



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Escuela de Mecánica Eléctrica

**DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ARMÓNICOS EN INVERSORES DE ENERGÍA
SOLAR, IMPLEMENTANDO SISTEMAS EMBEBIDOS EN TIEMPO REAL**

Rufino Haroldo Locón Amézquita

Asesorado por el Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Guatemala, febrero de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	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. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
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:

DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ARMÓNICOS EN INVERSORES DE ENERGÍA SOLAR, IMPLEMENTANDO SISTEMAS EMBEBIDOS EN TIEMPO REAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 7 de noviembre de 2017.


Rufino Haroldo Locón Amézquita

Guatemala, 17 de octubre de 2019

Ingeniero
Julio César Solares Peñate
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

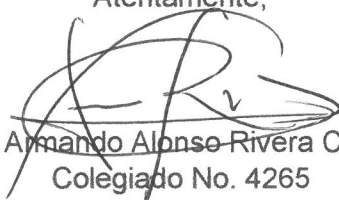
Estimado Ingeniero Solares:

Por medio de la presente le informo que he asesorado el trabajo de tesis titulado: **“DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ARMÓNICOS EN INVERSORES DE ENERGÍA SOLAR, IMPLEMENTANDO SISTEMAS EMBEBIDOS EN TIEMPO REAL”**, desarrollado por el estudiante Rufino Haroldo Locón Amézquita, previo a optar al título de Ingeniero Electrónico.

Con base en la revisión y corrección de dicho trabajo, considero que ha alcanzado los objetivos propuestos, por lo que el estudiante y asesor, nos hacemos responsables del contenido del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,



Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Colegiado No. 4265

Armando Alonso Rivera Carrillo
Ingeniero Electrónico
Colegiado No. 4265

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

REF. EIME 72. 2019.
25 de OCTUBRE 2019.

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

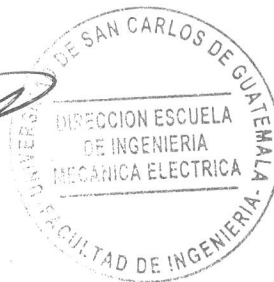
Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ARMÓNICOS EN
INVERSORES DE ENERGÍA SOLAR, IMPLEMENTANDO
SISTEMAS EMBEBIDOS EN TIEMPO REAL** del estudiante;
Rufino Haroldo Locón Amézquita, que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

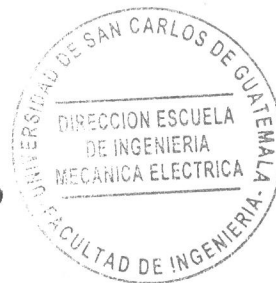




REF. EIME 72. 2019.

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: RUFINO HAROLDO LOCÓN AMÉZQUITA titulado: DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ARMÓNICOS EN INVERSORES DE ENERGÍA SOLAR, IMPLEMENTANDO SISTEMAS EMBEBIDOS EN TIEMPO REAL , procede a la autorización del mismo.


Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo



GUATEMALA, 5 DE NOVIEMBRE 2019.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189102 - 24189103

DTG. 041.2020

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: **DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ARMÓNICOS EN INVERSORES DE ENERGÍA SOLAR, IMPLEMENTANDO SISTEMAS EMBEBIDOS EN TIEMPO REAL**, presentado por el estudiante universitario: **Rufino Haroldo Locón Amézquita**, 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, febrero de 2020

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Agustín Haroldo Locón Solórzano y Ana Dominga Amézquita Vargas. Por su incondicional apoyo a lo largo de mi vida.

Mi familia

Por ser una parte sustancial de mi entorno.

Guatemala

A la Patria.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Mi alma máter.

Facultad de Ingeniería

Por el conocimiento, por las alegrías y los sentimientos encontrados.

**Escuela de Mecánica
Eléctrica**

Por el legado que sus maestros nos han dejado.

**Mi Asesor de Tesis Ing.
Armando Rivera**

Por su paciencia a lo largo de este proceso.

**Mis compañeros de la
Facultad**

Por su invaluable amistad durante los años de estudio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ENERGÍA SOLAR	1
1.1. Características de la energía solar	1
1.2. Celdas solares	3
1.2.1. Características.....	3
1.2.2. Tipos.....	7
1.3. Inversores.....	11
1.3.1. Funcionamiento	11
1.3.2. Sistemas aislados	12
1.3.2.1. Entrada de batería	14
1.3.2.2. Entrada de batería y carga	15
1.3.2.3. Salida alterna y continua	15
1.3.3. Forma de onda	15
1.3.3.1. Onda cuadrada	16
1.3.3.2. Onda senoidal pura	16
1.3.3.3. Rendimiento de un inversor	16
1.3.3.4. Calidad de la señal de salida	17

2.	CALIDAD DE POTENCIA	19
2.1.	Calidad de potencia.....	19
2.2.	Causas de pérdidas y disturbios eléctricos	20
2.2.1.	Potencia reactiva.....	21
2.2.2.	Variaciones de voltaje	23
2.2.3.	Otros disturbios	28
2.3.	Armónicos	28
2.3.1.	Origen de los armónicos.....	31
2.3.2.	Efectos en los sistemas.....	34
3.	SISTEMAS EMBEBIDOS Y APLICACIONES.....	35
3.1.	Sistemas en tiempo real.....	35
3.1.1.	Tipos de sistemas	36
3.1.1.1.	Suaves	37
3.1.1.2.	Duros.....	38
3.1.2.	Tipos de tareas.....	39
3.1.2.1.	Periódicas.....	40
3.1.2.2.	Aperiódicas.....	41
3.2.	Sistemas embebidos en tiempo real	42
3.3.	Sistemas operativos en tiempo real	44
4.	DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ARMÓNICOS	47
4.1.	Señales y sensores	47
4.2.	Medición de parámetros.....	49
4.2.1.	Voltaje	49
4.2.2.	Corriente.....	51
4.2.3.	Protección de circuitos	52
4.3.	Adquisición de datos y digitalización	54
4.3.1.	Conversión análogo-digital	55

4.3.2.	Multiplexación y muestreo	57
4.4.	Sistemas de detección.....	59
4.4.1.	Detector de armónicos.....	60
4.5.	Sistemas de corrección	66
4.5.1.	Filtros dinámicos.....	67
CONCLUSIONES		69
RECOMENDACIONES		71
BIBLIOGRAFÍA.....		73
APÉNDICE.....		77
ANEXO		79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de bloques sistema de energía solar	2
2.	Características físicas módulo solar A-135P	4
3.	Curva característica módulo solar A-135P	5
4.	Conexión de paneles solares	6
5.	Elaboración de celdas	9
6.	Reguladores en serie y paralelo.....	13
7.	Triangulo de potencia.....	21
8.	Sag y Swell	23
9.	Sobretensiones transitorias.....	24
10.	Interrupción de energía	25
11.	Ruido	26
12.	Impulso.....	26
13.	Oscilatorios	27
14.	Notching	27
15.	Armónicos	28
16.	Parámetros de una señal senoidal.....	30
17.	Muestreo de datos.....	35
18.	Formato de tiempo tareas periódicas	41
19.	Formato de tiempo tareas aperiódicas	42
20.	Sistema DSP	43
21.	Señales continua y discreta	48
22.	Circuito simple para muestreo de voltaje AC	50
23.	Circuito integrado AD629	51

24.	Diagrama de bloques ADC por conteo	56
25.	Convertidor completo ADC por conteo	57
26.	Circuito inversor monofásico.....	62
27.	Diagrama de bloques PLL	64
28.	Diagrama VCDO	65
29.	Diagrama PLL completo	65

TABLAS

I.	Características eléctricas módulo solar A-135P.....	5
II.	Índice de factor de potencia.....	22
III.	Tiempos de muestreo	36
IV.	Métodos de detección de armónicos	63

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
α	Coefficiente de temperatura de I_{sc}
γ	Coefficiente de temperatura de P
β	Coefficiente de temperatura de V_{oc}
h	Constante de Plank
DAC	Convertidor digital-analógico
ca	Corriente alterna
cc	Corriente continua
I_{sc}	Corriente de cortocircuito
dc	Corriente directa
IM_n	Corriente en un módulo solar independiente
I_{mp}	Corriente punto de máxima potencia
ITM	Corriente total en módulos solares en paralelo
SiO₂	Dióxido de silicio
TDH	Distorsión armónica total
E	Energía recibida de los fotones
EVA	Etil-vinil-acetileno
FP	Factor de potencia
ω	Frecuencia angular
f	Frecuencia en Hertz (Hz) o ciclos/segundo
Hz	Hertz o ciclos/segundo
Γ	Juego de tareas periódicas
α_k	k-ésima tarea aperiódica

kHz	Kilohertz
Wp	Máxima potencia del módulo
Io	Máximo valor instantáneo de corriente
Vo	Máximo valor instantáneo de voltaje
MHz	Megahertz
um	Micrómetro
us	Microsegundos
mm	Milímetro
ms	Milisegundos
PWM	Modulación por ancho de pulso
nm	Nanómetro
T_N	N-ésima tarea periódica
N	Número de tareas periódicas
π	Número pi
h	Orden armónico
C_i	Peor caso de tiempo de ejecución
E_k	Peor caso estimado de tiempo de ejecución
T	Período
T_i	Período de la tarea
fh_n	Porcentaje de cada armónico
P	Potencia activa
S	Potencia Aparente
W	Potencia en watts
Q	Potencia reactiva
s	Segundos
N	Semiconductor dopado negativamente
P	Semiconductor dopado positivamente
UPS	Sistema de potencia ininterrumpida
DSP	Sistema de procesamiento digital

Vcd	Tensión en cada celda
Voc	Tensión en circuito abierto
VM	Tensión en un módulo solar independiente
Vmp	Tensión punto de máxima potencia
VTM	Tensión total en módulos solares en paralelo
a_k	Tiempo de arribo tarea aperiódica
f_k	Tiempo de finalización de una tarea aperiódica
R_k	Tiempo de respuesta de α_k
d_{i,j}	Tiempo límite de la tarea
FFT	Transformada rápida de Fourier
P-N	Unión de semiconductores
U_i	Utilización de procesador
RMS	Valor eficaz

GLOSARIO

Armónico	Representa una señal distorsionada por la adición de una o más señales que son múltiplo entero de la señal original.
Adquisición de datos	Proceso a través del cual una señal física es transformada por medio de elementos transductores y circuitos electrónicos para luego obtener información y datos relevantes.
Batería	Dispositivo que proporciona una señal de corriente continua.
Calidad de potencia	Habilidad de la red eléctrica para suministrar una fuente de energía estable y limpia.
Carga no lineal	Son equipos electrónicos que modifican la forma de onda de tensión o corriente.
Celda fotovoltaica	Dispositivos de silicio que forman una lámina plana.
Conversión ADC	Es un proceso que convierte señales analógicas en señales digitales, para posteriormente procesarlas más fácilmente por medio de circuitos digitales.

Corriente	Movimiento de electrones a través de un circuito.
Cubierta	Elemento fabricado con vidrio templado que protege el panel solar.
Digitalización	Proceso donde una señal proveniente de sensores o transductores es transformada a su equivalente digital en instantes discretos de tiempo.
Distorsión armónica	Condición que se da cuando se suman una o más componentes armónicas a la onda fundamental alterando su forma.
Disturbio eléctrico	Es un fenómeno que provoca variaciones de voltaje, traspases, o parpadeos.
Encapsulante	Elemento que protege las celdas solares y las conexiones internas del panel solar.
Energía solar	Energía que basa su principio en el efecto fotoeléctrico.
Efecto Fotoeléctrico	Cantidad de electrones que un elemento metálico proporciona cuando recibe radiación solar fotónica.
Factor de Potencia	Relación entre la potencia real en un circuito y la potencia reactiva debido a campos magnéticos y

	campos eléctricos en inductores y capacitores respectivamente.
Frecuencia	Cantidad de repeticiones de una forma de onda durante un segundo.
Inversor	Dispositivo que transforma corriente eléctrica con otras características.
Onda cuadrada	Representación de una señal de voltaje en la cual los cambios se dan de forma discreta alternando valores positivos y negativos.
Onda senoidal pura	Representación de una señal de voltaje en la cual los cambios obedecen a la función trigonométrica coseno.
Panel solar	Arreglo de celdas fotovoltaicas que generan voltaje directo.
Pérdidas eléctricas	Son desviaciones observadas en las líneas de distribución eléctrica y que deterioran la correcta distribución de la potencia eléctrica.
Potencia	Medida de la capacidad máxima de voltaje y corriente de un panel solar.
Potencia reactiva	Es la potencia consumida por motores transformadores u otros dispositivos que poseen embobinados y generan campos magnéticos.

Regulador	Dispositivo que cuya función es mantener un nivel de voltaje regular, protegiendo el sistema de sobretensiones y caídas.
Sensores	Dispositivos formados por elementos que son sensibles a ciertas magnitudes físicas y que permite la transformación de esas magnitudes en señales eléctricas.
Señal continua	Es una señal que posee un valor definido en cualquier instante de tiempo.
Señal discreta	Es una señal que posee ciertos valores en instantes discretos de tiempo a intervalos definidos.
Sistema en tiempo real	Son sistemas electrónicos que realizan conversiones y procesamiento de datos a alta velocidad.
Sistema Embebido	Es un sistema electrónico basado en microprocesador, diseñado para controlar una función específica.
Sistema Operativo	Es un ambiente de software que provee un camino entre el usuario y las interfaces de bajo nivel de hardware.

Tarea aperiódica	Es una tarea que genera trabajos, que pueden arribar en orden secuencial, pero no se ejecutan en el mismo orden.
Tarea periódica	Es una tarea que genera secuencias de trabajos periódicos muy bien definidos en el tiempo.
Tensión	Diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito.
Valor eficaz	Mide el efecto de calentamiento de la corriente alterna sobre equipos en un sistema eléctrico de potencia.
Variación de voltaje	Es una disminución o aumento de voltaje en un período no mayor a 10ms en una señal de energía.
Voltaje	Término utilizado para referirse a la tensión.

RESUMEN

La ciencia y la ingeniería modernas buscan siempre fuentes alternativas de energía que posibiliten el desarrollo de la tecnología. Una fuente de este tipo es la energía solar, la cual se basa en el efecto fotoeléctrico para generar energía en forma de voltajes y corrientes. Existen elementos denominados celdas solares, cuya función es captar de manera eficiente las ondas electromagnéticas provenientes del sol, y canalizarlas para ser aprovechadas.

La conversión de energía solar a energía eléctrica conlleva el apareamiento de distorsiones o fluctuaciones propias del sistema. Un tipo especial de estas distorsiones son los denominados armónicos, los cuales se representan con la aparición de señales de menor voltaje que la señal original, pero con frecuencias que son múltiplos de dicha señal. Los sistemas de energía solar emplean inversores para generar señales alternas, utilizando la señal de voltaje directo proveniente de la celda solar. Estos inversores se basan en circuitos electrónicos que intrínsecamente generan armónicos en el sistema.

La electrónica moderna, permite implementar sistemas basados en microprocesador para detectar y corregir armónicos en sistemas de energía solar, y que la señal de salida en dichos sistemas sea lo más cercana posible a una onda senoidal pura. Existen sistemas denominados embebidos, que programan tareas periódicas o aperiódicas, en las cuales se basa el desempeño de estos sistemas, y la correcta realización de los algoritmos de software para cumplir los objetivos dentro del sistema. En un sistema embebido que es diseñado para la detección y corrección de armónicos, se pueden implementar varios métodos para estas tareas.

OBJETIVOS

General

Detectar y corregir armónicos en inversores de energía solar, implementando sistemas embebidos en tiempo real.

Específicos

1. Analizar la calidad de potencia en inversores de energía solar.
2. Detectar perturbaciones en la alimentación debido a armónicos en el sistema.
3. Corregir las perturbaciones debido a armónicos en el sistema.
4. Diseñar sistemas embebidos y de procesamiento digital de señales en tiempo real.
5. Diseñar un sistema que logre detectar y corregir armónicos en un inversor de energía solar.

INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía renovable están disponibles en todo momento y en cantidades abundantes. La energía solar representa una parte importante de las fuentes de energía renovable. Los avances en ingeniería de materiales permiten obtener elementos compuestos que aprovechan en gran medida la energía proveniente del sol, y lograr con esto la fabricación de calentadores de agua y celdas de semiconductores con la capacidad de generar energía eléctrica convencional. Esta investigación se centrará en la energía solar fotovoltaica, cuyo mercado de producción se incrementa constantemente y ahora representa un porcentaje significativo en la generación nacional. Por esta razón es de interés gubernamental.

En la producción de energía solar fotovoltaica, la eficiencia es un factor clave. Por medio del análisis de la calidad de potencia, se puede determinar si la energía generada reúne las calidades necesarias para llegar al consumidor. Prevenir perturbaciones en la onda eléctrica generada, en especial los armónicos, beneficia a los productores, quienes pueden producir energía más estable, y a los consumidores quienes obtienen un máximo desempeño en la demanda.

Dados los avances tecnológicos en el campo de la microelectrónica, se han implementado a gran escala arquitecturas y sistemas de computadora completos en circuitos integrados estándar, con medida de unos pocos centímetros. Por ello, es posible contar con sistemas con características de procesamiento similares a los de las computadoras personales o industriales, en menos espacio y con mayor facilidad de implementación.

Un sistema embebido (Embedded System) es un sistema de propósito especial diseñado para realizar una o varias tareas predefinidas usualmente con requerimientos específicos.

Un sistema en tiempo real (RTS) es un sistema electrónico que interactúa con el entorno físico y responde a los estímulos en un tiempo determinado. Son diseñados de tal forma que las acciones realizadas están cronometradas y los retrasos son mínimos. Algunos ejemplos de estos sistemas son:

- Sistemas de ensamblaje
- Sistemas de monitoreo de procesos
- Sistemas SCADA

1. ENERGÍA SOLAR

1.1. Características de la energía solar

“Es una fuente muy grande de energía. Se puede emplear para calentar e iluminar hogares y lugares de negocios. Esto se debe a que existe más energía proveniente del sol a la tierra en una hora que la utilizada por cualquier persona en el mundo en un año.”¹

La energía solar basa sus principios en el efecto fotoeléctrico. Este consiste en la cantidad de electrones que un elemento metálico es capaz de proporcionar cuando recibe radiación solar fotónica.

Matemáticamente se define el efecto fotoeléctrico de la siguiente manera:

$$E = h * f$$

donde:

E = energía recibida de los fotones

h = constante de Plank ($6.62 \cdot 10^{-34}$ J*s o Jules por segundo)

f = frecuencia en Hertz (Hz) o ciclos/segundo

Las tecnologías solares más utilizadas son los calentadores y las celdas solares fotovoltaicas para generar electricidad.

“La industria también utiliza estas tecnologías para diversificación de fuentes de energía, mejorar la eficiencia y ahorrar recursos. Las tecnologías de

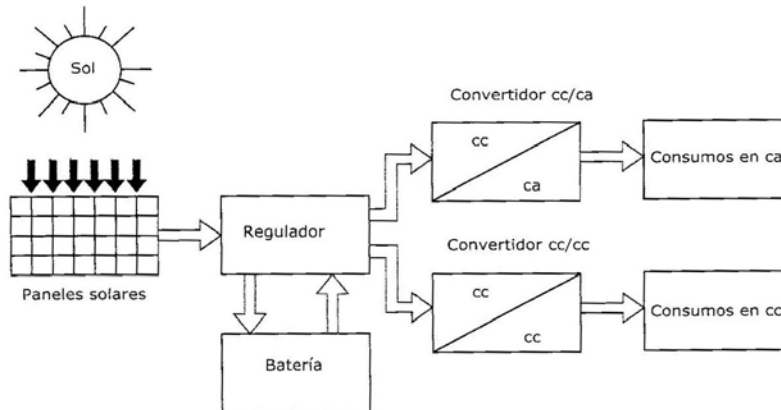
¹ U.S. Department of Energy. *Solar Energy Basics*. <https://www.nrel.gov/workingwithus/re-solar.html>. Consulta: 1 de junio 2018.

celdas fotovoltaicas son también utilizadas para generar potencia en ciudades y poblados.”²

Los elementos de una instalación de energía solar son:

- Celda solar fotovoltaica
- Panel captador solar
- Regulador
- Acumulador o batería
- Conmutador o inversor
- Elementos de conexión

Figura 1. **Diagrama de bloques sistema de energía solar**



Fuente: TOBAJAS VÁSQUEZ, M. Carlos. *Instalaciones solares fotovoltaicas*. p.10.

² TOBAJAS VÁSQUEZ, M. Carlos. *Identificación de los elementos de las instalaciones de energía solar fotovoltaica*. En: *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. p.9.

1.2. Celdas solares fotovoltaicas

Las celdas solares, tradicionalmente, son hechas de silicio compuesto de una lámina plana para mayor eficiencia.

La segunda generación de celdas se llama de película delgada porque están hechas de silicio o materiales como cadmio-telurio. Están formadas por capas de material semiconductor de unos cuantos milímetros de espesor. Gracias a su flexibilidad estas celdas se pueden colocar sobre terrazas, fachadas de edificios o vidrios en domos.

Las de tercera generación se fabrica con una variedad de nuevos materiales incluyendo tintas solares, dados solares y plásticos conductivos. Estas celdas utilizan lentes plásticos o espejos para concentrar la luz en una porción pequeña de material fotovoltaico de gran eficiencia.

1.2.1. Características

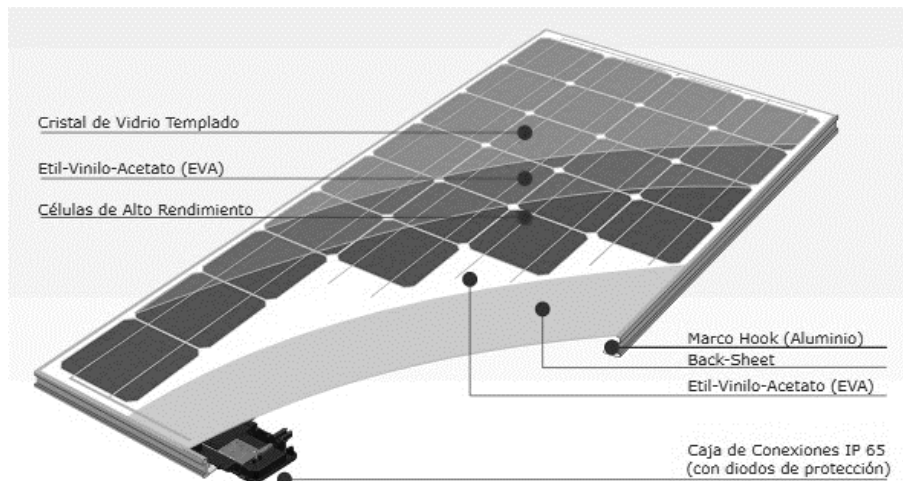
Los módulos solares, por su naturaleza, poseen características físicas y eléctricas. Para conocer dichas características se hace referencia al módulo solar A-135P marca Atersa, compuesto de 36 celdas policristalinas.

Entre las características físicas están:

- Cubierta exterior cuya función es proteger el panel de la acción de agentes atmosféricos. Para fabricarla se utiliza vidrio templado de 4mm que presenta un buen rendimiento contra impactos y una excelente transmisión de la radiación solar.

- Encapsulante el cual se encarga de la protección de las celdas y las conexiones. El material utilizado en la fabricación es EVA(Etil-vinilo-acetileno).
- Parte posterior formada por material acrílico de tipo EVA protege el panel de la humedad.
- Marco soporte de donde se sujeta la placa solar, está fabricado de aluminio o acero inoxidable y presenta un elemento de conexión a tierra.

Figura 2. **Características físicas módulo solar A-135P**



Fuente: TOBAJAS VÁSQUEZ, M. Carlos. Instalaciones solares fotovoltaicas. p.14.

Se observan las características eléctricas en la siguiente tabla:

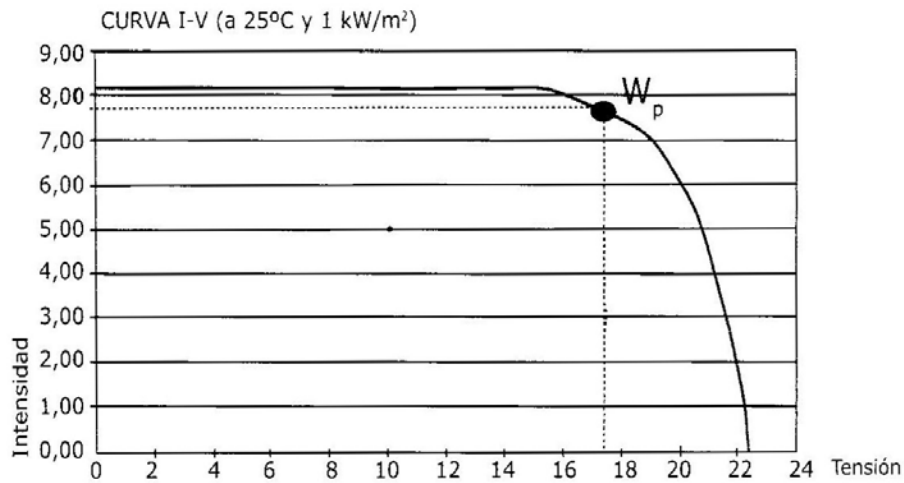
Tabla I. **Características eléctricas módulo solar A-135P**

Características Eléctricas para radiación de 1000 W/m ²	A-135P
Potencia (W en prueba ± 5%)	135 W
Número de celdas en serie	36
Eficiencia del módulo	13.88%
Corriente punto de máxima potencia (I_{mp})	7.58 A
Tensión punto de máxima potencia (V_{mp})	17.82 V
Corriente de cortocircuito (I_{sc})	8.23 A
Tensión en circuito abierto (V_{oc})	22.38 V
Coefficiente de temperatura de I_{sc} (α)	0.08%/°C
Coefficiente de temperatura de V_{oc} (β)	-0.32%/°C
Coefficiente de temperatura de P (γ)	-0.38%/°C
Máxima tensión del sistema	1000 V

Fuente: TOBAJAS VÁSQUEZ, M. Carlos. *Instalaciones solares fotovoltaicas*. p.15.

Se puede observar la curva característica en la siguiente figura:

Figura 3. **Curva característica módulo solar A-135P**



Fuente: TOBAJAS VÁSQUEZ, M. Carlos. *Instalaciones solares fotovoltaicas*. p.15.

Otros parámetros importantes se presentan a continuación:

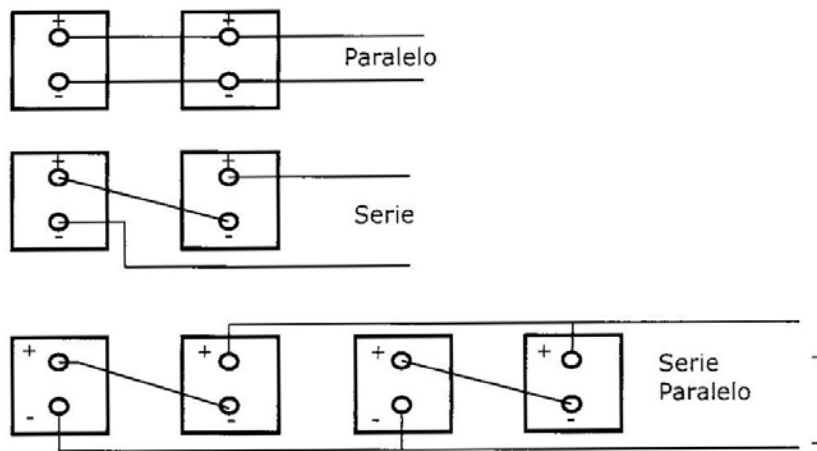
- Tensión en cada celda (V_{cd}) = $V_{oc} / 36$
- Eficiencia del módulo = potencia del módulo / potencia de radiación

- Máxima Potencia (W_p) = $I_{mp} \cdot V_{mp}$
- Factor de Forma = $I_{mp} \cdot V_{mp} / I_{sc} \cdot V_{oc}$

Para obtener un mayor rendimiento, los paneles pueden conectarse entre sí siempre y cuando tengan las mismas características. Esto se logra de tres maneras:

- Conexión en serie
- Conexión en paralelo
- Conexión mixta (serie-paralelo)

Figura 4. **Conexión de paneles solares**



Fuente: TOBAJAS VÁSQUEZ, M. Carlos. *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. p.17.

Si los paneles se conectan en serie o paralelo, se pueden observar las siguientes características especiales:

- La tensión total en módulos conectados en paralelo será la misma que en un módulo independiente $V_{TM} = V_M$.

- La corriente total en módulos conectados en paralelo será la suma de las corrientes individuales de cada módulo $I_{TM} = I_{M1} + I_{M2} + \dots + I_{Mn}$.
- La tensión total en módulos conectados en serie será la suma de los módulos independientes $V_{TM} = V_{M1} + V_{M2} + \dots + V_{Mn}$.
- La corriente total en módulos conectados en paralelo será la misma que en un módulo independiente $I_{TM} = I_M$.

1.2.2. Tipos

El panel solar es la parte más importante del sistema, recibe la energía radiante del sol y la transforma en energía eléctrica. Físicamente está compuesto por un número variable de celdas solares. Dependiendo del voltaje de salida, este número puede ser entre 31 y 36 conectadas en serie. Los fabricantes de paneles deciden el número total de celdas conectadas para garantizar una carga efectiva del banco de baterías.

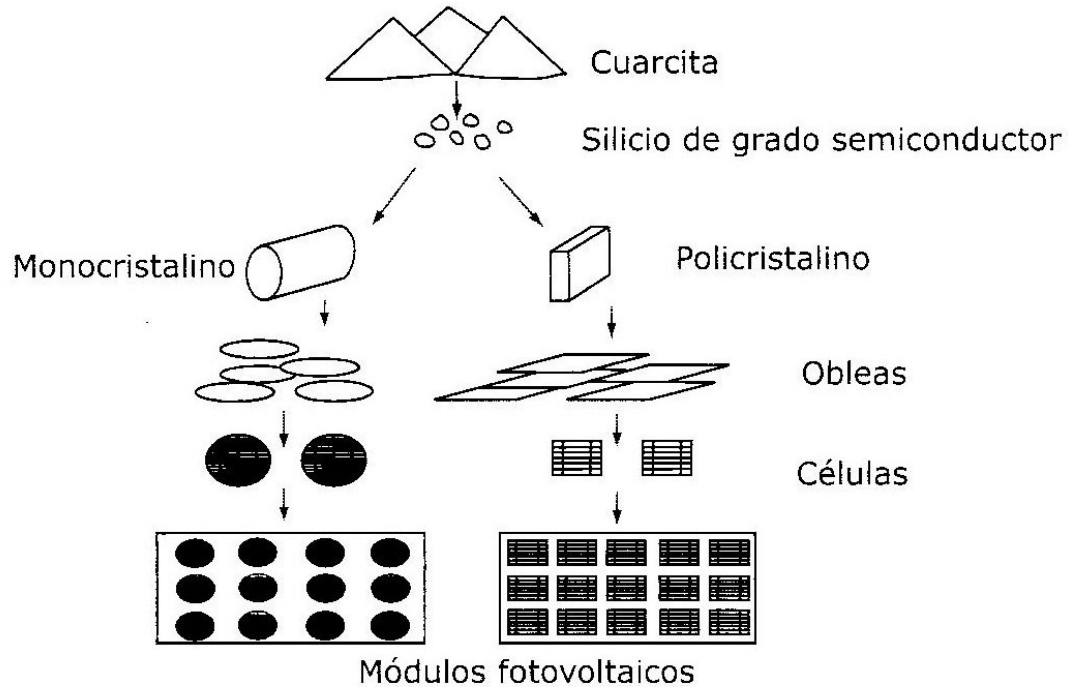
“La superficie del panel oscila entre 0,5 y 1,3 metros, donde las celdas están ensambladas dentro de dos estratos, uno superior de cristal de silicio y uno inferior de plástico. Estos elementos se colocan en un horno de alta temperatura resultando un bloque único laminado añadiendo por último marcos de aluminio. La celda solar se forma por la unión de materiales semiconductores tipo N y tipo P, formando una unión P-N con características similares a las de un diodo. Cuando incide la luz solar aparece un campo eléctrico de la zona N a la zona P logrando polaridades de volteje en esta unión.”³

Los paneles se fabrican de acuerdo con los siguientes pasos:

³ TOBAJAS VÁSQUEZ, M. Carlos. *Identificación de los elementos de las instalaciones de energía solar fotovoltaica*. En: *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. p.14.

- Obtención de silicio de alta pureza a partir del dióxido de silicio SiO_2 , básicamente cuarzo muy abundante en la naturaleza. El problema radica en la pureza, que debe ser parecida a la de semiconductores utilizados en electrónica, por lo que aumenta el costo.
- Para la obtención de obleas se utiliza como materia prima el polvo de silicio de alta pureza para obtener un monocristal de forma cilíndrica con diámetro de hasta 20cm con longitud 1m. La barra se corta mediante sierras especiales produciendo obleas de aproximadamente 30um. En esta etapa hay una pérdida de aproximadamente 60 % del material formando polvo de aserrín.
- Para obtener, finalmente, la celda solar, la oblea se somete a un procedimiento con los siguientes pasos:
 - Laminado y pulido
 - Formación de unión P-N
 - Decapado y limpieza
 - Capa antireflejante
 - Fitolitografía para formación de contactos
 - Material para soldadura de electrodos
 - Limpieza del decapante

Figura 5. **Elaboración de celdas**



Fuente: TOBAJAS VÁSQUEZ, M. Carlos. *Instalaciones solares fotovoltaicas*. p.12.

Entre los tipos de paneles están los siguientes:

- Monocrystalinos proporcionan el rendimiento más elevado de alrededor de un 20 % de los fabricados en serie. Se utiliza boro para dopar el silicio por lo que su precio es más elevado, pero a la vez es el tipo más usado debido a su estabilidad.
- Policristalinos presentan un rendimiento entre 12 y 14 %. Son muy delgados y se diferencian de los monocrystalinos por su forma física cuadrada, esto hace que se aproveche mejor el espacio entre las celdas del panel.
- Amorfos tienen un rendimiento menor al 10 %, su principal ventaja es su maleabilidad por lo que actualmente se instalan en tejados y techos de edificios.

- Sulfuro de cadmio y sulfuro de cobre tienen como ventaja que el proceso de fabricación es fácil porque no utiliza mucho material activo. Su rendimiento no supera el 10 %.
- Arsénico galio son los más indicados para la fabricación de paneles, dado que su rendimiento puede llegar al 28 % en versión monocristalina. La desventaja principal es que los materiales son escasos y encarece la producción.
- Híbrido es la combinación entre panel solar fotovoltaico solar térmico. Se trata de enfriar las celdas fotovoltaicas por medio de agua que, a su vez, se puede utilizar como agua caliente para uso doméstico almacenándola en un acumulador o depósito.⁴

⁴ TOBAJAS VÁSQUEZ, M. Carlos. *Identificación de los elementos de las instalaciones de energía solar fotovoltaica*. En: Instalaciones Solares Fotovoltaicas. p.13.

1.3. Inversores

Son dispositivos que transforman la corriente eléctrica para que resulte apta en usos específicos. Los convertidores más comúnmente utilizados son:

- Corriente continua a corriente continua o cc-cc
- Corriente continua a corriente alterna o cc-ca

1.3.1. Funcionamiento

Los inversores estáticos utilizan dispositivos semiconductores de potencia funcionando en modos de corte y saturación, para obtener una señal de tensión alterna. La fuente principal de energía es de corriente continua, por lo tanto, la salida alterna tiene una forma cuadrada.

Una señal cuadrada puede convertirse en senoidal mediante filtros de potencia, encargados de eliminar los armónicos diferentes de la frecuencia fundamental. Tomando en cuenta esto, el diseño de los inversores debe ser tal que a la salida los armónicos sean de pequeño valor y están lo más lejos posible del valor fundamental. Esto se consigue aumentando la frecuencia de conmutación de los semiconductores y filtrando adecuadamente la señal.

Una función característica de los inversores es mantener la regulación de la tensión de salida. Esto se consigue de la siguiente forma:

- Regulando la tensión antes del inversor por medio de convertidores dc/dc.
- Regulando la tensión en el inversor mediante un sistema de control que varíe el ángulo de fase o implemente modulación PWM.
- Regulando la salida del inversor mediante un auto transformador.

Los parámetros característicos de un inversor solar son:

- Tensión nominal
- Potencia nominal
- Capacidad de sobrecarga
- Forma de onda
- Eficiencia

1.3.2. Sistemas aislados

Son utilizados en sistemas fotovoltaicos autónomos y aislados de la red eléctrica. Algunos poseen reguladores cuya función principal es evitar las sobrecargas excesivas en las baterías que pueden dañarla irreversiblemente.

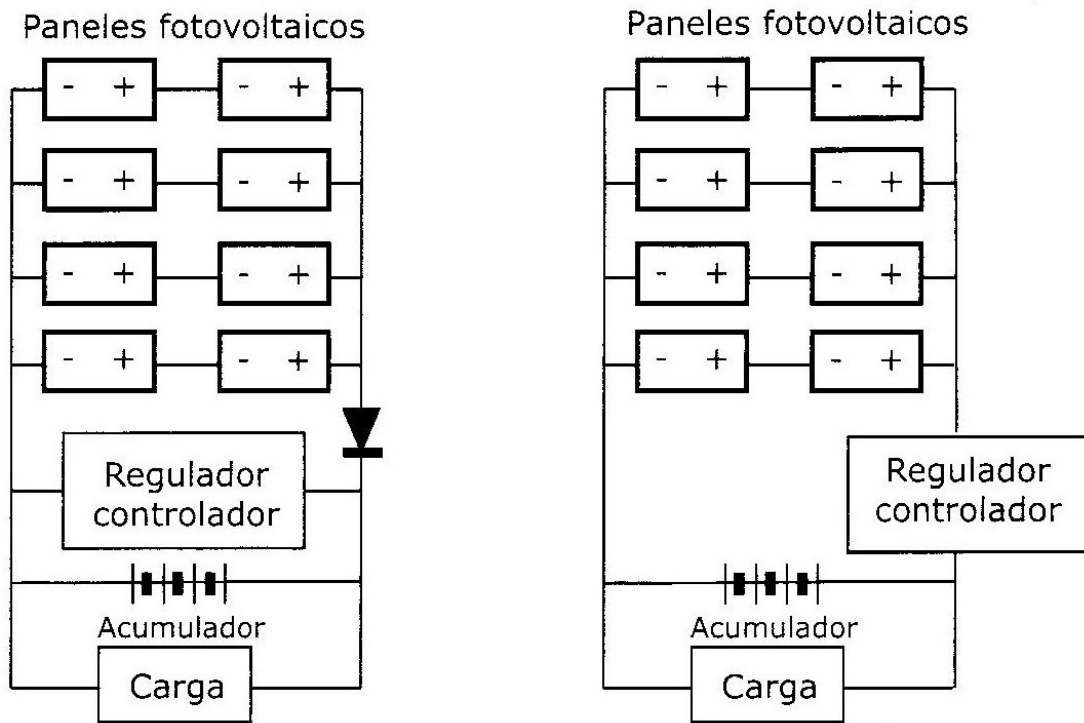
La tensión en los paneles solares debe ser siempre mayor a la tensión nominal de las baterías por dos razones:

- Si aumenta la temperatura, disminuye el voltaje.
- La tensión debe ser mayor para cargar la batería correctamente.

Existen dos tipos de reguladores empleados en sistemas solares aislados:

- Regulador Shunt o paralelo
- Regulador serie

Figura 6. Reguladores en serie y paralelo



Fuente: TOBAJAS VÁSQUEZ, M. Carlos. *Instalaciones solares fotovoltaicas*. p.24.

Se diferencian en la forma de trabajo, mientras que un paralelo se utiliza para instalaciones pequeñas, una serie se utiliza en instalaciones de mayor potencia.

Los reguladores disponen de: amperímetro, voltímetro alarma de tensión baja, sensor de temperatura para regular la tensión de carga, diodo de bloqueo para paso de corriente panel-batería.

El regulador paralelo, cuando la batería está cargada y el panel sigue produciendo energía eléctrica, el sistema activa un diodo zener para disipar la energía en forma de calor por medio de un disipador.

El regulador serie no necesita diodo de bloqueo porque se interrumpe automáticamente cuando el voltaje en el panel no es el adecuado. Su ventaja es que no disipa energía, consumiendo solo lo necesario en el sistema de control.

Normalmente, una sola unidad puede funcionar con tensiones de 12, 24 y 48 voltios, utilizando un sistema de regulación interno formado por un relay mecánico, un circuito de detección y un circuito de protección.⁵

1.3.2.1. Entrada de batería

En este la entrada del inversor está conectada directamente a la batería solar. Consta de protección de sobrecarga para la línea de la batería.

En el sistema solar fotovoltaico la batería o acumulador es el elemento que almacena energía eléctrica que produce la celda solar.

Las baterías pueden ser de dos tipos:

- Estacionarias son las determinadas a permanecer fijas en un lugar y están diseñadas para producir corrientes permanentes.
- Arranque son las equivalentes a las baterías de automóvil, están diseñadas para suministrar una cantidad elevada de energía en un espacio corto de tiempo.

Las baterías estacionarias son las más utilizadas en sistemas fotovoltaicos, algunas de estas son:

⁵ TOBAJAS VÁSQUEZ, M. Carlos. *Identificación de los elementos de las instalaciones de energía solar fotovoltaica*. En: Instalaciones Solares Fotovoltaicas. p.19.

- Batería plomo-ácido
- Batería plomo-antimonio
- Batería plomo-calcio
- Batería de ciclo profundo gelatinosa
- Batería níquel-cadmio
- Batería níquel-hidruro metálico
- Baterías herméticas
- Baterías monoblock

1.3.2.2. Entrada de batería y carga

Incluye un regulador de carga interno que posibilita la conexión directa del campo fotovoltaico.

1.3.2.3. Salida alterna y continua

Dispone de doble salida, alterna y continua. Están diseñados para utilización en sistemas con este tipo de demanda.

1.3.3. Forma de onda

Las magnitudes fundamentales que se calculan en un circuito son tensión y corriente. Estas magnitudes varían según los elementos existentes en el circuito. A estas magnitudes se les conoce como señales y pueden tomarse directamente de las fuentes o desde algún punto del circuito. Están determinadas por valores que varían con el tiempo y cuya representación dará lugar a una curva denominada forma de onda de la señal.

Estas formas de onda presentan singularidades que permiten asociarlas en algún grupo determinado:

- Señales con forma de onda constante reciben el nombre de fuentes de continua y tendrán tensiones constantes en el tiempo.
- Señales con forma de onda periódica destacan por tener valores cambiantes en un intervalo de tiempo y que pueden repetir ese comportamiento.

1.3.3.1. Onda cuadrada

Características de inversores de baja potencia, aptos para alimentar exclusivamente cargas puramente resistivas.

1.3.3.2. Onda senoidal pura

Proporciona una forma de onda prácticamente idéntica a la de la red eléctrica general que puede conectar cualquier tipo de carga.

1.3.3.3. Rendimiento de un inversor

La eficiencia de todos los inversores es afectada por las pérdidas producidas por la conmutación y además por las pérdidas de elementos pasivos que incluyen transformadores, filtros y condensadores.

1.3.3.4. Calidad de la señal de salida

En un inversor deben tenerse en cuenta condiciones técnicas desde el punto de vista de calidad de la señal de salida como el factor de potencia y distorsión armónica.

2. CALIDAD DE POTENCIA

2.1. Calidad de potencia

Se define como la habilidad de la red eléctrica de suministrar una fuente de energía estable y limpia. También puede definirse como la ausencia de interrupciones, sobretensiones y deformaciones producidas por armónicos en la red y variaciones de voltaje en la señal suministrada al usuario manteniendo una estabilidad de voltaje y frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico.

Esta idealización crea una fuente de energía siempre disponible y tiene una forma de onda senoidal pura, sin ruido y con voltaje y frecuencia dentro de los límites de tolerancia.

Con las variaciones de la demanda de energía en procesos industriales, las cargas imponen irregularidades en la red, marcando desviaciones de las condiciones ideales.

La baja calidad de potencia es un problema para industrias, como los *datacenter* y las distribuidoras de gas. Esto constituye un alto coste en la energía y disturbios en la producción, al tener en cuenta equipo moderno y muy sensible empleado en estos procesos.

Recientemente, se han desarrollado sistemas electrónicos de uso general, los cuales pueden ser muy sensibles a las variaciones de voltaje generadas en los sistemas de distribución causado por pérdidas inherentes al sistema.

Por lo tanto, el estudio de la calidad de potencia busca caminos para detectar y corregir disturbios y fluctuaciones de voltaje del lado del cliente y además detectar y corregir fallas del lado del proveedor de energía.

2.2. Causas de pérdidas y disturbios eléctricos

Las cargas inestables gastan energía y causan anomalías eléctricas.

En la corriente eléctrica, acarrearán pérdidas los comportamientos reactivos (desfases debido a campos eléctricos o magnéticos), armónicos y desbalances (entre fases de la red).

Los comportamientos que provocan disturbios incluyen transientes, variaciones de voltaje, parpadeos y resonancia (oscilaciones).

La forma usual para describir la calidad de energía es, en términos del voltaje, cualquier desviación de magnitud o frecuencia de la onda senoidal pura se considera como un disturbio de la calidad de potencia.

Se deben tomar en cuenta los siguientes valores de referencia:

- Rango de aceptación en el diseño de equipos eléctricos sensibles y compatibles con el sistema.
- Selección, instalación y conexión a tierra de equipos eléctricos.
- El desarrollo de mediciones y las guías de operación para elegir equipo deben estar definidas en normas, políticas y procedimientos.

Factores que contribuyen a los problemas asociados con la calidad de potencia son:

- Cargas sensibles.
- Complejidad de equipos e instalaciones.
- Equipos que provocan disturbios.

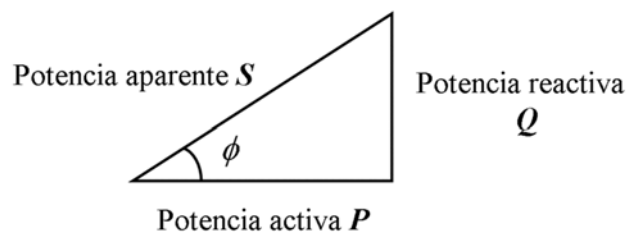
2.2.1. Potencia reactiva

“La potencia eléctrica es la capacidad que tiene un equipo eléctrico para realizar un trabajo o la cantidad de trabajo por unidad de tiempo.”⁶

En equipos que funcionan con circuitos magnéticos, como transformadores, motores, etc., coexisten tres tipos de potencia:

- Potencia activa (P)
- Potencia reactiva (Q)
- Potencia aparente (S)

Figura 7. Triangulo de potencia



Fuente: GONZALEZ, Federico. <http://telergia.blogspot.com>.

El factor de potencia (FP) es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente, que depende de las cargas conectadas a la instalación eléctrica. Las cargas inductivas y capacitivas pueden provocar un adelanto o atraso de la corriente con respecto al voltaje.

⁶ RTR Energía. *Compensación de Energía Reactiva*. http://www.rtrenergia.es/downloads/reactiva_2012.pdf.

Tabla II. Índice de factor de potencia

Factores de potencia más comunes en la industria	
Motor asíncrono al 50% de carga	0,73
Motor asíncrono al 100% de carga	0,85
Centros estáticos monofásicos de soldadura de arco	0,5
Grupos rotativos de soldadura	0,7 - 0,9
Rectificadores de soldadura por arco	0,7 - 0,9
Factores de potencia en pequeñas instalaciones eléctricas	
Lámparas de fluorescencia	0,5
Lámparas de descarga	0,4 - 0,6
Hornos de calefacción dieléctrica	0,85
Hornos de arco	0,8
Hornos de inducción	0,85

Fuente: RTR Energía. http://rtrenergia.es/mx/folleto_mejico.pdf.

La potencia reactiva es la consumida por los motores, transformadores y otros dispositivos que poseen embobinados que generan campos magnéticos.

Algunos problemas asociados con la potencia reactiva son:

- Aumento de pérdidas en los conductores
 - Produce calentamiento en los conductores acelerando el deterioro de los aislamientos.
 - Calentamiento en los embobinados de los transformadores de distribución.
 - Disparo de protecciones sin causa aparente.
- Sobrecargas de transformadores y generadores
 - El exceso de corriente debido al bajo factor de potencia baja origina sobrecarga en los equipos.
- Aumento de la caída de tensión.

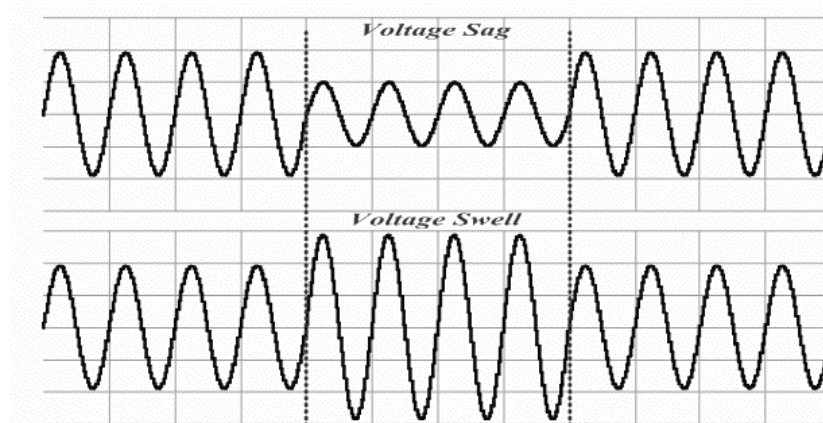
- El aumento de la caída de tensión debido al bajo factor de potencia producirá un insuficiente suministro de potencia a las cargas conectadas.

2.2.2. Variaciones de voltaje

Se mencionan las siguientes:

- Fluctuaciones de voltaje denominadas sag son disminuciones momentáneas en la magnitud del voltaje RMS, con una duración desde 10ms (0,6 ciclos de una señal senoidal de 60Hz) hasta 2,5 segundos (150 ciclos) causada por una falla remota del sistema de potencia. Existe otra fluctuación denominada swell que se representa por un aumento en el voltaje, aunque esta no es tan común. Las posibles causas de la disminución o aumento se dan durante la desconexión de cargas grandes o sobrecargas.

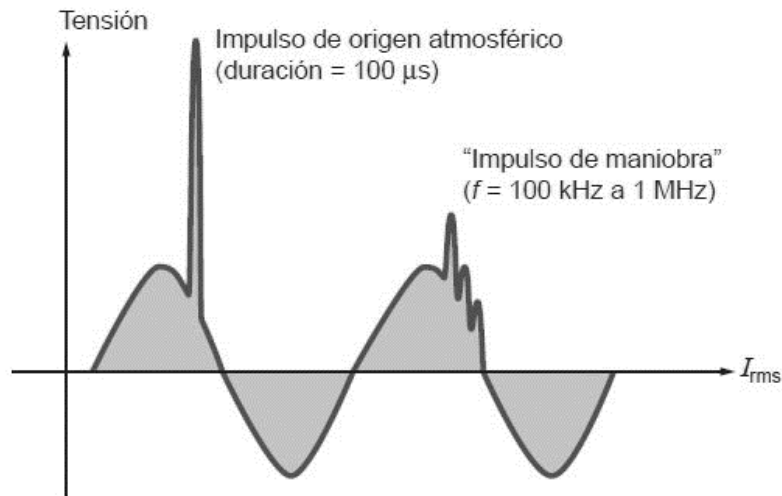
Figura 8. **Sag y Swell**



Fuente: BÜYÜK, Mehmet. https://www.researchgate.net/figure/Voltage-sag-swell-conditions-in-electrical-grids_fig1_318316470.

- Sobretensiones transitorias se presentan en forma de impulsos o picos de voltaje de corta duración, intermitentes y superimpuestos en la señal de alimentación, con duración menor a 2ms. Estos pueden ser causados por descargas atmosféricas, maniobras de interruptores y al conectar o desconectar capacitores para corrección del factor de potencia.

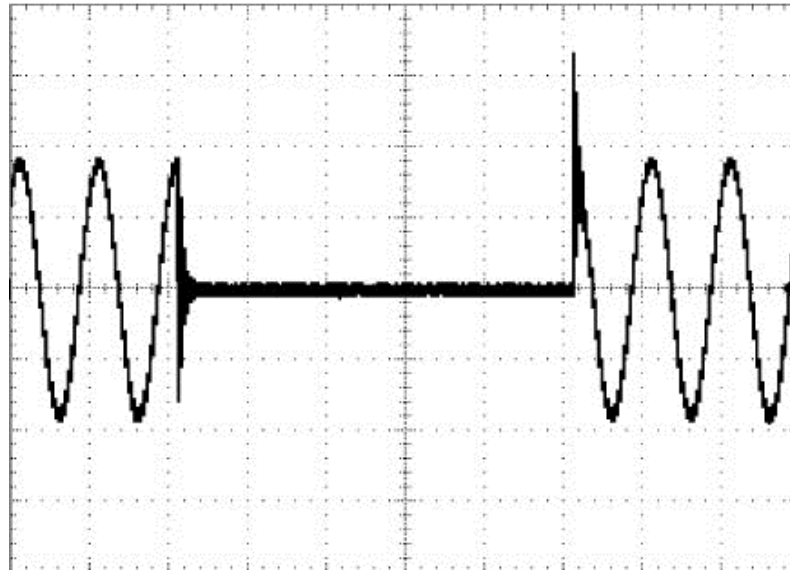
Figura 9. **Sobretensiones transitorias**



Fuente: ROMERO, Raúl. <https://www.electroinstalador.com/proteccion-contra-sobretensiones-transitorias-edificios-viviendas-n76>.

- Interrupciones de energía. Se deben a condiciones de falla de aislamiento después de una operación de corte y restablecimiento. Pueden tener varios ciclos de duración. En los equipos de cómputo pueden existir tiempos de tolerancia a interrupciones momentáneas, que cubren hasta medio ciclo de interrupción.

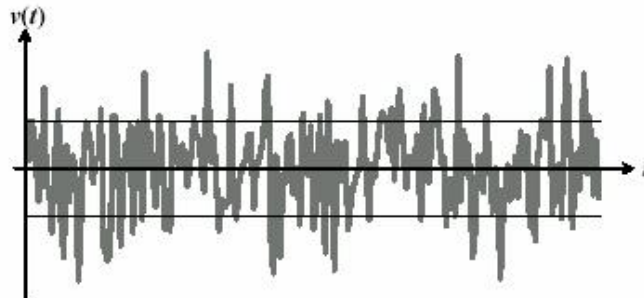
Figura 10. Interrupción de energía



Fuente: KACZMAREK, Michal. https://www.researchgate.net/figure/Primary-voltage-waveform-of-VT-type-UDZ24-in-condition-of-interruption-of-measured-voltage_fig8_267982618.

- Ruido eléctrico se presenta comúnmente en sistemas de cómputo generado por sistemas de transmisión de señales de radio, lámparas fluorescentes y controladores de atenuación de niveles de iluminación. Puede afectar la operación de computadoras durante la ejecución de programas.

Figura 11. **Ruido**

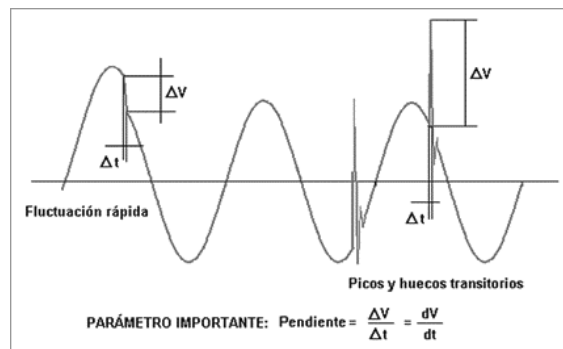


Fuente: PRIETO, Paloma.

<http://recursostic.educacion.es/observatorio/version/v2/ca/equipamiento-tecnologico/redes/502-monografico-lenguajes-de-programacion?start=3>.

- Impulso es el cambio repentino de voltaje en una frecuencia mayor a la fundamental, siendo unidimensional en la polaridad. Su característica principal son la cresta y la cola siendo comúnmente producidas por descargas atmosféricas.

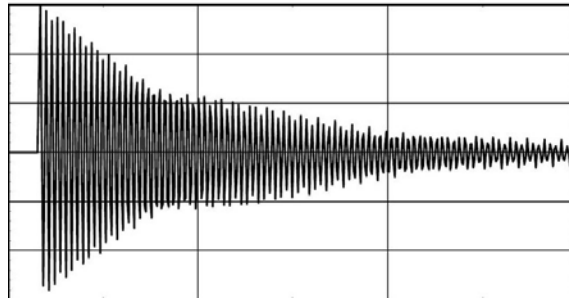
Figura 12. **Impulso**



Fuente: ENERGYTEL. <https://energytel.typepad.com/energytel/2012/08/calidad-de-energ%C3%ADa-compensaci%C3%B3n-din%C3%A1mica-soluciones-para-la-calidad-de-la-energ%C3%ADa-el%C3%A9ctrica.html>.

- Oscilatorios son transitorios con un valor instantáneo de voltaje que cambia rápidamente de polaridad. Son ocasionados por maniobra de equipos, desconexión de líneas, bancos de capacitores, entre otros.

Figura 13. **Oscilatorios**

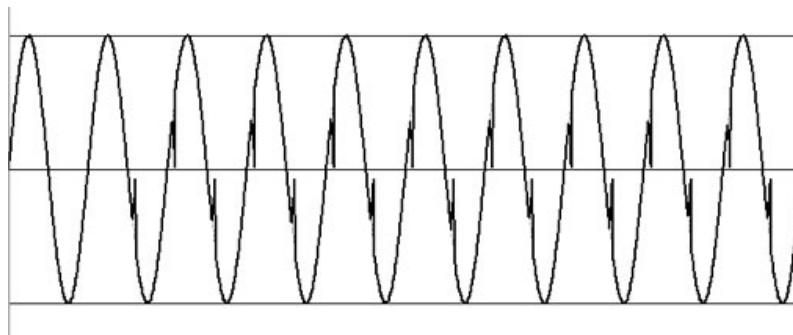


Fuente: INGENIERIA INTERNACIONAL.

<https://ingenieriainternacional.wordpress.com/ingenieria-internacional-e-informatica-2/%C2%BFsabias-que/calidad-de-energia/>.

- Notching es un disturbio periódico de voltaje causado por la operación normal de sistemas electrónicos de potencia. La causa común son los convertidores trifásicos cuando realizan una conmutación provocando corto circuito.

Figura 14. **Notching**



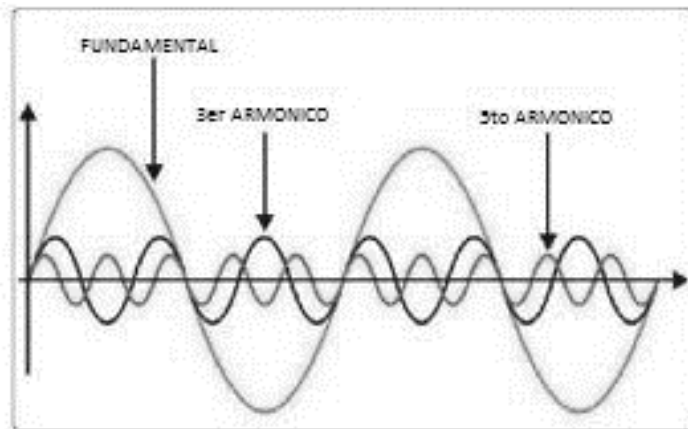
Fuente: ARIF, Mohammad. <https://www.intprogress-energy.com>.

2.2.3. Otros disturbios

Un armónico en un sistema eléctrico es el hecho de que la forma de onda de la tensión o la corriente no es una onda senoidal pura. Esto resulta de la adición de una o más ondas armónicas que se superponen a la onda fundamental de 60Hz. Pueden ser causadas por la conexión al sistema eléctrico de convertidores estáticos de potencia, controladores de motores con rectificadores controlados, hornos de arco en aplicaciones industriales.

La utilización de capacitores para corregir el factor de potencia puede provocar la aparición de condiciones de resonancia entre los capacitores y la inductancia de los transformadores.

Figura 15. **Armónicos**



Fuente: BONILLA, David. <http://factorelectrico.blogspot.com>.

2.3. Armónicos

En un sistema ideal, la tensión suministrada y la corriente de carga son ondas senoidales perfectas. En la práctica las condiciones no son ideales y existe una desviación en la onda seno, la que se expresa en términos de la

distorsión armónica. Los sistemas físicos presentan desviaciones en su forma de onda debido a las impedancias internas, o incluso los generadores de señal presentan condiciones no ideales que contribuyen a las desviaciones.⁷

El uso de convertidores electrónicos ha sido de interés acerca de la generación de corrientes armónicas y los efectos sobre sistemas de potencia.

El análisis de la distorsión armónica se aplica a sistemas de potencia industriales donde los convertidores de potencia son usados en activación de motores, calentadores, ups, entre otros.

Con la aplicación de la electrónica en cargas domésticas e industriales, los convertidores de potencia estáticos están presentes en muchos sistemas contribuyendo al interés acerca de la distorsión armónica.

Una tensión de red ideal se representa por una señal senoidal pura de frecuencia constante. Si las cargas conectadas a la red son lineales, generaran también corrientes senoidales.

Los parámetros básicos de estas señales ideales son:

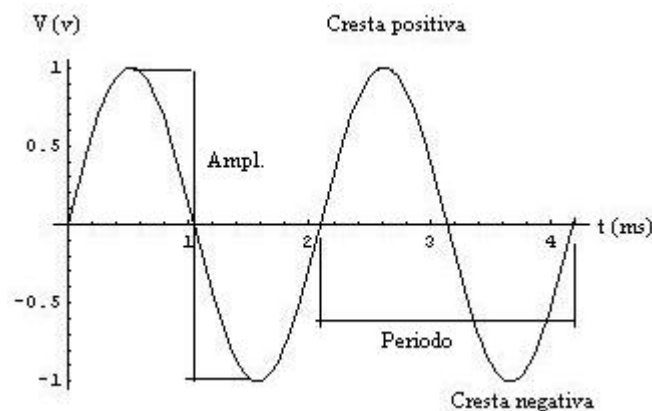
- Amplitud es el máximo valor instantáneo (V_o , I_o).
- Período es la duración de un ciclo completo (T).
- Frecuencia es el número de ciclos por segundo ($f = 1/T$).
- Frecuencia Angular está definida como $\omega = 2\pi f$.
- Fase es el desplazamiento angular de la función senoidal respecto del origen.

⁷ ZAMORA BELVER, Ma. I. MACHO STADLER, Valentín. *Estudio bibliográfico sobre distorsión armónica producida por convertidores estáticos*. p.50.

Existen dos parámetros adicionales para indicar la magnitud de la tensión y corriente:

- Valor medio es la media aritmética de los valores instantáneos en un período T . Si la señal es alterna, el valor medio en un período es cero. De existir un valor diferente de cero, indicará la presencia de un componente de señal continua.
- Valor eficaz es la media cuadrática de la función en un período T . La potencia en una carga depende del cuadrado de la tensión o la corriente, por lo anterior el calor eficaz de una señal periódica es directamente proporcional a la potencia.⁸

Figura 16. **Parámetros de una señal senoidal**



Fuente: ELORRIAGA, Antonio. <http://www.electronicasi.com/enseanzas/electronica-elemental/electronica-basica/corriente-alterna-ac/>.

Los parámetros anteriores no proporcionan información de la calidad de una red, esto es, qué tanto se desvía de su forma de onda senoidal ideal. Esta información se obtiene analizando el contenido armónico de la señal. Como se

⁸ ZAMORA BELVER, Ma. I. MACHO STADLER, Valentín. *Estudio bibliográfico sobre distorsión armónica producida por convertidores estáticos*. p.55.

mencionó anteriormente los armónicos son desviaciones de la señal senoidal original debido a los elementos no lineales que conforman la red o los sistemas de generación.

Dado que estos elementos generan corrientes de diferente frecuencia, estas se reparten por la red dando lugar a otras caídas de tensión sobre las cargas.

2.3.1. Origen de los armónicos

Un armónico es la deformación de la forma de onda de tensión o corriente debido a otras señales senoidales en superposición, con frecuencias de múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, en este caso 60Hz, tomada como referencia para otras señales.

También pueden obtenerse funciones que no son múltiplos de 60Hz, estas son conocidas como interarmónicos.

Cada armónico puede expresarse en términos de su orden, por ejemplo: segundo, tercero y quinto armónico tienen frecuencias 120, 180 y 300 Hz respectivamente.

Conforme se incrementa el orden, la magnitud de los armónicos disminuye. Los armónicos más cercanos a la frecuencia fundamental tienen mayor efecto en el sistema de potencia.

Si no existe resonancia, el máximo valor posible de una corriente armónica es porcentaje de la fundamental es $100/h$, donde h es el orden del armónico. De

esta manera el quinto armónico alcanzará 20 %, mientras que el noveno armónico tendrá 11,1 %.

Algunos parámetros que corresponden a las señales que contienen armónicos:

- Onda compleja es una forma de onda creada tras añadir la amplitud de diversos armónicos a la amplitud de la onda fundamental.
- Cargas no lineales son equipos electrónicos que modifican la forma de onda de tensión o corriente. La señal resultante es una onda compleja.
- Valor eficaz mide el efecto de calentamiento de la corriente alterna sobre los equipos en un sistema eléctrico de potencia. Si la onda senoidal es pura el valor eficaz será 0,707 del valor pico.
- Factor de cresta es la razón del valor pico de una onda y su valor eficaz. El factor de cresta para una onda senoidal es 1,414, para una onda compleja varía.
- Distorsión armónica (TDH) es una condición presente cuando se suman una o más componentes armónicas a la onda fundamental alterando su forma. La ecuación matemática que para el TDH es la siguiente: $TDH = (fh_2^2 + fh_3^2 + \dots + fh_n^2)^{1/2}$, donde fh es el porcentaje que existe de cada armónico.⁹

Existen varios tipos de fuentes de armónicos, se clasifican como convencionales y no convencionales.

Entre las convencionales están:

⁹ ZAMORA BELVER, Ma. I. MACHO STADLER, Valentín. *Estudio bibliográfico sobre distorsión armónica producida por convertidores estáticos*. p.60.

- Horno de arco es utilizado en siderurgia y puede ser de corriente alterna o corriente directa. El horno de corriente alterna presenta un comportamiento no lineal, asimétrico e inestable por lo que produce un espectro de armónicos con componentes pares, impares y una componente continua. El horno de corriente continua presenta un espectro parecido al de un rectificador por el empleo de un circuito de este tipo para alimentarlo.
- Lámparas de descarga y tubos fluorescentes son generadores de armónicos los cuales pueden alcanzar hasta un 25 % en el tercer armónico, por lo que se debe tomar en cuenta una protección para la línea del neutro en una instalación.
- Máquinas rotativas son máquinas síncronas que generan armónicos de tercer orden que pueden tener incidencia sobre:
 - Calentamiento permanente de las resistencias de la puesta a tierra y el neutro.
 - Mal funcionamiento de los relés amperimétricos de protección.

Las fuentes no convencionales pueden ser:

- Convertidores estáticos como puentes rectificadores, diodos y tiristores son generadores de corrientes armónicas. Los convertidores tales como reguladores, cicloconvertidores, entre otros, tiene espectros variables y concentran más armónicos.

Otras fuentes de armónicos pueden ser:

- Equipos de cómputo
- Fotocopiadoras
- Sistemas de Potencia Ininterrumpida (UPS)
- Cargadores de batería

- Alternadores eléctricos
- Accionamientos de frecuencia variable
- Controladores electrónicos
- Rectificadores

2.3.2. Efectos en los sistemas

- Aumento de la potencia en la red, empeorando el factor de potencia.
- Disparo de interruptores automáticos.
- Sobrecarga en conductores.
- Vibraciones y sobrecarga de máquinas.
- Creación de inestabilidad en el sistema.
- Mal funcionamiento de relés de protección.
- Mediciones erróneas.
- Perturbaciones en equipos de control.

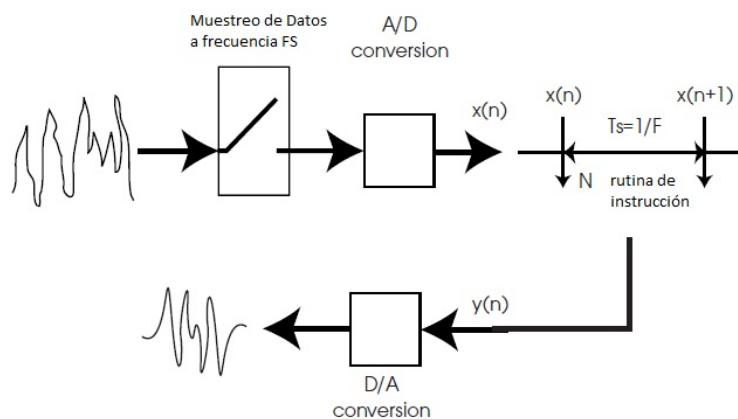
3. SISTEMAS EMBEBIDOS Y APLICACIONES

3.1. Sistemas en tiempo real

El procesamiento digital de señales es un proceso más complejo que su equivalente analógico. Requiere más etapas de conversión, procesamiento y reconstrucción. No obstante, las ventajas de estos sistemas son varias:

- No sufren demasiadas pérdidas por envejecimiento, ajustes o adición de componentes.
- Poseen alta inmunidad al ruido, estabilidad de la fuente de poder y gracias al procesador embebido pueden realizar tareas de autodiagnóstico.
- La posibilidad de modificar directamente parámetros de funciones los hace fáciles de implementar.
- Además, pueden obtenerse resultados de procesos y medida de parámetros en un tiempo muy corto, casi instantáneamente.

Figura 17. Muestreo de datos



Fuente: HEATH, Steve. *Embedded Systems Design*. p. 6.

Tabla III. **Tiempos de muestreo**

Tiempo para ejecutar una instrucción	Ts	Fs	No. De instrucciones entre dos muestras
1 us	1 kHz	1 ms	1000
	10 KHz	100 us	100
	100 KHz	10 us	10
	1 MHz	1 us	1
100 us	1 kHz	1 ms	10000
	10 KHz	100 us	1000
	100 KHz	10 us	100
	1 MHz	1 us	10

Fuente: HEATH, Steve. *Embedded Systems Design*. p. 6.

3.1.1. Tipos de sistemas

Para describir y caracterizar los diferentes tipos de sistemas en tiempo real, se prefiere mencionar los trabajos que cada parte realiza dentro del sistema.

Se le denomina trabajo a cada unidad que debe ser programada y ejecutada. En conjunto, a todos los trabajos ejecutados por el sistema se les denomina tarea. Ejemplo de trabajos: es el conjunto de transformadas FFT de datos de sensores, transmisión de paquetes, cálculo de coeficientes.

Entonces, se dice que un trabajo “es ejecutado” por el sistema. En términos de sistemas operativos, el conjunto de tareas que se ejecutan es llamado servicio.

El tiempo de liberación del trabajo es el instante de tiempo al cual el trabajo está disponible para ejecución.

El trabajo se puede llevar a cabo en cualquier momento después de cumplido el tiempo de liberación y que se conozcan las dependencias de datos y control.

El tiempo límite es el instante de tiempo en el cuál la ejecución de un trabajo debe completarse.

El tiempo de respuesta de un trabajo es el tiempo transcurrido desde el inicio del tiempo de liberación hasta el fin del trabajo. El tiempo máximo de respuesta es llamado tiempo límite relativo.

El tiempo límite absoluto o simplemente tiempo límite, es la suma del tiempo de liberación más el tiempo límite relativo.

A las condiciones de tiempo impuestas por el sistema se le conocen como restricciones de tiempo. Los conceptos anteriores la clasificación de los sistemas en suaves y duros.¹⁰

3.1.1.1. Suaves

En contraste con el tipo duro, un sistema suave o blando, puede completar un trabajo fuera del límite de tiempo, lo cual es indeseable, pero si se presenta más de una pérdida en el límite de tiempo esto no significa un problema serio. El rendimiento del sistema se vuelve más y más pobre cuando más trabajos son completados fuera del tiempo.

¹⁰ HEATH, Steve. *Embedded Systems Design*. p.215.

En el desarrollo de sistemas suaves, no se necesita una prueba rigurosa en cuanto al cumplimiento de tiempo de los trabajos, por lo que pueden considerarse otras métricas para medir el desempeño del sistema.

Los requerimientos de tiempo en un sistema suave son especificados en términos de funciones probabilísticas.

3.1.1.2. Duros

Una restricción de tiempo es determinada dura si el fallo es considerado como falla fatal. El límite de tiempo duro es impuesto a un trabajo debido al resultado tardío que puede provocar un problema desastroso si se completa después del límite. Y dado que los requerimientos del sistema y restricciones de tiempo se cumplen exactamente como se necesitan, todos los trabajos y tareas deben validarse, logrando lo anterior a través de procedimientos eficientes con pruebas y simulaciones exhaustivas.

Lo anterior supone mayores restricciones al diseño e implementación de sistemas embebidos y a las aplicaciones de software que son agregadas a este.

Muchos sistemas embebidos son sistemas duros en tiempo real. Los tiempos límites son derivados de requerimiento de respuesta de los sensores monitoreados y actuadores controlados.¹¹

Las restricciones de tiempo de sistemas duros pueden variar según la especificación del sistema. Algunos ejemplos son:

¹¹ LIU, Jane. *Real-Time Systems*. P.28.

- Restricciones determinísticas: el tiempo límite de cada tarea de control es un valor fijo conocido.
- Restricción probabilística: definidas en términos de alguna distribución de probabilidad, estima la probabilidad de exceder el tiempo límite de cada tarea.
- Restricciones en términos de la utilidad de la función, determina si la tarea tiene más peso dentro del sistema.

3.1.2. Tipos de tareas

Una tarea es una abstracción de un programa en ejecución y es la unidad lógica de trabajo programable por el sistema operativo en tiempo real.

Un proceso es representado por una estructura de datos que contiene por lo menos una identidad, nivel de prioridad, estado de ejecución y recursos asociados.

Un hilo es un proceso de poco peso que reside dentro de un proceso regular y utiliza recursos solamente de ese proceso mayor. Múltiples hilos que residen lógicamente en un mismo proceso pueden compartir recursos entre ellos.

Mientras que los procesos son participantes activos de un sistema multitarea, los hilos son miembros de procesos multitarea.

En entornos amplios son recurrentes las aplicaciones suaves en tiempo real, mientras que en sistemas embebidos por lo general existe solo un tipo de tarea dura.

Los sistemas operativos en tiempo real proveen tres tipos de funciones con respecto a tareas de software:

- Planificación: un planificador determina cual tarea debe ser ejecutada en un sistema multitarea.
- Despacho: un despachador realiza lo necesario para iniciar una tarea particular.
- Comunicación entre tareas y sincronización: Se asegura que las tareas paralelas logren comunicarse.

Un *kernel* o núcleo del sistema operativo es la entidad más pequeña que posee todas estas funciones.¹²

3.1.2.1. Periódicas

El modelo de sistema de tareas periódicas se define como sigue:

En un sistema que tiene un juego de N tareas periódicas denotadas por:

$$\Gamma = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N\}$$

La i-ésima tarea periódica está definida por $\tau_i = (C_i, T_i)$ donde C_i es el peor caso de tiempo de ejecución y T_i es el período de la tarea, además $C_i \leq T_i$.

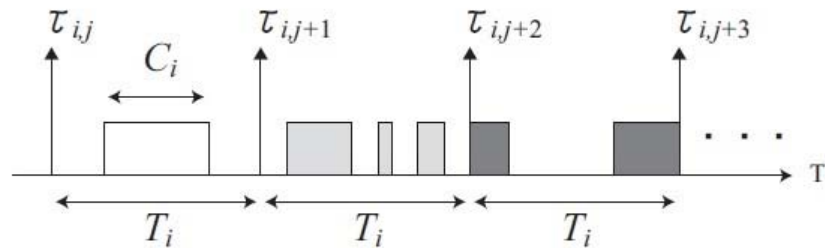
La utilización de procesador de esta definida por $U_i = C_i / T_i$.

¹² LAPLANTE, Phillip A. OVASKA, Seppo J. *Real-time system design and analysis: tools for the practitioner*. p.82.

Una tarea genera una secuencia de trabajos periódicamente. El j -ésimo trabajo de τ_i es denotado por $\tau_{i,j}$ que es liberado en tiempo $r_{i,j}$ y tiene un tiempo límite $d_{i,j}$, igual al tiempo liberado del siguiente trabajo. $d_{i,j} = r_{i,j+1} = r_{i,j} + T_i$.

En algoritmos de planeación las tareas periódicas se ejecutan en algoritmos dedicados. El tiempo de ejecución consumido y el tiempo de ejecución restante de $\tau_{i,j}$ en t se denota como $C_{i,j}$ y $\check{C}_{i,j}$ respectivamente.

Figura 18. **Formato de tiempo tareas periódicas**



Fuente: SHINPEI, Kato. *Real-Time scheduling of periodic and aperiodic tasks on multiprocessor systems*. p. 31.

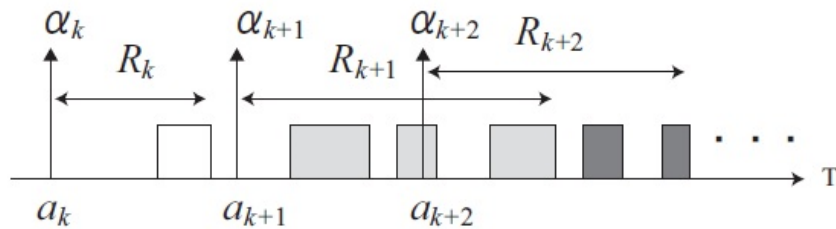
3.1.2.2. Aperiódicas

En un modelo de tareas aperiódicas, estas arriban al procesador secuencialmente.

La k -ésima tarea aperiódica que arriba al sistema se define por $\alpha_k (a_k, E_k)$ donde a_k es el tiempo de arribo y E_k es el peor caso estimado de tiempo de ejecución. Sea f_k el tiempo de finalización de α_k , el tiempo de respuesta de α_k está denotado por $R_k = f_k - a_k$. El tiempo de ejecución consumido y el tiempo remanente de α_k en el tiempo t son $e_k(t)$ y $\tilde{e}_k(t)$ respectivamente.

Para cualquier k se cumple $a_k < a_{k+1}$. La carga de tareas aperiódicas se denota por $U(\alpha) = \lambda/\mu$, donde μ es el promedio de tasa de inicio y λ es el promedio de tasa de arribo.¹³

Figura 19. **Formato de tiempo tareas aperiódicas**



Fuente: SHINPEI, Kato. *Real-Time scheduling of periodic and aperiodic tasks on multiprocessor systems*. p. 32.

3.2. Sistemas embebidos en tiempo real

Son sistemas electrónicos basados en microprocesador o microcontrolador, diseñados para controlar una función específica o un rango especial de estas. Muchos de estos sistemas tienen un propósito específico, por lo que la programación de funciones está restringida al diseñador experto y no al usuario final. A diferencia de las computadoras PC, en un sistema embebido no puede modificarse su programación inmediatamente, esta debe ser modificada utilizando un sistema de programación especializado.

Los primeros sistemas diseñados para realizar cálculos automáticos utilizaban gran cantidad de circuitos lógicos digitales, necesitando mucho espacio de circuitería. Luego de la creación del microprocesador se redujo el tamaño de los circuitos y aumentó el poder de procesamiento. Mientras que la

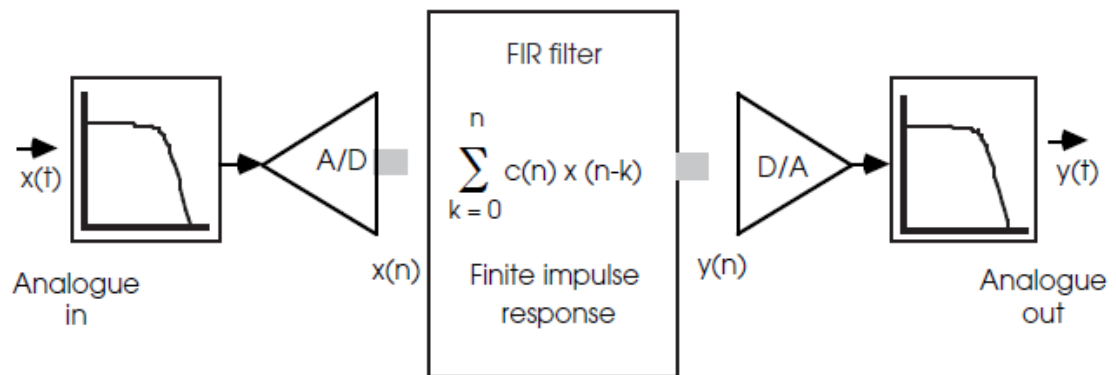
¹³ LAPLANTE, Phillip A. OVASKA, Seppo J. *Real-time system design and analysis: tools for the practitioner*. p.98.

lógica digital debía cambiar para cada sistema y cada función, teniendo que hacer un rediseño completo del sistema, los microprocesadores solamente necesitaban cambiar su programación para obtener un sistema diferente.

Dada la posibilidad de almacenar toda la funcionalidad del sistema en un programa de microprocesador, es posible aumentar o disminuir funciones, así como actualizar las versiones o utilizar nuevas, reduciendo costo y tiempo de producción.

Muchos sistemas compuestos por circuitos analógicos pueden ser sustituidos por un circuito de microprocesador, así, se obtienen mejores resultados en el procesamiento de señales, proceso conocido como DSP o Procesamiento Digital de Señales.¹⁴

Figura 20. **Sistema DSP**



Fuente: HEATH, Steve. *Embedded Systems Design*. p. 5.

¹⁴ HEATH, Steve. *Embedded Systems Design*. p.4.

3.3. Sistemas operativos en tiempo real

Los sistemas operativos son ambientes de software que proveen un camino entre el usuario y las interfaces de bajo nivel del hardware. También proveen varias utilidades para que el usuario utilice el sistema de forma rápida y eficiente. Estas pueden ser operaciones de acceso a dispositivos de entrada-salida, unidades de memoria, interfaces de comunicación, entre otros.

Para la mayoría de los sistemas embebidos modernos, un sistema operativo de una sola tarea es muy restrictivo, por lo que se requiere uno especializado que permita ejecutar varias aplicaciones simultáneamente y que provea comunicación y control entre tareas.

Un sistema operativo multitarea trabaja dividiendo el tiempo del procesador en ranuras o slots discretos. Cada tarea requiere un número de ranuras de tiempo para completar la ejecución. El núcleo decide que tarea toma la próxima ranura, logrando así ejecutar, varias tareas sin necesidad de esperar a que una sola sea completada.

El núcleo controla el uso de memoria para prevenir que las tareas puedan corromperse entre ellas, implementando tablas de memoria para decidir si la petición es aceptada o rechazada.

Un control para paso de mensajes puede ser implementado por el núcleo para control de tareas, En un sistema operativo en tiempo real existen dos tipos básicos de mensajes que puede manejar el núcleo:

- Banderas que pueden controlar, pero no contiene información, normalmente llamadas semáforos.

- Mensajes que pueden contener información y controlar tareas, normalmente llamados eventos.

Sumado a lo anterior se encuentra la característica especial de tener un tiempo de respuesta definido para estímulos externos. En un sistema industrial se toma por definición un tiempo de respuesta de 10mseg. Si el sistema no es capaz de responder en ese lapso, puede traer consecuencias peligrosas al sistema.

4. DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ARMÓNICOS

4.1. Señales y sensores

“Una señal se puede considerar como una variable o cantidad física que provee información sobre el estado o evolución de un sistema o fenómeno. La variable física puede estar en función del tiempo, espacio o cualquier otra variable o variables, es decir, que una señal puede considerarse como un fenómeno físico (cantidad física) que experimenta cambios en el tiempo, espacio u otra variable independiente. Una señal es una descripción de como un parámetro varía con otro parámetro.”¹⁵

“Para un análisis más formal de una señal, se utilizan herramientas matemáticas que la representan en función del tiempo. Las señales físicas son señales analógicas, que pueden representarse con un modelo de función continua y cuyo espectro de frecuencias está definido matemáticamente a través de la transformada de Fourier.”¹⁶

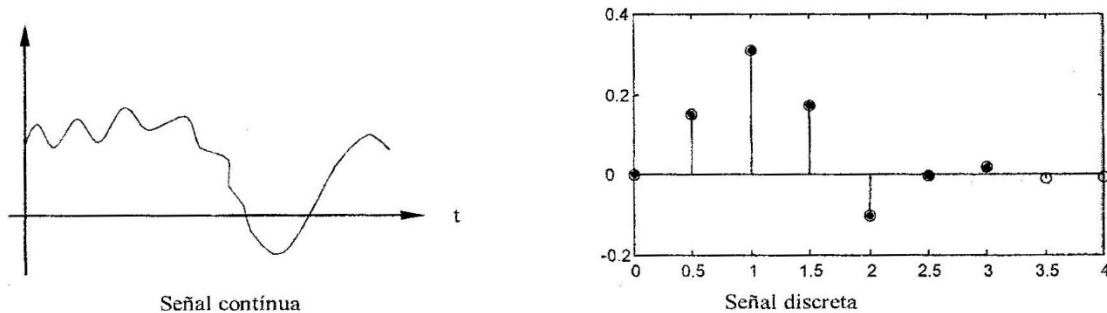
Las señales continuas son señales analógicas que representan magnitudes del mundo real. Matemáticamente, toman cualquier valor del dominio de números reales en un intervalo continuo.

Las señales discretas matemáticamente se definen en el dominio de los enteros. Presentan secuencias discretas (incrementos del mismo valor) de números y son el resultado de un proceso de digitalización.

¹⁵ ESCOBAR SALGUERO, Larry H. *Conceptos básicos de procesamiento digital de señales.* p.5.

¹⁶ *ibíd.*

Figura 21. **Señales continua y discreta**



Fuente: ESCOBAR SALGUERO, Larry H. *Conceptos básicos de procesamiento digital de señales*. p. 7.

Para procesar señales provenientes de sensores u otro sistema físico, es necesario implementar una interfaz analógica, que luego será utilizada por una etapa de conversión digital y cuantización.

Un sensor es un dispositivo que produce una salida utilizable en respuesta a una medición específica. Un sensor adquiere una cantidad física y la convierte en una señal lista para ser procesada. Por lo general, la transformación de una magnitud física se hace a su equivalente eléctrico.

Un sensor es un caso especial de otro elemento llamado transductor. Si un transductor convierte una señal física en señal eléctrica se le conoce como sensor. Si un transductor convierte una señal eléctrica en un cambio de magnitud física se le conoce como actuador.

Si los sensores y actuadores se combinan con amplificadores, convertidores, microprocesadores y otros componentes electrónicos, el sistema completo se conoce como instrumento o sistema de instrumentación.¹⁷

4.2. Medición de parámetros

En la actualidad, existen diversos métodos y técnicas de medición de magnitudes físicas. Para medición de voltaje y corriente específicamente, existen métodos invasivos y no invasivos.

Un método invasivo plantea una solución de medición conectando un componente físicamente a la fuente de voltaje o corriente que requiere medirse.

Un método no invasivo requiere utilizar ciertos componentes que son sensibles a campos electromagnéticos producidos por las fuentes de voltaje o corriente por medir. Algunos métodos también contemplan utilizar componentes optoaislados para evitar al máximo el contacto físico.

4.2.1. Voltaje

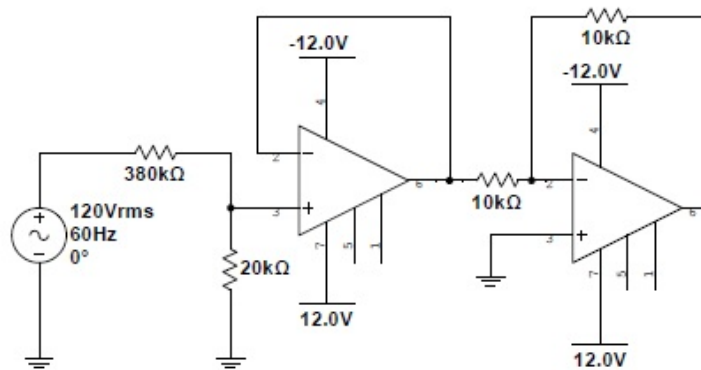
Un método sencillo para medir voltajes grandes en AC es utilizar un divisor de voltaje con dos resistores en serie. Los resistores se seleccionan para obtener una porción del voltaje total y luego llevarla a un circuito amplificador o acondicionador de señal.

Esta solución presenta varios problemas que pueden incurrir en errores de lectura ya que uno de los resistores disipará más potencia, el calor excesivo

¹⁷ PAPAVALASSILIOU, Christos. *Instrumentation*. <http://cas.ee.ic.ac.uk/people/dario/files/E302/1-Sensors.pdf>.

puede modificar el valor de resistencia dando lugar a un error lineal grande. El siguiente punto por considerar es el voltaje de offset, que puede estar presente en el amplificador.

Figura 22. **Circuito simple para muestreo de voltaje AC**



Fuente: elaboración propia, empleando Multisim 14 Educational Edition.

Otros puntos por considerar son:

- El voltaje máximo que puede soportar la etapa de conversión ADC.
- Por el tipo de aplicación se necesita tomar las muestras directamente de una señal alterna. Si se rectifica la señal para obtener una señal continua, puede no representar el dato que se requiere.

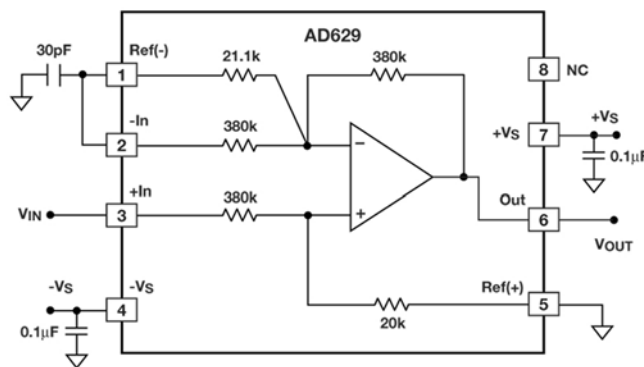
Una mejora al circuito anterior se logra colocando varios componentes de la siguiente manera:

- Un transformador reductor que permita tener un aislamiento y a la vez reduzca el nivel de voltaje que se aplica a los resistores en serie. Debe considerarse también las pérdidas y un posible desvío de la señal debido al

transformador. En el apéndice 1 se presenta un circuito con estas características.

- Utilizar circuitos integrados especiales para acondicionar la señal entrada antes de llegar al convertidor ADC. El integrado AD629 es un circuito integrado con una función de Amplificador Diferencial de Alto Voltaje en modo común que nos da una relación de entrada y salida de 1/20 con un voltaje máximo de entrada de +- 270V.

Figura 23. **Circuito integrado AD629**



Fuente: ANALOG DEVICES. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD629.pdf>.

4.2.2. Corriente

Igual que en la medición de voltaje, existen métodos que forman parte directa del circuito, denominados invasivos, y métodos no invasivos utilizando sensores denominados de efecto Hall.

Un método invasivo consiste en colocar una bobina o un transformador en serie con la carga, para que de esta manera se produzca un voltaje en el

devanado secundario proporcional a la corriente que atraviesa la bobina. A la salida se coloca un amplificador diferencial o de instrumentación para la captura y acondicionamiento de señal, paso previo a la entrada de filtros y convertidores ADC.

En el apéndice 2 se muestra la configuración de transformadores de voltaje y corriente con su respectivo circuito de acondicionamiento, este es un circuito completo previo a una etapa de filtrado y conversión ADC.

Un método no invasivo consiste en colocar un sensor de efecto Hall, por lo general construido en forma de gancho, el cual se coloca alrededor de uno de los cables donde se desea medir cantidad de corriente.

En la sección de anexos se presenta el diagrama de bloques de un medidor integrado con microprocesador, de corriente y voltaje alterno marca NXP.

4.2.3. Protección de circuitos

En un capítulo anterior se mencionaron varias fuentes de posibles perturbaciones que se presentan en los sistemas eléctricos y que pueden afectar la calidad de la potencia entregada al consumidor. En esta sección nos concentraremos en la protección de picos de voltaje también llamados oleadas o por su término en inglés surge.

Varios tipos de voltajes de pico se diferencian esencialmente por su duración y la cantidad de potencia suministrada. Los equipos eléctricos tienen un rango de tolerancia a los picos de voltaje. Si el voltaje es excedido puede provocar funcionamiento erróneo y acarrear daño permanente.

Voltajes en picos de kilovoltios son generalmente transitorios de sobrevoltaje de corta duración, desde algunos microsegundos a algunos milisegundos. Algunas causas de estos transitorios son: caída de rayos, operaciones de conmutación, descarga electrostática, acoplamiento inductivo y acoplamiento capacitivo.

Las protecciones contra este tipo de perturbaciones deben asegurar que los voltajes de pico no causen daño a los equipos. Las protecciones deben cumplir dos características:

- Limitar la amplitud del voltaje de pico para lograr que la capacidad del dieléctrico no sea excedida.
- Descargar las corrientes de pico asociadas con los voltajes correspondientes.

Algunos componentes sencillos que se pueden implementar para la protección de picos son los varistores. Estos son dispositivos que disminuyen su resistencia cuando el voltaje entre sus terminales aumenta.

Algunas características importantes son:

- Tiempo de respuesta de 5 a 25 nanosegundos.
- Voltaje de funcionamiento entre 14 y 550V.
- Buena disipación de potencia.
- Baja confiabilidad por degradación de uso.

El dispositivo protege el circuito de variaciones y picos bruscos de tensión mayores a su tensión nominal. Se coloca en paralelo para limitar los impulsos transitorios y es recomendable colocarlo inmediatamente después de un fusible.

4.3. Adquisición de datos y digitalización

Los sistemas de adquisición y conversión son la base para obtener lecturas de señales analógicas de cualquier fuente física y llegar a una representación digital para posteriormente procesarla y transmitirla hacia los dispositivos finales.

Las señales analógicas que puede tomar un sistema de adquisición provienen de sensores o transductores que convierten parámetros físicos como presión o temperatura, a su equivalente en señal eléctrica.

La principal característica de los sistemas de adquisición es la habilidad de preservar la exactitud e integridad de la señal que se mide.¹⁸

Algunos componentes básicos que implementa un sistema de adquisición y conversión de señales analógicas con las siguientes:

- Multiplexor analógico y acondicionador de señal.
- Amplificador de muestreo y retención.
- Convertidor Análogo-Digital.
- Temporizador y lógica de control

Aunado al diseño e implementación física de los componentes anteriores, debe tomarse en cuenta dos aspectos mencionados a continuación:

- Consideración de error: se debe considerar en un sistema un error bajo, tomando en cuenta la velocidad de muestreo que depende del máximo

¹⁸ Texas Instruments. Principles of Data acquisition and conversion. p.27.

ancho de banda del canal, el número de canales y el número de muestras por segundo.

- Error de Aliasing: a partir del teorema de muestreo de Nyquist, el cual dice que se necesita un mínimo de 2 muestras por ciclo del ancho de banda de la señal para reproducir idealmente la información muestreada sin pérdida de información. El error de Aliasing lo provoca el número insuficiente de muestras en un ciclo de una señal, provocando pérdida de información.

4.3.1. Conversión análogo-digital

Se mencionan algunos tipos de circuitos convertidores de señales analógicas a señales digitales:

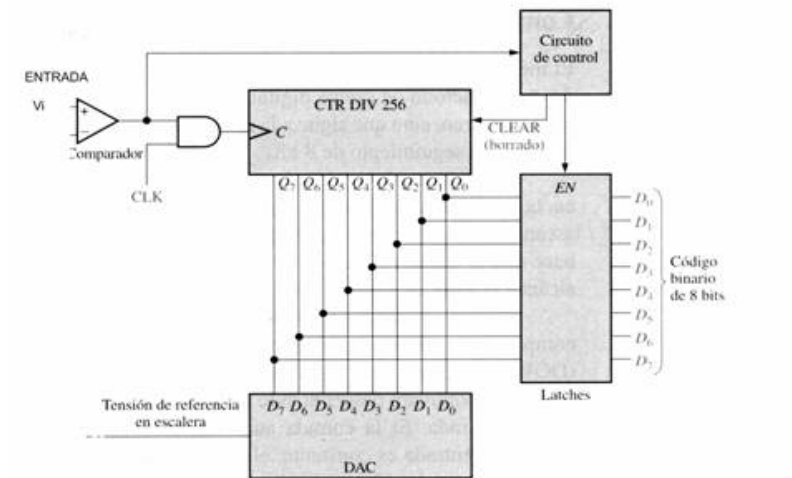
- Convertidor integrador
- Convertidor por conteo
- Convertidor por aproximaciones sucesivas
- Convertidor tipo flash
- Convertidor en paralelo de prioridad

Un convertidor por conteo utiliza tres elementos principales: un contador digital, un convertidor DAC y un comparador analógico.

Al inicio del ciclo de conversión el contador inicia a 0, esto produce que la salida del DAC sea $V_b = 0$ la cual está conectada a la entrada inversora del comparador analógico.¹⁹

¹⁹ ALVAREZ GIRÓN, Jorge F. *Estudio del contenido armónico de la señal de voltaje de 120 voltios en la ciudad de Guatemala*. Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 1998.

Figura 24. Diagrama de bloques ADC por conteo



Fuente: NIÑO, José Eduardo. <http://www.angelfire.com/al4/pc/tad.htm>.

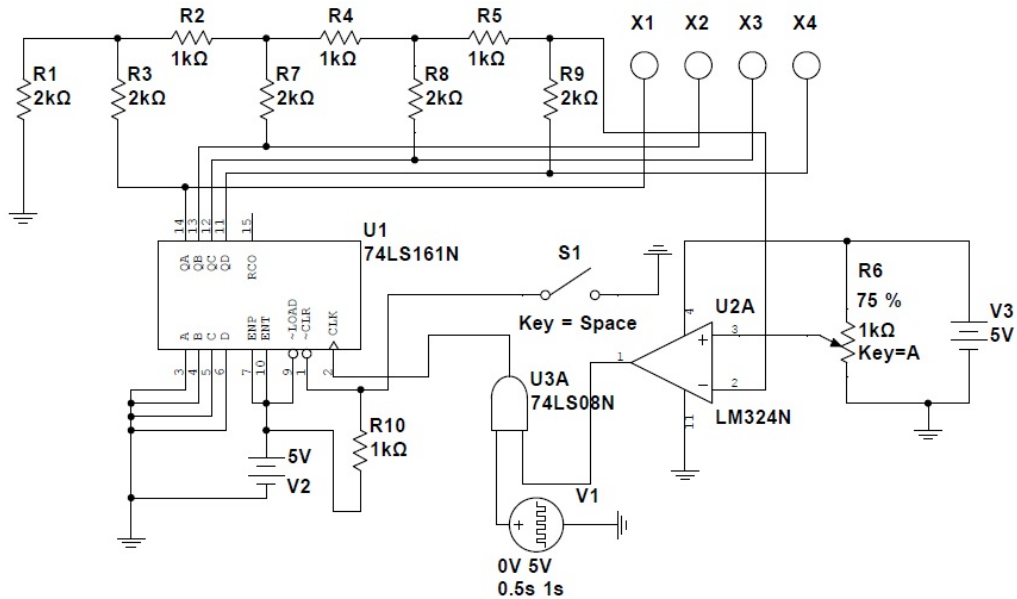
La entrada analógica V_a puede ser alimentada hacia la entrada no inversora a través de un circuito de muestreo-retención. Mientras la entrada V_a sea mayor que V_b , el comparador enviará a 1 la compuerta AND que habilita el contador. Con cada pulso del reloj, el contador se incrementa y la señal V_b aumenta a un nivel de voltaje determinado por la red en escalera a la salida del contador.

Si el V_b excede V_a , el comparador cambia su salida a 0 y detiene el conteo deshabilitando la compuerta AND. El número registrado en el contador es el valor binario equivalente. El proceso de conversión es lento debido a que se necesita, para el peor caso, un total de $2n$ pulsos de reloj.²⁰

En la figura 25 se presenta un convertidor ADC de conteo de 4 bits.

²⁰ SCHILLING, Donald L. BELOVE, Charles. *ELECTRONIC CIRCUITS: Discrete and Integrated*. p.205.

Figura 25. **Convertidor completo ADC por conteo**



Fuente: elaboración propia, empleando Multisim 14 Educational Edition.

4.3.2. Multiplexación y muestreo

El teorema de muestreo o teorema de Nyquist determina el número mínimo de muestras que deben procesarse para obtener una representación digital de una señal, y que permita reconstruirla de forma más exacta posteriormente.

La definición del teorema es la siguiente: Sea $f(t)$ una señal cuya máxima componente de frecuencia es f_H . Se toman muestras periódicas de una señal

con frecuencia f_s . Para poder reconstruir la señal sin distorsión, la frecuencia f_s debe ser por lo menos dos veces f_H , es decir $f_s \geq 2f_H$.²¹

En el sistema de detección de armónicos, la señal proveniente del sensor de entrada, cuya señal de voltaje rms es 120 voltios, asumimos un contenido armónico y una frecuencia fundamental de 60Hz. Por lo tanto, la frecuencia de muestreo debe ser mayor o igual a dos veces la frecuencia del armónico más lejano que se desea analizar. Por ejemplo, si se analiza el séptimo armónico, la frecuencia f_H será $7 * 60\text{Hz} = 420\text{Hz}$, por lo tanto, la frecuencia de muestreo f_s será $2 * 420 = 840\text{Hz}$.

Algunas características importantes de los sistemas de procesamiento digital son:

- Ya que un sistema digital puede programarse, la implementación del algoritmo de procesamiento y su posterior modificación no involucra mayor trabajo que solamente reprogramar el sistema. La contraparte analógica puede necesitar un diseño completamente nuevo del sistema.
- Un sistema digital permite mayor precisión, inmunidad al ruido y velocidad de procesamiento.
- Una señal digital se almacena fácilmente, por lo que puede ser transportada a través de un sistema de comunicaciones para un procesamiento remoto.
- Fácilmente puede implementarse un sistema que procese varias señales, utilizando técnicas de multiplexación.
- La velocidad de operación de un convertidor análogo-digital puede ser una limitante al procesar señales con ancho de banda grande. Entre más grande

²¹ ALVAREZ GIRÓN, Jorge F. *Estudio del contenido armónico de la señal de voltaje de 120 voltios en la ciudad de Guatemala*. Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 1998.

sea el componente de frecuencia de la señal, más rápido debe trabajar el convertidor.

En procesos industriales existe una alta densidad de canales de adquisición provenientes de varios sensores los cuales deben ser procesados por un número pequeño de convertidores ADC implementando tiempos y secuencias para el proceso. Lo anterior es conocido como multiplexación y es una solución para ahorro significativo de potencia, espacio y costos.

El sistema empleado es el ADC de aproximaciones sucesivas debido a su baja latencia y que se adapta mejor a sistemas multiplexados que demandan respuestas rápidas.

Los sistemas de adquisición multiplexados demandan amplificadores con ancho de banda amplio, además, la conmutación y el muestreo secuencial de los canales debe sincronizarse con el ciclo de conversión del ADC.²²

4.4. Sistemas de detección

La compensación armónica selectiva es posible en los casos donde la red esta balanceada y la potencia en el filtro activo se mantiene.

Los métodos de detección de armónicos son parte del control de filtros activos presentes en sistemas eléctricos de potencia. Estos poseen la habilidad de terminar atributos específicos de los armónicos tales como: potencia, amplitud y fase de la señal de entrada, utilizando algoritmos dedicados para tal efecto.

²² PACHCHIGAR, Maithil. *Demystifying High-Performance Multiplexed Data-Aquisition Systems*. <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/demystifying-data-acquisition-systems.html>.

La compensación armónica general (OHC) cumple el objetivo de proveer una referencia a la corriente armónica en todo el espectro presente en la corriente de la carga excepto en la frecuencia fundamental, que provee la red de potencia eléctrica.

La compensación armónica selectiva (SHC) provee una corriente armónica de referencia solamente para armónicos de orden seleccionado. La selectividad puede ser seleccionada por defecto o ajustada por el usuario.

La función principal del bloque detector de armónicos es filtrar la frecuencia fundamental. Esto puede lograrse de diferentes formas:

- En forma estacionaria implementando filtros rechaza-banda (notch filter), sintonizado para eliminar el componente fundamental.
- En forma sincrónica aplicándolo a cargas con amplio espectro armónico o que este sea desconocido.²³

4.4.1. Detector de armónicos

Un proceso para detección de armónicos implica analizar la señal de salida en el dominio de la frecuencia utilizando técnicas de tratamiento de señales digitales.

Los armónicos pueden ser analizados en un amplio rango de frecuencias, empleando técnicas como la transformada rápida de Fourier (FFT). La implementación de estas técnicas con circuitos digitales puede volverse complicada. Una solución a esta desventaja es emplear un circuito de enganche

²³ KAUR BHATTI, Jaipreet. ASATI Deepak. *Harmonic Detection using Microcontroller*. http://www.ijctee.org/files/VOLUME2ISSUE3/IJCTEE_0612_19.pdf.

de fase (PLL). Con este sistema, una señal senoidal es enganchada a la salida junto con las señales armónicas que se requiere detectar.

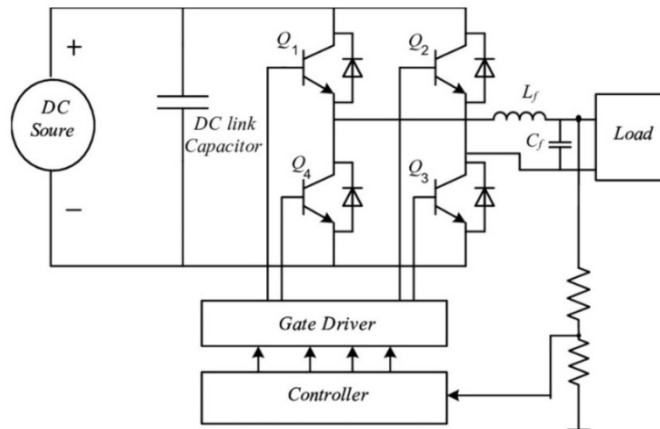
Otra técnica es a utilización de un microcontrolador, como circuito embebido, para el procesamiento digital implementando la transformada discreta de Fourier (DTF).

La señal de entrada, la cual es una señal senoidal rectificada, se aplica al circuito ADC interno del microcontrolador que puede tener una resolución de 10 bits por canal. El software embebido desarrolla la DTF calculando la amplitud de la frecuencia fundamental y de la tercera armónica. La distorsión armónica es calculada con la amplitud de la fundamental y la amplitud del tercer armónico.

Los circuitos inversores utilizan semiconductores que generan una señal alterna a partir de una señal PWM. La conmutación de circuitos es la más eficiente forma de generar potencia alterna, permitiendo un control flexible del voltaje y la potencia de salida.

De cualquier forma, los sistemas PWM generan ruido armónico debido a los cambios rápidos de voltaje y corriente. Es necesario agregar filtros externos que permitan eliminar estos armónicos.

Figura 26. **Circuito inversor monofásico**



Fuente: SAYED, Khairy. https://www.researchgate.net/figure/Single-phase-PWM-inverter_fig1_274082091.

Como se muestra en la figura anterior la onda PWM es generada comparando una señal de referencia y una señal portadora. La señal PWM controla un circuito IGBT para generar una salida alterna.

Cuando la señal de referencia es mayor que la señal portadora, el IGBT superior se activa y un voltaje dc positivo es aplicado a la fase de salida del inversor. Cuando la señal de referencia es menor que la señal triangular portadora, el IGBT inferior es activado y un voltaje dc negativo es aplicado a la salida del inversor.

La magnitud y la frecuencia de la señal de referencia determinan la amplitud y la frecuencia del voltaje de salida.²⁴

²⁴ KAUR BHATTI, Jaipreet. ASATI Deepak. *Harmonic Detection using Microcontroller*. http://www.ijctee.org/files/VOLUME2ISSUE3/IJCTEE_0612_19.pdf.

Un método en tiempo real para detección de armónicos es utilizar filtros activos. Un filtro activo básicamente opera detectando los armónicos e inyectando al sistema de potencia los mismos armónicos, pero de fase opuesta. La respuesta del filtro depende de las características del inversor, las estrategias de control y las características de la señal de referencia.

Los métodos en los que operan los filtros activos se encuentran en el dominio de la frecuencia o en el dominio del tiempo, según la siguiente tabla:

Tabla IV. **Métodos de detección de armónicos**

Dominio	Método de Detección de Armónicos
Frecuencia	Transformada de Fourier
Tiempo	Teorema de Detección Síncrona
	Teorema de Referencia Síncrona
	Potencia Instantánea
	Teorema de Multiplicación Seno

Fuente: OZER, Emre. https://www.researchgate.net/publication/307181170_A_Real-Time_Harmonic_Detection_Method_for_Single-Phase_Active_Power_Filters.

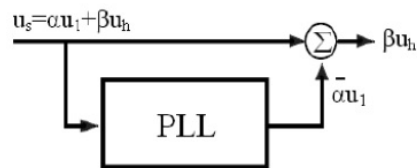
La detección de armónicos utilizando transformada de Fourier necesita más de un ciclo de la señal de entrada y más tiempo para determinar que está en la entrada, por lo tanto, hay retraso en la cancelación de armónicos.

Un método alternativo propone utilizar un sistema PLL (phase-locked loop), utilizando un filtro capacitivo pasabanda y un circuito PLL que tiene una baja distorsión en la onda senoidal de salida.²⁵

²⁵ OZER, Emre. *A Real-Time Harmonic Detection Method for Single-Phase Active Power Filters*. https://www.researchgate.net/publication/307181170_A_Real-Time_Harmonic_Detection_Method_for_Single-Phase_Active_Power_Filters.

La detección de armónicos utilizando PLL pretende producir una componente fundamental y sustraer esta componente de la señal distorsionada. El circuito PLL debe seguir tanto la amplitud como la fase.

Figura 27. **Diagrama de Bloques PLL**



Fuente: OZER, Emre. https://www.researchgate.net/publication/307181170_A_Real-Time_Harmonic_Detection_Method_for_Single-Phase_Active_Power_Filters.

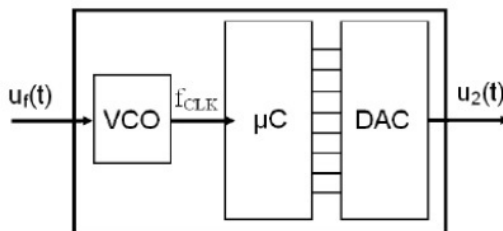
Un tipo especial de PLL denominado oscilador digital controlado por voltaje VCDO, es diseñado para obtener una baja distorsión de la salida. La frecuencia de la señal senoidal generada depende del intervalo de muestreo $t(s)$ de duración A y tamaño N , se determina por:

$$f_0 = A / N * f_{clk}$$

donde f_{clk} es la frecuencia de reloj del sistema.

Un ejemplo de este tipo de PLL se muestra en la figura siguiente:

Figura 28. Diagrama VCDO

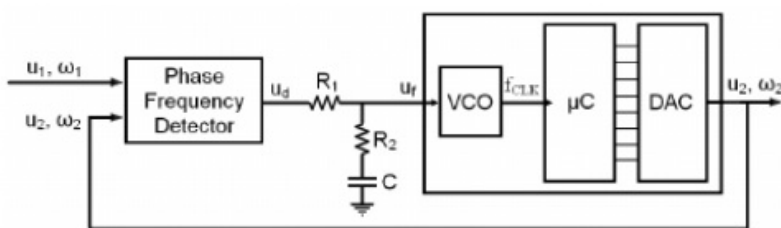


Fuente: OZER, Emre. https://www.researchgate.net/publication/307181170_A_Real-Time_Harmonic_Detection_Method_for_Single-Phase_Active_Power_Filters.

Para producir una señal sin distorsión se recomienda un intervalo $A = 1$, el tamaño de la tabla de comparación $N = 256$. Con estos datos se genera una señal analógica implementando un convertidor DAC. Los pulsos de reloj requeridos se generan con el uso de un VCO. Por lo que es posible ajustar la frecuencia con un control de voltaje.²⁶

Un diagrama más elaborado muestra el sistema completo de un PLL. Presenta una sección del detector PFD, un filtro de lazo LP y un VCO.

Figura 29. Diagrama PLL completo



Fuente: OZER, Emre. https://www.researchgate.net/publication/307181170_A_Real-Time_Harmonic_Detection_Method_for_Single-Phase_Active_Power_Filters.

²⁶ OZER, Emre. *A Real-Time Harmonic Detection Method for Single-Phase Active Power Filters*. https://www.researchgate.net/publication/307181170_A_Real-Time_Harmonic_Detection_Method_for_Single-Phase_Active_Power_Filters.

4.5. Sistemas de corrección

Algunas soluciones para reducir el contenido armónico en los sistemas eléctricos de potencia son:

- Filtros pasivos.
- Filtros activos (dinámicos).
- Técnicas de inyección de corriente en el lado de continua para reducir el contenido armónico.
- Convertidores con PWM.

En los convertidores de alterna conforme se aumentan los pulsos del rectificado, los armónicos que aparecen tienen cada vez un orden superior. A 6 pulsos el armónico que aparece es el 5to., por lo tanto, empleando más pulsos en los puentes rectificadores se consigue mejorar el proceso de supresión de armónicos.²⁷

Los filtros pasivos basan su funcionamiento en proporcionar a las corrientes armónicas un camino de impedancia mucho menor que la red exterior actuando como sumidero las mismas. Están formados por componentes pasivos (resistencias, capacitores, inductores), pudiendo ser del tipo siguiente:

- Filtro LC paralelo es un filtro sintonizado a una única frecuencia y se forma con una reactancia inductiva en serie con un banco de capacitores. Debe tenerse cuidado de no desviar la resonancia a un armónico particular.

²⁷ ZAMORA BELVER, Ma. I. MACHO STADLER, Valentín. Estudio bibliográfico sobre distorsión armónica producida por convertidores estáticos. p.120.

- Filtro pasa-alto LCR toma en cuenta la configuración anterior y agrega una resistencia R en paralelo con la reactancia. Debe ser capaz de resistir los armónicos arriba de la frecuencia a la que se sintoniza.

4.5.1. Filtros dinámicos

Consisten en eliminar las corrientes de armónicos generadas en la carga mediante la inyección de las mismas corrientes, pero en contrafase, de modo que queden anuladas.

El convertidor tiene la forma de un inversor que conecta la red de corriente alterna con un sistema de almacenamiento de energía situado del lado de la corriente continua. Este sistema debe ser capaz de absorber o suministrar contenido de corriente armónico esté disponible en cada momento.

El convertido trabaja con pulsos PWM a alta frecuencia además lo acompaña un sistema de control cuya regulación hace un seguimiento de la corriente de carga, determina el contenido armónico y genera las señales para conseguir la cancelación.

Estos filtros se suman al método de inyección de corriente, cuya técnica se basa en inyectar en el transformador que alimenta el rectificador, o directamente a la línea de alimentación corrientes de armónicos a cierta frecuencia, que mitiguen las producidas por el rectificador. Finalmente se trata de convertir la onda que absorbe el convertidor en una señal senoidal por medios magnéticos o por medio de semiconductores.²⁸

²⁸ ZAMORA BELVER, Ma. I. MACHO STADLER, Valentín. *Estudio bibliográfico sobre distorsión armónica producida por convertidores estáticos*. p.131.

CONCLUSIONES

1. En todo sistema de conversión de energía solar existen distorsiones en la forma de onda denominadas armónicos.
2. La calidad de potencia es la ausencia de interrupciones y fluctuaciones en una línea de alimentación eléctrica.
3. Existen métodos para la detección de armónicos en inversores de energía solar, algunos de estos métodos involucran filtros pasivos basados en condensadores e inductores, mientras otros implementan sistemas dinámicos basados en microprocesador y dispositivos para el tratamiento digital de señales.
4. Un sistema embebido basa su funcionamiento en ejecutar trabajos y tareas para los que fue diseñado. Un sistema embebido en tiempo real se denomina duro si las tareas deben ser ejecutadas en el orden de llegada para no derivar en una falla del sistema.
5. Un método por desarrollar para la detección de armónicos consiste en diseñar un sistema embebido, basado en microprocesador, e implementar un sistema de tratamiento de señales con algoritmos de filtrado y muestreo de señales, para implementar un lazo de enganche y de esta manera detectar armónicos arriba de la frecuencia fundamental.

RECOMENDACIONES

1. Para los sistemas de energía solar, la recomendación sugerida es agregar al inversor un sistema de detección y corrección de armónicos, obteniendo de esta manera un máximo rendimiento en el sistema, manteniendo la calidad de potencia.
2. En el diseño e implementación de sistemas embebidos, una recomendación es tomar como base de hardware los microcontroladores, dadas sus características físicas, y la posibilidad de programar un software para procesar digitalmente las señales armónicas provenientes del inversor.
3. En la implementación de sistemas de este tipo, se recomienda colocar elementos de protección, para resguardar los equipos sensibles.
4. En el diseño e implementación de circuitos detectores de voltaje y corriente, se recomienda utilizar métodos no invasivos, para evitar la apertura de la línea principal y que el circuito de potencia no sufra interrupciones por mal funcionamiento de los sistemas embebidos.

BIBLIOGRAFÍA

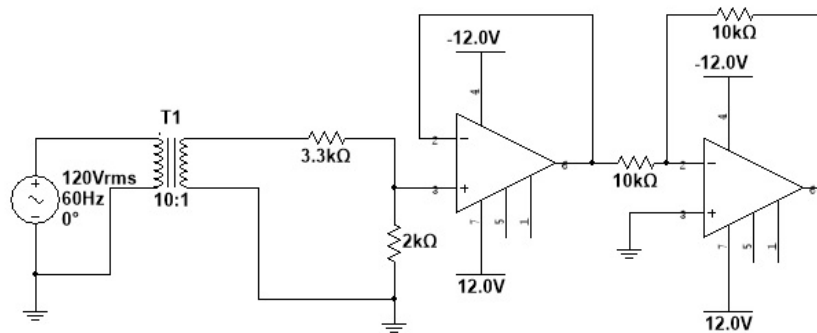
1. ALVAREZ GIRÓN, Jorge F. *Estudio del contenido armónico de la señal de voltaje de 120 voltios en la ciudad de Guatemala*. Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 1998. 70 p.
2. ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. *El ABC de la calidad de energía eléctrica*. México: Limusa. 256 p.
3. ESCOBAR SALGUERO, Larry H. *Conceptos básicos de procesamiento digital de señales*. México: UNAM, 2009. 195 p.
4. GERSTANHABER, Moshe. TRAN, Chau. *Difference amplifier measures high AC voltage without heat*. [en línea]. <https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1272269>. [Consulta: 10 julio 2018].
5. HEATH, Steve. *Embedded Systems Design*. EEUU: Newnes, 2003. 430 p.
6. KAUR BHATTI, Jaipreet. ASATI Deepak. *Harmonic Detection using Microcontroller*. [en línea]. <http://www.ijctee.org/files/VOLUME2ISSUE3/IJCTEE_0612_19.pdf>. [Consulta: 15 marzo 2019].

7. LAPLANTE, Phillip A. OVASKA, Seppo J. *Real-time system design and analysis: tools for the practitioner*. EE. UU.: Wiley, 2012. 560 p.
8. LIU, Jane. *Real-Time Systems*. EE. UU.: Prentice Hall, 2000. 576 p.
9. OZER, Emre. *A Real-Time Harmonic Detection Method for Single-Phase Active Power Filters*. [en línea]. <https://www.researchgate.net/publication/307181170_A_Real-Time_Harmonic_Detection_Method_for_Single-Phase_Active_Power_Filter>. [Consulta: 20 marzo 2019].
10. PACHCHIGAR, Maithil. *Demystifying High-Performance Multiplexed Data-Aquisition Systems*. [en línea]. <<http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/demystifying-data-acquisition-systems.html>>. [Consulta: 20 agosto 2018].
11. PAPAVALASSILIOU, Christos. *Instrumentation*. [en línea]. <<http://cas.ee.ic.ac.uk/people/dario/files/E302/1-Sensors.pdf>>. [Consulta: 30 agosto 2018].
12. RTR Energía. *Compensación de Energía Reactiva*. [en línea]. <http://www.rtrenergia.es/downloads/reactiva_2012.pdf>. [Consulta: 20 junio 2018].
13. SCHILLING, Donald L. BELOVE, Charles. *ELECTRONIC CIRCUITS: Discrete and Integrated*. EE. UU.: McGraw-Hill 1979. 420 p.

14. SHINPEI, Kato. *Real-Time scheduling of periodic and aperiodic tasks on multiprocessor systems*. [en línea]. Tesis doctoral. Universidad Keio, 2009. <http://www.ny.ics.keio.ac.jp/~shinpei/papers/kato_thesis.pdf>. [Consulta: 1 de julio 2018].
15. Texas Instruments. *Principles of Data acquisition and conversion*. EEUU, 2001. 230 p.
16. TOBAJAS VÁSQUEZ, M. Carlos. *Identificación de los elementos de las instalaciones de energía solar fotovoltaica*. En: *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. 1ra. edición. Bogotá: Ediciones de la U, 2015. 166 p.
17. U.S. Department of Energy. *Solar Energy Basics*. [en línea]. <<https://www.nrel.gov/workingwithus/re-solar.html>>. [Consulta: 1 junio 2018].
18. ZAMORA BELVER, Ma. I. MACHO STADLER, Valentín. *Estudio bibliográfico sobre distorsión armónica producida por convertidores estáticos*. España: Iberdrola, 1997. 136 p.

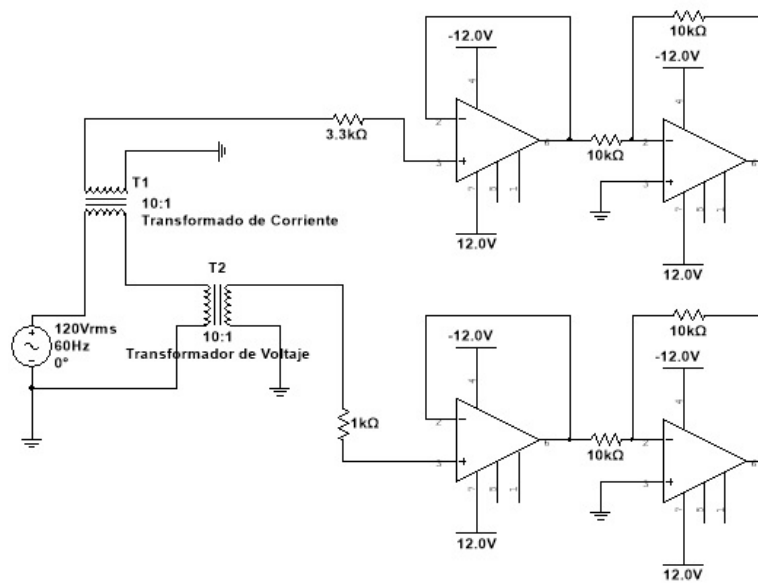
APÉNDICE

Apéndice 1. Mejora del circuito figura 22 agregando un transformador



Fuente: elaboración propia, empleando Multisim 14 Educational Edition.

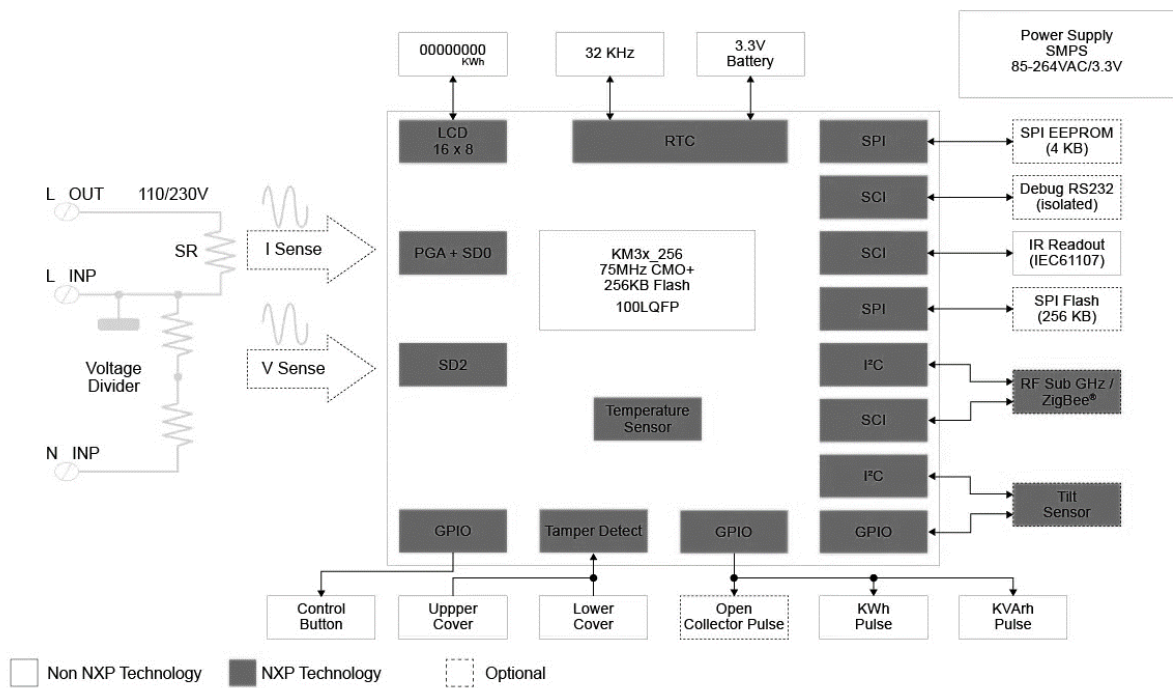
Apéndice 2. Circuito con transformador de voltaje y corriente



Fuente: elaboración propia, empleando Multisim 14 Educational Edition.

ANEXO

Anexo 1. Diagrama de bloques medidor integrado



Fuente: NXP Semiconductors. <https://www.nxp.com/products/sensors/motion-sensors/3-axis/single-phase-metering:SINGLE-PHASE-METER#0>.

