4 Grafica en Origin correspondiente a los datos mostrados en la imagen de la figura 5.7.2.3

En esta gráfica se observa el comportamiento de la amplificación de la irradiancia producida por la lente del sensor. La velocidad en la medición evita que a celda sufra calentamiento excesivo que pudiera reducir el valor de la corriente fotogenerada, por tanto la eficiencia de conversión de la celda se encuentra entre los valores más altos e idóneos.

5.7.3. Celda de bioalcohol obtenida a partir de residuos de agave.

Potencia máxima 0.3mW, medición llevada a cabo en el laboratorio de hidrogeno del IER-UNAM. En este caso llevo a cabo la medición considerando los ejes como se hace con las celdas fotovoltaicas.

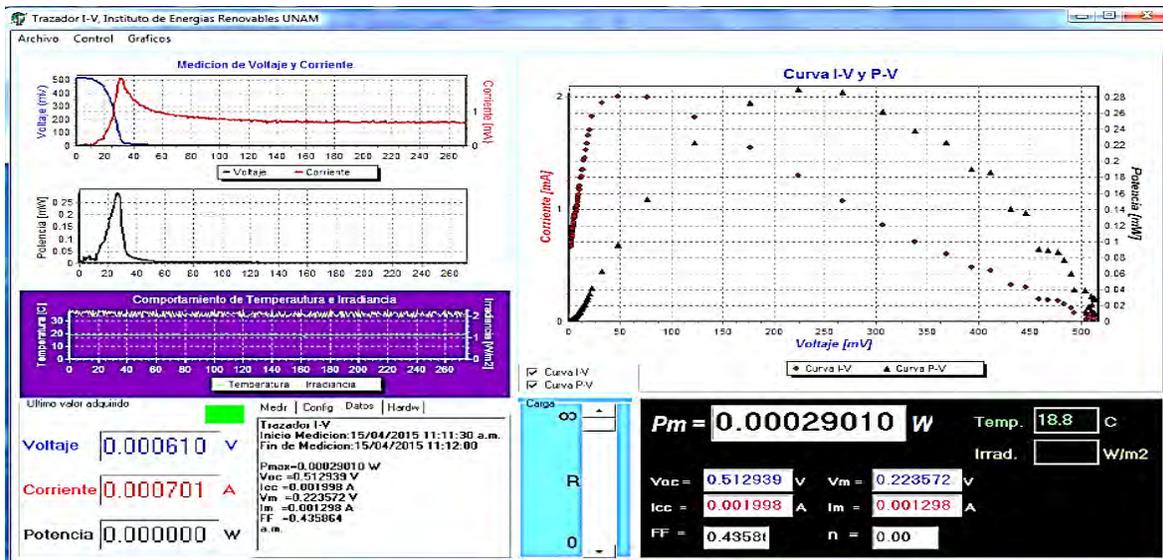


Fig. 5.7.3.1 Gráficas obtenidas de la caracterización de una celda de combustible experimental de bioalcohol.

De acuerdo a las necesidades del laboratorio de hidrogeno, para este experimento en particular se llevó a cabo la caracterización de la celda pero posteriormente se fijó el valor de la carga en el punto de máxima potencia.

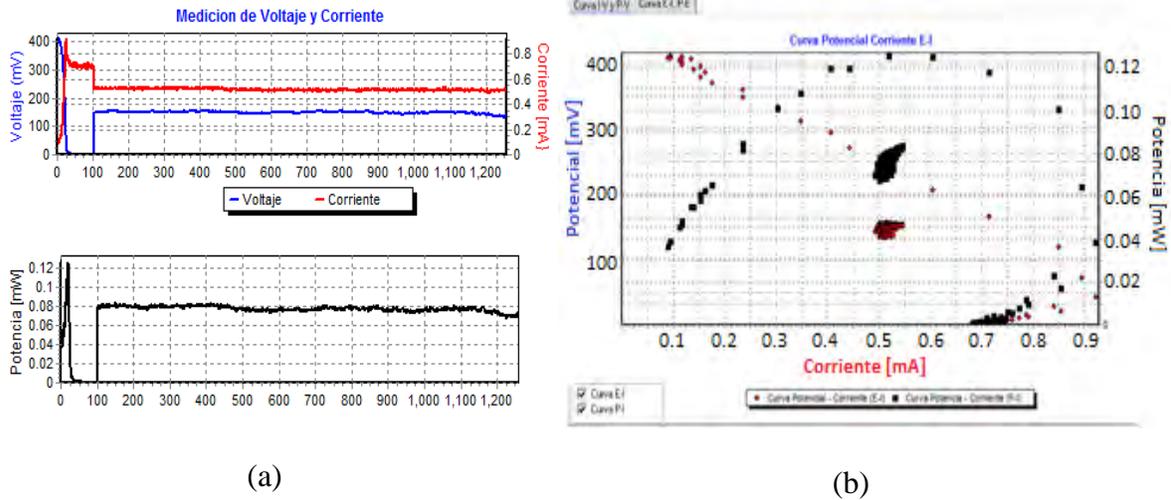


Fig. 5.7.3.2 Celda experimental de bioalcohol fijándola por un tiempo determinado en el punto de máxima potencia.

Tabla 5.7.3.1 Datos obtenidos de Celda FC experimental de bioalcohol.

$V_{oc} = 410 \text{ mV}$	$I_{sc} = 0.92 \text{ mA}$	Temp. = $23.7 \text{ }^\circ\text{C}$	$P_{m\acute{a}x} = 0.13 \text{ mW}$
$V_m = 241 \text{ mV}$	$I_m = 0.52 \text{ mA}$	$A_{celda} = 1 \text{ cm}^2$	F.F. = 0.59

De acuerdo con la gráfica obtenida, el valor de la corriente se mantuvo casi constante mientras que el voltaje sufrió una disminución que no es significativa. En la figura 5.5.3.2(a) se observa el comportamiento del potencial con respecto a la corriente, el valor de la corriente máxima I_{cc} corresponde al valor mínimo de voltaje de la celda.

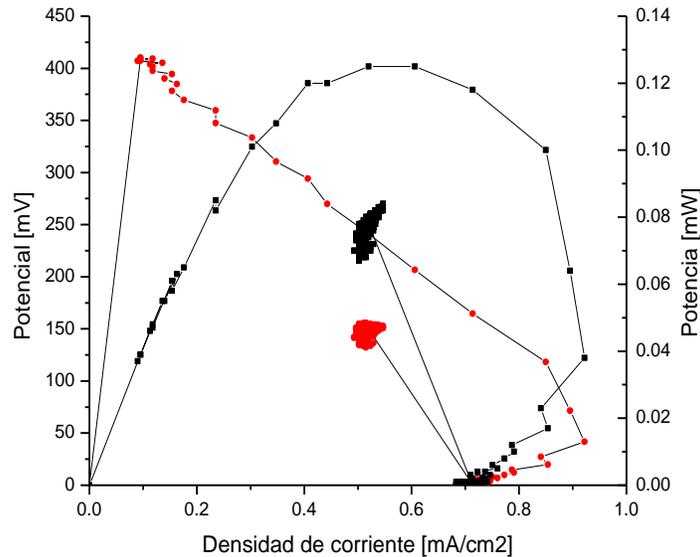


Fig. 5.7.3.3 Celda experimental de bioalcohol correspondiente a los datos de la figura 5.7.3.2(b) graficada en origen.

En esta prueba se hace evidente que el valor de la resistencia no considero la determinación del valor mínimo de potencial a máxima corriente. Es decir, se llevó al corto circuito total, de allí que la gráfica sufre una inconsistencia en valores de potencial menores a 15mV, que corresponde a la máxima corriente ($I_{\text{máx}}$ que se puede considerar como la corriente de cortocircuito I_{cc}) que es de 0.92mA.

Adicional a esto, entre la gama de posibilidades con que cuenta el programa de control, se establece automáticamente el valor del punto de máxima potencia, esto es, el valor de la resistencia del mosfet queda almacenado en una variable con la finalidad de poder procesarlo de ser necesario. Este punto de máxima potencia se visualiza en la figura 5.7.3.2(a) y (b). De acuerdo a la gráfica, el valor de la corriente a máxima potencia permanece casi constante entre 0.49 y 0.55 mA y el valor de potencial a máxima potencia se encuentra de igual manera entre 130 y 155 mV.

5.7.4. Kit didáctico de celda de combustible.

Se llevó a cabo la caracterización de un kit didáctico basado en celdas de combustible y se obtuvieron los siguientes resultados.

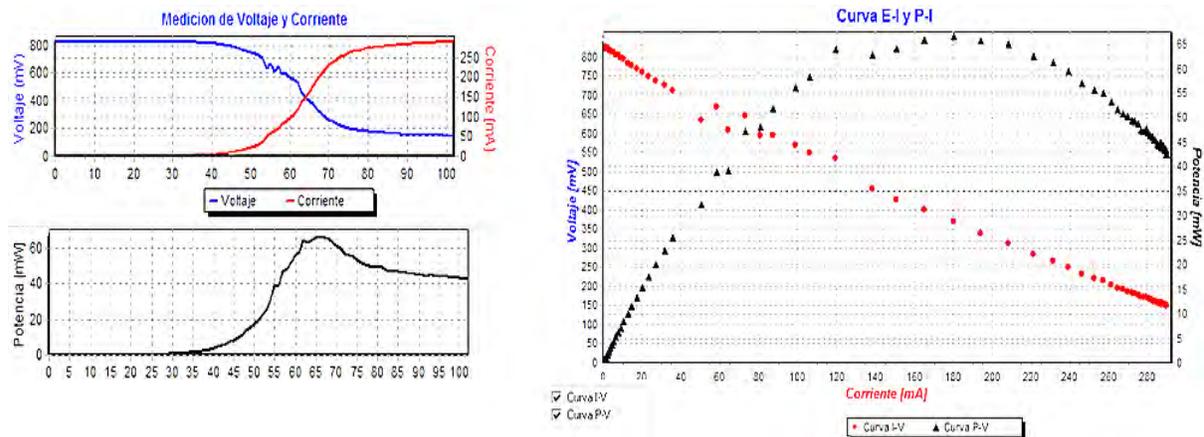


Fig. 5.7.4.1 Celda de combustible tipo PEM de kit didáctico.

La figura 5.7.4.1 muestra la caracterización de una celda de combustible utilizada en un kit didáctico de generación de electricidad, en ella se aprecia el comportamiento eléctrico de la celda de combustible y se considera la protección contra cortocircuito total, ya que el potencial nunca llega o se aproxima a 0 volts.

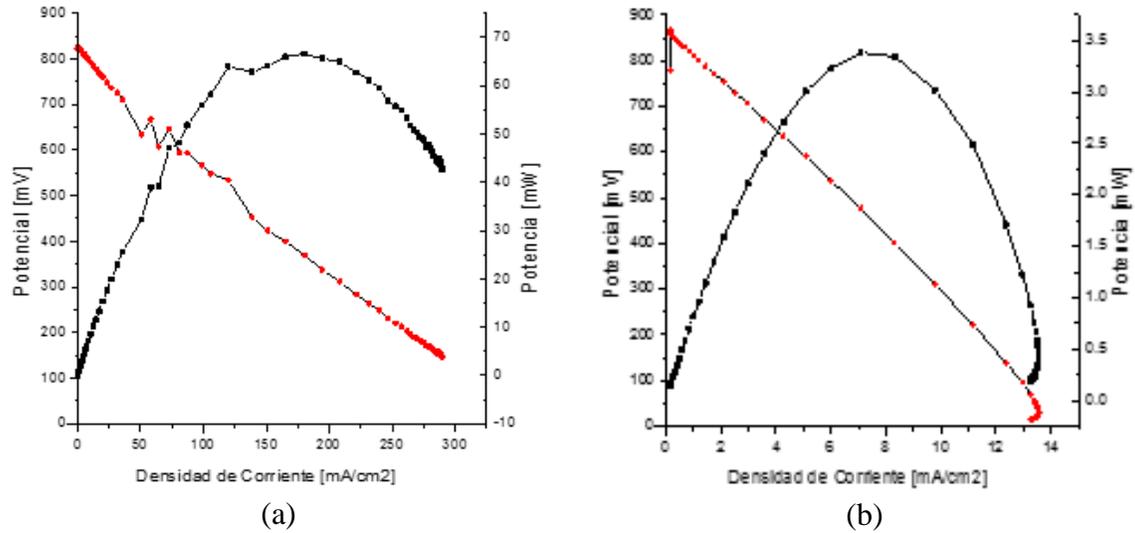


Fig. 5.7.4.2 Datos obtenidos de la Celda de combustible tipo PEM de kit didáctico con diferentes condiciones de operación procesados en Origin.

En la figura 5.7.4.2 se observa el comportamiento de la celda de combustible a diferentes condiciones de suministro de hidrogeno y oxígeno.

Tabla 5.7.4.1 Prueba correspondiente a la figura 5.7.4.2(a)

$V_{oc} = 825\text{mV}$	$I_{sc} = 290\text{ mA}$	Temp.= $23\text{ }^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 66\text{ mW}$
$V_m = 369\text{ mV}$	$I_m = 180\text{ mA}$	$A_{\text{celda}} = 5\text{cm}^2$	F.F. = 0.45

Tabla 5.7.4.2 Prueba correspondiente a la figura 5.5.4.2(b)

$V_{oc} = 865\text{mV}$	$I_{sc} = 13.5\text{ mA}$	Temp.= $26.7\text{ }^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 3.4\text{ mW}$
$V_m = 477\text{ mV}$	$I_m = 7.01\text{ mA}$	$A_{\text{celda}} = 5\text{cm}^2$	F.F. = 0.35

5.7.5. Celdas de combustible experimentales de bioalcohol.

En el instituto donde se llevó a cabo este proyecto se desarrollan diferentes tipos de celdas entre las cuales se encuentran las llamadas celdas de bioalcohol. Por cuestiones de que se encuentran en fase de registro de patentes no se pueden dar más datos de estas celdas pero se puede mostrar la resolución del sistema de medición para la obtención de las curvas correspondientes a este tipo de celdas de combustible.

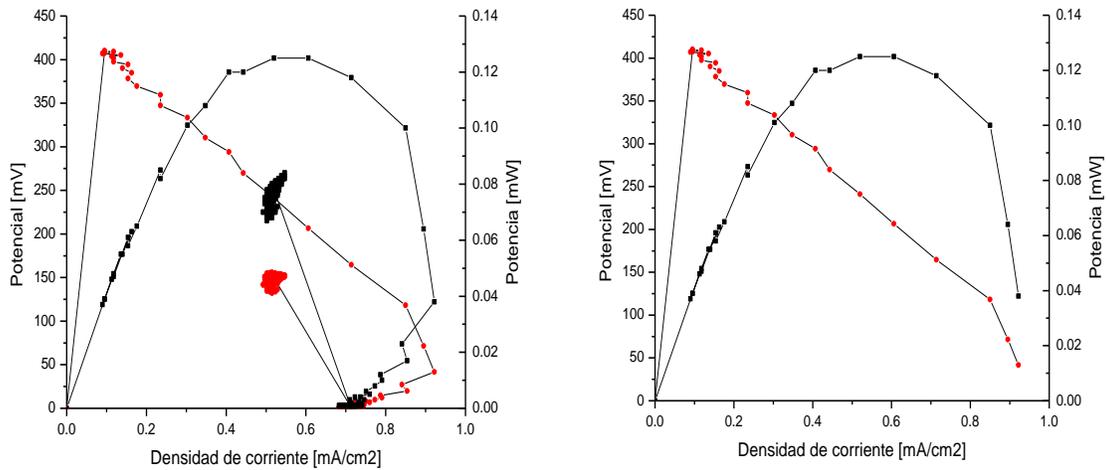


Fig. 5.7.5.1 Datos obtenidos de la Celda de bioalcohol procesados en Origin.

Tabla 5.7.5.1 Prueba correspondiente a la figura 5.3.10.14

$V_{oc} = 410\text{mV}$	$I_{sc} = 0.92\text{ mA}$	Temp. = $23\text{ }^{\circ}\text{C}$	$P_{m\acute{a}x} = 0.125\text{ mW}$
$V_m = 241\text{ mV}$	$I_m = 0.52\text{ mA}$	$A_{celda} = 5\text{cm}^2$	

En la figura 5.7.5.1 se muestra el comportamiento de la celda en cuestión, los datos fueron obtenidos mediante el programa de control y se generó un archivo con toda la información misma que ha sido procesada en un software hoja de cálculo comercial.

5.7.6. Celdas de combustible experimentales de bioetanol.

Del mismo modo, se realizaron pruebas con celdas de bioetanol y se obtuvieron los resultados que se observan en la figura 5.7.6.1.

En estas graficas se hace evidente la resolución del sistema de medición, dado que se caracterizaron celdas de combustible de tipo experimental, los valores de corriente y potencia no demasiado pequeños, lo que conlleva a no llegar al valor real de la corriente en potencial a circuito abierto. La resolución en corriente que tiene el equipo es de $193\mu\text{A}$ (0.193 mA).

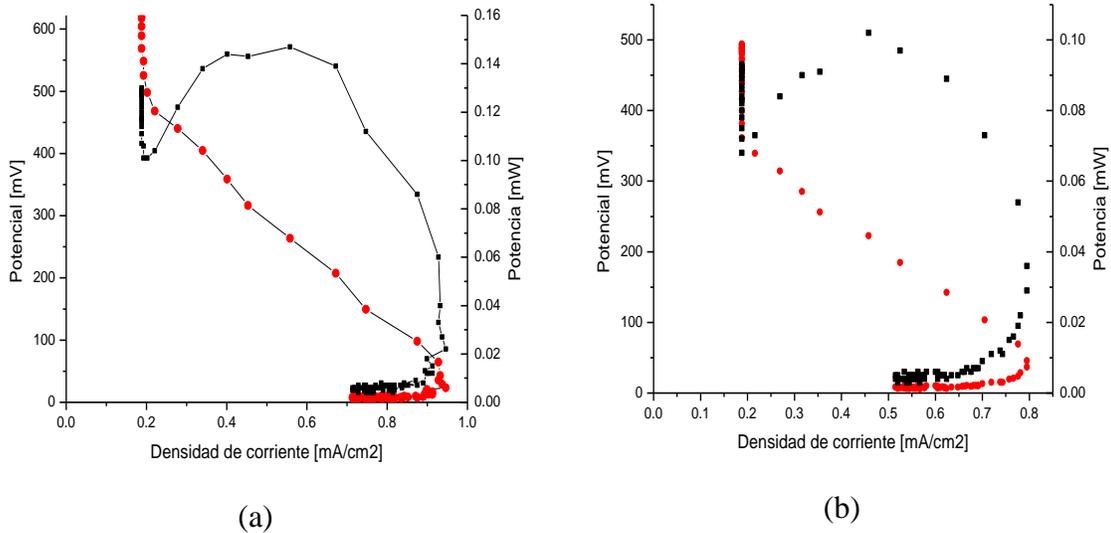


Fig. 5.7.6.1 Datos obtenidos de la Celda de bioetanol procesados en Origin.

Celdas de combustible de bioetanol sometida a condiciones específicas de iluminación. Prueba con bioetanol sometido a luz estableciendo y fijando la resistencia de carga en el punto de la máxima potencia.

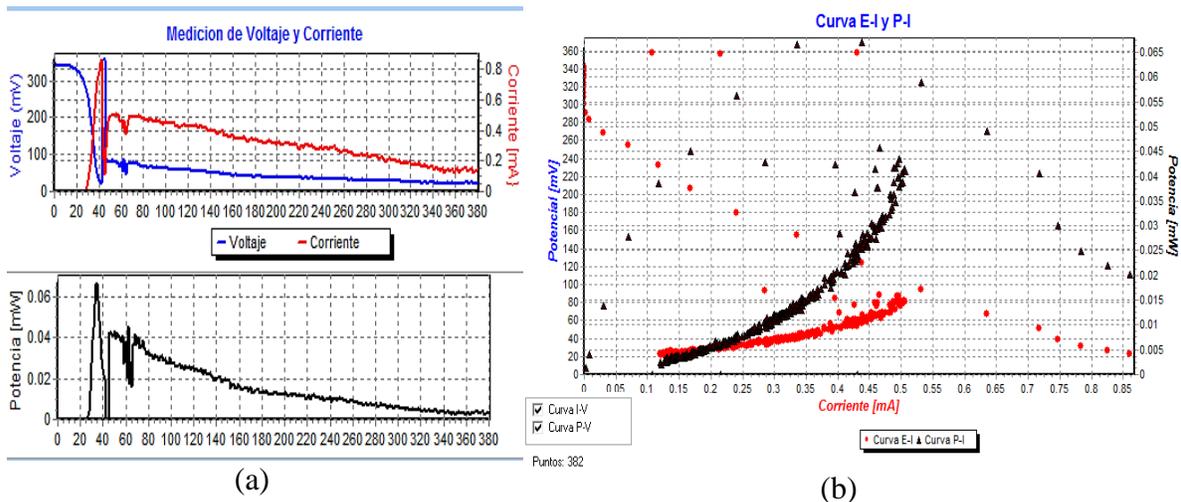


Fig. 5.7.6.2 Celda de bioetanol sometida a condiciones de irradiancia y fijada en el punto de máxima potencia (a) comportamiento del voltaje, corriente y potencia; (b) curva potencial-corriente (E-I)

Tabla 5.7.6.1 Prueba correspondiente a la figura 55.6.2

$V_{oc} = 357 \text{ mV}$	$I_{sc} = 0.86 \text{ mA}$	Temp. = $23 \text{ }^\circ\text{C}$	$P_{m\acute{a}x} = 0.067 \text{ mW}$
$V_m = 124 \text{ mV}$	$I_m = 0.44 \text{ mA}$	$A_{celda} = 5 \text{ cm}^2$	F.F. = 0.36

Las gráficas correspondientes a la figura 5.5.6.2(a) brindan información acerca del comportamiento en el tiempo de los parámetros eléctricos de interés en la celda de combustible (potencial, corriente y potencia) sometida a una carga que se acopla al punto de

máxima potencia. En esta prueba se fija el valor de la carga en el punto de máxima potencia obtenido mediante el barrido de la curva E-I, el valor de la carga no se modifica por lo que no se hace el seguimiento de máxima potencia.

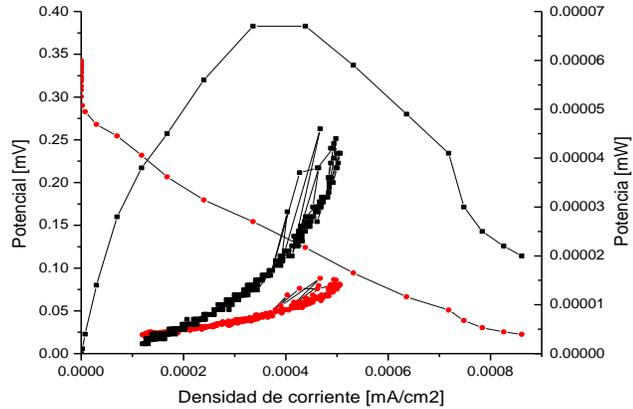


Fig. 5.7.6.3 (a) Prueba con la celda de combustible de bioetanol. (b) curva potencial-corriente (E-I) mostrada en la figura 5.5.6.2(b) graficada en Origin.

La información obtenida en esta prueba permite observar que el valor de la corriente decae más rápidamente que con las pruebas de bioalcohol mostradas con anterioridad. Las soluciones utilizadas en estas pruebas son materia de experimentos particulares de las cuales no se puede dar más información que la correspondiente a la resolución y capacidades del sistema de medición utilizado.

Dado que el proyecto aquí presentado es un instrumento de medición y con la finalidad de validar los resultados obtenidos, se llevaron a cabo comparaciones de mediciones realizadas con el sistema de medición presentado en el presente proyecto con respecto a un instrumento de medición comercial. El instrumento de medición comercial es una fuente de voltaje programable marca Keithley modelo 230 (Keithley 230 Programmable Voltage Source). Las comparaciones realizadas a modo de calibración sirvieron para llevar a cabo los ajustes mínimos a nivel de hardware y software.

Capítulo 6

Conclusiones

El sistema de medición desarrollado es una integración hardware-software aplicado a la caracterización eléctrica de un sistema híbrido basado en tecnología fotovoltaica y tecnología de celdas de combustible, tiene la capacidad de ser controlado en su totalidad desde una computadora personal mediante la utilización de un programa de control diseñado expreso para este propósito. El programa de control brinda una amplia gama de posibilidades de experimentación ante lo cual no se necesitan conocimientos especializados de computación para su operación, es decir, la interfaz gráfica de usuario considera las características de sencillez operacional, ya que con unos cuantos pasos se lleva a cabo todo el proceso de caracterización del sistema híbrido en el cual se puede obtener información numérica y grafica de los parámetros eléctricos medidos en tiempo real. Es importante mencionar que estos datos no pasan por ningún ajuste para ser desplegados en pantalla, lo que permite al experimentador llevar a cabo cualquier tipo de análisis de datos posterior.

Se realizaron dos sistemas de potencia para simular la carga eléctrica variable, a base de capacitor y a base de mosfet y, de donde se determinó a la etapa de mosfet como la que brinda mayores capacidades en cuanto al control del proceso de medición.

La portabilidad del sistema permite transportar el hardware hacia cualquier sitio donde sea requerido lo que brinda la posibilidad de obtener mediciones con diferentes condiciones climáticas o de entorno. En cuanto al software, es un programa ejecutable que puede ser transportado sin ningún problema en cualquier dispositivo de almacenamiento y para llevar a cabo su ejecución no es necesario instalar el programa.

Los componentes electrónicos que conforman el prototipo operan de manera adecuada, permitiendo obtener mediciones a altas frecuencias, aunque gracias al control que se tiene en los dispositivos de potencia, específicamente en el control de la resistencia de carga, no son necesarias altas velocidades para llevar a cabo una medición.

Se llevó a cabo la comparación de resultados entre este equipo y un equipo comercial y, de acuerdo con los resultados obtenidos en el proceso de caracterización de celdas y módulos fotovoltaicos, este proyecto se considera como un equipo con una resolución aceptable comparado con equipos comerciales que cuestan 20 veces más su valor.

Se obtuvo un subproducto del proyecto que aplica para caracterizar celdas fotovoltaicas o de combustible de tipo experimental que sirve para subsanar necesidades de experimentación en el ámbito de la investigación científica relacionada con la fabricación de celdas a partir de

nuevos materiales, mismo que se encuentra en trámite de patente. Es una versión escalada de este sistema de medición.

Trabajo a futuro.

Entre las actividades que pueden considerarse como trabajo a futuro se encuentran las que se mencionan a continuación:

- La generación de modelos que permitan estimar las pérdidas en módulos relacionadas con celdas sombreadas de manera estratégica.
- La reconfiguración de celdas de manera automática mediante la implementación de dispositivos electrónicos de potencia o electromecánicos con fines de investigación.
- La verificación de error de tipo o mismatch, a partir de la interconexión de módulos de diferentes marcas, potencias y tecnologías de fabricación.
- La integración de un circuito electrónico adicional para la conexión de sensores de temperatura de diferentes tipos como termopares, RTD's, sensores en circuitos integrados, etc.

Referencias Bibliográficas

- [1] D. Ginley, A. A. Green and R. Collins, Solar Energy Conversion Toward 1 Terawatt, M R S, Bulletin, Vol 33 (4), pp.355 (2008).
- [2] Revista Mexicana de Física, A. Morales Acevedo, Diseño optimo y realización de celdas solares de silicio para producción industrial, (2004).
- [3] Ciencia y Desarrollo, Electricidad en el futuro, (CONACYT, 2008).
- [4] Martin A. Green, Solar Cell, Operating principles, technology, and system applications, (Prentice-Hall).
- [5] Ned Mohan, Tore M. Undenland, William P Robins. Electrónica de potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño. Edit. McGraw Hill.
- [6] World Energy Balances, IEA, edición 2014
- [7] José Bosh, Manuel Carmona. Instrumentación Electrónica Avanzada, *Instrumentación inteligente*. Departamento de Electrónica Universidad de Barcelona Jul/2012
- [8] Juan Antonio Higuera, Electrónica básica e instrumentación. Univ. Autónoma de Madrid
- [9] William D. Cooper, Albert D. Helfrick, Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición. Ed. Prentice Hall
- [10] Norman S. Nise, Sistemas de Control para Ingeniería. Ed. Cecsca. Tercera Edición
- [11]. Benjamin C. Kuho, Sistemas de Control Digital. Editorial Cecsca, 4ª Edición
- [12] G. A. Olah, A. Goeppert, G. K. Surya Prakash, Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy.
- [13] <http://powergystix.com/fuel-cell/>
- [14] EG&G Technical Services, Inc., FuelCell Handbook, seventh edition. (2004)
- [15] F.Oreccinni, F. Zuccari, Dispense del corso di Sistemi Energetici I, Università LaSapienza, Roma
- [16] Shanna D. Knights, Kevin M. Colbow, J. St-Pierre, David P. Wilkinson. Aging mechanisms and lifetime of PEFC and DMFC
- [17] J. Larminie, A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Second edition (2003)
- [18] Nguyen, D. H. and Widrow, B., "Neural Networks for Self-Learning Control Systems," IEEE Control Systems Magazine, vol. 10 pp. 18-23, 1990.
- [19] WENHAM, Stuart R., GREEN, Martin A. y WATT Muriel E. Applied Photovoltaics. 2ª ed. Londres: Earthscan, 2007.
- [20] González Velasco, Jaime. "Energía solar. Dispositivos fotovoltaicos". Energías renovables. 1ª ed. Madrid: Editorial Reverté, 2009.
- [21] Serway Física para Ciencias e Ingeniería Vol. II 5ta Edición Mc Graw Hill 2005.

- [22] Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico. Universitat Rovira I Virgili. Jordi Pallejá Cabré. Septiembre 2012
- [23] Tocci, Widmer, Moss, Sistemas Digitales, principios y aplicaciones
- [24] A. Palma, A. Palomo, S. Liscano, F. Mendoza. Caracterización eléctrica de las celdas de combustible de óxido sólido. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vice-Rectorado Puerto Ordaz.
- [25] MANZANO, Francisca. “Prototipo Experimental de Sistema Híbrido basado en Pilas de Combustible: Diseño, Modelado, Implementación y Testeo”, Tesis Doctoral, Universidad de Huelva, 2009.
- [26] T Yalcinoz y M Alam. “Dynamic Modeling and Simulation of Air-Breathing Proton Exchange Membrane Fuel Cell”, Journal of Power Sources, Vol. 182, 2008, Pp 168-174.
- [27] GEBREGERGIS Abraham. “Solid Oxide Fuel Cell Modeling”, IEE Transactions on industrial electronics, Vol. 56, 2009, Pp 139-148.
- [28] BIERBERDE Anja. “The Electrochemistry of Solid Oxide Fuel Cell Anode: Experiments, Modeling and Simulations”, Tesis Doctoral, Instituto Suizo Federal de Tecnología de ZURICH, 2000.
- [29] J.E. Larminie, A.Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Chichester, U.K., Wiley, pp.308, 2000.
- [30] I. Zamora, J.I. San Martín, J.J. San Martín, M. Larruskain, V. Aperribay, “Technologies of fuel cells in Electrical Microgeneration”, Proceedings of the International Symposium, MEPS’06, pp.138-143, 2006.
- [30] Robert F. Coughlin. Frederick F. Driscoll. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. Ed. Prentice Hall.
- [31] P. Grunow, S. Lust, D. Sauter, C. Hoffmann, C. Beneking, B. Litzenburger and L. Podlowski, "Weak light performance and annual yields of pv modules and systems as a result of the basic parameter set of industrial solar cells," 19th EUPVSEC, pp. 2190-2193, 2004
- [32] M. Müller, J. Isenberg, B. Hund, H. Beyer and M. Sedlacek, "Influence of shunt resistance, series resistance and recombination current on weak light performance of industrial silicon solar cells," 25th EUPVSEC , pp. 2604-2606, 2010.
- [33] M. López, J. Galán, J. Rando, L. López Caballero and L. López, "Influence of resistivity and shunt resistance in PV modules performance," 25th EUPVSEC, pp. 2676-2677, 2010.
- [34] K. Emery and C. Osterwald. Solar cell efficiency measurements. Solar Cells, vol.17, pp. 253-274, 1985.
- [35] J. E. Flores Mena, Caracterización eléctrica de una celda solar de silicio monocristalino. Internet Electronic Journal. Nanociencia et moletrónica. Dic. 2010, Vol. 8, N. 22

- [36] L. De Bernardez, Medición de la curva I-V a oscuras de las celdas de un módulo fotovoltaico. Avances en Energías renovables y medio ambiente. Vol. 8. N. 1. Argentina (2004). ISSN 0329-5184
- [37] Tatiana Vargas y Augusta Abrahamse, Trazador de curvas I-V de código abierto para monitoreo de rendimiento de paneles fotovoltaicos en Bolivia. Investigación y Desarrollo. N. 14. Vol. 1. Bolivia (2014). ISSN 1814-6333
- [38] Yingying Kuai, S. Yuvarajan. An electronic load for testing photovoltaic panels. Electrical and Computer Engineering Department, North Dakota State University. 2005
- [39] Vicente Leite y Faustino Chenlo. An improved electronic circuit for tracing the I-V characteristics of photovoltaic modules and strings. Polytechnic Institute of Bragança, School of Technology and Management. 2010.
- [40] Anwar Sahbel, Naggar Hassan. Experimental performance characterization of photovoltaic modules using DAQ. Faculty of engineering, The British University in Egipt. 2013
- [41] Vargas, Amado; Quintero B., César; Sanjuanes M., Carmelo(2008). Diseño y construcción de un generador proto-tipo de energía mediante paneles solares-hidrogeno celda combustible. 1ª. Edición. Bogotá. Centro de Investigación y Desarrollo Científico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 41 pp