



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE MONITOREO DE PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE BAJO COSTO, PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO, CON UN SUMINISTRO DE ENERGÍA AUXILIAR POR GENERADOR MONOFÁSICO, EN UN CENTRO DE SALUD TIPO B

Carlos Manuel Maldonado Mendizabal

Asesorado por el Ing. Mario Gustavo López Hernández

Guatemala, octubre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE MONITOREO DE PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE BAJO COSTO, PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO, CON UN SUMINISTRO DE ENERGÍA AUXILIAR POR GENERADOR MONOFÁSICO, EN UN CENTRO DE SALUD TIPO B

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS MANUEL MALDONADO MENDIZABAL

ASESORADO POR EL ING. MARIO GUSTAVO LÓPEZ HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Antonio de León Escobar
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Walter Giovanni Alvarez Marroquín
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE MONITOREO DE PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE BAJO COSTO, PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO, CON UN SUMINISTRO DE ENERGÍA AUXILIAR POR GENERADOR MONOFÁSICO, EN UN CENTRO DE SALUD TIPO B

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 25 de noviembre de 2019.

Carlos Manuel Maldonado Mendizabal



Guatemala, 26 de Marzo del 2,021.

A QUIEN INTERESE:

El objeto de la presente es para hacer de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación, realizado por el Señor **CARLOS MANUEL MALDONADO MENDIZABAL**, con DPI número 2846 28646 0101 y número de carné 201314800, denominado:

“DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE MONITOREO DE PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE BAJO COSTO, PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO, CON UN SUMINISTRO DE ENERGÍA AUXILIAR POR GENERADOR MONOFÁSICO, EN UN CENTRO DE SALUD TIPO B.”

Trabajo que ha realizado para optar al título de Ingeniero Electrónico; en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala; y he verificado que cumple con los requisitos necesarios, por lo que doy la aprobación a dicho trabajo.

Atentamente,

Ing. Mario Gustavo López Hernández
Profesor Titular II

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Departamento de Matemática

+(502) 5466-4645

E-mail: mariogustavo.lopezhernandez@gmail.com



REF. EIME 105.2021.

10 DE JUNIO 2021.

Señor Director

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE MONITOREO DE PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE BAJO COSTO, PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO, CON UN SUMINISTRO DE ENERGÍA AUXILIAR POR GENERADOR MONOFÁSICO, EN UN CENTRO DE SALUD TIPO B, del estudiante Carlos Manuel Maldonado Mendizabal, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. José Anibal Silva de los Angeles
Coordinador de Electrotécnica



SRO



REF. EIME 106. 2021.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; CARLOS MANUEL MALDONADO MENDIZABAL titulado; DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE MONITOREO DE PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE BAJO COSTO, PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO, CON UN SUMINISTRO DE ENERGÍA AUXILIAR POR GENERADOR MONOFÁSICO, EN UN CENTRO DE SALUD TIPO B, procede a la autorización del mismo.

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo



GUATEMALA, 29 DE JUNIO 2,021.



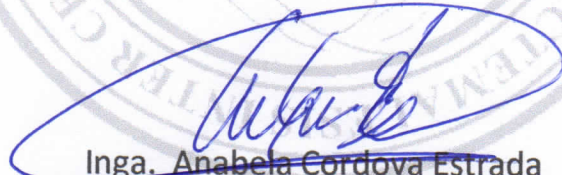
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

DTG. 584-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE MONITOREO DE PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE BAJO COSTO, PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO, CON UN SUMINISTRO DE ENERGÍA AUXILIAR POR GENERADOR MONOFÁSICO, EN UN CENTRO DE SALUD TIPO B**, presentado por el estudiante universitario: **Carlos Manuel Maldonado Mendizabal**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, octubre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por regalarme el don de la vida y por ser fuente de sabiduría e inspiración. Toda la gloria para Él.
- Mis padres** Manuel Maldonado y Doroty Mendizabal, por su amor incondicional, por sus consejos, sus oraciones, y su apoyo emocional, moral y económico en mi vida.
- Mi hermano** Luis Maldonado por su amor y enseñanzas en cada proceso importante de mi vida.
- Mis amigos de la Universidad** Balam Lol, José Orellana, Jorge Gutiérrez, Jorge Cardona y muchos más, por su amistad en cada etapa vivida en la universidad.
- Mi abuelita** Ana Beatriz Chajón, por ser parte de los momentos más difíciles y felices de mi familia.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y por brindarme la oportunidad de desarrollar una carrera universitaria.
Manuel Maldonado y Doroty Mendizabal	Por haberme apoyado en cada instante, siendo su ejemplo de amor, fe y unidad la semilla más importante para mi vida.
Mis amigos de San Juan Chamelco, A.V.	Por su ejemplo de superación y acompañamiento durante los primeros años de mi carrera.
Karina López	Por su cariño y apoyo emocional, por su paciencia, empatía, consejos, y escucha durante cada paso de la realización de este trabajo.
Ing. Arturo Samayoa	Por brindarme la oportunidad de laborar en el Departamento de matemática de la Facultad de Ingeniería durante la última etapa de mi carrera universitaria.
Inga. Vera Marroquín	Por su acompañamiento sincero como catedrática y compañera de trabajo en el Departamento de matemática.

Ing. Mario Hernández

Por el tiempo, motivación y dedicación brindados a la revisión de este trabajo.

Kingo Energy

Por haber creído en mí y brindarme un trabajo que permita encender vidas en el país, por brindarme la experiencia necesaria para culminar este trabajo.

Mis compañeros de trabajo

Balam Lol, Daniel González, Luis Pinillos y Manuel Contreras por sus invaluable enseñanzas y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XV
GLOSARIO.....	XVII
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO	1
1.1. Efecto fotovoltaico	1
1.2. Celdas fotovoltaicas.....	4
1.3. Módulos fotovoltaicos	5
1.3.1. Tecnologías de módulos fotovoltaicos	6
1.3.1.1. Módulos de silicio cristalino	6
1.3.1.2. Módulos de silicio amorfo (a-Si)	7
1.3.1.3. Diselenuro de indio de cobre.....	7
1.3.1.4. Heterounión con capa delgada intrínseca	8
1.4. Condiciones de prueba estándar (STC).....	8
1.4.1. Masa del aire	8
1.4.2. Irradiancia.....	9
1.4.3. Gráficas de caracterización.....	9
1.4.3.1. Irradiancia variable.....	10
1.4.3.2. Temperatura variable	11
1.4.3.3. Efecto de la temperatura	13
1.5. Características eléctricas.....	14

1.5.1.	Voltaje a circuito abierto	15
1.5.2.	Corriente de cortocircuito.....	15
1.5.3.	Voltaje y corriente a máxima potencia	15
1.5.4.	Eficiencia.....	16
1.5.5.	Potencia máxima en condiciones STC	16
	1.5.5.1. Voltaje nominal	16
1.6.	Consideraciones del diseño de un sistema fotovoltaico híbrido.....	16
1.6.1.	Norma NFPA 70 o NEC.....	17
	1.6.1.1. Artículo 690	17
1.6.2.	Componentes eléctricos y electrónicos.....	19
	1.6.2.1. Caja combinadora de circuitos.....	19
	1.6.2.2. Cableado eléctrico	21
	1.6.2.3. Protección contra sobrecorriente	23
	1.6.2.4. Inversor	25
	1.6.2.5. Generadores.....	27
2.	DIMENSIONAMIENTO TÉCNICO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO PARA EL CENTRO DE SALUD TIPO B.....	29
2.1.	Sistemas fotovoltaicos para la salud	29
	2.1.1. Entorno de aplicación del dispositivo	30
	2.1.1.1. Centro de salud tipo B	31
2.2.	Diagrama de bloques general del dimensionamiento	32
2.3.	Procedimiento del dimensionamiento.....	34
	2.3.1. Localización de la instalación	34
	2.3.2. Cálculo del consumo energético y potencia requerida	37
	2.3.3. Dimensionamiento del generador fotovoltaico	42
	2.3.3.1. Hora solar pico	42

2.3.3.2.	Potencia nominal de los módulos fotovoltaicos	45
2.3.3.3.	Potencia generada de los módulos fotovoltaicos	46
2.3.3.4.	Cantidad de módulos fotovoltaicos	48
2.3.4.	Dimensionamiento del inversor de corriente	50
2.3.4.1.	Condiciones para elección del inversor	52
2.3.4.2.	Plan de dimensionamiento del inversor	54
2.3.4.3.	Elección, resultados y análisis del dimensionamiento del inversor	55
2.3.5.	Dimensionamiento del generador monofásico	58
2.3.5.1.	Cálculo del tamaño de la carga	59
2.3.5.2.	Conversión de kW a kVA	59
2.3.5.3.	Definición los requisitos de funcionamiento	60
2.3.5.4.	Análisis de las condiciones del sitio y el acceso	61
2.3.5.5.	Elección del generador monofásico	61
2.3.6.	Diagrama de interconexión del sistema	67
2.3.7.	Dimensionamiento del cableado eléctrico	69
2.3.7.1.	Elección del cableado eléctrico	70
2.3.8.	Consumos de combustible del generador	72
3.	DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE MONITOREO DE PARÁMETROS ENERGÉTICOS	75
3.1.	Introducción	75
3.2.	Descripción general del dispositivo	76

3.3.	Resumen del <i>hardware</i>	78
3.3.1.	Consideraciones del diseño.....	78
3.3.2.	Diagrama de bloques del hardware	79
3.3.3.	Resumen de los componentes principales	81
3.3.3.1.	Sensor de corriente lineal ACS770xCB	81
3.3.3.2.	Amplificador operacional dual LM358B	84
3.3.3.3.	Convertidor <i>True RMS</i> a corriente directa AD8436.....	87
3.3.3.4.	Relé electromecánico de potencia HE1aN-P-DC6V-Y5	92
3.3.3.5.	Aislador de salida de colector abierto Si8711AC-B.....	94
3.3.3.6.	Microcontrolador MSP430FR2155.....	98
3.3.3.7.	Aislador digital ISO7721	102
3.3.3.8.	Controlador de transformador para fuentes de alimentación aisladas SN6501	104
3.3.3.9.	Microcontrolador MSP430FR2476.....	106
3.4.	Teoría de diseño del dispositivo	110
3.4.1.	Operación en la adquisición de datos	110
3.4.2.	Valor RMS verdadero (<i>True RMS</i>) de una señal en corriente alterna.....	111
3.4.3.	Filtros analógicos <i>Butterworth</i>	112
3.4.3.1.	Magnitud, variación en transmisión y orden del filtro <i>Butterworth</i>	113
3.4.3.2.	Modos naturales del filtro <i>Butterworth</i>	116

3.4.4.	Topología <i>Sallen-Key</i> de segundo orden	118
3.4.5.	Modelos de conexión de la interfaz de entrada	120
3.5.	Diseño de los circuitos esquemáticos del dispositivo	123
3.5.1.	Interfaz analógica de entrada	123
3.5.1.1.	Sensores de corriente	126
3.5.1.1.1.	Error total de salida	126
3.5.1.1.2.	Conversión del sensor de corriente	127
3.5.1.1.3.	Aplicación del sensor para corriente directa ..	130
3.5.1.1.4.	Aplicación del sensor para corriente alterna ..	133
3.5.1.2.	Medición de voltaje del panel solar.....	135
3.5.1.3.	Medición de voltaje del generador monofásico.....	137
3.5.1.4.	Filtros analógicos de los sensores.....	141
3.5.2.	Unidad de digitalización y control	148
3.5.2.1.	Bloque de conversión analógico digital	148
3.5.2.2.	Bloque de aislamiento y regulación de voltaje.....	154
3.5.2.2.1.	Alimentación aislada para interfaces de 3,3 V	155
3.5.2.2.2.	Alimentación aislada para para interfaces de 5 V.....	161
3.5.2.3.	Bloque de control principal	166
3.5.3.	Interfaz de potencia	172

3.5.3.1.	Interruptores de potencia para los inversores de corriente	172
3.5.3.2.	Interruptor para el generador monofásico	178
4.	DISEÑO DE LA PLACA DE CIRCUITO IMPRESO (PCB)	183
4.1.	Descripción general de la PCB.....	184
4.2.	Resumen de los módulos	184
4.3.	Etapas de diseño de la placa de circuito impreso (PCB)	189
4.3.1.	Módulo de entrada.....	190
4.3.2.	Módulo de procesamiento	192
4.3.3.	Módulo de salida	195
4.4.	Comparación del dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos	197
5.	DISEÑO DE LA LÓGICA DE CONTROL DEL DISPOSITIVO DE MONITOREO DE PARÁMETROS ENERGÉTICOS	201
5.1.	Especificaciones de la lógica de procesamiento, de automatización y comunicación.....	202
5.2.	Descripción del entorno de programación	203
5.2.1.	Entorno de desarrollo para la aplicación local.....	203
5.2.2.	Entorno de desarrollo para la aplicación remota ...	206
5.3.	Diseño del módulo de control del procesamiento y automatización	207
5.3.1.	Descripción general de la disposición de las librerías del <i>firmware</i>	208
5.3.2.	Proceso en segundo plano del <i>firmware</i> de la interfaz ADC	212

5.3.3.	Proceso en primer plano del <i>firmware</i> de la interfaz ADC	215
5.3.3.1.	Adquisición de las señales por ADC...	218
5.3.3.2.	Cálculo de los parámetros energéticos	218
5.3.3.2.1.	Cálculo de la corriente en DC y AC	219
5.3.3.2.2.	Cálculo del voltaje en DC.....	221
5.3.3.2.3.	Cálculo del voltaje en AC.....	222
5.3.3.2.4.	Cálculo de potencia en DC.....	225
5.3.3.2.5.	Cálculo de potencia en AC.....	227
5.3.4.	Descripción del <i>firmware</i> de la interfaz de control .	228
5.3.5.	Descripción del <i>firmware</i> de la comunicación por UART de la interfaz de control	232
5.3.5.1.	Algoritmos de comunicación por UART de la interfaz de control	232
5.3.5.2.	Descripción de la comunicación remota.....	235
CONCLUSIONES.....		239
RECOMENDACIONES.....		241
BIBLIOGRAFÍA.....		243
APÉNDICES.....		253
ANEXOS		259

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Efecto fotoeléctrico.....	2
2.	Efecto fotovoltaico.....	3
3.	Celda, módulo y arreglo fotovoltaico	5
4.	Corriente vs., voltaje para diferentes niveles irradiancia	11
5.	Corriente vs., voltaje para diferentes temperaturas con irradiancia de 1 000 W/m ²	12
6.	Etiqueta de características eléctricas de un módulo fotovoltaico	14
7.	Caja combinadora de circuito para 3 cadenas de módulos fotovoltaicos	20
8.	Fusible e interruptor termomagnético	25
9.	Diagrama de bloques general del sistema híbrido fotovoltaico con sistema de monitoreo electrónico	33
10.	Irradiación Global Horizontal en Guatemala en KWh/m ²	36
11.	Especificaciones del módulo fotovoltaico	48
12.	Especificaciones generales del generador HYW-1 M6	62
13.	Cuadro de control manual M6	64
14.	Conexionado Central M6.....	66
15.	Interconexión del sistema fotovoltaico híbrido	67
16.	Indicadores gráficos para el diagrama de bloques del sistema	79
17.	Diagrama de bloques del dispositivo electrónico	80
18.	Ejemplo de aplicación sensor de corriente ACS770	82
19.	Ejemplo de aplicación de un filtro pasa bajos con el CI LM358B.....	85
20.	Configuración de pines del CI LM358B	86

21.	Diagrama funcional del CI AD8436.....	89
22.	Configuración de los pines del CI AD8436.....	90
23.	Ejemplo de aplicación del relé HE1aN-P-9V DC-Y5	93
24.	Circuito de aplicación del CI Si8711AC-B.....	96
25.	Configuración de pines del CI Si8711AC-B	97
26.	Diagrama esquemático del microcontrolador MSP430FR2155	101
27.	Circuito de aplicación del CI ISO7721.....	103
28.	Circuito de aplicación del controlador SN6501.....	105
29.	Diagrama esquemático del microcontrolador MSP430FR2476	109
30.	Elementos de un sistema de adquisición de datos digital	110
31.	Características de transmisión de un filtro pasa bajos	112
32.	Respuesta en magnitud de un filtro <i>Butterworth</i>	114
33.	Gráfica para determinar los polos de un filtro <i>Butterworth</i> de orden N.....	117
34.	Topología <i>Sallen-Key</i> de segundo orden ganancia unitaria	119
35.	Modelo de conexión con amplificadores analógicos aislados	121
36.	Amplificador operacional aislado ISO224	121
37.	Modelo de conexión con aislador digital	122
38.	Conexión de los sensores DC	124
39.	Conexión de los sensores AC.....	125
40.	Divisor de voltaje para el sensor de corriente	128
41.	Circuito sensor de corriente DC.....	132
42.	Circuito sensor de corriente AC	135
43.	Circuito sensor de voltaje DC	137
44.	Circuito sensor de voltaje AC.....	140
45.	Gráfica modos naturales del filtro <i>Butterworth</i>	144
46.	Circuito esquemático del filtro <i>Butterworth</i>	147
47.	Conexión de pines protocolo UART	149
48.	Concepto básico del protocolo <i>Spy-Bi-Wire</i>	150

49.	Circuito del bloque digital con el microcontrolador MSP430FR2155 ..	153
50.	Diagrama del bloque de aislamiento y regulación de voltaje de 3,3 V	156
51.	Circuito de la alimentación aislada para interfaces de 3,3 V.....	161
52.	Diagrama del bloque de aislamiento y regulación de voltaje de 5 V ...	162
53.	Circuito de la alimentación aislada para interfaces de 5 V.....	165
54.	Circuito del bloque digital con el microcontrolador MSP430FR2476 ..	171
55.	Circuito interruptor de potencia de los inversores de corriente	176
56.	Características eléctricas de la central M6 de mando del generador monofásico HIMOINSA	179
57.	Circuito interruptor de baja potencia para el generador monofásico ...	181
58.	Distribución espacial de la PCB	186
59.	Conectores de rosca externa de tipo <i>through hole</i> para módulos de entrada y salida nro. 1 a 4	187
60.	Conectores de rosca externa de tipo <i>through hole</i> para el módulo de entrada nro. 5.....	188
61.	Arandelas de cable tubular para el cableado.....	188
62.	Diagrama relacional entre PCB y circuito esquemático	189
63.	Circuito impreso del módulo de entrada para la aplicación del sensor de corriente directa	190
64.	Circuito impreso del módulo de entrada para la aplicación del sensor de corriente alterna	192
65.	Circuito impreso del módulo de procesamiento	193
66.	Circuito impreso del módulo de salida para la aplicación relé de alta potencia	196
67.	Circuito impreso del módulo de salida para la aplicación relé de baja potencia	197
68.	Tablero de transferencia automático	199
69.	Vista principal del entorno de programación Code Composer Studio ..	204

70.	Vista de depuración del entorno de programación Code Composer Studio	205
71.	Vista del entorno de desarrollo Pycharm	207
72.	Descripción de la jerarquía del <i>firmware</i>	209
73.	Librerías de proyecto para los microcontroladores MSP430FR2155 y MSP430FR2476	211
74.	Diagrama de flujo de la interrupción por <i>Timer</i> de la interfaz ADC.....	213
75.	Diagrama de flujo de la interrupción por UART de la interfaz ADC	214
76.	Diagrama de flujo del proceso en primer plano del <i>firmware</i> de la interfaz ADC	217
77.	Función para el cálculo de corriente con el sensor ACS770	220
78.	Función para el cálculo de voltaje en DC.....	222
79.	Función para el cálculo del voltaje en AC	225
80.	Función para el cálculo de potencia de los paneles solares.....	226
81.	Función para el cálculo de potencia del generador monofásico	227
82.	Diagrama de flujo del programa principal de la interfaz de control, parte 1	229
83.	Diagrama de flujo del programa principal de la interfaz de control, parte 2	230
84.	Diagrama de flujo del programa principal de la interfaz de control, parte 3	231
85.	Diagrama de flujo de la comunicación por UART de la interfaz de control hacia la interfaz ADC	233
86.	Diagrama de flujo de la comunicación por UART de la interfaz de control hacia módulo <i>bluetooth</i>	234

TABLAS

I.	Equipos eléctricos por ambiente en un centro de salud tipo B	37
II.	Consumo eléctrico por equipo en un centro de salud tipo B.....	40
III.	Resumen de los totales del consumo de los equipos	42
IV.	Tabla de la Radiación global en una superficie horizontal, para el año 2019 en Guatemala.....	44
V.	Hora solar pico para el año 2019 en Guatemala	44
VI.	Resumen de la cantidad de módulos fotovoltaicos	50
VII.	Parámetros de un inversor de corriente	50
VIII.	Parámetros de diseño del inversor CSI-4KTL1P-GI-FL.....	56
IX.	Resultados del dimensionamiento por inversor	57
X.	Requerimientos del generador monofásico	61
XI.	Especificaciones eléctricas del dispositivo electrónico	78
XII.	Descripción de los pines del CI ACS770xCB	83
XIII.	Descripción de los pines del CI LM358B	86
XIV.	Descripción de los pines del CI AD8436	91
XV.	Descripción de los pines del CI Si8711AC-B.....	97
XVI.	Criterios de diseño del sensor de corriente en DC	131
XVII.	Criterios de diseño del sensor de corriente en AC.....	133
XVIII.	Criterios de diseño sensor de voltaje del panel solar.....	136
XIX.	Criterios para la medición de voltaje del generador monofásico	139
XX.	Criterios de diseño para el filtro <i>Butterworth</i>	143
XXI.	Descripción de las conexiones del microcontrolador MSP430FR2155.....	151
XXII.	Criterios de diseño del bloque de alimentación aislada con regulador de voltaje de 3,3 V	157
XXIII.	Criterios de diseño del bloque de alimentación aislada con regulador de voltaje de 5 V	164

XXIV.	Descripción de las conexiones del microcontrolador MSP430FR2476	168
XXV.	Criterios para los interruptores de potencia de los inversores de corriente	173
XXVI.	Comparación de los interruptores de potencia	174
XXVII.	Criterios de diseño del interruptor para el generador monofásico	180
XXVIII.	Comparación técnica del dispositivo de parámetros energéticos	198
XXIX.	Definición de los parámetros constantes del sensor ACS770	221
XXX.	Especificaciones básicas para la comunicación serial	235
XXXI.	Comandos UART de lectura de información del dispositivo	235
XXXII.	Formato de los comandos UART de lectura	236
XXXIII.	Comandos UART de escritura de información del dispositivo	237
XXXIV.	Formato de los comandos UART de escritura	237

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
AC	Corriente alterna (<i>alternating current</i>)
dB	decibeles
°C	Grados centígrados
DC	Corriente directa (<i>direct current</i>)
kW	Kilowatts
kWh/m²	Kilowatt hora por metro cuadrado
Mbps	Megabits por segundo
mA	Miliamperios
Vrms	Voltios nominales (<i>root mean square</i>)
VDC	Voltios en corriente directa (<i>direct current</i>)
VAC	Voltios en corriente alterna (<i>alternating current</i>)
Vpk	Voltaje pico
Vpp	Voltios pico a pico
W	Watts
W/m²	Watts por metro cuadrado

GLOSARIO

ADC	Conversión analógica a digital (<i>Analog to digital conversión</i>). Proceso para digitalizar una señal proveniente de un transductor.
C	Lenguaje de programación de bajo nivel.
CAD	<i>Software</i> para diseño asistido por computadora. (<i>Computer-aided design</i>).
CI	Circuito integrado. Componente electrónico de dimensiones pequeñas que proporciona funciones específicas.
CMOS	Tecnología de tipo semiconductor complementario de óxido metálico (<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>).
CMTI	Tasa máxima tolerable de subida o bajada del voltaje de modo común aplicado entre dos circuitos aislados. (<i>Common Mode Transient Immunity</i>).
ESD	Descarga electrostática (<i>Electrostatic Discharge</i>).

I2C	Protocolo de comunicación serial síncrono entre dos dispositivos desarrollado por Philips Semiconductor (<i>Inter-Integrated Circuit</i>).
LCD	Pantalla delgada formada por pixeles colocados delante de una fuente de luz. (<i>Liquid Cristal Display</i>).
LOD	Componente electrónico regulador de voltaje de baja caída (<i>Low Dropout</i>).
LED	Diodo emisor de luz (<i>Light emitting diode</i>). Componente electrónico que emite luz al aplicar un voltaje en sus terminales.
FET	Transistor de efecto de campo. (<i>Field-Effect Transistor</i>).
Firmware	Programa informático que provee el control de bajo nivel de un dispositivo específico de hardware.
MCU	Unidad de control programable de dimensiones pequeñas para aplicaciones embebidas. (<i>Micro Controller Unit</i>).
NEC	Código Eléctrico Nacional (<i>National Electric Code</i>). Documento que consta de artículos para garantizar la instalación de equipos eléctricos, como también, de cableado eléctrico en Estados Unidos.

PCB	Placa de circuito impreso. (<i>Printed Circuit Board</i>).
Resistencia Pull-down	Componente resistivo conectado entre la referencia de un circuito y un pin de entrada digital.
Resistencia Pull-up	Componente resistivo conectado entre el voltaje de alimentación de un circuito y un pin de entrada digital.
RMS	Raíz Cuadrada media de un número (<i>Root Square Mean</i>).
RS232	Interfaz que designa las reglas para comunicar datos binarios entre un DTE y unDCE (<i>Recommended Standard 232</i>).
RS485	Es un estándar de comunicaciones industrial que define las características eléctricas de los controladores y receptores en una comunicación punto a multipunto (<i>Recommended Standard 485</i>).
RTC	Reloj en tiempo real (<i>Real Time <u>Clock</u></i>).
SPI	Es un protocolo de comunicación serial para transferencia de información entre circuitos integrados (<i>Serial Peripheral Interface</i>).

Texas Instruments	Empresa estadounidense de desarrollo y comercialización de semiconductores.
TIVA C	Tarjeta de desarrollo equipada con ARM Cortex-M4F de la marca Texas Instruments.
TRIAC	Triodo para corriente alterna (<i>Triode for Alternating Current</i>).
UART	Protocolo de comunicación serial para recepción y envío de datos entre dos dispositivos.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se describe el diseño de un dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos de bajo costo para un sistema fotovoltaico híbrido con suministro de energía auxiliar por generador monofásico, en un centro de salud tipo B.

El primer capítulo presenta los fundamentos teóricos de un sistema fotovoltaico. Con base en las condiciones de prueba estándar, se explican las características eléctricas de un módulo fotovoltaico. Seguidamente, se utiliza la Norma NFPA 70 para presentar los componentes eléctricos y electrónicos de un sistema fotovoltaico.

El segundo capítulo describe el procedimiento a realizar para el dimensionamiento técnico del sistema fotovoltaico híbrido para el centro de salud tipo B. Se considera los dimensionamientos de la demanda de energía, el generador fotovoltaico, los inversores de corriente y del generador monofásico.

En el tercer capítulo presenta el diseño de los circuitos esquemáticos del dispositivo de monitoreo. Se presentan el diagrama general del proyecto, el resumen de los componentes principales, la teoría del diseño y la explicación de los cálculos para cada circuito esquemático.

El cuarto capítulo presenta las etapas del diseño de la placa de circuito impreso. Se divide en los módulos de entrada, de procesamiento y de salida.

El quinto capítulo presenta un diseño de la lógica de control del dispositivo, que incluyen los módulos de control de procesamiento y automatización, como también, el módulo de control de la comunicación.

OBJETIVOS

General

Diseñar un dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos de bajo costo, para un sistema fotovoltaico híbrido, con un suministro de energía auxiliar por generador monofásico, en un centro de salud tipo B.

Específicos

1. Presentar la teoría de los sistemas fotovoltaicos híbridos y consideraciones eléctricas de sus componentes.
2. Realizar un dimensionamiento técnico de un sistema fotovoltaico híbrido para un centro de salud tipo B.
3. Presentar un diagrama de interconexión detallado de un sistema fotovoltaico híbrido para un centro de salud tipo B.
4. Diseñar el dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos considerando una comunicación remota por bluetooth.
5. Diseñar el circuito electrónico de potencia para accionar el suministro auxiliar de energía por generador monofásico.
6. Describir las funcionalidades del dispositivo electrónico de monitoreo de parámetros energéticos.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sistemas fotovoltaicos comerciales se utilizan en aplicaciones de generación de energía limpia en edificios, universidades o casas residenciales. Algunos otros ámbitos de gran importancia para el uso de energía renovable son los hospitales o centros de salud. En el país, existen un total de 95 centros de salud tipo B, con una demanda de energía de la red eléctrica nacional. Un sistema nacional para salud alimentado por energía solar contribuye a mantener la atención médica continua, donde las fallas repentinas de la red eléctrica se disminuyan por una fuente de energía renovable.

A pesar de que la energía solar es gratuita, hay ocasiones en las cuales el clima adverso no permite su transformación en electricidad. Los días lluviosos o simplemente la nubosidad presente en algunos territorios del país dificulta que se obtenga la máxima irradiación proveniente del sol. Los sistemas fotovoltaicos híbridos cuentan con un suministro de energía auxiliar, ya sea eólico, o por moto generador. La generación de electricidad por turbinas eólicas no es viable en lugares poblados, porque se necesitan grandes estructuras en campos, donde el viento circula con mayor facilidad. La otra opción es la generación de electricidad por moto generador o generador monofásico.

Los generadores monofásicos se caracterizan por su durabilidad. Aunque, el mantenimiento de estos puede ocasionar gastos, se compensa con la constancia en su funcionamiento. Sin embargo, utilizar todos los días el generador monofásico puede ocasionar su deterioro paulatino por sobrecalentamiento, y un elevado gasto de combustible. Un diseño no

convencional, pero viable es utilizando el concepto de sistemas de generación híbridos.

El presente trabajo se divide en dos partes fundamentales, primero, en un dimensionamiento técnico del sistema fotovoltaico híbrido, como segundo, en el diseño del dispositivo electrónico que permite el monitoreo de los parámetros energéticos e intercambio automático de las fuentes de energía. La estructura del trabajo tiene como objetivo brindar el procedimiento completo, en las áreas de electrotecnia y electrónica, para el diseño profesional de un dispositivo electrónico aplicado a sistemas fotovoltaicos híbridos.

1. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO

Un sistema fotovoltaico consiste en el conjunto de dispositivos que permiten transformar la luz del sol en energía eléctrica, para su uso en aplicaciones domésticas o industriales. La energía fotovoltaica es un tipo de electricidad utilizada para redes de distribución, abastecer viviendas aisladas, hospitales, edificios y alimentar todo tipo de aparatos eléctricos.

La palabra fotovoltaico hace referencia a la generación de fuerza electromotriz (voltaico), a partir de la energía lumínica (fotón). Al proceso completo de conversión que se realiza a nivel atómico en los materiales semiconductores se le denomina efecto fotovoltaico.

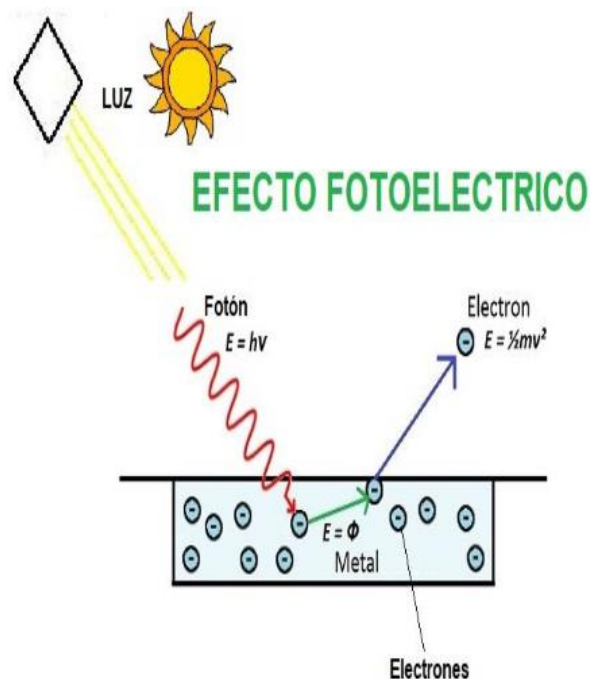
1.1. Efecto fotovoltaico

La luz solar está compuesta por partículas muy pequeñas llamadas fotones, donde cada uno transporta una cantidad de energía, de acuerdo con la longitud de onda del espectro de luz del sol. Los fotones inciden sobre la superficie de una celda solar que está compuesta por materiales semiconductores. De manera individual el fotón puede ser absorbido o reflejado, y este es un comportamiento aleatorio. Los fotones que son absorbidos en la superficie de la celda solar son los que se convierten en energía eléctrica.

El material semiconductor mayoritario en una celda solar es el silicio, el cual está compuesto por cuatro electrones de valencia en su estructura atómica. Cuando los fotones son absorbidos, suministran una cantidad de energía

suficiente para que los electrones de valencia del cada átomo del material semiconductor rompan sus enlaces covalentes, liberando a cada electrón de valencia de la atracción de su átomo. Al electrón libre se le llama carga negativa (-) y al espacio o hueco que dejó, se le denomina carga positiva (+). La figura 1 muestra la partícula de luz incidente en el material, junto al electrón liberado con energía cinética, por lo que se realiza una conversión de energía lumínica a energía cinética. Al proceso descrito se le denomina efecto fotoeléctrico.

Figura 1. **Efecto fotoeléctrico**



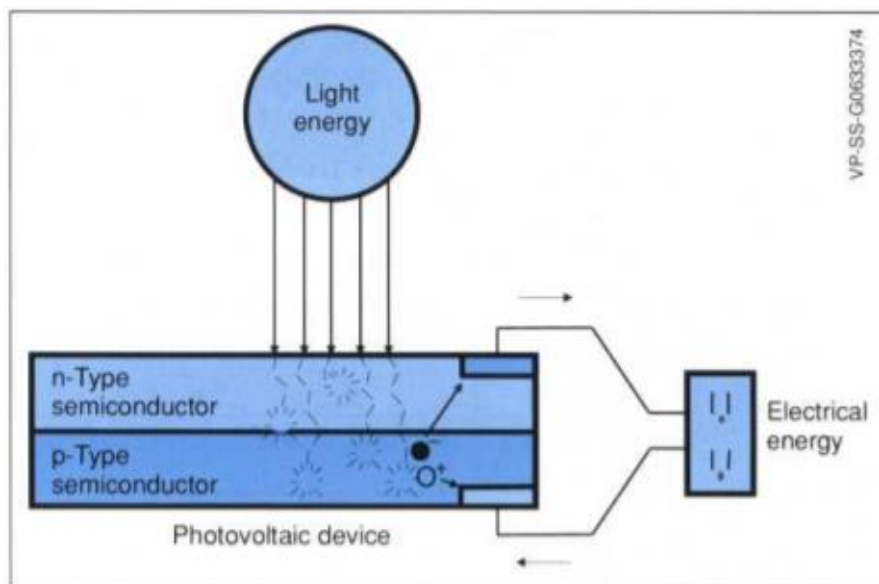
Fuente: AREATECNOLOGICA. *Efecto fotoeléctrico*. <https://www.areatecnologia.com/electricidad/efecto-fotoelectrico.html>. Consulta: 28 de diciembre de 2019. p. 1.

Los electrones que quedan libres, a partir del efecto fotoeléctrico, se mueven aleatoriamente en la estructura de una celda solar, viajando desde el material tipo p dentro de la estructura hacia el material tipo n, como se puede ver

en la Figura 2. Cuando se acumulan las cargas suficientes en las superficies positiva y negativa de la celda solar, se presenta una diferencia de potencial o voltaje eléctrico que puede medirse externamente. A este proceso se le denomina efecto fotovoltaico. En condiciones de cortocircuito, una celda solar produce una corriente eléctrica continua.

Según el laboratorio de energía renovables de los Estados Unidos, las propiedades eléctricas especiales del campo eléctrico incorporado en las celdas fotovoltaicas proporcionan el voltaje necesario para conducir la corriente a través de una carga externa.¹

Figura 2. **Efecto fotovoltaico**



Fuente: COOK, Gary; BILLMAN, Lynn; ADCOCK, Rick. *Photovoltaics Fundamentals*. <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/16319.pdf>. Consulta: 26 de octubre de 2019. p. 8.

¹ COOK, Gary; BILLMAN, Lynn; ADCOCK, Rick. *Photovoltaic Fundamentals*. <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/16319.pdf>. Consulta: 26 de octubre de 2019. p. 8.

1.2. Celdas fotovoltaicas

Una celda fotovoltaica está compuesta por la unión de dos materiales semiconductores dopados con silicio. Entre ellos los más comunes son el fósforo (tipo p) y el boro (tipo n). Una celda solar cuenta con una unión PN en su interior, lo que da lugar a la generación de un campo eléctrico permanente. Las capas de la unión PN deben ser de silicio dopado tipo n con una cantidad mayoritaria de electrones presentes en su red cristalina, que la capa de silicio dopado tipo p.

La función principal de una celda solar es forzar a las cargas positivas y negativas a moverse en direcciones opuestas, no solamente a recombinarse entre sí, para que se pueda producir una diferencia de potencial entre las regiones. Por lo que, una celda solar tiene el comportamiento de un diodo, esto permite el flujo de electrones en una única dirección, desde la región p a la n.

Entonces, una celda fotovoltaica funciona como un generador de energía al que se le ha agregado un diodo. Físicamente, a una celda solar se le añaden un par de terminales eléctricas en sus extremos opuestos, una capa de material anti reflectante para protegerlas, pero que logren absorber la luz y algún otro elemento que procure maximizar la eficiencia de esta. Generalmente, la diferencia de potencial de una celda solar es de aproximadamente 0,5 V, pero puede variar según algún procedimiento de fabricación.

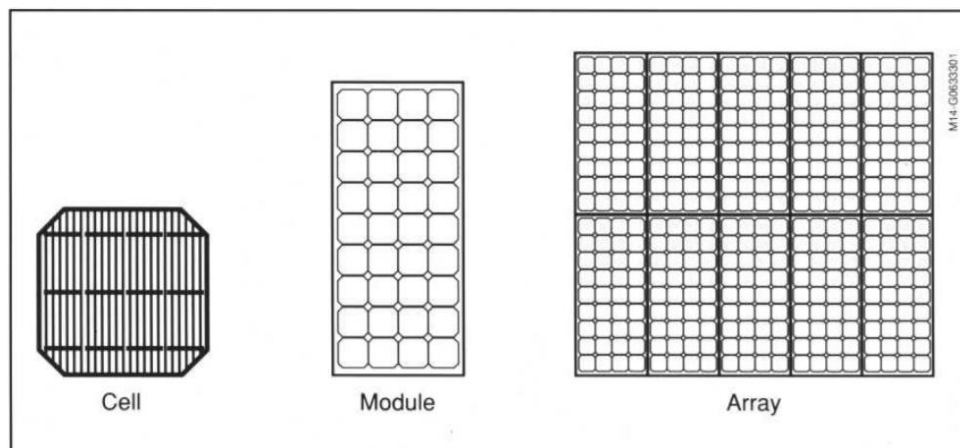
Una celda solar parece ser una fuente de energía potencialmente inagotable, dado que su fuente principal es el sol, entonces la pregunta que se puede realizar es por qué aún no es accesible para todos. Primero que las celdas solares son capaces de transformar la energía solar solamente en la región de luz visible del espectro electromagnético, esto da como consecuencia que, en su mayoría, sean capaces solamente de absorber alrededor del 20 % de la energía

solar. Segundo, existen pérdidas debido a la resistencia producida por las protecciones de vidrio antirrefletores. Tercero, la tecnología de fabricación todavía requiere inversión en investigación para mejorar la calidad de los materiales semiconductores que permiten la absorción de la luz del sol. Por ello, la eficiencia de una celda solar se ve afectada directamente por el material del que se encuentra elaborada, la temperatura ambiente y la conexión con dos o más celdas solares.

1.3. Módulos fotovoltaicos

Un módulo fotovoltaico consiste en la conexión en serie o en paralelo de varias celdas fotovoltaicas, con el fin de aumentar el voltaje o la corriente. Debido a que la conexión puede ser modular, también se le llama módulo fotovoltaico o panel solar. Ambos términos se utilizan de manera indiferente en este trabajo.

Figura 3. Celda, módulo y arreglo fotovoltaico



Fuente: COOK, Gary, BILLMAN, Lynn, Et. Al. *Photovoltaics Fundamentals*.
<https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/16319.pdf>. Consulta: 04 de enero de 2020. p. 44.

La unidad básica es una celda solar, comúnmente produce una cantidad muy pequeña de potencia aproximadamente de 0,5 W. Para producir mayor potencia se interconectan para formar el módulo, el cual se conecta en arreglos para producir mayor potencia. Debido a la característica de modularidad, los sistemas fotovoltaicos pueden estar diseñados para cualquier requerimiento eléctrico, no importando su magnitud. Existen módulos de 36 celdas colocadas en serie y diseñadas para entregar un voltaje de 12 V en los terminales del módulo. Además, existen módulos de 72 celdas, con celdas conectadas en serie para generar 24 V en sus terminales. Se pueden conectar en paralelo con el objetivo de generar mayores niveles de corriente, creando un array de módulos como se observa en la Celda, módulo y arreglo fotovoltaico Figura 3.

1.3.1. Tecnologías de módulos fotovoltaicos

Las tecnologías de los módulos fotovoltaicos están directamente relacionadas con los materiales de los cuales están contruidos. Según el estándar 1562-2007², existen varios tipos de módulos comercialmente disponibles. Entre ellos se encuentran los de silicio cristalino, silicio amorfo, diselenuro de indio de cobre, telururo de cadmio y heterounión con capa delgada intrínseco. Entre ellos existen algunas diferencias en su rendimiento, su respuesta bajo temperaturas y el tamaño máximo de los módulos.

1.3.1.1. Módulos de silicio cristalino

Los módulos policristalinos han sido los más usados en aproximadamente un 80 % alrededor del mundo. Poseen una eficiencia en el rango de 10 a 15 %. Típicamente los módulos de silicio cristalino son más afectados por la sombra

² IEEE Standards Coordinating Committee 21 On Fuel Cells. *IEEE guide for array and battery sizing in stand-alone photovoltaic (PV) systems*. p.38.

que los policristalinos. En cuanto a la temperatura los módulos cristalinos tienden a tener altos coeficientes de temperatura respecto a los de silicio amorfo. A medida que la temperatura aumenta, las salidas de voltaje y potencia decrecen más que los de silicio amorfo. Los módulos de silicio cristalino varían en un rango de tamaño desde *sub-watt* hasta unos 300 W.

1.3.1.2. Módulos de silicio amorfo (a-Si)

Son unos de los tipos de tecnologías de capa delgada. La eficiencia de esta tecnología varía en un rango de 5 % al 7 %, alrededor de la mitad que los de silicio cristalino. Menor eficiencia significa que un panel de este tipo debe ser más grande para alcanzar la misma salida de potencia que uno de silicio cristalino. Este tipo de tecnología es crítica cuando los paneles se implementan en climas cálidos porque para elevadas temperaturas la salida de potencia no decrece tanto como los de tecnología de silicio cristalino. Al igual para reducidos niveles de irradiación o cuando el cielo se encuentra parcialmente nublado, se tiene una mejor respuesta en su salida. Los módulos de silicio amorfo están disponibles hasta una potencia de 128 W.

1.3.1.3. Diselenuro de indio de cobre

Es una tecnología nueva en el mercado, representa un poco más del 0,5 % en ventas en todos los países del mundo. Su eficiencia es de alrededor del 6,5 %. El coeficiente de temperatura negativo para la potencia y el voltaje puede compararse o ser un poco mejor que la tecnología de silicio amorfo. La tecnología está disponible hasta 65 W.

1.3.1.4. Heterounión con capa delgada intrínseca

Se componen de la combinación de las tecnologías de silicio cristalino y amorfo en una sola capa, la mayor cantidad de la luz del sol es utilizado. Su eficiencia es del 16 %. Existen hasta una potencia 190 W.

1.4. Condiciones de prueba estándar (STC)

Las condiciones de prueba estándar (*STC, Standard Test Conditions*) son parámetros que sirven para evaluar el funcionamiento de un módulo fotovoltaico desde su fabricación. El objetivo de una prueba estandarizada es generar las características eléctricas de rendimiento de un panel solar. De esta manera se permite se pueda producir el mismo producto por diferentes fabricantes, permitiendo la comparación entre diferentes módulos fotovoltaicos. Las condiciones de prueba estándar son tres: la temperatura ambiente de 25 C, la masa del aire de 1,5 y el nivel de irradiancia de $1\ 000\ W/m^2$.

1.4.1. Masa del aire

La salida de un módulo fotovoltaico está afectada por el espectro de la luz incidente. El espectro del sol cambia basado en la cantidad de luz que atraviesa la atmosfera. Un módulo fotovoltaico utiliza el espectro de luz producido cuando el sol brilla a través de la masa de aire equivalente a 1,5 veces el grosor de la atmosfera, en el nivel del ecuador, como un estándar.

1.4.2. Irradiancia

La energía solar es el resultado de la radiación electromagnética liberada por el sol, por reacciones termonucleares en su núcleo.³ El sol radia energía considerable sobre la tierra, alrededor de 950 W/m^2 . La radiación solar que llega a la superficie de la Tierra puede ser de tres tipos: radiación solar directa, radiación solar difusa y radiación reflejada. La radiación directa depende de la orientación de la superficie receptora. La radiación difusa se puede considerar independientemente de la orientación de la superficie receptora.

La irradiancia expresada en W/m^2 , es la tasa a la cual incide la energía radiante en una superficie por unidad de área de superficie. La irradiación o radiación, expresada en J/m^2 o KWh/m^2 , es la energía incidente por unidad de área en una superficie, encontrada mediante la integración de la irradiación durante un tiempo específico, generalmente una hora o un día. La insolación es un término que se aplica específicamente a la irradiación de energía solar.

En verano cuando el sol está directamente en su punto máximo, la irradiancia en la superficie de la tierra, al nivel del mar, es aproximadamente de $1\ 000 \text{ W/m}^2$. También se define como pico del sol máximo. En diferentes épocas del año y a diferentes alturas, la irradiancia puede ser mucho mayor.

1.4.3. Gráficas de caracterización

Las condiciones de prueba estándar se establecieron debido a que las características eléctricas varían de manera considerable con la irradiancia y la

³ SARBU, Ioan; SEBARCHIEVICI, Calin. *Solar Heating and Cooling Systems, Solar Radiation*. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128116623000025>. Consulta: 10 de febrero 2020.

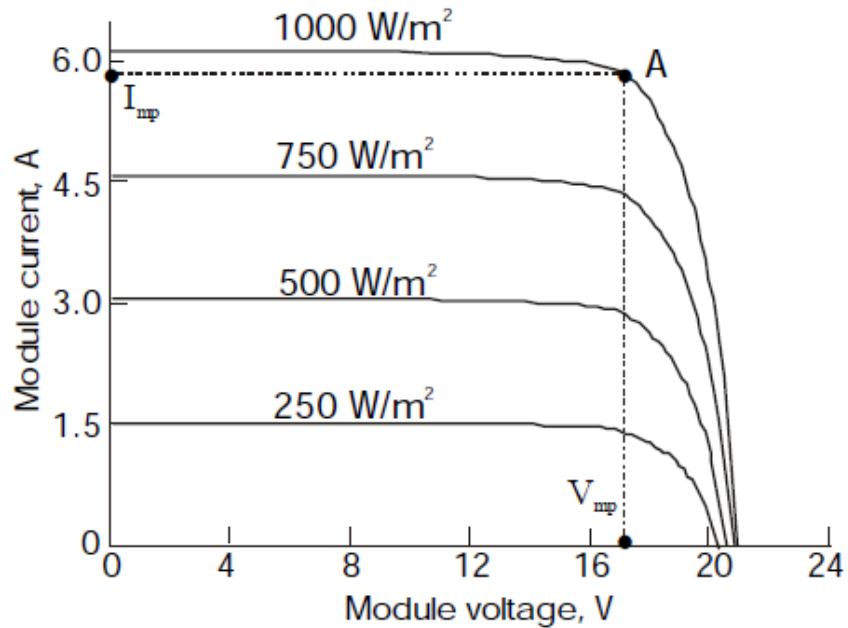
temperatura. Es posible caracterizar un panel solar por medio de la obtención de sus graficas de corriente contra voltaje, bajo las condiciones de irradiancia y temperatura variables.

1.4.3.1. Irradiancia variable

Los paneles solares muestran una dependencia de la corriente generada, que es directamente proporcional a la irradiancia incidente en su superficie. A medida que aumenta la irradiancia incidente, aumenta la corriente eléctrica del panel solar. En la Figura 4 se observa que para un valor de irradiancia de 250 W/m^2 , la corriente del módulo es de 1,5 A, pero para un aumento de la irradiancia del doble, también la corriente se duplica.

Se pueden obtener tres datos importantes de la Figura 4. El primero es que, la corriente del módulo es limitada cuando existe un cortocircuito ($V=0$), llamada corriente de cortocircuito. El segundo es que, el punto A se le denomina de máxima potencia, esto sucede cuando la corriente y voltaje tiene su valor máximo, logrando absorber la mayor cantidad de luz solar (a $1\ 000 \text{ W/m}^2$) para transformar en electricidad. El tercero es que el valor final de corriente sucede cuando es de 0 A, cuando el voltaje tiene un valor máximo, a este valor se le denomina voltaje a circuito abierto.

Figura 4. **Corriente vs., voltaje para diferentes niveles irradiancia**



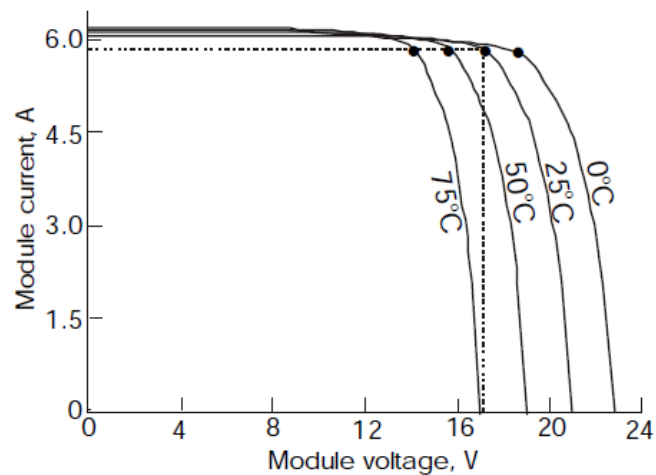
Fuente: DUNLOP, James. *Study Guide for Photovoltaic Systems Installers*. p.8.

El comportamiento de un panel solar para diferentes niveles de irradiancia se representa como la Figura 4, donde los valores de voltaje y corriente solo cambian dependiendo de las características de fabricación.

1.4.3.2. **Temperatura variable**

La corriente y voltaje de un módulo fotovoltaico es dependiente de la temperatura. El voltaje es mucho más dependiente que la corriente para módulos de silicio cristalino. El incremento o decremento de voltaje se mide a través de un coeficiente de temperatura, el cual varía dependiendo de la tecnología del módulo fotovoltaico, como se describe en las secciones anteriores.

Figura 5. **Corriente vs., voltaje para diferentes temperaturas con irradiancia de 1 000 W/m².**



Fuente: DUNLOP, James. *Study Guide for Photovoltaic Systems Installers*. p. 7.

A medida que la temperatura incrementa, la corriente de salida solamente incrementa ligeramente, mientras que el valor de voltaje de máxima potencia decrece aproximadamente 0,5 % por °C, lo que resulta en un decremento de la potencia máxima a la misma tasa. De igual manera, a medida que la temperatura decrece, el voltaje y la potencia incrementa por aproximadamente 0,5 % por °C.

La Figura 5, muestra el comportamiento para un módulo fotovoltaico de silicio cristalino, en ella se observa que alcanza su mayor voltaje a temperatura una menor. La tabla 670,7 del código eléctrico nacional⁴ (NEC, por sus siglas en inglés), brinda los factores de corrección para módulos de esta tecnología que operan a bajas temperaturas.

⁴EARLEY, Mark; SARGENT, Jeffrey; COACHE, Christopher. *National Electrical Code*. p. 1109.

1.4.3.3. Efecto de la temperatura

Según el estándar IEEE 1562-2007⁵ los módulos fotovoltaicos casi siempre están evaluados en condiciones estándares. En la realidad, en un sistema raramente operan a una temperatura de 25 grados centígrados. La temperatura en las celdas puede variar de -40 a 80 °C, dependiendo de la temperatura ambiente, la estructura de montaje, la velocidad del viento, entre otros.

Generalmente la temperatura de operación es importante porque todos los tipos exhiben una reducción de voltajes y potencia a elevadas temperaturas. La manera de medirlo es por medio del coeficiente de temperatura que puede variar desde un rango de 0,1 % a 0,6 %/ °C dependiendo del material del módulo.

Para calcular la salida de voltaje del módulo fotovoltaico a una temperatura diferente que 25 °C, la ecuación es la siguiente:

$$V_O = V_{STC} + V_{STC}C_T(T_A - 25^{\circ}\text{C}) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

V_O es el voltaje del panel solar afectado por la temperatura.

V_{STC} es el voltaje bajo condiciones STC del módulo.

T_A es la temperatura ambiente

C_T es el coeficiente de temperatura de voltaje en $V/^{\circ}\text{C}$.

⁵ IEEE Standards Coordinating Committee 21 on Fuel Cells. Op. Cit. p. 10.

1.5. Características eléctricas

Un módulo fotovoltaico presenta algunas características eléctricas que son importantes para efectos de diseño de ingeniería. Estas se ven afectadas por la irradiancia y la temperatura, por lo que se obtienen bajo condiciones de prueba estándar. Los módulos fotovoltaicos poseen una etiqueta pegada en su parte trasera, donde indican estas características.

Figura 6. **Etiqueta de características eléctricas de un módulo fotovoltaico**

ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS PANEL 100 W	
Tensión de circuito abierto (Voc)	22,3V
Tensión de operación óptima (Vmp)	18,0V
Corriente de cortocircuito (Isc)	6,06A
Corriente de operación óptima (Imp)	5,55A
Potencia máxima en condiciones estándar (STC) (Pmax)	100Wp
Temperatura de operación	-45°C a 85°C
Tolerancia de potencia	± 5%
Tensión nominal	12V
Tensión máxima del sistema	600V
Eficiencia del módulo	13,80%

Fuente: FOTONIA. *¿Qué podemos alimentar con un panel de 100W?* p. 1.

1.5.1. Voltaje a circuito abierto

Se puede medir cuando el módulo fotovoltaico se encuentra en circuito abierto, no existe una corriente eléctrica ($I=0$). Las cargas deben estar desconectadas de sus dos terminales. Es el voltaje máximo del panel solar, y depende mínimamente del cambio en la irradiancia. Para aumentar el voltaje los módulos se conectan en serie, como es el caso de las baterías. El voltaje a circuito abierto es afectado por la temperatura en gran medida, como se observa en la Figura 5. En cambio, su valor varía ligeramente por un cambio en la irradiancia.

1.5.2. Corriente de cortocircuito

Se mide con un amperímetro cuando el módulo fotovoltaico se desconecta del sistema, donde se coloca en un cortocircuito ($V=0$). Se puede observar que tiene un valor limitado. Si se llega a cortocircuitar bajo altos niveles de irradiancia, por largos periodos de tiempo puede dañar el módulo. El valor de corriente obtenido es máximo y sirve para encontrar el calibre del cableado hacia el punto de conexión central.

1.5.3. Voltaje y corriente a máxima potencia

Son los niveles de voltaje y corriente para los cuales el módulo fotovoltaico entrega la máxima potencia posible dado un nivel de irradiancia. Tanto los inversores, como controladores de carga que son utilizados para los arreglos de paneles solares están diseñados electrónicamente para darle seguimiento a un punto de máxima potencia (*MPPT*, por sus siglas en inglés).

1.5.4. Eficiencia

Se define como una medida de la potencia de radiación incidente sobre el panel que se convierte en potencia eléctrica. Es una característica importante porque permite dimensionar de manera óptima una instalación. Es un valor que es dependiente de la tecnología de fabricación. Actualmente el rango se encuentra entre 10 y 22 %.

1.5.5. Potencia máxima en condiciones STC

Es un valor que indica la potencia que puede entregar bajo condiciones de prueba estándar, su valor puede ser mayor o menor con una tolerancia indicada en las especificaciones. El valor indicado es comúnmente por el que se vende comercialmente.

1.5.5.1. Voltaje nominal

Es el voltaje mínimo de operación del módulo fotovoltaico. Su valor debe ser menor que el voltaje a circuito abierto.

1.6. Consideraciones del diseño de un sistema fotovoltaico híbrido

Un sistema híbrido se caracteriza principalmente porque utiliza dos o más fuentes de energía distintas. La fuente principal es la energía solar, pero además se puede utilizar un generador diésel, un aerogenerador o una conexión a la red eléctrica. Los sistemas híbridos fotovoltaicos tienen la ventaja de que no es necesario sobredimensionar notablemente el generador solar (panel solar), para los periodos de baja irradiación. Esto se traduce a un ahorro de dinero considerable.

Un sistema fotovoltaico híbrido con una segunda fuente de alimentación por generador diésel monofásico funciona de tal forma que al no ser suficiente la energía solar producida, se enciende el suministro secundario. Esto permite minimizar las emisiones de CO₂, porque el generador monofásico funciona solo cuando sea necesario.

Para realizar un diseño profesional y apegado a las normas del sistema fotovoltaico se utiliza como referencia un artículo de una norma internacional que aplica para Guatemala, denominada Código Eléctrico Nacional.

1.6.1. Norma NFPA 70 o NEC

Según su página oficial, “la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (*NFPA*) es una organización mundial sin fines de lucro autofinanciada, establecida en 1896, dedicada a eliminar muertes, lesiones, pérdidas materiales y económicas debido a incendios, peligros eléctricos y peligros relacionados.”⁶ La *NFPA* crea un estándar conocido como Código Eléctrico Nacional (NEC, por sus siglas en inglés), el cual describe un conjunto de artículos sobre la instalación y operación segura de los equipos eléctricos.

1.6.1.1. Artículo 690

Según indica el Código Eléctrico Nacional, el artículo 690, está compuesto de ocho partes, se aplica a los sistemas de energía eléctrica fotovoltaica (*PV*), circuitos de paneles solares, inversor y controlador de carga para sistemas fotovoltaicos⁷.

⁶ National Fire Protection Association. *NFPA overview*. <https://www.nfpa.org/overview>. Consulta: enero 2020.

⁷ EARLEY, Mark; SARGENT, Jeffrey; COACHE, Christopher. *National Electrical Code*. p.1 099.

La primera parte contiene cuatro tipos de circuitos esquemáticos simplificados para sistemas fotovoltaicos, los cuales son: aislado para DC (*direct current*) y AC (*alternating current*), aislado para DC, híbrido y conectado a la red. Así como las definiciones generales que conciernen a cada parte de los circuitos.

La segunda parte presenta los requerimientos mínimos de los circuitos para realizar un dimensionamiento del cableado y protecciones del sistema fotovoltaico.

La tercera parte describe los medios de desconexión para los conductores, junto al equipo que esta interconectado. Previene al personal de instalación de ciertas direcciones a seguir en la instalación y agrupamiento del sistema completo.

La cuarta parte se titula métodos de cableado, por lo que especifica la información sobre la correcta posición en el área de instalación de los componentes, conectores y acceso a las cajas de circuitos.

La quinta parte concierne a la puesta a tierra del sistema, puntos de conexión, equipo requerido, dimensionamiento de los conductores para proteger el dispositivo de sobre corrientes.

La sexta parte enfoca la importancia de identificar cada una de las partes del sistema fotovoltaico, como las salidas de los módulos, entradas de los módulos, circuitos de corriente alterna, de corriente directa, puntos de interconexión y almacenamientos de energía.

La séptima parte es breve, porque presenta el comportamiento requerido y esperado al conectarse a otras fuentes de energía.

La octava parte describe algunas recomendaciones sobre las baterías como medio de almacenamiento de energía. Así también menciona algunas recomendaciones para los controladores de carga y convertidores DC/DC.

Del artículo 690 del NEC se toman en consideración las partes uno, dos y cuatro para el desarrollo de este trabajo⁸.

1.6.2. Componentes eléctricos y electrónicos

Un sistema fotovoltaico está compuesto por diferentes componentes clasificados según la etapa en el proceso de conversión, ya sea en la etapa de corriente directa, como en la etapa de corriente alterna. Los componentes comunes son: panel solar, inversor, controlador de carga, batería, cables y protecciones. Además, según el tipo de conexión pueden estar aislados, conectados a la red o híbridos. Para el sistema híbrido se presenta el generador monofásico como un componente adicional. En el apéndice 1a se muestra el diagrama completo de un sistema híbrido.

1.6.2.1. Caja combinadora de circuitos

Es una caja capaz de combinar dos o más grupos de circuitos fuente, donde se conectan los paneles solares, se puede observar la Figura 7. Si el voltaje del arreglo de módulos fotovoltaicos no excede los 150 V, se puede utilizar una protección electromagnética de 20 A DC, según las especificaciones del módulo, en la caja combinadora.

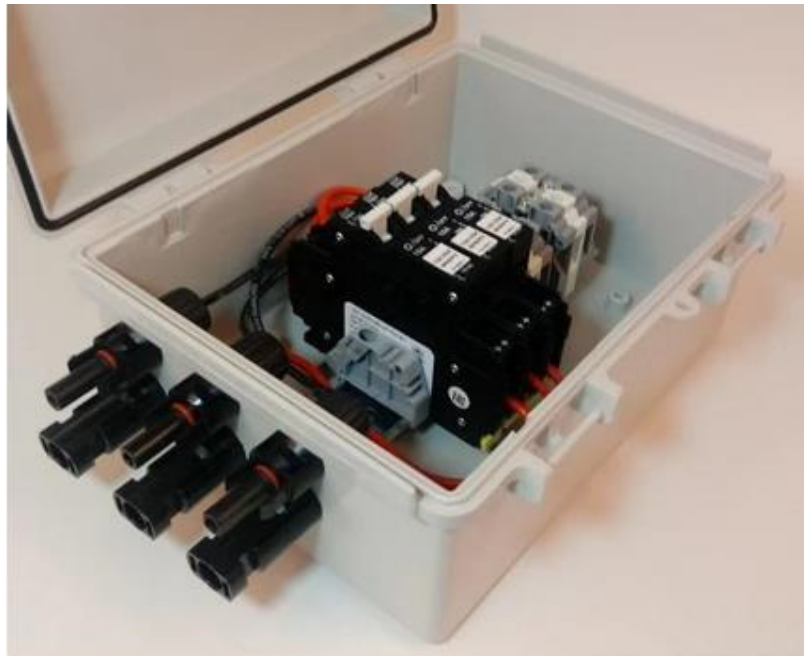
La ampacidad requerida del cableado o los conductores de los módulos a la caja combinadora del circuito fuente, generalmente depende de la corriente

⁸ EARLEY, Mark; SARGENT, Jeffrey; COACHE, Christopher. *National Electrical Code*. p. 1 099.

máxima de cortocircuito (I_{sc}) del módulo fotovoltaico. Bajo ciertas condiciones atmosféricas es posible que los módulos operen a 125 % de la corriente nominal de cortocircuito en condiciones estándar durante 3 horas o más.

Debido a que los conductores para operación continua deben dimensionarse al 125 % de la corriente de servicio continuo, el cableado del circuito fuente (panel fotovoltaico) debe dimensionarse al 156 % ($125 \% \times 125 \%$) de la corriente de cortocircuito.

Figura 7. **Caja combinadora de circuito para 3 cadenas de módulos fotovoltaicos**



Fuente: Solar Power Combiner Box. *2 or 3-String Pre-wired Solar Combiner Box -150V Breakers.* p. 1.

1.6.2.2. Cableado eléctrico

Los módulos fotovoltaicos tienen una capacidad limitada para suministrar corriente. La capacidad de corriente de cortocircuito (I_{sc}) de un módulo es nominalmente 10 a 15 % más alta que la corriente de operación. Los valores normales diarios de irradiancia solar pueden superar la condición de prueba estándar de $1\ 000\ W/m^2$. Estas corrientes aumentadas se consideran utilizando el factor de ajuste de 1,25 en los cálculos de ampacidad. Otro problema para los sistemas fotovoltaicos es que los conductores pueden funcionar a temperaturas tan altas como 65-75 °C cuando los módulos se montan cerca de una estructura, no hay vientos y la temperatura ambiente es alta.

Las temperaturas en las cajas de conexiones del módulo ocurren con frecuencia dentro de este rango. Esto requerirá que la ampacidad de los conductores se reduzca o se corrija con los corrientes dados en las tablas 310,15(B) (16) y 310,15(B) (17) del NEC. (Ver anexo 2).

Las tablas 310,15(B) (16) y 310,15(B) (17) brindan la ampacidad (capacidad de carga de corriente en amperios) de conductores de varios tamaños a temperaturas de 30 °C (ver anexo 2). Hay muchos ajustes que deben hacerse a estos números antes de poder seleccionar un tamaño de conductor.

Las tablas se utilizan según varias características que dependen del método de instalación. Con estas características definidas se puede localizar en las tablas correspondientes la ampacidad nominal del conductor.

- El primera, es definir si el conductor se encuentra aire libre (tabla 310,15(B) (17)), o están agrupados o colocados en un conductor (tabla 310,15(B) (16)).

- La segunda es definir la temperatura ambiente del aire, si no es 30 °C, entonces se utiliza las tablas.
- La tercera es definir la cantidad de conductores agrupados que conducen corriente, si son más de 3 conductores se aplica un factor de ajuste según la tabla 310,15(B) (3) (a).
- La cuarta característica es definir el tipo de material del conductor, que puede ser cobre o aluminio revestido de cobre.

Los conductores que transportan corrientes de módulos fotovoltaicos están aún más restringidos por un factor de reducción adicional del 80 % debido a la forma en que los módulos fotovoltaicos generan energía eléctrica en respuesta a la luz solar.

Según el artículo 690 del NEC:

La ampacidad de los conductores en los circuitos de fuente fotovoltaica debe ser al menos 125 % de la corriente de cortocircuito del módulo nominal o de los módulos conectados en paralelo. La ampacidad de los conductores del circuito de salida fotovoltaica debe ser al menos 125 % de la corriente de salida de cortocircuito. La capacidad de los conductores a un inversor o sistema de acondicionamiento de energía será del 125 % de la corriente de funcionamiento nominal de ese dispositivo. De manera similar, otros conductores en el sistema deben tener una ampacidad del 125 % de la corriente de operación nominal para permitir una operación de larga duración a plena potencia.⁹

Estos requisitos de NEC son para asegurarse de que los dispositivos o tableros de corriente conectados no funcionan más del 80 % de su ampacidad. La operación cuando la nieve o la mejora de la nube aumenta la salida fotovoltaica por encima de normal puede requerir ampacidad adicional.

⁹ EARLEY, Mark; SARGENT, Jeffrey; COACHE, Christopher. *National Electrical Code*. p.1 099.

Solo hay dos factores 1,25 aplicados a las corrientes del módulo fotovoltaico que resulta en el factor combinado es 156 (1,25 x 1,25). Las prácticas correctas de diseño requieren determinar correctamente el tamaño del cable, junto a la clasificación de los dispositivos de sobre corriente en los circuitos de fuente y salida del módulo fotovoltaico. Sin embargo, la clasificación del dispositivo de sobre corriente siempre debe ser menor o igual que la ampacidad del cable.

Se sugiere que los conjuntos fotovoltaicos grandes se dividan en subconjuntos, cada uno con una salida de cortocircuito de menos de 64 amperios. Esto permitirá el uso de equipos con clasificación de 100 amperios (156 % de 64 amperios) en cada circuito fuente.

1.6.2.3. Protección contra sobrecorriente

El NEC requiere que cada conductor no conectado a tierra esté protegido por un dispositivo de sobrecorriente. En un sistema fotovoltaico con múltiples fuentes de energía (módulos fotovoltaicos, baterías, cargadores de batería, generadores, sistemas de acondicionamiento de energía, entre otros.), el dispositivo de sobrecorriente debe proteger al conductor de la sobrecorriente de cualquier fuente conectada a ese conductor. Los diodos de bloqueo, los controladores de carga y los inversores no se consideran dispositivos de sobrecorriente porque deben considerarse cables de resistencia cero cuando se evalúan las fuentes de sobrecorriente. Si el sistema fotovoltaico está conectado directamente a la carga sin almacenamiento de batería u otra fuente de energía, entonces no se requiere protección contra sobrecorriente si los conductores están dimensionados al 156 % de la corriente de cortocircuito.

Cuando los circuitos se abren en sistemas de DC, los arcos se mantienen mucho más tiempo que en los sistemas de AC. Esto presenta cargas adicionales

en los dispositivos de protección contra sobrecorriente clasificados para funcionamiento con DC. Dichos dispositivos deben transportar la corriente de carga nominal y detectar situaciones de sobrecorriente, así como poder interrumpir de manera segura las corrientes de DC. Los dispositivos de sobrecorriente de AC tienen los mismos requisitos.

Los circuitos de la fuente fotovoltaica deben tener dispositivos de sobrecorriente con una clasificación de al menos 156 % ($1,25 \times 1,25$) de la corriente de cortocircuito de los módulos en paralelo. Los dispositivos de sobrecorriente del circuito de salida fotovoltaica deben tener una clasificación de al menos 156 % de las corrientes de cortocircuito del módulo individual. Los fusibles de retardo de tiempo o los interruptores termomagnéticos (*breakers*) minimizarían los disparos, ver Figura 8. En todos los casos, se deben usar dispositivos con clasificación de DC que tengan la clasificación de voltaje de DC adecuada.

Todos los conductores no conectados a tierra desde el arreglo fotovoltaico deben estar protegidos con dispositivos de sobrecorriente. Los conductores con conexión a tierra no deben tener dispositivos de sobrecorriente porque la apertura independiente de dicho dispositivo podría desconectar el sistema. Dado que las salidas del módulo fotovoltaico están limitadas por la corriente, estos dispositivos de sobrecorriente realmente protegen el cableado del arreglo de la retroalimentación de los módulos conectados en paralelo, la batería o el inversor.

Figura 8. **Fusible e interruptor termomagnético**



Fuente: SIVARANKITH. *Difference between Fuses and Circuit breakers.*
<https://automationforum.co/difference-between-fuses-and-circuit-breakers/>.
Consulta: 19 de enero de 2020. p. 1.

1.6.2.4. **Inversor**

Un inversor como un dispositivo que convierte energía eléctrica de corriente directa a corriente alterna, donde la salida del inversor puede ser de una o tres fases¹⁰. Los inversores pueden manejar potencias en el rango cientos de watts a megawatts. El inversor se caracteriza por una eficiencia dependiente de la potencia, η_{inv} . Al mismo tiempo de convertir la corriente directa en alterna, la función principal de un inversor es mantener el voltaje constante en el lado de AC y convertir la potencia de entrada, P_{in} , en la potencia de la salida, P_{out} , con la mayor eficiencia posible.

¹⁰ KARABANOV, Sergey. Et. Al. *Photovoltaic Systems*. p. 501.

La ecuación que describe la eficiencia es la siguiente:

$$\eta_{inv} = P_{out}/P_{in} = \frac{V_{ac}*I_{ac}*\cos \varphi}{V_{dc}*I_{dc}}$$

Donde:

$\cos \varphi$ es el factor de potencia.

V_{dc} es el voltaje de entrada al inversor.

I_{dc} es la corriente requerida por el inversor.

La eficiencia de un inversor tiene un máximo, sobre 90 % para un nivel de potencia de entrada usualmente entre 30 % a 50 % de su capacidad nominal. El rendimiento de un inversor depende de su punto de trabajo, límites de operación, forma de onda de la salida, distorsión armónica, frecuencia, eficiencia del módulo fotovoltaico y algoritmo de seguimiento del punto de potencia máxima¹¹.

En los sistemas fotovoltaicos, los inversores se utilizan para cambiar la corriente continua (DC) de un banco de baterías a corriente alterna (AC) de 120 voltios o 240 voltios, 60 Hertz (Hz).

Para minimizar las caídas de voltaje en estado estacionario tener en cuenta: incrementar la eficiencia del sistema y las caídas de voltaje inducidas por sobretensiones. Los sistemas bien diseñados tienen conductores que son más grandes de lo requerido por el NEC. Cuando los conductores que transportan corriente están sobredimensionados, el conductor de conexión a tierra del equipo también debe estar sobredimensionado proporcionalmente.

¹¹ NORTON, Brian. Et. Al. *Enhancing the performance of building integrated photovoltaics*. p. 1620.

El cableado de entrada de DC asociado con los inversores autónomos o híbridos es el mismo que el cableado descrito para las baterías. Se aplican la mayoría de las mismas reglas; sin embargo, el cálculo de la corriente de entrada de DC necesita una consideración especial porque el NEC no tiene en cuenta algunos de los puntos más finos necesarios para lograr la máxima confiabilidad.

1.6.2.5. Generadores

Según Wiles (2008)¹² otros generadores de energía eléctrica como la eólica, hidráulica y gasolina/propano/diésel deben cumplir con los requisitos del NEC. Estos requisitos se especifican en los siguientes artículos:

- Artículo 230 Servicios.
- Artículo 250 Puesta a tierra.
- Artículo 445 Generadores.
- Artículo 700 Sistemas de emergencia.
- Artículo 701 Sistemas en espera legalmente requeridos.
- Artículo 702 Sistemas de reserva opcionales.
- Artículo 705 Fuentes de producción de energía interconectadas.

¹² WILES, John. *Photovoltaic Power Systems And the 2005 National Electrical Code: Suggested Practices Report SAND2001-0674*. p. 41.

Cuando se van a conectar múltiples fuentes de alimentación de AC al sistema fotovoltaico, se deben conectar con un interruptor de transferencia aprobado y con la clasificación adecuada. Los generadores de AC con frecuencia están clasificados para suministrar mayores cantidades de energía que la suministrada por el sistema fotovoltaico. Los interruptores de transferencia (externos al inversor o un relé integrado en los inversores) deben poder acomodar con seguridad cualquiera de las fuentes de alimentación.

La conexión a tierra, tanto del equipo como del sistema, debe considerarse cuidadosamente cuando un generador está conectado a un sistema existente. No debe haber corrientes que fluyan en el conductor de conexión a tierra del equipo bajo ningún modo operativo del sistema.

Los interruptores termomagnéticos o fusibles integrados en el generador no son suficientes para proporcionar la protección requerida por NEC para los conductores desde el generador hasta el sistema fotovoltaico. Se debe montar un dispositivo de sobrecorriente externo (con clasificación de circuito derivado) y posiblemente una desconexión cerca del generador. Los conductores del generador a este dispositivo de sobrecorriente deben tener una ampacidad del 115 % de la corriente nominal de la placa de identificación del generador.

2. DIMENSIONAMIENTO TÉCNICO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO PARA EL CENTRO DE SALUD TIPO B

2.1. Sistemas fotovoltaicos para la salud

Guatemala es un país con recursos naturales renovables, que poseen un potencial energético alto. El aprovechamiento de las fuentes de energía puede ser suficientes, para que el país pueda abastecerse sin depender de combustibles fósiles. Además, la necesidad en el área de servicios públicos de salud puede hacerse imperante debido a la demanda de energía eléctrica permanente y en grandes cantidades.

Los sistemas fotovoltaicos para la salud se han convertido en una fuente de desarrollo y mejoramiento de la calidad de vida de las personas. Según un Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas¹³, existen cinco formas en las que la energía solar puede hacer realidad la asistencia sanitaria universal, que son: dar acceso, garantizar la calidad, reducir los costos, construir resiliencia e invertir en sostenibilidad. La energía solar se hace importante en lugares remotos o rurales, especialmente en centros de salud, salas de maternidad, quirófanos, almacenes médicos, laboratorios donde la electricidad sirve para refrigerar los medicamentos, encender luces y utilizar equipo médico para salvar vidas. Se puede garantizar la disponibilidad de los servicios de atención básicos especialmente para mujeres embarazadas.

¹³ Programme, U.N.D. *Energía solar para la salud*. <https://stories.undp.org/energia-solar-para-la-salud>. Consulta: marzo 2020.

Ahorrar dinero en energía eléctrica es una de las razones más importantes, porque se puede invertir en programas de salud prioritarios, para el sostenimiento de recursos de uso diario en emergencias o en laboratorios. De modo que, un sistema nacional para salud alimentado por energía solar contribuye a mantener la atención médica continua, donde las fallas repentinas de la red eléctrica se disminuyan por una fuente de energía renovable.

2.1.1. Entorno de aplicación del dispositivo

Según el artículo 69 del acuerdo gubernativo nro. 115-99 sobre los niveles de atención de salud: “en Guatemala la atención en salud se divide en tres niveles, que se definen como el conjunto de recursos físicos, materiales, humanos y tecnológicos que se organizan de acuerdo con poblaciones territoriales, capacidad de resolución y riesgo para la atención de la salud”¹⁴.

Los tipos de establecimientos institucionales y comunitarios de salud son los siguientes:

- Centros Comunitarios de Salud.
- Puestos de Salud.
- Centros de Salud tipo A y tipo B.
- Hospitales.

¹⁴ ARZÚ, Álvaro. *Acuerdo gubernativo 155-99*. <https://www.mspas.gob.gt/index.php/component/jdownloads/send/4-numeral-1-estructura-organica/5-reglamento-organico-interno-mspas>. Consulta: marzo 2020.

2.1.1.1. Centro de salud tipo B

Según el acuerdo gubernativo 155-99 en el artículo 70:

Un centro de salud pertenece al nivel de atención II, en él se desarrollan los servicios a personas referidas por el Primer Nivel de Atención o aquellas que, por demanda espontánea o urgencias acudan al establecimiento. En este nivel se prestan servicios de medicina general, laboratorio, rayos x, emergencias, desarrollo de acciones de promoción, prevención y rehabilitación según normas.¹⁵

Seguidamente, según el acuerdo gubernativo 155-99 en el artículo 77:

Un centro de salud se encuentra en el segundo nivel de atención ubicado en el ámbito municipal y en ciudades de importancia. Brinda a la población servicios ampliados de salud y además coordina la prestación de salud en establecimientos de menor categoría. Se clasifican en centros de salud tipo A, centros de salud tipo B, clínicas periféricas y centros de atención materno infantil.

Un centro de salud tipo B es un establecimiento de salud de menor capacidad que los de tipo A. Su área de influencia es en poblaciones entre cinco a diez mil habitantes. Brindan servicios de prevención, recuperación, rehabilitación dirigidos a las personas. Sus recursos humanos básicos son el médico general, el odontólogo, el psicólogo, la enfermera graduada, el auxiliar de enfermería, el técnico en salud rural, el inspector de saneamiento ambiental, otros técnicos de salud que se requieran.¹⁶

Según la Categoría 2 sobre Dirección y teléfonos de la información pública de la página oficial del Ministerio de Salud Pública, al realizar un compendio de los datos, en Guatemala existen un total de 95 centros de Salud Tipo B, distribuidos en las áreas de población municipal, 13 en Guatemala, 3 en Baja Verapaz, 14 en Chimaltenango, 5 en Chiquimula, 5 en El Progreso, 5 en Escuintla, 4 en Izabal, 7 en Jalapa, 4 en Petén, 11 en Retalhuleu, 3 en Sacatepéquez, 6 en San Marcos, 10 en Santa Rosa, 1 en Suchitepéquez y 4 en Zacapa¹⁷.

¹⁵ ARZÚ, Álvaro. *Acuerdo Gubernativo 155-99*. p. 19.

¹⁶ *Ibíd.* p. 20.

¹⁷ Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. *Numeral 2: Dirección y teléfonos*. <https://www.mspas.gob.gt/index.php/component/jdownloads/category/5-numeral-2-direccion-y-telefonos?Itemid=-1>. Consulta: abril 2020.

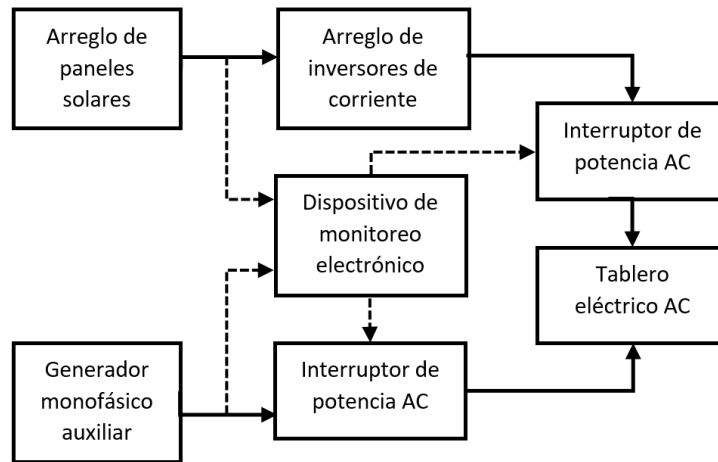
2.2. Diagrama de bloques general del dimensionamiento

El sistema fotovoltaico híbrido para suministrar energía al centro de salud tipo B considera la fuente de energía solar y la fuente de energía auxiliar por medio de un generador diésel. A pesar de que un diseño convencional está compuesto por un arreglo de baterías como fuente de energía de reserva; en el presente trabajo se omite su uso. Las razones por las cuales no se considera las baterías son las siguientes:

- Las baterías representan un costo económico alto en instalación, mantenimiento y protección de su estado de carga.
- El tiempo de vida de una batería de ácido plomo es de aproximadamente 2 años, lo que implica su cambio periódico.
- Se debe considerar el costo del controlador de carga, que se encarga de regular los valores de corriente y voltaje para el arreglo de baterías.

Por lo tanto, se propone un esquema general del sistema fotovoltaico híbrido en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 9. **Diagrama de bloques general del sistema híbrido fotovoltaico con sistema de monitoreo electrónico**



Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

A partir de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en las siguientes secciones del capítulo, se dimensionan el arreglo de paneles solares, el arreglo de los inversores de corriente, y el generador monofásico auxiliar. Estos dependen directamente de las cargas conectadas al tablero eléctrico AC. Los diseños del dispositivo electrónico, de los interruptores de potencia DC/AC, se realizan en el siguiente capítulo.

Primero se debe realizar el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, considerando el dispositivo electrónico de forma transparente, esto se debe a que los valores de corriente y voltaje que atraviesan los cables de potencia, indicados con una línea continua, se deben calcular con anterioridad. Luego corresponde dimensionar los interruptores de potencia, que simplemente se encargan de realizar una transferencia automática de energía de manera no simultánea.

Así también, las líneas punteadas en dirección al dispositivo de monitoreo son señales de detección, donde se utilizan sensores de corriente y voltaje. Las líneas punteadas en dirección a los interruptores de potencia indican señales de habilitación.

2.3. Procedimiento del dimensionamiento

El dimensionamiento técnico de un sistema fotovoltaico se refiere al cálculo de los componentes en una instalación de generación solar, que pueda abastecer las necesidades de carga eléctrica de consumo, de manera permanente y constante. Se presenta un procedimiento general, donde en cada subsección se describen las debidas recomendaciones y cálculos que se deben realizar.

2.3.1. Localización de la instalación

El primer paso consiste en determinar la ubicación exacta del lugar, que tome en cuenta las coordenadas georreferenciadas. Esto con el motivo de estimar los parámetros de irradiancia solar y temperatura aproximada para el centro de salud. Para ello se puede consultar un mapa de radiación solar que es proporcionado por el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala¹⁸, o bien, la referencia de un mapa de recurso solar proporcionado por el programa de Evaluación de los Recursos de Energía Solar y Eólica¹⁹ o por información de la página oficial de Solargis.²⁰

¹⁸ Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. *Numeral 2: Dirección y teléfonos*. <https://www.mspas.gob.gt/index.php/component/jdownloads/category/5-numeral-2-direccion-y-telefonos?Itemid=-1>. Consulta: abril 2020.

¹⁹ OpenEI. *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) | Open Energy Information*. [https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_\(SWERA\)](https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_(SWERA)). Consulta: abril 2020.

²⁰ Solargis. *Mapas de recursos solares y datos GIS para más de 180 países | Solargis*. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/guatemala>. Consulta: abril 2020.

El mapa de recurso solar mostrado en la Figura 10 puede ser utilizado para identificar visualmente las zonas ricas en recursos solares dentro de un país o región. La resolución del mapa varía entre 10 a 40 km, donde en la página web fuente se puede navegar con mayor precisión. La irradiación horizontal global es una medida de la irradiancia solar que incide sobre una superficie horizontal, que resulta de sumar las componentes directa, difusa y de albedo. Este valor se muestra en colores, donde el color naranja representa una región con mayor irradiancia, en disminución de la escala de color, hasta el color amarillo con menores valores de irradiancia solar.

La utilidad del mapa de recurso solar es para determinar las regiones con mayor potencial solar, no está destinada para realizar cálculos directos, sino que sirve como medio de obtención de información para los cálculos posteriores. Entonces, para el caso de los 95 centros de salud tipo B, puede ser que solamente en algunas regiones del país sea útil realizar el dimensionamiento. La obtención de la irradiancia en cada ubicación no es el fin de este trabajo, pero con la herramienta presentada, se puede obtener y elaborar una tabla adecuada a las necesidades.

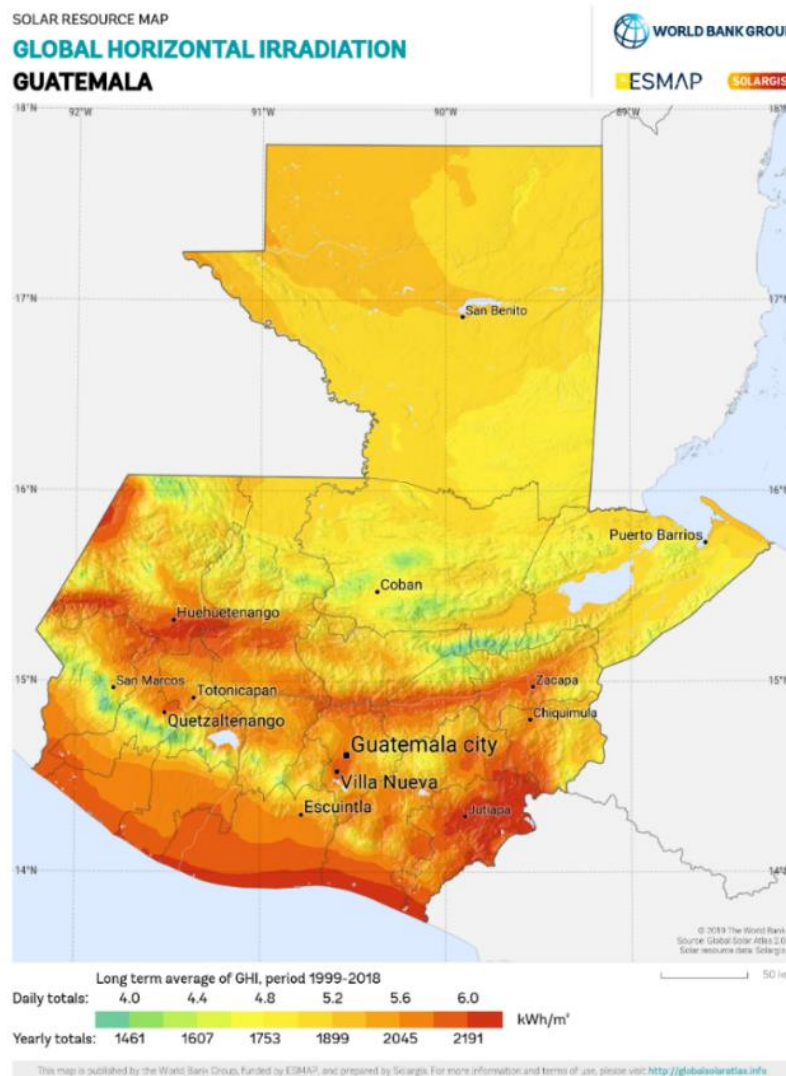
En Guatemala, la irradiación global horizontal se encuentra en un rango de 4,19 a 6,10 KWh/m^2 por día. Y la temperatura varía en un rango de 10,3 a 28,1 °C, según información de Global Solar Atlas.²¹ Ver Figura 10.

La cantidad de energía en cada ubicación en un tiempo definido depende de tres aspectos: las condiciones climatológicas, la eficiencia de los módulos, la irradiancia solar que incide sobre la superficie de los paneles, que, a su vez, depende, de la orientación e inclinación de los módulos respecto al sol. Por lo

²¹ The World Bank Group. *Global Solar Atlas*. <https://globalsolaratlas.info/map?c=15.792254,-90.230713,7&r=GTM>. Consulta: abril 2020.

que, en cuanto a la ubicación en el sitio, es importante ubicar los paneles fotovoltaicos en un área libre de sombras, libre de obstáculos y en dirección perpendicular al sol.

Figura 10. Irradiación Global Horizontal en Guatemala en kWh/m^2



Fuente: Solargis. *Mapas de recursos solares de Guatemala*. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/guatemala>. Consulta: 16 de abril de 2020.

2.3.2. Cálculo del consumo energético y potencia requerida

El consumo energético se refiere al consumo de energía en Kilowatts-hora, que utiliza cada equipo médico, lumínico o de trabajo, para alimentarse con energía eléctrica en un periodo de tiempo de una hora. Como el lugar de instalación propuesto es un centro de salud tipo B, entonces se accedió a la página oficial del ministerio de salud pública para conocer información adicional acerca de alguna guía que permita conocer los ambientes que debe tener habilitados.

Efectivamente existe una guía para la habilitación de los servicios públicos de un centro de salud tipo B²², en ella se encuentra las áreas físicas para cada categoría de servicios que podría prestar el establecimiento, de los cuáles se toman algunos para este trabajo. Luego se estiman algunas cargas eléctricas que se pueden disponer en cada ambiente o servicio del centro de salud tipo B.

Tabla I. Equipos eléctricos por ambiente en un centro de salud tipo B

Ambiente	Equipo instalado	Cantidad
Sala de espera	Oasis de agua pura	1
	Tubos led	3
Laboratorio clínico	Refrigeradora	1
	Centrifuga	1
	Equipo de autoclave	1
	Microscopio	2
	Tubos led	6
Clínica médica de preconsulta	Equipo de computo	2
	Tubos led	3
Clínica médica de consulta	Equipo de computo	2
	Tubos led	3
Servicio sanitario	Tubos led	3

²² Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. *Guía para la habilitación centro de salud tipo B*. <https://www.mspas.gob.gt/index.php/component/jdownloads/category/415-centro-de-salud-tipo-b?Itemid=-1>. Consulta: abril 2020.

Continuación de la Tabla I:

Ambiente	Equipo instalado	Cantidad
Clínica de atención al neonato	Equipo de computo	1
	Tubos led	3
Clínica de atención del adulto y adulto mayor	Equipo de computo	1
Clínica de atención prenatal o puerperio	Tubos led	3
	Tubos led	3
Farmacia	Equipo de computo	1
	Tubos led	3
Bodega de almacenamiento de medicamentos	Equipo de computo	1
	Tubos led	4
Bodega de productos de limpieza	Tubos led	4
Área de comedor	Tubos led	4
Clínica de atención de emergencias	Tubos led	4
	Desfibrilador eléctrico	2
	Monitor de signos vitales	4
Área de archivos	Equipo de cómputo	1
	Tubos led	4

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

La Tabla I muestra la cantidad de equipos instalados por ambiente. La información de cada equipo se obtiene al consultar las hojas de datos de equipos conocidos en el mercado. La siguiente lista muestra las referencias de la información obtenida para la Tabla II.

- Oasis de agua pura de la marca Servinox.²³

²³ Servinox. *Dispensador de Agua DA001.* [https://www.servinox.com.mx/catalogo/imgs_catalog2/Ficha Tecnica Enfriador y Calentador de Agua DA001.pdf](https://www.servinox.com.mx/catalogo/imgs_catalog2/Ficha_Tecnica_Enfriador_y_Calentador_de_Agua_DA001.pdf). Consulta: mayo 2020.

- Tubos led de la marca Eco max.²⁴
- Refrigeradora de más de 22 pies cúbicos con un consumo estándar²⁵.
- Equipo de autoclave de la marca Sevmexico.²⁶
- Centrífuga de la marca PCE Instruments.²⁷
- Microscopio de la marca Dilabo.²⁸
- Equipo de cómputo de gama media.²⁹
- Desfibrilador eléctrico de la marca Zoll M2.³⁰
- Monitor de signos vitales de la marca Elance 7c-elite³¹.

²⁴ Ferretería EPA. *Tubo led 48" T8 18 W 6000 K 1500 L Policarbonato*. <https://gt.epaenlinea.com/tubo-led-48-t8-18-w-6000-k-1500-l-policarbonato.html>. Consulta: mayo 2020.

²⁵ El Universal. *Consumo electrodomésticos*. http://static.eluniversal.com/2010/02/10/consumo_electrodomesticos.pdf. Consulta: mayo 2020.

²⁶ Sevmexico. *Autoclaves*. https://www.sevmexico.com/catalogos/AUTOCLAVES_140312.pdf. Consulta: mayo 2020.

²⁷ PCE Instruments. *Centrifugadora de laboratorio 1-16 / 1-16k*. <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/laboratorio/centrifugadora-laboratorio-1-16-serie.htm>. Consulta: mayo 2020.

²⁸ Dilabo, S.A. *Microscopio Triocular para Fluorescencia led, filtros azul y verde - DILABO S.A Suministros para Laboratorios*. http://www.dilabo.com/producto_28403_NombreProd.html. Consulta: mayo 2020.

²⁹ CHC Energía. *Cuánta electricidad consume un ordenador*. <https://chcenergia.es/blog/cuanto-consume-un-ordenador-o-pc/>. Consulta: mayo 2020.

³⁰ Zoll M2. *Especificaciones técnicas*. <https://www.pvequip.cl/wp-content/uploads/2019/08/Especificaciones-Técnicas-ZOLL-M2-Enero-2109.pdf>. Consulta: mayo 2020.

³¹ Spacelabs healthcare. *Monitores de signos vitales*. <https://prhoinsa.com/images/pdf/spacelabs/elance/elance-Vital-Signs-Monitor-Family-061-2181-01-rev-J-SPA.pdf>. Consulta: mayo 2020.

Tabla II. Consumo eléctrico por equipo en un centro de salud tipo B

Tipo de equipo	Tiempo de uso (h/día)	Cantidad	Corriente nominal (A)	Potencia por unidad (kW)	Corriente nominal total (A)	Potencia total (kW)	Consumo total (kWh/día)
Oasis de agua pura	8	1	5,5	0,50	5,5	0,50	4,00
Tubos led	12	50	0,2	0,018	12,0	0,90	10,80
Refrigeradora	8	1	6,0	0,500	6,0	0,50	4,00
Centrifuga	5	1	3,2	0,390	3,2	0,39	1,95
Equipo de autoclave	5	1	6,5	0,600	6,5	0,60	3,00
Microscopio	4	2	0,5	0,050	1,0	0,10	0,40
Equipo de computo	8	8	2,5	0,250	20,0	2,00	16,00
Desfibrilador eléctrico	2	2	2,4	0,200	2,4	0,40	0,80
Monitor de signos vitales	2	4	2,0	0,240	8,0	0,96	1,92
TOTAL					64,9	6,35	42,87

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Para el cálculo de la potencia total de cada equipo se toma el valor de la potencia por unidad (W), multiplicado por la cantidad de equipos de ese tipo:

$$P_T = \sum_{i=1}^n N_{Ei} \times P_{Ui}$$

Donde:

P_T es la potencia total en kW.

N_E es el número de equipos, en cada fila, es adimensional.

P_{Ui} es la potencia por unidad, en cada fila, en kW.

n es la cantidad de filas de la tabla.

i es la i -ésima fila de la tabla.

Por lo que, el resultado de la sumatoria es de 6,35 kW, que se aproxima a un total de 7 kW por un aumento no considerado en la potencia de los equipos.

Para el cálculo del consumo total en kWh, se multiplica el valor numérico de 1 000, por la potencia total en Watts de cada equipo, por la cantidad de horas al día de uso:

$$C_T = \sum_{i=1}^n P_{Ti} \times T_i$$

Donde:

C_T es el consumo energético total en Watts-hora (kWh).

P_T es la potencia total en kW.

T_i es el periodo de tiempo de uso diario de cada fila, en horas.

n es la cantidad de filas de la tabla.

i es la i -ésima fila de la tabla.

Por lo que, el resultado de la sumatoria es un consumo eléctrico mínimo total (kWh), de 42,87 kWh al día, que se aproxima a 43 kWh/día por algún aumento no considerado en las horas de uso. El resumen de los datos se observa en la Tabla III. Los datos de kilowatts y kilowatts-hora obtenidos son importantes, porque permiten dimensionar el generador monofásico auxiliar, junto al

generador fotovoltaico, respectivamente, para cubrir las necesidades descritas del centro de salud tipo B.

Tabla III. **Resumen de los totales del consumo de los equipos**

Descripción	Total
Sumatoria de la corriente nominal	71 A
Sumatoria de la potencia nominal	7 kW
Sumatoria del consumo energético	43 kWh

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

2.3.3. Dimensionamiento del generador fotovoltaico

El dimensionamiento del generador fotovoltaico se refiere al proceso para determinar el arreglo de paneles solares o módulos fotovoltaicos, que produzcan la energía suficiente para suplir el consumo eléctrico por parte de la carga, las pérdidas debidas al cableado eléctrico, a los efectos de temperaturas, y a condiciones climáticas adversas.

2.3.3.1. Hora solar pico

Una hora solar pico es una hora durante la cual la intensidad de la luz solar es de al menos 1 000 Watts por metro cuadrado. La cantidad de radiación solar o insolación entregada por el sol varía durante el día, basada en la posición del sol en el cielo, las nubes y otras condiciones atmosféricas. Cabe mencionar que las horas solares pico no son lo mismo que las horas de sol durante el día.

La radiación solar pico ocurre al mediodía, cuando el sol está en el punto más alto del cielo. Las horas del sol aumentan durante el verano debido a la posición más alta del sol en el cielo. La energía aumenta cerca del Ecuador,

porque está más cerca del Sol. Las condiciones anteriores dan lugar a que, si bien, los paneles solares pueden recibir un promedio de 7 a 8 horas de luz por día, o más horas durante una época de verano, solamente un promedio equivalente de 4 a 5 horas pico de sol son las necesarias para que opere a una potencia máxima o nominal.

Por lo que el cálculo para obtener las horas pico de sol durante un día es el siguiente:

$$HPS = \frac{R_s}{1000 \text{ W/m}^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

HSP es la hora solar pico.

R_s es la radiación solar en Wh/m^2 .

Ahora, para calcular la cantidad de horas pico de sol durante un año se procede a construir una tabla de la radiación solar por mes, en un año determinado, para este estudio se toma el año 2019, como se observa en la Tabla IV La información se obtiene de la base de datos de la NASA, con los parámetros de latitud y longitud iguales a (14,62041, -90,49579), a una elevación de 1 663 m. En el anexo 3 se encuentra la información por día.

Tabla IV. **Tabla de la Radiación global en una superficie horizontal, para el año 2019 en Guatemala**

Mes	Radiación global en una superficie horizontal KWh/m^2
Enero	5,28
Febrero	5,77
Marzo	6,27
Abril	5,88
Mayo	5,15
Junio	5,68
Julio	6,24
Agosto	5,82
Septiembre	5,19
Octubre	4,56
Noviembre	5,20
Diciembre	5,18

Fuente: elaboración propia, con información de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.

Consulta: 02 de febrero de 2020.

Se procede a realizar el cálculo de horas de sol pico para cada mes, que resulta en valores iguales, pero en unidades de hora, utilizando la ecuación 2.

Tabla V. **Hora solar pico para el año 2019 en Guatemala**

Mes	Horas solares pico
Enero	5,28
Febrero	5,77
Marzo	6,27
Abril	5,88
Mayo	5,15
Junio	5,68
Julio	6,24
Agosto	5,82
Septiembre	5,19

Continuación de la Tabla V.

Mes	Horas solares pico
Octubre	4,56
Noviembre	5,20
Diciembre	5,18

Fuente: elaboración propia, con información de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
Consulta: 02 de febrero de 2020

El valor que se utiliza para el estudio es el promedio de los 12 meses, que es igual a 5,5 horas. Ver la Tabla V.

2.3.3.2. Potencia nominal de los módulos fotovoltaicos

La potencia nominal se refiere al valor de potencia que los módulos fotovoltaicos deben generar para cubrir el consumo de energía, a partir de la cantidad de luz del sol incidente. El valor obtenido en este inciso es importante, porque es el valor teórico de la potencia del arreglo de paneles a utilizar. Aun no se considera ninguna pérdida de potencia. Para ello se calcula considerando las horas pico de sol obtenidas en el inciso anterior, con la ecuación siguiente:

$$P_n = \frac{E_r}{HSP} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

P_n es la potencia requerida en kW.

E_r es la energía requerida en kWh.

HSP es la hora solar pico en horas.

Para la propuesta del centro de salud tipo B, se toma el valor de 43 kWh obtenido en la sección de consumo energético y el valor de 5,5 horas de la sección anterior. El resultado para la potencia nominal para el generador fotovoltaico es igual a 7,81 kW.

2.3.3.3. Potencia generada de los módulos fotovoltaicos

El cálculo de la potencia real se aplica para todos los sistemas fotovoltaicos, porque se involucra las pérdidas debido al polvo o sombras en un factor denominado de seguridad. También se toma en cuenta el coeficiente de temperatura del panel solar, según la tecnología de fabricación, o bien, sus características de fábrica.

Aunque la temperatura ambiente permanezca en un rango de 30 a 40 °C, en la superficie del panel solar, la temperatura puede elevarse hasta un rango de 60 a 70 °C, en horas pico de sol durante el día. Éste aumento de temperatura se debe simplemente a la exposición directa hacia el sol por varias horas, el cual está construido de materiales conductores de calor en su marco, como el metal; además del calor producido por las pérdidas naturales en las celdas fotovoltaicas, debidas al porcentaje de luz recibida que no es transformado en energía. Es por ello que el cálculo de la potencia generada se divide en dos pasos, descritos con dos ecuaciones, la primera describe el comportamiento lineal de la pérdida de eficiencia dada por el aumento de la temperatura, vista a continuación.

$$\eta_{PS} = C_T(T_s - T_A) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

n_{PS} es la eficiencia por temperatura del panel solar, es adimensional.

- C_T es el coeficiente de temperatura en $\%W/^{\circ}C$.
- T_s es la temperatura sobre la superficie del panel solar.
- T_A es la temperatura ambiente. El estándar es de $25^{\circ}C$.

La segunda ecuación describe la potencia generada del sistema fotovoltaico, la cual es la siguiente:

$$P_G = P_n \left(\frac{100 + \eta_{PS}}{100} \right) f_s \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

- P_G es la potencia generada por los módulos fotovoltaico en kW.
- n_{PS} es la eficiencia por temperatura del panel solar, es adimensional.
- P_n es la potencia nominal o teórica en kW.
- f_s es un factor de seguridad adimensional entre 1,0 y 1,5.

Se observa que la potencia generada depende directamente de la potencia nominal o teórica, pero es un valor aún mayor. Esto quiere decir que se debe sobre dimensionar el arreglo de módulos fotovoltaicos para que cubra las necesidades de potencia teóricas además de las pérdidas naturales en el sistema.

Para el caso de estudio, con una temperatura ambiente de 25 grados centígrados, una temperatura en la superficie del panel solar de 70 grados centígrados, un coeficiente de temperatura igual a $0,5\%W/^{\circ}C$, la eficiencia por temperatura (n_{PS}), es igual a 22,5. Con un factor de seguridad de 1,5 y una potencia nominal (P_n) de 7,8 kW, entonces la potencia generada debe ser igual a 14,33 kW. En términos prácticos este valor se puede aproximar a 15 kW.

2.3.3.4. Cantidad de módulos fotovoltaicos

Un paso importante en el dimensionamiento es el cálculo de la cantidad de paneles que se utilizarán en la instalación, siendo un valor que depende directamente de la potencia real, que se calcula en el paso anterior. El arreglo incluye encontrar la cantidad de paneles conectados en paralelo, junto a los paneles conectados en serie, para obtener los niveles de tensión y corriente deseados.

Figura 11. Especificaciones del módulo fotovoltaico

ELECTRICAL DATA STC*					
CS3U	380MS	385MS	390MS	395MS	400MS
Nominal Max. Power (Pmax)	380 W	385 W	390 W	395 W	400 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	40.0 V	40.2 V	40.4 V	40.6 V	40.8 V
Opt. Operating Current (Imp)	9.50 A	9.58 V	9.66 A	9.73 A	9.81 A
Open Circuit Voltage (Voc)	47.8 V	48.0 V	48.2 V	48.4 V	48.6 V
Short Circuit Current (Isc)	10.01 A	10.09 A	10.17 A	10.25 A	10.33 A
Module Efficiency	19.15%	19.41%	19.66%	19.91%	20.16%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C				
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)				
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or Class C (IEC 61730)				
Max. Series Fuse Rating	30 A				
Application Classification	Class A				
Power Tolerance	0 ~ + 5 W				

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS	
Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.36 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.29 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	42 ± 3°C

Fuente: Canadian Solar. *High Efficiency Mono Perc Module*. https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian_Solar-Datasheet-KuMax_CS3U-MS_EN.pdf.

Consulta: 04 de mayo de 2020.

Es importante definir las características del módulo fotovoltaico a utilizar. Se toma como referencia los datos del panel solar *CS3U 380MS* de la marca Canadian Solar. En la Figura 11, se muestra una imagen sobre las especificaciones del módulo fotovoltaico, pero sus características se encuentran detalladas en el anexo 4.

Por lo que la cantidad de módulos fotovoltaicos que se conectan en paralelo dependen directamente de la potencia generada e inversamente del valor individual de potencia nominal del panel solar escogido, definida por la ecuación siguiente:

$$N_p = \frac{P_R}{P_{PS}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

N_p es el número de módulos fotovoltaicos en paralelo.

P_R es la potencia real generada.

P_{PS} es la potencia nominal de un panel solar individual.

Para el caso de estudio se escoge un panel solar de 380 W, y dado la potencia total de 15 kW, del inciso anterior, se obtiene un resultado de aproximadamente 40 paneles conectados en paralelo.

La selección de la cantidad de paneles conectados en serie depende del diseñador. Una de las razones por la que se puede escoger un voltaje mayor para una cadena de paneles solares, es que el cableado puede resultar de menor calibre. A una misma potencia de salida, con un voltaje mayor, la corriente de salida disminuye. Si se diseña un arreglo en serie con voltajes mayores a 300 V, es importante utilizar protecciones por voltajes elevados, y con precaución en caso de mantenimiento.

Tabla VI. **Resumen de la cantidad de módulos fotovoltaicos**

Parámetro	Valor
Potencia generada	15 kW
Potencia nominal de un panel solar	380 W
Número de paneles solares en paralelo	40
Número de paneles en serie	1

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

2.3.4. Dimensionamiento del inversor de corriente

El inversor de corriente es un dispositivo que permite convertir la potencia de entrada del generador fotovoltaico en corriente directa, a una potencia de salida equivalente en corriente alterna. Entre los parámetros externos que definen las especificaciones del inversor para el sistema fotovoltaico son: la eficiencia, el voltaje, la potencia de entrada, la potencia de salida, las características de los módulos fotovoltaicos a utilizar. Así también para definir la elección óptima del inversor, se deben conocer algunos parámetros propios del equipo, que se presentan a continuación en la Tabla VII.

Tabla VII. **Parámetros de un inversor de corriente**

Parámetro	Símbolo	Descripción
Voltaje nominal en DC	V_{NDC}	Es el voltaje nominal de entrada al inversor.
Voltaje máximo en DC	V_{DCMAX}	Es el voltaje máximo de entrada al inversor.
Voltaje de arranque en DC	V_{DCA}	Es el voltaje mínimo de entrada al inversor. Si no se alcanza no se activa.
Corriente de máxima potencia en DC	I_{DCMAX}	Es el límite superior de la corriente que el inversor puede convertir a máxima potencia.
Corriente máxima de corto circuito en DC	I_{SCDC}	Es el límite superior de corriente que el inversor puede soportar antes de dañarse.

Continuación de la Tabla VII:

Parámetro	Símbolo	Descripción
Potencia máxima en DC	P_{DCMPPT}	Es la potencia máxima por MPPT para cada entrada del inversor.
Voltaje nominal de AC	V_{NAC}	Es el voltaje nominal de salida del inversor.
Corriente nominal AC	I_{NAC}	Es la corriente nominal de salida del inversor.
Eficiencia	η_{MAX}	Es la eficiencia máxima del inversor.
Potencia nominal en AC	P_{NAC}	Es la potencia nominal de salida del inversor.
Potencia máxima en AC	P_{ACMAX}	Es la potencia máxima de salida que el inversor puede convertir.

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Los parámetros indicados en la Tabla VII son importantes para revisar cuando se diseña un sistema fotovoltaico, donde la entrada son los paneles solares y la salida está directamente conectada a una caja combinadora de circuitos o a las cargas.

En la sección anterior se dimensiona 1 cadena de 40 paneles conectados en paralelo, para cubrir la demanda de energía. Sin embargo, solo es un dato preliminar, porque aún falta dimensionar el arreglo de inversores. Se hace mención de que puede ser un arreglo de inversores, porque la potencia de las cargas es muy alta para satisfacerla con un inversor solamente. Por lo que, en esta etapa, se adapta la elección del panel solar con el inversor a escoger, quiere decir que, puede ser conveniente que sea necesario cambiar la configuración actual entre los paneles solares y el inversor, porque se deben cumplir los parámetros indicados en la Tabla VII.

2.3.4.1. Condiciones para elección del inversor

Para comprender el procedimiento, primero se presentan algunas ecuaciones y condiciones importantes que se deben cumplir para el dimensionamiento, se utiliza la teoría de circuitos como base para el planteamiento de cada una.

La primera condición, involucra el comportamiento de un panel solar que es afectado por la temperatura ambiente, como se explicó en el capítulo anterior.

$$V_{DCA} < V_{OC1} + V_{OC2} + \dots + V_{OCN} < V_{DCMAX} \quad (\text{Condición 1})$$

Donde:

V_{DCA} es el voltaje de arranque del inversor, de la Tabla VII.

V_{OCN} es el voltaje de circuito abierto de los paneles conectados en serie.

V_{DCMAX} es el voltaje máximo en DC del inversor, de la Tabla VII.

Como se conoce, el voltaje de cortocircuito de un panel solar es el valor más grande en condiciones estándar; sin embargo, puede aumentar a menores temperaturas. Cuando se conectan paneles solares en serie, el voltaje aumentado siempre debe de sumarse. Para el cálculo del voltaje de circuito abierto de cada panel solar se utiliza la ecuación 1, que se indica en la sección 2.3.3.1.

La segunda condición que cumplir involucra el aumento o disminución de la corriente debido al cambio de temperatura. También existe un coeficiente de temperatura dado en porcentaje de corriente por cada grado, el cual es diferente de la condición estándar de temperatura de 25 grados centígrados.

Es importante indicar, en una conexión de paneles conectados en serie no aumenta la corriente, solamente en una conexión en paralelo.

$$I_{SC1} + I_{SC2} + \dots + I_{SCN} < I_{SCMAX} \quad (\text{Condición 2})$$

Donde:

I_{SCN} es la corriente de corto circuito de los paneles conectados en paralelo.

I_{SCMAX} es la corriente máxima de corto circuito del inversor. Ver Tabla VII.

La potencia de entrada del inversor por *MPPT* es un parámetro importante, que se indica en la Tabla VII. Este tiene la característica que se encuentra en corriente directa; y se calcula directamente, multiplicando la corriente de máxima potencia por el voltaje de máxima potencia, ambos del arreglo de paneles solares de entrada.

$$P_{DCN} = (I_{MPA})(V_{MPA}) \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

P_{DCN} es la potencia en corriente directa de cada entrada del inversor.

I_{MPA} es la corriente de máxima potencia del arreglo de paneles solares.

V_{MPA} es el voltaje de máxima potencia del arreglo de paneles solares.

Algunos inversores tienen la capacidad de darle seguimiento al punto de máxima potencia del módulo fotovoltaico y además pueden poseer varias entradas de este tipo. Para un inversor con más de una entrada disponible se debe considerar la siguiente condición.

$$(P_{DC1} + P_{DC2} + \dots + P_{DCN}) * \eta_{MAX} < P_{ACMAX} \quad (\text{Condición 3})$$

Donde:

P_{DCN} es la potencia en corriente directa de cada entrada del inversor.

η_{MAX} es la eficiencia máxima de conversión del inversor. Ver la Tabla

VII.

P_{ACMAX} es la máxima potencia de salida del inversor. Ver la Tabla VII.

2.3.4.2. Plan de dimensionamiento del inversor

Planteadas las condiciones, se procede a describir el plan de dimensionamiento siguiente:

- Presentar los parámetros de dimensionamiento iniciales del sistema.
- Se evalúan los dos casos siguientes: el primero es que sea necesario utilizar un inversor con características sobredimensionadas respecto a los parámetros de diseño, acá se conserva la cantidad máxima de 40 paneles solares; el segundo caso, es que sea necesario buscar un inversor de menor potencia y que sea utilizado en un arreglo serie-paralelo.
- Buscar un proveedor que satisfaga la potencia de salida.
- Revisar que el inversor escogido soporte las características de entrada.
- Dimensionar el equipo considerando los límites superiores e inferiores del inversor, con las condiciones 1 a 3.

2.3.4.3. Elección, resultados y análisis del dimensionamiento del inversor

La potencia que se debe de generar con los paneles solares se calculó en la sección 2.3.3.3., la cual es de 15 kW. Este valor se considera como la cantidad de potencia en corriente directa que recibe el inversor o arreglo de inversores. Así también, en la sección 2.3.3.4, se propone una tabla preliminar del dimensionamiento, que indica un total de 40 paneles solares de 380 W cada uno, conectados en paralelo. Sin embargo, esta forma de conexión no es una topología práctica, porque el voltaje del arreglo es de alrededor de 40 V (1 panel solar en serie por 40 en paralelo). Si se toma en cuenta de que el voltaje de arranque de un inversor debe ser mayor que 120 V (un valor común), entonces se puede conectar un arreglo de 10 x 4, que representa 10 cadenas conectadas en paralelo, cada una con 4 paneles solares en serie, para cumplir con la demanda de potencia.

Bajo este primer criterio, donde se utilizan las especificaciones del módulo fotovoltaico de la Figura 11, la investigación se encamina a la búsqueda de un inversor comercial que tenga las características siguientes:

- Potencia de entrada de 3 800 W, equivalente a las 10 cadenas de paneles solares en paralelo de 380 W cada una.
- Número de entradas DC del inversor igual a 10.
- Voltaje nominal de entrada igual a 160 V (4 x 40V).

- Corriente nominal de entrada igual a 95 A, equivalente a las 10 cadenas de paneles solares en paralelo con corriente operacional de 9, 5 A, cada una.

Estas condiciones mínimas, fueron suficientes para inferir que una corriente de nominal de entrada de 95 A, no es un valor práctico, debido al calibre del cableado necesario para dirigir la corriente hacia el inversor; tampoco existe comercialmente un inversor con 10 entradas DC. Se encuentra que el valor que puede causar problema es la corriente de entrada, entonces se propone una topología de 4 x 10, la cual consiste en conectar la misma cantidad de paneles solares, solamente que ahora en un arreglo de 4 cadenas conectadas en paralelo, cada una con 10 paneles solares en serie.

A partir de este corto análisis se escoge a un inversor de la marca Canadian Solar, donde se pueden ver sus parámetros en la Tabla VIII:

Tabla VIII. **Parámetros de diseño del inversor CSI-4KTL1P-GI-FL**

Parámetro	Valor
Voltaje máximo en DC	600 V
Voltaje de arranque en DC	120 V
Corriente de máxima potencia en DC	11 A
Corriente máxima de corto circuito en DC	17,2 A
Potencia máxima en DC	4,6 kW
Voltaje nominal de AC	220 V / 230 V
Eficiencia	98,1 %
Potencia nominal en AC	4 kW

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word, con información de https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/CanadianSolar_Inverter_Single-Phase_4-5KW.pdf. Consulta: 08 de mayo de 2020.

El inversor tiene la capacidad de una entrada DC con *MPPT* incluida. El diseño que se elige utilizar es un arreglo de 4 inversores conectando sus salidas en paralelo. Una característica que se debe cumplir es que el sistema se encuentre balanceado. Esto quiere decir que se utilice la misma potencia de entrada para cada inversor. Entonces sigue siendo válido el arreglo de 10 paneles solares conectados en serie para cada inversor. Al considerar las condiciones descritas anteriormente, se muestran los resultados del dimensionamiento por inversor, en la Tabla IX:

Tabla IX. **Resultados del dimensionamiento por inversor**

Parámetro	Valor
Modelo del panel solar	CS3U-380MS
Potencia del panel solar	380 W
Modelo del inversor	CSI-4KTL1P-GI-FL
Cantidad de paneles solares	10
Rango de temperatura	0-40 °C
Voltaje máximo de entrada	512,65 V
Corriente máxima de entrada	10,01 A
Voltaje nominal de entrada	400 V
Corriente nominal de entrada	9,5 A
Potencia de entrada	3 800 W

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Ahora bien, se aplican las condiciones descritas en esta sección:

- La primera condición, indica que la suma del voltaje de circuito abierto, afectado por la temperatura, de los paneles solares conectados en serie debe de estar en un rango definido por los parámetros del inversor. Aplicando la ecuación 1, de la sección 2.3.3.1, para un voltaje de circuito abierto igual $V_{OCSTC} = 47,5 V$ y un coeficiente de temperatura igual a $C_T = -0,0029 V/^{\circ}C$ se encuentra que el voltaje de circuito abierto máximo,

cuando esta ve afectado por la temperatura mínima $T_A = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ grados centígrados, es igual a $V_{OC} = 51,265\text{ V}$, por panel solar. Dado que se encuentran 10 de ellos conectados en serie, el resultado es de $V_{OCN} = 512,65\text{ V}$. Este valor es mayor que el voltaje de arranque ($V_{DCA} = 120\text{ V}$), como también menor que el voltaje máximo en DC ($V_{DCMAX} = 600\text{ V}$).

- La segunda condición, indica que la suma de corrientes de corto circuito de los paneles solares conectados en paralelo debe ser menor que la corriente de corto circuito máxima del inversor ($I_{SCMAX} = 17,2$). Dado que se utiliza un inversor por cada cadena que consta 10 paneles conectados en serie, entonces la suma de corrientes resulta siendo solamente la de un panel solar, que es igual a $I_{SCN} = 10,01\text{ A}$, llamada corriente nominal de entrada en la tabla IX.
- La tercera condición, indica que la potencia de salida debe ser menor al valor máximo $P_{ACMAX} = 4,4\text{ kW}$. Al realizar el cálculo para una entrada DC, resulta en una potencia AC igual a $3\ 727,8$, ($P_{DC1} = 3\ 800\text{ W}$, con $\eta_{MAX} = 98,1\%$). El cálculo de P_{DC1} se realiza con la ecuación 7.

2.3.5. Dimensionamiento del generador monofásico

Dimensionar adecuadamente un generador es importante, porque si el tamaño se queda corto, entonces no será capaz de alimentar la carga conectada; si el generador se sobredimensiona, entonces se estará desperdiciando dinero. Se define que el generador a utilizar es monofásico, porque el tablero eléctrico cuenta con esta conexión, que es definido por las cargas, las cuales no incluyen algún motor trifásico.

2.3.5.1. Cálculo del tamaño de la carga

El primer paso es realizar el cálculo de los equipos que alimenta el generador monofásico. Este paso se realizó en la sección 2.3.2. De esta sección se encontró que la potencia a suministrar es de 7 kW. En esta sección es importante acotar que algunos equipos eléctricos tienen una potencia de arranque y de funcionamiento diferente. Esto se debe a que se necesita más energía para arrancar el equipo con un motor eléctrico que para mantener el motor en funcionamiento. Es vital que cualquier aumento inicial de potencia se tenga en cuenta en el proceso de dimensionamiento: no sirve de nada tener un generador que cumpla con sus requisitos de funcionamiento, pero no tiene suficiente potencia para iniciar la carga. En el diseño actual se cumple esta especificación.

2.3.5.2. Conversión de kW a kVA

La potencia real que utiliza la carga para producir una salida útil de trabajo está dada como una medida de kilowatts. Los generadores están clasificados en kilovoltios-amperios (kVA). Los kVA son una medida de potencia aparente: indica la cantidad total de potencia que utiliza un sistema. Si el sistema es 100 % eficiente los kW son iguales a los kVA. Sin embargo, los sistemas eléctricos no son cien por ciento eficientes y, por lo tanto, no todos los sistemas de potencia aparente se utilizarán para producir una salida de trabajo útil.

Se puede convertir entre kVA y kW si se conoce la eficiencia del sistema eléctrico. La eficiencia eléctrica se expresa como un factor de potencia en un rango de 0 a 1. Entonces si el factor de potencia se acerca a 1, el sistema eléctrico más eficientemente convierte los kVA en kW útiles.

Los estándares internacionales califican a los generadores con un factor de potencia de 0,8. Sin embargo, se conoce que el factor de potencia se obtiene a partir del cálculo de la potencia reactiva (inductiva más capacitiva) y la potencia real de las cargas.

El factor de potencia es muy importante para hacer coincidir el tamaño de la carga con el generador. Por ejemplo, un generador con una capacidad nominal de 100 kVA, y factor de potencia de 0,8 es demasiado pequeño para alimentar equipos que requieren 100 kW de potencia real. Para convertir kW a kVA, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{REAL} = \frac{P_{APARENTE}}{F_{POTENCIA}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

P_{REAL}	es la potencia real en kW.
$P_{APARENTE}$	es la potencia aparente en kVA.
$F_{POTENCIA}$	es el factor de potencia, es adimensional.

Entonces si el equipo que desea alimentar tiene una potencia total de 100 kW, el generador de tamaño mínimo que podría producir sería de 125 kVA.

2.3.5.3. Definición los requisitos de funcionamiento

Se define si el generador es una fuente de energía de reserva o de energía primaria. Un generador no debe funcionar a su capacidad máxima durante más de 30 minutos. Si se utiliza el generador como una fuente de alimentación principal, se debe dimensionar el 70 a 80 % de su capacidad. Además de mejorar el rendimiento, dejar un margen de seguridad del 20 a 30 % también permite requisitos de energía en el futuro.

2.3.5.4. Análisis de las condiciones del sitio y el acceso

El último punto por tomar en cuenta es analizar si los requisitos antes dispuestos son factibles dadas las condiciones del lugar de instalación. El acceso al sitio, junto a la maniobrabilidad tienen un gran impacto en cómo se descarga el generador. Esto también puede afectar el tamaño del generador. Si el acceso al sitio es particularmente angosto, cuesta arriba o fuera de la carretera, entonces los vehículos más grandes o menos maniobrables no podrán entrar o salir del sitio. Del mismo modo, si el espacio en el sitio es limitado, puede que no haya suficiente espacio para extender las patas del estabilizador necesarias para descargar el generador, mucho menos espacio suficiente para operar la grúa y colocar el generador.

2.3.5.5. Elección del generador monofásico

Bajo los criterios presentados anteriormente se presenta la Tabla X sobre los requerimientos básicos para elegir el inversor.

Tabla X. **Requerimientos del generador monofásico**

Parámetro	Valor
Potencia real máxima	7 kW
Potencia aparente máxima	8,75 kVA
Factor de seguridad	1,2
Potencia aparente con factor de seguridad	10.5 kVA
Factor de potencia	0,8
Frecuencia	60 Hz
Voltaje de salida	110 - 120 V
Tipo de instalación	Monofásico

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Se realiza la investigación acerca de los generadores disponibles, se encuentran diferentes marcas con prestaciones avanzadas. Los generadores de baja potencia, menor a 7 kVA, mayoritariamente de alimentan con gasolina y son portátiles; por el contrario, los generadores de alta potencia se alimentan con diésel. Existen divisiones de acuerdo con la potencia del equipo, pueden ser de gama industrial, gama pesada, hasta gama de media tensión que puede manejar potencias de 2 500 kVA.

La potencia objetivo es de 10,5 kVA, por lo que se escoge el modelo HYW-14 M6 de la marca *Himoinsa*³², con capacidad de manejar potencias de hasta 12,1 kVA. Una de las razones del porque se escoge esta marca es por la versatilidad en las funciones de sus grupos electrógenos, y la capacidad de información disponible de cada uno de sus modelos. La Figura 12 muestra las características principales del generador monofásico.

Figura 12. **Especificaciones generales del generador HYW-1 M6**



SERVICIO		PRP	ESP
POTENCIA	kVA	12,1	13,3
POTENCIA	kW	12,1	13,3
RÉGIMEN DE FUNCIONAMIENTO	r.p.m.	1.800	
TENSIÓN ESTÁNDAR	V	240/120	
FACTOR DE POTENCIA	Cos Phi	1,0	

Fuente: Himoinsa. *Grupo electrógeno 12.1 kVA Estático Estándar.*

<https://www.himoinsa.com/esp/generadores-electricos/676/grupo-electrogeno--12,10kva--estatico-estandar.html>. Consulta: 21 de marzo de 2020. p. 1.

³² Himoinsa. *Grupo Electrógeno 12.1 kVA Estático Estándar Gama Industrial HYW-14 M6.* <https://www.himoinsa.com/esp/generadores-electricos/676/grupo-electrogeno--12,10kva--estatico-estandar.html>. Consulta: mayo 2020.

Como se puede observar cumple las especificaciones de diseño que se muestran en la Tabla X. El hecho de que la capacidad del generador sobrepase la exigencia de la red, podría hacer pensar que se ha sobredimensionado el equipo y se ha incurrido en un gasto innecesario. Sin embargo, se prevé un crecimiento de la demanda de energía, por lo que es necesario, mantener un equipo de esta magnitud para el centro de salud tipo B.

Entre la información disponible para este modelo se encuentran las especificaciones del motor, las especificaciones del alternador, dimensiones, peso y datos de instalación. Con motivos del trabajo de investigación, que pretende generar una interfaz de puesta en marcha del generador en caso de fallo del arreglo de paneles solares, es importante mencionar que estos equipos cuentan con un sistema de transferencia manual o automática que, si bien es la función principal del equipo, también poseen una central de mando capaz de realizar una serie de lecturas eléctricas, como también mecánicas. Así también, permite la comunicación por protocolos como RS232, RS485, entre otros., en sus versiones más avanzadas.

De la misma manera, los modelos más simples de la central de mando cuentan con un control manual que posee las prestaciones esenciales y para el uso que se pretende brindar en este trabajo, posee una característica primordial, que es un encendido automático por contacto libre. En términos sencillos, se puede encender por medio de una señal de baja potencia, tal como un relé o contacto seco, comúnmente llamado. En la Figura 13 se muestra información adicional del equipo del cuadro de control:

Figura 13. **Cuadro de control manual M6**



Fuente: Himoina. *Cuadros de control y potencia*. <https://www.himoina.com/esp/sistemas-de-energia-inteligentes/40/cuadros-control-y-potencia-grupos-electrogenos.html>.

Consulta: 21 de mayo de 2020.

Los componentes principales del cuadro de control, en orden numérico, son los siguientes:

- Voltímetro analógico.
- Amperímetro analógico.
- Frecuencímetro analógico.
- Central M6.
- Luz alarma.

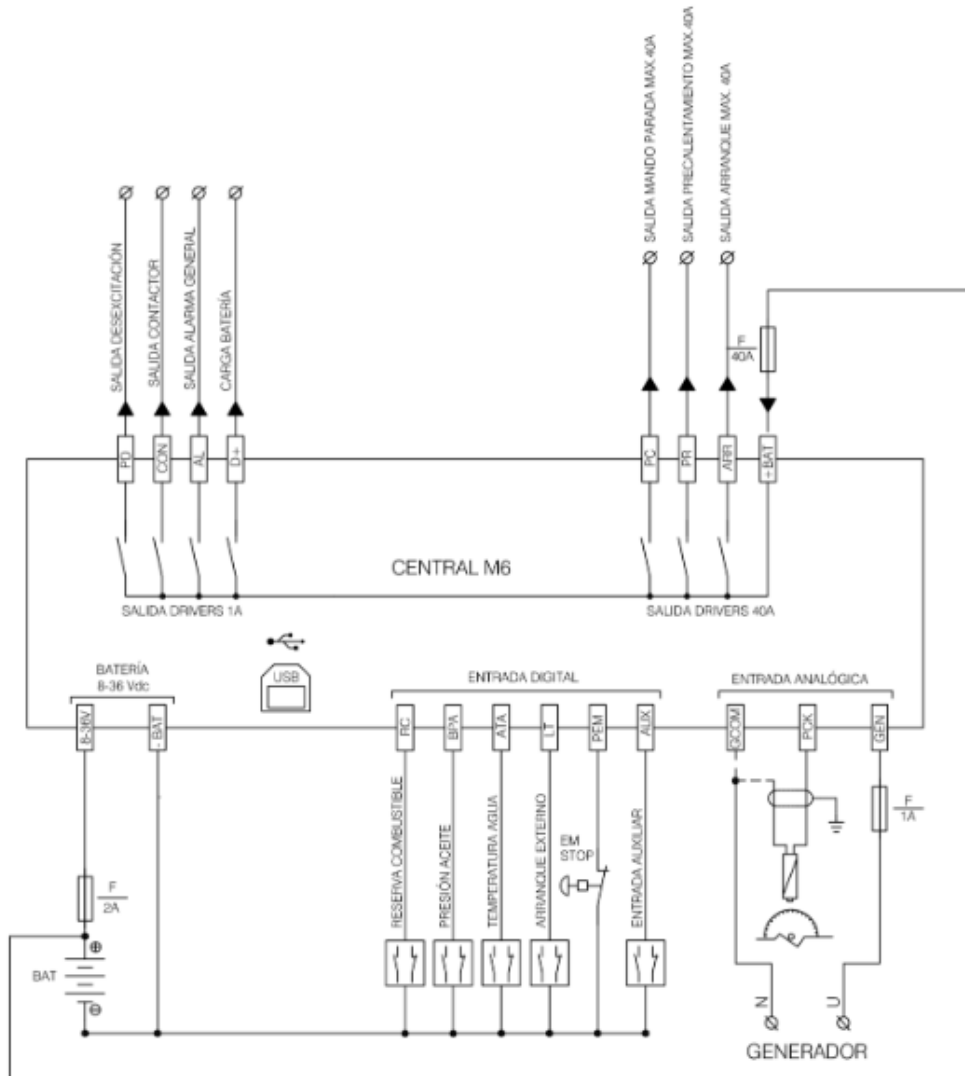
- Cuenta horas de funcionamiento.
- Selector de medida de voltaje.
- Fusibles.
- Relé diferencial.
- Protección magneto térmica.
- Parada de emergencia.

La central M6, que se indica con el número 4 en la imagen anterior, tiene una opción de selección de puesta en marcha por transferencia manual o automática. La parte trasera de la central de mando contiene las conexiones lógicas y de potencia para el funcionamiento correcto del generador. Con base en el manual profesional versión 1,0 que se encuentra en *studylib*³³, en su página número 18, se encuentra el diagrama de conexiones de la central M6.

La entrada digital de interés se denomina arranque externo (LT), la cual funciona como un contacto seco. Según este manual, el generador se activa al conectar a una referencia a tierra el pin de entrada digital (LT). Para ello se puede utilizar un relé, se conecta el pin normalmente abierto a la entrada digital y el pin normalmente cerrado se deja al aire; de esa manera, se conecta el pivote del relé hacia la terminal negativa de la batería que alimenta la central de mando M6. Se puede observar la Figura 14 para mayor comprensión:

³³ Himoinsa. *Manual Profesional versión 1.0 Central M6*. <https://studylib.es/doc/5048005/central-m6>. Consulta: mayo 2020.

Figura 14. **Conexión Central M6**



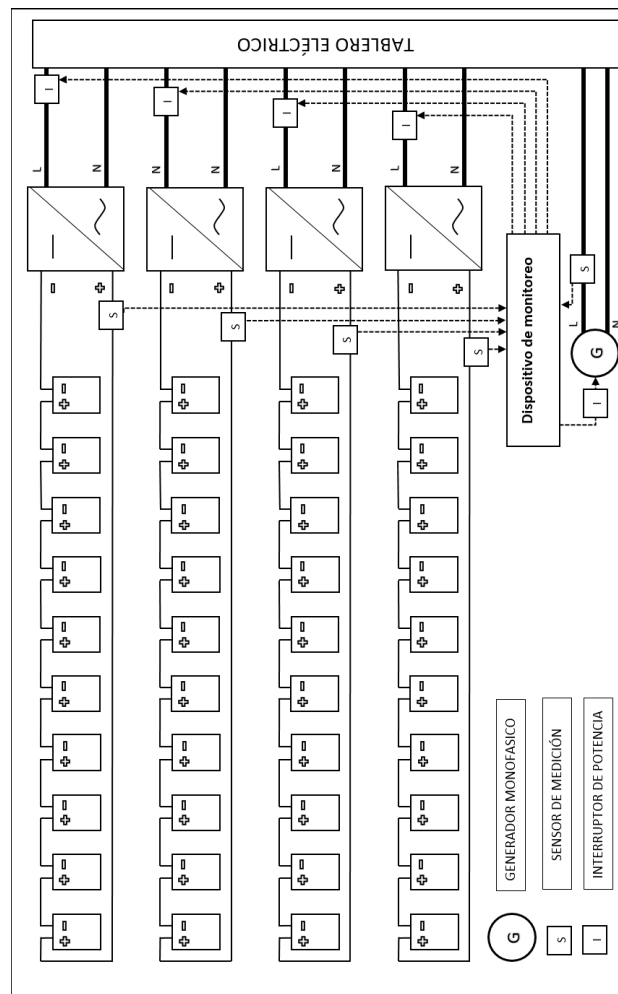
Fuente: Himoinsa. *Central M6, Manual Profesional versión 1.0.*

<https://studylib.es/doc/5048005/central-m6> Consulta: 25 de marzo de 2020. p. 18.

2.3.6. Diagrama de interconexión del sistema

A partir del análisis realizado sobre el dimensionamiento de los paneles solares, inversores y generador monofásico, en la Figura 15 se presenta un diagrama preliminar de interconexión de cada uno de los componentes. Para mayor detalle ver apéndice 1a.

Figura 15. Interconexión del sistema fotovoltaico híbrido



Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Se explica brevemente cada una de sus partes:

- La primera parte consiste en el arreglo de paneles solares, dibujados en forma de rectángulos indicando la polaridad. El arreglo consta de 40 en total, cada serie de paneles solares tiene los valores de voltaje, junto a los valores de corriente adecuados para cada entrada del inversor, como se dimensiona en una de las secciones anteriores. Si cada panel tiene un voltaje a máxima potencia de $V_{mp} = 40 V$, y una corriente a máxima potencia de $I_{mp} = 9,5 A$, entonces la potencia de entrada hacia cada inversor es de 3 800 W. Recordar que este valor de potencia se encuentra en corriente directa.
- La segunda parte consiste en el arreglo de inversores, que como bien se comentó en dos secciones anteriores, se dimensionan de modo que pueda soportar la potencia de entrada, y poder ser conectados en paralelo dentro del tablero eléctrico, para brindar una potencia de salida de 12,1 kW.
- La tercera parte consiste en la conexión del generador monofásico, indicado con una letra G. Este se conecta directamente al tablero eléctrico, y como se explica en la sección anterior, es accionado por una señal de bajo voltaje.
- La cuarta parte consiste en los elementos que constituyen el dispositivo de monitoreo. El primer elemento se compone de los sensores de medición indicados con una letra "S". El segundo elemento se compone de los interruptores de potencia indicados con una letra "I". En el capítulo siguiente se profundiza acerca de la topología del dispositivo electrónico y el diseño interno del mismo, el cual es el tercer elemento.

2.3.7. Dimensionamiento del cableado eléctrico

En la sección 1.6.1.1 que describe brevemente el artículo 690 de la norma *NFPA 70*, se menciona que se utilizan las secciones uno, dos, cuatro para el desarrollo de este trabajo. Sin embargo, también son requeridos los artículos 210,20(a) sobre el dimensionamiento de las protecciones por sobrecorriente, 215,2 y 215,3 sobre dimensionamiento de los alimentadores, 220,10 que describe el cálculo para los circuitos de rama, 240,6(a) sobre estándares para el cálculo de amperajes. Así también en las secciones 1.2.2.2, 1.2.2.3 se describen las características a seguir para dimensionar adecuadamente el cableado y los dispositivos de sobrecorriente. Por lo que a continuación se resume por pasos, un procedimiento aplicado a sistemas fotovoltaicos:

- Corriente del circuito: para circuitos que transportan corrientes desde los módulos fotovoltaicos, multiplicar la corriente de corto circuito por 125 %. Este requerimiento se incluye en la sección 690,8 del NEC. Para los circuitos DC o AC del inversor, se utiliza la corriente nominal continua. Los circuitos de las cargas AC o DC deber seguir los requerimientos de las secciones 210, 220, y 215 del NEC.
- Capacidad de los dispositivos de sobrecorriente: los dispositivos de sobrecorriente deben ser clasificados a un 125 % de la corriente determinada en el paso 1. Esto es para prevenir que los dispositivos de sobrecorriente funcione a más del 80 % de su capacidad nominal.
- Dimensionamiento del cableado: los cables deberán tener una ampacidad del 125 % a 30 grados centígrados, de la corriente determinada en el paso 1, para garantizar el funcionamiento adecuado de los dispositivos de sobrecorriente conectados. No se realizan otros cambios en este paso.

- Pérdidas del cableado: basado en el cálculo del paso anterior, conociendo la ubicación del cableado (aire libre o tubo), entonces el tamaño del cable, la temperatura de aislamiento (60, 75, o 90 °C), se seleccionan del NEC en las tablas de ampacidad 310,15(B)(16) y 310,15(B)(17) (Ver anexo 2). Se utiliza la ampacidad del cable en la columna de 75 °C para obtener su tamaño, luego se usa la ampacidad de la columna de 90 °C, si es necesario, para las pérdidas. La ampacidad disminuida resultante debe ser mayor que el valor del paso 1. Si no es mayor, entonces un cable de mayor tamaño o temperatura de aislamiento debe seleccionarse. La corriente del paso 3 no se usa en este punto para sobredimensionar los cables. Se puede ver la sección 1.6.2.2 de este trabajo para más detalle.
- Ampacidad vs. dispositivo de sobrecorriente: la ampacidad disminuida del cable seleccionado en el paso 4, debe ser igual o mayor que la capacidad del dispositivo de sobrecorriente del paso 2. En caso sea menor, entonces un cable mayor debe seleccionarse. Si la ampacidad del cable disminuido se encuentra entre los tamaños de dispositivos de sobrecorriente estándar encontrados en el NEC, entonces se utiliza el dispositivo con mayor capacidad en el rango. Este paso puede resultar en un conductor de mayor tamaño que el determinado en el paso 4.

2.3.7.1. Elección del cableado eléctrico

Para elegir adecuadamente el cableado eléctrico para el sistema fotovoltaico híbrido se aplican las recomendaciones escritas al inicio de esta sección. Además, se toma en consideración el diagrama interconexión indicado en la sección 2.3.6.

Para ello se definen primero algunas partes fundamentales del diagrama, respecto al cableado eléctrico:

- Circuito fuente fotovoltaico: se refiere al conjunto de cables que están conectados desde el panel fotovoltaico hacia el inversor.
- Circuito de potencia inversor: se refiere al conjunto de cables que están conectados desde el inversor hacia el tablero eléctrico.

El procedimiento aplicado se describe a continuación:

La tarea consiste en dimensionar el circuito fuente fotovoltaico en tubería *conduit*, con corriente de corto circuito $I_{SC} = 10,01 A$. Existe cuatro circuitos fuente fotovoltaico, cada uno correspondiente a cada cadena de módulos que se dirigen hacia cada inversor. Por lo que, por cada circuito, solamente un conductor está en el *conduit* y está operando a una temperatura ambiente de $T_A = 30 ^\circ C$.

- Paso 1: $1,25 \times 10,01 A = 12,51 A$
- Paso 2: $1,25 \times 12,5125 A = 15,64 A$. La capacidad del dispositivo de protección de sobrecorriente, como un fusible, debe tener una capacidad de corriente de 20 A, el cual es el valor próximo superior.
- Paso 3: $1,25 \times 12,5125 A = 15,64 A$. Es la capacidad de corriente inicial del cableado. Tiene in aumento en el siguiente paso.
- Paso 4: de la tabla 310,15(B)(16), con una temperatura de aislamiento de $75 ^\circ C$, el conductor de cobre calibre 14 AWG es necesario a 20 A, (el valor próximo superior de la corriente del paso 3). Se planea instalar un

conductor XHHW-2 con temperatura de aislamiento 90°C , el cual soporta 25 A. Una disminución de 0.8 por temperatura se considera, entonces se obtiene una corriente de 20 A ($25\text{ A} \times 0,8$). Este valor es mayor que la corriente 12,51 A obtenida en el paso 1, por lo que, el conductor cumple el requerimiento.

- Paso 5: la capacidad disminuida es igual al valor de corriente encontrado en el paso 2, por lo que, el conductor no se debe de cambiar.

Para el inversor, se realiza el cálculo final del cableado para el circuito potencia del inversor, el cual consiste en multiplicar la corriente máxima de salida por 1,25. Para ello se toma en cuenta la eficiencia, la potencia de entrada y el voltaje de entrada, de donde se obtiene una corriente de 100 A ($3\ 800\text{ W} / 40\text{ V} / 0,95$). Al consultar la tabla 310,15(B)(16), se observa que un conductor calibre 2 AWG, tiene una capacidad de corriente de 115 A, a una temperatura de aislamiento de 75°C .

Por último, para el generador monofásico, el NEC requiere que los conductores de salida entre el generador y el tablero eléctrico estén sobredimensionados por un factor de 1,25. Por lo que la ampacidad del cable debe ser de un valor mínimo de 126 A ($(12,1\text{ kW} / 120) \times 1,25$). Al consultar la tabla 310,15(B)(16), se observa que un conductor calibre 1 AWG, tiene una capacidad de corriente de 130 A, a una temperatura de aislamiento de 75°C .

2.3.8. Consumos de combustible del generador

El generador de la marca Himoinsa serie HYW-14 M6 de 12.1 kVA tiene un consumo de combustible a plena carga de 4,2 litros por hora de diésel. El diseño fotovoltaico se planea para una instalación en un centro de salud tipo B, funcional

en área rural, con horario de 8 a.m. a 5 p.m. De la sección 2.1.4 se conoce que la hora pico promedio en Guatemala es de 5, 5 horas. Por lo tanto, el generador tendrá un tiempo de funcionamiento de 3,5 horas. Esto conlleva a tener un consumo de combustible de 14,7 litros por hora. El precio del diésel en mayo de 2021 es de Q 5 756³⁴. Por lo que, el gasto de combustible diario es de Q 84,61. El valor del combustible puede tener un aumento durante los años de funcionamiento, pero se puede considerar un costo inicial estimado para la comunidad de Q 100,00. La solución es completamente realizable porque se considera el beneficio a largo plazo y este costo de combustible puede ser cubierto a través de aportes de la comunidad.

³⁴ Global Petrol Prices. *Guatemala precios del diesel, 26-jul-2021.* https://es.globalpetrolprices.com/Guatemala/diesel_prices/. Consulta: mayo 2020.

3. DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE MONITOREO DE PARÁMETROS ENERGÉTICOS

3.1. Introducción

Un dispositivo de monitoreo se puede utilizar para conocer el consumo energético en una instalación eléctrica, lo que abre camino para implementar medidas relacionadas al ahorro y eficiencia. Su uso es principalmente en fuentes de energía renovable, o para la toma de decisiones en la sustitución de otras fuentes de energía. Entre las funciones que se pueden realizar se encuentran: la obtención de los datos de consumo en tiempo real, la activación de alarmas inteligentes, el disparo de una fuente de energía alternativa, y el análisis de la calidad de energía, en los más avanzados.

Para energías renovables, un dispositivo de monitoreo es esencial porque facilita la visualización y el control de la información de las mediciones eléctricas. Específicamente en sistemas fotovoltaicos, el dispositivo debe monitorizar el consumo energético, en kWh, siendo el elemento principal de una factura de electricidad. La medición del voltaje generado es otra variable de mucho valor, donde se pueden analizar aspectos como la amplitud, las caídas e interrupciones de la tensión. También, la corriente, la potencia del sistema son medidas de la actividad instantánea del sistema, de estos datos, se pueden analizar sus fluctuaciones o cambios repentinos. El aumento de la corriente puede significar una sobrecarga, mientras que una disminución puede significar un sobre dimensionamiento o mal uso del sistema.

Para propósitos de control o monitoreo sofisticados también se pueden medir datos ambientales o atmosféricos, como temperatura y radiación solar. Así también, el acceso remoto a la información puede realizarse con conexiones a una red de internet inalámbricas, por bluetooth o Wifi, o de manera local por protocolos de comunicación serial, como RS232 o RS485.

En el presente trabajo, el diseño del dispositivo electrónico se aplica directamente al diseño de un sistema fotovoltaico híbrido. El tamaño de dicho sistema puede ser un poco mayor que una instalación residencial, pero de menor dimensión que una instalación industrial, el ámbito que se propone analizar es en un centro de salud tipo B. El dispositivo de medición se diseña para su uso en el ramal principal del sistema fotovoltaico. Se conecta en paralelo a las conexiones de los paneles fotovoltaicos e inversor, hacia una instalación interna del centro de salud tipo B. De este modo la naturaleza de la señal a analizar es de corriente directa y alterna.

Por lo tanto, el dispositivo electrónico cuenta con algunas partes fundamentales como lo son los sensores de medición, la adquisición de datos y el tratamiento o visualización de los parámetros energéticos. Así, corresponde analizar los circuitos electrónicos de potencia, que se encargan de interrumpir las salidas, como también de las fuentes principal o auxiliar de energía, ambas dirigidas hacia el tablero eléctrico del centro de salud tipo B; así como, el circuito que se encarga de activar o desactivar la fuente de energía auxiliar.

3.2. Descripción general del dispositivo

El siguiente diseño es un dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos de bajo consumo. El diseño de la tarjeta de circuito impreso funciona para soluciones de monitoreo en un sistema fotovoltaico híbrido, con 4 entradas

de corriente directa y una entrada de corriente alterna. Las entradas de corriente directa tienen una capacidad de potencia de hasta 4 kW, con un voltaje nominal de 400 VDC, cada una. La entrada de corriente alterna tiene la capacidad de potencia de hasta 13 kW, con un voltaje nominal de 120 VAC.

El diseño en corriente directa utiliza un sensor de efecto hall para la medición de corriente de hasta 30 A, junto a un sensor resistivo para la medición de voltaje de 600 VDC máximo, para cada entrada. El diseño en corriente alterna utiliza un sensor de efecto hall para la medición de corriente de hasta 115 A, y un circuito convertidor True RMS para la medición de un voltaje nominal de entrada de 120 VAC. El tratamiento de la información se realiza en tiempo real por medio de una unidad de microcontrolador (*MCU, microcontroller unit*, por sus siglas en inglés), en el cual se calcula la potencia de entrada, que es proporcional de los valores medidos.

El diseño del dispositivo también cuenta con 5 salidas de potencia en corriente alterna que funcionan como un interruptor electrónico, capaces de cerrar o abrir cada circuito conectado en sus terminales, con una respuesta automática. Dichas salidas se activan por medio de señales provenientes del MCU, bajo una lógica de control programable de manera simultánea se abren 4 salidas, mientras la restante se cierra, o viceversa, según sea la función de activar o desactivar la fuente de energía solar o por generador auxiliar.

El diseño del dispositivo de monitoreo tiene una interfaz de usuario conectada directamente hacia el MCU. En ella se pueden visualizar los valores medidos en tiempo real, a través de una pantalla LCD; y verificar las alarmas de seguridad según sea la funcionalidad requerida, por medio de pulsadores digitales. Finalmente, el diseño del dispositivo es capaz de establecer una

conexión inalámbrica por *bluetooth*, para transferir información del comportamiento del sistema fotovoltaico híbrido.

3.3. Resumen del hardware

A continuación, se realiza un recorrido breve del hardware utilizado para el diseño del dispositivo electrónico de monitoreo de parámetros energéticos.

3.3.1. Consideraciones del diseño

El dispositivo está diseñado, para soluciones de monitoreo de sistemas fotovoltaicos híbridos de baja o media potencia, con un respaldo de energía por generador monofásico auxiliar y no por baterías. En la siguiente tabla se muestran las especificaciones eléctricas del dispositivo de monitoreo:

Tabla XI. **Especificaciones eléctricas del dispositivo electrónico**

Parámetro	Especificaciones	Unidad
Potencia máxima de entrada DC	4 000	W
Potencia máxima de entrada AC	13 800	W
Rango de medición de voltaje de entrada DC	120 – 600	V
Rango de medición de voltaje de entrada AC	110 – 120	V
Corriente máxima DC	50	A
Corriente máxima AC	115	A

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

La etapa de acondicionamiento de las señales se efectúa considerando una lectura de corriente de hasta 50 A, con un voltaje máximo de 600 VDC; también se considera una corriente de hasta 115 A, con un voltaje máximo de 120 VAC (13 800 W). La etapa de control es de ultra bajo consumo girando en torno a los microcontroladores MSP430FR2355 y MSP430FR2476 de la marca Texas











Instruments. Se utiliza un modelo descentralizado para la medición de las señales, con aislamiento digital para la interfaz de usuario, comunicación inalámbrica, o alimentación de 3,3 o 5 V.

Por último, la etapa de potencia utiliza aislamiento galvánico para los relés electromecánicos, que funcionan como interruptores, estos son accionados por una señal de bajo voltaje proveniente del microcontrolador principal. Dichos relés están dimensionados para soportar cargas resistivas de 35 A a 277 VAC.

3.3.2. Diagrama de bloques del hardware

En la Figura 17 se presentan los gráficos la y descripción de cada una de las flechas en la Figura 16. Esto con el fin de proporcionar una ayuda visual completa del dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos.

Figura 16. **Indicadores gráficos para el diagrama de bloques del sistema**

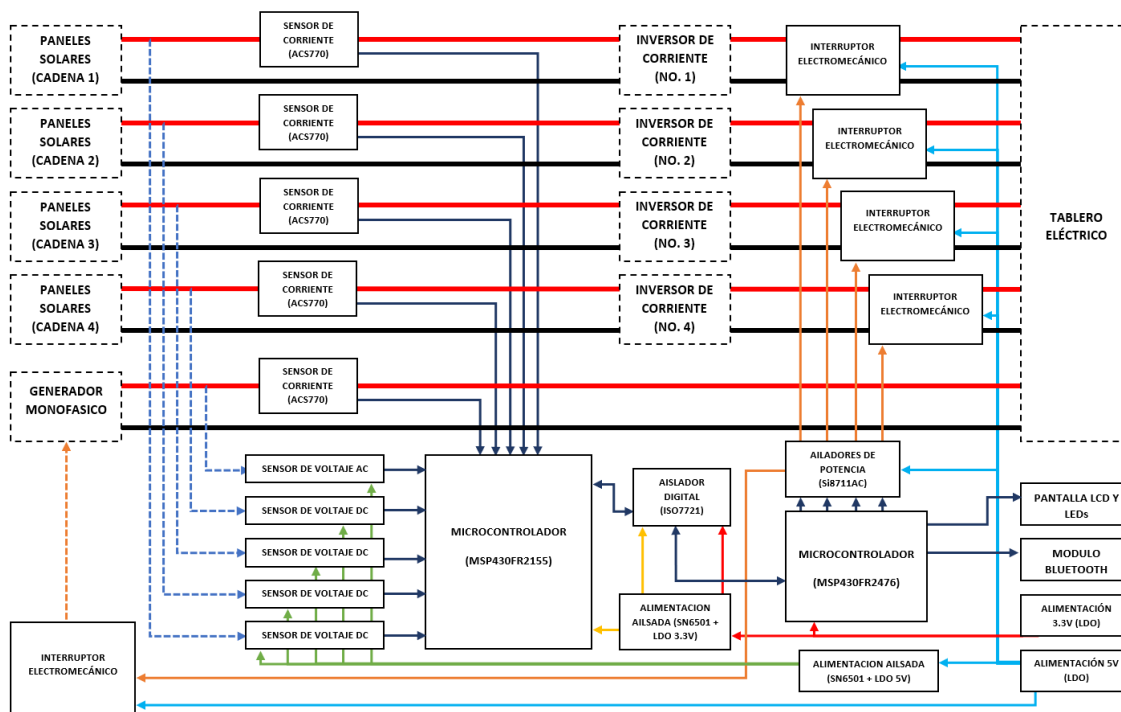
Gráfico de conexión	Descripción
	Conexión externa del cableado de voltaje positivo.
	Conexión externa del cableado de retorno/neutro.
	Conexión externa del cableado de los módulos fotovoltaicos hacia los sensores de voltaje.
	Conexión externa del cableado del interruptor electromecánico hacia el generador monofásico.
	Conexiones internas de la comunicación UART, envío y recepción de señales entre circuitos y los dos microcontroladores.
	Conexión interna entre salida del microcontrolador hacia interruptores electromecánicos.
	Conexión interna de alimentación de 3.3V hacia microcontrolador principal.
	Conexión interna de alimentación de 5V hacia interruptores electromecánicos.
	Conexión interna de alimentación de 3.3V aislada hacia microcontrolador secundario.
	Conexión interna de alimentación de 5V aislada hacia sensores de voltaje y aisladores de potencia.

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

En la Figura 17 se observan los bloques que conforman el sistema fotovoltaico híbrido completo. Para diferenciar los bloques que corresponden al dispositivo electrónico, se puede observar que cada bloque está dibujado con un contorno continuo (no punteado) de color negro, a diferencia de los bloques de paneles solares, inversor de corriente y tablero eléctrico.

Este diagrama es realmente útil durante todo el desarrollo del diseño, porque resume completamente cada etapa y componentes principales de las secciones siguientes. En el apéndice 1b., se copia exactamente el mismo diagrama extendido en una página completa.

Figura 17. Diagrama de bloques del dispositivo electrónico



Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

3.3.3. Resumen de los componentes principales

Se describen los componentes que se utilizan en el dispositivo, brevemente se explican sus características, un circuito esquemático de aplicación, descripción de los pines, y finalmente la razón por la cual se escogen.

3.3.3.1. Sensor de corriente lineal ACS770xCB

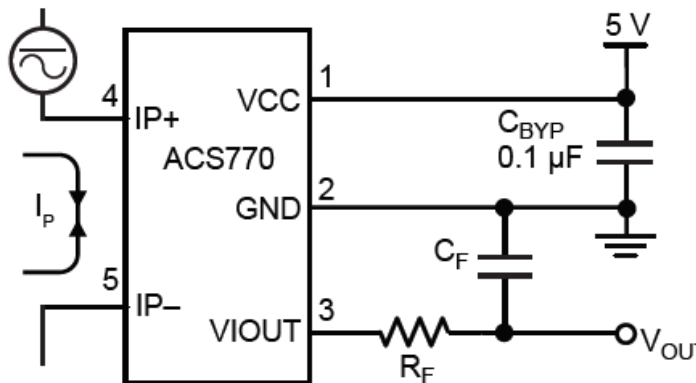
El ACS770xCB es un sensor de corriente lineal de efecto *Hall* de la industria³⁵, de alta precisión, térmicamente mejorado y totalmente integrado con un conductor de corriente de 100 $\mu\Omega$. Posee además las siguientes características:

- Rendimiento al ruido con técnicas propietarias de diseño de filtros y amplificadores internos.
- Ancho de banda de 120 kHz.
- Blindaje integrado que reduce el acoplamiento capacitivo del conductor de corriente debido al cambio repentino elevado dV/dt de las señales.
- Tiempo de elevación (rise-time) de 4,1 μs , en respuesta a un escalón de corriente de entrada.

³⁵ Allegro Microsystems. *ACS770xCB: Current Sensor IC with 100 $\mu\Omega$ Current Conductor*. <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/fifty-to-two-hundred-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs770>. Consulta: junio 2020.

- Error total de salida mejorado a través de técnicas de compensación programadas digitalmente de la ganancia y el desplazamiento (offset), sobre el rango operativo de temperatura.
- Baja pérdida de potencia.
- Aislamiento galvánico, funcional para sensado de corriente en sistemas de alto voltaje.
- Voltaje de operación entre 4,5 a 5,5 V.
- Voltaje de salida proporcional a las corrientes DC y AC.
- Voltaje de salida extremadamente estable.

Figura 18. **Ejemplo de aplicación sensor de corriente ACS770**



Fuente: Allegro Microsystems. *IC de sensor de corriente lineal de alta precisión basado en efecto Hall*. <https://www.allegromicro.com/~/media/Files/Datasheets/ACS770-Datasheet.ashx>.

Consulta: 15 de junio de 2020. p. 1.

En la Figura 18 se observa que el circuito integrado puede recibir una señal DC o AC en sus terminales 4 y 5, con una salida en corriente directa en la terminal 3. Se puede observar en la tabla siguiente la funcionalidad de cada una de ellas:

Tabla XII. **Descripción de los pines del CI ACS770xCB**

nro.	Nombre	Descripción
1	VCC	Terminal de alimentación. Típicamente de 5V.
2	GND	Terminal de señal de tierra
3	VIOUT	Terminal de salida analógica
4	IP+	Terminal positiva para corriente muestreada
5	IP-	Terminal negativa para corriente muestreada

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020, con información de <https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS770-Datasheet.ashx>.

Consulta: 14 de junio de 2020.

Por último, cabe mencionar las razones principales por las cuales se escoge el sensor. La primera de ellas es por su capacidad de manejo de corriente, desde 50 A hasta 200 A, según se elija el modelo adecuado. La segunda, es por su fiabilidad en las lecturas del voltaje analógico de salida, porque posee un algoritmo interno de compensación por temperatura, e integra filtros digitales para disminuir el ruido. La tercera, es por su capacidad de medición de corrientes unidireccionales o bidireccionales. La cuarta, es por su capacidad de medición de altos voltajes, de hasta 700 Vrms. La quinta razón es por su capacidad para medir corriente continua o alterna, según sea su aplicación. Finalmente, por la simplicidad de conexión para el sistema, donde no es necesario algún componente adicional, además de un capacitor de desacople, resistencia y capacitor de filtrado externos.

3.3.3.2. Amplificador operacional dual LM358B

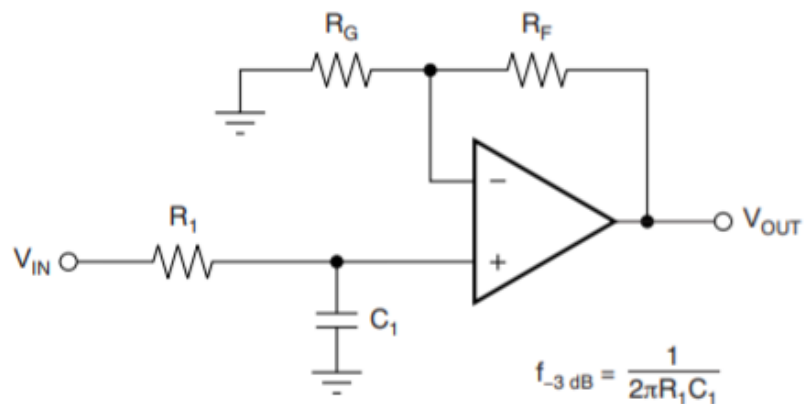
El circuito integrado LM358B es una versión de amplificador operacional estándar de la industria³⁶, el cual incluye dos amplificadores en un solo encapsulado. Entre sus características más relevantes se encuentran las siguientes:

- Rango extenso de voltaje de alimentación de 3 V a 36 V.
- Bajo offset de 300 microamperios.
- Ancho de banda con ganancia unitaria de 1,2 MHz.
- Rango de voltaje de entrada en modo común, que permite la detección directa cerca de tierra.
- Filtros internos RF and *EMI (Electromagnetic Interference)*.
- Aplicaciones variadas tales como:
 - Unidades de fuentes de alimentación.
 - Impresoras multifuncionales.
 - Cargadores móviles.
 - Control de motores.

³⁶ Texas Instruments. *Industry-Standard Dual Operational Amplifiers*. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf?&ts=1589251590096>. Consulta: junio 2020.

- Inversores AC.
- Controladores lógicos programables.
- Fuentes ininterrumpidas de alimentación (*UPS*).

Figura 19. **Ejemplo de aplicación de un filtro pasa bajos con el CI LM358B**



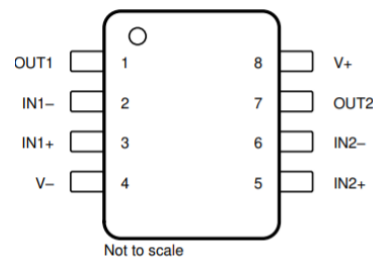
Fuente: Texas Instruments. *Amplificador operacional dual LM358B*.

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf?ts=1589251590096>. Consulta: 14 de junio de 2020.

La Figura 19 muestra el circuito esquemático que representa un filtro pasa bajos de un polo, que tiene la facultad de atenuar el voltaje de entrada V_{IN} a frecuencias mayores a la de corte. La frecuencia de corte, también llamada frecuencia a -3 decibels, se obtiene con la ecuación indicada en la imagen, que depende de la resistencia R_1 y el capacitor C_1 que están conectados a la terminal no inversora del circuito integrado. Las resistencias R_G y R_F , tienen la función de servir como la ganancia de voltaje.

Un amplificador operacional tiene la función de servir como acople de impedancia para las señales de voltaje o corriente. La configuración que realiza dicha característica se denomina seguidor emisor, la cual es similar a la Figura 19, a excepción de que se conecta directamente la terminal negativa a la terminal de salida, eliminando las resistencias R_G y R_F . De esta manera, el circuito descrito anteriormente, se define como un filtro pasa bajos activo de ganancia unitaria, el cual se aplica más adelante.

Figura 20. **Configuración de pines del CI LM358B**



Fuente: Texas Instruments. *Amplificador operacional dual LM358B*.

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf?ts=1589251590096>. Consulta: 14 de junio de 2020.

Tabla XIII. **Descripción de los pines del CI LM358B**

nro.	Nombre	Descripción
1,7	OUT1, OUT2	Terminal de salida
2,6	IN1-, IN2-	Terminal de entrada inversora o negativa
3,5	IN1+, IN2+	Terminal de entrada no inversora o positiva
8	V+	Terminal de alimentación positiva de 3 a 36 V
4	V-	Terminal de alimentación negativa o GND

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020, con información de <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf?ts=1589251590096>. Consulta: 14 de junio de 2020.

En la Figura 20 se observa que el circuito integrado consta de 8 terminales de conexión. Se puede observar en la Tabla XIII la funcionalidad de cada una de ellas.

Se escoge el circuito integrado principalmente por su capacidad de aislamiento, por sus características de funcionamiento para sistemas de una sola fuente de alimentación, y porque integra dos amplificadores operacionales.

3.3.3.3. Convertidor *True RMS* a corriente directa AD8436

El circuito integrado AD8436 de la industria³⁷ es un convertidor de voltaje RMS de señales en corriente alterna, a voltajes en corriente directa. Entonces se encarga de calcular el equivalente de corriente directa del valor eficaz de la forma de onda, de corriente alterna de entrada. Una de sus aplicaciones puede ser para multímetros portátiles que funcionan con baterías.

Entre sus características más importantes se pueden mencionar las siguientes:

- Amplio rango dinámico de entrada de 100 μV a 3 V_{rms} (8,5 V_{pp}).
- Amplio ancho de banda; 1 MHz para -3dB.
- Precisión de 10 $\mu\text{V} \pm 0,25$ % de la lectura.

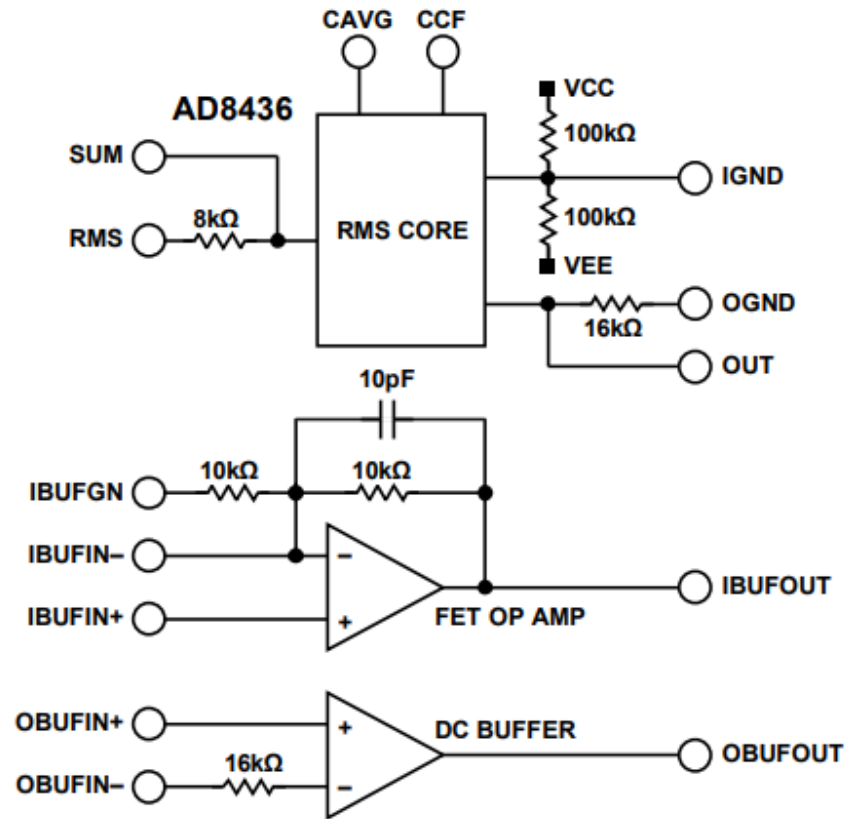
³⁷ Analog Devices. *Low Cost, Low Power, True RMS-to-DC Converter*. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8436.pdf>. Consulta: junio 2020.

- Tiempo de establecimiento de la señal programable.
- Conversión precisa para señales con factor de cresta de hasta 10.
- *Buffer* de entrada de alta impedancia con alimentación separada.
- Amplio rango de voltaje de la fuente de alimentación
 - Fuente dual: $\pm 2,4$ V a ± 18 V
 - Fuente simple: 4,8 V a 36 V
- Protección ESD

La Figura 21 muestra el diagrama funcional del CI AD8436. Se observan 3 funcionalidades independientes en un solo integrado: el núcleo RMS, un amplificador operacional de entrada tipo FET, y un amplificador operacional de salida para voltajes DC.

El núcleo RMS es el encargado de realizar la conversión del valor RMS descrita por la ecuación 10 que se encuentra adelante en la sección 3.4.2; sin la necesidad de programación externa. Para aplicaciones sencillas se agregan un capacitor denominado promedio en la etapa de conversión intermedia (pin *CAVG*), con un valor que puede variar entre 100 μ F a 100 pF para frecuencias de 0,1 Hz a 1 MHz; también, un capacitor para corregir el factor de cresta (pin *CCF*); y finalmente, un capacitor en la etapa post conversión (pin *OUT*) que funciona como un filtro de reducción del *ripple* de la señal DC de salida.

Figura 21. Diagrama funcional del CI AD8436



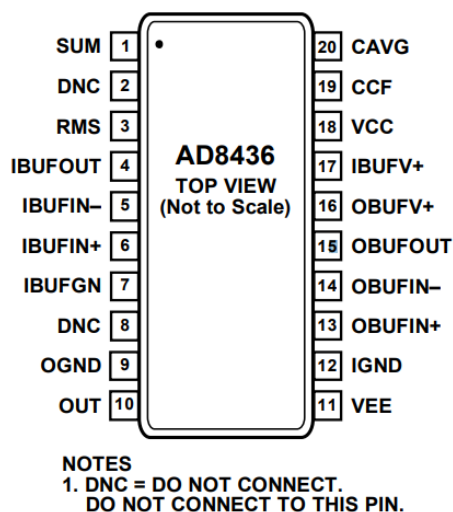
Fuente: Analog Devices. *Low Cost, Low Power, True RMS-to-DC Converter*.
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8436.pdf>.
 Consulta: 14 de junio de 2020.

El amplificador operacional de entrada tipo FET se puede utilizar para incorporar una etapa de alta impedancia, porque proporciona una interfaz para atenuadores externos, compensación de frecuencia o conducción a cargas de baja impedancia. Como se observa en la Figura 21, posee dos resistencias internas, estas resistencias combinadas permiten una ganancia doble o mayor. Esta característica permite que se pueda extender el rango de entrada a un valor más bajo de amplitud en las señales.

Por último, el *buffer* de precisión de salida de corriente directa se utiliza para minimizar los errores al manejar cargas de baja impedancia con voltajes de compensación extremadamente bajos, esto es debido a que cancela las corrientes de polarización interna. En otras palabras, se acopla a señales con amplitudes altas o bajas, de 100 μV a 3 V, sin ninguna escala externa, lo que facilita el acondicionamiento de la señal para todo el rango de entrada sin ningún recorte.

Las etapas mostradas en la Figura 21 son independientes según sea la aplicación se pueden interconectar para un diseño más robusto. El cálculo u obtención de los valores adecuados se pueden ver en las recomendaciones y graficas en la hoja de datos del fabricante. En la Figura 22 se observa que el circuito integrado consta de 20 terminales de conexión.

Figura 22. Configuración de los pines del CI AD8436



Fuente: Analog Devices. *Low Cost, Low Power, True RMS-to-DC Converter*.

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8436.pdf>

Consulta: 14 de junio de 2020. p. 5.

Se puede observar en la Tabla XIV la funcionalidad de cada uno de los pines del *CI AD8436*.

Tabla XIV. **Descripción de los pines del CI AD8436**

nro.	Nombre	Descripción
1	SUM	Terminal de entrada del amplificador sumador.
2,8	DNC	No se conecta.
3	RMS	Entrada AC para el núcleo RMS.
4	IBUFOUT	Terminal de salida del <i>buffer</i> de entrada tipo FET.
5	IBUFIN-	Terminal de la entrada inversora del <i>buffer</i> tipo FET.
6	IBUFIN+	Terminal de la entrada no inversora del <i>buffer</i> tipo FET.
7	IBUFGN	Resistencia de 10k opcional para ganancia de precisión.
9	OGND	Resistencia de 16k interna para conversión I a V.
10	OUT	Salida de voltaje o corriente del núcleo RMS.
11	VEE	Voltaje de alimentación negativo o GND.
12	IGND	Nodo de media alimentación.
13	OBUFIN+	Terminal de la entrada no inversora del <i>buffer</i> de salida.
14	OBUFIN-	Terminal de la entrada inversora del <i>buffer</i> de salida.
15	OBUFOUT	Terminal de salida del <i>buffer</i> de salida.
16	OBUFV+	Terminal de alimentación del <i>buffer</i> de salida.
17	IBUFV+	Terminal de alimentación del <i>buffer</i> de entrada tipo FET.
18	VCC	Voltaje de alimentación positivo del núcleo RMS.
19	CCF	Conexión del capacitor para el factor de cresta.
20	CAVG	Conexión del capacitor para el promedio de voltaje.

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020, con información de <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8436.pdf>.

Consulta: 14 de junio de 2020. p. 5.

El circuito integrado se escoge por ser el único que es capaz de calcular el valor RMS verdadero con la menor cantidad de componentes externos. También su alto rango dinámico de entrada permite su uso para señales de voltaje de línea de corriente alterna, con una etapa de escalada previa. Además, tiene un tiempo de establecimiento corto, que proporciona una respuesta rápida en señales de baja frecuencia de 60 Hz. Así también tiene la capacidad de funcionamiento con

una fuente de alimentación simple desde 4,8 V a 36 V, dependiendo de las amplitudes de la señal de entrada.

Por último, consta de dos amplificadores operacionales de acople de impedancia con amplias funcionalidades como escalamiento de la señal hasta la capacidad de configurar un filtro pasa bajos de segundo grado, con solamente agregar dos capacitores y dos resistencias externas.

3.3.3.4. Relé electromecánico de potencia HE1aN-P-DC6V-Y5

El HE1aN-P-DC6V-Y5 es un relé electromecánico de la industria³⁸, de una capacidad de 48 amperios para un voltaje nominal de 250 VAC. Tiene un tamaño compacto de L:33 x W:38 x H:36,3 mm, que puede ubicarse en una placa de circuito impreso con gran facilidad. Además, contribuye a un ahorro de energía debido al bajo consumo de la bobina de aproximadamente 1,92 W con un voltaje de 6 VDC y una corriente nominal de 320 mA.

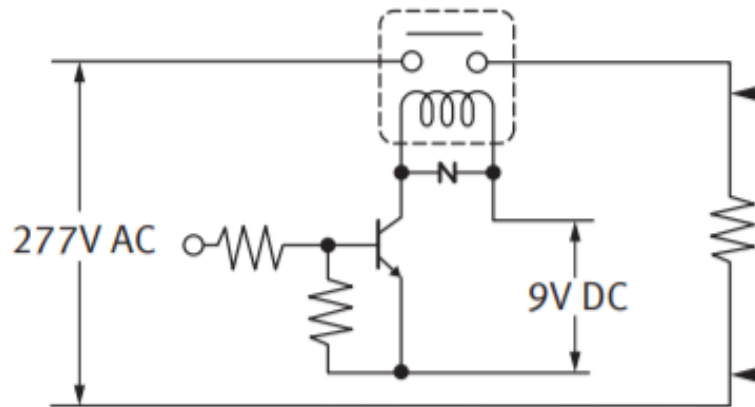
Posee algunas características que se enlistan a continuación:

- Alto aislamiento con un voltaje de ruptura por sobretensión de hasta 10 000V.
- Cumple el estándar internacional *VDE0126* para sistemas fotovoltaicos, que se aplica a los parámetros adecuados para la desconexión de inversores.

³⁸ Panasonic Industry. *HE Relays PV Type*. https://b2b-api.panasonic.eu/file_stream/pids/fileversion/276. Consulta: junio 2020.

- Tiene aplicaciones específicas en inversores solares, *UPS* o estaciones de carga.
- Tiene una velocidad máxima de operación de 6 veces por minuto a la capacidad nominal máxima.
- Tiene vida útil mínima de 30 000 ciclos (ON: OFF = 1s: 9s) a 85 grados centígrados con una carga de 48 A y 277 VAC.
- Funciona en óptimas condiciones con un factor de potencia mínimo de $\cos(\varphi) = 0,8$.

Figura 23. **Ejemplo de aplicación del relé HE1aN-P-9V DC-Y5**



Fuente: Panasonic. *HE Relays PV Type*. https://b2b-api.panasonic.eu/file_stream/pids/fileversion/276. Consulta: 14 de junio de 2020. p. 4.

En la Figura 23 se observa un ejemplo de aplicación del relé *HE1aN-P-9V DC-Y5*, este modelo energiza su bobina con un voltaje de 9 V, en cambio, el relé que se propone se energiza con un voltaje de 6V. El transistor *BJT* que se puede

ver en la Figura 23 funciona en corte y saturación controlado por una señal lógica de 0 a 3 V. Un voltaje alto satura el transistor, mientras que un voltaje bajo lo lleva a corte. Además, se muestra un diodo de retorno en las terminales de la bobina, este diodo, denominado *flyback*, sirve para proteger el transistor de los picos de voltaje que se producen por el cambio repentino o interrupción de la corriente a través de la bobina en el momento de una conmutación.

Se escoge este componente porque su aplicación es específica para desconexión de inversores solares y por su alta capacidad de corriente.

3.3.3.5. Aislador de salida de colector abierto Si8711AC-B

El circuito integrado Si8711AC-B de la marca Silicon Labs³⁹ es un reemplazo de un canal compatible con un opto acoplador popular que puede trabajar con hasta una velocidad de hasta 15 Mbps. Este dispositivo aísla las señales digitales de alta velocidad con un mayor rendimiento, confiabilidad y flexibilidad en contraste con un opto acoplador debido a su tecnología CMOS.

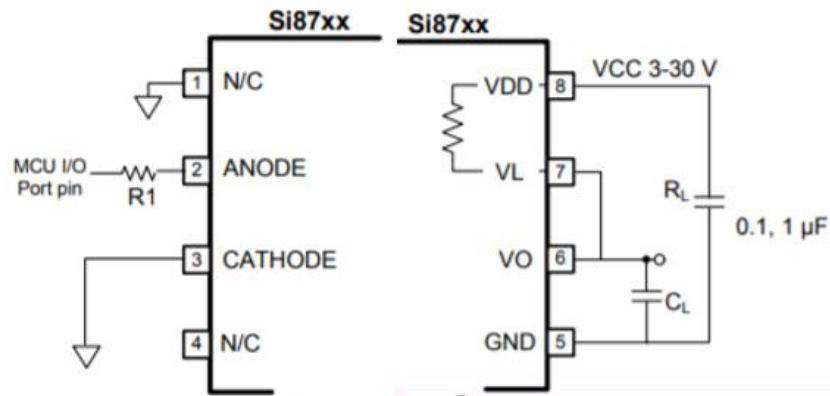
El circuito integrado es confiable porque brinda aislamiento estable en toda su vida útil con un tiempo medio de fallo de hasta 60 años; también es de menor consumo de potencia porque mejora el rendimiento a la mitad de la corriente; además es inmune al ruido en modo común transitorio (CMTI), porque tiene baja capacitancia de entrada; por último, su velocidad de conmutación es mucho mayor porque tiene un tiempo de propagación de la señal más corto.

³⁹ Silicon Labs. *5 KV LED emulator input, open collector output isolators*. <https://www.skyworksinc.com/-/media/Skyworks/SL/documents/public/data-sheets/Si87xx.pdf>. Consulta: junio 2020.

A continuación, se presentan algunas características:

- Resistente a cambios de temperatura.
- Voltaje de alimentación en el rango de 3 a 30 V
- Corriente máxima de alimentación 30 mA.
- 10 veces menor tasa de fallo para una mayor vida útil.
- Alta inmunidad a transientes: mayor a 50 kV/ms.
- Menor potencia y corriente en directa del diodo de entrada.
- Protección por sobrevoltaje de 10 kV.
- Alta velocidad de conmutación de 15 Mbps.
- Entre sus aplicaciones se pueden mencionar:
 - Automatización industrial, PLC
 - Control de motores y drivers.
 - Fuentes de alimentación aisladas.
 - Adquisición de datos.
 - Equipos de medición.

Figura 24. **Circuito de aplicación del CI Si8711AC-B**



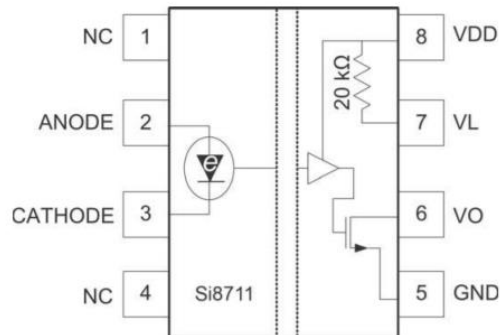
Fuente: Silicon Labs. *Circuito integrado aislador de colector abierto.*

<https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si87xx.pdf>. Consulta: 15 de junio de 2020. p. 17.

En la Figura 24 se muestra un circuito esquemático que representa la conexión del aislador capacitivo, donde su entrada está directamente conectada a un pin del microcontrolador con su salida conectada a un capacitor que representa la carga. Posee dos componentes extras como lo son un capacitor de 0.1 uF en la alimentación, y una resistencia para limitar la corriente de entrada. El modelo de aislador Si87xxA soporta una corriente de 3 a 15 mA en el pin indicado como Ánodo.

En la Figura 25 se observa que el circuito integrado consta de 8 terminales de conexión.

Figura 25. **Configuración de pines del CI Si8711AC-B**



Fuente: Silicon Labs. *Circuito integrado aislador de colector abierto.*

<https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si87xx.pdf>

Consulta: 15 de junio de 2020. p. 18.

Por lo que, se puede observar en la Tabla XV la funcionalidad de cada una de ellas:

Tabla XV. **Descripción de los pines del CI Si8711AC-B**

nro.	Nombre	Descripción
1,4	NC	No se conecta. Para maximizar la inmunidad al ruido estos pines se conectar al plano de tierra lógica.
2	ANODE	Terminal del ánodo del emulador led.
3	CATHODE	Terminal del cátodo del emulador led
5	GND	Terminal de conexión del <i>source</i> del MOSFET interno y referencia para el pin VDD.
6	VO	Terminal de la señal de salida.
7	VL	Terminal de la resistencia <i>pull-up</i> interna para la carga. Conectar a VO para habilitar la carga.
8	VDD	Terminal de alimentación positiva. (30 V máx.).

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Consulta en: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si87xx.pdf>

Consulta: 15 de junio de 2020.

Se escoge el circuito integrado porque tiene una alta capacidad de aislamiento, una alta velocidad de conmutación, además del bajo consumo de energía y porque son necesarios muy pocos componentes para su correcto funcionamiento, siendo adaptable para una señal de control por medio de un microcontrolador.

3.3.3.6. Microcontrolador MSP430FR2155

El microcontrolador MSP430FR2155 pertenece a la familia de microcontroladores MSP430FR235x, MSP430FR215x de la marca Texas Instruments, es de ultra baja potencia, de bajo costo, siendo específico para aplicaciones de sensado y medición de señales⁴⁰.

Algunas de las características relevantes se muestran a continuación:

- Tiene una arquitectura RISC con un reloj de hasta 24 Mhz.
- Soporta temperaturas de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Posee modos optimizados de bajo consumo con un máximo de $142\text{ }\mu\text{A}/\text{MHz}$.
- Tiene una memoria no volátil para programación con tecnología ferroeléctrica (*FRAM*) de 32 KB, la cual permite almacenar hasta 10^{15} ciclos de escritura y lectura.

⁴⁰ Texas Instruments. *MSP430FR235x, MSP430FR215x Mixed-Signal Microcontrollers*. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr2353.pdf?ts=1601830734811&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FMSP430FR2353. Consulta: julio 2020.

- Tiene una memoria volátil *SRAM* de 4 KB.
- Tiene 12 canales para conversión analógica digital (ADC) con capacidad de 12-bits por canal, con una velocidad de muestreo de 200 ksps con referencias internas de 1,5, 2,0 y 2,5 V.
- Posee 3 temporizadores de 16-bits, con 3 registros de comparación cada uno. Además 1 temporizador de 16-bits, con 7 registros de comparación.
- Tiene un temporizador en tiempo real (*RTC, Real Time Clock*) de 16 bits.
- Posee 2 módulos UART-SPI y 2 módulos SPI e I2C separados para comunicación digital.
- Soporta hasta 44 pines de entrada y salida.
- El encapsulado es de superficie de tipo *LQFP (Low Profile Quad Flat)*.
- Entre sus aplicaciones se puede utilizar para:
 - Sensores transmisores.
 - Acondicionamiento de señales de sensores.
 - Circuitos de interrupción.
 - Comunicaciones industriales cableados.
 - Manejo de paquetes de baterías (*battery-packs*).

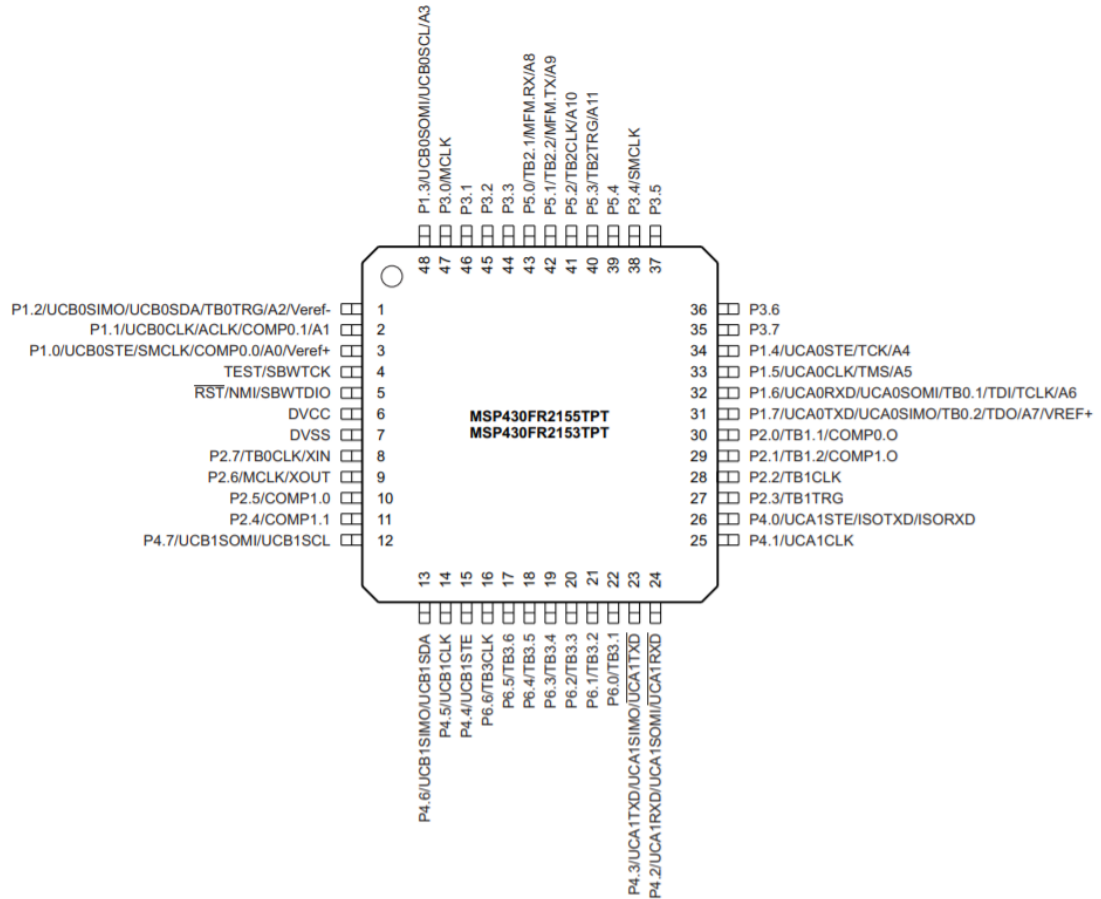
Como se observa entre las aplicaciones, el microcontrolador es adecuado para el dispositivo de parámetros energéticos. Además, se escoge entre toda la gama, porque cuenta con una plataforma de desarrollo y un software libre con librerías para programación.

El diagrama de la Figura 26 da a conocer el mapeo general de los pines del microcontrolador. Se puede notar que algunos pines poseen un propósito solamente, en cambio, la mayoría de los pines posee dos o más funcionalidades que son configurables por software. Se hace la aclaración que solo es posible utilizar una función a la vez, en cada pin. Aunque se puede realizar el cambio de la función en cada pin por software en cualquier momento, de manera general se mantienen sin variación durante su uso.

El encapsulado escogido es *LQFP (Low-profile Quad Flat)*, de 48 pines, en la Figura 26 se observa que al final del nombre ubicado en el centro del microcontrolador se agregan las letras *TPT*, ésta es una nomenclatura interna del fabricante.

Se escoge este microcontrolador porque ofrece la cantidad de entradas analógicas necesarias, con una resolución elevada. Así también es posible que pueda comunicarse con otro microcontrolador por medio de UART, para mantener el control centralizado, pero con las señales analógicas separadas del microcontrolador central. Esto con el fin de mantener en aislamiento los circuitos de entrada; y ofreciendo una aplicación escalable del dispositivo, en caso fuera necesario. Además, tiene una capacidad suficiente de memoria no volátil, la cual es útil para almacenar el firmware en lenguaje C de manera amplia.

Figura 26. Diagrama esquemático del microcontrolador MSP430FR2155



Fuente: Texas Instruments. *MSP430FR235x, MSP430FR215x Mixed-Signal Microcontrollers*.
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr2353.pdf?ts=1601830734811&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FMSP430FR2353

Consulta: 07 de julio de 2020. p. 10.

3.3.3.7. Aislador digital ISO7721

El circuito integrado ISO7721 es un aislador digital de alta velocidad de doble canal. Provee una capacidad de inmunidad a emisiones electromagnéticas altas, con un consumo de potencia mínimo. Tiene una barrera capacitiva de dióxido de silicio en su interior capaz de soportar voltajes de al menos 1,5 kV_{rms} ⁴¹.

A continuación, se enumeran unas de sus cualidades:

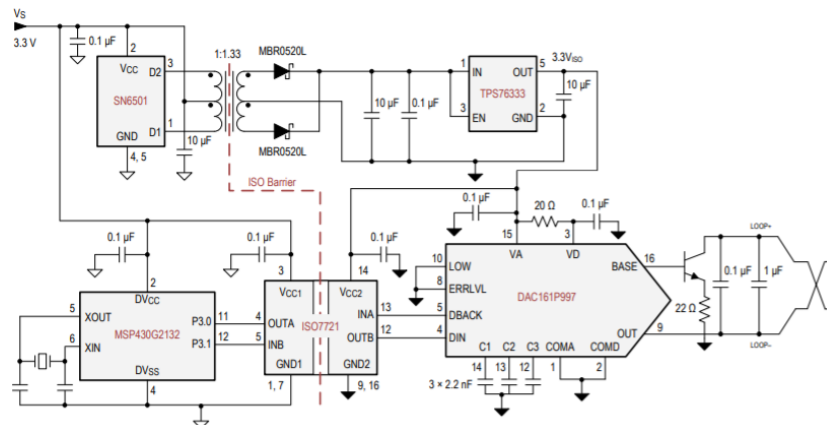
- Velocidad de transmisión de 100 Mbps.
- Barrera de aislamiento de hasta 5 000 V_{rms} .
- Rango de voltaje de alimentación de 2,25 a 5,5 V.
- Consumo de potencia típico de 1,7 mA por canal.
- Compatibilidad electromagnética según norma IEC 61000-4-2.
- Encapsulado tipo *SOIC (Small Outline Integrated Circuit)* de 8 pines.
- Sus aplicaciones son las siguientes:
 - Automatización industrial.

⁴¹ Texas Instruments. *ISO772x High-Speed, Robust EMC, Reinforced and Basic Dual-Channel Digital Isolators*. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso7721.pdf?ts=1602137213004&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FISO7721. Consulta: julio 2020.

- Control de motores.
- Fuentes de alimentación.
- Inversores solares.
- Equipo médico.

En la Figura 27 se observa un circuito de aplicación para un convertidor digital a analógico. El circuito integrado es capaz de permitir un aislamiento para la transmisión de señales bidireccionales, ya sea por comunicación: UART, RS485, RS432, I2C, o SPI. Su funcionamiento está acompañado de una fuente de alimentación aislada por transformador, que se presenta en la sección siguiente.

Figura 27. **Circuito de aplicación del CI ISO7721**



Fuente: Texas Instruments. *ISO772x High-Speed, Robust EMC, Reinforced and Basic Dual-Channel Digital Isolators datasheet (Rev. E).*

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso7721.pdf>?ts=1602137213004&ref_url=https%25A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FISO7721. Consulta: 07 de julio de 2020. p. 22.

Se observa en la Figura 27 que se debe colocar una alimentación separada para cada etapa del circuito, $VCC1$ está directamente conectada a 3,3V, a su vez, $VCC2$, está conectada a la salida del regulador de voltaje TPS7633, de 3,3V. También, la conexión de referencia de cada circuito es diferente, porque el ISO7721 se encarga de separarlas.

El ISO7721 se escoge para el dispositivo de monitoreo por su relación precio-funcionalidad, es económico, siendo único en el mercado. Su desarrollo es reciente, con una aplicación para comunicación de señales digitales de alta velocidad es un beneficio para la aplicación. Es versátil en cuanto a que se puede transmitir de manera bidireccional utilizando un mismo encapsulado. Su voltaje de alimentación es estándar para utilizar con un microcontrolador, y, por lo tanto, el consumo de corriente es muy bajo.

3.3.3.8. Controlador de transformador para fuentes de alimentación aisladas SN6501

El circuito integrado SN6501 es un controlador diseñado específicamente para aislar la fuente de alimentación en aplicaciones que involucran una interfaz de comunicación. Utiliza un transformador con toma central de perfil bajo que es alimentado con 3,3 V o 5 V. El secundario del transformador tiene un devanado que proporciona un voltaje aislado con base en la relación de vueltas⁴².

Algunas de las características fundamentales del controlador son:

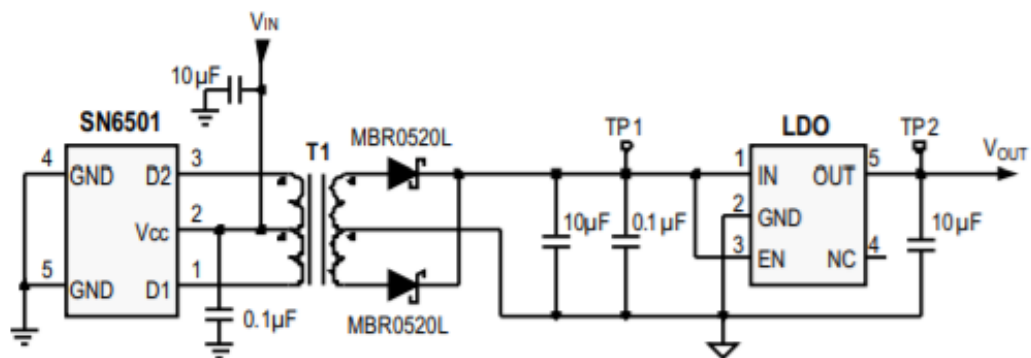
- Fuente de alimentación de 3,3 V o 5 V.

⁴² Texas Instruments. *SN6501 Transformer Driver for Isolated Power Supplies*. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn6501.pdf?ts=1602129743851&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FSN6501%253FkeyMatch%253DSN6501%2526tisearch%253DSearch-EN-everything%2526usecase%253DGPN. Consulta: julio 2020.

- Corriente de salida para el primario de 350 mA para 5 V y 150 mA para 3,3 V.
- Tiene un ripple pequeño lo que permite capacitores de salida pequeños.
- Encapsulado SOT-23

La Figura 28, se muestra un ejemplo de aplicación del controlador. En ella se observa la conexión directa hacia el transformador, el cual se encarga de convertir un voltaje de entrada de 3,3 V a un voltaje de salida de 5 V. De manera continua, el voltaje que ha sido convertido atraviesa un regulador de voltaje de tipo LDO que permite una salida de voltaje estable y en corriente directa. Se observa que su función principal es aislar las conexiones de tierra, manteniendo la regulación del voltaje con base en la relación de vueltas del transformador.

Figura 28. **Circuito de aplicación del controlador SN6501**



Fuente: Texas Instruments. *SN6501 Transformer Driver for Isolated Power Supplies.*

https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn6501.pdf?ts=1602129743851&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Fsn6501%253FkeyMatch%253DSN6501%2526tisearch%253DSearch-EN-everything%2526usecase%253DGPN

Consulta: 07 de octubre de 2020. p. 16.

El circuito de la Figura 28 tiene la función específica de aislar la alimentación para el microcontrolador MSP430FR2155 y el circuito integrado ISO-7721, por lo que se escoge para el diseño.

3.3.3.9. Microcontrolador MSP430FR2476

El microcontrolador MSP430FR2476 pertenece a la familia de microcontroladores MSP430FR247x de la marca Texas Instruments, es de ultra baja potencia, de bajo costo, y específico para aplicaciones de sensado industriales⁴³.

Algunas de las características relevantes se muestran a continuación:

- Tiene una arquitectura *RISC (Reduced Instruction Set Computer)* con un reloj de hasta 16 Mhz.
- Posee modos optimizados de bajo consumo con un máximo de $135 \mu A / MHz$.
- Tiene una memoria no volátil para programación con tecnología ferroeléctrica (*FRAM*) de 64 KB, la cual permite almacenar hasta 10^{15} ciclos de escritura y lectura.
- Tiene una memoria volátil *SRAM* de 8KB.

⁴³ Texas Instruments. *MSP430FR247x Mixed-Signal Microcontrollers*. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr2476.pdf?ts=1603930752228&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FMSP430FR2476%253FkeyMatch%253DMSP430FR2476%2526tsearch%253DSearch-EN-everything%2526usecase%253DGPN. Consulta: julio 2020.

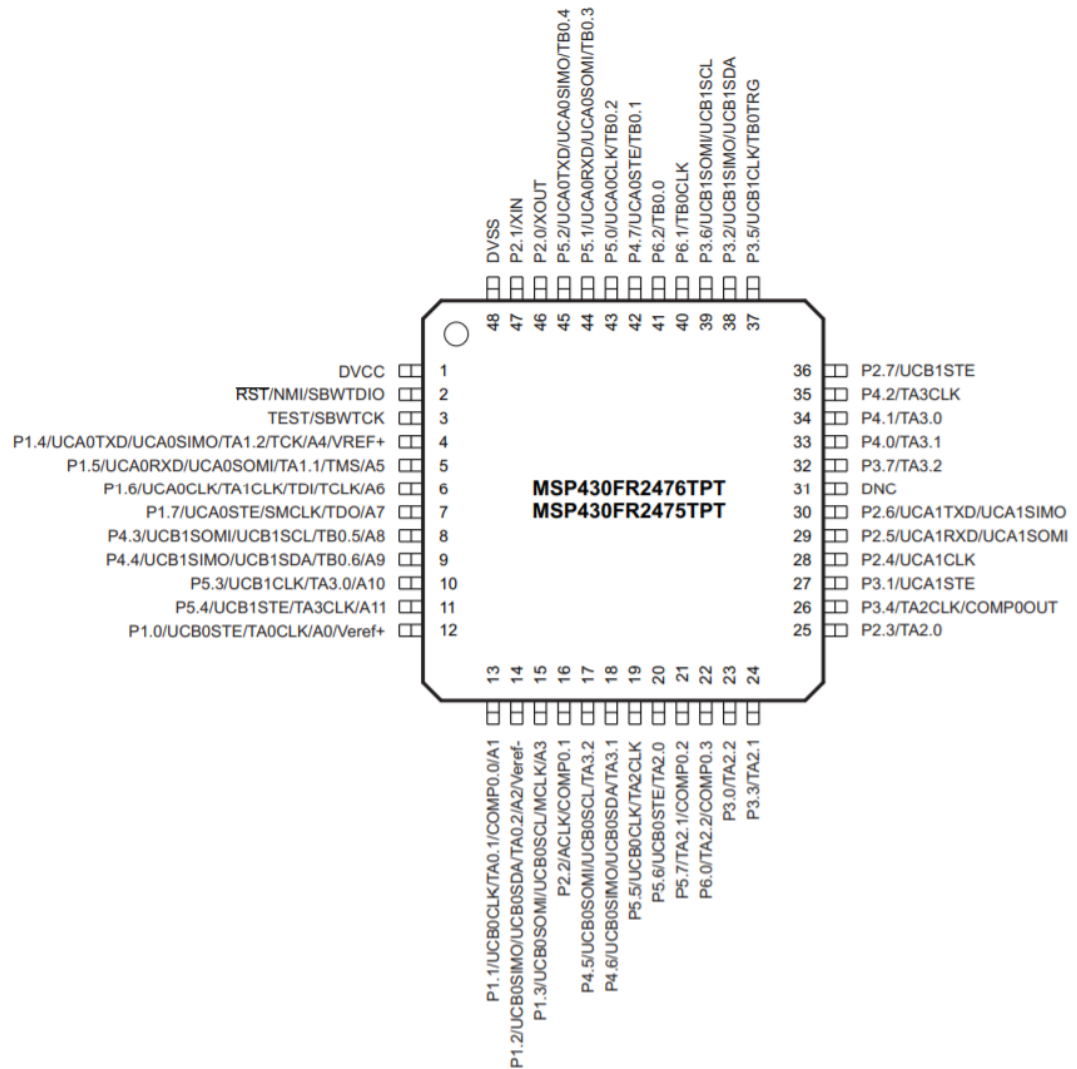
- Tiene 12 canales para conversión analógica digital (ADC) con capacidad de 12-bits por canal, con una velocidad de muestreo de 200 ksps y referencias internas de 1,5, 2,0 o 2,5 V.
- Posee 4 temporizadores de 16-bits, con 3 registros de captura cada uno. Además 1 temporizador de 16-bits, con 7 registros de captura.
- Tiene un temporizador en tiempo real (*RTC*) de 16 bits.
- Posee 2 módulos UART-SPI, 2 módulos SPI e I2C separados para comunicación digital.
- Soporta hasta 43 pines de entrada y salida y encapsulados de superficie tipo *LQFP*.
- Entre sus aplicaciones se puede utilizar para:
 - Sensores industriales de factor pequeño.
 - Aplicaciones médicas, de salud y de entrenamiento de bajo consumo.
 - Sistema digital de punto de venta electrónico (*EPOS*).
 - Termostatos.
 - Manejo de paquetes de baterías (*battery-packs*).
 - Accesorios de computadoras.

Se escoge entre todos los microcontroladores disponibles porque tiene disponible una plataforma de desarrollo con un software libre con librerías para programación. A diferencia del microcontrolador MSP430FR2155, éste contiene más memoria interna para guardar información, tiene la capacidad de almacenar un firmware con mayor cantidad de líneas de código, y también, tiene una memoria volátil del doble de tamaño (8 KB), lo que permite realizar las instrucciones rápidamente en cada función programada. El consumo de corriente es levemente menor, respecto del otro microcontrolador.

El diagrama de la Figura 29 muestra el mapeo general de todos los pines del MSP430FR2476. Se observa que por cada pin se pueden programar una función específica a la vez. El encapsulado escogido es *LQFP (Low-profile Quad Flat)*, de 48 pines, en la Figura 29 se observa que al final del nombre en el centro del microcontrolador se agregan las letras *TPT*, ésta es una nomenclatura interna del fabricante.

Es posible la comunicación con dos canales UART y un canal I2C, prestaciones suficientes para la aplicación del dispositivo de monitoreo.

Figura 29. Diagrama esquemático del microcontrolador MSP430FR2476



Fuente: Texas Instruments. *MSP430FR247x Mixed-Signal Microcontrollers datasheet (Rev. B)*.
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr2476.pdf?ts=1603814187575&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FMSP430FR2476%253FkeyMatch%253DMSP430FR2476%2526tsearch%253DSearch-EN-everything%2526usecase%253DGPN

Consulta: 28 de julio de 2020. p. 8.

3.4. Teoría de diseño del dispositivo

En las siguientes subsecciones se presentan algunos temas útiles para el diseño del dispositivo de monitoreo de parámetros eléctricos.

3.4.1. Operación en la adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos digital contiene los elementos que se muestran en la Figura 30. Un sistema digital incluye: manipulación, medición, acondicionamiento y conversión de las señales analógicas, manejo de datos digitales, programación o control interno.

Figura 30. Elementos de un sistema de adquisición de datos digital



Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

La función de cada elemento del sistema de la Figura 30 se describe a continuación:

- Transductor: transforma parámetros físicos en señales eléctricas para el sistema de adquisición. También se pueden medir directamente cantidades eléctricas, como voltaje, resistencia, o frecuencia.
- Acondicionador de señal: incluye los circuitos de soporte para el transductor, que pueden proporcionar la energía, o elementos de calibración.

- Convertidor de señal: transforma la señal analógica en magnitud o fase para el convertidor analógico-digital. En este punto se distingue un divisor de voltaje o un amplificador de voltaje.
- Conversión analógico-digital (*A/D*): convierte el voltaje analógico a un valor digital, que es equivalente. La salida del convertidor *A/D* es un voltaje en pasos discretos para procesamiento posterior.
- Sistema programador: recibe la señal digital y manipula la información binaria para mostrar el resultado en una pantalla, o bien, se realiza un control interno.

3.4.2. Valor RMS verdadero (*True RMS*) de una señal en corriente alterna

El valor *True RMS* (*root mean square*, por sus siglas en inglés) o valor raíz cuadrada media verdadero de una forma de onda en corriente alterna es igual al valor en corriente directa que proporciona la misma potencia a una carga. El valor RMS es la única métrica que es equivalente para todas las formas de onda.

El valor RMS se entiende como la raíz cuadrada del promedio de la suma de los cuadrados de los valores pico de cualquier forma de onda. Se define con la siguiente ecuación⁴⁴:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (\text{Ecuación 9})$$

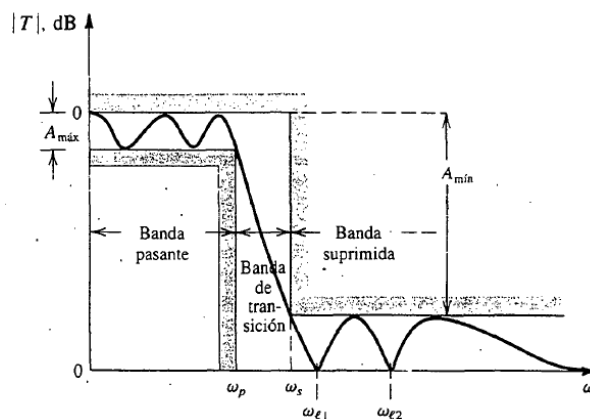
⁴⁴ Analog Devices. *RMS to DC Conversion Application Guide*. https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/RMStoDC_Cover-Section-I.pdf?doc=AD8436.pdf. Consulta: julio 2020.

3.4.3. Filtros analógicos *Butterworth*

Según Sedra y Smith⁴⁵, un filtro *Butterworth* define una función matemática que se utiliza para aproximar las curvas características de transmisión de filtros de paso bajo. Estas funciones tienen la ventaja de que tienen expresiones analíticas para sus parámetros, que se pueden usar en el diseño de filtros sin necesidad de computadoras o tablas de diseño. Sus aplicaciones son limitadas y sencillas.

También menciona que el filtro *Butterworth* tiene una transmisión que decrece en forma monótona con todos sus ceros de transmisión a una frecuencia cercana al infinito. Esto quiere decir que, las curvas características de la señal de entrada se modifican de forma tal que, la magnitud de la señal se acerca a un valor de cero, cuando la frecuencia aumenta en el eje de las abscisas.

Figura 31. Características de transmisión de un filtro pasa bajos



Fuente: SEDRA, Adel. *Circuitos microelectrónicos*. p. 887.

⁴⁵ SEDRA, Adel; SMITH, Kenneth. *Circuitos Microelectronicos*. p. 906.

En la Figura 31, se puede observar la respuesta de un filtro pasa bajas, con una oscilación máxima en la banda pasante, denominada A_{max} . Los filtros Butterworth se conocen por tener una respuesta plana en la banda pasante, pero para ello se debe aumentar el orden del filtro, N .

3.4.3.1. Magnitud, variación en transmisión y orden del filtro *Butterworth*

La función de magnitud que define un filtro Butterworth de orden n -ésimo con una frecuencia de banda pasante, ω_p , está dado por:

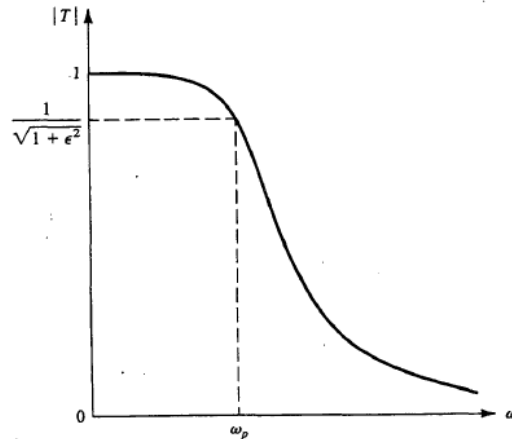
$$|T(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2N}}}, \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Donde:

- $|T(j\omega)|$ es la función de magnitud del filtro Butterworth.
- ε es el parámetro que determina la variación en transmisión de banda pasante.
- N es el orden del filtro.
- ω_p es la frecuencia de banda pasante.

La figura 33 muestra la respuesta del filtro que corresponde a la ecuación 10. Se observan que cuando $\omega = \omega_p$, entonces la magnitud es igual a $|T(j\omega_p)| = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2}}$. El parámetro ε , puede variar entre 0 y 1, sirve para determinar cuál es la variación máxima en la banda pasante del filtro. Esto quiere decir que, la respuesta en magnitud del filtro tiene un límite máximo de $\frac{1}{\sqrt{2}}$.

Figura 32. Respuesta en magnitud de un filtro *Butterworth*



Fuente: SEDRA, Adel. *Circuitos microelectrónicos*. p. 893.

El límite en frecuencia de la banda pasante sucede cuando $\omega = \omega_p$, como se observa en la Figura 32, si en esta frecuencia se obtiene el logaritmo de la ecuación 11, entonces la variación máxima en transmisión de banda pasante, A_{max} , se define como:

$$A_{max} = 20 \log \sqrt{1 + \varepsilon^2} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

A_{max} es la oscilación máxima en banda pasante

ε es el parámetro que determina la variación en transmisión de banda pasante.

Se hace la aclaración que A_{max} es negativo, pero en la ecuación 11 se coloca con signo positivo; esto se debe que la gráfica de magnitud $|T(j\omega_p)|$ del filtro en decibeles (ver Figura 32), se parte del valor 0 hacia valores negativos.

En el diseño de filtros *Butterworth*, A_{max} , es un valor numérico dado como parámetro inicial por el diseñador, y la variable a encontrar es el parámetro ε .

El orden de un filtro *Butterworth* es: “el valor mínimo entero de N , que produce $A(\omega_s) \geq A_{min}$ ”⁴⁶. Para ello se obtiene directamente el logaritmo de la ecuación 10, y se sustituye $\omega = \omega_s$, donde ω_s representa la frecuencia de la banda suprimida, como se muestra en la Figura 32. Para tal efecto, se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_{min} = A(\omega_s) = \log|T(j\omega_s)| = \log \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega_s}{\omega_p}\right)^{2N}}} \right]$$

$$A_{min} = 20 \log [1] - 20 \log \left[\sqrt{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega_s}{\omega_p}\right)^{2N}} \right]$$

$$A_{min} = 10 \log \left[1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega_s}{\omega_p}\right)^{2N} \right] \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

- A_{min} es la atenuación logarítmica en la banda suprimida.
- ε es el parámetro que determina la variación en transmisión de banda pasante.
- ω_s es la frecuencia de banda suprimida.
- ω_p es la frecuencia de banda pasante.

⁴⁶ SEDRA, Adel. *Circuitos microelectrónicos*. p. 893.

La definición del orden del filtro indica que existe un valor entero de N , que se obtiene de la resolución de la ecuación 12, cuando la magnitud de la señal de entrada se atenúa hasta un valor mínimo $A(\omega_s)$, dado en decibeles, y alcanza la banda suprimida ω_s . Entonces, se define el valor mínimo de la función del filtro para la banda suprimida como $A(\omega_s) = A_{min}$.

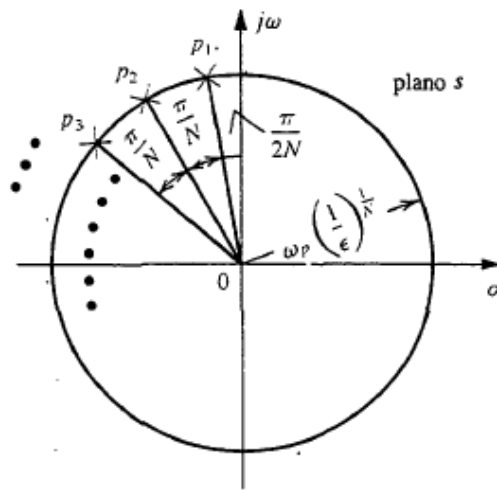
En la ecuación 12, también se hace la aclaración que A_{min} es negativo, pero se coloca con signo positivo, porque en la gráfica de magnitud $|T(j\omega_p)|$ del filtro en decibeles (Figura 32), se parte del valor 0 hacia valores negativos. En el diseño de filtros *Butterworth*, A_{min} , es un valor numérico dado como parámetro inicial por el diseñador, y la variable a encontrar es N .

3.4.3.2. Modos naturales del filtro *Butterworth*

Los modos naturales o polos, es el nombre que se da al denominador de la función de transferencia de un filtro.

De la ecuación 10, podemos deducir que los modos naturales de la función del filtro *Butterworth* están localizados en un círculo de radio $\omega_p(1/\varepsilon)^{1/N}$, y espaciados por ángulos iguales a π/N , con el primero modo a un ángulo de $2\pi/N$ del eje $+j\omega$, como se muestra en la Figura 33. Como todos los polos tienen la misma distancia radial desde el origen, quiere decir que, tienen la misma frecuencia $\omega_0 = \omega_p(1/\varepsilon)^{1/N}$.

Figura 33. **Gráfica para determinar los polos de un filtro *Butterworth* de orden N**



Fuente: SEDRA, Adel. Circuitos microelectrónicos. p. 895.

La misma figura muestra el caso general para definir los polos de un filtro Butterworth, p_1, p_2, \dots, p_N . Una vez obtenidos los modos naturales, se puede construir la función de transferencia definida a continuación:

$$T(s) = \frac{K \omega_0^N}{(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_N)} \quad \text{(Ecuación 13)}$$

Donde:

$T(s)$ es la función de transferencia en el plano s .

K es la ganancia de corriente directa requerida del filtro.

ω_0 es igual $\omega_p(1/\epsilon)^{1/N}$.

p_N son los modos naturales del filtro.

s es la traslación en el plano s que es igual $j\omega$, con ω , como la frecuencia de entrada.

Al encontrar la función de transferencia del filtro *Butterworth* de segundo orden normalizada se debe expresar de la siguiente forma:

$$T(s) = \frac{\omega_o^2}{s^2 + \frac{\omega_o}{Q}s + \omega_o^2}, \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

- $T(s)$ es la función de transferencia en el plano s .
- K es la ganancia de corriente directa requerida del filtro.
- ω_o es igual $\omega_p(1/\varepsilon)^{1/N}$, con ω_p la frecuencia angular de banda pasante.
- Q es el factor de calidad del polo.

3.4.4. Topología *Sallen-Key* de segundo orden

La topología *Sallen-Key* es un filtro eléctrico activo de segundo orden estudiado en 1955 por R.P. Sallen and E. L. Key, que principalmente es de ganancia positiva⁴⁷. La topología del circuito se observa en la Figura 34.

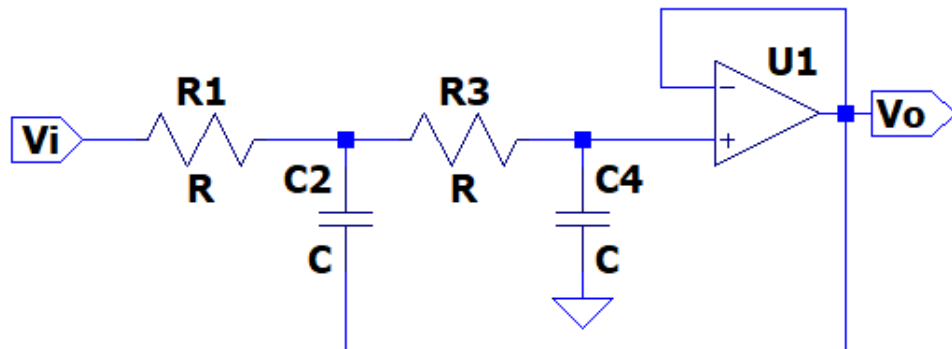
Según el mismo reporte de aplicación la operación del filtro puede ser descrita de forma cualitativa de la manera siguiente:

- A bajas frecuencias, donde la reactancia de los capacitores es muy alta, entonces, C_2 y C_4 aparecen como circuitos abiertos, la señal simplemente se transmite a la salida.

⁴⁷ Texas Instruments. *Analysis of the Sallen-Key Architecture*. https://www.ti.com/lit/an/sloa024b/sloa024b.pdf?ts=1601150727216&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Consulta: agosto 2020.

- A altas frecuencias, donde la reactancia capacitiva es muy baja, entonces, C_2 y C_4 aparecen como cortocircuitos, la señal se deriva a tierra en la entrada del amplificador. El amplificador amplifica la entrada a la salida y la señal no aparece en V_o , porque ha sido atenuada totalmente.
- Cerca de la frecuencia de corte, donde C_2 y C_4 , están en el mismo orden que R_1 y R_3 , la retroalimentación positiva a través de C_2 , atenúa la señal dada por el factor de calidad.

Figura 34. Topología **Sallen-Key** de segundo orden ganancia unitaria



Fuente: elaboración propia, empleando LTspice versión XVII, 2020.

Al realizar el análisis del circuito de la Figura 34, se obtiene la función de transferencia de un filtro con topología Sallen-Key, la cual es de la forma siguiente:

$$T(s) = \frac{K}{R_1 R_3 C_2 C_4} \frac{1}{s^2 + \left(\frac{1}{R_3 C_4} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_3 C_2} - \frac{K}{R_3 C_4} \right) s + \frac{1}{R_1 R_3 C_2 C_4}}$$

Al comparar con la función de transferencia para un filtro de segundo orden de la ecuación 14, se obtienen las constantes siguientes:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_3 C_2 C_4}}, \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$\frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{R_3 C_4}{R_1 C_2}} + \sqrt{\frac{R_1 C_4}{R_3 C_2}} + (1 - K) \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_3 C_4}}, \quad (\text{Ecuación 16})$$

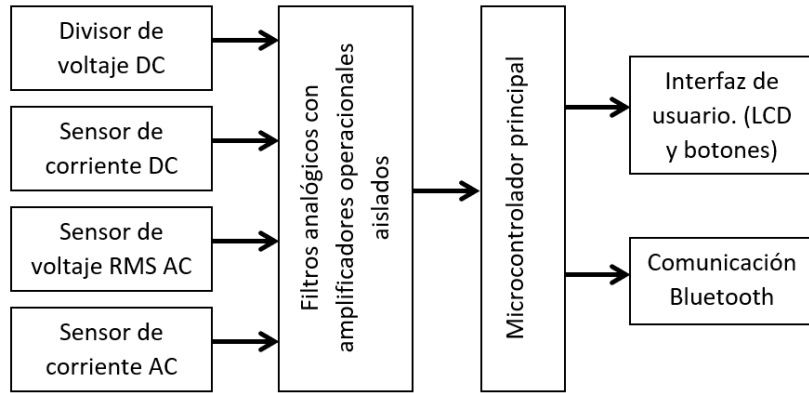
Estas ecuaciones se utilizan en una sección siguiente para el diseño del filtro de segundo orden.

3.4.5. Modelos de conexión de la interfaz de entrada

Un circuito de adquisición de datos se debe conectar a un ramal de voltaje o corriente de alta potencia con la característica de poseer una funcionalidad de aislamiento de las señales. Se presentan dos modelos de conexión del circuito electrónico, explicando la elección, ventajas y desventajas de cada uno.

El primero modelo se muestra en la Figura 35, éste consta principalmente de una etapa intermedia de acondicionamiento de señal compuesta de filtros analógicos pasa bajos con amplificadores operacionales aisladores que se conectan directamente al microcontrolador principal, encargado de toda la lógica de control digital, y de la toma de muestras por medio de un convertido analógico-digital (ADC).

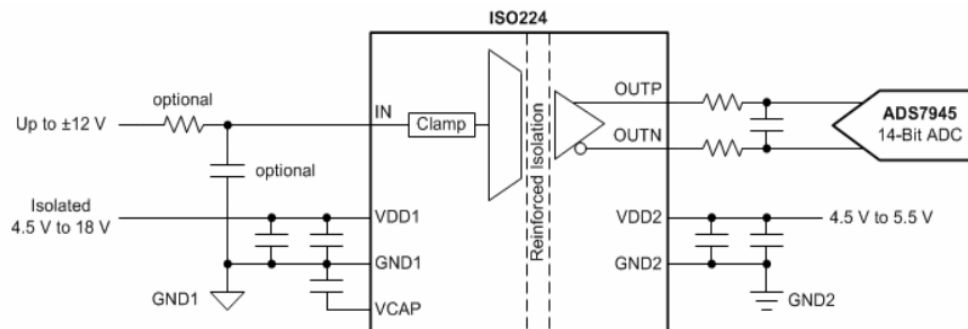
Figura 35. **Modelo de conexión con amplificadores analógicos aislados**



Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Los amplificadores aislados son circuitos integrados que poseen una barrera con una alta inmunidad a interferencias magnéticas que proveen aislamiento galvánico de hasta 5 kVrms, con una larga vida y disipación baja de potencia. En la Figura 36 se muestra un amplificador de este tipo.

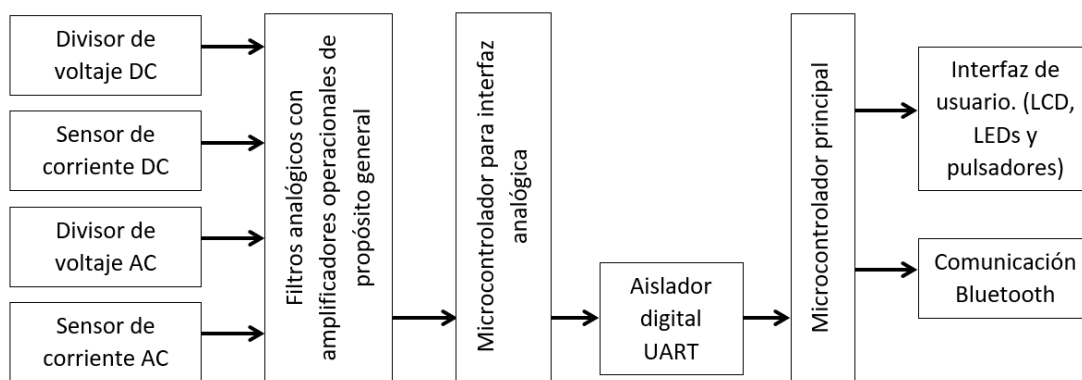
Figura 36. **Amplificador operacional aislado ISO224**



Fuente: Texas Instruments. *Reinforced isolated amplifier for voltage sensing with ±12-V input*
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso224.pdf?ts=1634128852528&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Consulta: 13 de septiembre de 2020. p. 1.

La desventaja del amplificador operacional aislado es su elevado precio unitario. Aunque es la mejor opción por su funcionalidad; para fines de este trabajo, se opta por un modelo diferente que consta de componentes más económicos.

Figura 37. **Modelo de conexión con aislador digital**



Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

La Figura 37 muestra el diagrama de bloques del modelo de conexión con aislador digital. En él, se observa el acondicionamiento de la señal por medio de filtros analógicos con amplificadores operacionales de propósito general, y la adquisición de datos por medio de un microcontrolador de bajo costo. El aislamiento de las señales del circuito principal es digital por comunicación UART, utilizando un circuito integrado aislador.

La ventaja de utilizar este aislador es que su precio unitario es 85% más económico respecto al ISO224, con capacidades de aislamiento similares, y para señales digitales de hasta 100 Mbps de velocidad. Además, por el modelo de conexión que se escoge solamente es necesario utilizar un circuito integrado de este tipo. A pesar de que se agrega un microcontrolador como interfaz analógica,

el precio del sistema seguirá siendo mucho menor respecto al modelo anterior. En la sección 3.3.3 se describe cada uno de los componentes principales del diagrama de la Figura 37.

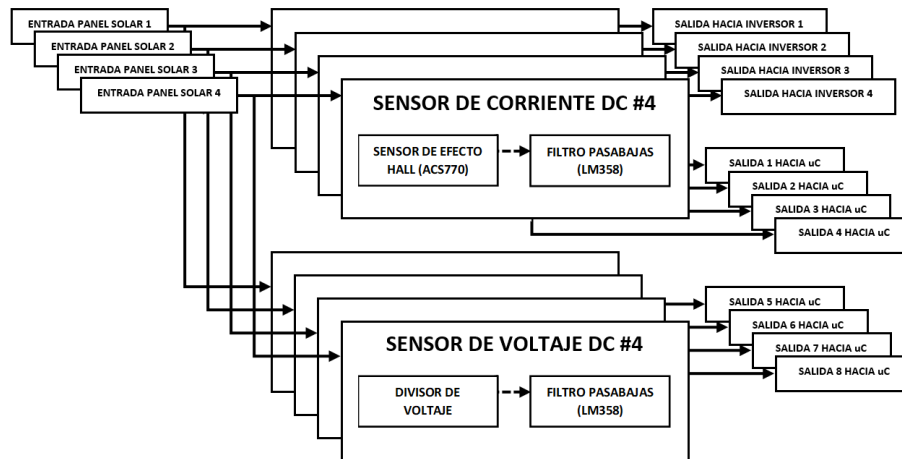
3.5. Diseño de los circuitos esquemáticos del dispositivo

En la siguiente sección se presenta el análisis de cada circuito electrónico incluido en el dispositivo de monitoreo de parámetros eléctricos. El diseño se divide en 3 etapas: la primera es la interfaz analógica de entrada, la segunda es la unidad de digitalización y control; la tercera es la interfaz de potencia. Los circuitos se presentan de acuerdo con estas tres etapas de manera consecutiva en las siguientes subsecciones.

3.5.1. Interfaz analógica de entrada

Para el diseño de la interfaz analógica se parte del modelo definido en la Figura 37, en la sección 3.4.5., junto al resumen de los componentes de las subsecciones 3.3.3.1 a 3.3.3.3. En las subsecciones siguientes se explica con mayor detalle los primeros dos bloques del modelo. Cabe mencionar que, para el funcionamiento de los circuitos integrados de todos los sensores, presentados a continuación (DC y AC) se utiliza una fuente de alimentación de 5 VDC. En las siguientes líneas se presenta esta interfaz de manera general.

Figura 38. **Conexión de los sensores DC**



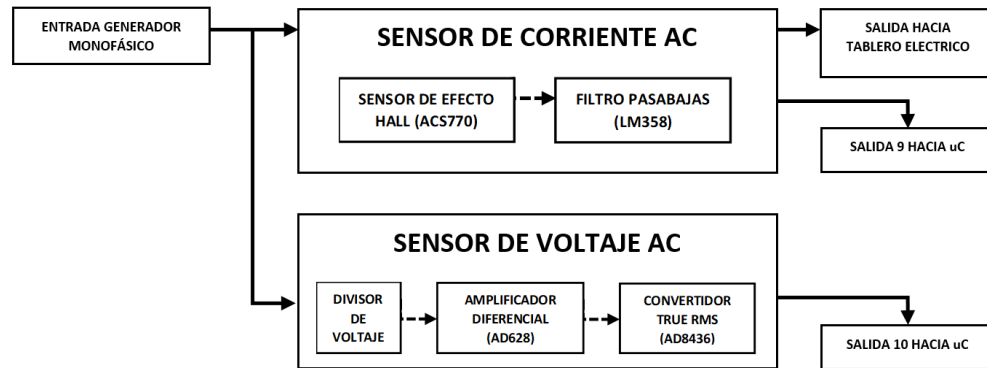
Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

El diagrama de la Figura 38 indica la conexión de los sensores en corriente directa. Se muestran dos bloques que se repiten cuatro veces cada uno. Para cada par de bloques se tienen una entrada y tres salidas. La entrada es la conexión de la terminal negativa del último módulo fotovoltaico de la cadena de 10 paneles solares. También cuenta con tres salidas; la primera es la conexión de la terminal positiva de entrada del inversor; las restantes son dos salidas analógicas, una por cada sensor, dirigidas hacia un microcontrolador.

Si el inversor propuesto en el segundo capítulo es cambiado, entonces se debe de contemplar otros criterios de diseño, como voltajes y corrientes nominales. Por lo que, el diseño de los componentes de esta sección se dimensiona para la potencia requerida en el capítulo 2 de este trabajo.

En las subsecciones siguientes se explica el diseño solamente para un par de bloques (sensores de voltaje y corriente), debido a que los circuitos se replican idénticamente para los restantes tres pares de bloques.

Figura 39. **Conexión de los sensores AC**



Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

En la Figura 39, se presenta el diagrama de conexión de los sensores en corriente alterna. De la misma manera que en corriente directa se cuenta con una entrada y tres salidas. Sin embargo, en este caso en particular se observan dos bloques en lugar de ocho. El primer bloque corresponde al sensor de corriente conectado en serie con un generador monofásico de onda senoidal pura de 120 V_{rms} a 60 Hz; con una de sus salidas conectada directamente hacia un tablero eléctrico; además este bloque tiene una salida que representa una señal analógica que es proporcional a la corriente eléctrica que suministra el generador.

El bloque del sensor de voltaje tiene una entrada conectada en paralelo a la línea de 120 V_{rms} , y como resultado, su salida es una señal analógica proporcional al voltaje true rms leído, que está directamente conectada hacia un microcontrolador.

3.5.1.1. Sensores de corriente

Los componentes del sensor de corriente de esta sección funcionan como transductor, acondicionador y convertidor de señal. El proceso de diseño del sensor de corriente se realiza en el orden siguiente: primero, se presenta la ecuación del error total de salida del sensor con su explicación. Luego se explica la ecuación de conversión del ADC para la medición de corriente; por último, se presentan las aplicaciones del sensor para el sistema fotovoltaico híbrido, junto a las descripciones de cada circuito electrónico.

3.5.1.1.1. Error total de salida

El error total de salida se refiere a la máxima desviación del voltaje de salida actual, respecto a su valor ideal, también conocido como exactitud. Como bien se puede obtener en la hoja de datos del sensor de corriente⁴⁸ en su página número 21, la ecuación del error de salida para el sensor ACS770xCB, sin importar la capacidad de corriente es la siguiente:

$$E_{TOT(I_P)} = \left(\frac{V_{IOUT(I_P)} - V_{IOUT_IDEAL(I_P)}}{Sens_{IDEAL} \times I_P} \right) * 100 \% \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

$V_{IOUT(I_P)}$	es el voltaje de salida del sensor, en V.
$V_{IOUT_IDEAL(I_P)}$	es el voltaje de salida ideal, en V.
$Sens_{IDEAL}$	es la sensibilidad del sensor, en mV/A.
I_P	es la corriente medida, en A.

⁴⁸ Allegro Microsystems. Op. Cit. p. 21.

En la ecuación 17 se observa el error total como una medida de la exactitud del sensor. Esta medida simplemente muestra la diferencia entre el voltaje real y el ideal, en porcentaje, donde $V_{IOUT_IDEAL(I_P)}$, es igual a:

$$V_{IOUT_IDEAL(I_P)} = V_{IOUT(Q)} + (Sens_{IDEAL} \times I_P) \quad (\text{Ecuación 18})$$

La ecuación 18 define el voltaje de salida ideal $V_{IOUT_IDEAL(I_P)}$, es una ecuación que predice teóricamente la lectura realizada por el sensor ACS770xCB. En la ecuación 18 se puede observar un comportamiento totalmente lineal. De este modo, $V_{IOUT_IDEAL(I_P)}$ tiene una pendiente que es la sensibilidad del sensor. La sensibilidad es una medida del cambio en el voltaje de salida en respuesta al cambio de 1A, en su entrada.

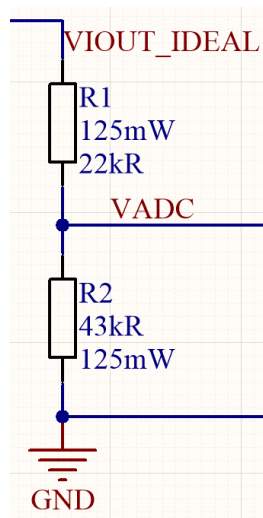
Así también, depende directamente de la cantidad de corriente, I_P , que atraviesa el sensor, que puede tener 3 valores límite distintos: 50, 100 o 200 A, de acuerdo con el modelo del sensor escogido. Finalmente, el intercepto en “y” es el voltaje de salida inactivo, que significa el voltaje de salida cuando no hay corriente circulando en la entrada; este voltaje para la variante bidireccional tiene un valor de $V_{IOUT(Q)} = V_{CC}/2$, y para la variante unidireccional tiene un valor de $V_{IOUT(Q)} = 0.5 V$.

3.5.1.1.2. Conversión del sensor de corriente

El objetivo de esta sección es mostrar el procedimiento para definir la corriente medida en amperios en términos de la lectura realizada por el convertidor analógico digital (ADC) del microcontrolador (MCU).

Para el diseño actual, el voltaje máximo permitido en la entrada del MCU es de 3,3 V; pero, el sensor tiene una salida máxima de 5 V. Por ello, se utiliza un divisor de voltaje como acople entre la salida del sensor de corriente al pin ADC del microcontrolador que se puede observar en la Figura 40.

Figura 40. **Divisor de voltaje para el sensor de corriente**



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0, licencia estudiantil 2021.

Utilizando la teoría de circuitos se obtiene que:

$$V_{ADC(I_P)} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) * V_{IOUT_IDEAL(I_P)} \quad (\text{Ecuación 19})$$

El segundo paso es expresar la ecuación 19 en términos de la corriente entrada I_P . Para ello, se sustituye $V_{IOUT_IDEAL(I_P)}$ de la ecuación 18, en la ecuación 19, para obtener la ecuación 20.

$$V_{ADC(I_P)} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) * (V_{IOUT(Q)} + (Sens_{IDEAL} * I_P)) \quad (\text{Ecuación 20})$$

El tercer paso es despejar la corriente de entrada I_P en la ecuación 20:

$$\left(\frac{R_1 + R_2}{R_2}\right) * V_{ADC(I_P)} = (V_{IOUT(Q)} + (Sens_{IDEAL} * I_P))$$

$$I_P = \frac{\left(\frac{R_1 + R_2}{R_2}\right) * V_{ADC(I_P)} - V_{IOUT(Q)}}{Sens_{IDEAL}} \quad (\text{Ecuación 21})$$

Por último, hace falta encontrar la corriente de entrada I_P , en términos de la lectura del ADC. Pero, primero se realiza una breve explicación sobre la conversión de la lectura digital a analógica en el siguiente párrafo.

En un ADC, existe un término llamado resolución, que es una relación entre una cantidad digital y una analógica, que se define como el cambio de 1 bit en una palabra digital de n bits, debido al cambio en el voltaje de entrada $V_{ADC(I_P)}$ dentro del voltaje de referencia máximo. La resolución se calcula dividiendo el voltaje máximo admisible, entre el número total de combinaciones de bits del ADC (entre 2^n).

$$\frac{V_{ADC(I_P)}}{B_{ADC}} = \frac{3.3 V}{2^n} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde B_{ADC} es la lectura realizada por el microcontrolador.

Este valor es un factor proporcional, que sirve para convertir el voltaje de entrada del microcontrolador en una lectura de ADC, y viceversa. Entonces, a medida que $V_{ADC(I_P)}$ varía entre 0 a 3,3 V, entonces, B_{ADC} , varía entre 0 a 2^n .

Luego de la explicación previa, se despeja $V_{ADC(I_P)}$ de la ecuación 22, y el resultado se sustituye en la ecuación 21, de esa manera se obtiene finalmente la corriente de entrada en términos de la palabra digital B_{ADC} .

$$I_P(B_{ADC}) = \frac{\left(\frac{R_1 + R_2}{R_2}\right) * \left(B_{ADC} * \frac{3.3}{2^n}\right) - V_{IOUT(Q)}}{Sens_{IDEAL}} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde:

B_{ADC} es la lectura de la palabra digital en el MCU, en *bits*.

R_1 es la resistencia de *pull-up* del divisor de voltaje, en Ω .

R_2 es la resistencia de *pull-down* del divisor de voltaje, en Ω .

$V_{IOUT(Q)}$ es el voltaje de salida inactivo, en V.

$Sens_{IDEAL}$ es la sensibilidad del sensor, en mV/A.

3.5.1.1.3. Aplicación del sensor para corriente directa

Para este punto se consulta el diagrama de bloques de la Figura 17 donde se observa la ubicación exacta del sensor de corriente. La conexión se realiza en serie, entre la terminal negativa de la parte final de la cadena de paneles solares, y la terminal positiva de la entrada del inversor. Para ello también, se consulta el capítulo 2, del cual se extrae el valor de corriente máximo para el sensor, siendo éste el valor de corriente máxima de entrada del inversor definido en la Tabla XI. También, se conoce el voltaje máximo que soporta el microcontrolador en sus pines de entrada, los cuales serán los encargados de realizar la lectura por ADC proveniente del sensor.

Tabla XVI. **Criterios de diseño del sensor de corriente en DC**

Parámetro	Especificación
Corriente máxima de entrada DC	10,01 A
Voltaje máximo de salida	3,3 V

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

A partir de los criterios iniciales, se obtiene que el modelo del sensor a utilizar es el ACS770LCB-050U-PFF-T⁴⁹, el cual tiene la característica de ser unidireccional, una corriente máxima de 50 A, y con una sensibilidad típica a 80 mV/A.

El límite de voltaje de entrada para el microcontrolador se encuentra aplicando la ecuación 18 con el sensor ACS770LCB-050U-PFF-T y con los datos de la Tabla XVI, como se muestra a continuación.

$$V_{IOUT_DC} = 0,5 V + \left(0,08 \frac{V}{A} \times 10,01 A \right) = 1,3 V$$

El valor V_{IOUT_DC} recién calculado, demuestra que el voltaje de lectura máximo es de 1,3 V. A pesar de que este valor 10,01 A se encuentra en el rango de 0 a 3,3 V, por prevención, se diseña un circuito reductor con un divisor de voltaje, como se muestra en la Figura 40, entonces se realiza el cálculo de voltaje de lectura máximo, con la ecuación 19, con los valores $R2 = 43k$ y $R1 = 22k$

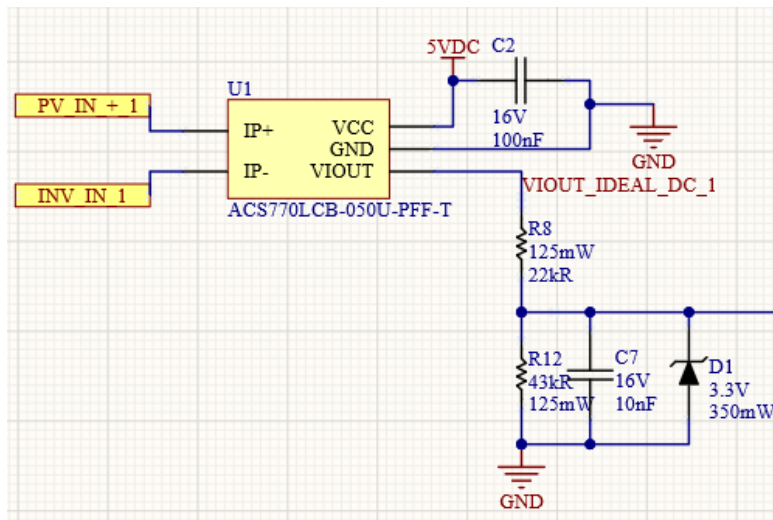
$$V_{ADC(I_P)} = \left(\frac{43k}{22k + 43k} \right) * (0,5 + 0,08 \times 10,01) = 0,86 V$$

⁴⁹ Allegro Microsystems. Op. Cit. p. 7.

En el diagrama esquemático de la Figura 41 se muestra la conexión del sensor de corriente directa, utilizando el circuito integrado ACS770LCB-050U-PFF-T, designado como U1. Los pines IP+ e IP- sirven como las entradas de corriente desde el panel solar hacia el inversor, y el pin VIOOUT funciona como la salida de voltaje del circuito integrado.

El capacitor C1 tiene la función de mantener el voltaje de alimentación estable, bajo cualquier cambio repentino de la señal. Las resistencias R1 y R2 componen el divisor de voltaje que convierte una señal de voltaje máxima de 5 a 3,3 V. El capacitor C2, mantiene el voltaje de salida estable, como un filtro de ruido de alta frecuencia. El diodo D1, es un diodo Zener de protección que sirve para limitar la entrada de voltaje en el nivel máximo de 3,3 V, en caso exista una elevación más allá de este límite. La salida de voltaje hacia el ADC del microcontrolador se designa como VIOOUT_IDEAL_DC_1.

Figura 41. **Circuito sensor de corriente DC**



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0, licencia estudiantil 2021.

El circuito descrito es solamente uno de los cuatro necesarios para todo el sensado de corriente DC del dispositivo.

3.5.1.1.4. Aplicación del sensor para corriente alterna

El criterio de corriente máxima de entrada para la aplicación de corriente alterna se calcula utilizando las especificaciones del generador monofásico, de la Figura 12, del capítulo 2. También, se consulta el diagrama de bloques de la Figura 17, donde se observa la ubicación exacta del sensor. La conexión se realiza en serie, entre la terminal de línea del generador y la terminal de línea del tablero eléctrico. Si la potencia máxima es de 13 kW (se dimensiona a un valor mayor que el de diseño por seguridad), el voltaje nominal es de 120 VAC, con un factor de potencia igual a 1, entonces:

$$Corriente\ máxima_{AC} = \frac{Potencia\ maxima}{Voltaje\ mínimo_{AC} * Factor\ de\ potencia}$$

De la igual forma que para corriente directa, la salida máxima de voltaje hacia el microcontrolador es igual al valor máximo de los pines de entrada ADC.

Tabla XVII. **Criterios de diseño del sensor de corriente en AC**

Parámetro	Especificación
Corriente máxima de entrada AC	108 A
Voltaje máximo de salida	3,3 V

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

A partir de los criterios iniciales, se obtiene que el modelo del sensor a utilizar es el ACS770LCB-200B-PFF-T⁵⁰, el cual tiene la característica de ser bidireccional, una corriente máxima de 200 A, y con una sensibilidad típica a 10 mV/A.

El límite de voltaje de entrada para el microcontrolador se encuentra aplicando la ecuación 18 con el sensor ACS770LCB-200B-PFF-T, y con los datos de la Tabla XVII como se muestra a continuación:

$$V_{IOUT_DC} = 2,5 V + \left(0,01333 \frac{V}{A} \times 108 A \right) = 3,93 V$$

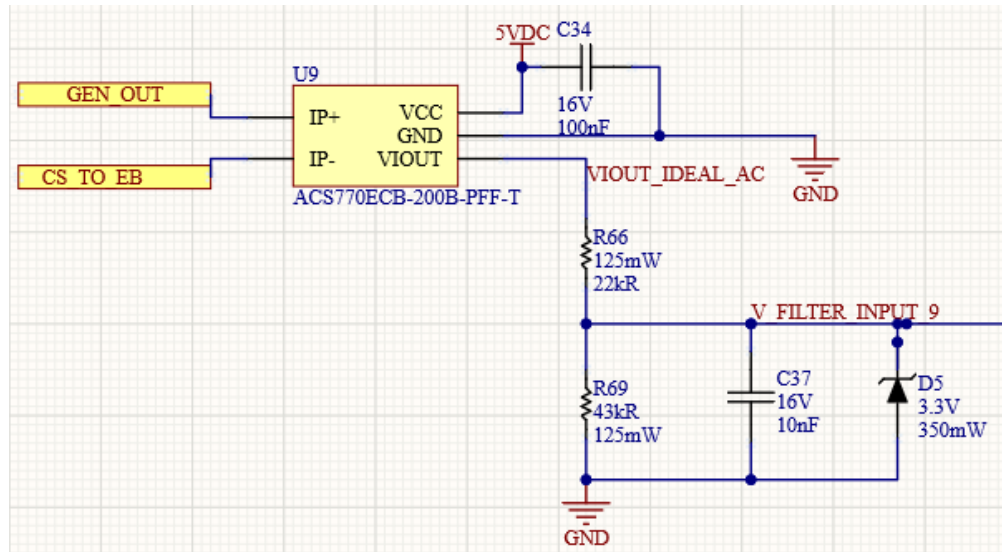
El valor V_{IOUT_DC} recién calculado demuestra que el voltaje de lectura máximo hacia el microcontrolador es de 3,93 V. Este voltaje en el rango de 0 a 3,3 V no es admisible. Por lo que, es necesario utilizar un divisor de voltaje como el de la Figura 42, entonces se realiza el cálculo de voltaje de lectura máximo, con la ecuación 19, con los valores $R2 = 43k$ y $R1 = 22k$

$$V_{ADC(I_P)} = \left(\frac{43k}{22k + 43k} \right) * (2,5 + 0,01333 \times 108) = 2,6 V$$

En el diagrama esquemático de la Figura 42 se muestra la conexión del sensor de corriente alterna, este se identifica con los componentes similares que el sensor que se muestra en la Figura 42, con la diferencia que se utiliza el circuito integrado ACS770LCB-200U-PFF-T, designado como U5, además las conexiones de entrada en los pines IP+ e IP- ahora son las del generador monofásico y el tablero eléctrico, respectivamente. El circuito es único para el sensado de corriente alterna.

⁵⁰ Allegro Microsystems. Op. Cit. p. 13.

Figura 42. Circuito sensor de corriente AC



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

3.5.1.2. Medición de voltaje del panel solar

Los componentes incluidos en esta sección funcionan como un convertidor de señal. El proceso de diseño de la medición de voltaje del panel solar se realiza en el orden siguiente: primero, se presentan los criterios de diseño del sensor con su explicación; segundo, se presentan la descripción del circuito electrónico.

La medición de voltaje de entrada se realiza por medio de un sensor resistivo. Se consulta el capítulo 2 en su Tabla VIII, de la cual se extrae que el voltaje máximo de cada cadena de paneles solares es de 512,65 V, que se aproxima a 600 V por seguridad. Este valor representa el voltaje máximo de entrada del sensor, según el diagrama de la Figura 17. También se conoce que el voltaje máximo de salida debe coincidir con la entrada del microcontrolador, que es de 3,3 V. Por lo que, los criterios de diseño son los siguientes:

Tabla XVIII. **Criterios de diseño sensor de voltaje del panel solar**

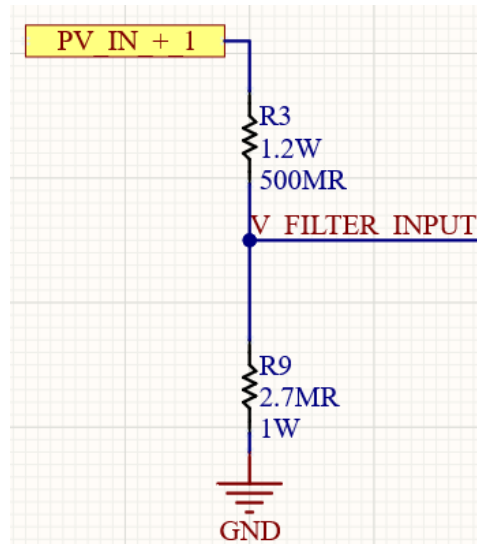
Parámetro	Especificación
Voltaje máximo de entrada del sensor	600 V
Voltaje máximo de salida del sensor	3,3 V

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

A partir de los criterios definidos en la 0, se obtiene que se debe utilizar un divisor de voltaje como sensor resistivo. En general un resistor es capaz de soportar 200 V, pero las resistencias actuales deben soportar 600 V, entonces se escogen resistores tienen la característica de funcionar para altos voltajes.

En la Figura 43, el divisor de voltaje, R3 y R9, se diseña para funcionar con los criterios de la Tabla XVI. Se utilizan valores en el orden de los megas, esto con el fin de evitar que la corriente a través del punto de conexión se drene a tierra por esta vía. Se menciona que la salida del sensor resistivo se conecta directamente a un filtro pasa bajos de segundo orden, el cual se explica en la sección 3.5.1.4.

Figura 43. **Circuito sensor de voltaje DC**



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

3.5.1.3. **Medición de voltaje del generador monofásico**

Los componentes incluidos en esta sección funcionan como acondicionador y convertidor de señal. El proceso de diseño de la medición de voltaje del generador monofásico se realiza en el orden siguiente: primero, se presentan los criterios de diseño del sensor con su explicación; segundo, se presentan la descripción del circuito electrónico.

La potencia real instantánea de una forma de onda de corriente alterna se obtiene realizando el cálculo del voltaje RMS por la corriente que conduce la carga, o bien, de manera contraria, con el cálculo de la corriente RMS por el voltaje en la carga. En el caso de estudio se decide obtener de la primera forma,

debido a que es más viable y económico medir una señal de voltaje, que una señal de corriente.

La medición del voltaje RMS se realiza por medio de dos circuitos integrados, el primero de ellos sirve para escalar la amplitud de voltaje luego el segundo está dedicado a la obtención del voltaje RMS. En Tabla X del capítulo 2 se puede observar que el voltaje estándar del generador monofásico es de 240/120 VAC. Para el modelo de generador se debe realizar la elección en el momento de su adquisición para que sea de 120 VAC. Este voltaje se le denomina nominal, quiere decir que es una tensión RMS específica de diseño, pero su valor puede variar con la práctica, debido a alguna pérdida externa y a la carga conectada. Sin embargo; se puede calcular el voltaje pico-pico de la onda senoidal del generador monofásico a partir del voltaje nominal.

El voltaje pico-pico o V_{pp} , es mayor que el voltaje nominal y se obtiene con la ecuación siguiente:

$$V_{pp} = 2\sqrt{2} V_N \quad (\text{Ecuación 24})$$

A partir de la ecuación 24 se obtiene que el voltaje pico-pico para una señal de 120 VAC es igual a 340 Vpp. Este valor corresponde al voltaje de entrada para el circuito a diseñar. En Figura 17 se observa la posición exacta de este sensor, conectado en paralelo al voltaje de línea. También se conoce que el voltaje máximo de salida debe coincidir con la entrada del microcontrolador, que es de 3,3 V. Por lo que, los criterios de diseño son los que se ven en la Tabla XIX.

Tabla XIX. **Criterios para la medición de voltaje del generador monofásico**

Parámetro	Especificación
Voltaje pico-pico de entrada del sensor	340 Vpp
Voltaje máximo de salida del sensor	3,3 VDC

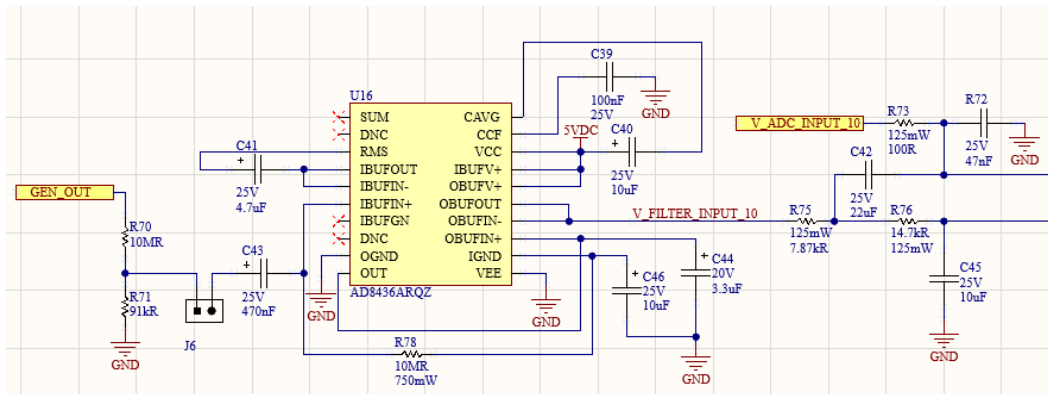
Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Los criterios de la Tabla XIX muestran que se debe reducir una señal de alto voltaje en corriente alterna a una señal de bajo voltaje en corriente directa. Para ello se utiliza un divisor de alto voltaje, el circuito integrado AD8436 de la marca Analog Devices. Se toma como referencia las hojas de datos del fabricante, como también el documento de Staley (2015)⁵¹, el cual explica las configuraciones posibles en profundidad del AD8436, como también sus aplicaciones comunes.

En la Figura 44 se observa el circuito esquemático para el sensor de voltaje AC. Está compuesto por dos etapas, la primera es de acondicionamiento de la señal y la segunda es la conversión de voltaje. La explicación del funcionamiento de lo circuito integrado se menciona en la sección 3.3.3.3.

⁵¹ STALEY, James. *Using the AD8436 True RMS to DC Converter*. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1341.pdf?doc=AD8436.pdf>. Consulta: agosto 2020.

Figura 44. Circuito sensor de voltaje AC



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

El divisor de voltaje compuesto por R70 y R71 permite acondicionar el voltaje AC de entrada de 340 Vpp a 3 Vpp, que es adecuado para ser medido por el CI AD8436. El CI AD8436 es el encargado de realizar la conversión de 3 Vpp a su respectivo voltaje RMS. El CI AD8436 puede funcionar con una fuente simple de 5 V. Internamente, dos resistencias de 100kΩ están conectadas entre VCC y VEE formando un divisor de voltaje con alimentación intermedia igual a VCC/2. La referencia de voltaje es accesible en el pin IGND. El divisor de voltaje interno permite que cualquier señal de entrada este centrada en VCC/2, cuando se conecta el pin IGND hacia el pin IBUFIN+, hacia la terminal del capacitor de acople C43.

Se requiere una resistencia externa, R78, de 10MΩ entre el pin IBUFIN+ y el pin IGND para polarizar el amplificador operacional FET interno. Además, se recomienda un capacitor de desacoplamiento, C46, de 10 μF entre el pin IGND y el pin VEE, el cual está conectado a tierra. De la misma manera el capacitor C41

acopla la señal de corriente alterna que se dirige de la salida del *buffer* hacia el pin RMS del núcleo de conversión⁵².

La conversión a corriente directa para obtener el voltaje RMS de la señal entrante requiere un capacitor externo, C40, para proporcionar el valor medio (o promedio) del voltaje pico-pico de entrada, ver la ecuación 9 para una mejor comprensión. Según la hoja de datos del fabricante el valor adecuado de C40 para una frecuencia de 60 Hz debe ser de 10 μ F. El capacitor C39 junto a una resistencia interna de 16 k Ω funcionan como un filtro pasa bajos que está referido a tierra.

Además, la hoja de datos menciona que la combinación del capacitor C40 en el pin CAVG, de 10 μ F, y el capacitor C44 en el pin OUT, de 3,3 μ F, reduce el *ripple* de salida a un valor menor a 1mV pico-pico para una onda senoidal de entrada de 60 Hz, 300mV rms. Así también, el capacitor C39, sirve para reducir los errores debido al factor de cresta, que es un problema para la mayoría de las aplicaciones con ondas sinusoidales. El valor exacto de C39 no es crítico, pero debe ser menor al 10 % del valor de C40 (CAVG), por lo que se escoge un valor de 100 nF.

3.5.1.4. Filtros analógicos de los sensores

La información que proviene de los sensores tiene la particularidad de ser una señal analógica. Esta señal, puede ser afectada por algún ruido externo, el cual surge del ambiente que rodea al circuito. Por lo que, una solución para eliminar dichas interferencias es agregar filtros analógicos. La etapa de filtrado se agrega entre los sensores y el microcontrolador, como lo muestra la figura 39 del modelo de conexión con aislador digital.

⁵² Allegro Microsystems. Op. Cit. p. 5.

Para cada sensor propuesto en la Figura 17 se agrega un filtro analógico Butterworth, entonces resulta en un total de 10 circuitos de este tipo. Debido a que las características de salida de los circuitos sensores de voltaje y corriente DC, que corresponden a los paneles solares se repiten para cada una de las cadenas, entonces de la misma manera el circuito de filtrado también se repite. Así también, los circuitos sensores AC tienen las mismas características de salida que los sensores DC. Por lo tanto, solamente es necesario diseñar un filtro analógico que pueda replicarse para cada sensor.

De las secciones anteriores que se refieren a los sensores, se tienen como criterio de salida un voltaje máximo de 3,3 V, porque los circuitos se diseñan para conectarse directamente a un microcontrolador, entonces el filtro analógico se puede replicar diez veces, que corresponde a las salidas de cada sensor, sin ocasionar alguna pérdida en la información, ni algún cambio de nivel de voltaje.

Ahora bien, si las señales que provienen de los sensores, ya sea de voltaje o corriente son teóricamente señales de corriente directa; por qué se hace importante agregar filtros. La respuesta es que, en la práctica, cuando se construyen los sensores, se conoce que las señales pueden verse modificadas por algún voltaje de línea cercano al circuito, que tenga una frecuencia de 60 Hz, o bien, alguna interferencia electromagnética presente en el ambiente.

Consultado los conceptos teóricos de la sección 3.4.3. sobre filtros analógicos *Butterworth*, específicamente las ecuaciones 11 a 12 para encontrar ε y N , respectivamente. Se muestran los criterios de diseño siguientes:

Tabla XX. **Criterios de diseño para el filtro *Butterworth***

Parámetro	Especificación
Magnitud de la variación máxima en transmisión (A_{max})	3 dB
Magnitud de la variación mínima en banda suprimida (A_{min})	60 dB
Frecuencia de banda suprimida	60 Hz
Frecuencia de banda pasante	1 Hz
Ganancia de cd	1 V

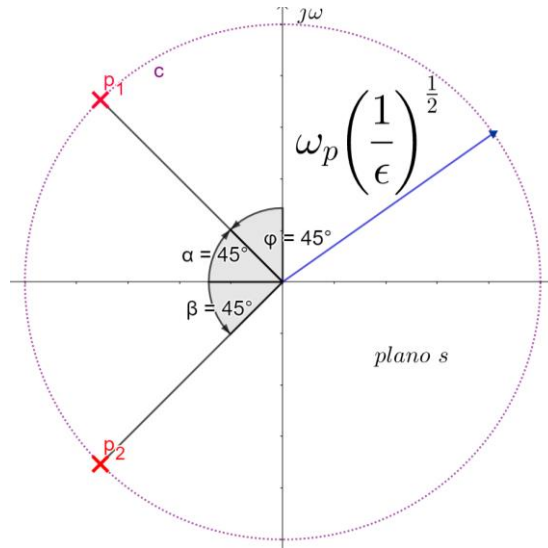
Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Al sustituir $A_{max} = 3 \text{ dB}$, en la ecuación 11, el resultado es $\varepsilon = 0,9976$. La ecuación 12, se utiliza para determinar el orden del filtro, entonces, con los datos de la tabla anterior, se sustituyen dos valores para N . Se encuentra que $N = 2$, produce $A_{min} = 71,10 \text{ dB}$, y que $N = 3$, produce $A_{min} = 103,66 \text{ dB}$. Por lo tanto, se selecciona $N = 2$.

Los modos naturales se encuentran construyendo el círculo mostrado en la Figura 45 con los datos obtenidos. Los polos tienen la misma frecuencia $\omega_0 = \omega_p(1/\varepsilon)^{1/N} = 2\pi \times 1 \times \left(\frac{1}{0,9976}\right)^{1/2} = 6,29 \text{ rad/s}$.

El ángulo respecto del eje $+j\omega$ para los polos p_1 y p_2 , se encuentran en dirección antihoraria. Se construye de la forma siguiente: el polo p_1 se encuentra a un ángulo de $\frac{2\pi}{N} = \frac{2\pi}{2}$ rad, que es igual a 45° respecto del eje $+j\omega$; el polo p_2 se encuentra a un ángulo de $\frac{\pi}{N} = \frac{\pi}{2}$ rad, que es igual a 90° respecto del polo 1, que es igual a 135° respecto del eje $+j\omega$.

Figura 45. **Gráfica modos naturales del filtro *Butterworth***



Fuente: elaboración propia, empleando Geogebra versión 5.

Por lo que, p_1 y p_2 , están dados por

$$p_1 = \omega_0(-\cos 45^\circ + j \sin 45^\circ) = 35.92 * (-0,707 + j 0,707)$$

$$p_2 = \omega_0(-\cos 45^\circ - j \sin 45^\circ) = 35.92 * (-0,707 - j 0,707)$$

Finalmente se construye la función de transferencia para el filtro *Butterworth*, con $K = 1$, a partir de la ecuación 13:

$$T(s) = \frac{K\omega_0^N}{(s - p_1)(s - p_2)}$$

$$T(s) = \frac{\omega_0^2}{(s - \omega_0(-\cos 45^\circ + j \sin 45^\circ))(s - \omega_0(-\cos 45^\circ - j \sin 45^\circ))}$$

$$T(s) = \frac{\omega_0^2}{(s^2 + 2s\omega_0 \cos 45^\circ + \omega_0^2((\cos 45^\circ)^2 + (\sin 45^\circ)^2))}$$

Simplificando expresión anterior, con $s = j\omega$, donde ω es la frecuencia angular de la señal de entrada, entonces la función de transferencia queda de la siguiente manera:

$$T(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \sqrt{2}\omega_0 s + \omega_0^2}, \quad (\text{Ecuación 25})$$

Donde: $\omega_0 = \omega_p(1/\varepsilon)^{1/N} = 6,29 \text{ rad/s}$ y el factor de calidad, $Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

La función de la ecuación 25 se compara con la ecuación 14 de la sección 3.4.3.2, y de allí se obtiene el factor de calidad Q .

Entonces, con la función de transferencia del filtro *Butterworth* se propone realizar la correlación de los componentes del circuito, con base en la topología *Sallen-Key*, descrita en la sección 3.4.4.

Para ello se correlaciona la ecuación 15 y 16, con los parámetros de la ecuación 25, a continuación:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_3 C_2 C_4}}$$

$$\sqrt{2} = \sqrt{\frac{R_3 C_4}{R_1 C_2}} + \sqrt{\frac{R_1 C_4}{R_3 C_2}} + (1 - K) \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_3 C_4}}$$

De las expresiones anteriores se desconocen los cuatro valores: R_1, R_3, C_2 y C_4 .

Según el reporte de aplicación sobre la arquitectura *Sallen-Key*⁵³ se utiliza la simplificación 2 que consiste en definir una relación entre los valores de las resistencias o capacitores; de esta manera: $R_1 = mR$, $R_3 = R$, $C_2 = nC_4$ y $C_4 = C$. Entonces, con una ganancia unitaria $K = 1$, las expresiones simplificadas quedan así:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC\sqrt{mn}}$$

$$\sqrt{2} = \frac{m+1}{\sqrt{mn}}$$

Si se define $n = 2,2$, la capacitancia $C = 10 \mu\text{F}$, entonces se despeja la segunda expresión para m , dando como resultado, $m = 0,5366$. Al sustituir este valor en la primera expresión y se despeja para R , resulta en:

$$R = \frac{1}{\omega_0 C \sqrt{mn}} = \frac{1}{6,29 (10 \mu) \sqrt{(2,2)(0,5366)}} = 14,63 \cong 14,7 \text{ k}\Omega$$

Por lo tanto, los valores de los componentes quedan como siguen: $R_1 = 7,8 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 14,7 \text{ k}\Omega$, $C_2 = 22 \mu\text{F}$, y $C_4 = 10 \mu\text{F}$

Según el mismo reporte, en la página 14, el filtro de segundo grado con esta topología puede presentar una operación no lineal a altas frecuencias, pero el filtro no atenúa la señal, sino que su grafica de magnitud presenta un valle en su parte inferior, ocasionando que la ganancia empiece a crecer conforme la frecuencia aumenta más allá de 40 kHz. Por lo que, para resolver tal efecto, se agrega un filtro RC en la salida. Una resistencia (R_5) de 100Ω es ubicada en

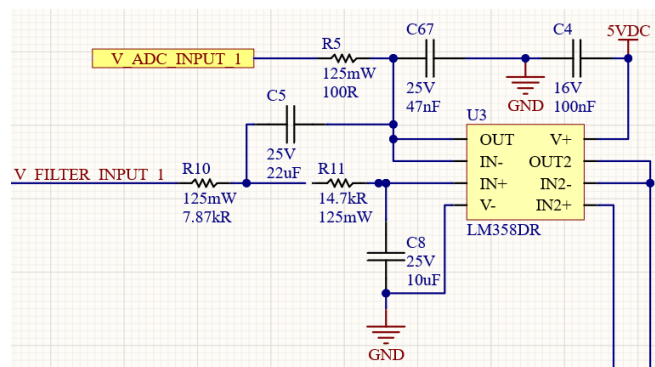
⁵³ Texas Instruments. Op. Cit. p. 5.

serie con la salida, y un capacitor (C67) de $0,047 \mu\text{F}$ está conectado de la terminal de salida hacia tierra. Este filtro sirve para que siga existiendo un polo pasivo en la función de transferencia en la respuesta de alta frecuencia.

Finalmente se escriben algunas recomendaciones en la elección de los componentes. En cuanto a los capacitores se recomienda utilizar valores mayores de 10 pF , con un dieléctrico de tipo NPO u COG, con baja tolerancia y de superficie, preferiblemente. Ahora bien, para las resistencias, utilizar bajas tolerancias, con material de película de metal, valores de varios miles de ohms.

El diseño del circuito eléctrico del filtro de segundo orden de ganancia unitaria tipo Butterworth con topología *Sallen Key* se muestra en la Figura 46. Este se replica para cada sensor conectado hacia el microcontrolador MSP430FR2155. En total son 10 filtros *Butterworth* de segundo orden con la misma funcionalidad. Tomar en cuenta que el circuito esquemático completo de la interfaz analógica del dispositivo de monitoreo se encuentra en el apéndice 3.

Figura 46. **Circuito esquemático del filtro *Butterworth***



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

3.5.2. Unidad de digitalización y control

En esta sección se explica la etapa digital, junto a los circuitos de control de las señales. Se sigue el modelo definido en la Figura 37, de la sección 3.4.5, y el resumen de los componentes de las subsecciones 3.3.3.6 a 3.3.3.9. Entonces, en las subsecciones siguientes se explica con mayor detalle los últimos tres bloques de dicho modelo de conexión.

El primer bloque para la *conversión* analógica digital consta principalmente del microcontrolador MSP430FR2155, junto a algunos componentes pasivos. Éste, se encarga de realizar el muestreo de las señales analógicas provenientes de los sensores. El segundo bloque consta de un aislador digital denominado ISO7121, el cual es alimentado por un circuito que separa la tierra lógica de los microcontroladores incluidos en el diseño, esto como una medida de protección. Por último, el tercer bloque consta de un microcontrolador MSP430FR2476 denominado principal, que se encarga de manejar la interfaz y comunicación con el usuario.

El MSP430FR2476, también se le puede denominar maestro, porque es el encargado de manejar los tiempos de envío y recepción de la información, así como el control de algunas señales de alerta, estado del dispositivo. También, se encarga de accionar la etapa de potencia, la cual se analiza en la sección 3.5.3.

3.5.2.1. Bloque de conversión analógico digital

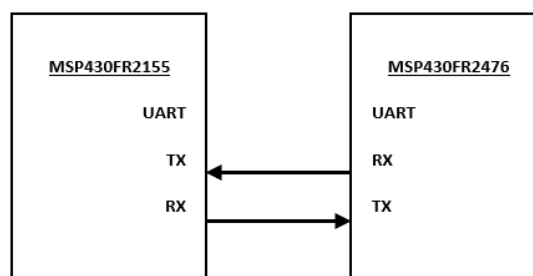
Se comienza analizando la primera etapa. El MSP430FR2155 recibe la señal de un total de 10 sensores, divididos de la forma siguiente: 4 sensores de corriente en DC, 4 sensores de voltaje DC, 1 sensor de corriente AC y un sensor de voltaje RMS AC. Para ello se utilizan, en consecuencia, 10 pines del

microcontrolador indicados como entradas analógicas A0 hasta A10. La conversión analógica a digital de cada sensor es de manera ordenada, comenzando por el pin A9 hasta alcanzar el pin A0.

La entrada máxima de voltaje debe ser de 3,3V y las lecturas digitales tienen un máximo de 10 bits, por lo que la resolución es de aproximadamente 3,22 mV ($3,3 V / 2^{10} = 0,00322 V$). Este valor de voltaje es conocido por el microcontrolador, pero representado en una palabra digital de 0 a 1 023 bits. Así, por ejemplo, si la lectura es de 2,5V entonces este voltaje se lee como 775, aproximadamente.

La comunicación de la información recopilada se realiza de manera asíncrona por medio del protocolo UART, hacia el microcontrolador principal, para lo cual, se utiliza la siguiente configuración: una velocidad de 115 200 baudios, con un bit de inicio, un bit de parada, sin bits de paridad. Este protocolo utiliza dos pines, en cada dispositivo, denominados transmisor (Tx) y receptor (Rx). La conexión se realiza de manera cruzada, esto quiere decir que, el pin Tx del emisor se debe conectar al pin Rx del receptor, siendo el pin Rx del emisor, el que se conecta al pin Tx del receptor, ver la Figura 47.

Figura 47. **Conexión de pines protocolo UART**

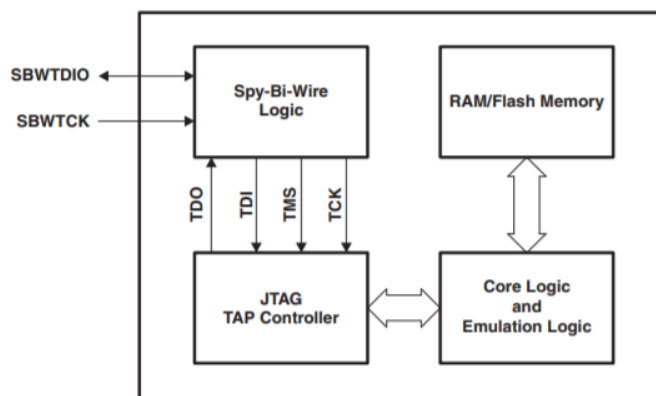


Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Ahora bien, el esquema interno de comunicación donde se explica el flujo de información entre cada microcontrolador se presenta en el capítulo 5, el cual se dedica a detallar cada aspecto de la lógica de control del dispositivo de monitoreo.

La programación del microcontrolador MSP430FR2155 se realiza por medio de la interfaz *JTAG* (*Joint Test Action Group*) la cual es un estándar de la IEEE 1149,1., para realizar la depuración de circuitos embebidos. De manera específica este microcontrolador utiliza el estándar *JTAG 4-wire* o *JTAG 2-wire*, también conocido como protocolo *Spy-By-Wire*. Entonces, los pines de programación se denominan *SBWTDIO* (*Spy-By-Wire test data input/output*) y *SBWTCK* (*Spy-By-Wire test clock*). El pin *SBWTCK* es la señal de reloj, que en operación normal tiene una resistencia *pull-down*. El pin *SBWTDIO* es bidireccional, por lo que, se coloca una resistencia *pull-up* con un capacitor del pin a tierra.

Figura 48. **Concepto básico del protocolo *Spy-Bi-Wire*.**



Fuente: Texas Instruments. *MSP430 Programming Via the JTAG interface*.

<http://reverse.0cpm.org/grandstream/datasheet/slau320.pdf>.

Consulta: 17 de octubre de 2020. p. 7.

En la Figura 48 se observa el esquema interno del protocolo *Spy-By-Wire*. En ella se observa que el bloque lógico realiza la conversión de 2 a 4 pines, donde el controlador JTAG realiza lleva los tiempos e instrucciones para realizar la programación y depuración del código, según sea el caso. Es importante mencionar que para programar el MSP430FR2155, se utiliza una tarjeta de desarrollo dedicada, que puede adquirirse con el nombre: MSP430FR2355 *LaunchPad™ development kit*, de la marca Texas Instruments. A continuación, se presenta una Tabla XXI que describe las conexiones a realizar.

Tabla XXI. **Descripción de las conexiones del microcontrolador MSP430FR2155**

nro. de pin	Nombre del pin	Descripción
1	A2	Entrada analógica sensor de corriente DC nro. 1.
2	A1	Entrada analógica sensor de corriente AC.
3	A0	Entrada analógica sensor de voltaje AC.
4	SBWTCK	Entrada de reloj del protocolo <i>Spy-By-Wire</i> .
5	SBWTDIO	Entrada y salida de datos del protocolo <i>Spy-By-Wire</i> .
6	DVCC	Alimentación positiva (3.3 V).
7	DVSS	Referencia de 0V o tierra (GND).
23	UCA1TXD	Salida de datos del protocolo UART hacia microcontrolador MSP430FR2476.
24	UCA1RXD	Entrada de datos del protocolo UART hacia microcontrolador MSP430FR2476.
31	A7	Entrada analógica sensor de voltaje DC nro. 4.
32	A6	Entrada analógica sensor de voltaje DC nro. 8.
33	A5	Entrada analógica sensor de voltaje DC nro. 7.
34	A4	Entrada analógica sensor de voltaje DC nro. 3.
35	P3,7	Salida digital LED Rojo.
36	P3,6	Salida digital LED Verde.
42	A9	Entrada analógica sensor de corriente DC nro. 2.
43	A8	Entrada analógica sensor de corriente DC nro. 6.
48	A3	Entrada analógica sensor de corriente DC nro. 5.

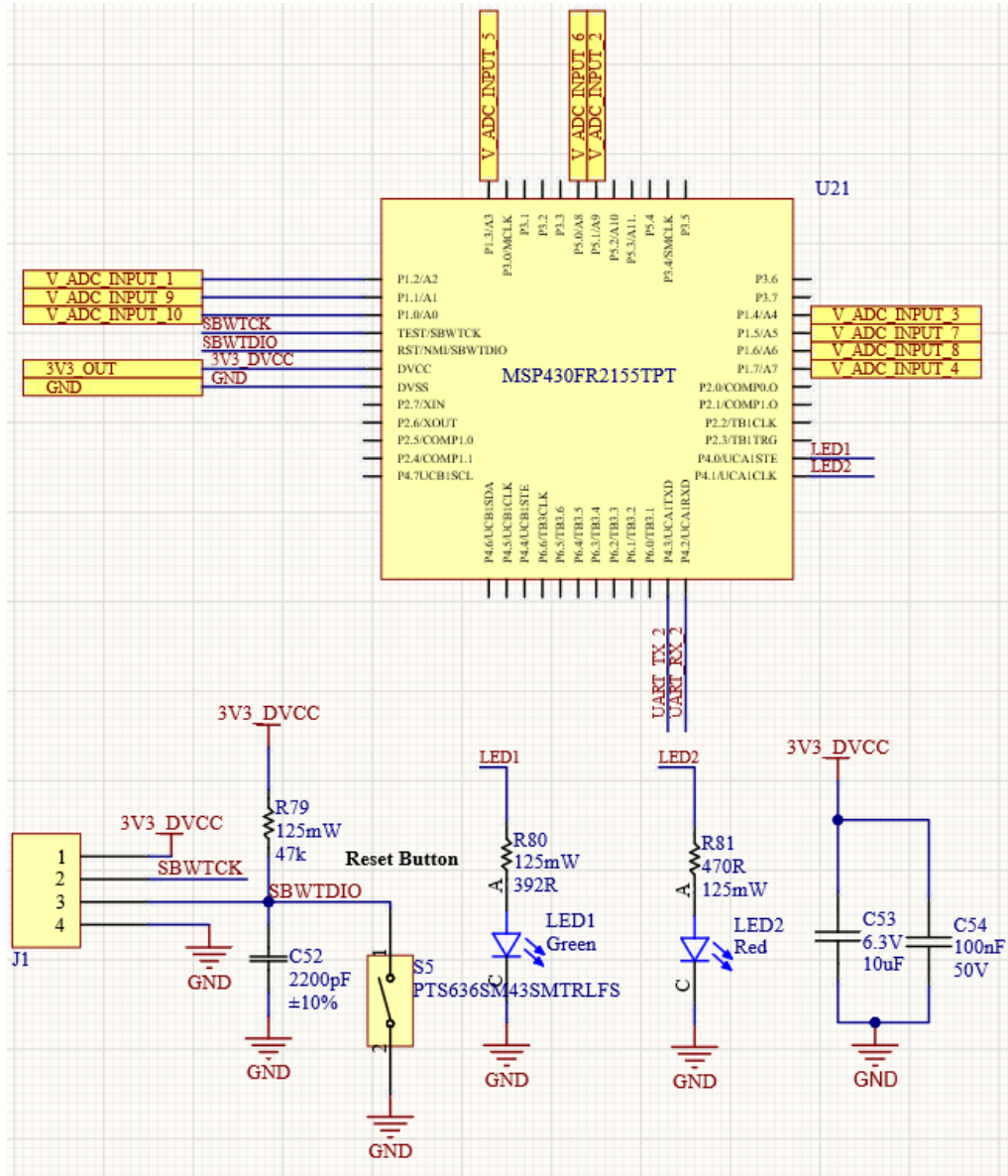
Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

En la Figura 49 se observa el circuito esquemático para este bloque. Se agregan dos salidas digitales para led, como señales que pueden ser programadas internamente. Se puede observar que la línea de voltaje de alimentación se agregan dos capacitores (C53, C54), que funcionan como desacople para interferencias de baja y alta frecuencia, respectivamente.

También, no se agrega oscilador externo porque no es necesario para la aplicación. Se pueden observar pines externos para programación (J1), y pines de habilitación de los LEDs (J2, J3), también llamados *jumpers*. Los valores de resistencias se escogen de una potencia de 0,125 mW con un encapsulado 0,805, por su tamaño reducido, pero adaptable para soldar. El voltaje nominal de los capacitores, se escogen de acuerdo con las recomendaciones de la hoja de datos del microcontrolador.

Los pines de alimentación están indicados como DVCC, DVSS, en los cuales se debe conectar un voltaje máximo de 3,3 V y 0 V (también denominado GND), respectivamente.

Figura 49. Circuito del bloque digital con el microcontrolador MSP430FR2155



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

3.5.2.2. Bloque de aislamiento y regulación de voltaje

En esta parte se describe el diseño del circuito de aislamiento que realiza la función de separar el bloque de control principal del bloque de conversión. Para ello se utiliza el circuito integrado ISO7721, el cual se presentó en la sección 3.3.3.7. Este aislador internamente utiliza una modulación *OOK (ON-OFF keying)* para transmitir los datos digitales. El modulador envía una señal de alta frecuencia, denominada portadora, representando un uno digital, como también envía una señal en bajo para representar un cero digital; además contiene circuitos internos que se encargan de realizar el acondicionamiento y filtrado de la señal para minimizar las radiaciones debido a la conmutación de alta velocidad.

La versión del CI ISO7721 que se utiliza en este diseño posee dos canales de comunicación, uno en cada dirección. El circuito integrado comunica la información entre los microcontroladores. El aislamiento que brinda el CI es de 5 000 Vrms con 7 071 Vpk, cumpliendo con certificaciones de seguridad, como también, con protección contra descargas electrostáticas (ESD). Para más información se puede leer la hoja de datos del fabricante, aunque se hace la aclaración de que el aislador es altamente confiable, debido a sus altos estándares en cuanto a pruebas de ciclo de vida, protección por sobrevoltajes, siempre que, se realice un correcto diseño de la tarjeta de circuito impreso (PCB).

El circuito se debe alimentar con dos fuentes independientes entre sí, una que sirve para el modulador y la otra que funciona para el demodulador. El propósito de esta separación es que el retorno de corriente de cada circuito se mantenga totalmente aislado. La hoja de datos del fabricante propone un circuito de alimentación con el uso de un transformador, el cual utiliza el concepto de un convertidor *push-pull*. Este tipo de convertidor DC-DC utiliza un oscilador y dos

transistores para generar una señal de corriente alterna de bajo voltaje. Así también, utiliza un rectificador de onda completa con un filtro pasa bajos en la salida para generar una señal en corriente continua nuevamente. La relación de vueltas del transformador permite que se pueda aumentar o disminuir el voltaje de salida, respecto del voltaje de entrada. Ahora bien, la corriente de salida depende, tanto de los voltajes como de la inductancia de los devanados del transformador, de acuerdo con la ecuación de voltaje de un inductor ($V = L di_L/dt$). El controlador que permite la conmutación en el primario del transformador es el CI SN6501, el cual se presenta en la sección 3.3.3.8. Además, el circuito completo contiene en su salida un regulador de voltaje lineal de baja caída (LDO).

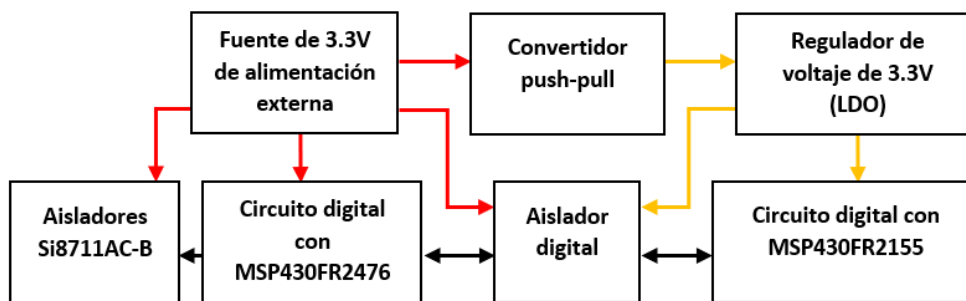
3.5.2.2.1. Alimentación aislada para interfaces de 3,3 V

El dispositivo de monitoreo de parámetros electrónicos utiliza dos microcontroladores, los cuales deben estar separados físicamente en cuanto a su voltaje de alimentación y retorno de corriente (GND). Cada microcontrolador debe tener una alimentación de 3,3 V, pero cambian sus consumos de corriente.

Para la alimentación de 3,3 V se divide en dos partes el circuito completo del dispositivo. El primer parte consta principalmente del microcontrolador MSP430FR2476, y los aisladores Si8711AC-B, estos últimos sirven para accionar los interruptores electromecánicos, pero que se explican en la siguiente sección del diseño. La segunda parte consta esencialmente del microcontrolador MSP430FR2155.

En la Figura 50, las flechas rojas indican la alimentación externa, las flechas negras indican la información que intercambian los circuitos; y las flechas naranjas indican los circuitos que la alimentación aislada.

Figura 50. **Diagrama del bloque de aislamiento y regulación de voltaje de 3,3 V**



Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

La corriente máxima para la MSP430FR2476 se encuentra en la hoja de datos del fabricante⁵⁴; en la figura 5-7 de la sección 5.11.4. que indica las características típicas de salida para un voltaje de entrada de 3 V y 2 V, la cual sugiere que la corriente de operación podría ser de hasta 25 mA. En este sentido, se propone una fuente de alimentación con 100 mA de corriente de entrada para el circuito que corresponde al bloque de control. Los aisladores Si8711AC-B consumen una corriente máxima de 120 mA, en total, (información que se conoce de la sección 3.3.3.5). Por lo que el consumo de la primera parte es de 220 mA.

⁵⁴ Texas Instruments. *MSP430FR247x Mixed-Signal Microcontrollers*. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr2476.pdf?ts=1603930752228&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FMSP430FR2476%253FkeyMatch%253DMSP430FR2476%2526tsearch%253DSearch-EN-everything%2526usecase%253DGPN. Consulta: julio 2020.

Ahora bien, la corriente necesaria del circuito aislado, ósea, para el microcontrolador MSP430FR2155 no supera los 100 mA. Esta corriente se encuentra fácilmente en la hoja de datos del fabricante; donde en el apartado de especificaciones, se busca la tabla de valores absolutos máximos (*Absolute Maximum Ratings*), la definición de la corriente a través de todo el chip, incluyendo corriente en los puertos de entrada y salida.

Entonces los criterios de diseño se resumen en la tabla siguiente:

Tabla XXII. **Criterios de diseño del bloque de alimentación aislada con regulador de voltaje de 3,3 V**

Parámetro	Especificación
Corriente máxima de entrada DC	400 mA
Voltaje máximo de entrada	3,3 V
Corriente máxima de salida DC	100 mA
Voltaje máximo de salida	3,3 V

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

En la sección 9.2 de la hoja de datos del fabricante del CI6501⁵⁵ se presenta procedimiento detallado para un ejemplo de diseño típico. Siguiendo dichas instrucciones, se explica por qué se escogen ciertos componentes para la aplicación y criterios propuestos.

A continuación, se enlistan los componentes escogidos, junto a la información de diseño para la aplicación:

⁵⁵ Texas Instruments. Op. Cit., p. 6.

- El primer paso es escoger el regulador de voltaje. Se deben tener en cuenta tres condiciones:
 - La corriente de salida a máxima carga debe ser mayor a la corriente requerida para el diseño.
 - El voltaje de entrada mínimo debe ser igual o mayor al voltaje de salida máximo más la caída de voltaje en el regulador con la corriente de salida máxima ($V_{IN-min} = V_{O-max} + V_{DO-max}$). V_{O-max} , es el criterio voltaje de salida indicado en la Tabla XXII.
 - El voltaje de entrada máximo multiplicado por la relación de vueltas del transformador debe ser mayor que el voltaje de salida del secundario, ($V_{S-max} = V_{IN-max} \times n$).
 - A partir de las condiciones anteriores se escoge el CI TPS76333-Q156. Este es un LDO capaz de brindar una corriente de salida máxima de 150 mA con una caída de voltaje de 300mV. Entonces, el voltaje mínimo de entrada es igual a 3.6 V ($V_{I-min} = 0,3 V + 3,3 V$). Entonces, según la hoja de datos del fabricante, el voltaje máximo de entrada del LDO es de 10 V. Para la condición número tres el valor máximo del secundario, con una relación de vueltas de 1,5, es igual a 5,6 V ($V_{S-max} = 3,6 V * 1,5 = 5,6 V$). El criterio que se debe cumplir es que el voltaje de entrada máximo se mantenga estable, con un valor promedio de 3,6 V, esto explica porque se utiliza el valor resultante de la condición número dos.

⁵⁶ Texas Instruments. *TPS763 Low-Power, 150-mA, Low-Dropout Linear Regulator*. https://www.ti.com/lit/ds/slvs181j/slvs181j.pdf?ts=1627865130899&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Consulta: agosto 2020.

- El segundo paso es la selección del diodo. Entonces se considera la recomendación de la hoja de datos del diodo MBR0520LT1G⁵⁷, debido a su al voltaje en directa de 275 mV a 100 mA y su bajo tiempo de recuperación para la aplicación de conmutación de alta frecuencia, proveniente del controlador.
- El capacitor de entrada se escoge de un valor de 1 microfaradio, pero se considera especial atención en el layout del convertidor. El capacitor de salida del rectificador se escoge de un valor mínimo de 1 microfaradio para garantizar un voltaje suavizado, pero sin agregar resistencia innecesaria al circuito. A la entrada del LDO se utiliza un capacitor de 0,1 microfaradios que permite el rechazo del ruido y mejora la respuesta de transitorios del regulador. Ala salida del LDO se escoge un capacitor mínimo de 4,7 microfaradios de baja resistencia equivalente.
- El cuarto paso es la elección del transformador. Para el efecto, primero se calcula la relación de vueltas del transformador siguiendo la ecuación 10 de la sección 9.2.2.5 de la hoja de datos del fabricante⁵⁸:

$$n_{min} = 1,013 \times \frac{V_{F-max} + V_{DO-max} + V_{O-max}}{V_{IN-min} - R_{DS-max} \times I_{D-max}}, \quad (\text{Ecuación 26})$$

Entonces, para un convertidor de $V_{IN} = 3,3V$ a $V_{OUT} = 3,3 V$, utilizando el diodo rectificador MBR0520L y el LDO TPS76333-Q1 de 3,3 V, los valores de las hojas de datos para una corriente de carga de 100 mA, con una temperatura

⁵⁷ ON Semiconductor. *Surface Mount Schottky Power Rectifier*. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mbr0520lt1-d.pdf>. Consulta: agosto 2020.

⁵⁸ Texas Instruments. *SN6501 Transformer Driver for Isolated Power Supplies*. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn6501.pdf?ts=1602129743851&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FSN6501%253FkeyMatch%253DSN6501%2526tisearch%253DSearch-EN-everything%2526usecase%253DGPN. Consulta: julio 2020.

máxima de 85 grados centígrados son: $V_{F-\max} = 0,2 V$, $V_{DO-\max} = 0,3 V$, y $V_{O-\max} = 3,399 V$.

Luego, asumiendo que el voltaje de entrada del convertidor es tomado de una fuente de alimentación de 3,3 V con una exactitud máxima de $\pm 2 \%$, entonces: $V_{IN-\min} = 3,234 V$, (mínimo valor requerido para regulación efectiva del TPS76333-Q1). Finalmente, los valores máximos de la resistencia de drenador a fuente y la corriente de drenador a 3,3 V, según la hoja de datos del SN6501 son: $R_{DS-\max} = 3 \Omega$, e $I_{D-\max} = 150 mA$. Por lo que insertando los valores en la ecuación 26.

$$n_{\min} = 1,013 \times \frac{0,2 V + 0,3 V + 3,399 V}{3,234 V - 3 \Omega \times 150 mA} = 1,28$$

Un transformador comercial para un convertidor push-pull de 3,3 V a 3,3 V es de una relación de vueltas 1,3 con una tolerancia de $\pm 2 \%$.

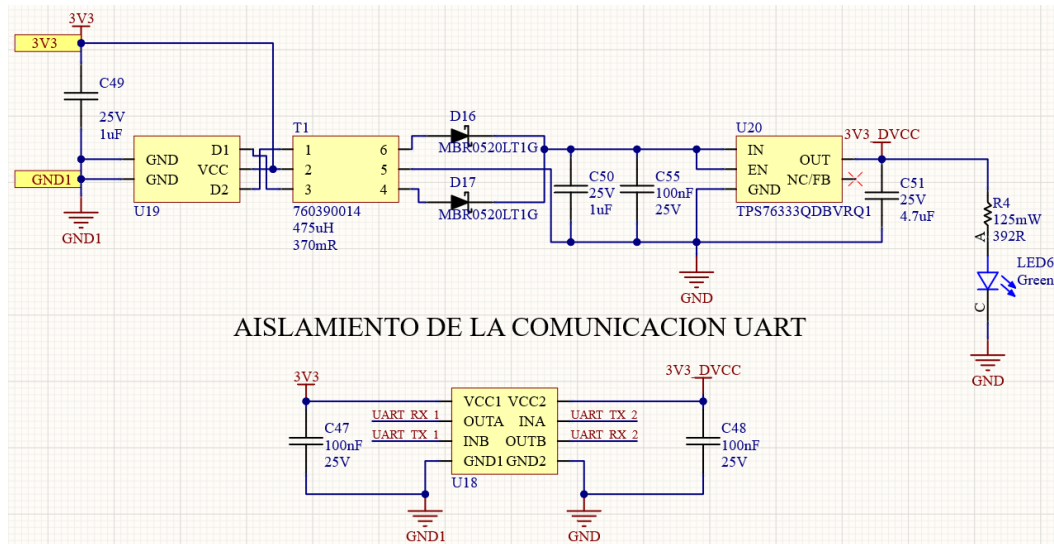
Por lo tanto, se recomienda el transformador 760390014⁵⁹ de la marca Würth Electronics con un voltaje de aislamiento de 2 500 Vrms. Sin embargo, si se desea un voltaje de aislamiento de 5 000 Vrms, entonces se recomienda el transformador 750313638⁶⁰, de la misma marca.

Finalmente se presenta el circuito para este bloque en la Figura 51.

⁵⁹ Würth Electronics. *Transformer 760390014*. <https://www.wurth-electronics.de/katalog/datasheet/760390014.pdf>. Consulta: agosto 2020.

⁶⁰ Würth Electronics. *Transformer 750313638*. <https://www.wurth-electronics.com/catalog/datasheet/750313638.pdf>. Consulta: agosto 2020.

Figura 51. Circuito de la alimentación aislada para interfaces de 3,3 V



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

Un detalle importante, es que se puede observar el nombre de tierra es diferente para cada circuito. La separación es evidente internamente en el CI *ISO7721* y en el transformador.

3.5.2.2.2. Alimentación aislada para interfaces de 5 V

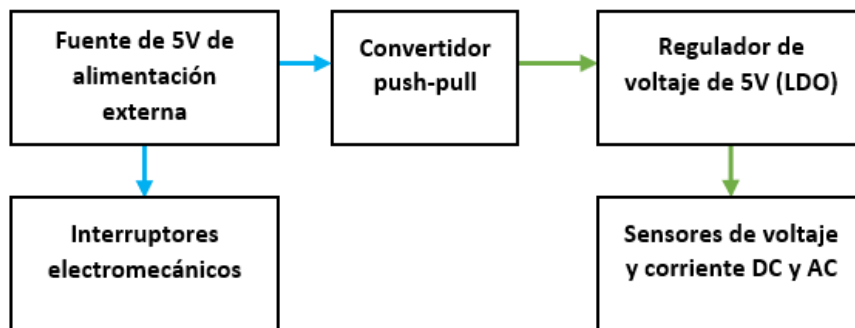
Los circuitos que reciben una alimentación de 5 V son: los sensores de voltaje, de corriente, y los interruptores electromecánicos de potencia AC/DC (que se explican en la siguiente sección). Estos son específicamente los circuitos integrados presentados al principio de este capítulo, ACS770LCB-xxxU, LM358, los relés G6L-1P-DC5⁶¹, HE1AN-P-DC6V-Y5, respectivamente. Desde el punto

⁶¹ Omron. *Ultra-thin low signal relay G6L*. https://media.digikey.com/pdf/Data_Sheets/Omron_PDFs/G6L.pdf. Consulta: septiembre 2020.

de vista del dispositivo, los sensores funcionan como una interfaz de entrada, los aisladores como una interfaz de salida. Por lo que, se hace necesario aislar su alimentación.

En la Figura 52, las flechas color celeste indican la alimentación de 5 V externa hacia los relés, las flechas color verde indican la alimentación aislada hacia los sensores de voltaje o corriente. Se observa que, a diferencia de la alimentación de 3,3 V, no es necesario colocar un aislador digital, porque estos circuitos son totalmente independientes, porque no intercambien información entre ellos, como bien se realiza con los microcontroladores. El aislamiento se realiza con el único objetivo de proteger en caso haya un incidente de descarga eléctrica accidental, ya sea en la interfaz de entrada o de salida.

Figura 52. **Diagrama del bloque de aislamiento y regulación de voltaje de 5 V**



Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

La fuente externa debe ser capaz de brindar el consumo para todo el circuito, la suma del consumo de los interruptores electromecánicos y de los circuitos integrados de los sensores. Entonces, La información acerca de la

corriente que consume cada circuito integrado se puede encontrar en las hojas de datos de cada fabricante.

A continuación, se enumeran los consumos máximos por componente:

- El relé G6L-1P-DC5 consume 36 mA.
- El relé HE1AN-P-DC6V-Y5 consume 320 mA, multiplicado por 4 de ellos resulta en 1 280 mA.
- El convertidor push-pull consume 0,7 mA.
- El regulador de voltaje LDO consume 150 mA.
- El amplificador operacional LM358 consume 800 μ A, multiplicado por 5 de ellos resulta en 4 mA.
- El sensor ACS770LCB-xxxU consume 10 mA, multiplicado por 4 de ellos resulta en 40mA.
- El convertidor de voltaje *True RMS* AD8436 consume 10 mA.

Entonces el resultado de la suma del consumo sería igual a 1 520,7 mA. Al valor obtenido se le suman 500 mA por pérdida de potencia en resistencia de los componentes y del *layout*, entonces aproximadamente se pueden consumir 2 000 mA. Lo que equivale a una fuente externa de 2 A. El consumo circuito aislado que representa los sensores consiste en los últimos 4 componentes enlistados, que es igual a 25,6 mA. Por lo que se pueden necesitar un consumo

máximo de 50 a 100 mA de corriente, por alguna pérdida no prevista en el diseño. En la Tabla XXIII se resumen los resultados como criterios de diseño:

Tabla XXIII. **Criterios de diseño del bloque de alimentación aislada con regulador de voltaje de 5 V**

Parámetro	Especificación
Corriente máxima de entrada DC	2 000 mA
Voltaje máximo de entrada	3,3 V
Corriente máxima de salida DC	100 mA
Voltaje máximo de salida	3,3 V

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Se realiza el mismo diseño del circuito de aislamiento de 3.3V, con el uso del CI SN6501. Por lo que, se explicará parte del procedimiento nuevamente.

Entonces, para un convertidor de $V_{IN} = 5 V$ a $V_{OUT} = 5 V$, utilizando el diodo rectificador MBR0520L y el LDO TPS76350-Q1 de 5 V, los valores de las hojas de datos para una corriente de carga de 100mA, con una temperatura máxima de 85 grados centígrados, son: $V_{F-max} = 0,2 V$, $V_{DO-max} = 0,3 V$, y $V_{O-max} = 5,175 V$.

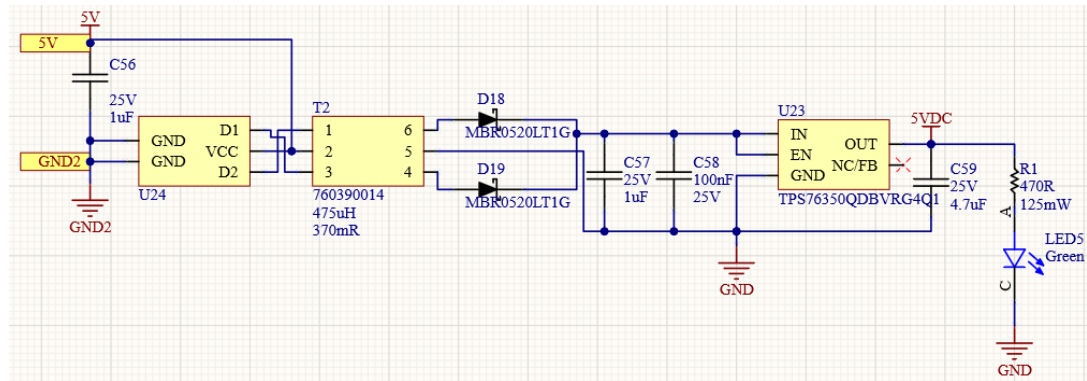
Luego, asumiendo que el voltaje de entrada del convertidor es tomado de una fuente de alimentación de 5 V con una exactitud máxima de $\pm 2 \%$, entonces: $V_{IN-min} = 4,875 V$, (mínimo valor requerido para regulación efectiva del TPS76350-Q1). Finalmente, los valores máximos de la resistencia de drenador a fuente y la corriente de drenador, con una alimentación de 5 V, según la hoja de datos del SN6501 son: $R_{DS-max} = 2 \Omega$, y $I_{D-max} = 150 mA$. Por lo que insertando los valores en la ecuación 26.

$$n_{min} = 1,013 \times \frac{0,2 V + 0,3 V + 5,175 V}{4,875 V - 2 \Omega \times 150 mA} = 1,26$$

Un transformador comercial para un convertidor push-pull de 5 V a 5 V es de una relación de vueltas 1,3 con una tolerancia de $\pm 2 \%$. Por lo tanto, se recomienda el transformador 760390014 de la marca Würth Electronics con un voltaje de aislamiento de 2 500 Vrms. Sin embargo, si se desea un voltaje de aislamiento de 5 000 Vrms, entonces se recomienda el transformador 750313638, de la misma marca

Finalmente se presenta el circuito para este bloque en la Figura 53:

Figura 53. **Circuito de la alimentación aislada para interfaces de 5 V**



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

Se puede observar la separación de tierras indicadas como GND y GND2. La referencia denominada GND es la misma que comparte el circuito aislado de 3,3 V. La referencia denominada GND2 es el retorno de tierra dedicado a la fuente externa de 5 V. Además, solamente comparten los relés electromecánicos para su funcionamiento. Esta referencia se mantiene aislada completamente de GND1, la cual pertenece al circuito de 3,3 V para el bloque de control principal.

3.5.2.3. Bloque de control principal

Este bloque consiste en el circuito digital que tiene como componente principal el microcontrolador MSP430FR2476. Su función es procesar la información proveniente del bloque de conversión analógico digital, la cual es transmitida por medio utilizando el protocolo de comunicación UART. Además, sirve como interfaz con el usuario para mostrar los datos recopilados y ver el estado actual del dispositivo. Así también, funciona como controlador automático de los interruptores electromecánicos que se proponen en la siguiente sección.

De esta manera, el circuito se compone de entradas y salidas digitales que están ordenadas según la aplicación.

A continuación, se agrega una breve explicación del uso de cada parte del circuito:

- Para mostrar los datos de corrientes, voltajes y potencia se utiliza una pantalla LCD.
- Para leer un dato específico, o bien, realizar alguna función previamente programada, se utilizan los pulsadores de tipo simple polo simple tiro normalmente abiertos (*SPST-NO*).
- Para mostrar alguna alarma o estado actual de funcionamiento se utilizan 2 LED, uno de color rojo y otro de color verde.
- Para comunicarse hacia una computadora u otro dispositivo con alguna interfaz gráfica se utiliza un módulo *bluetooth* externo con comunicación UART.

- Para activar los relés electromecánicos se utilizan pines digitales conectados directamente al circuito de aislamiento de potencia que se presenta en la siguiente sección.

Como se describe en la Figura 49, el microcontrolador MSP430FR2476, también se programa por medio del protocolo *Spy-By-Wire*. Para tal efecto, se utiliza una tarjeta de desarrollo dedicada, que puede adquirirse con el nombre: *MSP430FR2476 LaunchPad™ development kit* de la marca Texas Instruments. Ahora bien, el esquema interno de procesamiento donde se explica el flujo de información para la comunicación y funciones específicas de manejo de la información se presenta en el capítulo 5, el cual se dedica a detallar cada aspecto de la lógica de control del dispositivo de monitoreo.

Se presenta una tabla de resumen donde se describen las conexiones a realizar para el microcontrolador MSP430FR2476.

Tabla XXIV. Descripción de las conexiones del microcontrolador
MSP430FR2476

nro. de pin	Nombre	Descripción
1	DVCC	Alimentación positiva (3,3 V).
2	SBWTDIO	Entrada y salida de datos del protocolo Spy-By-Wire.
3	SBWTCK	Entrada de reloj del protocolo Spy-By-Wire.
8	P4,3	Salida digital hacia el circuito de potencia del interruptor electromecánico nro. 5.
9	P4,4	Salida digital hacia el circuito de potencia del interruptor electromecánico nro. 4.
10	P5,3	Salida digital hacia el circuito de potencia del interruptor electromecánico nro. 3.
11	P5,4	Salida digital hacia el circuito de potencia del interruptor electromecánico nro. 2.
12	P1,0	Salida digital hacia el circuito de potencia del interruptor electromecánico nro. 1.
15	P1,3	Conexión SCE de la pantalla LCD.
16	P2,2	Conexión RST de la pantalla LCD.
17	UCB0SOMI	Conexión D/C de la pantalla LCD.
18	UCB0SIMO	Conexión DN de la pantalla LCD.
19	P5,5	Conexión SCLK de la pantalla LCD.
20	P5,6	Conexión LED de la pantalla LCD.
23	P3,0	Salida digital LED verde.
24	P3,3	Salida digital LED rojo.
29	UCA1TXD	Salida de datos hacia microcontrolador MSP30FR2155.
30	UCA1RXD	Entrada de datos hacia microcontrolador MSP430FR2155.
37	P3,5	Entrada digital del pulsador nro. 2.
38	P3,2	Entrada digital del pulsador nro. 1.
39	P3,6	Entrada digital del pulsador nro. 3.
44	UCA0RXD	Entrada de datos hacia módulo <i>bluetooth</i> HC-05.
45	UCA0TXD	Salida de datos hacia módulo <i>bluetooth</i> HC-05.
46	XOUT	Entrada analógica de la terminal nro. 1 del cristal
47	XIN	Entrada analógica de la terminal nro. 2 del cristal.
48	DVSS	Referencia de 0V o tierra (GND).

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

La pantalla LCD tiene un circuito incorporado capaz de interpretar las instrucciones dadas por el microcontrolador. Estas instrucciones de uso encuentran definidas en la hoja de datos del fabricante, así como, la información de la descripción de sus pines. Por lo que, se obtiene el funcionamiento requerido de la pantalla LCD al utilizar sus ocho pines disponibles. La pantalla LCD se comunica con el estándar de comunicación serial síncrona, (*SPI, Synchronous Peripheral Interface*, por sus siglas en inglés).

La pantalla posee cuatro pines que permiten la comunicación síncrona, los cuales son SCE, D/C, DN(MOSI) y SCLK, tienen las funciones de selección del dispositivo, selección entre comando o datos, entrada de datos del maestro, y entrada de reloj, respectivamente. Posee un pin de reinicio de la pantalla, también dos pines de alimentación, junto a un pin que alimenta el LED interno para retroiluminación de la pantalla.

Los pulsadores digitales se conectan directamente a 3 entradas digitales del microcontrolador, pero se debe colocar una resistencia *pull-up* de 47 k en cada uno. Esto quiere decir que, cuando el botón no está presionado se lee el voltaje máximo de 3,3 V, y de manera opuesta, cuando el botón se presiona se lee el nivel de voltaje de referencia o GND.

Los leds propuestos son de encapsulado de superficie, con poseen una resistencia limitadora de corriente. El led de color verde se conecta en serie con una resistencia de 370 Ohms, por lo que consume 8 mA; el led de color rojo se conecta en serie con una resistencia de 470 Ohms, entonces consume 7 mA.

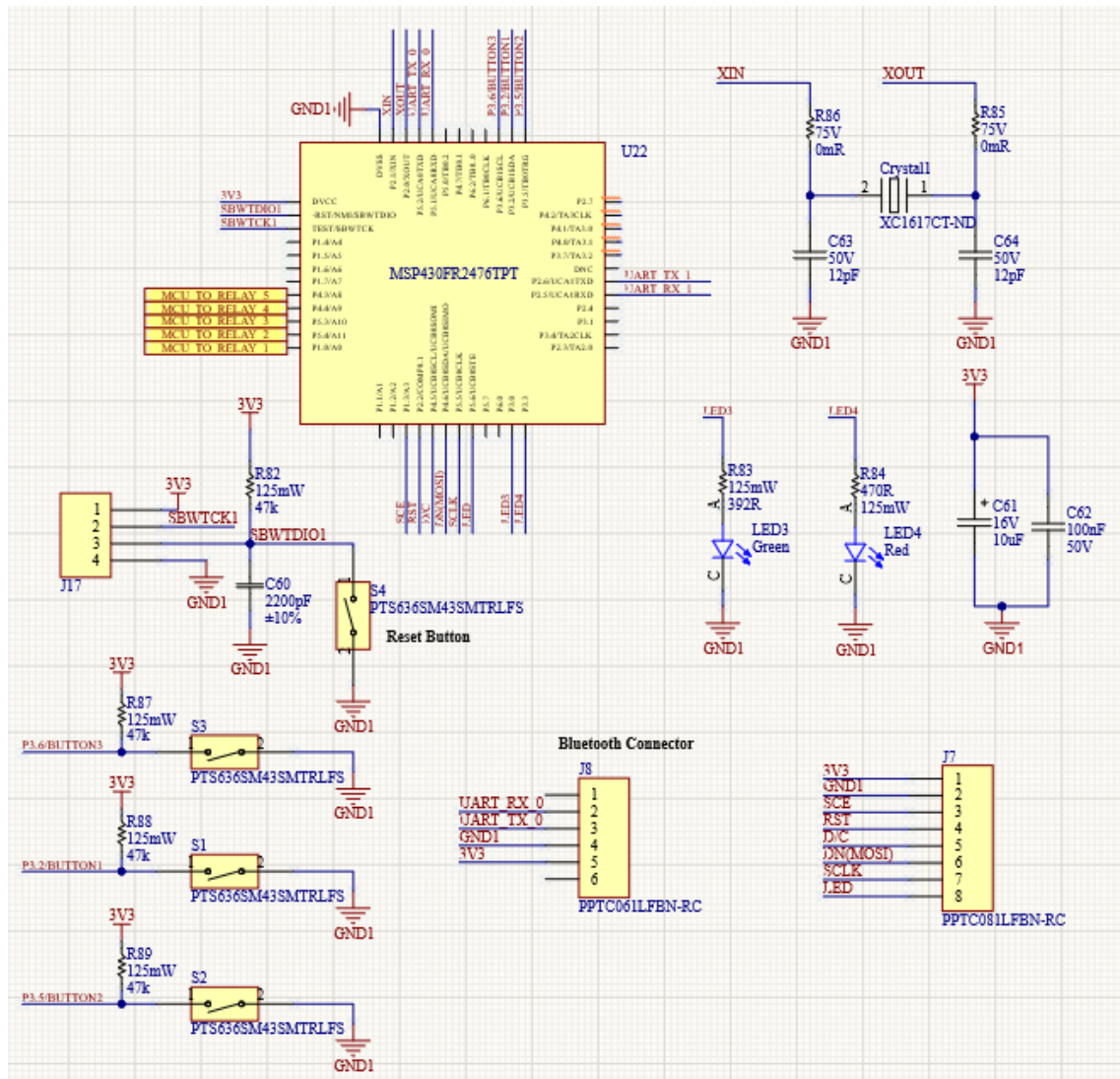
El microcontrolador tiene dos módulos disponibles para comunicación UART (UCA0, UCA1). La interfaz UCA0 se comunica de manera bidireccional con el microcontrolador MSP430FR2155, como se muestra en la Figura 49. La

interfaz UCA1 se conecta directamente hacia un módulo *bluetooth* HC-05, que es capaz de comunicarse inalámbricamente con otro dispositivo del mismo tipo, o bien, con una computadora personal con *bluetooth* integrado. Entonces, en el diseño simplemente se agregan los pines de alimentación, la transmisión y la recepción para el módulo *bluetooth* externo.

Los pines para activación de los circuitos de potencia son cinco, que se configuran como salidas digitales. La corriente de salida máxima de cada pin es de 8 mA con un voltaje máximo de 3,3 V y un voltaje mínimo de 0 V. Para esta etapa se presenta la sección 3.5.4 llamada interfaz de potencia.

Por último, se agrega un cristal externo de 32 kHz, que permite la programación del reloj en tiempo real (RTC), disponible en este microcontrolador, para llevar un registro del tiempo de algún evento importante. También, se debe utilizar un par de capacitores que sirven para la filtrar algún ruido en la alimentación, y se agrega el conector de programación J4, con su respectivo circuito de acople. En la Figura 54 se muestra el circuito para este bloque:

Figura 54. Circuito del bloque digital con el microcontrolador MSP430FR2476



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

3.5.3. Interfaz de potencia

La interfaz de potencia está compuesta en dos partes, la primera son los interruptores de potencia de corriente directa y la segunda considera el interruptor de corriente alterna para el generador monofásico.

3.5.3.1. Interruptores de potencia para los inversores de corriente

En esta subsección se presenta el procedimiento de diseño de los interruptores de potencia para los inversores de corriente. Se inicia realizando una breve explicación de funcionamiento, continuando con la presentación de algunos criterios de diseño, y finalizando con el circuito electrónico escogido para la aplicación específica.

Se conoce que el funcionamiento del proyecto completo se compone de dos acciones principales. La primera acción, sucede cuando la carga se alimenta por medio de energía solar, en este momento es cuando los inversores de corriente se encuentran encendidos, permitiendo la conversión de energía de corriente directa proveniente de los paneles solares a corriente alterna hacia la carga, al mismo tiempo que el generador monofásico está apagado. La segunda acción se presenta cuando el dispositivo de monitoreo detecta una baja potencia recibida desde los paneles solares, esto quiere decir que los inversores de corriente no reciben suficiente corriente para realizar la conversión de energía, como también para alimentar la carga; en dicho momento se activa el generador monofásico para suplir y suministrar la energía al tablero eléctrico.

Como se puede inferir, el diseño cuenta con los componentes necesarios para permitir o bloquear el paso de corriente eléctrica desde los inversores hacia

el tablero eléctrico, realizando de forma opuesta, el accionamiento y parada del generador monofásico. De manera concreta, los cuatro inversores de corriente tienen una potencia máxima de salida de 4,4 kW con un voltaje nominal (rms) de 220 V, según la Tabla IX ubicada en el del capítulo 2. Estos parámetros iniciales sirven para el cálculo de la corriente máxima de salida, para ello se divide la potencia máxima entre el voltaje nominal, resultando en una corriente de 20 A rms.

Es importante definir cómo se realiza el control de los interruptores de potencia. Para ello se propone un control por medio de una señal lógica proveniente del microcontrolador. Dicha señal se acondiciona para brindar la corriente necesaria que habilite el interruptor de potencia. Con los anteriores parámetros explicados se resumen los criterios en la Tabla XXV:

Tabla XXV. **Criterios para los interruptores de potencia de los inversores de corriente**

Parámetro	Especificación
Voltaje nominal mínimo de los contactos	220 VAC
Corriente nominal máxima de los contactos	20 A
Voltaje de habilitación máximo	3,3 VDC
Corriente de habilitación máxima	8 mA

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Se realizó la investigación sobre interruptores electromecánicos y electrónicos. Se consideran los relés de estado sólido (*SSR, Solid State Relay*), con el uso de un triodo para corriente alterna (*TRIAC*), que se adquieran fabricados todo en uno, como también de los relés electromecánicos de potencia. A continuación, se presenta la Tabla XXVI comparativa tanto de las ventajas, como desventajas de cada una de las soluciones.

Tabla XXVI. **Comparación de los interruptores de potencia**

Criterio	Relé de estado sólido	Relé electromecánico
Ruido Eléctrico	Genera una perturbación eléctrica mínima.	Puede generar ruido debido al contacto mecánico.
Consumo de potencia	Bajo consumo. Solución más eficiente.	Requiere mayor potencia de entrada para operar.
Vibración y Shock	Altamente resistente en ambientes demandantes.	Está sujeto a fuerzas externas.
Capacidad de conmutación	Responde a señales de control en menos de 100us	Responde a señales de control en 5 a 15 milisegundos.
Rendimiento en ambientes duros	Tiene aislamiento de hasta 4 kV. Campos electromagnéticos no afectan su operación. No generan arcos eléctricos o chispas	Puede generar arco eléctrico al conmutar. No puede operar en áreas con grandes campos electromagnéticos.
Sensibilidad a la posición	Se pueden montar posiciones verticales u horizontales	Las fuerzas externas deben ser perpendiculares a la acción del relé.
Generación de calor	Alta generación de calor. Necesita un disipador adecuado a la potencia que disipa.	Reduce su rendimiento a temperatura elevadas. Se debe considerar la temperatura externa y comparar con valores de la hoja de datos.
Ciclo de vida	Elevada vida útil	Vida útil media por la degradación de los contactos eléctricos y la bobina.
Costo económico	Coste elevado debido a que se debe adquirir un disipador y ventilación especializados	Costo medio que depende de la capacidad de potencia a conmutar.

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020, con información de <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/crydom-solid-state-relays-vs-electromechanical-relays#:~:text=Los%20rel%C3%A9s%20electromec%C3%A1nicos%20son%20una,s%C3%AD%2C%20tambi%C3%A9n%20son%20m%C3%A1s%20complejos.>

Consulta 14 de octubre de 2020.

Los relés electromecánicos pueden representar un costo inicial bajo, pero necesitan mantenimiento preventivo o correctivo periódicamente. Por ejemplo, si el uso del relé es tal que, conmuta 5 veces por minuto durante 8 horas al día, por 6 días a la semana, durante 48 semanas al año, puede que se necesite un cambio de relé 2 veces al año. Según el artículo de Crydom⁶², el costo efectivo de un SSR es menor, respecto a un relé electromecánico. Estas razones se muestran como una desventaja para el diseñador; sin embargo, esta investigación se enfoca en un diseño para un dispositivo de bajo costo.

Entonces, un relé electromecánico es una solución muy segura, cuando se dimensiona adecuadamente, para que soporte las cargas con un alto rendimiento y sin pérdida de potencia considerable para la aplicación que se propone. Por último, si se desea un dispositivo con una vida útil mayor se puede optar por una solución de estado sólido, donde se debe considerar costos adicionales de ventilación, como también de disipación de calor.

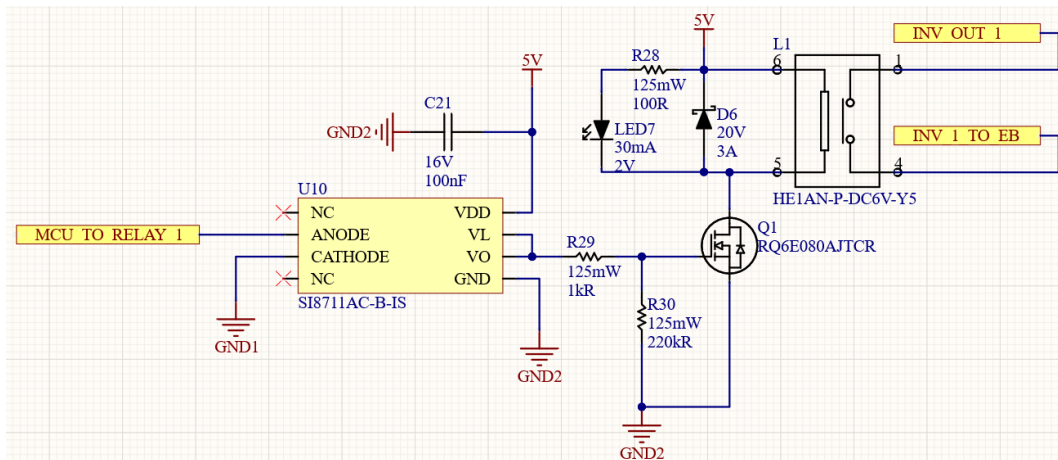
A partir de los criterios de la Tabla XXV, junto al análisis presentado en la Tabla XXVI, se propone un circuito compuesto por aislador de señales, un transistor MOSFET y un relé electromecánico. El criterio de corriente de habilitación máxima de 8mA es dependiente del relé, como también de la etapa de acondicionamiento de la señal lógica, por lo que, se presenta todo el análisis del circuito en los párrafos siguientes.

El objetivo principal es aislar la etapa de control de la señal lógica, al mismo tiempo que proporcionar el paso de potencia de 4,4 kW. La solución que se presenta garantiza una larga vida útil, el aislamiento de los componentes lógicos

⁶² Crydom. *Total Cost of Ownership | White Papers*. <http://www.crydom.com/en/tech/white-papers/total-cost-of-ownership-white-paper.shtml>. Consulta: septiembre 2020.

debido alguna descarga eléctrica accidental y un costo asequible para el diseñador.

Figura 55. **Circuito interruptor de potencia de los inversores de corriente**



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

En la Figura 55 se observa el circuito esquemático que se diseña para interrumpir la señal AC proveniente de un inversor de corriente hacia el tablero eléctrico. Consta de 3 componentes principales: el Relé electromecánico de potencia HE1AN-P-DC6V-Y5 de la marca *Panasonic*⁶³, diseñado específicamente para aplicaciones solares; el otro componente importante es el MOSFET de habilitación RQ6E080AJTCR de la marca *Rohm Semiconductor*,⁶⁴ el cual permite el paso de corriente por la bobina del relé; por último, el tercer componente es el aislador de colector abierto SI8711AC-B-IS de la marca *Silicon*

⁶³ Panasonic Industry. *HE Relays PV Type*. https://b2b-api.panasonic.eu/file_stream/pids/fileversion/276. Consulta: junio 2020.

⁶⁴ Rohm Semiconductor. *RQ6E080AJ*. <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/transistor/mosfet/rq6e080ajtcree.pdf>. Consulta: septiembre 2020.

Labs⁶⁵, que tiene una aplicación directa para control de motores o circuitos de potencia. A continuación, se explica el circuito de manera detallada indicando la función de cada componente.

En la sección 3.3.3. de resumen de los componentes se explican las características más importantes del circuito integrado SI8711-AC-B indicado como U10 en la Figura 55, el cual recibe una señal lógica de 0 a 3,3 V indicada como *MCU_TO_RELAY_1*, dicha señal conduce una corriente aproximada de 8mA.

El capacitor C21 sirve para absorber los picos de voltaje de alta frecuencia presentes en la alimentación que pueden ser producidos por algún ruido externo. Así también, se puede ver que se conecta el pin VL hacia el pin VO, esta conexión se debe a que internamente existe una resistencia *pull-up* de 20 k Ω conectada hacia VDD, que sirve para polarizar el transistor interno.

Para la etapa siguiente el transistor MOSFET Q1 de canal N funciona en corte o saturación. El transistor permite el paso de corriente por la bobina del relé, entonces es una fuente de corriente controlada por voltaje, por lo que para su correcto funcionamiento son necesarias las resistencias de polarización. La resistencia R29 tiene un valor de 1 k Ω , la cual sirve para limitar la corriente de entrada, pero también funciona como un filtro pasa bajos junto a la capacitancia interna del transistor entre los pines compuerta(G) y fuente(S). La resistencia R30 funciona como una resistencia *pull-down* para las transiciones de nivel lógico bajo, su función es evitar un voltaje flotante en la compuerta del transistor que pueda producir una activación no controlada del mismo.

⁶⁵ Silicon Labs. *5 KV led emulator input, open collector output isolators*. <https://www.skyworksinc.com/-/media/Skyworks/SL/documents/public/data-sheets/Si87xx.pdf>. Consulta: junio 2020.

Cabe mencionar que el transistor Q1 se escoge con las características siguientes: un voltaje de umbral de 1,5 V, una resistencia (R_{DSon}) entre drenador(D) y fuente(S), muy pequeña de $19.5m\Omega$, una capacidad de conducción (I_D) máxima de 8 A, con un voltaje entre drenador y fuente (V_{DSS}) máximo de 30 V. Dichas características se buscan a propósito para mantener el transistor en la zona resistiva, permitiendo el menor consumo de potencia.

La tercera parte del circuito tiene como componente principal el relé de potencia indicado como L1. Según la hoja de datos del relé, el voltaje de alimentación máximo es de 6 V para una resistencia de la bobina igual a $18,8 \Omega$, lo que resulta en una corriente nominal de 320 mA. El diodo D6 es de protección, denominado *flyback*, para drenar las corrientes inversas hacia la fuente y evitar que se dañe el MOSFET. Por último, la resistencia R28 junto al led D7 forman un circuito para reconocer el momento en que la bobina esté energizada.

Un detalle importante que se observa en el circuito esquemático es que, se debe realizar una separación de tierras, de esa manera, se aprovecha el uso del aislamiento de las señales. El circuito de la Figura 55 se replica para cada inversor conectado hacia el tablero eléctrico. En total son 4 interruptores de potencia con la misma funcionalidad.

3.5.3.2. Interruptor para el generador monofásico

El generador monofásico tiene la funcionalidad de suministrar energía de manera auxiliar al tablero eléctrico en caso de que el sistema fotovoltaico tenga baja potencia. Para ello activa el generador de manera automática. A continuación, se explican los parámetros de diseño y el circuito electrónico que es capaz de funcionar con el generador escogido en el capítulo 2 de esta investigación.

Como bien podemos observar la Figura 14, ubicada en la sección 2.3.5.5, se puede realizar el encendido y apagado del generador monofásico de la marca HIMOINSA, por medio de una señal lógica con un relé electromecánico. A diferencia de los interruptores para los inversores de corriente, en esta sección se diseña un interruptor de baja potencia. En la Figura 17 de la sección 3.3.2, podemos observar la ubicación del interruptor para el generador monofásico, éste se encuentra conectado desde la parte trasera del panel de control del generador hacia el dispositivo de monitoreo.

Se toma un extracto del documento del Manual Profesional versión 1.0⁶⁶, donde indica algunas características importantes.

Figura 56. **Características eléctricas de la central M6 de mando del generador monofásico HIMOINSA**

Símbolo	Parámetro	Condiciones	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Alimentación (bornes 8+36V, -BAT, +BAT)						
8+36V	Tensión de alimentación del módulo		8		36	VDC
+BAT	Tensión de alimentación de la salidas		8		36	VDC
I _{BAT}	Corriente de alimentación	8+36V=12V		20	60	mA
I _{BAT}	Corriente de alimentación	8+36V=24V		10	50	mA
P _{BAT}	Potencia consumida				1	W
Entradas digitales NPN (bornes RC, BPA, ATA, LT, PEM, AUX)						
V _{IN}	Tensión de entrada		-0,7		40	V
V _{IL}	Tensión de entrada a nivel bajo				1	V
V _{IH}	Tensión de entrada a nivel alto		5			V
I _{IL}	Corriente de entrada a nivel bajo	V _{IN} = 0V		2	2,5	mA
I _{IH}	Corriente de entrada a nivel alto	V _{IN} = 24V		0	100	uA

Fuente: Himoinsa. *Central M6, Manual Profesional versión 1.0.*

<https://studylib.es/doc/5048005/central-m6> Consulta: 19 de noviembre de 2020.

⁶⁶ Himoinsa. *Manual Profesional versión 1.0 Central M6.* <https://studylib.es/doc/5048005/central-m6>. Consulta: mayo 2020.

Como se observa en la Figura 56 las entradas digitales se activan con un voltaje en el rango de 12 a 40 V, con una corriente directa de 0 a 2,5 mA. Dicha corriente está regulada internamente por la central de mando, por lo que solamente es necesario garantizar un relé que soporte el voltaje en sus contactos. Así también se debe de alimentar la central de mando con una batería externa. Se resumen los parámetros de diseño en la Tabla XXVII:

Tabla XXVII. **Criterios de diseño del interruptor para el generador monofásico**

Parámetro	Especificación
Voltaje nominal de los contactos	24 VDC
Corriente nominal de los contactos	0,5 A
Voltaje de habilitación máximo	3,3 VDC
Corriente de habilitación máxima	8 mA

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

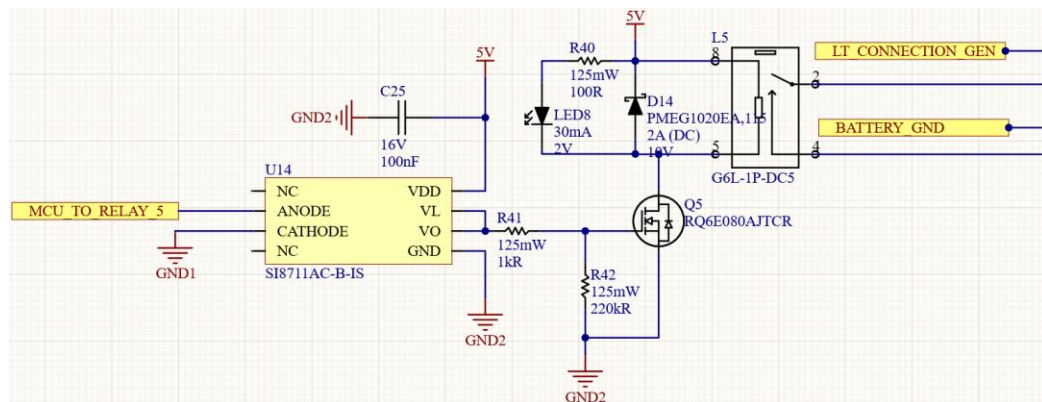
Se propone un circuito electrónico con un relé de baja potencia y acondicionamiento de la señal de habilitación, que cumple con los criterios de la tabla anterior.

En la Figura 57, el relé G6L-1P-DC5⁶⁷ tiene un consumo aproximado de 180 mW, por lo que, no demanda mucha potencia de la alimentación. Con un voltaje de 5 VDC y una resistencia interna de 139,0Ω, se obtiene una corriente nominal de 36 mA. La carga nominal para los contactos es capaz de soportar 1 A a 24 VDC, por lo que se adapta con mucha ventaja a los requerimientos del generador. Como se observa es un relé con forma de contacto de simple polo simple tiro normalmente abierto, (SPST-NO), debido a que solo es necesario

⁶⁷ Omron. *Ultra-thin low signal relay G6L*. https://media.digikey.com/pdf/Data_Sheets/Omron_PDFs/G6L.pdf. Consulta: septiembre 2020.

conectar la terminal a tierra para su funcionamiento (este concepto se explica al final de la sección 2.3.5.5). También posee la característica de montaje en PCB con un tamaño ultradelgado, lo que ocupara el mínimo espacio. Entre sus aplicaciones se encuentran para dispositivos de medición, equipos de comunicación o seguridad, por lo que se escoge para el diseño.

Figura 57. **Circuito interruptor de baja potencia para el generador monofásico**



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

Se observa que el circuito de Figura 57 tiene los mismos componentes que el circuito de la Figura 55, a excepción del relé. Se decide utilizar los mismos componentes porque el circuito de acondicionamiento de la señal también se adapta a este tipo de relés. La alimentación del aislador y el relé se mantienen separadas, para permitir un control de la señal sin ruido. Si se desea conocer más información del funcionamiento de cada componente se puede remitir a la sección anterior.

4. DISEÑO DE LA PLACA DE CIRCUITO IMPRESO (PCB)

El diseño electrónico cuenta con una segunda etapa, que consiste en llevar a la realidad cada uno de los circuitos esquemáticos. Para ello se toma a consideración todos los componentes, en su forma, tamaño y espacio que ocupan físicamente. Toma también gran relevancia la manera en cómo se interconecta cada componente en la computadora, que se represente medio de una línea dibujada, pero físicamente se utiliza un material conductor como el cobre.

Entonces, las señales eléctricas transitan a través de pistas o rutas de conexión. También existen porciones de cobre de mayor tamaño que una pista, llamadas planos o polígonos, los cuales tienen importancia para la disipación de potencia, como también para interconectar diferentes láminas de cobre que están separadas por un dieléctrico. A estas láminas de cobre se les llama capas que pueden ser: superior, inferior o intermedia. Estas capas se pueden comparar como niveles en un edificio, son generalmente de dos a cuatro niveles dependiendo de la complejidad, espacio o costo requerido para el circuito. Por lo tanto, al conjunto de cada una de las pistas, polígonos, capas y a los componentes físicos que están impresos o soldados sobre un material de cobre, (que a su vez está sobrepuesto en un material dieléctrico de fibra de vidrio o baquelita), se le denomina placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés). Cabe mencionar que una PCB puede ser realizada artesanal o industrialmente.

En este capítulo se realiza la descripción del diseño de la PCB, y sus recomendaciones correspondientes de acuerdo con el circuito esquemático presentado en el capítulo número tres. Se divide en la descripción general de la PCB, el resumen de cada módulo, por último, se desarrolla la explicación pertinente a cada etapa del diseño

4.1. Descripción general de la PCB

La placa de circuito impreso, o PCB, como se llamará de manera indiferente en este texto, está compuesta de un material FR4 estándar de dos capas, con un grosor de 1,6 mm, una dimensión de 210 x 234 mm, con un diámetro mínimo de vías de 0,4 mm. El espesor del cobre es de 1 oz, con una distancia mínima entre pistas de 0,152 mm y con un grosor de 0,3 mm. La PCB completa se agrega en el apéndice 3.

4.2. Resumen de los módulos

En su distribución espacial la PCB se divide en módulos de entrada, módulo de procesamiento y módulos de salida. Se utiliza la palabra módulo, porque se constituyen de componentes que están separados físicamente con una función específica, pero que se unen para formar un solo bloque o sistema. Para el caso de un circuito electrónico, cada módulo, de entrada, o salida, se aísla uno del otro por medio de polígonos de cobre, donde internamente comparten una misma referencia o retorno de corriente.

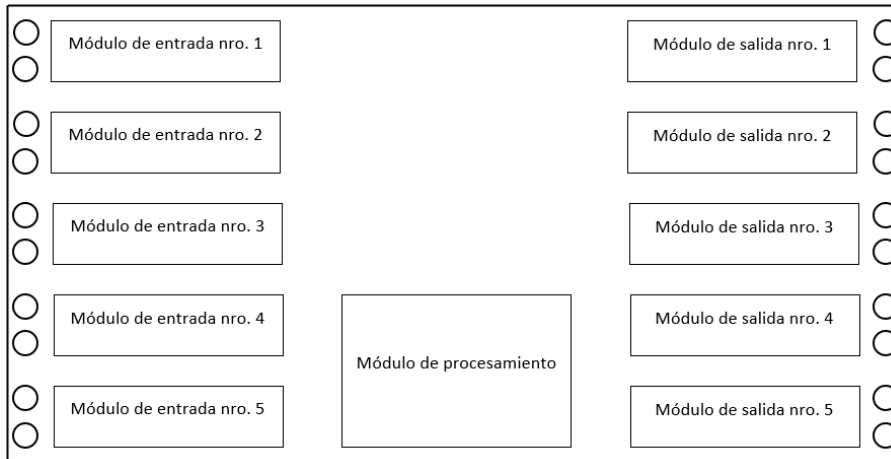
Existe un total de 5 módulos de entrada y 5 módulos de salida, los cuales son receptores de información e interruptores de señales eléctricas, correspondientemente. Por su parte, la etapa de procesamiento tiene importancia radical, porque es la que transforma los datos recopilados comunicándolos al

usuario, siendo capaz, además, de ejecutar una acción predeterminada para la aplicación del dispositivo de monitoreo de parámetros eléctricos.

Se puede definir que el primer paso en el diseño de una PCB es configurar los módulos, tomando como guía la disposición requerida del cableado externo, tanto en la entrada como en la salida. Para el caso del dispositivo de monitoreo se realiza de manera que cada conjunto de módulos se encuentre separados ordenadamente. Entonces, del lado izquierdo de la PCB se propone atornillar las argollas de los cables que provienen de los paneles solares como también del generador monofásico. De manera contraria, en el lado derecho de la PCB se propone realizar la conexión de los cables de salida, éstos se conectan en serie desde los inversores de corriente hacia el cableado del tablero eléctrico en los primeros 4 módulos de salida, y la conexión del cableado dirigido hacia las terminales del contacto seco que activa el generador monofásico. En la parte media de la PCB se permite colocar la alimentación lógica (3,3 V y 5 V).

A continuación, se presenta un diagrama de la distribución física de cada módulo dentro de la PCB:

Figura 58. **Distribución espacial de la PCB**

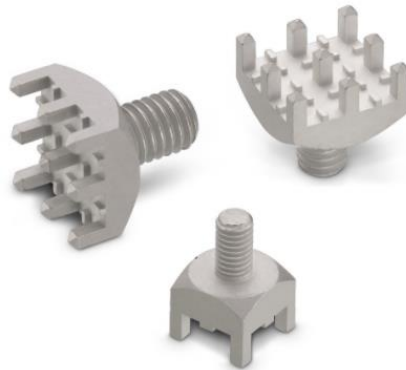


Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

En la Figura 58 se observan círculos en los extremos derecho e izquierdo de la PCB, estos significan los espacios donde se colocan los conectores para el cableado externo. Entonces, se propone un modelo de conexión física con el uso de conectores de rosca externa de la marca Würth Electronics.

Para los módulos de entrada y de salida enumerados del 1 al 4, se escoge el modelo 74651175R con una métrica M5, con una altura de la rosca de 7mm, el cual soporta hasta 50 A de corriente, siendo de tipo *through hole*, con los pines de conexión inferiores atraviesan la PCB, como se observa en la Figura 59.

Figura 59. **Conectores de rosca externa de tipo *through hole* para módulos de entrada y salida nro. 1 a 4**



Fuente: Würth Electronics. *WP-THRSH REDCUBE THR with external thread*. <https://www.wurth-electronics.com/catalog/en/WP-THRSH> Consulta: 23 de noviembre de 2020.

De manera similar para la conexión del módulo de entrada número 5 que corresponde a la medición de corriente AC del generador monofásico hacia el tablero eléctrico, se escoge el modelo 7461383 con una métrica M5 y una altura de la rosca de 8 mm, el cual soporta hasta 180 A de corriente, con 16 pines de conexión de tipo *through hole*. La Figura 60 ejemplifica estos conectores.

Figura 60. **Conectores de rosca externa de tipo *through hole* para el módulo de entrada nro. 5**



Fuente: Würth Electronics. *REDCUBE PRESS-FIT with external thread*. https://www.wurth-electronics.com/catalog/en/WP-SHFU_FULL_PLAIN Consulta: 23 de noviembre de 2020.

Ahora bien, para que la conexión del cableado externo sea suficientemente segura se debe de adaptar a unas arandelas de cables tubulares, también de la marca Würth Electronics. Estas arandelas tienen la característica de presentarse en diferentes métricas para un área superficial de 6, 10 y 16 mm cuadrados.

Figura 61. **Arandelas de cable tubular para el cableado**

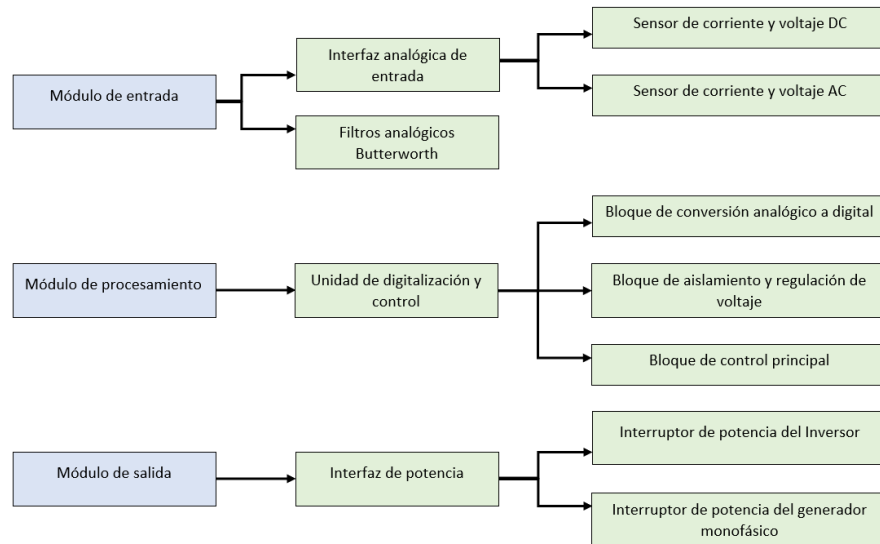


Fuente: Würth Electronics. *WA-CLUG Tubular Cable Lugs*. https://www.wurth-electronics.com/catalog/en/CLUG_TUBULAR_CABLE_LUGS Consulta: 23 de noviembre de 2020.

4.3. Etapas de diseño de la placa de circuito impreso (PCB)

Según las etapas descritas en la sección 3.5 sobre el diseño de los circuitos esquemáticos del dispositivo se enseña a continuación el desarrollo de cada parte de la Figura 58. De tal manera que, el módulo de entrada se puede relacionar con la interfaz analógica de entrada, junto a los filtros analógicos de los sensores; el módulo de procesamiento se puede relacionar con la unidad de digitalización y control; el módulo de salida se puede relacionar con la interfaz de potencia. El siguiente diagrama muestra la relación entre todas las partes.

Figura 62. Diagrama relacional entre PCB y circuito esquemático



Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

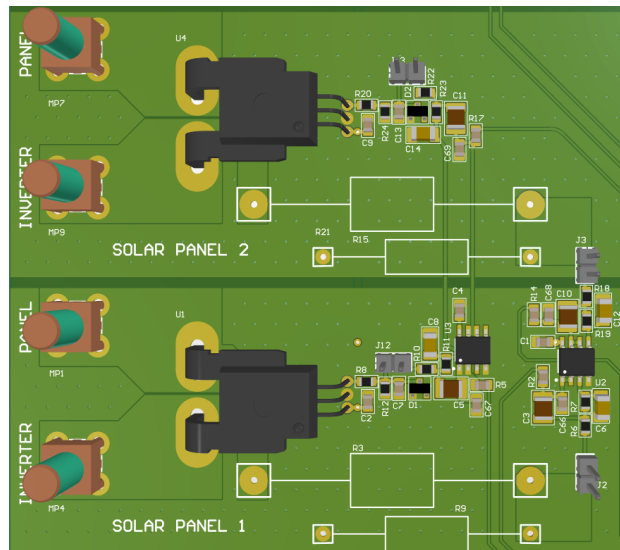
En la Figura 62 se muestra en color azul las partes de la placa de circuito impreso y en color verde las partes del circuito esquemático. A partir del resumen propuesto por este diagrama se pretende explicar cada una de las partes del dispositivo.

4.3.1. Módulo de entrada

El módulo de entrada se relaciona directamente con las etapas de la interfaz de entrada de los filtros *Butterworth*. Esta etapa de acondicionamiento de las señales se realiza a través de los sensores de corriente o voltaje, donde se puede encontrar en la sección 3.5.1. Existen dos tipos de circuito impreso para los módulos de entrada, que se diferencian por la aplicación en corriente directa o alterna. Cabe mencionar que la alimentación de todos los componentes que lo requieren se realiza por rutas en la capa inferior (*bottom layer*) de la PCB.

La Figura 63 muestra un modelo 3D de la PCB del módulo de entrada para los sensores en corriente directa, solamente.

Figura 63. **Circuito impreso del módulo de entrada para la aplicación del sensor de corriente directa**



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

La figura anterior muestra dos circuitos de sensado en corriente directa, esto para enseñar la manera en cómo se conectan hacia los circuitos de acondicionamiento, porque se comparten los amplificadores operacional duales LM358B con encapsulado SOIC, que están dispuestos en la parte baja de la imagen. Los componentes (U1, U4), que se observa de mayor tamaño en color negro es el circuito integrado ACS770 que funciona como sensor de corriente. Las resistencias de mayor tamaño en la parte de abajo de la imagen son de tipo *through hole*, porque son las que soportan alto voltaje de entrada proveniente de los paneles solares propuesto en el capítulo 2.

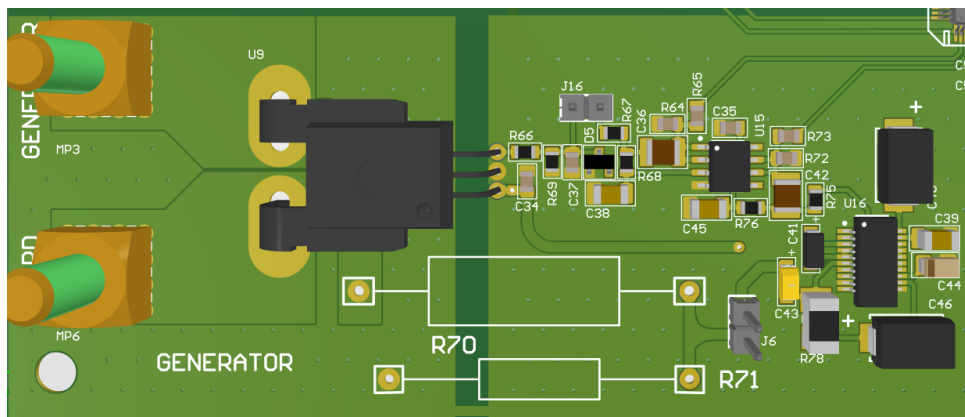
Un detalle importante es la separación de la referencia de 0 Voltios entre cada circuito, mostrado la parte media de la imagen, este hecho tiene importancia porque sirve como espacio de aislamiento y dirección de la corriente de retorno. Además, se puede reconocer que sirve para dirigir cualquier corriente provocada por algún campo magnético externo. La manera en que se comparten las referencias de 0 voltios se realiza por medio de vías hacia el plano inferior, que sirve como un plano de voltaje equipotencial, estas se observan en color verde oscuro en la imagen.

De manera semejante, en la Figura 64 se observa el módulo de entrada para los sensores de corriente y voltaje alternos. Tiene una disposición parecida a la del circuito de corriente similar a la Figura 63; sin embargo, se diferencia por la conexión al circuito integrado AD8436, indicado como U16.

La disposición de cada componente se realiza siguiendo las recomendaciones de las hojas de datos de los circuitos integrados. Una regla para seguir es que los capacitores de desacople se encuentren ubicados cercanos a los pines de alimentación de los circuitos integrados, como también que las rutas entre cada componente sean cortas en la medida que se pueda

realizar. Además, se ubican los componentes de manera que las pistas estén cercanas al módulo de procesamiento. Se realiza una separación física entre la tierra de potencia y la lógica para evitar que la corriente de retorno sea una fuente de ruido.

Figura 64. **Circuito impreso del módulo de entrada para la aplicación del sensor de corriente alterna**



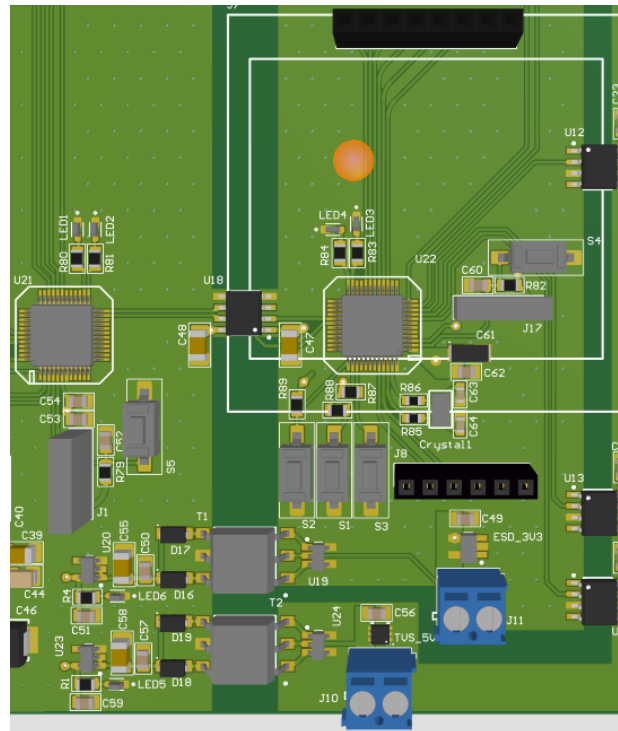
Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

4.3.2. Módulo de procesamiento

El módulo de procesamiento se relaciona directamente con la unidad de digitalización y control. La etapa esta condensada en un área aproximada de 64 x 80 milímetros cuadrados, en el que se incluye una pantalla LCD, un módulo *bluetooth* conectado perpendicularmente sobre pines, los bloques de alimentación (3,3 V y 5 V), el bloque de conversión analógico a digital, junto al bloque de control principal. Cada parte de este módulo es con base en los circuitos esquemáticos de la sección 3.5.3.

A continuación, se explica el circuito impreso para el módulo de procesamiento en la Figura 65, pero antes de explicar se mencionan algunos componentes que no se incluyen en este módulo, pero que, por el recorte de la imagen se pueden ver en ella, estos son: U12, U13, U14, C23, C46, C44, C39 Y C40.

Figura 65. **Circuito impreso del módulo de procesamiento**



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

Pues bien, primero se comienza con la observación de la separación de los planos de referencia o tierra, vistos en color verde claro; siendo estos, desde el lado izquierdo al derecho: GND, GND1 y GND2. Los planos están totalmente aislados; sin embargo, se conoce que la información, señales o potencia se pueden transmitir a través de los circuitos integrados ISO7721, SI8711AC-B o los

transformadores 760390014 de la marca Wurth Electronics, todo esto se realiza con el objetivo de proteger galvánicamente el circuito central, ubicado en la parte media.

En la parte baja del circuito impreso se observan los conectores (J10, J11), los cuales se conocen como bloques de terminales fijos (terminal block en inglés). El código de fabricante del conector es el 691103110002 de la marca Wurth Electronics, capaz de ajustar un cable calibre AWG 16 a 26, para corrientes máximas de 10 A, con un voltaje de 125 VAC.

Cada uno de los componentes están dispuestos con la premisa de optimizar todo el espacio disponible, pero considerando las recomendaciones de las hojas de datos de los fabricantes. Los componentes de cada microcontrolador (U21, U22) deben colocarse lo más cerca posible de los pines respectivos del dispositivo, de acuerdo con el circuito esquemático, para evitar pistas largas, porque agregan capacitancia, inductancia o resistencia parásitas adicionales en las señales. Así también, se debe evitar enrutar señales de entrada analógicas cerca de un pin de alta frecuencia (por ejemplo, un *PWM* de alta frecuencia), porque la conmutación de alta frecuencia se puede acoplar a la señal analógica.

Para el circuito integrado ISO7721 el enrutamiento de las pistas de alta velocidad en la capa superior se debe evitar el uso de vías porque introduce inductancia parasita al circuito. De tal manera que las interconexiones son limpias entre el aislador, los circuitos transmisor y receptor del enlace de datos. También, la colocación de un plano de tierra sólido junto a la capa de señal de alta velocidad establece una impedancia controlada para las interconexiones de la línea de transmisión. Esto proporciona una excelente ruta de baja inductancia para el flujo de corriente de retorno.

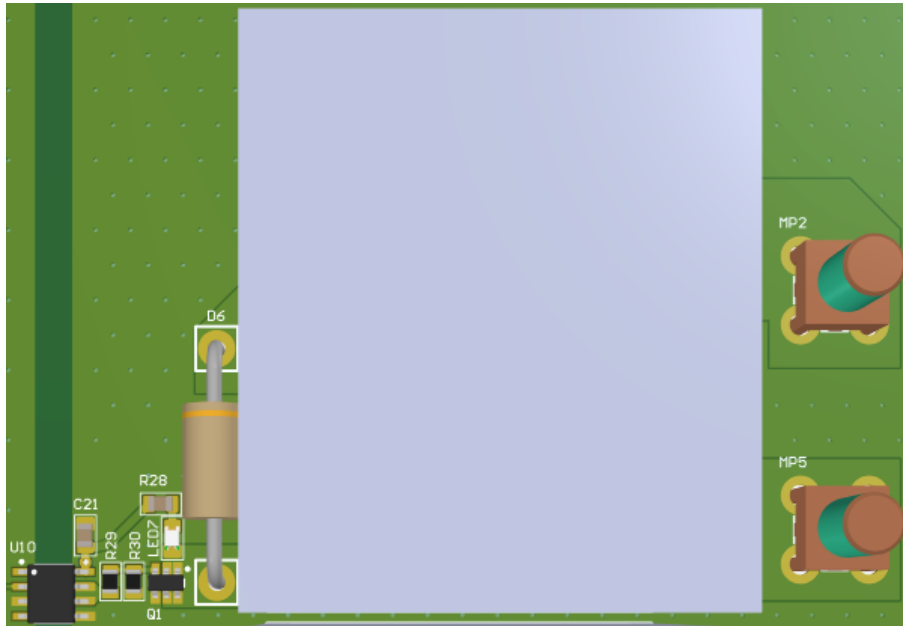
También, se muestra el bosquejo de la ubicación exacta de la pantalla LCD en color blanco. A pesar de que el *layout* se observa sobre los componentes, la pantalla LCD se localiza a 8,5 milímetros sobre la superficie. Por último, las protecciones ESD como de supresión de transientes, dadas por los circuitos integrados ESDS312 y TVS0500, se deben localizar contiguo a las entradas de alimentación. Esto con el objeto de desviar cualquier evento de sobrevoltaje o sobrecorriente hacia la fuente que lo ocasiona.

4.3.3. Módulo de salida

El módulo de salida está relacionado con la interfaz de potencia, la cual a su vez se divide en dos partes: el interruptor de potencia del inversor y del generador monofásico. Ambos circuitos se explican en la sección 3.5.4. Se tienen 5 módulos de salida con una función equivalente. Los primeros cuatro poseen los mismos componentes, ocupando un área de 80 x 40 milímetros cuadrados. Por último, el quinto modulo ocupa un área de 40 x 35 milímetros cuadrados. En las dos imágenes siguientes se muestra cada circuito impreso para esta etapa.

La Figura 66 se refiere al circuito impreso que permite el paso desde el inversor de corriente hacia el tablero eléctrico, al conectar el cableado externo en los tornillos llamados MP2 y MP5. El relé electromecánico es el cuadrado de color gris que ocupa la mayor cantidad de espacio, pero que hace la función más importante, porque posee los contactos como también un primer aislamiento galvánico del circuito restante. Los componentes ubicados del lado izquierdo se colocan cercanos al relé, porque evita la creación de cualquier inductancia parasita que afecte el paso de corriente en la bobina interna. En la PCB se observa una franja de separación de 3.1 mm, que aísla los circuitos que poseen las referencias de tierra (GND1, GND2), en color verde oscuro.

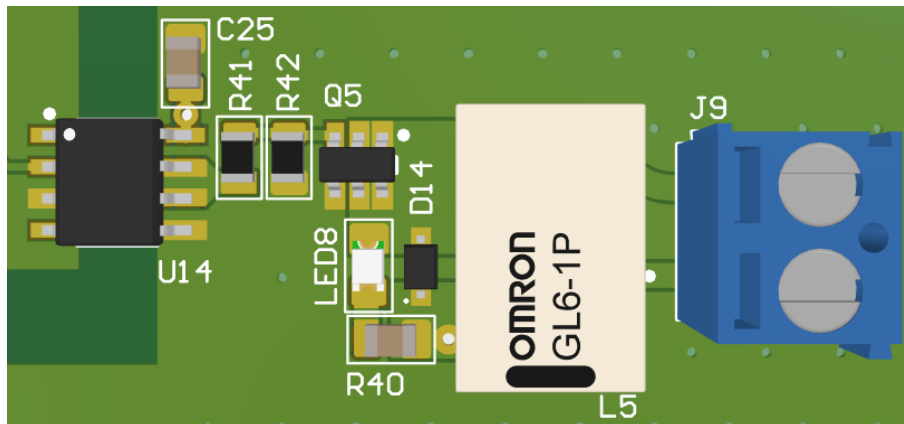
Figura 66. **Circuito impreso del módulo de salida para la aplicación relé de alta potencia**



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

De manera semejante, en la Figura 67 se muestra el circuito impreso para la conexión de las terminales de baja potencia hacia el contacto seco del generador monofásico propuesto en el capítulo 2. La distribución de los componentes es muy parecida con la Figura 66. El conector J9 es el mismo modelo que para los bloques de alimentación.

Figura 67. **Circuito impreso del módulo de salida para la aplicación relé de baja potencia**



Fuente: elaboración propia, empleando Altium Designer versión 21.1.0.

4.4. **Comparación del dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos**

El dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos propuesto en este trabajo realiza dos funciones: monitoreo y transferencia automática. Una solución en la industria solar es realizar ambas funciones separadas. Entonces, la comparación a presentar se divide en dos partes, la primera consiste en mostrar un dispositivo de monitoreo, la segunda un tablero de transferencia.

Se realiza una comparación del dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos con un dispositivo disponible en el mercado. Cabe recalcar que no se encuentra uno con las mismas especificaciones que las descritas en este

trabajo, por lo tanto, el precio final puede variar para cada solución o aplicación. El dispositivo por comparar es de la marca ACKSEN.⁶⁸

Tabla XXVIII. **Comparación técnica del dispositivo de parámetros energéticos**

Información técnica	Especificaciones	
Funciones básicas	Dispositivo de parámetros energéticos	Electroder modelo 3VA
Número de canales DC	4	2
Máximo voltaje DC por canal	600 VDC	300 VDC
Corriente nominal de entrada por canal	10 ADC	10 ADC
Grado de protección	NA	IP43
Capacidad de la memoria	NA	32000 valores
Frecuencia de muestreo	1Msps	800Msps
Número de canales AC	1	NA
Contactores	5	NA
Máximo voltaje AC por canal	240 AC	NA
Máxima corriente AC por canal	>100A	NA
Interfaz de comunicación	<i>Bluetooth</i>	USB
Precio	\$500	\$1 550

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020, con información de <https://electrocorder.com/products/electrocorder-dc-3va-dc-energy-logger-for-industry-and-light-commercial>. Consulta: 16 de mayo de 2021.

La solución actual para la transferencia es por medio de un tablero eléctrico de transferencia automática, que consta de contactores y las conexiones lógicas

⁶⁸ Acksen. *Electrocorder DC-3VA DC Energy Logger for Industry and Light Commercial*. <https://electrocorder.com/products/electrocorder-dc-3va-dc-energy-logger-for-industry-and-light-commercial>. Consulta: octubre 2020.

hacia un PLC. Si la energía eléctrica se corta entonces se pone en marcha en forma automática un generador.

Figura 68. **Tablero de transferencia automático**



Fuente: BAPER. *Tablero de transferencia automático TTA*. <https://baper.net/producto/tablero-de-transferencia-automatico-tta/> Consulta: mayo de 2021. p. 1.

Un *PLC* puede tener un costo mínimo de dos mil quetzales⁶⁹. Por lo tanto, el costo de un tablero de transferencia con un *PLC* se considera de un costo mayor en comparación con el dispositivo de monitoreo propuesto, tanto por sus componentes como por sus materiales de construcción.

⁶⁹ Esinsa. *Cotizacion*. http://guatecompras.gt/ofertas/files/1255/2443%40A10-1704018_IRTRA_MCC_RCC_08-05-2017.pdf. Consulta: octubre 2020.

5. DISEÑO DE LA LÓGICA DE CONTROL DEL DISPOSITIVO DE MONITOREO DE PARÁMETROS ENERGÉTICOS

Un dispositivo electrónico está compuesto por dos conjuntos, el primero es el *hardware*, que lo componen cada uno de los elementos físicos descritos en el capítulo 4; el segundo es el *firmware*, el cual se encarga de realizar la lógica de control de bajo nivel en los circuitos electrónicos.

El *firmware* posee el conjunto de instrucciones para controlar el *hardware*, también se almacena en un espacio de memoria no volátil. El *firmware* responde a los eventos externos para modificar el estado actual del procesamiento interno del dispositivo específico, de esta manera se diferencia del software en una computadora, siendo este último una capa superior para las aplicaciones de alto nivel. Un ejemplo de un *firmware* puede ser el programa que controla el teclado de una computadora, el cual se encarga de interpretar cada letra que se presiona con los dedos por medio de la transformación en una señal eléctrica, que luego es transmitida y procesada por una unidad de control interna, de manera que puede ser utilizada por un software como Microsoft Word.

El *firmware* tiene vital importancia en el desarrollo del dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos. El *firmware* se desarrolla para la digitalización, el procesamiento y la comunicación de las señales analógicas de corriente o voltaje que provienen de los paneles solares, junto al del generador monofásico. Así también se puede automatizar la activación o desactivación del suministro de energía auxiliar. Por lo tanto, se dedica un capítulo completo para su desarrollo.

5.1. Especificaciones de la lógica de procesamiento, de automatización y comunicación

Las especificaciones para el *firmware* del dispositivo de monitoreo tienen su base en la cantidad de memoria no volátil disponible en cada microcontrolador, también llamada *FRAM* (*Ferroelectric Random Access Memory*, en inglés), siendo una tecnología a la vanguardia por su consumo bajo de potencia, resistente a la radiación, como a interferencias electromagnéticas y con una capacidad de soportar 10^{15} ciclos de escritura, entre otras características. La hoja de datos del MSP430FR2155 muestra que tiene 32 KB disponibles de memoria, mientras que el MSP430FR2476 muestra que tiene 64 KB disponibles de memoria; ambas para programas constantes o almacenamiento de información.

Para el procesamiento de las señales un requerimiento necesario es la frecuencia de muestreo. El teorema de *Nyquist* afirma que el muestreo debe realizarse al menos con el doble de la frecuencia máxima contenida en la señal, con el fin de recuperar totalmente la señal a partir de las muestras. Los microcontroladores poseen un módulo de conversión analógico a digital capaz de tomar muestras a una velocidad de 200 000 muestras por segundo.

Una especificación importante es el trabajo modos de bajo consumo en momentos de espera o reposo del dispositivo, pero con una respuesta rápida y efectiva en momentos de críticos para la aplicación.

La eficiencia del programa a implementar se considera en el diseño. Esto quiere decir que la estructura del código se debe realizar en orden a mejorar la velocidad de respuesta de las instrucciones porque se pretende su uso para eventos de manejo de energía eléctrica. Para cumplir el requerimiento de

eficiencia se evitan retrasos innecesarios en la ejecución del programa donde se procura el uso de interrupciones no enmascarables. Aunque la velocidad de ejecución de los microcontroladores no se puede cambiar o mejorar, tiene gran importancia dos requerimientos específicos de la hoja de datos: la velocidad de reloj y la memoria volátil de acceso aleatorio (*RAM*, por sus siglas en inglés).

Por último, la comunicación con los distintos periféricos debe ser con la utilización de protocolos estándar en la industria, entre ellos: UART, SPI, I2C, CAN, entre otros. Esta especificación tiene la finalidad de que el código pueda ser compatible con tecnologías similares, como también comprensible por ingenieros de diseño electrónico.

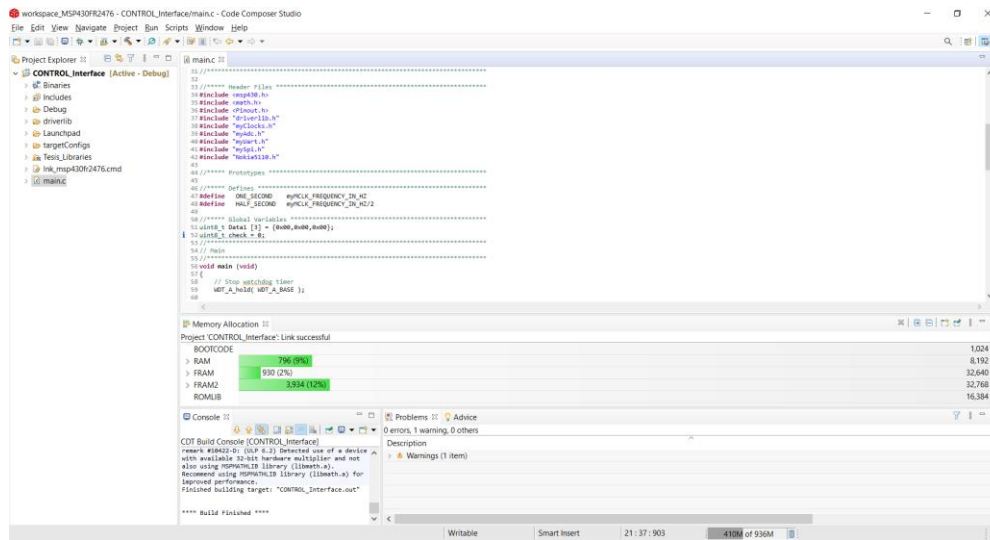
5.2. Descripción del entorno de programación

El desarrollo de los programas para el dispositivo de monitoreo de parámetros eléctricos tiene dos utilidades, para su uso local y remoto. En el ámbito local se maneja el entorno de programación de uso libre llamado Code Composer Studio de la marca Texas Instruments. En el ámbito remoto se utiliza el entorno de programación Pycharm con su versión de código abierto.

5.2.1. Entorno de desarrollo para la aplicación local

Según la página oficial de Texas Instruments, Code Composer Studio (CCS) es un entorno de desarrollo integrado (IDE) que admite todos sus procesadores o microcontroladores. CCS posee un conjunto de herramientas para desarrollar o depurar aplicaciones integradas. Incluye un compilador C/C++ optimizado, un editor de código fuente, un entorno de construcción de proyectos, depurador y muchas otras características. CCS utiliza las ventajas de la plataforma de software Eclipse con las capacidades de depuración integradas avanzadas de TI.

Figura 69. Vista principal del entorno de programación Code Composer Studio

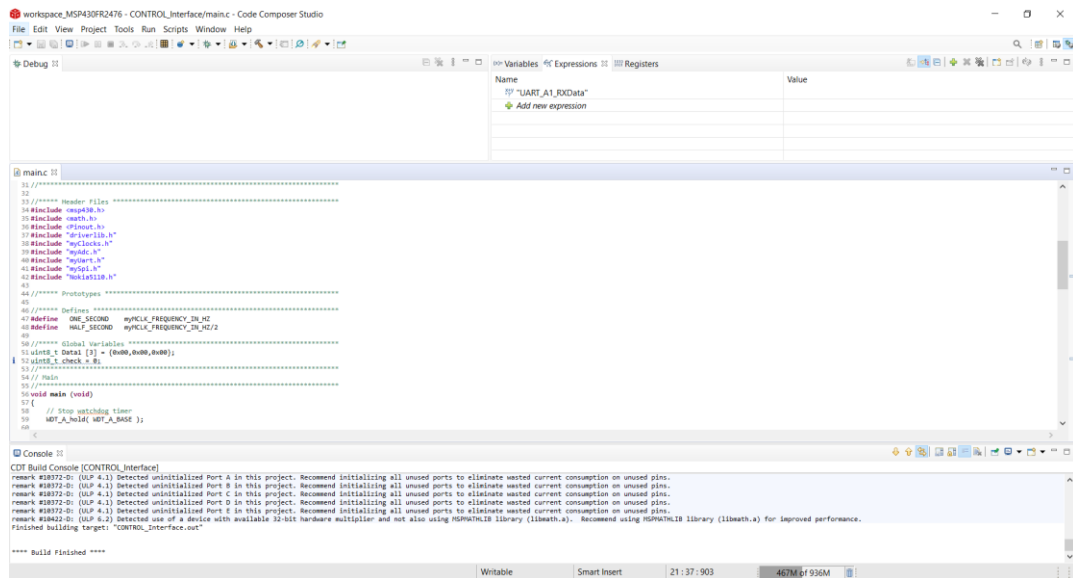


Fuente: elaboración propia, empleando Code Composer Studio versión 10.0.0.

La Figura 69 muestra el entorno de programación con base en el software Eclipse. Tiene las ventanas de explorador de proyectos, del editor de código, de la consola, del espacio de memoria y barras de botones para depuración del programa. Se pueden agregar otras ventanas disponibles según la función que se necesite.

La Figura 70 muestra el entorno de programación CCS en su vista de depuración. Se observa inicialmente en la barra superior los botones que sirven para iniciar, parar o avanzar en cada línea del código fuente; en la parte superior derecha se observa la ventana de las variables y expresiones a depurar. En esta vista se pueden agregar puntos de interrupción en cualquier parte del código fuente que permiten ver los valores actuales de las variables en depuración.

Figura 70. Vista de depuración del entorno de programación Code Composer Studio



Fuente: elaboración propia, empleando Code Composer Studio versión 10.0.0.

Entre los microcontroladores soportados por CCS se encuentran la gama completa de MSP430. Este tipo de microcontroladores trabajan con programación a nivel de registros, esto quiere decir que se habilitan las entradas o salidas de los periféricos con un procedimiento de configuración descrito en la hoja de datos. Por ejemplo, para habilitar un pin como salida digital, los pasos a seguir son: primero, habilitar el reloj del sistema para el puerto; segundo, habilitar el pin como salida y finalmente habilitar el pin como encendido o apagado.

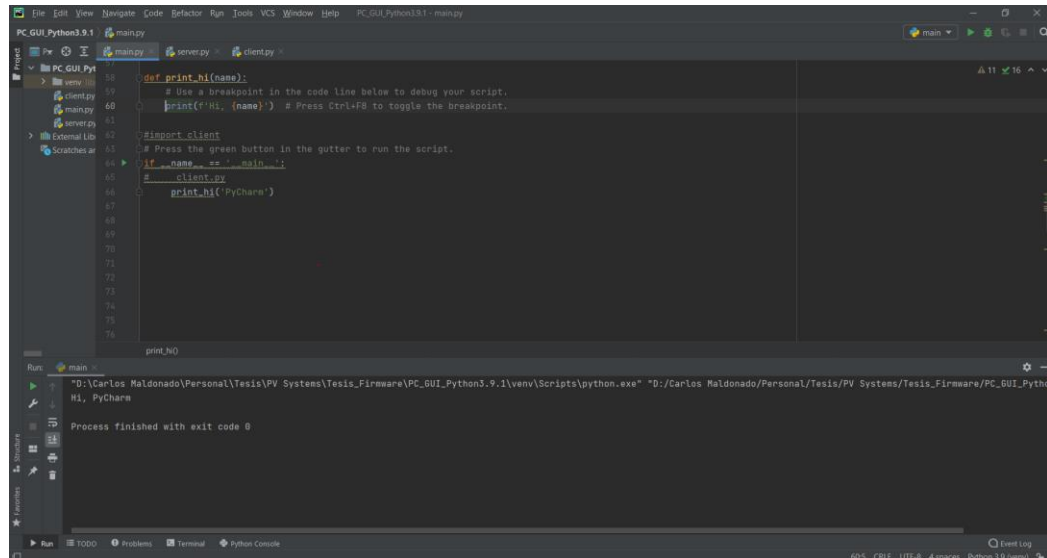
El lenguaje que se utiliza es C, pero aplicado a registros directamente. Se puede deducir que para aplicaciones más extensas donde se involucran diferentes funcionalidades, protocolos y procesos a realizar, se puede complicar el desarrollo del *firmware*.

De tal manera que el equipo de desarrollo de software de Texas Instruments tiene disponibles una interfaz de programación para aplicaciones de alto nivel (*HLAPI*) denominada *Driver Library*, que permite comunicarse de manera amigable y ordenada con el hardware del microcontrolador.

5.2.2. Entorno de desarrollo para la aplicación remota

Según la página oficial de *Jet Brains* el entorno de programación Pycharm es un entorno de desarrollo integrado (*IDE*) para programadores del lenguaje Python. Pycharm tiene todas las herramientas profesionales como un editor de código fuente inteligente, un depurador gráfico y ejecutor de pruebas, un inspector de código, con compatibilidad con *VCS* (*versión control system*, por sus siglas en inglés), entre otros. Tiene una versión comunitaria de código abierto con características limitadas, con una versión pagada con capacidades para desarrollo web y bases de datos *SQL*.

Figura 71. Vista del entorno de desarrollo Pycharm



Fuente: elaboración propia, empleando Pycharm versión 2020.3.5, 2020.

La Figura 71 muestra la vista principal del *IDE* Pycharm, se pueden observar las ventanas siguientes: la jerarquía del proyecto, el código fuente o *scripts*, la consola de ejecución, la terminal, entre otros. Pycharm está pensado para manejarse por medio de comandos desde el teclado, por lo que su interfaz se muestra simple a la vista, pero con funcionalidades avanzadas descritas en la barra de menús, como la capacidad para depuración del código.

5.3. Diseño del módulo de control del procesamiento y automatización

Esta sección se divide en cinco partes:

- La primera describe el esquema general del *firmware*;

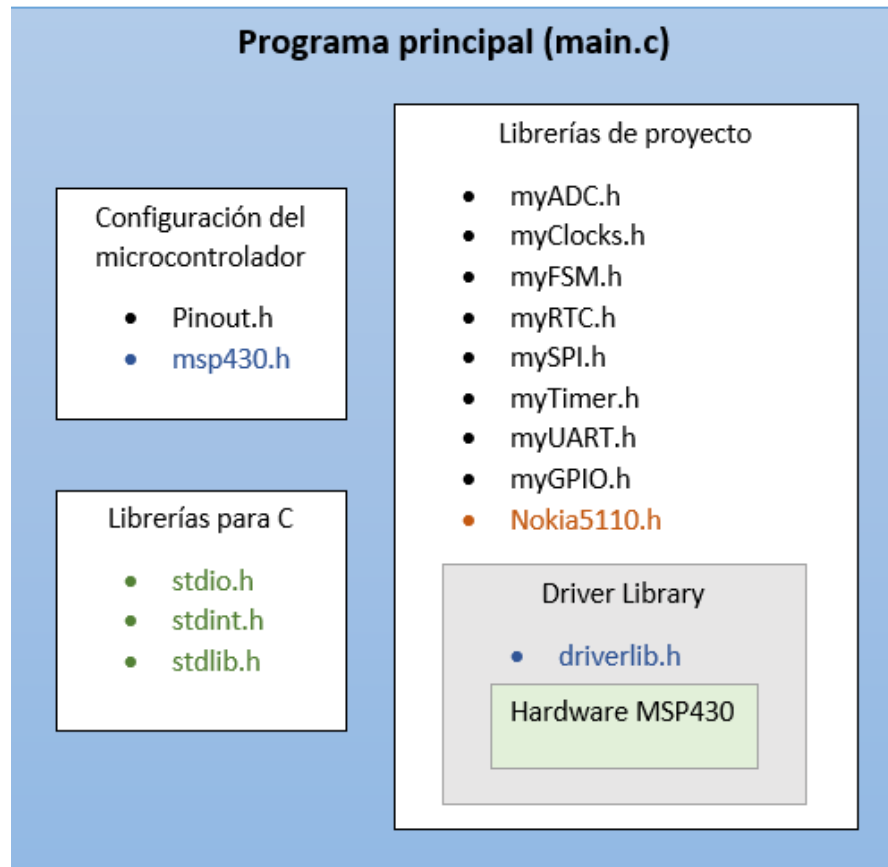
- La segunda y la tercera consideran los procesos en segundo y en primer plano del *firmware* de conversión analógica a digital.
- La cuarta consiste en la descripción del programa principal.
- La quinta consiste en la descripción del flujo de información en la comunicación por UART del *firmware* de control principal.

5.3.1. Descripción general de la disposición de las librerías del *firmware*

El *firmware* para los periféricos comprende el código fuente, junto a las librerías escritas en lenguaje C utilizadas en ambos microcontroladores. El *firmware* hace uso de librerías de Texas Instruments para la configuración de los periféricos, pero también se escriben librerías adicionales que permite una lectura comprensible del código fuente, manipulación o acceso a los periféricos. Entonces, para alcanzar dicho propósito se vinculan ordenadamente el programa principal y la configuración de los registros.

La Figura 72, describe como se dispone la llamada a las funciones. También refiere a las definiciones escritas en lenguaje C para el funcionamiento del *hardware* del microcontrolador MSP430. El recuadro de mayor tamaño llamado programa principal hace las llamadas a las librerías en los recuadros que están contenidos en él: primero, la configuración de pines de entrada o salida del microcontrolador a utilizar; segundo, las librerías propias del lenguaje C; y tercero, las librerías escritas por el diseñador.

Figura 72. Descripción de la jerarquía del *firmware*



Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

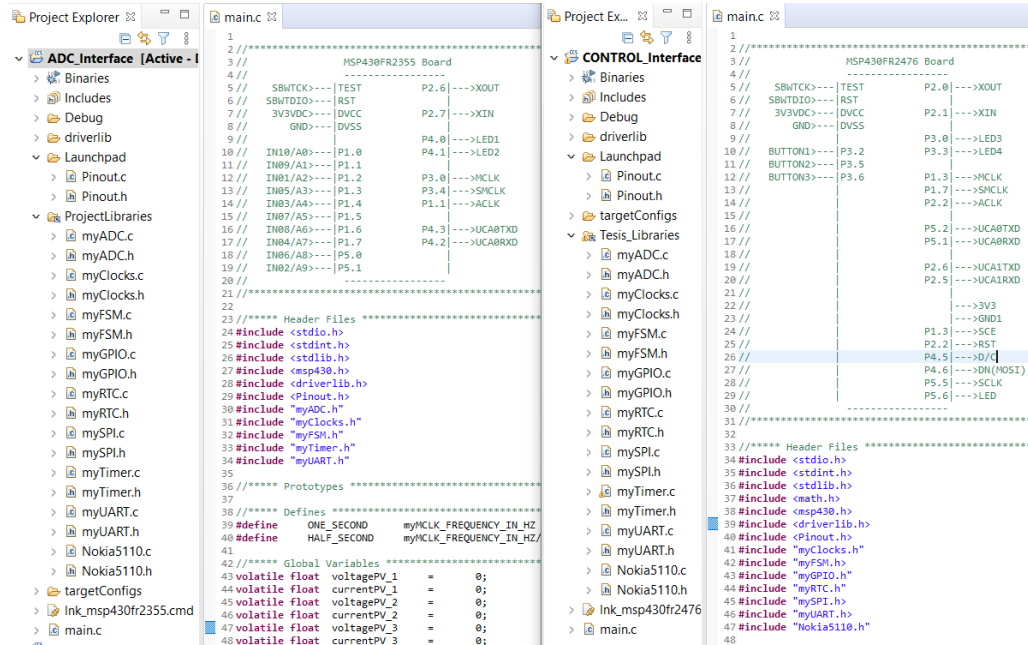
En la misma figura se observa en letras color azul oscuro las librerías que son escritas por Texas Instruments (*msp430.h* y *driverlib.h*). Los nombres en color verde oscuro son las librerías estándar para lenguaje C. La librería en color naranja oscuro es una librería escrita por el PhD Jonathan Valvano, profesor de la Universidad de Texas Austin, para configurar la pantalla LCD Nokia 5110 en la tarjeta de desarrollo TIVA C, pero que ha sido modificada en este trabajo aplicada al microcontrolador MSP430. Por último, los nombres escritos en color negro son

las librerías escritas para uso específico del dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos.

Las librerías de proyecto definen las funciones para configurar y controlar los periféricos, tales como: ADC, SPI, UART o GPIO. Así como, los procesos de temporización internos en los módulos TIMER y RTC (*Real Time Clock*). El control de las banderas, como del flujo de los procesos se define en la librería *myFSM.h*.

Cabe mencionar que la Figura 72 solamente representa la jerarquía en la llamada de las funciones, junto al contenido en cada proyecto. Entonces, en la Figura 73 se observa la inclusión de las librerías utilizadas en cada código principal, de acuerdo con los periféricos útiles en cada microcontrolador. En ambos, es diferente la disposición, como la configuración de los pines, por eso se crea una carpeta para cada uno llamada *LaunchPad* con la librería *Pinout.h*, y su respectivo código fuente.

Figura 73. Librerías de proyecto para los microcontroladores MSP430FR2155 y MSP430FR2476



Fuente: elaboración propia, empleando Code Composer Studio versión 10.0.0.

Es posible escribir las mismas librerías para ambos microcontroladores, porque ambos pertenecen a la misma familia MSP430FRxxxx. Este hecho da lugar a que el nombre de los registros de configuración sea el mismo, por lo que, no existe la necesidad de crear un código diferente para configuraciones de los puertos. También se aprovechan las capacidades de Code Composer Studio para realizar una referencia de ambos proyectos hacia la misma ubicación fuente de las librerías. Por último, todo el desarrollo ayuda a mantener ordenado el *firmware*, en caso se contemple aumentar las capacidades del dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos.

5.3.2. Proceso en segundo plano del *firmware* de la interfaz ADC

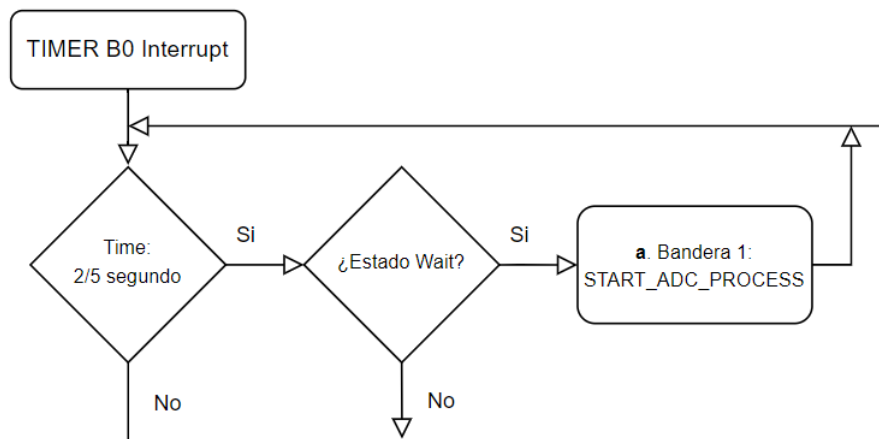
La interfaz ADC se refiere al microcontrolador MSP430FR2155, junto a sus conexiones externas, entradas de voltaje, indicadores led, junto a la conexión por UART hacia la interfaz de control. El *firmware* en segundo plano consiste en el código escrito en las interrupciones. Entonces, esta sección da a conocer el código fuente para manejar de manera ordenada, como efectiva los eventos ocasionados por las interrupciones de *Timer* y UART, que, a su vez, afectan el curso normal del programa en primer plano. La explicación de dichos procesos permite una mejor comprensión del proceso en primer plano.

La frecuencia configurada para la interrupción del *Timer* B0 es de 10 Hz. Entonces, el proceso de toma de datos en las entradas ADC se realiza cada 0,4 segundos, o 2,5 Hz. Se decide utilizar este valor para evitar traslape en la ejecución del programa principal al transcurrir un segundo. Existe un lapso de 0,2 segundos antes y después de transcurrido 1 segundo para poder realizar alguna tarea solicitada por el programa principal, sin interrumpir el proceso de ADC.

También, dado que las señales son en corriente directa, como también previamente filtradas, es sencillo deducir que no es necesario mantener una frecuencia de muestreo elevada, por ejemplo, con el teorema de *Nyquist*. Este proceso solo se realiza para señales en corriente alterna. Aunque en la entrada del dispositivo se toman muestras de las señales de voltaje o corriente provenientes del generador monofásico, estas pasan primero por el *hardware* diseñado en el capítulo 3, específicamente por los integrados ACS770 y AD8436.

Para conocer el tiempo que transcurre dentro de la interrupción, se debe preguntar el valor actual del registro TBCCR0. Este registro inicialmente puede tener un valor máximo de 1 200, y representa el número de ciclos de reloj necesarios para completar la décima parte de un segundo (10 Hz). El valor corresponde a un reloj de 12 MHz. Entonces, la Figura 74 muestra que sí ha transcurrido 0,4 s, o bien 480 ciclos de reloj; además, el estado actual del programa se encuentra en espera de alguna acción, entonces, se debe habilitar la bandera que notifica el inicio del proceso ADC.

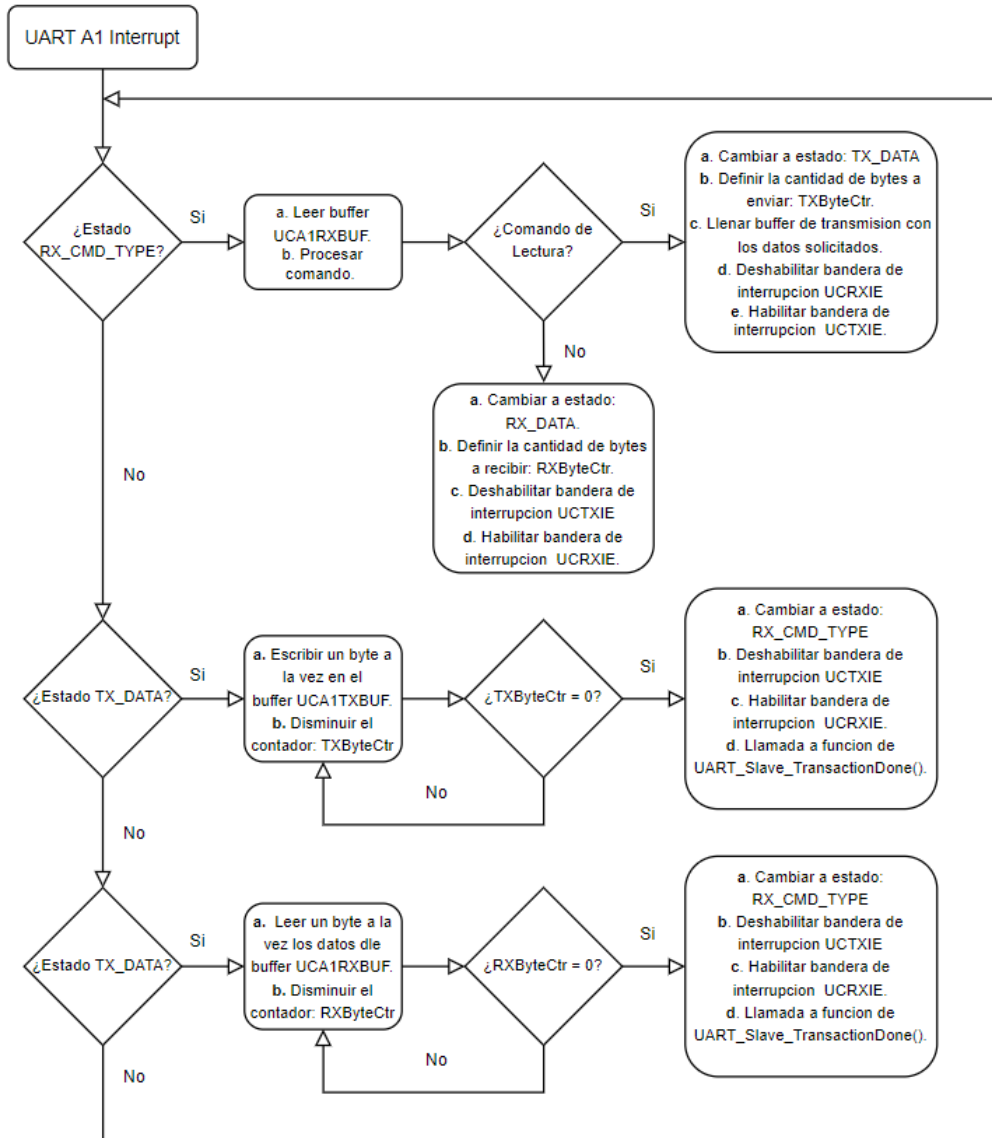
Figura 74. **Diagrama de flujo de la interrupción por *Timer* de la interfaz ADC**



Fuente: elaboración propia, empleando Draw.io versión 14.4.3.

El *firmware* de la interfaz ADC se comporta como un esclavo, está disponible en todo momento para recibir alguna solicitud desde el microcontrolador maestro. Para ello, la siguiente interrupción importante es la que se realiza para la comunicación UART.

Figura 75. Diagrama de flujo de la interrupción por UART de la interfaz ADC



Fuente: elaboración propia, empleando Draw.io versión 14.4.3.

La interrupción por UART realiza un proceso de lectura o escritura de cada *byte* de entrada o salida, respectivamente. El esquema que se presenta realiza

la comunicación de manera ordenada, segura y con la cantidad de errores mínimos o incluso nula.

La Figura 75 muestra 3 estados: el primero es el que permite la decodificación del comando recibido y asigna el siguiente estado para realizar una tarea de lectura o de escritura; el segundo estado es el que permite mantener la recepción *byte* por *byte* de la cadena de información entrante; el tercer estado es el realiza la escritura de los *bytes* hacia el *buffer* de transmisión. Una vez realizada la acción se hace la llamada a la función de transacción terminada, la cual puede activar la bandera de finalización de la comunicación (*UART_REQUEST*).

Se observa que para la recepción de los datos se verifica constantemente el conteo de *bytes* de salida; de manera contraria para la transmisión de los datos se verifica el conteo de *bytes* de entrada. Este comportamiento se realiza porque tanto en el programa del esclavo como del maestro estos son valores previamente definidos que obligatoriamente deben ser iguales en ambos microcontroladores o entidades. Por ejemplo, si la variable TXByteCtr es igual a 6 *bytes*, entonces se conoce que el maestro envía dicha cantidad, por lo que, el esclavo debe realizar el conteo descendentemente desde 6 hasta 0 que indica la recepción completa de la trama de datos.

5.3.3. Proceso en primer plano del *firmware* de la interfaz ADC

El *firmware* en primer plano consiste en la lógica de control da lugar a dos acciones importantes, la primera consiste en el procedimiento para la adquisición de las señales, el procesamiento de los datos obtenidos, y el cálculo de los valores de potencia; la segunda acción, es dar respuesta a cualquier comando de lectura o escritura recibido en la interrupción UART. En resumen, es el código

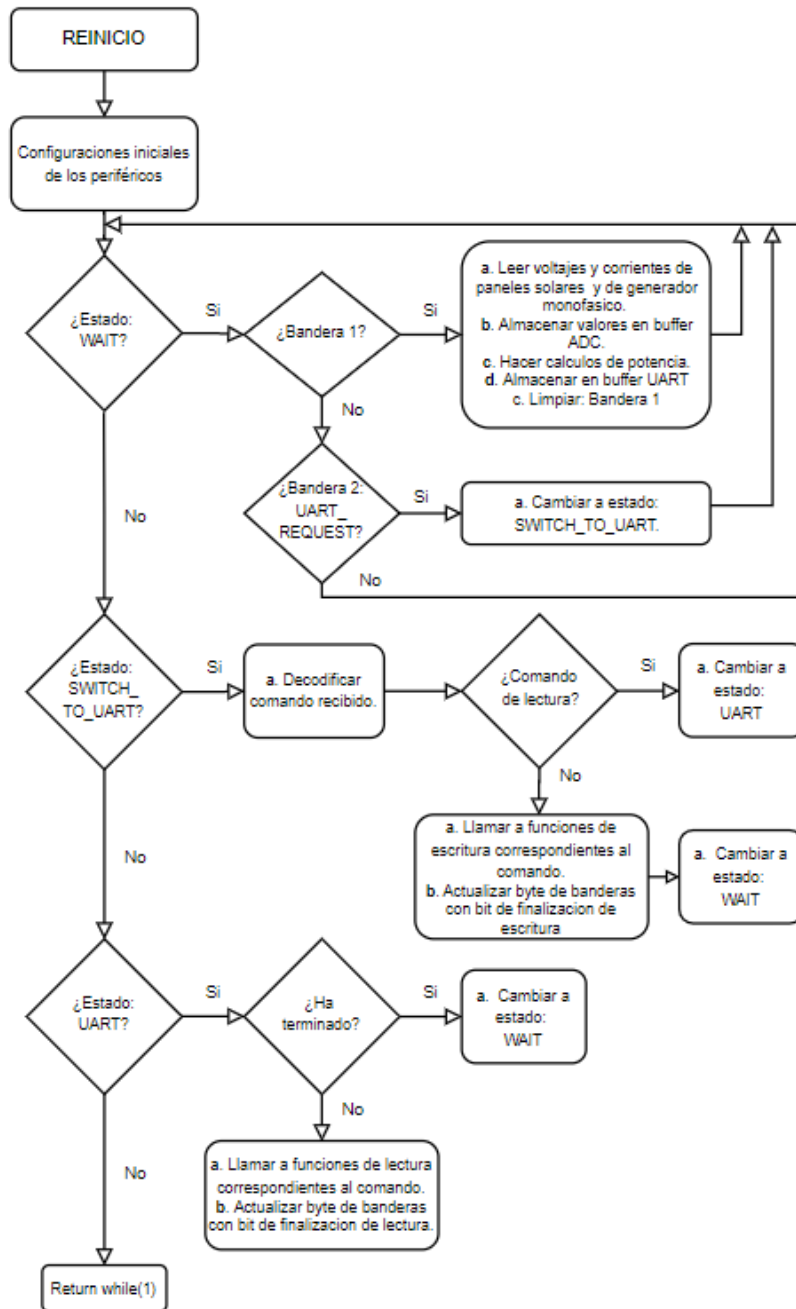
que se encuentra en el archivo fuente llamado *main.c*. Este código no contempla lo escrito en las interrupciones ADC, *Timer* o UART.

En la Figura 76 se observa el algoritmo para el *firmware* en primer plano. A partir del reinicio del sistema, se realizan las configuraciones de los periféricos. Seguidamente se contempla una máquina de estados finitos definida por *software*, la cual consta de tres estados: *WAIT*, *SWITCH_TO_UART* y UART.

El estado llamado *WAIT*, constantemente realiza la lectura de las banderas llamadas *UART_REQUEST* o *START_ADC_PROCESS*, que se activan en los procesos de segundo plano, o interrupciones. El segundo estado decodifica el comando recibido por UART, si es un comando de escritura, realiza la función correspondiente y regresa al estado *WAIT*, pero si es un comando de lectura es necesario realizar el cambio ultimo estado. El estado UART tiene la característica de realizar un procedimiento de devolución de la información solicitada, lo cual conlleva la llamada a la función de lectura de los datos en el *buffer* ADC o bien, de algún parámetro de configuración o calibración del sistema. Por último, se notifica que el proceso ha terminado en un arreglo de banderas que puede ser solicitado por el programa del microcontrolador maestro o principal.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que ejemplifica el proceso en primer plano.

Figura 76. Diagrama de flujo del proceso en primer plano del *firmware* de la interfaz ADC



Fuente: elaboración propia, empleando Draw.io versión 14.4.3.

Luego de que la bandera 1 es acertada se procede a realizar un procedimiento de 4 pasos que prepara los parámetros energéticos necesarios para el dispositivo. Los pasos 1 a 3 son los más importantes: la adquisición de las señales al cálculo de los parámetros.

5.3.3.1. Adquisición de las señales por ADC

La adquisición de las señales se realiza con un ADC de 10 bits configurado con una referencia de voltaje en 3,3 V, se establece el tiempo de muestreo y retención a 16 ciclos de reloj.

Para obtener los valores de corriente o voltaje se realiza el procedimiento siguiente: se obtiene el valor en bits en un rango de 0 a 1 023, luego se realiza la conversión a un valor de voltaje o corriente utilizando la *ecuación 23* de la sección 3.5.1.1.2. Por ejemplo, si se mide un valor de ADC igual a 589, entonces el valor de voltaje correspondiente es de $V_{ADC(I_P)} = B_{ADC} * \frac{3,3 V}{2^n} = 589 * \frac{3,3 V}{1\ 023} = 1,9 V$. Este procedimiento se realiza para las 8 entradas de los paneles solares, como también para las 2 entradas de voltaje y corriente del generador monofásico.

5.3.3.2. Cálculo de los parámetros energéticos

Los parámetros energéticos por calcular son la potencia de entrada de cada panel solar, junto a la potencia del generador monofásico. Para ello es necesario primero calcular el valor de corriente en amperios y el voltaje en voltios, de cada entrada.

5.3.3.2.1. Cálculo de la corriente en DC y AC

El sensor de corriente ACS770 utilizado en el diseño tiene una ecuación ideal característica para realizar la conversión de voltaje en el ADC a una corriente real. La ecuación recibe como entrada un valor entre 0 a 1 023, lo convierte a un valor de 0 a 5 V, para luego retornar un valor en el rango de 0 a 50 A, o en su defecto, de 0 a 200 A, dependiendo del modelo del circuito integrado. Dicha ecuación es la número 23, que se puede observar con mayor detalle en de la sección 3.5.1.1.2

La Figura 77 muestra la función que realiza el cálculo en el *firmware*. La función realiza el proceso de cómputo de la corriente utilizando todos los parámetros en una escala de milivoltios. Esto permite disminuir el consumo de potencia del microcontrolador cuando se utilizan variables de tipo *float*. La Tabla XXIX, también ejemplifica el despeje de la ecuación descrita en la página 21 de la hoja de datos del sensor de corriente junto a la ecuación del divisor de voltaje que convierte de 5 V a 3,3 V para ser leídos por el microcontrolador. También se puede ver que el valor máximo de salida tiene cierto error en la lectura, pero que se puede corregir utilizando la ecuación 17, de la sección 3.5.1.1.1 acerca del error total de salida del sensor de corriente.

Figura 77. Función para el cálculo de corriente con el sensor ACS770

```

//*****
// Compute Current
//*****
uint32_t Get_PV_Input_Current_Value(uint8_t port)
{
    volatile uint32_t current_sensor = 0;
    volatile uint32_t bits_sensor = 0;

    //*****
    // The value is given in mV or mA. Avoid using variables such as floats or decimals because they consume a lot of space.
    //
    // V_BITS
    bits_sensor = ADC10_Get_PV_Input_Current(port);

    // V_ADC (mV)
    // V_ADC = (( (1000 * 1000 * 3.3V) / 1023) * V_BITS) /1000
    current_sensor = ((3300000 / 1023) * bits_sensor) / 1000;

    // I (mA)
    // IF
    // V_IOUT_IDEAL = V_IOUT(Q) + (SENS_IDEAL * I)          ---> DATASHEET PAGE 21
    // V_ADC = (R2 / (R1 + R2)) * V_IOUT_IDEAL          ---> VOLTAGE DIVIDER FROM 5V TO 3.3V
    // THEN
    // V_IOUT_IDEAL = ((R1 + R2) / R2) * V_ADC
    // V_IOUT(Q) + (SENS_IDEAL * I) = ((R1 + R2) / R2) * V_ADC
    // (SENS_IDEAL * I) = ((R1 + R2) / R2) * V_ADC - V_IOUT(Q)
    // I = (((R1 + R2) / R2) * V_ADC - V_IOUT(Q)) / SENS_IDEAL
    current_sensor = (((1000*(R1 + R2)) / R2)*current_sensor - (1000 *INACTIVE_VOLTAGE_VALUE)) / (1000*CURRENT_SENSITIVITY_VALUE);
    //*****

    if (current_sensor < 1)
    {
        current_sensor = 0;
    }
    else if (current_sensor > 55)
    {
        current_sensor = 55;
    }
    return current_sensor;
}

```

Fuente: elaboración propia, empleando Code Composer Studio versión 10.0.0, 2020.

Las variables R1, R2 son las resistencias del divisor de voltaje de entrada, se puede revisar el diseño en el capítulo 3 para conocer el valor exacto. Para los valores de las definiciones *INACTIVE_VOLTAGE_VALUE* y *CURRENT_SENSITIVITY_VALUE*, se multiplican por 1 000, porque se pretende evitar utilizar variables tipo *float* en los cálculos. En la tabla siguiente se describen los valores. Así también, el voltaje inactivo para el sensor unidireccional es de 0,5 V, y para el sensor bidireccional es igual a $VCC/2$, que, para una fuente de 5 V, resulta en un valor de 2,5 V.

Tabla XXIX. **Definición de los parámetros constantes del sensor ACS770**

Parámetro	ACS770LCB-050U-PFF-T	ACS770LCB-200B-PFF-T
INACTIVE_VOLTAGE_VALUE	500 (0,5 V)	250 (2,5 V)
CURRENT_SENSITIVITY_VALUE	40 (0,04 V/A)	10 (0,01 V/A)

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

5.3.3.2.2. Cálculo del voltaje en DC

La medición de voltaje DC para los paneles solares se describe en la sección 3.5.1.2. Se recuerda que después de la conexión del divisor de alto voltaje está un filtro pasa bajas de segundo orden con un amplificador en modo seguidor emisor. La única ganancia por considerar es la que convierte la señal de entrada máxima de 600 V a 3,3 V. Se utiliza una resistencia *pull-up* de 500 M Ω (R4), y una resistencia *pull-down* de 2,7 M Ω (R3).

Los valores de voltaje de panel tienen valores máximo y mínimo, por lo que se utiliza una función condicional para que no existan en errores en las lecturas. Se puede observar que se utilizan datos enteros, esto para disminuir el consumo de potencia con el uso de números tipo *float*. Por lo que, las constantes primero se escalan, luego se definen así: $R3 = 2\,700\ \Omega$ y $R4 = 500\,000\ \Omega$.

Figura 78. Función para el cálculo de voltaje en DC

```
*****  
// Compute PV Voltage  
*****  
uint32_t Get_PV_Input_Voltage_Value(uint8_t port)  
{  
    volatile uint32_t voltage_sensor = 0;  
    volatile uint32_t bits_sensor = 0;  
  
    *****  
    bits_sensor = ADC10_Get_PV_Input_Voltage(port);  
    voltage_sensor = ((3300000 / 1023) * bits_sensor) / 1000;  
  
    // V (mV)  
    // V_ADC = ((R3 + R4) / R3) * voltage_sensor ---> VOLTAGE DIVIDER FROM 600V TO 3.3V  
    voltage_sensor = (((R3 + R4) / R3) * (voltage_sensor)) / 1000;  
  
    *****  
  
    if (voltage_sensor < 1)  
    {  
        voltage_sensor = 0;  
    }  
    else if (voltage_sensor > 600)  
    {  
        voltage_sensor = 600;  
    }  
    return voltage_sensor;  
}
```

Fuente: elaboración propia, empleando Code Composer Studio versión 10.0.0, 2020.

5.3.3.2.3. Cálculo del voltaje en AC

El propósito es conocer el voltaje de entrada del generador monofásico a partir de la lectura ADC del microcontrolador. Se utiliza el circuito sensor de voltaje AC que está descrito en la sección 3.5.1.3. Según la Tabla XIX de la misma sección, se observa que la conversión de amplitudes máximas y de tipo de señales de AC a DC, es de 340 V_{pp} a 3,3 VDC. Es necesario deducir una expresión matemática que permita un cálculo, al menos ideal, del voltaje medido por el sensor, respecto al voltaje leído por el microcontrolador.

Se recuerda que, la señal de voltaje AC tiene un valor RMS de amplitud 120 VAC medida con un multímetro, ahora bien, el voltaje de línea medido es de 340 V_{pp} , magnitud obtenida con la ecuación 24. La magnitud de 340 V_{pp} es imposible de convertir directamente con el sensor AD8436, porque solamente

tiene la capacidad de leer en un rango de voltaje diferencial de ($V_{EE} - 0,3 \text{ V}$ a $V_{CC} + 0,3 \text{ V}$). Los voltajes de alimentación, V_{EE} y V_{CC} pueden tener valores absolutos, que, según su hoja de datos, son de ($\pm 2,4 \text{ V}$ a $\pm 18 \text{ V}$) para una fuente dual, o de ($4,8 \text{ V}$ a 36 V) para una fuente simple. Por ejemplo, una señal de voltaje de entrada debe mantener su amplitud entre $-0,3$ a $5,1 \text{ V}$ para una fuente simple de 0 a 5 V .

Entonces, es conveniente en la práctica, escalar la señal de entrada hacia el rango de voltaje definido por la fuente de alimentación. Dicha tarea se realiza con un divisor de voltaje con capacidad para soportar voltajes elevados.

La operación de conversión se divide en dos partes, primero se analiza el divisor de voltaje. El resultado debe brindar una ecuación del escalado, en términos del voltaje de pico a pico.

El divisor de voltaje tiene la siguiente expresión matemática:

$$V_{INPUT_AD8436} = \frac{91k\Omega}{10M\Omega + 91k\Omega} (V_{PP}) \quad (\text{Ecuación 27})$$

Para un valor máximo de voltaje de línea $v = 340 \text{ Vpp}$, el resultado aproximado es de $V_{INPUT_AD8436} = 3,1 \text{ Vpp}$. El voltaje V_{OUT_AD8436} , es una señal en corriente alterna que está atenuada, pero que conserva su forma de onda senoidal en el rango de ($-1,55$ a $1,55 \text{ V}$).

La segunda parte del cálculo se realiza con el análisis del CI AD8436, que es capaz de realizar la conversión RMS directamente de la onda senoidal pura en su entrada. El voltaje RMS de la señal se obtiene teóricamente con la ecuación 9 de la sección 3.4.2, la cual define el valor RMS verdadero de una señal de

corriente alterna. La ecuación por resolver tiene una frecuencia de 60 Hz, y una amplitud (A) variante, que está definida de la manera siguiente:

$$V_{RMS} = \sqrt{60 \int_0^{1/60} [A * \text{Sen}(2 \pi 60)]^2 dt} \quad (\text{Ecuación 28})$$

Al sustituir la amplitud máxima $A = 1,55 \text{ V}$, entonces, el resultado de la ecuación anterior es de $V_{RMS} = 1,096 \text{ V}$. La ecuación 28 se utiliza para comprobar los resultados; pero en la práctica, el valor que se utiliza es el voltaje de salida del circuito integrado, que, a su vez, es capaz de leer el microcontrolador. La ecuación 28 sirve para calcular el voltaje AC RMS.

$$V_{AC_RMS} = \frac{10 \text{ M}\Omega + 91 \text{ k}\Omega}{91 \text{ k}\Omega} (V_{RMS_AD8436})$$

Así, por ejemplo, si $V_{RMS_AD8436} = 1,096 \text{ V}$, entonces $V_{AC_RMS} = 121,5 \text{ V}$.

Figura 79. **Función para el cálculo del voltaje en AC**

```
/*******  
// Compute GEN Voltage  
/*******  
uint32_t Get_GEN_Input_Voltage_Value(uint8_t port)  
{  
    volatile uint32_t voltage_sensor = 0;  
    volatile uint32_t bits_sensor = 0;  
  
    /*******  
    bits_sensor = ADC10_Get_PV_Input_Voltage(port);  
    voltage_sensor = ((3300000 / 1023) * bits_sensor) / 1000; //(mV)  
  
    // V (mV)  
    // V_ADC = ((R5 + R6) / R5) * voltage_sensor  
    voltage_sensor = (((R5 + R6) / R5) * (voltage_sensor)) / 1000;  
  
    /*******  
  
    if (voltage_sensor < 1)  
    {  
        voltage_sensor = 0;  
    }  
    else if (voltage_sensor > 125)  
    {  
        voltage_sensor = 125;  
    }  
    return voltage_sensor;  
}
```

Fuente: elaboración propia, empleando Code Composer Studio versión 10.0.0, 2020.

Las constantes se definen así: $R5 = 91\ 000\ \Omega$ y $R6 = 10\ 000\ 000\ \Omega$.

5.3.3.2.4. **Cálculo de potencia en DC**

Finalmente, uno de los valores más importantes es la potencia producida por los paneles solares, para ello se obtiene individualmente la potencia de cada panel solar y luego se realiza la sumatoria total. La potencia de entrada simplemente se define como la multiplicación de la corriente por el voltaje. Se escribe la función siguiente para ejemplificar el proceso de cálculo.

Figura 80. **Función para el cálculo de potencia de los paneles solares**

```
/**
 * Compute PV Power
 */
uint32_t Get_PV_Input_Power_Value()
{
    uint32_t pv_current_1 = 0;
    uint32_t pv_current_2 = 0;
    uint32_t pv_current_3 = 0;
    uint32_t pv_current_4 = 0;

    uint32_t pv_voltage_1 = 0;
    uint32_t pv_voltage_2 = 0;
    uint32_t pv_voltage_3 = 0;
    uint32_t pv_voltage_4 = 0;

    uint32_t pv_power_1 = 0;
    uint32_t pv_power_2 = 0;
    uint32_t pv_power_3 = 0;
    uint32_t pv_power_4 = 0;

    pv_current_1 = Get_PV_Input_Current_Value(PV1_CURRENT_SENSOR);
    pv_current_2 = Get_PV_Input_Current_Value(PV2_CURRENT_SENSOR);
    pv_current_3 = Get_PV_Input_Current_Value(PV3_CURRENT_SENSOR);
    pv_current_4 = Get_PV_Input_Current_Value(PV4_CURRENT_SENSOR);

    pv_voltage_1 = Get_PV_Input_Voltage_Value(PV1_VOLTAGE_SENSOR);
    pv_voltage_2 = Get_PV_Input_Voltage_Value(PV2_VOLTAGE_SENSOR);
    pv_voltage_3 = Get_PV_Input_Voltage_Value(PV3_VOLTAGE_SENSOR);
    pv_voltage_4 = Get_PV_Input_Voltage_Value(PV4_VOLTAGE_SENSOR);

    pv_power_1 = pv_current_1 * pv_voltage_1;
    pv_power_2 = pv_current_2 * pv_voltage_2;
    pv_power_3 = pv_current_3 * pv_voltage_3;
    pv_power_4 = pv_current_4 * pv_voltage_4;

    pv_total = pv_power_1 + pv_power_2 + pv_power_3 + pv_power_4;

    if (pv_total < 1)
    {
        pv_total = 0;
    }
    else if (pv_total > 15200)
    {
        pv_total = 15200;
    }
    return pv_total;
}
```

Fuente: elaboración propia, empleando Code Composer Studio versión 10.0.0, 2020.

El criterio para realizar el cambio a la fuente de energía auxiliar es cuando el valor de la variable pv_total reduce a un voltaje menor a 10 000 W, durante al menos 10 segundos de manera consecutiva.

5.3.3.2.5. Cálculo de potencia en AC

El ultimo cálculo importante es la potencia en AC, la cual se calculó multiplicando el voltaje rms y la corriente rms obtenidas en las funciones anteriores. El programa que explica dicho cálculo se muestra a continuación:

Figura 81. **Función para el cálculo de potencia del generador monofásico**

```

//*****
// Compute GEN Power
//*****
uint32_t Get_GEN_Input_Power_Value()
{
    uint32_t gen_current = 0;
    uint32_t gen_voltage = 0;
    uint32_t gen_power = 0;

    //*****
    gen_current = Get_GEN_Input_Current_Value(GEN_1_VOLTAGE_SENSOR);
    gen_power = Get_GEN_Input_Voltage_Value(GEN_1_CURRENT_SENSOR);
    gen_power = pv_current * pv_voltage;

    //*****

    if (gen_power < 1)
    {
        gen_power = 0;
    }
    else if (gen_power > 13300)
    {
        gen_power = 13300;
    }

    return gen_power;
}

```

Fuente: elaboración propia, empleando Code Composer Studio versión 10.0.0, 2020.

El criterio para mantener el voltaje del generador monofásico activo es cuando se solicita desde el programa principal y cuando el valor de la variable *gen_power* es mayor a 10 000 W.

5.3.4. Descripción del *firmware* de la interfaz de control

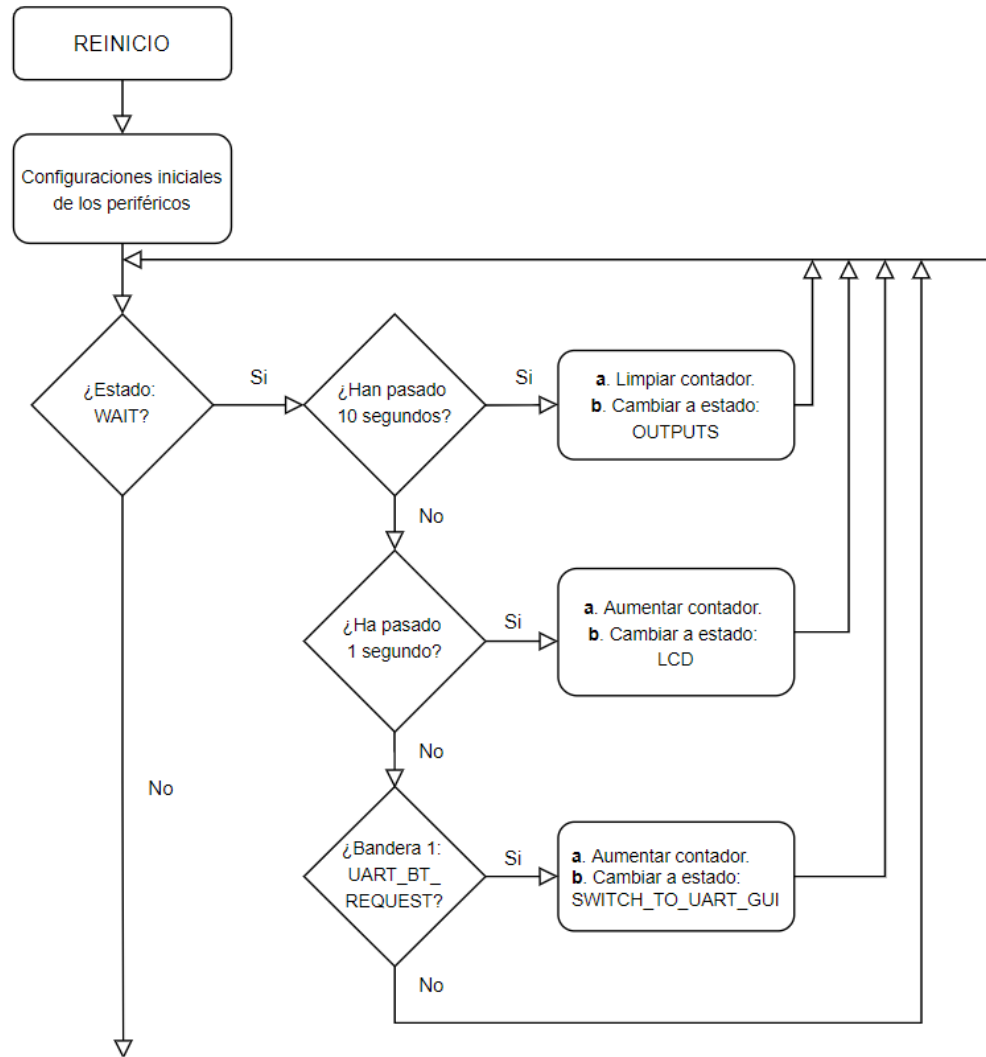
El *firmware* de la interfaz de control es el que actúa como maestro para la comunicación, también como interfaz mediadora entre el microcontrolador esclavo y el módulo bluetooth. El módulo bluetooth comunica cualquier evento hacia una interfaz gráfica de usuario. Cabe mencionar que dicha interfaz no se realiza en el presente trabajo, pero se dejan escritos los comandos que permiten acceder a las funciones de escritura o lectura.

Las figuras siguientes explican el algoritmo utilizado para el programa principal de la interfaz de control. Se divide en tres partes porque ello permite visualizar la máquina de estados definida por software de manera más amplia. La Figura 82 muestra la serie de acciones a realizar dependiendo del tiempo transcurrido o bien dependiendo de si se recibe una solicitud por UART desde el módulo bluetooth.

La Figura 83 muestra los estados *OUTPUTS* y *LCD*. El estado *OUTPUTS* realiza la función principal del proyecto, la cual es gestionar los voltajes de salida hacia los relés dependiendo de las lecturas de potencia provenientes del cálculo realizado en el microcontrolador esclavo. El estado *LCD* tiene vital importancia también, porque es el encargado de solicitar el nuevo parámetro energético al microcontrolador esclavo.

Por último, la Figura 84 muestra los últimos dos estados correspondientes a las funciones de lectura o escritura de datos provenientes del módulo bluetooth.

Figura 82. Diagrama de flujo del programa principal de la interfaz de control, parte 1

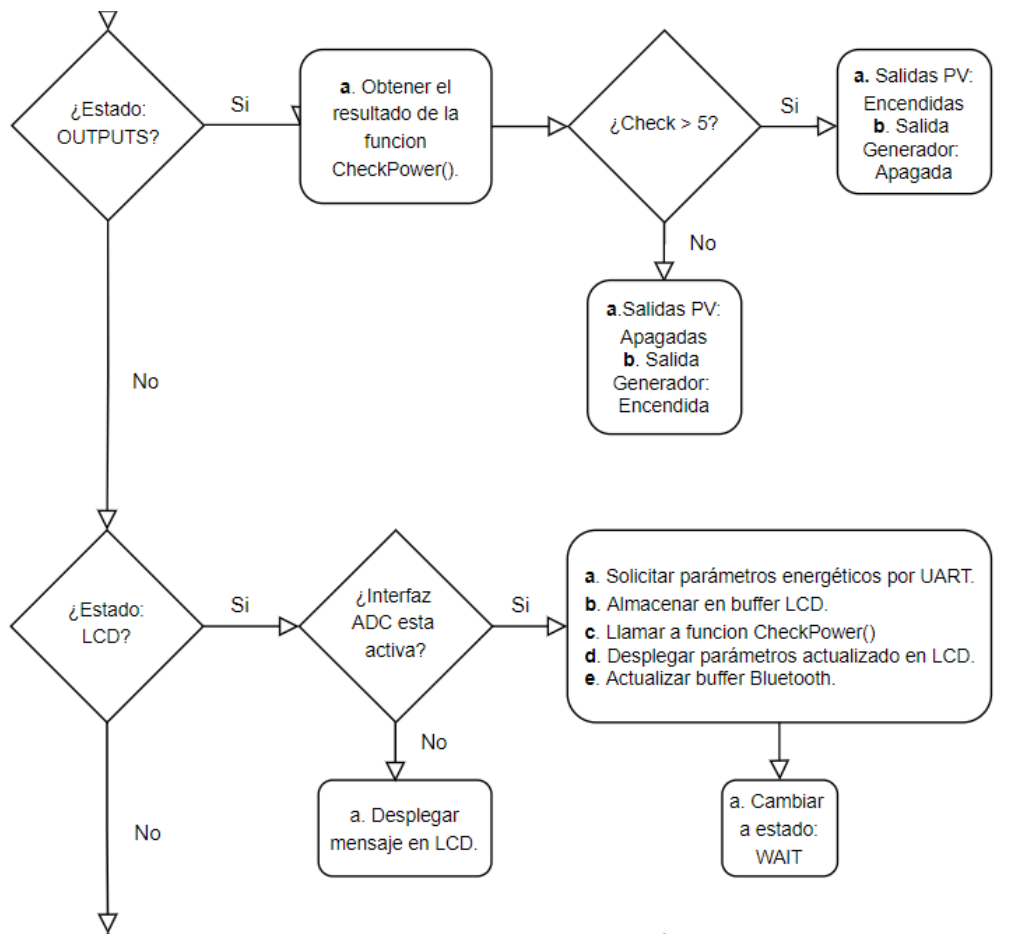


Fuente: elaboración propia, empleando Draw.io versión 14.4.3.

El tiempo transcurrido se mide con el uso del reloj en tiempo real (*RTC*, por sus siglas en inglés) configurado con el oscilador externo de 32 768 Hz, de modo que pueda marcar una interrupción cada segundo. Se maneja un contador dentro

de la interrupción, de modo que, al alcanzar un valor de 10, quiere decir que han transcurrido 10 segundos.

Figura 83. **Diagrama de flujo del programa principal de la interfaz de control, parte 2**

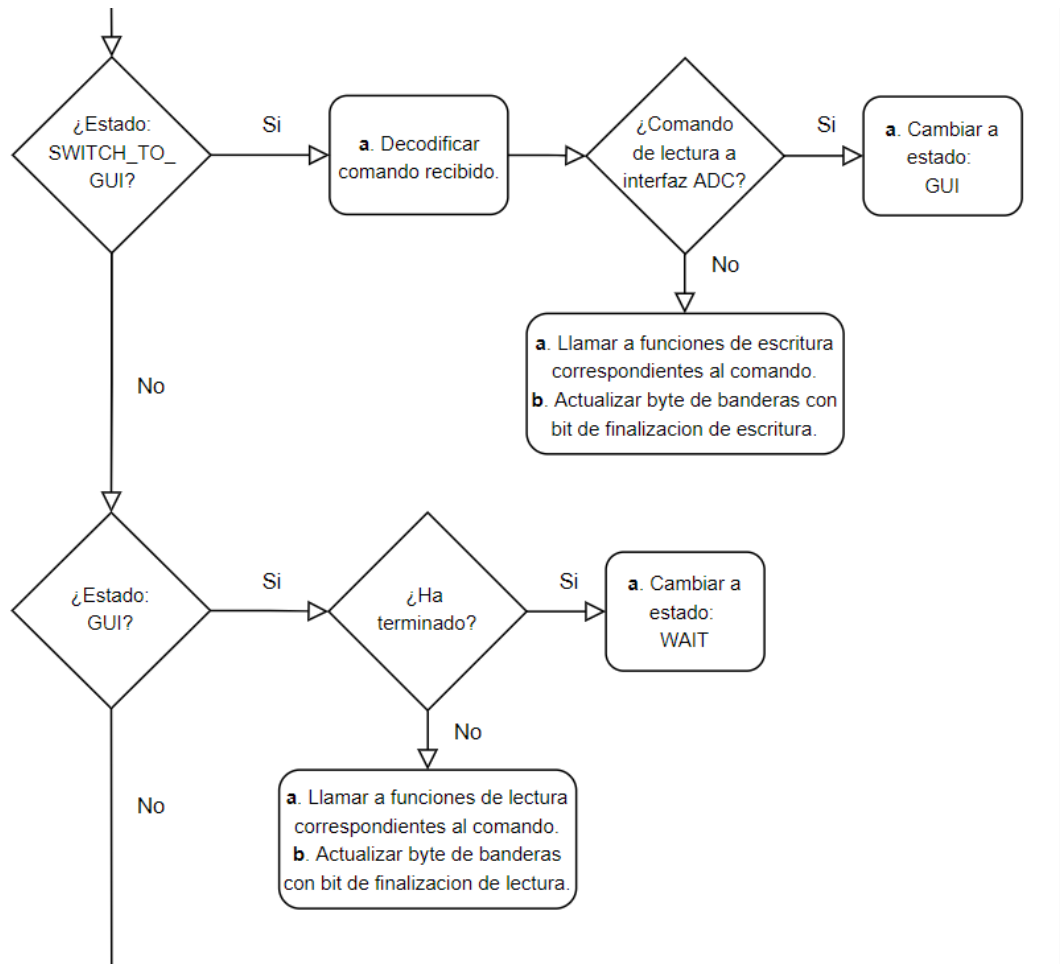


Fuente: elaboración propia, empleando Draw.io versión 14.4.3.

La función *CheckPower* se encarga de guardar los datos de potencia medidos, a su vez, de realizar la comparación de la cantidad de veces que la potencia medida se mantiene en un rango de valores mínimos durante al menos

5 muestras de datos. Esto quiere decir que al transcurrir 10 segundos la potencia de los paneles solares debe encontrarse sobre un umbral, si no es así quiere decir que es necesario activar la salida de voltaje hacia el relé para realizar el cambio hacia la fuente de energía auxiliar y apagar el paso de corriente de la fuente de energía principal.

Figura 84. **Diagrama de flujo del programa principal de la interfaz de control, parte 3**



Fuente: elaboración propia, empleando Draw.io versión 14.4.3,.

5.3.5. Descripción del firmware de la comunicación por UART de la interfaz de control

La interfaz de control tiene dos vías de comunicación, siendo estas hacia el microcontrolador esclavo, la segunda hacia el módulo bluetooth. El protocolo utilizado es UART, porque permite sencillez y flexibilidad en su configuración.

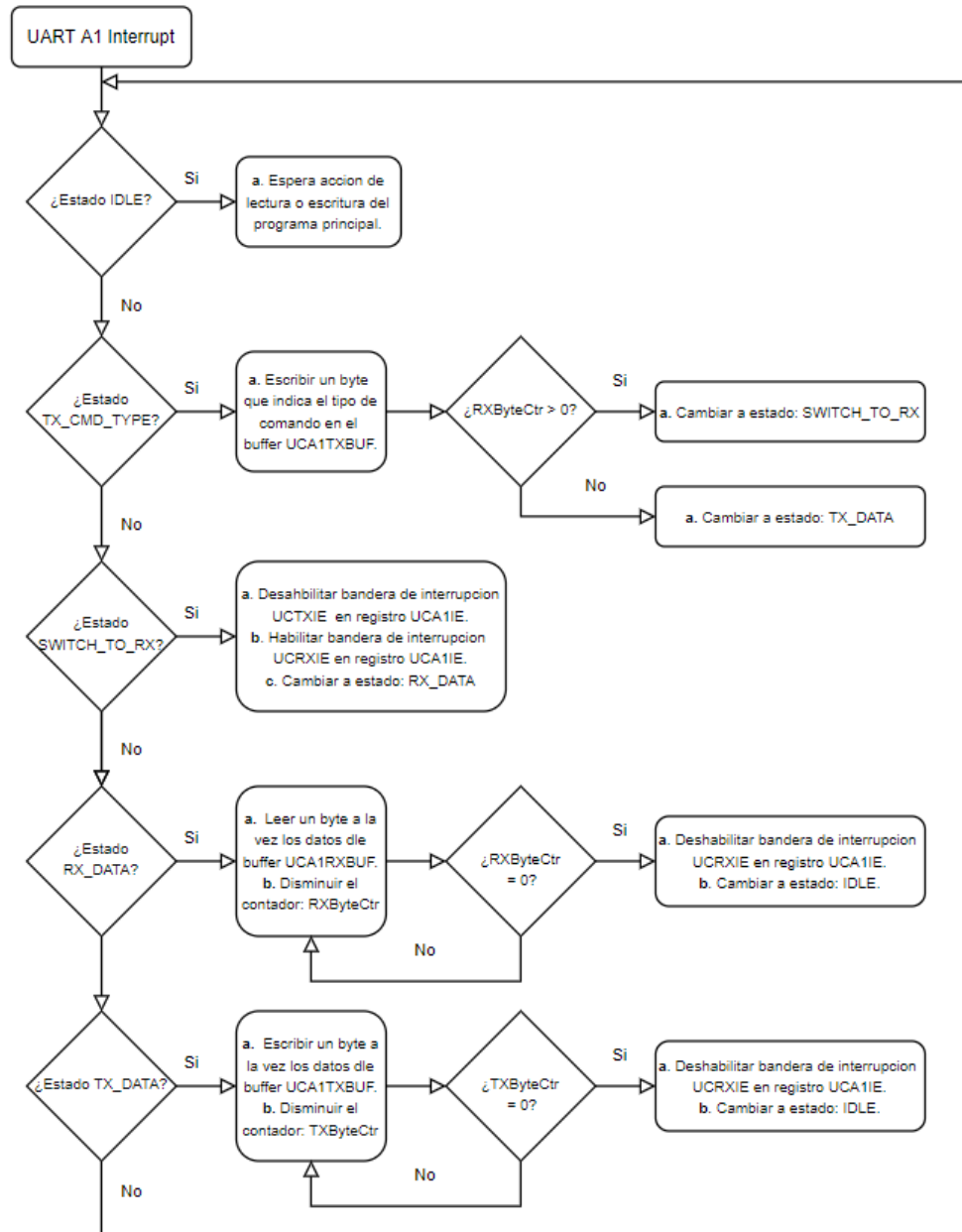
La comunicación hacia el exterior del dispositivo de monitoreo de parámetros eléctricos se realiza por medio de una topología punto a punto hacia un módulo bluetooth HC05. Los datos se envían de forma serial desde el microcontrolador principal hacia el módulo bluetooth, y este se encarga de enviar los datos inalámbricamente hacia un host. El proceso de emparejamiento se debe realizar previamente con una computadora o celular. El dispositivo externo es el que actúa como maestro en la comunicación. Los comandos de acceso al dispositivo de monitoreo se explican en la sección 5.3.5.2

5.3.5.1. Algoritmos de comunicación por UART de la interfaz de control

Para la comunicación punto a punto, el microcontrolador principal utiliza 2 interfaces UART. La primera interfaz es la que se encarga de la comunicación hacia el microcontrolador llamada USCI_A1 o A1 en la Figura 85, y la segunda interfaz se designa con el nombre de USCI_A0 o GUI en la Figura 86.

El algoritmo de la Figura 86 detalla el procedimiento realizado en el vector de interrupción EUSCI_A1_VECTOR, cuando se realizan las funciones de lectura o escritura de información hacia el microcontrolador esclavo. El programa principal se encarga de evaluar los tiempos adecuados para responder a los eventos por UART.

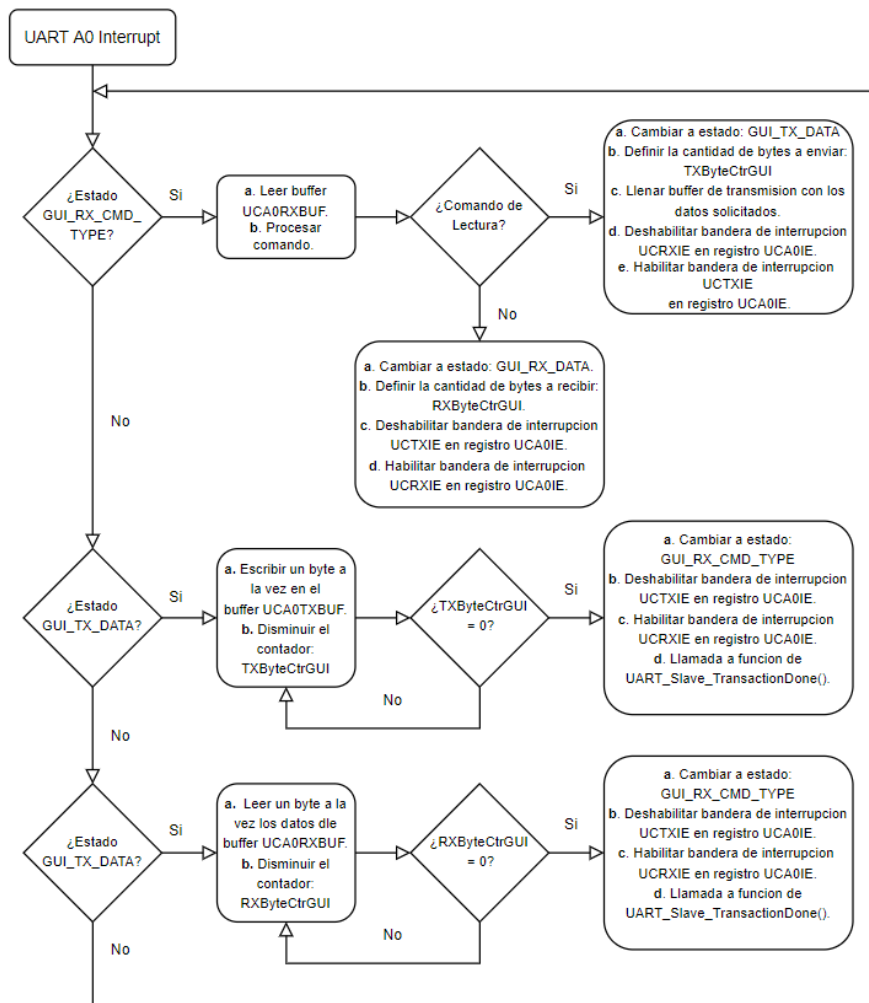
Figura 85. Diagrama de flujo de la comunicación por UART de la interfaz de control hacia la interfaz ADC



Fuente: elaboración propia, empleando Draw.io versión 14.4.3.

Por otro lado, el algoritmo que se presenta en la Figura 86 describe el algoritmo escrito en el vector de interrupción USCI_A0_VECTOR, para responder a una solicitud de lectura o escritura desde el módulo *bluetooth*. Se observa un procedimiento parecido al diagrama de la Figura 86, porque ambos funcionan como programas en modo esclavo.

Figura 86. **Diagrama de flujo de la comunicación por UART de la interfaz de control hacia módulo *bluetooth***



Fuente: elaboración propia, empleando *Draw.io* versión 14.4.3, 2020.

5.3.5.2. Descripción de la comunicación remota

El acceso al dispositivo de monitoreo de parámetros eléctricos se puede realizar de manera remota. El entorno que se recomienda para realizar la conexión exitosa es pycharm, porque el lenguaje Python cuenta con librerías para una conexión serial. Sin embargo, puede diseñarse una interfaz gráfica en cualquier otro lenguaje o IDE disponible, con las especificaciones de comunicación configuradas según la Tabla XXX, y los comandos de lectura de la información se describen en la Tabla XXXI

Tabla XXX. **Especificaciones básicas para la comunicación serial**

Especificación	Valor
Baud-rate	115 200
Bits de inicio y de parada	1
Bits de datos	8
Paridad y control de flujo	Ninguna

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Tabla XXXI. **Comandos UART de lectura de información del dispositivo**

Comando	Descripción
0x53	Voltaje del panel solar nro. 1
0x55	Voltaje del panel solar nro. 2
0x57	Voltaje del panel solar nro. 3
0x59	Voltaje del panel solar nro. 4
0x61	Corriente del panel solar nro. 1
0x63	Corriente del panel solar nro. 2
0x65	Corriente del panel solar nro. 3
0x67	Corriente del panel solar nro. 4
0x69	Voltaje del generador monofásico
0x71	Corriente del generador monofásico

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Finalmente, la Tabla XXXII muestra el formato de lectura de comandos diseñado para la comunicación por UART, con un tamaño de unidad de 2 *bytes*.

Tabla XXXII. **Formato de los comandos UART de lectura**

No.	Comando	Flujo de datos	Tipo	ID	CMD	Data Low	Data High
1	Leer voltaje de PV	Enviar	Lectura	0x25	2)	0x00	0x00
		Recibir		0x38	2)	3)	4)
Tipo de datos		16 bits sin signo					
Unidad		Voltios					
Descripción		<p>Obtiene el voltaje de los paneles solares o del generador monofásico.</p> <p>2) Comandos de lectura de voltaje. 3) Byte bajo del dato de voltaje. 4) Byte alto del de voltaje.</p>					
Ejemplo		<p>Leer:</p> <p style="text-align: right;">Tercer byte: 0x58 Cuarto byte: 0x02</p> <p>0x0258 en decimal es 600 V</p>					
No.	Comando	Flujo de datos	Tipo	ID	CMD	Data Low	Data High
2	Leer corriente de PV	Enviar	Lectura	0x25	2)	0x00	0x00
		Recibir		0x38	2)	3)	4)
Tipo de datos		16 bits sin signo					
Unidad		Amperios					
Descripción		<p>Obtiene la corriente de los paneles solares o del generador monofásico:</p> <p>2) Comandos de lectura de corriente. 3) Byte bajo del dato de corriente. 4) Byte alto del dato de corriente.</p>					
Ejemplo		<p>Leer:</p> <p style="text-align: right;">Tercer byte: 0x37 Cuarto byte: 0x00</p> <p>0x0037 en decimal es 55 A.</p>					

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365, 2020.

Los comandos de escritura de la información se describen en la Tabla XXXIII.

Tabla XXXIII. **Comandos UART de escritura de información del dispositivo**

Comando	Descripción
0x81	Activar/desactivar relé del inversor nro. 1 manualmente.
0x83	Activar/desactivar relé del inversor nro. 2 manualmente.
0x85	Activar/desactivar relé del inversor nro. 3 manualmente.
0x87	Activar/desactivar relé del inversor nro. 4 manualmente.
0x89	Activar/desactivar relé del generador monofásico manualmente.

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365.

Finalmente, la Tabla XXXIV muestra el formato de escritura de comandos diseñado para la comunicación por UART.

Tabla XXXIV. **Formato de los comandos UART de escritura**

No.	Comando	Flujo de datos	Tipo	ID	CMD	Data Low	Data High
1	Leer voltaje de PV	Enviar	Escritura	0x25	2)	3)	4)
		Recibir		0x38	2)	0x00	0x00
Tipo de datos		16 bits sin signo					
Unidad		No hay					
Descripción		Obtiene el voltaje de los paneles solares o del generador monofásico. 2) Comandos de escritura de voltaje. 3) Byte bajo igual a 0xFF para activar el relé. 4) Byte alto igual a 0xFF para desactivar el relé.					
Ejemplo		Leer: Tercer byte: 0x00 Cuarto byte: 0xFF 0xFF00 representa la desactivación del relé indicado por el comando.					

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365.

CONCLUSIONES

1. En el capítulo 1, se presenta la teoría de los sistemas fotovoltaicos híbridos, junto al artículo 690 del NEC, se presentan las consideraciones eléctricas de sus componentes, para el correcto dimensionamiento de los módulos fotovoltaicos, del cableado eléctrico, del inversor de corriente y del generador monofásico.
2. En el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico híbrido para un centro de salud tipo B con consumo máximo de 43 kWh con una potencia nominal de 7 kW, se estableció que la potencia mínima generada por los módulos fotovoltaicos debe ser de 15 kW. El suministro de energía auxiliar que se dimensionó es un generador monofásico de 12,1 KVA de potencia con una tensión nominal de 120 VAC, como se muestra en el capítulo 2.
3. Las partes fundamentales de un sistema fotovoltaico híbrido controlado por un dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos son el arreglo de paneles solares, el arreglo de los inversores al tablero eléctrico, la conexión en paralelo con los inversores del generador monofásico hacia el tablero eléctrico, y los elementos del dispositivo de monitoreo que interrumpen las salidas AC, como se muestra en la sección 2.3.6
4. El dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos tiene 4 entradas de corriente directa capaces de soportar de manera segura mediciones de voltaje de hasta 600 VDC, con corrientes de hasta 50 A. Se consideró el diseño de una entrada en corriente alterna capaz de censar corrientes de 115 A y de voltaje *True* RMS de 120 VAC. Además, cuenta con un

conector específico para una comunicación remota vía *bluetooth* con topología punto a punto con el uso del protocolo de comunicación UART, según el capítulo 3.

5. Se determinó que el mejor circuito electrónico de potencia, para accionar el suministro auxiliar de energía por generador monofásico, es un contacto seco automatizado por un microcontrolador. Por lo tanto, una opción viable es el relé electromecánico de baja potencia de 24 VDC con 0,5 A, con voltaje de habilitación de 3,3 VDC con corriente de habilitación de 8 mA. Se descartó el uso relés de estado sólido por el elevado costo adicional por ventilación y disipación de calor, como se muestra en la sección 3.5.3.2.

6. El dispositivo electrónico de monitoreo de parámetros energéticos está diseñado para realizar lecturas ADC, realizar cálculos de potencia instantánea, mostrar los resultados en pantalla comunicando la información vía *bluetooth* y el accionamiento automático o manual del generador monofásico en función de la pérdida de potencia en los paneles solares, según los capítulos 4 y 5.

RECOMENDACIONES

1. Revisar el diagrama actual del tablero eléctrico para la implementación del sistema fotovoltaico híbrido en sitio, debe existir una conexión de 220 VAC para los inversores con reducción a 120 VAC. Además, para futuras conexiones a la red eléctrica, como autoproducción de energía renovable, seguir la norma técnica NTGDR existente en Guatemala según la resolución CNEE 227-2014, (ver anexo 5).
2. Considerar una cantidad promedio de horas solares pico de 5,5 horas para la implementación del sistema fotovoltaico híbrido en sitio, para garantizar el sostenimiento del consumo eléctrico, para el cual está dimensionado el diseño actual. Sin embargo, se ha realizado un proceso general de dimensionamiento que se puede utilizar en otros proyectos de este tipo.
3. Brindar un mantenimiento preventivo con intervalos no mayores a 6 meses para que el sistema de monitoreo de parámetros energéticos planteado tenga una conmutación fiable, tomando cuidado especial en los relés electromecánicos, pues son los elementos con mayor probabilidad de falla por su tiempo de vida útil.
4. Mantener dentro de los márgenes de diseño establecidos los valores de potencia de entrada y salida para el dispositivo de monitoreo, porque se buscaron componentes capaces de soportar las potencias descritas en el trabajo. Por otro lado, la lógica de control permite el manejo de la información específica con los valores actuales. La solución presentada

brinda un proceso de diseño electrónico que puede ser replicado con confiabilidad

5. Usar relés de estado sólido en el futuro cuando el costo adicional por disipación o ventilación sea semejante al costo de los relés electromecánicos, por su facilidad de conexión, vida útil y la rapidez de conmutación, permitiendo la transparencia en la transferencia automática entre los paneles solares con el generador monofásico.
6. Tener precaución en el uso de los comandos de activación y desactivación de los relés en las salidas AC cuando se realice la implementación del dispositivo de monitoreo electrónico, para evitar alguna sobrecarga de corriente en el cableado del tablero eléctrico, o bien, para evitar la pérdida del suministro de energía sin aviso previo. Hay que considerar que esta funcionalidad es útil en caso de emergencia.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACKSEN. *Electrocorder DC-3VA DC Energy Logger for Industry and Light Commercial*. [en línea]. <<https://electrocorder.com/products/electrocorder-dc-3va-dc-energy-logger-for-industry-and-light-commercial>>. [Consulta: octubre 2020].
2. Allegro Microsystems. *ACS770xCB: Current Sensor IC with 100 $\mu\Omega$ Current Conductor*. [en línea]. <<https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/fifty-to-two-hundred-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs770>>. [Consulta: junio 2020].
3. Analog Devices. *Low Cost, Low Power, True RMS-to-DC Converter*. [en línea]. <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8436.pdf>>. [Consulta: junio 2020].
4. Analog Devices. *RMS to DC Conversion Application Guide*. [en línea]. <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/RMStoDC_Cover-Section-I.pdf?doc=AD8436.pdf>. [Consulta: julio 2020].
5. ARZÚ, Álvaro. *Acuerdo gubernativo 155-99*. [en línea]. <<https://www.mspas.gob.gt/index.php/component/jdownloads/send/4-numeral-1-estructura-organica/5-reglamento-organico-interno-mspas>>. [Consulta: marzo 2020].

6. CHC Energía. *Cuánta electricidad consume un ordenador*. [en línea]. <<https://chcenergia.es/blog/cuanto-consume-un-ordenador-o-pc/>>. [Consulta: mayo 2020].
7. COOK, Gary; BILLMAN, Lynn; ADCOCK, Rick; COOK, Gary; BILLMAN, Lynn. *Photovoltaics Fundamentals*. [en línea]. <<https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/16319.pdf>>. [Consulta: 04 de enero de 2020].
8. Crydom. *Total Cost of Ownership | White Papers*. [en línea]. <<http://www.crydom.com/en/tech/white-papers/total-cost-of-ownership-white-paper.shtml>>. [Consulta: septiembre 2020].
9. Dilabo, S.A. *Microscopio Triocular para Fluorescencia LED, filtros azul y verde - DILABO S.A Suministros para Laboratorios*. [en línea]. <http://www.dilabo.com/producto_28403_NombreProd.html>. [Consulta: mayo 2020].
10. EARLEY, Mark; SARGENT, Jeffrey; COACHE, Christopher; ROUX, Richard. *National Electrical Code*. [en línea]. <<https://catalog.nfpa.org/NFPA-70-National-Electrical-Code-NEC-Handbook-P16530.aspx>>. [Consulta: abril 2020].
11. El Universal. *Consumo electrodomésticos*. [en línea]. <http://static.eluniversal.com/2010/02/10/consumo_electrodomesticos.pdf>. [Consulta: mayo 2020].

12. Esinsa. *Cotizacion.* [en línea].
<<http://guatecompras.gt/ofertas/files/1255/2443%40A10-1704018IRTRA MCC RCC 08-05-2017.pdf>>. [Consulta: octubre 2020].
13. Ferretería EPA. *Tubo Led 48" T8 18 W 6000 K 1500 L Policarbonato.* [en línea].
<<https://gt.epaenlinea.com/tubo-led-48-t8-18-w-6000-k-1500-l-policarbonato.html>>. [Consulta: mayo 2020].
14. Global Petrol Prices. *Guatemala precios del diesel, 26-jul-2021.* [en línea].
<https://es.globalpetrolprices.com/Guatemala/diesel_prices/>. [Consulta: mayo 2020].
15. Himoinsa. *Grupo Electrógeno 12.1 kVA Estático Estándar Gama Industrial HYW-14 M6.* [en línea].
<<https://www.himoinsa.com/esp/generadores-electricos/676/grupo-electrogeno--12,10kva--estatico-estandar.html>>. [Consulta: mayo 2020].
16. Himoinsa. *Manual Profesional versión 1.0 Central M6.* [en línea].
<<https://studylib.es/doc/5048005/central-m6>>. [Consulta: mayo 2020].
17. IEEE Standards Coordinating Committee 21 on Fuel Cells. *IEEE guide for array and battery sizing in stand-alone photovoltaic (PV) systems.* [en línea].
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/4518937>>. [Consulta: febrero 2020].

18. JAMES Staley. *Using the AD8436 True RMS to DC Converter*. [en línea]. <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1341.pdf?doc=AD8436.pdf>>. [Consulta: agosto 2020].
19. KARABANOV, Sergey; KUKHMISTROV, Yury MIEDZINSKI, Bogdan; OKRASZEWSKI Zenon. *Photovoltaic Systems*. [en línea]. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123972705000091>>. [Consulta: julio 2021].
20. Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. *Guía para la habilitación centro de salud tipo B*. 2020 [en línea]. <<https://www.mspas.gob.gt/index.php/component/jdownloads/category/415-centro-de-salud-tipo-b?Itemid=-1>>. [Consulta: abril 2020].
21. Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. *Numeral 2: Dirección y teléfonos*. [en línea]. <<https://www.mspas.gob.gt/index.php/component/jdownloads/category/5-numeral-2-direccion-y-telefonos?Itemid=-1>>. [Consulta: abril 2020].
22. National Fire Protection Association. *NFPA overview*. 2020 [en línea]. <<https://www.nfpa.org/overview>>. [Consulta: enero 2020].
23. NORTON, Brian; EAMES, Philip; MALLICK, Tapas; HUANG, Ming; MCCORMACK, Sarah; MONDOL, Jayanta; YOHANIS, Yigzaw. *Enhancing the performance of building integrated photovoltaics Solar Energy*. [en línea]. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09002369>>. [Consulta: julio 2021].

24. Omron. *Ultra-thin low signal relay G6L*. [en línea]. <[https://media.digikey.com/pdf/Data Sheets/Omron PDFs/G6L.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data_Sheets/Omron_PDFs/G6L.pdf)>. [Consulta: septiembre 2020].
25. ON Semiconductor. *Surface Mount Schottky Power Rectifier*. [en línea]. <<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mbr0520lt1-d.pdf>>. [Consulta: agosto 2020].
26. OpenEI. *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) | Open Energy Information*. [en línea]. <[https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_\(SWERA\)](https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_(SWERA))>. [Consulta: abril 2020].
27. Panasonic Industry. *HE Relays PV Type*. [en línea]. <https://b2b-api.panasonic.eu/file_stream/pids/fileversion/276>. [Consulta: junio 2020].
28. PCE Instruments. *Centrifugadora de laboratorio 1-16 / 1-16k*. [en línea]. <<https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/laboratorio/centrifugadora-laboratorio-1-16-serie.htm>>. [Consulta: mayo 2020].
29. Programme, U.N.D. *Energía solar para la salud*. [en línea]. <<https://stories.undp.org/energia-solar-para-la-salud>>. [Consulta: marzo 2020].
30. Rohm Semiconductor. *RQ6E080AJ*. [en línea]. <<https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/transistor/mosfet/rq6e080ajtcr-e.pdf>>. [Consulta: septiembre 2020].

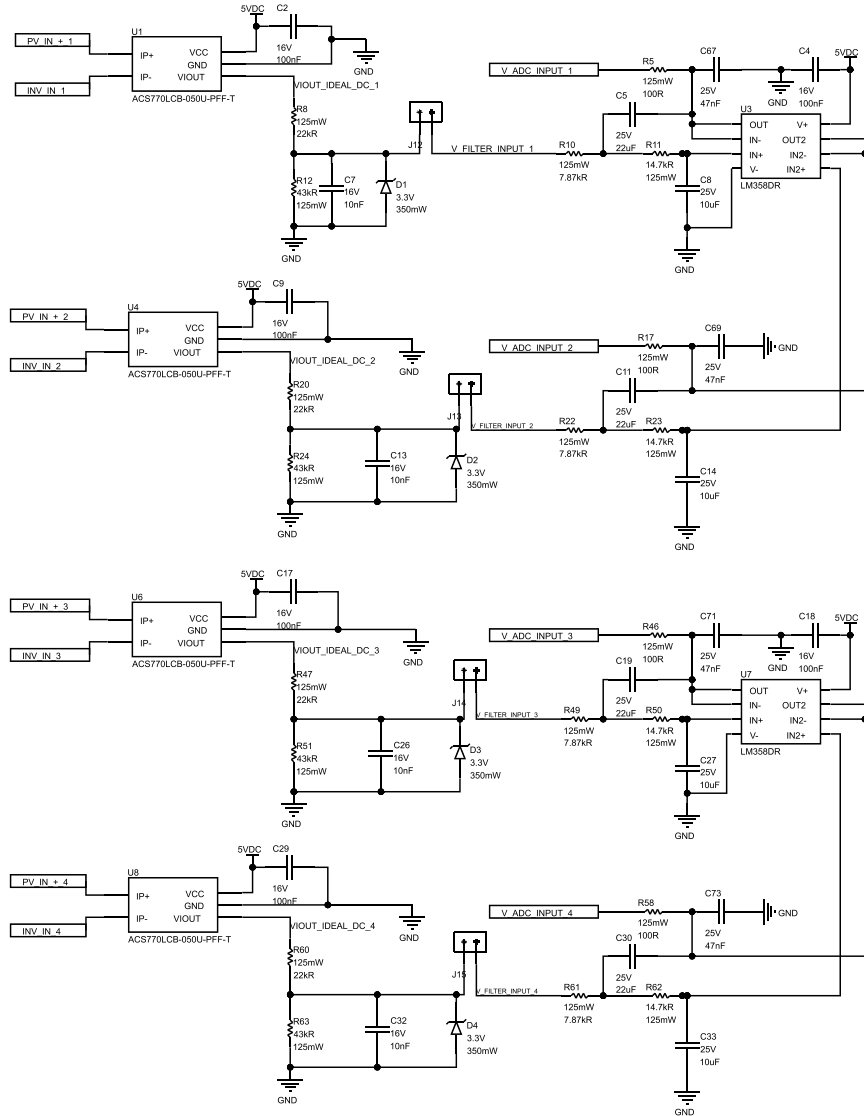
31. SARBU, Ioan; SEBARCHIEVICI, Calin. *Solar Radiation Solar Heating and Cooling Systems*, [en línea]. <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128116623000025>>. [Consulta: febrero 2020].
32. SEDRA Adel; SMITH Kenneth. *Circuitos Microelectronicos*. [en línea]. <https://docs.google.com/file/d/0B6w_XG3YRGV4MVFpSGZLNfZrX0E/edit?resourcekey=0-eeaGg9ZW0-ilbXJcPUdPLA>. [Consulta: agosto 2020].
33. Servinox. *Dispensador de Agua DA001*. [en línea]. <https://www.servinox.com.mx/catalogo/imgs_catalog2/Ficha_Tecnica_Enfriador_y_Calentador_de_Agua_DA001.pdf>. [Consulta: mayo 2020].
34. Sevmexico. *Autoclaves*. [en línea]. <https://www.sevmexico.com/catalogos/AUTOCLAVES_140312.pdf>. [Consulta: mayo 2020].
35. Silicon Labs. *5 KV LED emulator input, open collector output isolators*. [en línea]. <<https://www.skyworksinc.com/-/media/Skyworks/SL/documents/public/data-sheets/Si87xx.pdf>>. [Consulta: junio 2020].
36. Solargis. *Mapas de recursos solares y datos GIS para más de 180 países*. [en línea]. <<https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/guatemala>>. [Consulta: abril 2020].
37. Spacelabs healthcare. *Monitores de signos vitales*. [en línea]. <<https://prhoina.com/images/pdf/spacelabs/elance/elance-Vital-Signs-Monitor-Family-061-2181-01-rev-J-SPA.pdf>>. [Consulta: mayo 2020].

38. Texas Instruments. *Analysis of the Sallen-Key Architecture*. [en línea]. <https://www.ti.com/lit/an/sloa024b/sloa024b.pdf?ts=1601150727216&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F>. [Consulta: agosto 2020].
39. _____. *Industry-Standard Dual Operational Amplifiers*. [en línea]. <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf?ts=1589251590096>>. [Consulta: junio 2020].
40. _____. *ISO772x High-Speed, Robust EMC, Reinforced and Basic Dual-Channel Digital Isolators*. [en línea]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso7721.pdf?ts=1602137213004&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FISO7721>. [Consulta: julio 2020].
41. _____. *MSP430FR235x, MSP430FR215x Mixed-Signal Microcontrollers*. [en línea]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr2353.pdf?ts=1601830734811&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FMSP430FR2353>. [Consulta: julio 2020].
42. _____. *MSP430FR247x Mixed-Signal Microcontrollers*. [en línea]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr2476.pdf?ts=1603930752228&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FMSP430FR2476%253FkeyMatch%253DMSP430FR2476%2526tisearch%253DSearch-EN-everything%2526usecase%253DGPN>. [Consulta: julio 2020].

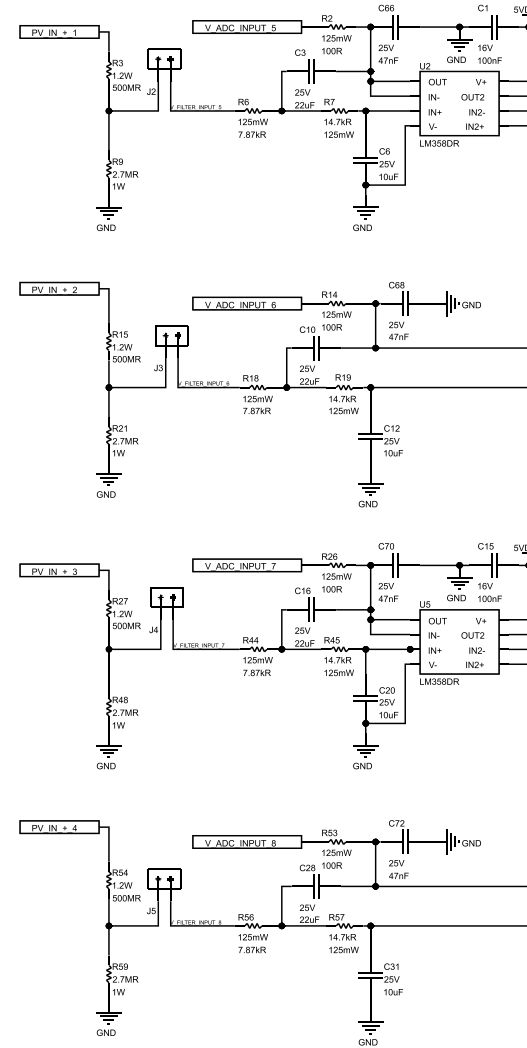
43. _____. *SN6501 Transformer Driver for Isolated Power Supplies*. [en línea]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn6501.pdf?ts=1602129743851&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FSN6501%253FkeyMatch%253DSN6501%2526tisearch%253DSearch-EN-everything%2526usecase%253DGPN>. [Consulta: julio 2020].
44. _____. *TPS763 Low-Power, 150-mA, Low-Dropout Linear Regulator*. [en línea]. <https://www.ti.com/lit/ds/slvs181j/slvs181j.pdf?ts=1627865130899&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F>. [Consulta: agosto 2020].
45. The World Bank Group. *Global Solar Atlas*. [en línea]. <<https://globalsolaratlas.info/map?c=15.792254,90.230713,7&r=GMT>>. [Consulta: abril 2020].
46. WILES, James. *Photovoltaic Power Systems And the 2005 National Electrical Code : Suggested Practices* Report SAND2001-0674. 1a ed. U.S.A. Sandia National Laboratories. 2008. 119 p.
47. Würth Electronics. *Transformer 750313638*. [en línea]. <<https://www.wurth-electronics.com/catalog/datasheet/750313638.pdf>>. [Consulta: agosto 2020].
48. _____. *Transformer 760390014*. [en línea]. <<https://www.wurth-electronics.de/katalog/datasheet/760390014.pdf>>. [Consulta: agosto 2020].

49. Zoll M2. *Especificaciones técnicas*. [en línea]. <<https://www.pvequip.cl/wpcontent/uploads/2019/08/Especificaciones-Técnicas-ZOLL-M2-Enero-2109.pdf>>. [Consulta: mayo 2020].

SENSOR DE CORRIENTE DC

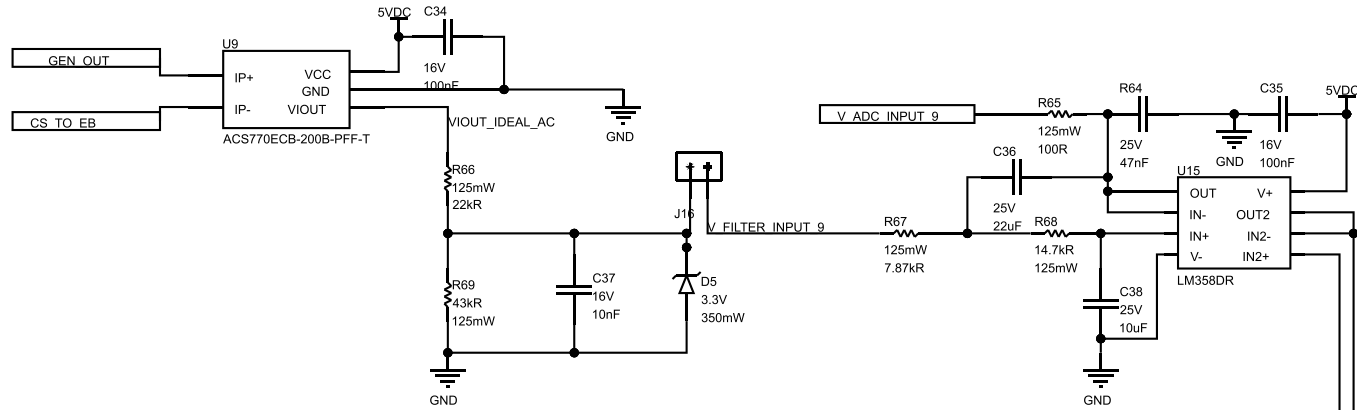


SENSOR DE VOLTAJE DC

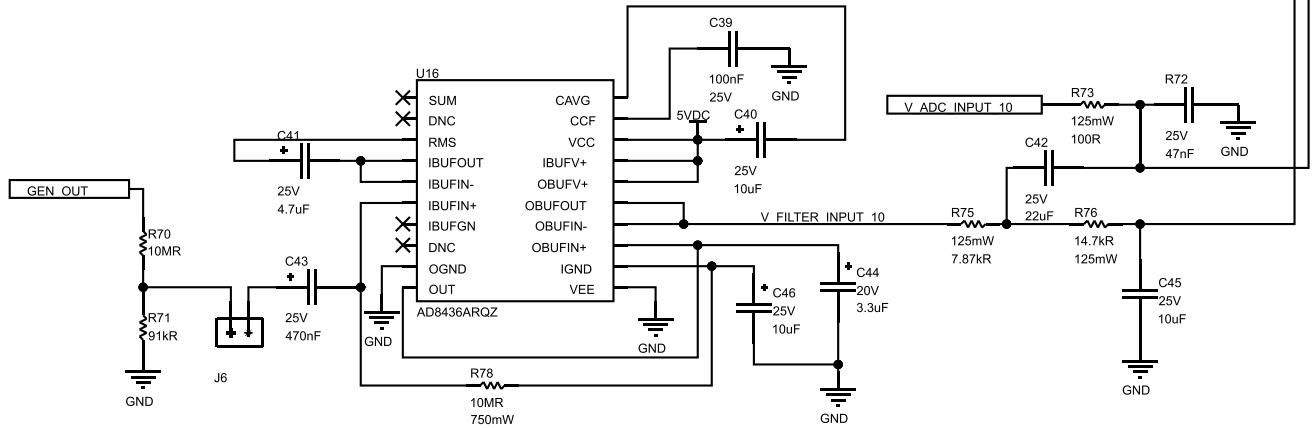


Title		
SENSORES PANELES SOLARES		
Size	Number	Revision
A3	1	1
Date:	3/02/2021	Sheet of 1/1
File:	C:\Users\... \Sensores_DC.SchDoc	Drawn By:

SENSOR DE CORRIENTE AC

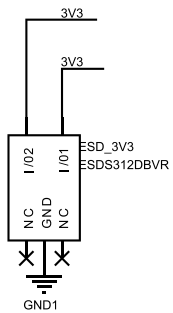
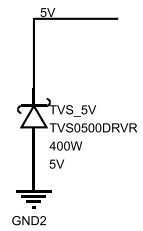


SENSOR DE VOLTAJE AC - RMS

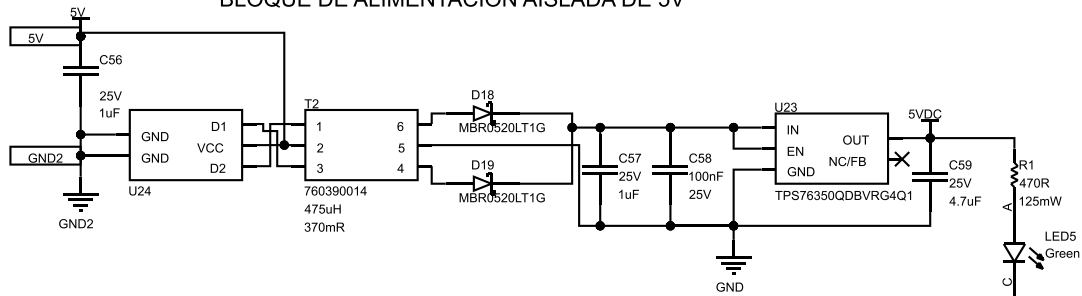


Title		
SENSORES GENERADOR MONOFÁSICO		
Size	Number	Revision
A4	1	1
Date:	3/02/2021	Sheet of 1/1
File:	C:\Users\1\Sensores_AC.SchDoc	Drawn By:

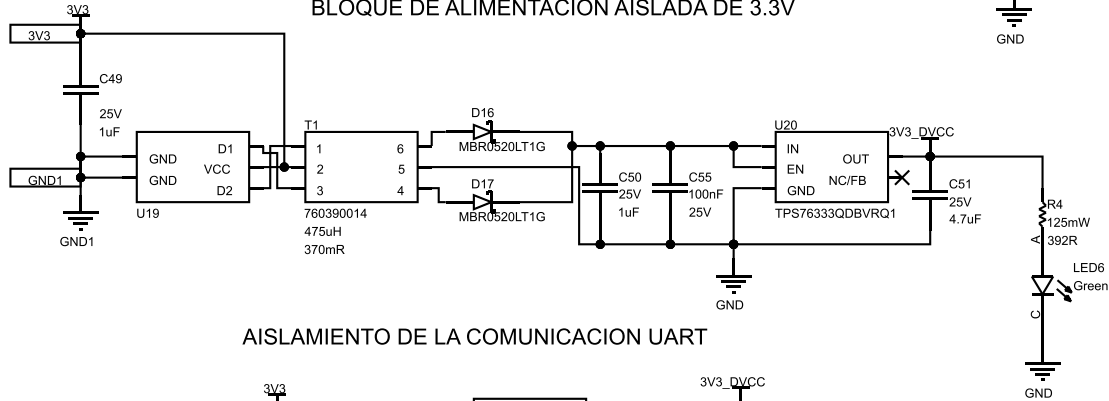
PROTECCIÓN ESD Y SUPRESOR DE TRASIENTOS



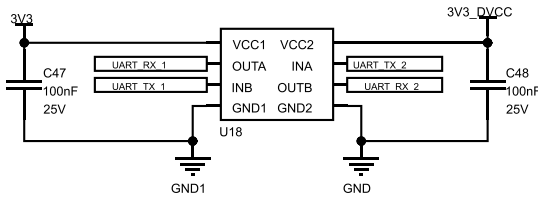
BLOQUE DE ALIMENTACIÓN AISLADA DE 5V



BLOQUE DE ALIMENTACIÓN AISLADA DE 3.3V



AISLAMIENTO DE LA COMUNICACION UART



Title		
AISLAMIENTO DE FUENTE		
Size	Number	Revision
A4	1	1
Date:	3/02/2021	Sheet of 1/1
File:	C:\Users\...Fuente aislada.SchDoc	Drawn By:

BLOQUE DE CONTROL PRINCIPAL

BLOQUE DE CONVERSION ANALOGICO DIGITAL

A

A

B

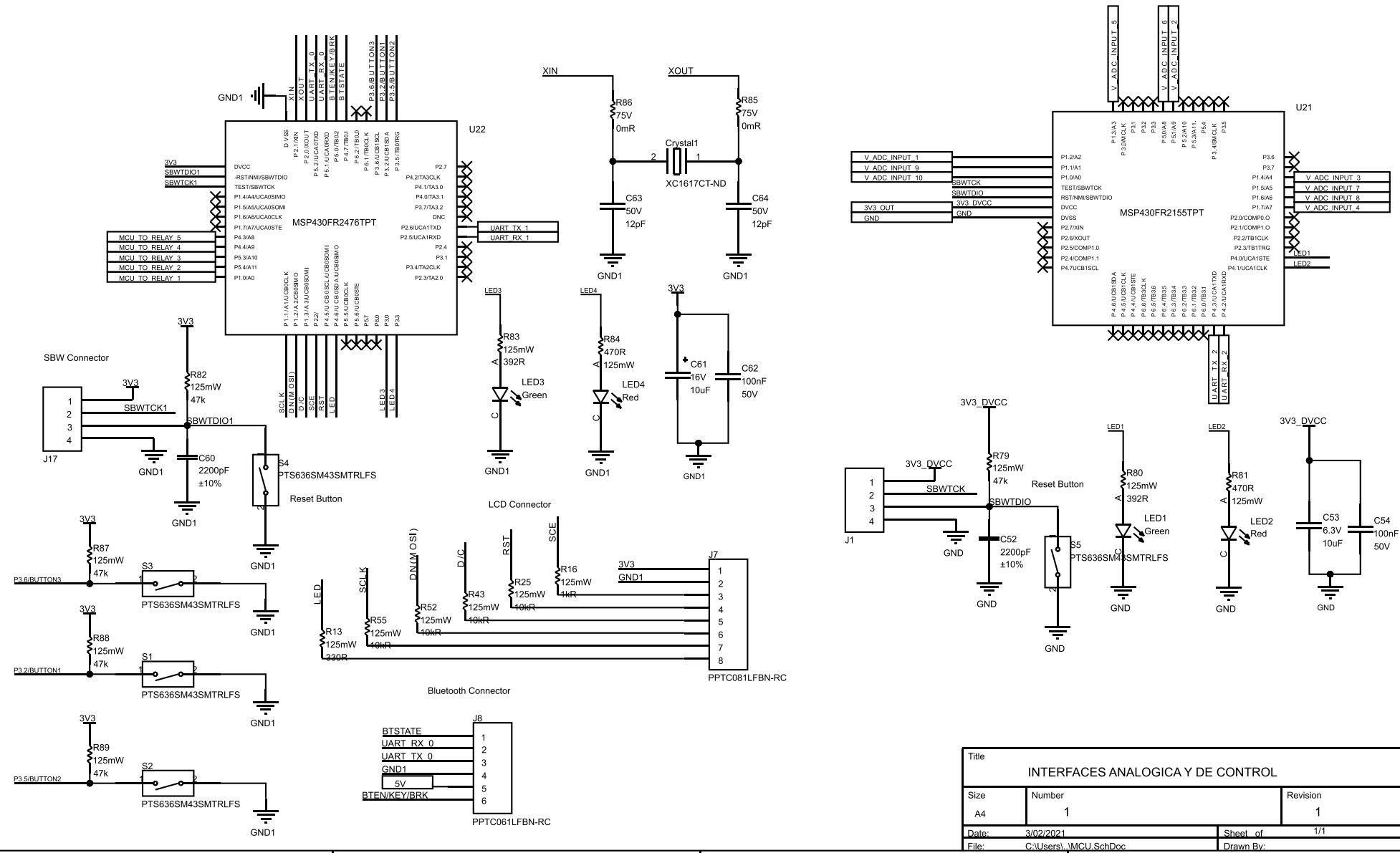
B

C

C

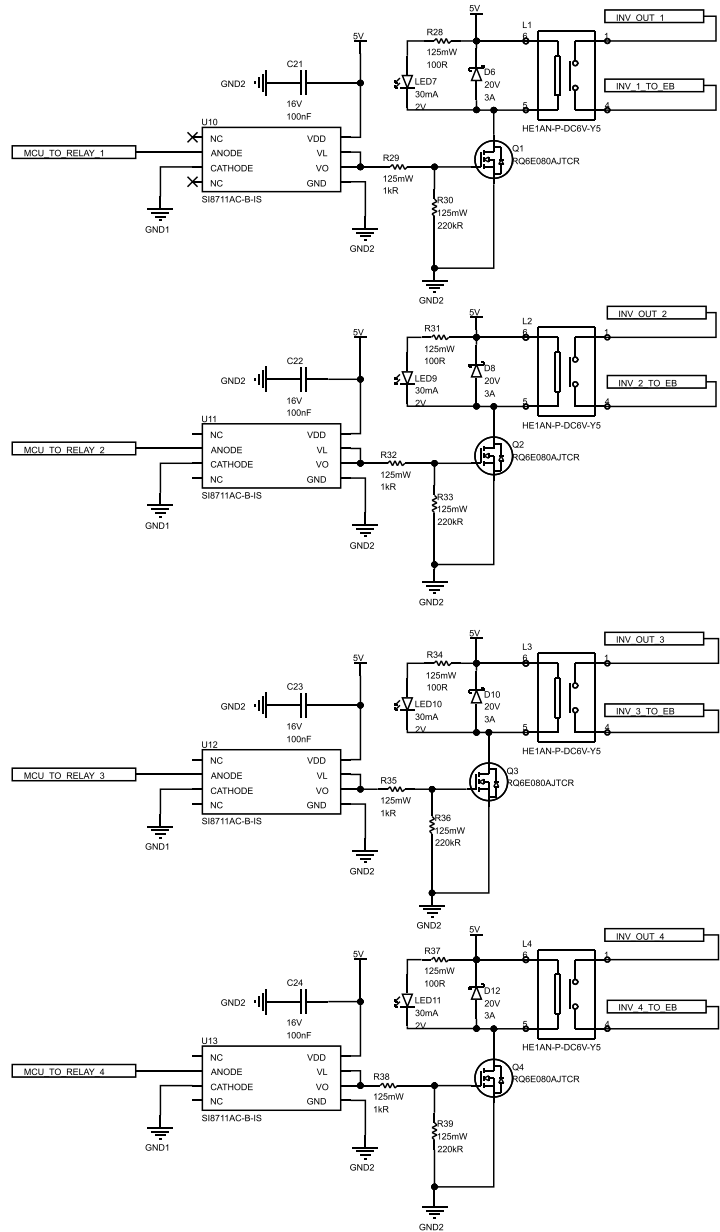
D

D

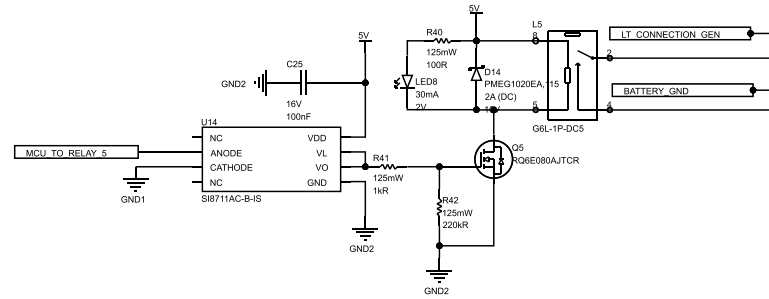


Title		
INTERFACES ANALOGICA Y DE CONTROL		
Size	Number	Revision
A4	1	1
Date:	3/02/2021	Sheet of 1/1
File:	C:\Users\... \MCU.SchDoc	Drawn By:

INTERRUPTORES ELECTROMECANICOS PARA LOS INVERSORES



INTERRUPTOR ELECTROMECANICO PARA EL GENERADOR



Title		
INTERRUPTORES DE POTENCIA		
Size	Number	Revision
A3	1	1
Date:	3/02/2021	Sheet of 1/1
File:	C:\Users\1\Interrupcion de potencia.SchDoc	Drawn By:

1

2

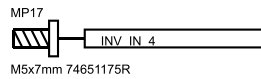
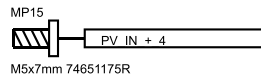
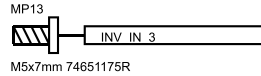
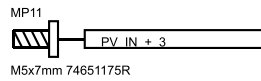
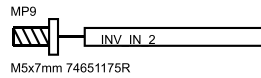
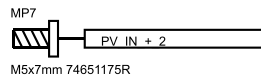
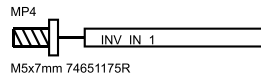
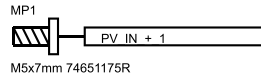
3

4

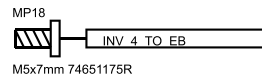
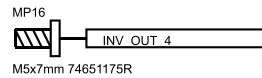
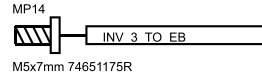
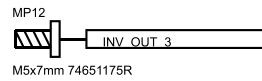
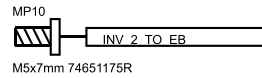
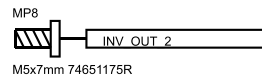
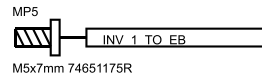
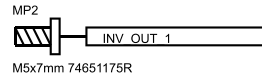
A

A

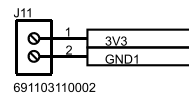
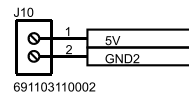
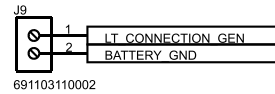
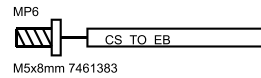
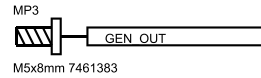
CONECTORES SENSORES DC



CONECTORES RELES



CONECTORES SENSORES AC



B

B

C

C

D

D

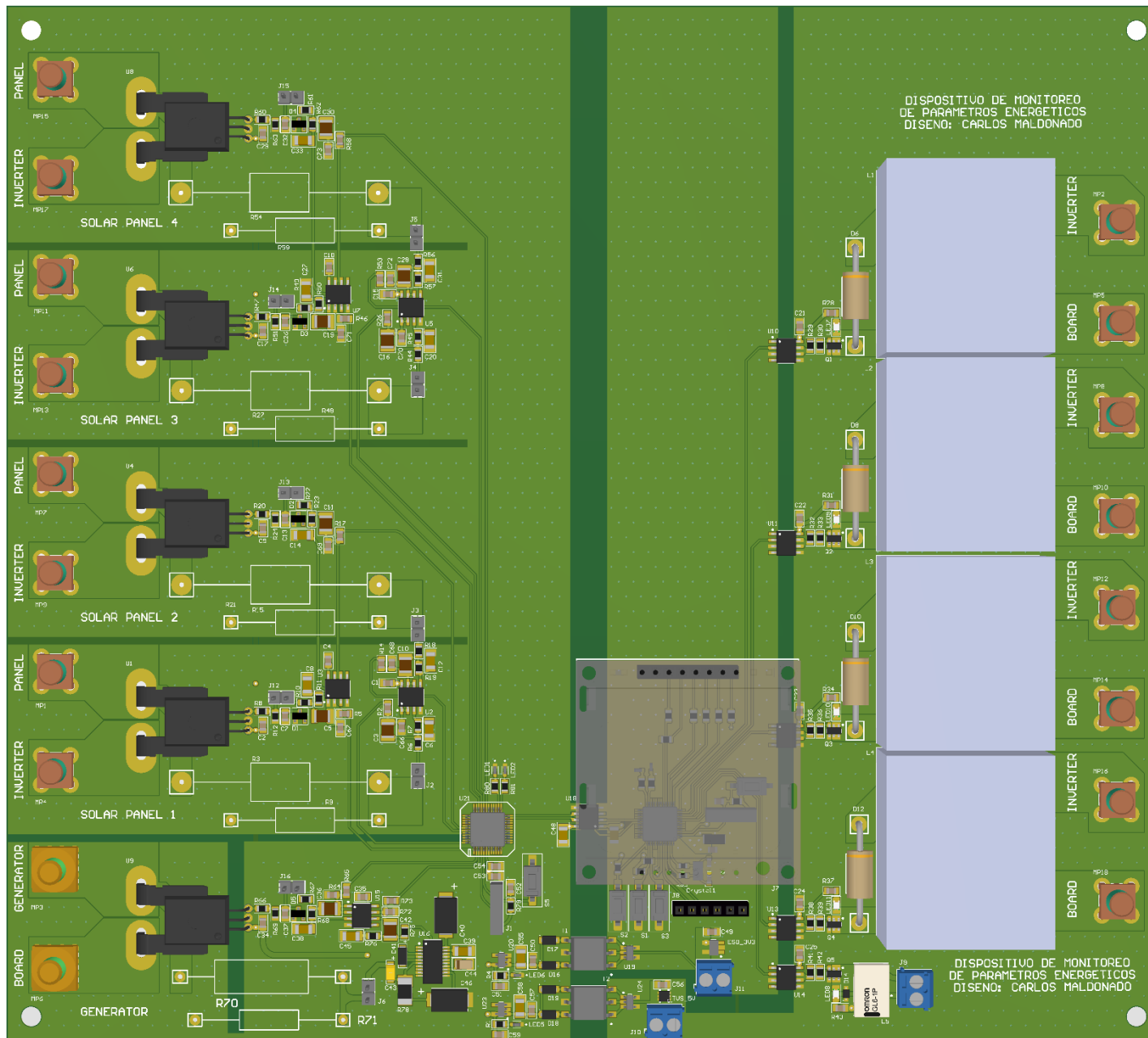
1

2

3

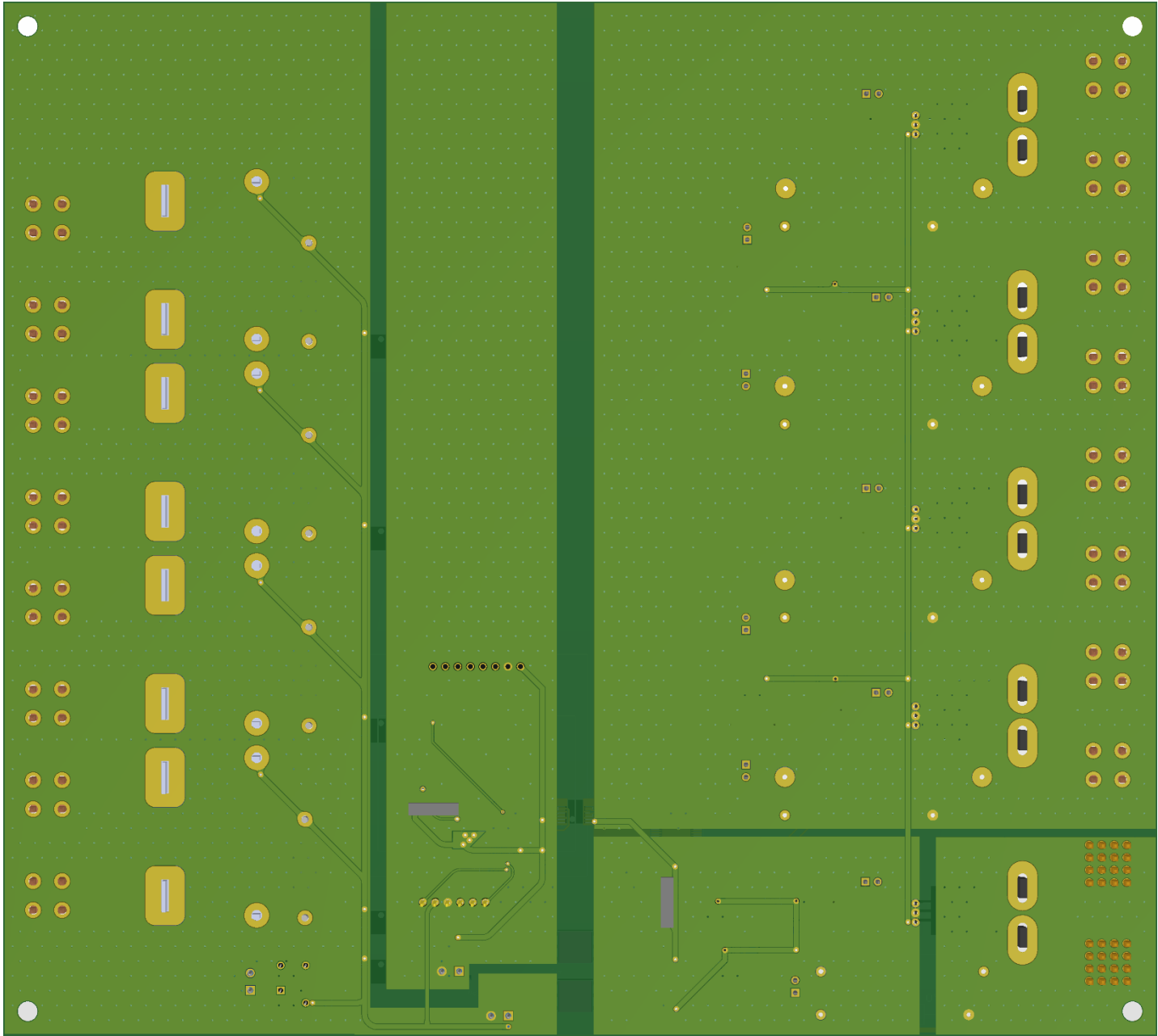
4

Title		
Size A4	Number	Revision
Date:	3/02/2021	Sheet of
File:	C:\Users\...Conectores.SchDoc	Drawn By:



PLACA DE CIRCUITO IMPRESO

TOP LAYER



PLACA DE CIRCUITO IMPRESO

BOTTOM LAYER

Número de parte del fabricante	Descripción	Referencia	Cantidad	Precio Unitario	Precio extendido
CC0805ZRY5V7BB104	CAP CER 0.1UF 16V Y5V 0805	C1, C2, C4, C9, C15, C17, C18, C21, C22, C23, C2	15	0.085	\$ 1.27
CL32B226KAJNNNE	CAP CER 22UF 25V X7R 1210	C3, C5, C10, C11, C16, C19, C28, C30, C36, C42	10	0.441	\$ 4.41
C1206C106J3RACAUTO	CAP CER 10UF 25V X7R 1206	C6, C8, C12, C14, C20, C27, C31, C33, C38, C45	10	0.649	\$ 6.49
AC0805KRX7R7BB103	CAP CER 10000PF 16V X7R 0805	C7, C13, C26, C32, C37	5	0.18	\$ 0.90
C1206C104K3HACTU	CAP CER 0.1UF 25V X8R 1206	C39, C47, C48, C55, C58	5	0.43	\$ 2.15
T491D106K025AT	CAP TANT 10UF 10% 25V 2917	C40, C46	2	0.99	\$ 1.98
T491A475M025AT	CAP TANT 4.7UF 20% 25V 1206	C41	1	0.53	\$ 0.53
T491A474K025AT	CAP TANT 0.47UF 10% 25V 1206	C43	1	0.42	\$ 0.42
TAJA335K020RNJ	CAP TANT 3.3UF 10% 20V 1206	C44	1	0.4	\$ 0.40
C2012X7R1E105K125AB	CAP CER 1UF 25V X7R 0805	C49, C50, C56, C57	4	0.3	\$ 1.20
C2012X7R1E475M125AB	CAP CER 4.7UF 25V X7R 0805	C51, C59	2	0.37	\$ 0.74
CC0805KRX7R9BB222	CAP CER 2200PF 50V X7R 0805	C52, C60	2	0.11	\$ 0.22
CC0805KRX5R5BB106	CAP CER 10UF 6.3V X5R 0805	C53	1	0.21	\$ 0.21
CC0805KRX7R9BB104	CAP CER 0.1UF 50V X7R 0805	C54, C62	2	0.11	\$ 0.22
293D106X0016A2TE3	CAP TANT 10UF 20% 16V 1206	C61	1	0.34	\$ 0.34
CL10C120JB8NNNC	CAP CER 12PF 50V COG/NPO 0603	C63, C64	2	0.1	\$ 0.20
C0805C473J3GEC7800	CAP CER 0805 47NF 25V COG 5%	C66, C67, C68, C69, C70, C71, C72, C73, C65, C74	10	0.306	\$ 3.06
ECS-.327-12.5-34B-TR	CRYSTAL 32.7680KHZ 12.5PF SMD	Crystal1	1	0.51	\$ 0.51
BZX84C3V3-7-F	DIODE ZENER 3.3V 300MW SOT23-3	D1, D2, D3, D4, D5	5	0.17	\$ 0.85
1N5820RLG	DIODE SCHOTTKY 20V 3A DO201AD	D6, D8, D10, D12	4	0.47	\$ 1.88
PMEG1020EA,115	DIODE SCHOTTKY 10V 2A SOD323	D14	1	0.36	\$ 0.36
MBR0520LT1G	RECTIFIER DIODE, SCHOTTKY, 0.5A,	D16, D17, D18, D19	4	0.29	\$ 1.16
ESDS312DBVR	FAMILY OF UNI-DIRECTIONAL SURGE	ESD_3V3	1	0.63	\$ 0.63
961104-6404-AR	CONN HEADER VERT 4POS 2.54MM	J1, J17	2	0.41	\$ 0.82
TSW-102-07-G-S	CONN HEADER VERT 2POS 2.54MM	J2, J3, J4, J5, J6, J12, J13, J14, J15, J16	10	0.26	\$ 2.60
PPTC081LFBN-RC	CONN HDR 8POS 0.1 TIN PCB	J7	1	0.65	\$ 0.65
PPTC061LFBN-RC	CONN HDR 6POS 0.1 TIN PCB	J8	1	0.52	\$ 0.52
6.91103E+11	TERM BLK 2POS SIDE ENT 3.5MM PCB	J9, J10, J11	3	0.83	\$ 2.49
HE1AN-P-DC6V-Y5	RELAY GEN PURPOSE SPST 48A 6V	L1, L2, L3, L4	4	33.04	\$ 132.16
G6L-1P DC5	RELAY TELECOM SPST 1A 5VDC	L5	1	2.91	\$ 2.91
LTST-C190GKT	LED GREEN CLEAR CHIP SMD	LED1, LED3, LED5, LED6	4	0.24	\$ 0.96

LTST-C190CKT	LED RED CLEAR CHIP SMD	LED2, LED4	2	0.3	\$ 0.60
150080VS75000	LED GREEN CLEAR 0805 SMD	LED7, LED8, LED9, LED10, LED11	5	0.18	\$ 0.90
74651175R	TERM REDCUBE 4PIN PCB	MP1, MP2, MP4, MP5, MP7, MP8, MP9, MP10, MP11, MP12, MP13, MP14, MP15, MP16, MP17, MP18	16	2.91	\$ 46.46
7461383	TERM REDCUBE M5 16PIN PCB	MP3, MP6	2	2.55	\$ 5.10
RQ6E080AJTCR	MOSFET N-CH 30V 8A TSMT6	Q1, Q2, Q3, Q4, Q5	5	0.73	\$ 3.65
RT0805FRE07470RL	RES SMD 470 OHM 1% 1/8W 0805	R1, R81, R84	3	0.1	\$ 0.30
RC0805FR-07100RL	RES SMD 100 OHM 1% 1/8W 0805	R2, R5, R14, R17, R26, R28, R31, R34, R37, R40	15	0.04	\$ 0.60
HVA12FA500M	RES 500M OHM 1.2W 1% AXIAL	R3, R15, R27, R54	4	0.76	\$ 3.04
RC0805FR-07392RL	RES SMD 392 OHM 1% 1/8W 0805	R4, R80, R83	3	0.1	\$ 0.30
RT0805BRD077K87L	RES SMD 7.87K OHM 0.1% 1/8W 0805	R6, R10, R18, R22, R44, R49, R56, R61, R67, R75	10	0.259	\$ 2.59
RNCF0805DTE14K7	RES 14.7K OHM 0.5% 1/8W 0805	R7, R11, R19, R23, R45, R50, R57, R62, R68, R76	10	0.11	\$ 1.10
RC0805JR-0722KL	RES SMD 22K OHM 5% 1/8W 0805	R8, R20, R47, R60, R66	5	0.1	\$ 0.50
RNX0382M70FKEE	RES 2.70M OHM 1% 100 PPM 1W	R9, R21, R48, R59	4	5.62	\$ 22.48
RC0805JR-0743KL	RES SMD 43K OHM 5% 1/8W 0805	R12, R24, R51, R63, R69	5	0.1	\$ 0.50
AC0805FR-07330RL	RES SMD 330 OHM 1% 1/8W 0805	R13	1	0.1	\$ 0.10
RC0805JR-071KL	RES SMD 1K OHM 5% 1/8W 0805	R16, R29, R32, R35, R38, R41	6	0.1	\$ 0.60
RC0805FR-0710KL	RES SMD 10K OHM 1% 1/8W 0805	R25, R43, R52, R55	4	0.1	\$ 0.40
RC0805JR-07220KL	RES SMD 220K OHM 5% 1/8W 0805	R30, R33, R36, R39, R42	5	0.1	\$ 0.50
VR68000001005JAC00	RES 10M OHM 1W 5% AXIAL	R70	1	0.71	\$ 0.71
PRO2000209102JR500	RES 91K OHM 2W 5% AXIAL	R71	1	0.41	\$ 0.41
CRCW201010M0JNEF	RES SMD 10M OHM 5% 3/4W 2010	R78	1	0.29	\$ 0.29
RC0805FR-0747KL	RES SMD 47K OHM 1% 1/8W 0805	R79, R82, R87, R88, R89	5	0.1	\$ 0.50
CRCW06030000Z0EAHP	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/3W 0603	R85, R86	2	0.14	\$ 0.28
PTS636 SM43 SMTR LFS	TACT 6.0 X 3.5, 4.3 MM H, 180GF,	S1, S2, S3, S4, S5	5	0.15	\$ 0.75
760390014	TRANSFORMER 475UH SMD	T1, T2	2	1.9	\$ 3.80
TVS0500DRVR	UNIDIR PRECISION SURGE DIODE	TVS_5V	1	0.65	\$ 0.65
ACS770LCB-050U-PFF-T	SENSOR CURRENT HALL 50A DC	U1, U4, U6, U8	4	7.18	\$ 28.72
ACS770ECB-200B-PFF-T	SENSOR CURRENT HALL 200A AC/DC	U9	1	7.18	\$ 7.18
SI8711AC-B-IS	DGTL ISO 3750VRMS 1CH GP 8SOIC	U10, U11, U12, U13, U14	5	0.92	\$ 4.60
AD8436ARQZ	IC RMS TO DC CONVERTER 20QSOP	U16	1	11.51	\$ 11.51
ISO7721DWVR	DGTL ISO 5000VRMS 2CH GP 8SOIC	U18	1	3.1	\$ 3.10
SN6501DBVR	IC REG CONV PWR SUPPLIES SOT23-5	U19, U24	2	2.06	\$ 4.12

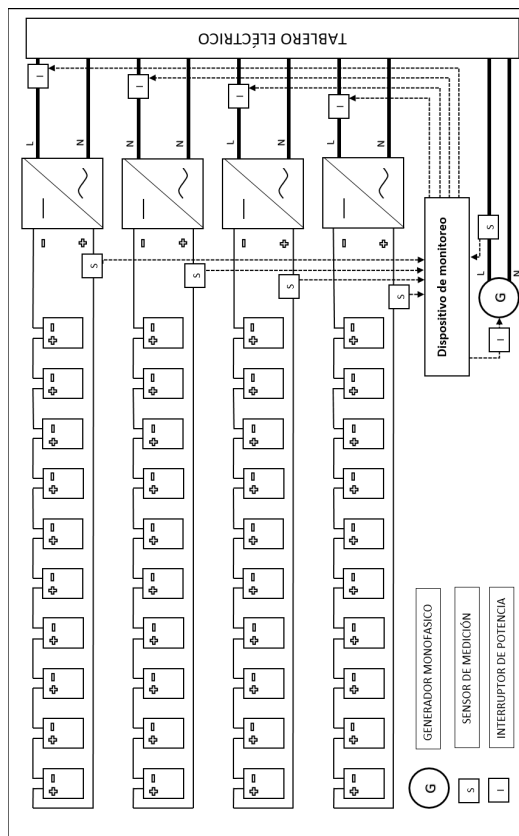
TPS76333QDBVRQ1	IC REG LINEAR 3.3V 150MA SOT23-5	U20	1	1.01	\$ 1.01
MSP430FR2155TPTR	IC MCU 16BIT 32KB FRAM 48LQFP	U21	1	2.88	\$ 2.88
MSP430FR2476TPT	IC MCU 16BIT 64.5KB FRAM 48LQFP	U22	1	3.15	\$ 3.15
TPS76350QDBVRG4Q1	IC REG LINEAR 5V 150MA SOT23-5	U23	1	1.01	\$ 1.01
LM358DR	IC OPAMP GP 2 CIRCUIT 8SOIC	U2, U3, U5, U7, U15	5	0.46	\$ 2.30
Precio en dolares americanos					\$ 339.93
Tipo de Cambio					7.8
Precio en Quetzales					Q 2,651.45

APÉNDICES

Apéndice 1. Diagramas

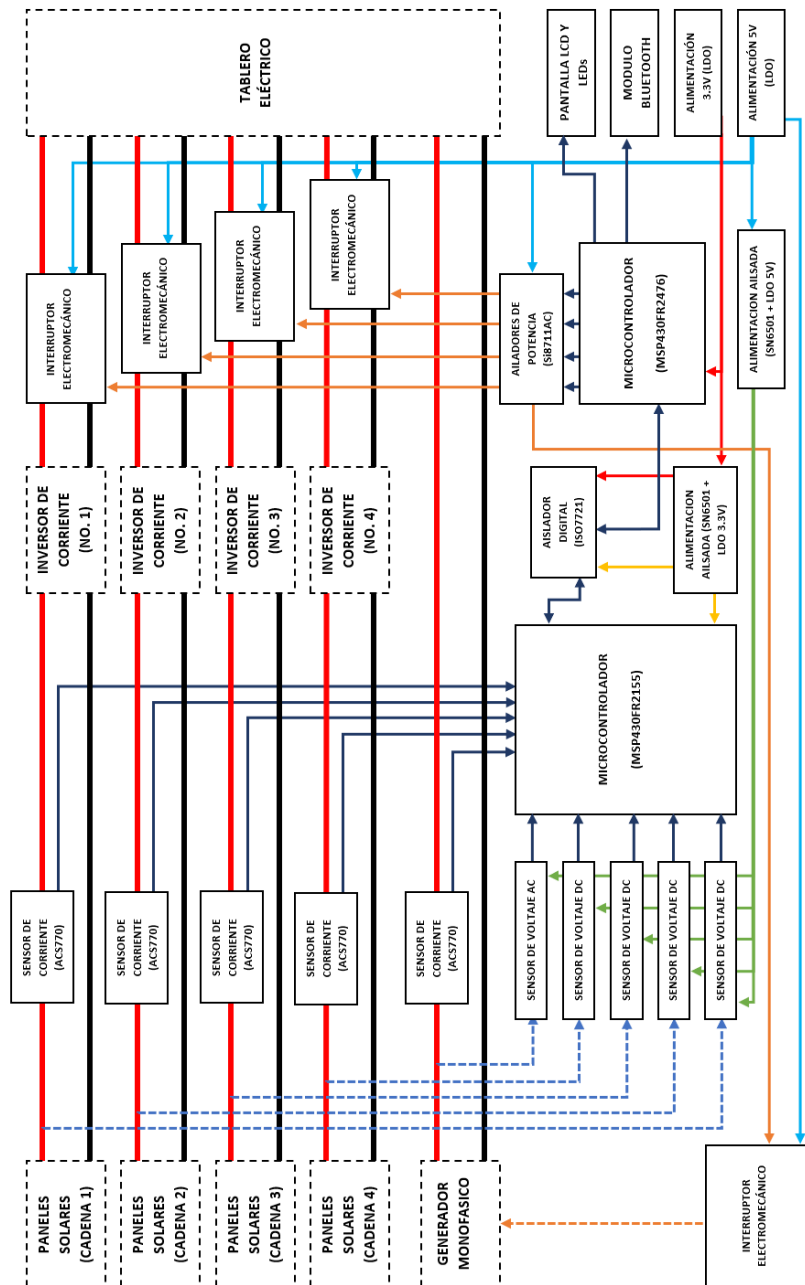
Se muestran los diagramas de interconexión de sistema y el diagrama de bloques del dispositivo de monitoreo de parámetros eléctricos.

Apéndice 1a. Diagrama de interconexión del sistema híbrido



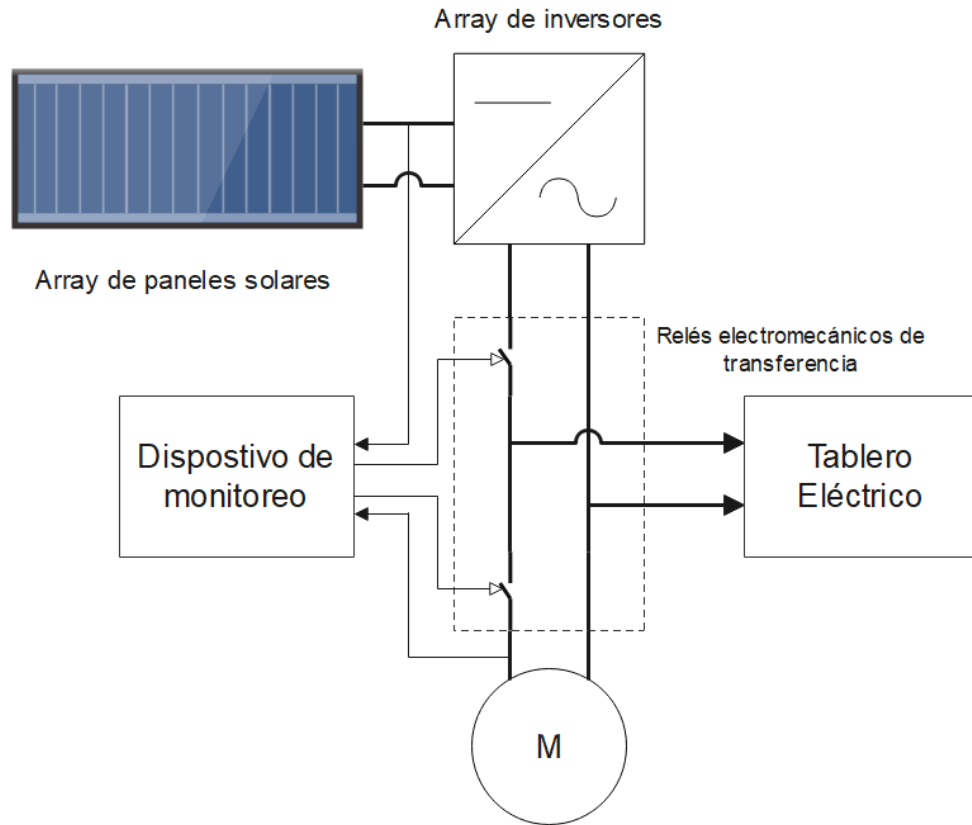
Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365.

Apéndice 1b. Diagrama de bloques del dispositivo de monitoreo de parámetros energéticos de bajo costo



Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365.

Apéndice 2. **Diagrama de transferencia del sistema fotovoltaico híbrido**



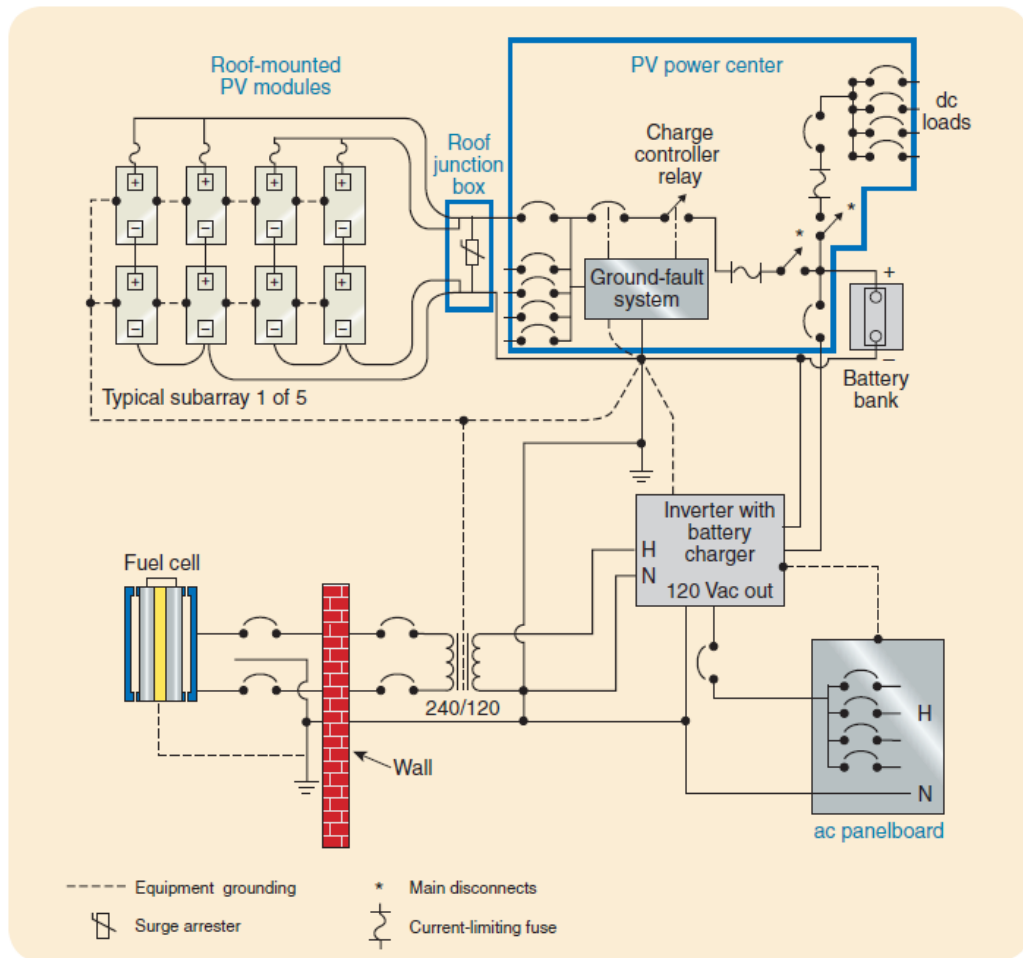
Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365.

Apéndice 3. **Diagrama de circuitos electrónicos y listado de componentes**

Fuente: elaboración propia, empleando Word versión Microsoft 365.

ANEXOS

Anexo 1. Sistema híbrido residencial



Fuente: EARLEY, Mark. Et. Al. *National Electrical Code (NEC), Handbook*, p. 1 069.

Anexo 2. Tablas de ampacidad

Se muestran las tablas para el cálculo del cableado eléctrico.

Anexo 2a. Tabla de ampacidad de conductores aislados a diferentes temperaturas

TABLE 310.15(B)(16) (formerly Table 310.16) Allowable Ampacities of Insulated Conductors Rated Up to and Including 2000 Volts, 60°C Through 90°C (140°F Through 194°F), Not More Than Three Current-Carrying Conductors in Raceway, Cable, or Earth (Directly Buried), Based on Ambient Temperature of 30°C (86°F)*

Size AWG or kcmil	Temperature Rating of Conductor [See Table 310.104(A).]						Size AWG or kcmil
	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	
	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Types TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE	Types TBS, SA, SIS, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
COPPER			ALUMINUM OR COPPER-CLAD ALUMINUM				
18	—	—	14	—	—	—	—
16	—	—	18	—	—	—	—
14**	15	20	25	—	—	—	—
12**	20	25	30	15	20	25	12**
10**	30	35	40	25	30	35	10**
8	40	50	55	35	40	45	8
6	55	65	75	40	50	55	6
4	70	85	95	55	65	75	4
3	85	100	115	65	75	85	3
2	95	115	130	75	90	100	2
1	110	130	145	85	100	115	1
1/0	125	150	170	100	120	135	1/0
2/0	145	175	195	115	135	150	2/0
3/0	165	200	225	130	155	175	3/0
4/0	195	230	260	150	180	205	4/0
250	215	255	290	170	205	230	250
300	240	285	320	195	230	260	300
350	260	310	350	210	250	280	350
400	280	335	380	225	270	305	400
500	320	380	430	260	310	350	500
600	350	420	475	285	340	385	600
700	385	460	520	315	375	425	700
750	400	475	535	320	385	435	750
800	410	490	555	330	395	445	800
900	435	520	585	355	425	480	900
1000	455	545	615	375	445	500	1000
1250	495	590	665	405	485	545	1250
1500	525	625	705	435	520	585	1500
1750	545	650	735	455	545	615	1750
2000	555	665	750	470	560	630	2000

*Refer to 310.15(B)(2) for the ampacity correction factors where the ambient temperature is other than 30°C (86°F).

**Refer to 240.4(D) for conductor overcurrent protection limitations.

Fuente: EARLEY, Mark. Et. Al. *National Electrical Code (NEC), Handbook*, p. 336.

Anexo 2b. **Tabla de ampacidad de conductores aislados simples a diferentes temperaturas**

TABLE 310.15(B)(17) (formerly Table 310.17) Allowable Ampacities of Single-Insulated Conductors Rated Up to and Including 2000 Volts in Free Air, Based on Ambient Temperature of 30°C (86°F)*

Size AWG or kcmil	Temperature Rating of Conductor [See Table 310.104(A).]						Size AWG or kcmil
	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	
	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, ZW	Types TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW- 2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE- 2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW	Types TBS, SA, SIS, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
	COPPER			ALUMINUM OR COPPER-CLAD ALUMINUM			
18	—	—	18	—	—	—	—
16	—	—	24	—	—	—	—
14**	25	30	35	—	—	—	—
12**	30	35	40	25	30	35	12**
10**	40	50	55	35	40	45	10**
8	60	70	80	45	55	60	8
6	80	95	105	60	75	85	6
4	105	125	140	80	100	115	4
3	120	145	165	95	115	130	3
2	140	170	190	110	135	150	2
1	165	195	220	130	155	175	1
1/0	195	230	260	150	180	205	1/0
2/0	225	265	300	175	210	235	2/0
3/0	260	310	350	200	240	270	3/0
4/0	300	360	405	235	280	315	4/0
250	340	405	455	265	315	355	250
300	375	445	500	290	350	395	300
350	420	505	570	330	395	445	350
400	455	545	615	355	425	480	400
500	515	620	700	405	485	545	500
600	575	690	780	455	545	615	600
700	630	755	850	500	595	670	700
750	655	785	885	515	620	700	750
800	680	815	920	535	645	725	800
900	730	870	980	580	700	790	900
1000	780	935	1055	625	750	845	1000
1250	890	1065	1200	710	855	965	1250
1500	980	1175	1325	795	950	1070	1500
1750	1070	1280	1445	875	1050	1185	1750
2000	1155	1385	1560	960	1150	1295	2000

*Refer to 310.15(B)(2) for the ampacity correction factors where the ambient temperature is other than 30°C (86°F).

**Refer to 240.4(D) for conductor overcurrent protection limitations.

Fuente: EARLEY, Mark. Et. Al. *National Electrical Code (NEC), Handbook*, p. 336.

Anexo 2c. **Tabla de factores de ajuste para más de tres conductores que transportan corriente en un cable o conductor**

TABLE 310.15(B)(3)(a) Adjustment Factors for More Than Three Current-Carrying Conductors in a Raceway or Cable

Number of Conductors¹	Percent of Values in Table 310.15(B)(16) through Table 310.15(B)(19) as Adjusted for Ambient Temperature if Necessary
4-6	80
7-9	70
10-20	50
21-30	45
31-40	40
41 and above	35

¹Number of conductors is the total number of conductors in the raceway or cable adjusted in accordance with 310.15(B)(5) and (6).

Fuente: EARLEY, Mark. Et. Al. *National Electrical Code (NEC), Handbook*. p. 330.

Anexo 3. Tabla de radiación solar

Se muestra la tabla de datos obtenida de Power larc de la NASA

Apéndice 3a. **Tabla de radiación solar global en una superficie horizontal en Guatemala, a una latitud y longitud iguales a (14.62041, - 90.49579), con una elevación de 1663 m. para el año 2019**

DIA\MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1	5.72	4.87	6.09	6.53	4.85	3.67	5.71	7.18	5.29	2.92	4.82	5.83
2	5.23	4.94	5.67	7.14	4.79	3.69	5	6.16	6.96	4	5.05	5.48
3	5.67	5.85	6.78	4.79	4.34	6.19	7.18	6.08	6.92	4.43	5.34	5.54
4	5.62	5.76	5.55	5.35	6.69	5.82	7.68	5.42	6.66	5.56	5.34	5.65
5	5.68	5	5.46	5.79	5.54	5.91	7.67	5.63	6.79	4.52	5.9	5.72
6	3.93	6.15	5.85	5.04	6.9	6.58	6.97	6.16	4	5.96	5.86	5.49
7	4.11	6.01	6.86	4.61	6.44	5.52	5.88	5.98	6.25	4.68	5.76	4.98
8	5.1	5.16	6.21	4	5.41	5.92	5.37	3.74	4.29	4.5	4.37	4.71
9	4.07	5.1	6.4	4.62	6.84	4.01	5.28	4.38	6.28	6.05	5.46	5.28
10	3.98	5.9	6.91	4.37	5.94	4.37	5.33	6.29	6.3	5.55	5.06	6.07
11	5.49	6.16	6.88	6.54	5.28	6.38	6.29	6.24	5	6.21	5.02	4.72
12	5.71	6.05	6.52	7.17	6.1	6.44	6.45	6.56	5.67	5.4	5.47	4.46
13	4.68	6.42	6.2	7.4	6.26	2.68	5.7	6.99	5.4	5.71	5.08	5.17
14	4.83	6.46	6.56	7.54	3.66	5.76	6.01	7.48	6.37	3.01	5.55	5.05
15	5.49	6.57	6.13	6.68	3.82	5.74	6.36	5.26	4.39	2.51	5.09	5.33
16	5.39	5.72	6.2	5.84	4.32	5.75	5.46	4.95	3.67	0.85	3.99	5.31
17	4.49	6.25	6.92	5.51	4.68	6.17	6.17	3.92	3.31	5.22	5.69	4.53
18	5.32	6.43	6.53	5.27	4.37	6.77	3.5	2.61	4	5.18	5.41	3.76
19	5.63	5.95	6.45	2.71	5.12	6.44	6.43	5.82	6.06	5.27	4.82	5.51
20	4.51	5.95	6.69	7.09	5.11	5.7	6.12	4.97	5.34	5.73	5.57	5.27
21	5.26	5.03	4.45	7.5	5.11	5.65	6.22	5.06	5.4	4.68	5.75	5.41
22	5.93	5.78	5.76	6.82	6.01	3.73	6.06	3.93	3.56	3.32	5.4	4.45
23	5.96	3.62	6.36	6.51	5.81	6.16	6.47	6.28	5.22	2.82	5.69	5.16
24	6.01	5.24	7.31	5.41	4.46	6.85	6.21	6.91	3.99	4.34	4.18	5.54
25	5.86	5.69	7.49	5.31	5.14	6.14	6.79	6.12	4.78	5.47	5.46	5.58
26	5.28	6.99	6.71	4.64	5.58	7.09	6.97	6.98	5.11	3.81	5.73	5.65
27	5.24	6.8	5.23	5.56	5.1	7.17	6.91	6.19	4.87	3.59	5.71	5.66
28	6.03	5.85	6.37	6.48	4.37	7.21	6.49	5.66	3.59	3.98	4.56	5.75
29	5.84	5.82	5.82	6.78	5.32	5	7.26	7.39	4.63	5.42	4.13	5.58
30	5.63	6.1	5.99	3.78	5.14	6.94	6.46	6.46	6.46	4.84	4	5.24
31	5.97	6.39	4.35	5.78	5.78	5.78	5.78	5.78	5.78	5.08	5.08	3.63
PROMEDIO	5.281290323	5.775	6.279032258	5.885333333	5.158387097	5.687	6.245806452	5.82516129	5.193666667	4.588064516	5.208666667	5.181612903

Fuente: Nasa Open Data Portal. *Power Data Access Viewer*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> Consulta: 02 de febrero de 2020

Anexo 4. Hojas de datos de los fabricantes

Se muestran las hojas de datos de los componentes del sistema fotovoltaico híbrido escogidos.

Anexo 4a. Hoja de datos del módulo fotovoltaico de Canadian Solar





KuMax

HIGH EFFICIENCY MONO PERC MODULE

CS3U-380|385|390|395|400MS

(1000 V / 1500 V)

MORE POWER

-  Low power loss in cell connection
-  Low NMOT: $42 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$
Low temperature coefficient (Pmax): $-0.36 \text{ } \%/ \text{ }^\circ\text{C}$
-  Better shading tolerance
-  High PTC
High PTC rating of up to: 93.24 %

MORE RELIABLE

-  Lower hot spot temperature
-  Minimizes micro-cracks
-  Heavy snow load up to 5400 Pa,
wind load up to 3600 Pa*

25 years linear power output warranty*

12 years enhanced product warranty on materials and workmanship*

*According to the applicable Canadian Solar Limited Warranty Statement.

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES

ISO 9001:2015 / Quality management system
ISO 14001:2015 / Standards for environmental management system
OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730: VDE / CE / CQC / MCS / KS / INMETRO
UL 1703 / IEC 61215 performance: CEC Listed (US)
UL 1703: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: VDE / IEC 60068-2-68: SGS
Take-e-way



* As there are different certification requirements in different markets, please contact your local Canadian Solar sales representative for the specific certificates applicable to the products in the region in which the products are to be used.

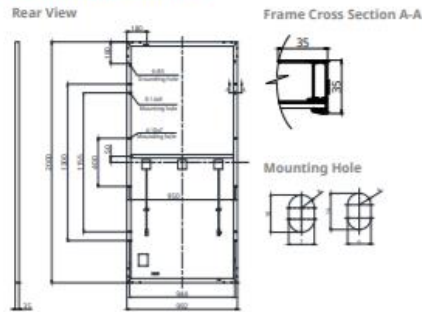
CANADIAN SOLAR INC. is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. No. 1 module supplier for quality and performance/price ratio in IHS Module Customer Insight Survey. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 36 GW deployed around the world since 2001.

* For detailed information, please refer to the Installation Manual.

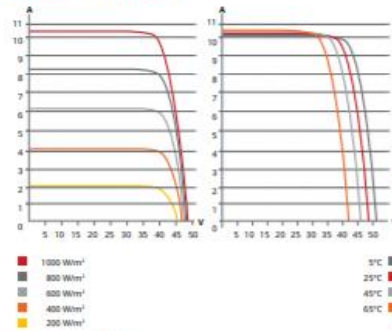
CANADIAN SOLAR INC.
545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com

Continuación anexo 4a:

ENGINEERING DRAWING (mm)



CS3U-400MS / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS3U	380MS	385MS	390MS	395MS	400MS
Nominal Max. Power (Pmax)	380 W	385 W	390 W	395 W	400 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	40.0 V	40.2 V	40.4 V	40.6 V	40.8 V
Opt. Operating Current (Imp)	9.50 A	9.58 A	9.66 A	9.73 A	9.81 A
Open Circuit Voltage (Voc)	47.8 V	48.0 V	48.2 V	48.4 V	48.6 V
Short Circuit Current (Isc)	10.01 A	10.09 A	10.17 A	10.25 A	10.33 A
Module Efficiency	19.15%	19.41%	19.66%	19.91%	20.16%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C				
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)				
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or Class C (IEC 61730)				
Max. Series Fuse Rating	30 A				
Application Classification	Class A				
Power Tolerance	0 ~ +5 W				

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS3U	380MS	385MS	390MS	395MS	400MS
Nominal Max. Power (Pmax)	283 W	287 W	290 W	294 W	298 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37.2 V	37.4 V	37.6 V	37.8 V	38.0 V
Opt. Operating Current (Imp)	7.60 A	7.66 A	7.72 A	7.78 A	7.84 A
Open Circuit Voltage (Voc)	44.8 V	45.0 V	45.2 V	45.4 V	45.6 V
Short Circuit Current (Isc)	8.08 A	8.14 A	8.20 A	8.27 A	8.33 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline
Cell Arrangement	144 [2 X (12 X 6)]
Dimensions	2000 X 992 X 35 mm (78.7 X 39.1 X 1.38 in)
Weight	22.5 kg (49.6 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy, crossbar enhanced
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4 mm² (IEC), 12 AWG (UL)
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 400 mm (15.7 in) (+) / 280 mm (11.0 in) (-); landscape: 1250 mm (49.2 in); leap-frog connection: 1670 mm (65.7 in)*
Connector	T4 series or H4 UTX or MC4-EVO2
Per Pallet	30 pieces
Per Container (40' HQ)	660 pieces

* For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.36 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.29 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	42 ± 3°C

PARTNER SECTION



* The specifications and key features contained in this datasheet may deviate slightly from our actual products due to the on-going innovation and product enhancement. Canadian Solar Inc. reserves the right to make necessary adjustments to the information described herein at any time without further notice. Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

CANADIAN SOLAR INC.

545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com

Oct. 2019. All rights reserved. PV Module Product Datasheet V5.6_EN

Fuente: Canadian Solar. *High Efficiency Mono Perc Module.*

https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian_Solar-Datasheet-KuMax_CS3U-MS_EN.pdf. Consulta: abril 2020. p. 1.

Anexo 4b. Hoja de datos del inversor de corriente de Canadian Solar



SINGLE PHASE STRING INVERTER

CSI-4KTL1P-GI-FL | CSI-5KTL1P-GI-FL

KEY FEATURES

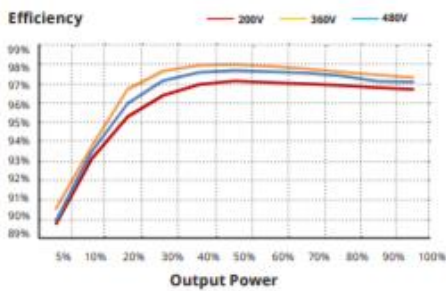
- Max. efficiency up to 98%, wide input voltage range
- Integrated DC switch
- Transformerless topology
- Compact design
- Flexible communication connection: supports RF, WiFi, Ethernet



Standard warranty, extension up to 20 years

EFFICIENCY CURVE

CSI-5KTL1P-GI @220 Vac



HIGH RELIABILITY

- Advanced thermal design and convection cooling
- Built in over-voltage and over-current protection
- DC reverse polarity and AC short circuit protection

CANADIAN SOLAR INC. is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 30 GW deployed around the world since 2001, Canadian Solar Inc. is one of the most bankable solar companies worldwide.

*For detailed information, please refer to the Installation Manual.

CANADIAN SOLAR INC.

545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada | www.canadiansolar.com

Continuación anexo 4b:

TECHNICAL DATA		
MODEL NAME	CSI-4KTL1P-GI-FL	CSI-5KTL1P-GI-FL
DC INPUT		
Max. PV power	4.5KW	5.8KW
Max. DC input voltage	600V	
Start-up DC Input Voltage	120V	
Number of MPP Trackers	2/2	
MPP Voltage Range	90-520V	
Max. Input Current (Imp)	11A	
Max. Short Circuit Current (Isc)	17.2A	
Number of DC Inputs	1/1	
DC Disconnection Type	Load rated DC switch	
Nominal DC Voltage	330V	
Max. Power per MPPT	4KW	4KW
MPPT Full Power Voltage Range	187-520V	234-520V
AC OUTPUT		
Rated AC Output Power	4KW	5KW
Max. AC Output Power	4.4KW	5KW
Rated Output Voltage	220V/230V	
OUTPUT VOLTAGE RANGE		
Grid Connection Type	1 Φ / PE	
Rated Grid Output Current	18.2/17.4A	22.7/21.7A
Max. Output Current	21A	25A (21.7 for AUS)
Rated Output Frequency	50HZ/60HZ	
Output Frequency Range	47-52HZ OR 57-62HZ	
Power Factor	0.8 Leading ... 0.8 Lagging	
Current THD	<1.5%	
DC Injection Current	<0.5% In	
Max. Apparent Output Power	4.4KVA	5KVA
SYSTEM		
Topology	Transformerless	
Max. Efficiency	98.1%	
EU Efficiency	97.3%	
MPPT Efficiency	>99.5%	
Night Consumption	<1W (Night)	
ENVIRONMENT		
Protection Degree	IP65	
Cooling	Natural convection	
Operating Ambient Temperature Range	-25°C to +60°C	
Storage Temperature Range	-40°C to +70°C	
Operating Humidity	0-100%	
Operating Altitude	4000m	
Noise Emission (typical)	<20dB	
GENERAL DATA		
Display	LCD, 2x20 Z	
Communication Connections	WiFi/RS485 Optional	
Dimensions (WxHxD)	310Wx438Hx160D (mm)	
Net Weight	11.5kg	
Installation Angle	90 degrees from horizontal	
DC Inputs	MC4	
Warranty	5 Years	
SAFETY		
Safety and EMC Standard	IEC62109-1/-2, NB/T 32004	
Grid Standard	EN50438, GB312, G59/3, AS4777.2:2015, VDE0126-1-1, IEC61727, VDE N4105, NBR-16149/NBR-16150	

The specification and key features described in this datasheet may deviate slightly and are not guaranteed. Due to on-going innovation, research and product enhancement, Canadian Solar Inc. reserves the right to make any adjustment to the information described herein at any time without notice. Please always obtain the most recent version of the datasheet which shall be duly incorporated into the binding contract made by the parties governing all transactions related to the purchase and sale of the products described herein.

Caution: For professional use only. The installation and handling of PV equipment requires professional skills and should only be performed by qualified professionals. Please read the safety and installation instructions before using the product.

CANADIAN SOLAR INC.

March 2019 | All rights reserved | Inverter Product Datasheet V1.1

Fuente: Canadian Solar. *Single Phase String Inverter*. https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/CanadianSolar_Inverter_Single-Phase_4-5KW.pdf

Consulta: abril 2020. p.1.

Anexo 5. **Norma NTGDR**

Se muestra una norma técnica de generación distribuida renovable obtenida de la página oficial de la Comisión Nacional de Energía (CNEE)

Anexo 5a. **Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios auto productores con excedentes de energía**

NORMA TÉCNICA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE Y USUARIOS AUTOPRODUCTORES CON EXCEDENTES DE ENERGÍA

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA
CNEE

NORMA TÉCNICA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE Y
USUARIOS AUTOPRODUCTORES CON EXCEDENTES DE ENERGÍA.

NTGDR

GUATEMALA, C.A.

Resolución CNEE-227-2014

Página 1 de 20

Fuente: CNEE. *Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Auto productores con Excedentes de Energía*. <https://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/08%20NTGDR.pdf>. Consulta: marzo 2021. p.1.