



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Campus San Juan del Río



“Ajuste dinámico de ganancias en un sistema de medición de señales de tensión para el mejoramiento de parámetros en la cuantificación de la calidad de la energía”

TESIS

Que, para obtener el título de

Ingeniero Electromecánico

Con línea terminal en Mecatrónica

Presenta:

Cristian Enrique Arteaga Martínez

Dirigido por:

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

M.I. José Luis González Córdoba

Santiago de Querétaro, mayo de 2015

Resumen

La adquisición de señales es la etapa más importante que un sistema de monitoreo debe tener para poder entregar resultados objetivos y precisos sobre algún proceso, principalmente en un sistema de control. En este trabajo se ha desarrollado un sistema de adquisición de señales completo, propio de la universidad, capaz de acondicionar y filtrar señales eléctricas a cualquier nivel de tensión eléctrica, usando las principales componentes de una señal eléctrica, tales como voltaje y corriente, siendo la etapa de acondicionamiento la parte fuerte del proyecto, ya que en ella se evalúan los datos de entrada para ajustar una ganancia adecuada de manera automática. La implementación de este proyecto se ha realizado en hardware, lo que hace del proceso de adquisición algo ideal para aplicaciones en línea.

Palabras clave: sistema, adquisición, ganancias, calidad de la energía, hardware, interfaz de usuario, FPGA, energía eléctrica, automático.

Dedicatorias

Dedicado a mi padre y a mi madre, quienes confiaron en mí mucho antes de que yo lo hiciera.

Agradecimientos

Agradezco al Dr. Roque por apoyarme y darme este tema de investigación que me ha servido para culminar con mis estudios de licenciatura.

Agradezco enormemente al aun entonces M. en C. Benigno Muñoz por darme una orientación adecuada respecto a este trabajo y, a quien yo considero, debió ser mi asesor desde un principio.

Agradezco a la mayoría de mis profesores, quienes me dieron las herramientas necesarias para darle una culminación a este proyecto, y que espero sus enseñanzas me sirvan en el futuro.

Agradezco a mis compañeros constantes de grupo, los cuales hicieron de estos cuatro años una estancia amena y enriquecedora.

Agradezco a mis siempre leales padres, quienes siempre me apoyaron y sé que siempre me apoyaran.

Agradezco a la vida por darme cada una de estas experiencias.

“En Dios confiamos”

Índice

Resumen	I
Dedicatorias	II
Agradecimientos	III
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	X
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Calidad de la energía eléctrica.....	2
1.1.2. Técnicas y metodologías de monitoreo de disturbios eléctricos	3
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo general	6
1.2.2. Objetivos particulares.....	6
1.3. Descripción del problema	7
1.4. Justificación	8
1.5. Planteamiento general	9
2. Estado del Arte	10
2.1. Introducción	10
2.2. Sistemas eléctricos y la necesidad del monitoreo en señales eléctricas.....	10
2.3. Señales eléctricas	12
2.3.1. Características de las Señales eléctricas	12
2.3.2. Anomalías en las Señales eléctricas	14
2.3.3. Cuantificación de las anomalías de las señales eléctricas	21
2.4. Adquisición de señales.....	27

2.4.1.	Sensores para la adquisición de señales eléctricas	28
2.4.2.	Acondicionamiento de señales	32
2.4.3.	Discretización de señales.....	36
2.5.	Procesamiento en Hardware	39
2.5.1.	FPGA (Arreglo de compuertas programables en campo)	39
2.5.2.	Características del procesamiento basado en FPGA	40
2.6.	Comunicación USB	42
2.6.1.	Beneficios para los usuarios	42
2.6.2.	Velocidad	44
2.6.3.	Fiabilidad.....	44
2.6.4.	Bajo costo.....	44
2.6.5.	Bajo consumo de energía	44
2.6.6.	Comunicación inalámbrica.....	45
3.	Metodología.....	46
3.1.	Introducción	46
3.2.	Especificaciones del sistema.....	46
3.3.	Diseño del sistema de adquisición de señales.....	47
3.3.1.	Modelo base del sistema de acondicionamiento	48
3.3.2.	Reestructuración del módulo de acondicionamiento	53
3.3.3.	Esquema de control en hardware.....	57
3.3.4.	Módulo convertidor analógico-digital (D/A)	59
3.3.5.	Sistema de ajuste automático de ganancias y adquisición de datos	61
3.4.	Interfaz de usuario	67
3.5.	Pruebas del sistema	69
3.5.1.	Pruebas basadas en un generador de señales.....	69
3.5.2.	Pruebas basadas en cargas lineales.....	69
3.5.3.	Pruebas basadas en cargas no lineales.....	70
4.	Resultados y análisis.....	72

4.1.	Interconexión entre el sistema en hardware y en software	72
4.2.	Análisis de datos en el generador de señales	74
4.3.	Análisis de corriente en cargas lineales	75
4.4.	Análisis de corriente en cargas no lineales	77
5.	Conclusiones y perspectivas.....	80
5.1.	Conclusiones	80
5.2.	Prospectivas	81
6.	Referencias	82
7.	Apéndice.....	85
7.1.	Interfaz de usuario	85
7.2.	Sistema en plataforma FPGA	87
7.3.	Sistema de acondicionamiento en hardware	90

Índice de figuras

Fig. 1.1. Diagrama a bloques de la descripción del problema.....	7
Fig.1.2. Diagrama a bloques en general del sistema de monitoreo	9
Fig. 2.1. Curva de demanda de un sistema durante un día de verano y un día de invierno (Wildi, 2007)	11
Fig. 2.2. Principales características de una señal eléctrica (Wildi, 2007).....	13
Fig. 2.3. Desfase entre señales (Wildi, 2007).....	13
Fig. 2.4. Fluctuaciones de voltaje debido a los constantes encendidos de un refrigerador (Wildi, 2007)	16
Fig. 2.5. Caída de tensión de baja duración provocado por un falla en una fase (Wildi, 2007)	17
Fig. 2.6. Representación grafica de un incremento de tensión de baja duración (Wildi, 2007)	18
Fig. 2.7. Sobrevoltaje transitorio sobre una forma de onda senoidal de voltaje (Wildi, 2007)	19
Fig. 2.8. Efecto de los armónicos en una señal fundamental (Wildi, 2007).....	20
Fig. 2.9. Triángulo de potencias para sistemas no sinusoidales (Wildi, 2007)	25
Fig. 2.10 Estructura general de un sistema de adquisición de señales para medida y control (Pallás, 1993)	27
Fig. 2.11. Simbología de los TC.....	30
Fig. 2.12. Demostración del efecto Hall.....	31
Fig. 2.13. Diagrama de una bobina Rogowski	32
Fig. 2.14. Modelo ideal de un Amplificador Operacional.....	33
Fig. 2.15. Amplificador inversor	34
Fig. 2.16. Circuito seguidor de voltaje	35
Fig. 2.17. Graficas de respuesta a la frecuencia de tres filtros pasa bajas Butterworth.....	36
Fig. 2.18. Elementos básicos de un convertidor D/A	37
Fig. 2.19. Dispositivo de muestreo y retención con amplificadores de aislamiento a la entrada y la salida	38
Fig. 3.1. Diagrama a bloques del sistema de adquisición de datos completo.....	47
Fig. 3.2. Diagrama eléctrico del acondicionador de señal para corriente.....	49
Fig. 3.3. Ubicación del seguidor de voltaje en el diagrama de acondicionamiento	50
Fig. 3.4. Ubicación del amplificador inversor en el diagrama de acondicionamiento	51

Fig. 3.5. Ubicación del filtro Butterworth en el diagrama de acondicionamiento	52
Fig. 3.6. Ubicación del circuito inversor en el diagrama de acondicionamiento	52
Fig. 3.7. Modelo a bloques del sistema de acondicionamiento de señales.....	54
Fig. 3.8. Nuevo modelo esquemático del circuito principal.....	55
Fig. 3.9. Modelo esquemático de la configuración con transistores.....	55
Fig. 3.10. Modelo esquemático de la salida en el sistema de acondicionamiento.....	55
Fig. 3.11. Configuraciones cambiadas para el nuevo diseño.....	56
Fig. 3.12. Nuevo diseño en la alimentación	56
Fig. 3.13. Estructura digital del sistema en hardware.....	57
Fig. 3.14. Ilustración de la plataforma Xilinx Spartan-3 Starter Kit Board	58
Fig. 3.15. Tarjeta de adquisición de datos DAS1612	59
Fig. 3.16. Conector Jack DB25	59
Fig. 3.17. Conector JP5	60
Fig. 3.18. Tren de configuración para el convertidor en el sistema DAS	61
Fig. 3.19. Transistores encargados de la conmutación en el multiplexor.....	62
Fig. 3.20. Tarjeta USB acoplada a la plataforma FPGA	63
Fig. 3.21. Transferencia de datos mediante el protocolo USB	64
Fig. 3.22. Sensor usado para la medición de corriente	64
Fig. 3.23. Sistema de acondicionamiento acoplado al sensor de efecto Hall	65
Fig. 3.24. Respuesta del sensor ante una carga resistiva	65
Fig. 3.25. Sistema completo de adquisición de señales.....	66
Fig. 3.26. Interfaz de usuario.....	68
Fig. 3.27. Resistencia de agua usada como carga resistiva	70
Fig. 3.28. Carga usada para la generación de armónicos	71
Fig. 4.1. Mediciones hechas sobre señales constantes	73
Fig. 4.2. Amplificación de una señal convencional sobre una ganancia de 10	74
Fig. 4.3. Reducción de una señal bajo una ganancia de 0.68	74
Fig. 4.4. Comparativa entre la señal original y la señal acondicionada	76
Fig. 4.5. Comparativa de frecuencia entre las dos señales medidas.....	76
Fig. 4.6. Influencia de un horno de microondas en la red eléctrica.....	78
Fig. 4.7. Prueba durante el arranque del horno de microondas	78
Fig. 4.8. Frecuencia fundamental y armónicos detectados durante el arranque de la maquina eléctrica.....	79

Fig. 7.1. Interfaz de usuario.....	85
Fig. 7.2. Sistema de activación manual o automático	86
Fig. 7.3. a) Ventana indicativa de error de conexión b) Ventana indicativa de conexión exitosa.....	86
Fig. 7.4. Índice para indicación de conexión.....	87
Fig. 7.5. Leds usados para la identificación del proceso	88
Fig. 7.6. Botoneras usadas para activar el proceso de forma secuencial.....	89
Fig. 7.7. Puerto de expansión usado para la conexión de la DAS	90
Fig. 7.8. Sistema de acondicionamiento en hardware	90

Índice de tablas

Tabla 3.1. Valores usados en el sistema de selección automática	50
Tabla 3.2. Pines de configuración para el conector JP5	60
Tabla 4.1. Valores de las medidas realizadas a una tensión eléctrica constante	73
Tabla 4.2. Comparación entre las señales originales y después de su acondicionamiento	75
Tabla 4.3. Mediciones realizadas sobre la carga resistiva	77
Tabla 4.4. Mediciones realizadas sobre cargas no lineales	79
Tabla 7.1. Descripción para cada combinación de leds.....	88
Tabla 7.2. Función específica para cada botón en la FPGA.....	89
Tabla 7.3. Conexión entre el sistema de acondicionamiento y la FPGA	91

1. Introducción

Hoy en día, el monitoreo de la calidad de la energía ha llamado la atención de un buen número de investigadores debido a la gran variedad y cantidad de disturbios eléctricos que se encuentran presentes en las líneas eléctricas, así como a la susceptibilidad de los diferentes equipos eléctricos a este tipo de perturbaciones. El monitoreo de los sistemas eléctricos implica la supervisión de la tensión real de formas de onda de corriente y voltaje, así como la detección de las perturbaciones que se producen en el sistema durante el seguimiento del mismo. Cualquier desviación en la tensión y de las características de las condiciones simétricas, sinusoidales y de frecuencia nominal en el sistema eléctrico se conoce como anomalías de la calidad de la energía (PQ). Los problemas de la PQ están ampliamente presentes en las redes eléctricas debido a varias causas como la presencia de cargas no lineales en el sistema eléctrico, descargas atmosféricas, arranque de motores etc., donde las mediciones orientadas a evaluar las causas de las distorsiones de tensión actuales son cada vez más importantes para poder cuantificar la degradación del sistema, así como para poder tomar decisiones de corrección y control para la mitigación y compensación de las imperfecciones que afectan a la PQ en la señal eléctrica.

El monitoreo de la calidad de la energía eléctrica ha sido una tarea demandada tanto por el proveedor del servicio eléctrico, como por los consumidores finales, ya sea dentro del sector privado, comercial y/o industrial. Esto se debe principalmente a que una mala calidad en el sistema eléctrico, afecta directamente los costos de producción y consumo, ya sean por el propio insumo del servicio o por los daños que pueden sufrir los equipos y/o los productos que se estén realizando. La calidad de la energía eléctrica se ve afectada por anomalías o perturbaciones en la línea eléctrica, llamados disturbios eléctricos, los cuales pueden provenir de la línea de suministro, de otras cargas conectadas a la línea e incluso de la misma carga, donde la diversidad de los disturbios eléctricos y la facilidad con la que pueden generarse y aparecer de forma intermitente y/o simultánea dificulta en gran medida su monitoreo.

En este trabajo se desarrolla un sistema de adquisición y monitoreo de señales aplicado directamente a la desratización y análisis de señales eléctricas. Para lo cual se pretende utilizar algunas técnicas espectrales para el monitoreo, así como la aplicación de la teoría del muestreo para la adquisición de datos, el acondicionamiento de la señal y el uso diverso de sensores especializados en la detección de señales eléctricas; los cuales servirán para cuantificar diversos parámetros de las señales detectadas, entre ellos el voltaje, la corriente y la potencia aparente.

1.1. Antecedentes

Los trabajos involucrados en el monitoreo y la adquisición de señales, principalmente en el área de ingeniería eléctrica, han tenido una gran aceptación con respecto a diferentes metodologías utilizadas para la implementación y uso en aplicaciones de la calidad de la energía. En este sentido, se trabaja de manera independiente la parte de la adquisición de datos y la parte de monitoreo de la señal, sin trabajar en la complementación y la interconexión entre ambos conjuntos. La aplicación directa y el enfoque de estos sistemas también varían en función de la aplicación del sistema, haciendo que el uso de cada una de las técnicas y metodologías de adquisición y monitoreo no puedan ser adaptables a los sistemas de forma general. El diseño, desarrollo e implementación de las metodologías para la evaluación de la calidad de la energía es la etapa más importante en el monitoreo de señales eléctricas, ya que consiste en el desarrollo de las metodologías basadas en numerosas técnicas de procesamiento espectral y algoritmos inteligentes, enfocándose principalmente en la detección y clasificación de disturbios eléctricos. Una vez desarrollada la metodología, se realiza la parte de implementación para su integración en el desarrollo de sistemas de monitoreo de la calidad de la energía.

En las siguientes secciones se presenta un análisis de trabajos que proponen diferentes metodologías y sistemas de monitoreo, abarcando la detección y clasificación de disturbios eléctricos, así como el monitoreo de las variables y parámetros eléctricos relacionados a calidad de la energía.

1.1.1. Calidad de la energía eléctrica

La calidad de la energía eléctrica es el término que relaciona las características óptimas de la señal del suministro de voltaje y corriente consumidos por la carga de forma lineal o no lineal. Esta calidad está referida a una onda senoidal ideal compuesta por una

sola componente fundamental, de amplitud constante y sin desviaciones en frecuencia (Bollen, 2006). Hay estándares que establecen índices sobre parámetros eléctricos acorde a las formas de onda de las señales de corriente y voltaje con los cuales se puede estimar perfectamente la calidad de la energía eléctrica. Estos índices sirven para cuantificar y diagnosticar disturbios eléctricos sobre el contenido armónico, desequilibrio de tensión entre fases, cambios rápidos de tensión, severidad de parpadeos (Flickers), caídas y elevaciones de tensión (sags y swells, respectivamente), interrupciones, transitorios, etc. La correcta clasificación de los tipos de disturbios eléctricos, definidos por los estándares IEEE 1159 (1995) y EN 50160 (2002), ha incrementado la investigación y desarrollo de distintas metodologías que permitan la clasificación de forma automática, sobre todo en procesos donde la cantidad de datos y parámetros a analizar son demasiados.

Las soluciones identificadas hasta ahora acerca del monitoreo de la calidad de la energía son: artículos reportados en congresos internacionales, revistas indexadas, así como instrumentos disponibles en el mercado entre otros. Estos últimos presentan la principal desventaja de no contar con procesamiento para análisis de fenómenos no estacionarios, arquitecturas cerradas y un alto costo. Por otro lado, las metodologías propuestas a la fecha para monitorear disturbios eléctricos, realizan un pre-procesamiento mediante transformaciones tiempo-frecuencia para extraer características únicas de la señal y así poder clasificar el tipo de disturbio mediante técnicas de análisis espectral y de inteligencia artificial, la mayoría de estas metodologías están desarrolladas en software y muy pocas han sido implementadas en hardware. El diseño y uso de cada una de estas metodologías es diferente, la elección de la mejor técnica de clasificación depende de las características proporcionadas por el pre-procesamiento, algunas de estas características son: valores máximos y mínimos de la señal, componentes principales, ángulo de fase, coeficientes de wavelets, la energía de coeficientes wavelets, número de oscilaciones en las variaciones de voltaje, etc.

1.1.2. Técnicas y metodologías de monitoreo de disturbios eléctricos

Los trabajos involucrados en el monitoreo y la adquisición de señales, principalmente en el área ingeniería eléctrica, han tenido un gran número de artículos e investigaciones enfocados a diferentes metodologías usadas para su implementación y uso.

Muchas veces en este tipo de proyectos se trabaja de manera independiente la parte de la adquisición de datos y la parte de monitoreo, sin trabajar en la complementación y la interconexión entre ambos conjuntos. La aplicación directa y el enfoque de estos sistemas también varían en función de la aplicación del sistema, haciendo que el uso de cada una de las técnicas y metodologías de adquisición y monitoreo no puedan ser adaptables a los sistemas de forma general.

Internacionalmente se han publicado múltiples artículos en relación a la adquisición de datos y al monitoreo enfocados a las señales eléctricas. Esto debido al enorme campo de investigación que presenta el estudio de las señales eléctricas y sus campos de aplicación, siendo estos sistemas eléctricos de potencia, cuantificación de algunos parámetros para la calidad de la energía eléctrica, entre otros. Uno de los principales enfoques en estos artículos es el desarrollo de diversas metodologías para el procesamiento de la información recopilada de las señales eléctricas, con fin de monitorear y cuantificar la calidad de la energía. Granados-Lieberman et al (2011) describen varias técnicas y metodologías desarrolladas para el análisis de la calidad de la energía, tanto en sistemas de distribución como de transmisión, proporcionando una clasificación de los disturbios de potencia utilizando algoritmos para la clasificación automática del disturbio eléctrico que ocurre en los sistemas eléctricos de potencia. Sin embargo, en este trabajo no se desarrolla un sistema de adquisición y monitoreo de las señales, haciendo imposible la optimización de los recursos y el tiempo de realización del trabajo. Por otra parte, Catterson et al (2011) presentaron el diseño y la implementación de un sistema en línea para el monitoreo de armónicos en los cables de distribución eléctrica, el cual está basado en el método de las descargas parciales (método del seguimiento en la progresión de fallo y la degradación de sistemas aislados). Para la adquisición de datos Chen (2003) revisó los requerimientos necesarios para una adecuada instrumentación enfocándose principalmente en el método de muestreo y los procesos de digitalización, todo esto aplicado a la medición anomalías en sistemas eléctricos (calidad de la energía); donde se especifica la importancia que tiene la selección de un adecuado sistema de adquisición de datos para la exactitud y precisión de las mediciones.

A nivel nacional, se han llevado a cabo un gran número de trabajos concernientes al análisis y monitoreo de las señales eléctricas, aplicados principalmente a la reducción de costos, control y monitoreo para la energía eléctrica. Espinoza (2007) desarrolló un sistema de medición remota de energía eléctrica utilizando medidores electromecánicos antiguos de

la CFE (Comisión Federal de Energía) para medir la energía eléctrica en zonas urbanas. Para ello, diseñó una tarjeta de adquisición de datos exclusiva para convertir los giros del medidor electromecánico en valores digitales. La temática principal del proyecto se basa en la optimización de las lecturas de energía eléctrica aplicada únicamente a los medidores electromecánicos proporcionados por CFE. Así mismo Abonza (2008) desarrolló un sistema de adquisición de datos, control y supervisión encargado de la administración del consumo de energía eléctrica en una empresa, proponiendo la arquitectura y las especificaciones para el sistema descrito. Sin embargo, en la etapa de adquisición de señales propone una integración de un sistema previo ya antes usado, con las etapas de control y supervisión, por lo que no hay un desarrollo por parte de la etapa de adquisición.

Dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro se han desarrollado proyectos donde la adquisición y el monitoreo de señales son parte esencial de los mismos, tal es el caso del presentado por Balseca (2012), quien desarrolló un sistema de monitoreo de la calidad de la energía en un torno reconvertido a una CNC dentro del laboratorio de manufactura de la universidad. Con este sistema es posible adquirir señales eléctricas en la fuente de alimentación del torno, con fin de analizar los efectos provocados por la máquina de herramientas cuando comienza su ciclo de trabajo, realizando el procesamiento de señales sobre una interfaz gráfica de Usuario (GUI por sus siglas en inglés) desarrollada en MATLAB. Por otro lado, Mejía (2013) desarrolló un trabajo para la integración de una interfaz Ethernet a un sistema de monitoreo de la energía basado en FPGA, el cual servía como protocolo de comunicación para la transferencia de datos entre estos dos sistemas. Otros trabajos en la universidad han desarrollado sistemas de medición y monitoreo de bajo costo para mejorar el rendimiento de la energía eléctrica. Tal es el caso de Trejo (2005), cuyo trabajo consiste en el uso de un analizador computarizado usado para la reducción de consumo y aumentar la eficiencia de la calidad eléctrica utilizando una PC, equipada con una tarjeta de adquisición de datos, como un analizador y registrador de potencias, voltajes y corrientes eléctricas, el cual sirve como sistema de monitoreo particular.

Pese a los múltiples proyectos e investigaciones hechos hasta ahora, se ha contemplado la necesidad de integrar un sistema en donde se puedan adquirir señales eléctricas y procesarlas en datos discretos. Muchos de los trabajos anteriormente mencionados basan su enfoque en la realización de alguna metodología para la discretización de datos y el monitoreo de sistemas de forma particular, complicando en

forma las investigaciones que requieren de un sistema de adquisición y monitoreo por el solo hecho de no ser un sistema bien definido para la detección y el monitoreo de señales. Esta desventaja hace que en cada trabajo se elabore una metodología para la adquisición y el monitoreo de señales diferente para cada sistema, es vez de usar un sistema general para la adquisición de dichas señales eléctricas, siendo este la propuesta del presente trabajo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Mejorar la eficiencia del convertidor ADC del sistema de adquisición de datos DAS de la UAQ por medio del ajuste automático de ganancias de corriente en el sistema de acondicionamiento de la señal aplicado al monitoreo de la calidad de la energía.

1.2.2. Objetivos particulares

1. Desarrollar e implementar un sistema dinámico de ajuste de ganancia de corriente analógico usando un multiplexor analógico para la manipulación de la amplitud de las señales eléctricas de entrada.
2. Desarrollar el sistema de control digital basado en tecnología FPGA para el control del ajuste dinámico de ganancias en la etapa de acondicionamiento de corriente.
3. Rediseñar la tarjeta de acondicionamiento por medio de la integración del sistema de ajuste de ganancias de corriente para poder ser controlado mediante la FPGA.
4. Implementar el prototipo del sistema de acondicionamiento propuesto en base al diseño ya establecido con el fin de poder acondicionar las señales de entrada.
5. Realizar pruebas para la validación del proyecto por medio de los algoritmos de cuantificación de los índices de PQ desarrollados en la UAQ, como los utilizados por Mejía (2013).

1.3. Descripción del problema

Son muy pocos los proyectos que se enfocan en la estructuración y el diseño de sistemas en hardware para la adquisición de señales y monitoreo. La mayoría de proyectos relacionados con el tema tienen como objetivo el desarrollo de metodologías para la adquisición de señales en general, dejando a un lado el desarrollo en hardware del sistema. Este enfoque ofrece una gran cantidad de desventajas en la elaboración de nuevos proyectos, cuyos objetivos tengas que ver con el monitoreo y la adquisición de señales. Esto debido al consumo de tiempo en la planeación y elaboración del proyecto, el cual se podría ahorrar si se tuviese previamente un sistema en hardware. Esto también compromete al proyecto en cuanto a la necesidad de un sistema versátil y sencillo, para que pueda ser visto como una etapa de integración, en vez de ser una etapa de desarrollo. Para el caso del desarrollo de proyectos complejos de control, son indispensables tanto la etapa de adquisición como la de clasificación de disturbios eléctricos, tal como se ve en la Fig. 1.1.

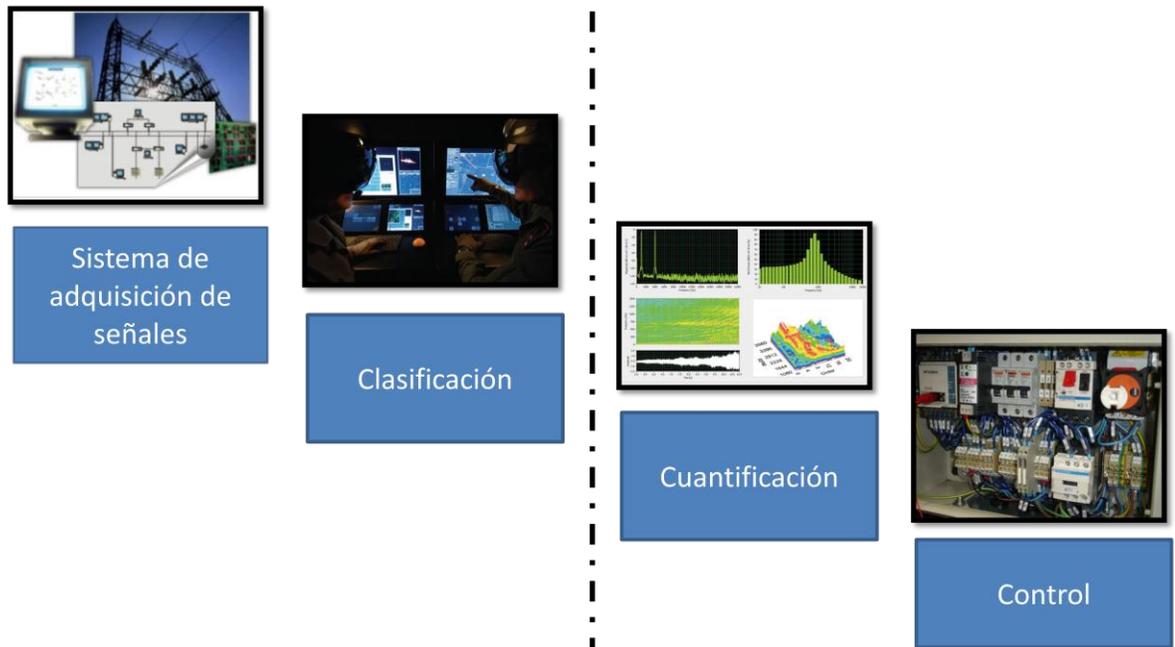


Fig. 1.1. Diagrama a bloques de la descripción del problema

Siendo así, queda clara la necesidad de un sistema que cumpla como una etapa complementaria para la adquisición de señales, el cual pueda ser usado en proyectos

relacionados con la toma de muestras en variables físicas, si es necesario, de forma simultánea, lo cual hace de este un sistema general para el monitoreo.

1.4. Justificación

Dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro se han desarrollado varios proyectos a nivel licenciatura y posgrado, concernientes al análisis de señales eléctricas enfocado principalmente al estudio de los efectos causados por cargas en la red eléctrica, la mayoría cargas no lineales. Esto ha tenido repercusiones directas con el estudio de la calidad de la energía, cuyo enfoque recae en el estudio de las características principales que poseen las señales eléctricas, principalmente en la detección de anomalías tanto en la frecuencia como en la amplitud de dichas señales. Sin embargo, al estudiar magnitudes tales como la corriente y la tensión eléctrica, en la mayoría de dichos trabajos se han tenido que ver en la necesidad de usar sensores sofisticados para la medición de dichos parámetros, los cuales llegan a tener amplitudes pequeñas comparadas con la señal original, así como la presencia de ruido en la señal provocada por los mismos sensores e inclusive por los mismos sistemas de adquisición, afectando directamente al análisis cuantitativo de los índices de la calidad de la energía. De modo contrario, si una señal eléctrica a medir es más grande que el rango de operación del sensor o el sistema de adquisición puede tolerar, estos podrían dañarse durante el proceso de adquisición, inutilizando la posibilidad de análisis.

Debido a esto, se desarrollará un sistema de adquisición de señales capaz de ajustar la amplitud de una señal eléctrica medida por un sensor de forma automática. El sistema, al no ser una plataforma comercial de arquitectura cerrada, podrá ser capaz de filtrar y acondicionar una señal eléctrica de tal forma que los datos que sean medidos puedan ser analizados con una mayor exactitud, sin la necesidad de comprometer la integridad del sistema.

Con dicho sistema de acondicionamiento, la señal medida tendrá la amplitud adecuada de acuerdo al convertidor usado, además de filtrar el ruido natural que proporciona el sensor y aumentar la exactitud y la precisión en cada adquisición que realice con dicho sistema.

1.5. Planteamiento general

En el siguiente diagrama se describe de forma general el proceso de adquisición de señales, desde la etapa en hardware hasta el monitoreo del sistema. De forma general, una señal eléctrica a cualquier nivel de tensión eléctrica es adquirida por diferentes sensores para registrar su valor en corriente y voltaje. Ambas señales, en corriente y voltaje, entran en una etapa de acondicionamiento. En dicha etapa, las señales son ajustadas en amplitud con fin de poder analizarlas de una forma más efectiva. Dentro de este acondicionamiento, también existe una etapa de filtrado, cuyo objetivo es eliminar posibles señales de alta frecuencia que llegasen a existir en la forma de onda fundamental eléctrica, este tipo de señales parasitas de alta frecuencia por lo general es identificadas como ruido.

Tras pasar por la etapa de acondicionamiento, la señal es discretizada y posteriormente analizada en un ordenador, para finalmente ser monitoreada en un software. La Fig. 1.2 muestra el diagrama de flujo del proyecto a través de un diagrama a bloques.

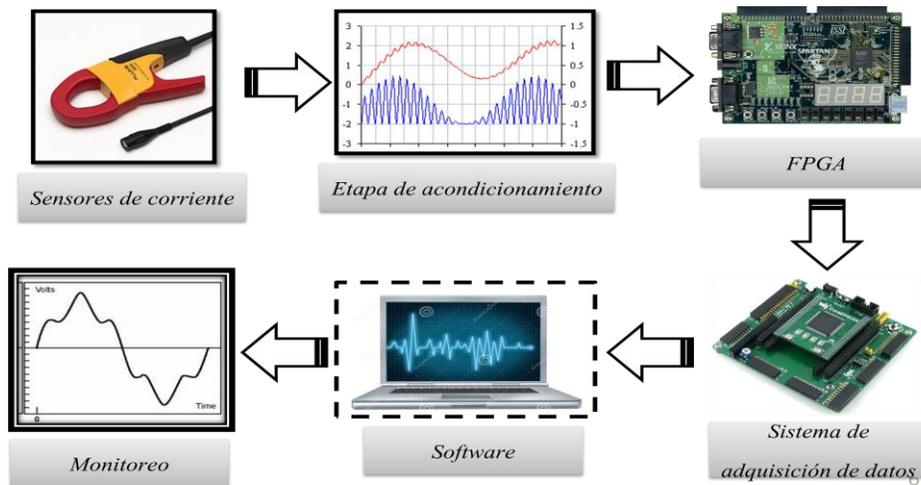


Fig.1.2. Diagrama a bloques en general del sistema de monitoreo

2. Estado del Arte

2.1. Introducción

Para lograr comprender las bases que sustentan este trabajo, en este capítulo se revisan los fundamentos teóricos que involucran el desarrollo del sistema de adquisición de datos y el monitoreo de las señales eléctricas. Se presenta la fundamentación teórica de los principales métodos de procesamiento para la detección de señales eléctricas, transformaciones en el dominio de la frecuencia, acondicionamiento de señales (amplificación y filtrado de señales), teoría de sensores, características de señales eléctricas y los principales tipos de anomalías en señales eléctricas empezando con una descripción de los sistemas eléctricos y la necesidad de la adquisición de las señales para el monitoreo de las mismas.

2.2. Sistemas eléctricos y la necesidad del monitoreo en señales eléctricas

En la actualidad, existen muchos sectores, los cuales tienen una dependencia casi absoluta de la energía eléctrica. Para poder satisfacer la demanda generada por estos sectores, es necesario disponer de un sistema eléctrico lo suficientemente robusto para que este no colapse al tratar de satisfacer las necesidades eléctricas diarias. Este tipo de sistema comprende de varias etapas desde la generación de energía eléctrica, hasta la etapa de consumo. Dichas etapas son las siguientes:

- ❖ Generación de energía eléctrica
- ❖ Transmisión de energía eléctrica
- ❖ Distribución de energía eléctrica

Por lo general la potencia total absorbida por los clientes de una compañía de electricidad grande fluctúa entre amplios límites, dependiendo de varios factores, como la estación del año o la hora del día. En la figura 2.1 se muestra como varía la demanda de

potencia de un sistema eléctrico durante un día normal en verano contra un día normal de invierno (Wildi, 2007).

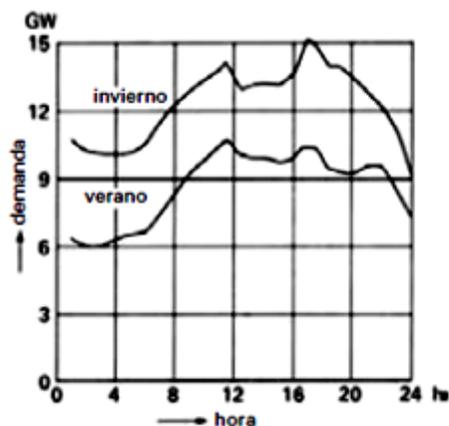


Fig. 2.1. Curva de demanda de un sistema durante un día de verano y un día de invierno (Wildi, 2007)

Al observar el comportamiento del consumo de potencia se puede concluir que, durante los días de invierno se consume más energía eléctrica con respecto a los días de verano, lo que hace que el consumo de potencia sea diferente a lo largo del año. Esto provoca varios conflictos importantes a la hora de generar energía, principalmente porque únicamente se genera la energía que se demanda, ya que resulta imposible almacenarla.

Debido a la variación que existe entre la demanda y el consumo de energía eléctrica, los elementos de los sistemas eléctricos de potencia deben ser capaces de responder a los cambios existentes en la relación de demanda y consumo. Al alterarse dicha relación, la forma de onda fundamental que tiene la energía eléctrica puede llegar a alterarse, modificando la frecuencia y la amplitud de la misma.

Conservar esta relación intacta es lo que proporciona que la energía tenga altos estándares de calidad. Sin embargo, para poder llevar a cabo esta labor es importante interconectar todos los elementos del sistema eléctrico de potencia de manera que exista una retroalimentación de información, y con ello poder llevar a cabo ajustes en la velocidad de la turbina y en el flujo de agua en la entrada de la misma.

Aquí es donde se recalca la importancia de poder retroalimentar y monitorear la información que existe en un sistema eléctrico. Las acciones de control dependen en gran

medida de la capacidad de adquirir señales y posteriormente analizarlas. Todo esto para mantener una relación estable entre la energía generada y la consumida, la cual idealmente debe contener parámetros constantes en amplitud y frecuencia.

2.3. Señales eléctricas

Una señal eléctrica se puede definir como una magnitud eléctrica cuya intensidad varía a través del tiempo. En este caso, una señal eléctrica por lo general posee dos magnitudes que varían en el tiempo, voltaje y corriente. Estos valores pueden poseer valores de amplitud y frecuencia iguales o diferentes, dependiendo de la carga que se les llegue a aplicar. Si se trata de una carga capacitiva inductiva, por lo general se genera un desfase entre la señal de corriente con respecto a la de voltaje (Wildi, 2007).

2.3.1. Características de las Señales eléctricas

Generalmente las señales eléctricas se pueden clasificar de dos formas, dependiendo de su variación con el tiempo:

- Corriente alterna
- Corriente directa

Las señales que varían en el tiempo se les consideran de corriente alterna, mientras que las que permanecen constantes son llamadas de corriente directa. Las señales eléctricas en corriente alterna poseen una forma sinusoidal, la cual presenta una amplitud y frecuencia específica. Algunas otras características que deben cumplir este tipo de señales son las siguientes:

Amplitud de pico (V_p): es considerado como el valor máximo que tiene una señal, considerada desde el valor cero.

Amplitud pico a pico (V_{pp}): es la diferencia entre el máximo y el mínimo valor de una señal.

Valor eficaz (V_{rms}): se le considera el valor equivalente al de una señal continua constante capaz de desarrollar la misma potencia que la señal periódica.

Valor medio (V_m): es el promedio de todos los valores de una señal tomados en un ciclo. En el caso de señales periódicas simétricas, el valor medio es nulo.

Algunas de estas características se muestran en la Figura 2.2.

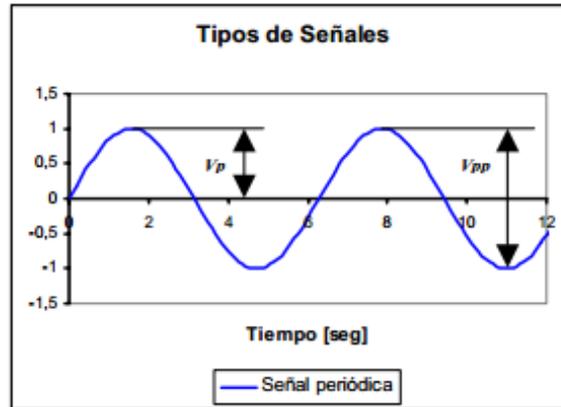


Fig. 2.2. Principales características de una señal eléctrica (Wildi, 2007)

Otra característica importante en una señal eléctrica es el desfase entre señales. Este se define como la diferencia angular que existe entre una señal con respecto de otra. A este corrimiento se le denomina ángulo de desfase. Este fenómeno se puede apreciar en la Figura 2.3.

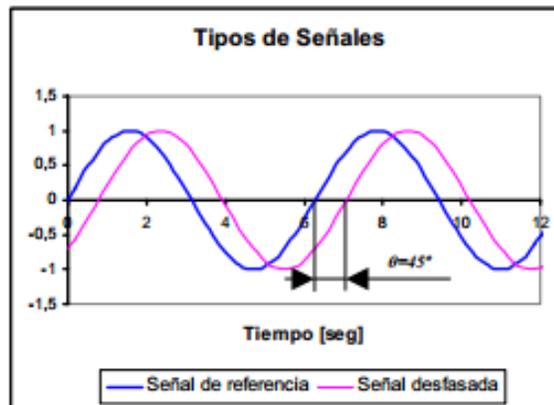


Fig. 2.3. Desfase entre señales (Wildi, 2007)

De este modo es como la IEEE 1159 1995 ha clasificado todos los tipos de disturbios en las siguientes siete categorías:

- ❖ Transitorios
- ❖ Variaciones de larga duración
- ❖ Variaciones de corta duración
- ❖ Voltajes desbalanceados
- ❖ Fluctuaciones de voltaje
- ❖ Variaciones de potencia en frecuencia
- ❖ Distorsión en la forma de onda

2.3.2. Anomalías en las Señales eléctricas

Para poder entender y analizar mejor los tipos de perturbaciones que existen, estos se clasificarán en dos tipos; eventos y variaciones (Wildi, 2007).

2.3.2.1. Variaciones

Los principales tipos de variaciones que existen actualmente son los siguientes:

Variaciones en la frecuencia del voltaje

Como es bien sabido, la energía eléctrica es un recurso usado continuamente en todo el mundo. Sin embargo, una de sus grandes desventajas radica en que es imposible almacenar grandes cantidades de energía por mucho tiempo, por lo que es necesario generar la energía requerida dependiendo del consumo diario. Este es un problema, debido a que es necesario establecer un balance entre la generación y el consumo de energía. De no guardar este equilibrio, la frecuencia nominal a la que la energía es distribuida puede variar abruptamente, provocando variaciones en la frecuencia nominal (regularmente de 50 o 60 Hz).

Algunos de los problemas relacionados con la variación de la frecuencia son los siguientes:

- Desviación en el tiempo de relojes
- Variaciones en la velocidad de los motores
- Variaciones en el flujo
- Riesgo de baja frecuencia de disparo
- Tasas de cambio en la frecuencia

Variaciones en la magnitud del voltaje

Así como ocurre con la frecuencia, la magnitud del voltaje en la energía eléctrica también puede variar, y así como en la variación de la frecuencia, estos cambios en la amplitud del voltaje pueden provocar daños tanto en el desempeño como con la vida útil de los equipos. Algunos de estos daños son los siguientes:

- ❖ Incremento de riesgo en el aislamiento de los equipos.
- ❖ Mal desempeño en motores debido a la inducción.
- ❖ Reducción de la vida útil en lámparas incandescentes y fluorescentes
- ❖ Calentamiento en dispositivos debido al aumento de potencia.
- ❖ Pérdida de eficiencia en equipos electrónicos debido a caídas de voltaje.
- ❖ Incremento en la distorsión de la forma sinusoidal en las terminales de los transformadores.

Fluctuaciones de voltaje y parpadeos

Una fluctuación de voltaje ocurre, de nueva cuenta, cuando existen variaciones en la magnitud del voltaje, pero a grandes velocidades. Dichas fluctuaciones son provocadas mayoritariamente a la variación de cargas eléctricas. Sin embargo, este tipo de perturbaciones se diferencia de las variaciones comunes de voltaje debido al tipo de cargas que son continuamente conectadas y desconectadas (Wildi, 2007).

Por otro lado, los llamados parpadeos son una consecuencia directa de las fluctuaciones. Estos pueden ser definidos como variaciones repetitivas de voltaje de forma repetitiva y continua. Por lo general este fenómeno se puede ver reflejado en el parpadeo de lámparas incandescentes, el cual puede ser visto a simple vista.

Algunos de los equipos responsables de este tipo de perturbaciones son los siguientes:

- ❖ Horno de arco eléctrico
- ❖ Soldadura de arco eléctrico y por resistencia
- ❖ Turbinas de viento
- ❖ Fotocopiadora
- ❖ Refrigerador

Este tipo de equipos se caracterizan por ser cargas eléctricas cuya corriente cambia continuamente, y algunos de estos efectos se pueden visualizar en la Figura 2.4.

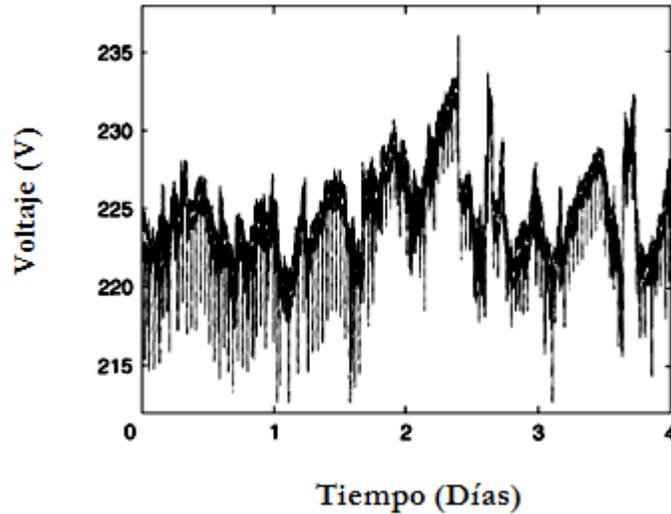


Fig. 2.4. Fluctuaciones de voltaje debido a los constantes encendidos de un refrigerador (Wildi, 2007)

Distorsión de forma de onda

Este tipo de perturbación se puede entender como la descomposición de la forma de onda ideal que generalmente posee la red eléctrica. Sin embargo, par a este caso en específico, existen dos tipos diferentes de distorsión de forma de onda, ya que este fenómeno ocurre tanto en corriente como el voltaje. La principal diferencia radica en las consecuencias provocadas por cada señal, mientras que la distorsión de voltaje afecta a los equipos, la distorsión en corriente afecta a los componentes de la red eléctrica (Wildi, 2007).

Algunas de las consecuencias de este tipo de perturbación son las siguientes:

- ❖ Sobrecalentamiento en transformadores
- ❖ Problemas con capacitores,
- ❖ Mal funcionamiento con equipo electrónico
- ❖ Incremento en la velocidad de los relojes digitales
- ❖ Sobrecalentamiento en conductores neutros

Pese a que este tipo de perturbaciones está íntimamente relacionado con las variaciones de amplitud y frecuencia, no son consideradas del mismo tipo. Algunos de estos tipos de perturbaciones son los siguientes:

- ❖ Distorsión armónica
- ❖ Distorsión inter-armónica
- ❖ Distorsión de onda no periódica

Este tema se volverá a retomar más adelante.

2.3.2.2. Eventos

Los principales eventos que existen actualmente son los siguientes:

Caídas de tensión de corta duración

Este tipo de perturbaciones se dan cuando existen “huecos en el voltaje”, de ahí su nombre (Wildi, 2007). En otras palabras, es una reducción en el voltaje RMS en un tiempo corto, tal y como muestra la Figura 2.5.

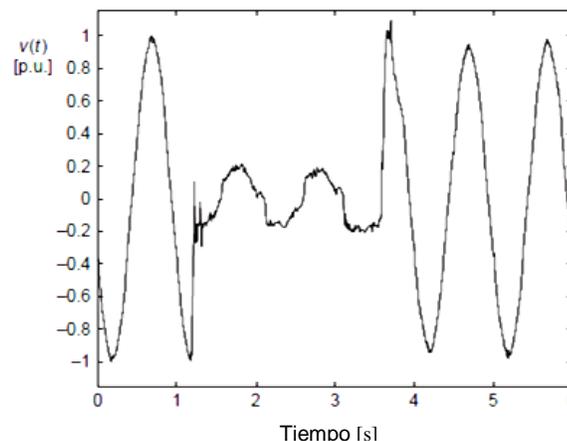


Fig. 2.5. Caída de tensión de baja duración provocado por un fallo en una fase (Wildi, 2007)

Existen múltiples problemas causados por este tipo de perturbaciones, los cuales generalmente afectan a muchos tipos de equipos, entre ellos el apagado de los equipos. Este problema afecta directamente a las industrias, debido a que muchos equipos requieren de mucho tiempo para poder ser restaurados. Algunos de los equipos más afectados son los siguientes:

- ❖ Computadoras
- ❖ Controladores Lógicos Programables (PLC)
- ❖ Variadores de velocidad
- ❖ Contactores
- ❖ Motores de inducción con conexión directa

Incremento de tensión de corta duración

Los incrementos de tensión eléctrica de corta duración se traduce como un incremento repentino en el voltaje RMS, generalmente entre un 110% y un 180% de su valor nominal, seguido por un voltaje de recuperación después de un corto periodo de tiempo (Caramia et al, 2009). Normalmente la duración de este disturbio dura alrededor de entre 10 ms y un minuto. La Figura 2.6 muestra una representación típica de este fenómeno en un tiempo corto de tiempo.

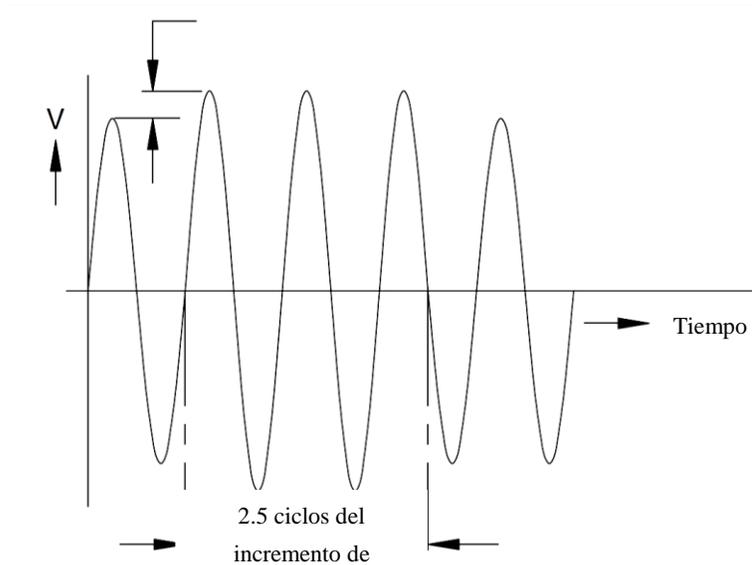


Fig. 2.6. Representación grafica de un incremento de tensión de baja duración (Wildi, 2007)

Cambios rápidos de voltaje

Esta perturbación se define como una rápida transición en el voltaje RMS entre dos estados estacionarios continuos. Se puede definir este fenómeno como un estado intermedio entre una caída de tensión y un incremento de tensión de baja duración, en donde su valor de voltaje generalmente varía entre el 90% y el 110%.

Sobrevoltajes transitorios

Se define como un sobrevoltaje oscilatorio o no oscilatorio el cual tiene una duración muy corta. Generalmente este tipo de sobrevoltajes tiene un amortiguamiento significativo, con una duración de unos pocos milisegundos o menos.

Este fenómeno se puede apreciar gráficamente como picos que distorsionan la forma de onda que posee el voltaje, tal y como se muestra en la Figura 2.7. Dichos picos pueden oscilar positiva o negativamente respecto a la forma de onda del voltaje.

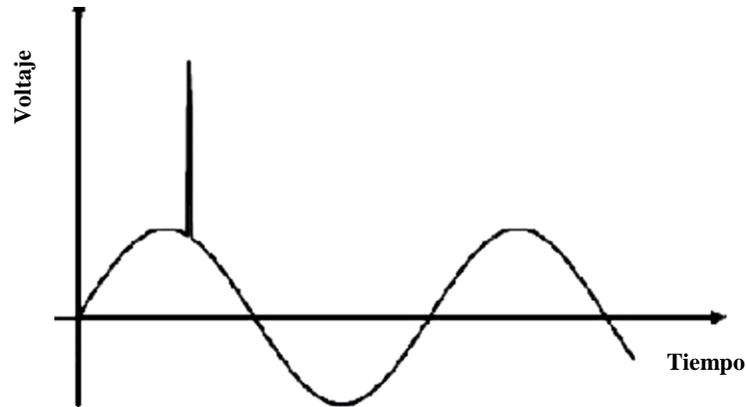


Fig. 2.7. Sobrevoltaje transitorio sobre una forma de onda senoidal de voltaje (Wildi, 2007)

2.3.2.3. Armónicos

De acuerdo con Balseca (2012), los armónicos pueden ser definidos como señales de corriente o voltaje, cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia nominal fundamental. Estas señales armónicas, por lo general, se suman a la señal de voltaje o corriente fundamental, alterando su forma. A esto se le conoce como distorsión armónica.

Dependiendo del número de armónicos creados, la señal se verá más afectada y por ende, se volverá más distorsionada. La Figura 2.8 muestra el efecto que poseen los armónicos sobre una señal sinusoidal, los cuales se suman a la forma de onda fundamental, distorsionándola.

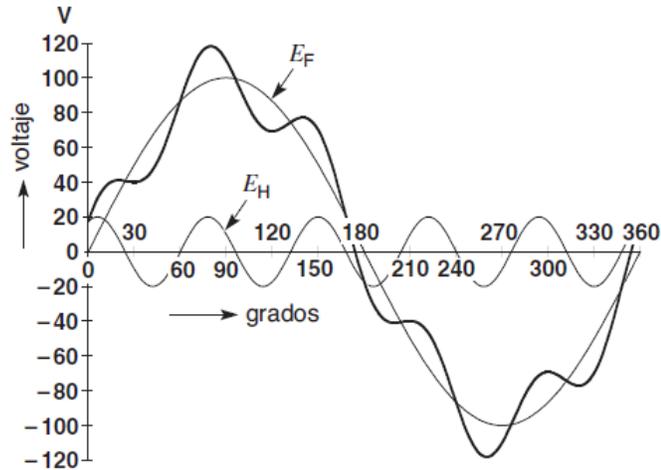


Fig. 2.8. Efecto de los armónicos en una señal fundamental (Wildi, 2007)

Existen diferentes tipos de distorsiones armónicas, las cuales se distinguen principalmente por la forma de onda resultante, su frecuencia y su forma de oscilación.

Distorsión armónica

Esta distorsión aparece cuando la forma de onda en corriente o voltaje no es sinusoidal pero es periódica, cuyo periodo es igual al de la forma de onda fundamental. Dicha distorsión puede ser representada por la suma infinita de sus armónicos de acuerdo a la ecuación 2.1.

$$i(t) = I_0 + \sum_{i=1}^n I_i \sqrt{2} \cos(i\omega t - \beta_i) \quad (2.1)$$

Para el caso del voltaje, la ecuación que describe su forma de onda queda siendo de la misma manera que la ecuación anterior, pero desde el punto de vista del voltaje. Esta ecuación queda expresada en la ecuación 2.2.

$$v(t) = V_0 + \sum_{i=1}^n V_i \sqrt{2} \cos(i\omega t - \alpha_i) \quad (2.2)$$

Distorsión interarmónica

En este tipo de perturbación la forma de onda de corriente y voltaje contienen componentes armónicos que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la señal eléctrica nominal. Para una señal de voltaje con una sola componente interarmónica y con una frecuencia ξf_0 , la ecuación que describe su comportamiento se puede visualizar en la ecuación 2.3:

$$v(t) = V_0(t) + \sum_{i=1}^n V_i \sqrt{2} \cos(i\omega t - \alpha_i) + V_\xi \sqrt{2} \cos(i\omega t - \alpha_i) \quad (2.3)$$

Distorsión no periódica

Aunque la principal característica que poseen las señales con alguna distorsión es la periodicidad, resulta que algunas señales no poseen esta propiedad en absoluto. Algunos autores y artículos refieren este fenómeno como un estado entre un comportamiento caótico y ruido, que no posee alguna expresión matemática que pueda definirlo. De hecho, la presencia de este tipo de disturbios son los que hacen complicado calcular los índices o características de la calidad de la energía, por lo que han surgido muchas investigaciones en base a esto para crear algoritmos más eficientes.

2.3.3. Cuantificación de las anomalías de las señales eléctricas

Para poder cuantificar la calidad de la energía, usualmente se usan parámetros o índices que son capaces de determinar qué tanta presencia tienen ciertos disturbios dentro de la señal fundamental de la energía eléctrica. La manera de obtener dichos índices depende enteramente de lo que se esté buscando y los instrumentos que se usen para medirlos (Wildi, 2007).

Existen principalmente dos tipos de índices que ayudan a cuantificar los disturbios en base a diferentes las características que posee una señal eléctrica. Dichas vertientes son las siguientes:

- Parámetros en el dominio del tiempo
- Parámetros en dominio de la frecuencia

2.3.3.1. Parámetros en el dominio del tiempo

Los índices o parámetros pertenecientes al dominio del tiempo son aquellos valores máximos analizados en algún intervalo de tiempo. En este caso, se trata del voltaje pico (V_{pico}), corriente pico (I_{pico}) y potencia pico (S_{pico}).

$$V_{pico} = \max(V(t)) \quad (2.4)$$

$$I_{pico} = \max(I(t)) \quad (2.5)$$

$$S_{pico} = \max[V(t) * I(t)] \quad (2.6)$$

2.3.3.2. Parámetros en el dominio de la frecuencia

Para este tipo de parámetros, donde su dominio es la frecuencia, es necesario acondicionar la señal para poder medir y cuantificar sus componentes en base a su frecuencia. Normalmente se emplea la transformada rápida de Fourier para llevar a cabo este análisis.

Voltaje y corriente RMS

El valor efectivo es definido como el valor verdadero de tensión eléctrica y de corriente. La forma de obtener estos valores se muestran a continuación, en las ecuaciones 2.7 y 2.8 para voltaje y corriente respectivamente. Para este caso, en valor de V_n/I_n corresponde a un valor determinado en un punto del tiempo específico.

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \quad (2.7)$$

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (2.8)$$

Factor cresta

Este factor se define como la amplitud del pico de la forma de onda (V_{pico}) dividido entre el valor RMS de la misma señal (V_{rms}). Dicha definición puede ser aplicada tanto a corriente como a voltaje.

$$V_{cresta} = \frac{V_{pico}}{V_{rms}} \quad (2.9)$$

$$I_{cresta} = \frac{I_{pico}}{I_{rms}} \quad (2.10)$$

Contribución armónica de voltaje y corriente

Las fórmulas que rigen el comportamiento de estos parámetros se muestra en las figuras 2.11 y 2.12.

$$VHC = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \quad (2.11)$$

$$IHC = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (2.12)$$

Distorsión armónica total

Este índice es capaz de cuantificar el grado de distorsión que posee alguna señal en base a los componentes armónicos que esta llegue a presentar. Para este parámetro, se puede enfocar tanto a la magnitud de la frecuencia fundamental (60 Hz) como al valor eficaz (RMS). Sin importar el enfoque, ambas ecuaciones expresan el resultado en un valor porcentual (Wildi, 2007).

Respecto a la frecuencia fundamental, las ecuaciones que rigen su comportamiento son las siguientes:

$$THD V_{fund} = \frac{VHC}{V_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.13)$$

$$THD I_{fund} = \frac{IHC}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.14)$$

Respecto al valor RMS, las ecuaciones que rigen su comportamiento son las siguientes:

$$THD V_{rms} = \frac{VHC}{V_{rms}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2}}{V_{rms}} \times 100\% \quad (2.15)$$

$$THD I_{rms} = \frac{I_{HC}}{I_{rms}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2}}{I_{rms}} \times 100\% \quad (2.16)$$

Factor de potencia de distorsión

Con este parámetro es posible determinar como la distorsión de la corriente influye en la disminución de la potencia promedio, la cual es transferida a la carga.

$$DPF = \frac{I_1}{I_{rms}} \quad (2.17)$$

Para entender mejor este concepto, es necesario visualizar la siguiente figura, la cual representa el comportamiento que tienen los diferentes componentes en un sistema cuya corriente posee una cierta distorsión.

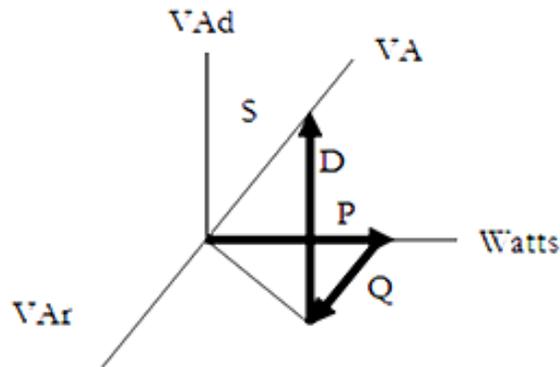


Fig. 2.9. Triángulo de potencias para sistemas no sinusoidales (Wildi, 2007)

Potencia aparente

Se trata de la potencia total consumida por el circuito igual al producto del voltaje RMS y la corriente RMS.

$$S = V_{rms} * I_{rms} \quad (2.18)$$

Potencia real

Se define como la potencia que es consumida por una carga puramente resistiva.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^N V_n I_n \cos(\theta_n - \phi_n) \quad (2.19)$$

Potencia reactiva

Este tipo de potencia queda almacenada en forma de campo eléctrico y magnético en cargas inductivas y capacitivas. Este tipo de potencia representa un consumo de energía, pero no genera trabajo útil.

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^N V_n I_n \sin(\theta_n - \phi_n) \quad (2.20)$$

Potencia de distorsión

Este tipo de potencia se define en base a la siguiente fórmula:

$$D = \sqrt{S^2 - Q^2 - P^2} \quad (2.21)$$

Factor de potencia

Este factor (*FP*) expresa el retraso o el desfase que existe entre el voltaje fundamental y la corriente, tomando en cuenta el signo.

$$FP = \cos(\theta_1 - \phi_1) \quad (2.22)$$

2.4. Adquisición de señales

Los sistemas de adquisición de señales son sistemas particularmente compuestos de sistemas electrónicos, es decir, se trata de un sistema cuyos elementos realizan sus respectivas funciones por medios electrónicos (Pallás, 1993).

Específicamente, en un sistema de medida es necesario adquirir la información (en forma de señales analógicas digitales), procesarla y presentarla. Este tipo de análisis se hace principalmente en la aplicación de sistemas de control, en donde hay que comparar el resultado de la medida con objetivos establecidos previamente, y actuar en consecuencia sobre el sistema físico o proceso para modificar el parámetro deseado. En este proceso de control se requiere de la generación de tensiones analógicas y digitales de salida, y el control de la potencia a aplicar.

La Figura 2.10 muestra la estructura general de un sistema de adquisición de señales para la instrumentación y control de un proceso.

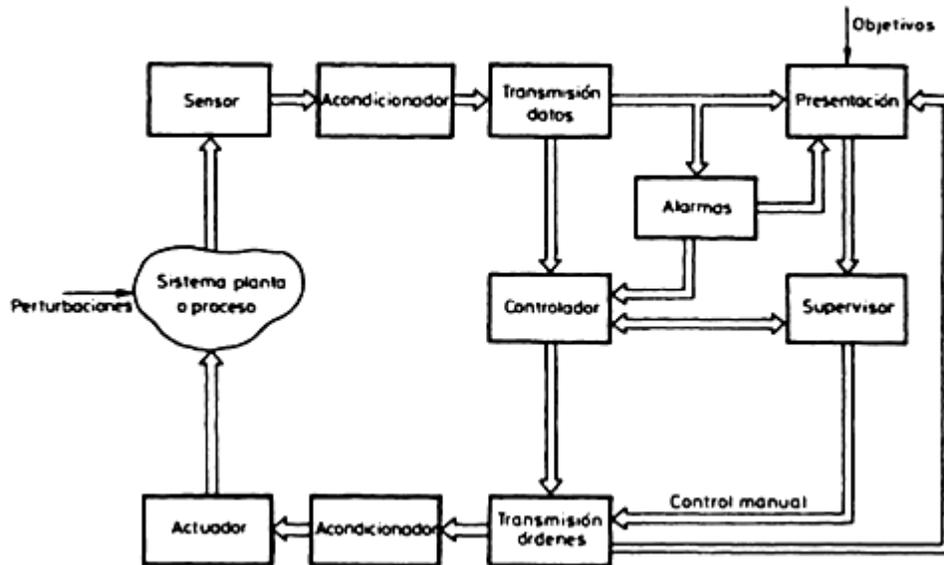


Fig. 2.10 Estructura general de un sistema de adquisición de señales para medida y control (Pallás, 1993)

2.4.1. Sensores para la adquisición de señales eléctricas

Un transductor se describe como todo aquel dispositivo capaz de convertir una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de una forma física distinta. En otras palabras, se trata de un dispositivo capaz de transformar un tipo de energía en otro. Actualmente, se considera que existen seis tipos de señales:

- ❖ Señales mecánicas
- ❖ Señales térmicas
- ❖ Señales magnéticas
- ❖ Señales eléctricas
- ❖ Señales ópticas
- ❖ Señales moleculares (químicas)

Dado a la existencia de estas señales, cualquier dispositivo que convierta una señal de un tipo en una señal de otro tipo debería ser considerado como un transductor. Sin embargo, en la práctica solo se consideran transductores por antonomasia aquellos que ofrecen una señal de salida eléctrica (Pallás, 2003).

Por otro lado, un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía donde se mide, entrega una señal de salida transducible que es función de la variable medida. Ambos términos suelen ser empleados como sinónimos, aunque existen sutiles diferencias entre uno y otro.

Este trabajo hace uso de sensores específicos capaces de medir diferentes rangos de señales eléctricas de manera continua, cuyas configuraciones y usos dependen de la aplicación.

2.4.1.1. Características estáticas de los sistemas de medida

El comportamiento del sistema de medida viene condicionado por el sensor empleado. Es por ello que es importante describir las características de los sensores. Sucede que, en la mayoría de los sistemas de medida, la variable de interés varía tan lentamente que

bastan con conocer las características estáticas del sensor. Bastan con decir que los conceptos empleados para describir dichas características estáticas no son de aplicación exclusiva a los sensores, sino que son comunes a todo instrumento de medición (Pallás, 1993).

Exactitud

Habla de la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medición de dar indicaciones que se aproximen al verdadero valor de la magnitud medida. La exactitud de un sensor se determina mediante la denominada calibración estática.

Fidelidad

Se trata de la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medida de dar el mismo valor que la magnitud medida, al medir varias veces unas mismas condiciones determinadas, prescindiendo de su constancia o discrepancia con el valor real de dicha magnitud. También se le llega a conocer como precisión.

Sensibilidad

También conocido como factor de escala, es la pendiente de la curva de calibración que puede ser o no constante a lo largo de la escala de medida. En los sensores se interesa tener una sensibilidad alta y, si es posible, constante.

2.4.1.2. Sensor TC

Se trata de un transductor utilizado para adecuar los niveles de corriente a los alcances de los elementos sensores de corriente y/o aislarlos galvánicamente de la red. Este tipo de sensor se conecta en serie con la carga cuya corriente se desee medir. Este tipo de transformadores se diseñan con la finalidad de medir las corrientes presenten en sistemas eléctricos y, de la misma forma proteger el circuito de medición. La corriente nominal en el secundario de estos dispositivos suele ser de 1 ó 5 A. La simbología usada para ubicar un TC se muestra en la Figura 2.11.

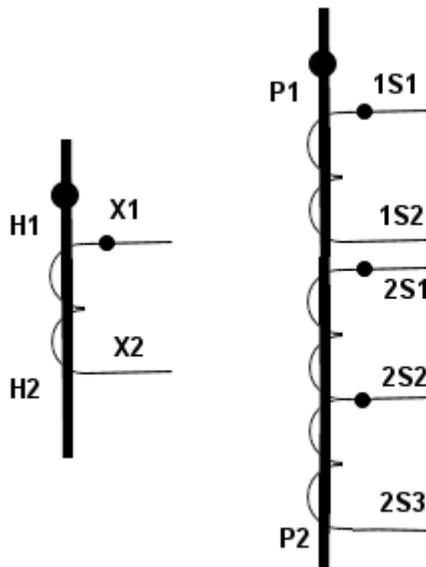


Fig. 2.11. Simbología de los TC

2.4.1.3. Sensores de gancho

Es un tipo especial de amperímetro capaz de medir la corriente de un circuito eléctrico sin la necesidad de abrir el circuito en el que se desee medir la corriente. Este tipo de dispositivo se basa en la medición indirecta de una corriente circulante en un conductor a partir del campo magnético generado sobre el mismo (Alcalde, 2011).

Lamentablemente, este dispositivo únicamente puede medir un solo conductor a través de sus ganchos, debido a que si se midieran simultáneamente más cables, se obtendría una suma vectorial de corrientes en la respuesta del sensor. Shunt de corriente y voltaje

Se trata de una carga resistiva, en donde se produce una corriente eléctrica. Por lo general, esta resistencia es conocida, y es utilizada para determinar la intensidad de corriente o tensión eléctrica, dependiendo del caso. Esto se hace gracias a la aplicación de la ley de Ohm.

2.4.1.4. Sensores basados en el efecto Hall

Consiste en la aparición de una diferencia de potencial transversal en un conductor o semiconductor, por el que circula una corriente, cuando hay también un campo magnético aplicado en una dirección perpendicular a esta. Este efecto se puede observar gráficamente en la Figura 2.12.

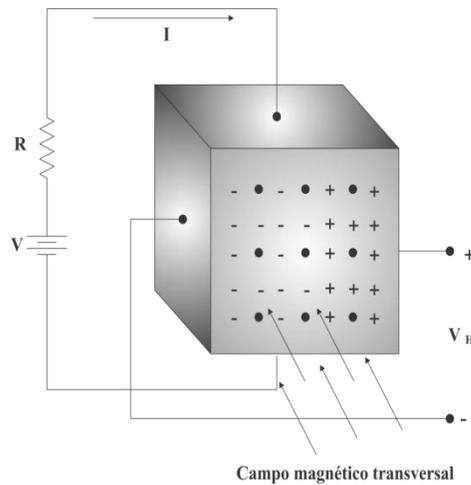


Fig. 2.12. Demostración del efecto Hall

Algunas de las aplicaciones de este tipo de sensores son las siguientes:

- ❖ Las aplicaciones más inmediatas son en la medida de campos magnéticos (gaussímetros).
- ❖ Es posible medir la intensidad de una corriente eléctrica a base de disponer el elemento Hall en el entrehierro de un toroide abierto en el que el paso de corriente crea un campo magnético proporcional.
- ❖ De forma general las aplicaciones de estos elementos se clasifican en las de conmutación y las linealidades.

2.4.1.5. Bobinas de Rogowski

Se trata de un tipo especial de transductor capaz de medir señales eléctricas en corriente alterna. En este dispositivo de sensores, existe una bobina de cable en forma de hélice, la cual forma una circunferencia sin ningún tipo de núcleo. La bobina se cierra

alrededor del cable conductor responsable de la circulación de la corriente eléctrica que se desea medir. La forma en que se representa la bobina aparece en la Figura 2.13.

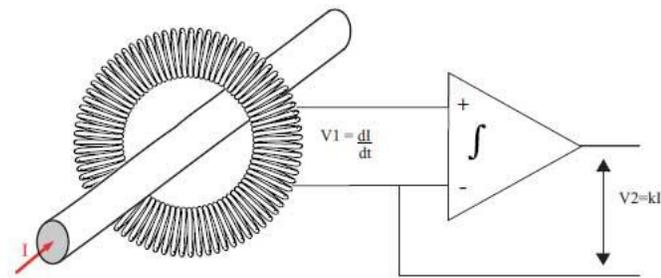


Fig. 2.13. Diagrama de una bobina Rogowski

La medición de la corriente se da en base a la relación que existe entre el voltaje inducido en la bobina y la velocidad de variación de la corriente. Con esta relación, se acondiciona el sensor de tal forma que un amplificador integrador proporcione la respuesta proporcional a la corriente en el conductor.

2.4.2. Acondicionamiento de señales

Se entiende como acondicionadores de señales a aquellos elementos del sistema de medida que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor electrónico, una señal apta para ser presentada o registrada o que simplemente permita un procesamiento posterior mediante un equipo o instrumento estándar (Pallás, 2003).

Este acondicionamiento consiste normalmente en circuitos electrónicos que ofrece, entre otras funciones, las siguientes operaciones:

- Amplificación
- Filtrado
- Adaptación de impedancias
- Modulación o demodulación

Entre los elementos principalmente usados en el acondicionamiento de señales se encuentran los amplificadores operacionales.

2.4.2.1. Amplificadores operacionales

Se define como un dispositivo electrónico, el cual posee dos entradas y una salida. La función primordial que realiza un amplificador operacional es tomar la información de las terminales de entrada, en forma de voltaje diferencial de entrada, y multiplicar éste por una ganancia de voltaje en lazo abierto del amplificador, entregando así un voltaje en la salida (Forcada, 1996). La forma en que se representa un amplificador operacional se muestra en la Figura 2.14.

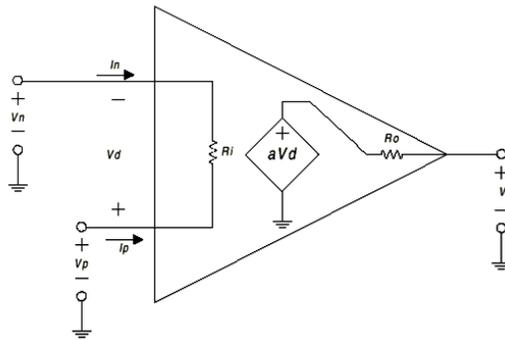


Fig. 2.14. Modelo ideal de un Amplificador Operacional

Comúnmente, todos los circuitos son amplificadores operacionales se basan en dos configuraciones principales: inversor y no inversor. Todas las configuraciones surgen a partir de estas dos básicas.

Amplificador inversor

Esta configuración proporciona un voltaje proporcional al producto de la ganancia de lazo abierto, con la diferencia de potencial de la terminal no inversora (+) a la inversora (-). El arreglo para esta configuración se muestra en la Figura 2.15.

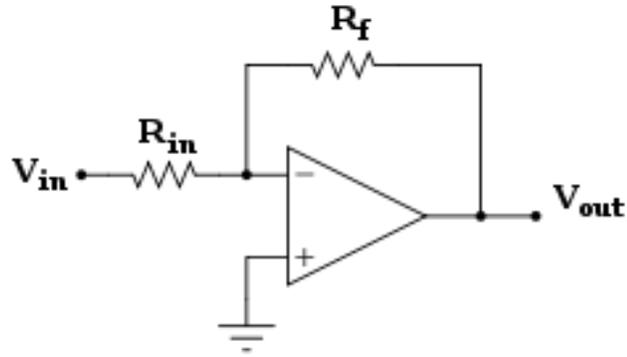


Fig. 2.15. Amplificador inversor

Para este tipo de configuración, la ecuación característica que rige el comportamiento del circuito esta dado por la siguiente expresión.

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i \quad (2.23)$$

La ganancia de voltaje puede ser variada ajustando los valores R_f o R_i . En la práctica no es recomendable variar R_i , ya que cambia la resistencia de entrada a la configuración. Como consecuencia. Se altera la amplitud de la señal de entrada, lo que se traduciría en errores.

Seguidor de voltaje

Se define como seguidor de voltaje a aquella configuración donde la señal de salida sigue exactamente en amplitud y fase a la señal de entrada. Si se habla de voltaje, se refiere a un amplificador en el que la resistencia de entrada debe ser muy grande, en lo posible cercana a infinito, con el fin de no cargar a la etapa anterior, con lo cual la señal de entrada no se altere. De esta forma, la señal se comporta como una fuente ideal de voltaje.

La forma de representar esta configuración se muestra en la Figura 2.16.

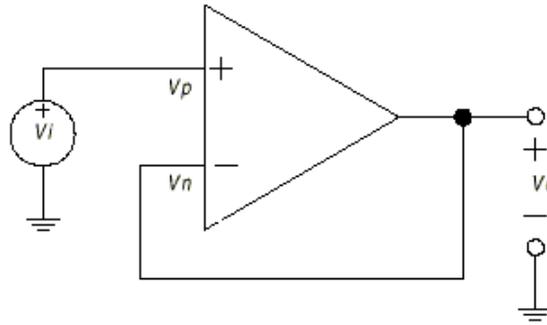


Fig. 2.16. Circuito seguidor de voltaje

Gracias a esta configuración, el circuito queda como una etapa de separación o aislamiento, evitando caídas de tensión en la señal que se desea adquirir o analizar. La expresión que rige el comportamiento de este circuito queda expresada de la siguiente forma.

$$V_o = V_i \quad (2.24)$$

Filtro Butterworth

Los filtros son circuitos que permiten el paso de una determinada banda de frecuencia mientras atenúan todas las señales que no estén comprendidas dentro de esta banda. Existen filtros activos y pasivos. Los filtros pasivos solo tienen resistencias, inductores y capacitores. Mientras que en los filtros activos generalmente se hace uso de transistores o amplificadores operacionales, así como dispositivos resistivos, capacitivos y, en menor proporción, inductivos (Coughlin & Driscoll, 1999).

Existen cuatro tipos de filtros:

- Filtros pasa bajas
- Filtros pasa altas
- Filtros pasa banda
- Filtros de eliminación de banda

En este trabajo, únicamente se hará uso de filtros pasa bajas.

El filtro Butterworth es uno de los filtros electrónicos más básicos, el cual tiene como propósito atenuar la respuesta lo más cerca posible hasta la frecuencia de corte. Dicha frecuencia se mantiene constante casi hasta la frecuencia de corte, para después disminuir 20 dB por década, dependiendo del número de polos que tenga la configuración del filtro. La Figura 2.17 muestra el decaimiento logarítmico para cada tipo de filtro.

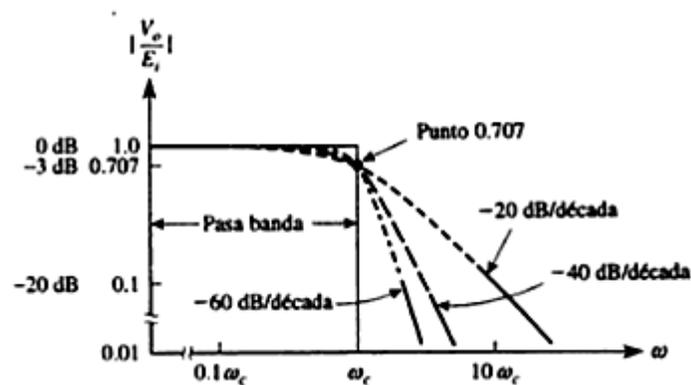


Fig. 2.17. Graficas de respuesta a la frecuencia de tres filtros pasa bajas Butterworth

2.4.3. Discretización de señales

El procesamiento digital de señales ofrece ventajas distintas cuando se compara con el procesamiento analógico. En general, los circuitos digitales son más estables y predecibles. No requieren de ajustes ni sintonización durante el proceso de producción o al trabajar en línea. Conforme avanza la tecnología de fabricación de circuitos integrados y de circuitos con escala de integración grande, el procesamiento digital de señales proporciona más ventajas en costo, tamaño, velocidad y confiabilidad que su contraparte analógica (Kuo, 2007).

2.4.3.1. Conversión digital-analógica (D/A)

La conversión digital-analógica, o decodificación, consiste en transformar la información numérica contenida en una palabra digital en una señal analógica equivalente. La función de la circuitería lógica es controlar la conexión de la fuente de voltaje o corriente utilizada como referencia de precisión, con las terminales de entrada apropiada de la red

resistiva, todo ello como una función de valor digital de cada dato de entrada. La Figura 2.18 muestra los elementos básicos que posee un convertidor digital-analógico.

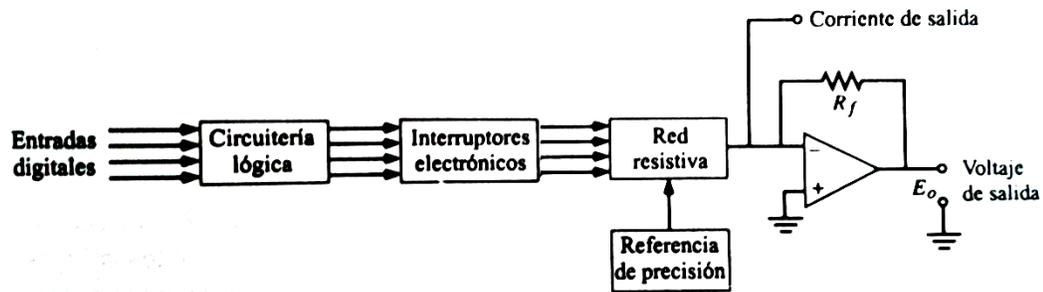


Fig. 2.18. Elementos básicos de un convertidor D/A

2.4.3.2. Conversión analógica- digital (A/D)

La conversión analógico-digital, o codificación, consiste en convertir la información numérica contenida en una señal analógica en una palabra digital. La conversión A/D es un proceso más complejo que la conversión D/A y requiere una circuitería más elaborada. En comparación con el convertidor D/A, el A/D tiene un costo mayor y una respuesta más lenta para la misma exactitud de conversión.

Cuando se proporciona un número como entrada a un convertidor A/D, éste realiza las operaciones de cuantificación y codificación. Cuando se convierte una señal analógica que cambia con el tiempo en una digital, el convertidor A/D efectúa usualmente las siguientes operaciones en sucesión: muestreo y retención, cuantificación y codificación.

Aunque hoy en día existen muchos circuitos A/D, sólo unos cuantos resultan ser adecuados para la fabricación de unidades comerciales eficientes y compactas. Entre los tipos de convertidores A/D más utilizados se encuentran los siguientes:

- ❖ Por aproximaciones sucesivas
- ❖ De integración (con uno o dos pendientes)
- ❖ Por contacto o tipo servo
- ❖ En paralelo

2.4.3.3. Dispositivos de muestreo y retención

El muestreador es un dispositivo que convierte una señal analógica en un tren de pulsos de amplitud modulada o en una señal digital. Este dispositivo simplemente mantiene el valor del pulso o de la señal digital durante cierto tiempo especificad de antemano. De forma práctica, es una sola unidad la que hace la función de retención y muestreo, la cual es llamaba comercialmente como muestreador-retenedor o dispositivo S/H.

Una de las principales aplicaciones del muestreador- retenedor es “congelar” señales muy rápidas para todos los tipos de conversión. Otro uso común del dispositivo S/H es servir como almacén durante la conversión de las señales que provienen del multiplexor. La detección de picos es otra aplicación del S/H. Este dispositivo es frecuentemente usado en los convertidores A/D y D/A.

Una configuración típica para este tipo de dispositivos se puede visualizar en la Fig. 2.19, en donde los dispositivos de muestreo y retención están complementados con configuraciones básicas de amplificadores operacionales para mejorar su rendimiento.

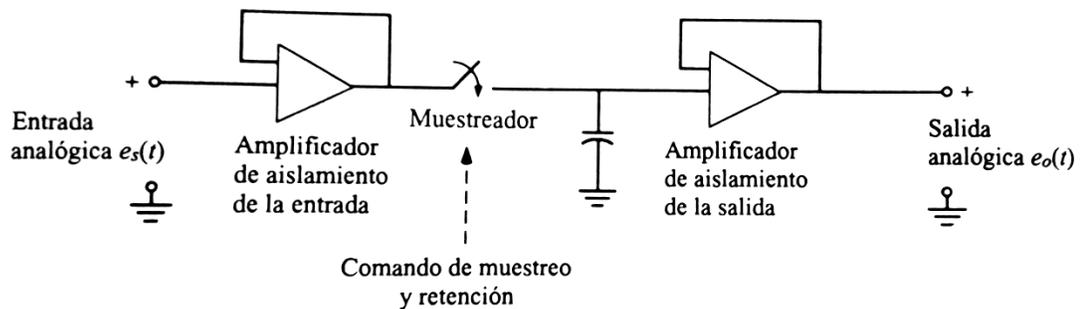


Fig. 2.19. Dispositivo de muestreo y retención con amplificadores de aislamiento a la entrada y la salida

2.4.3.4. Teorema del muestreo

Cuando se utiliza el muestreo de algún determinado sistema es necesario considerar cual debe ser la frecuencia de apropiada y los limites existentes sobre esta. Para este caso, se sabe que cualquier muestreador fabricado a base de componentes físicos tenga una frecuencia de muestreo máxima. Teóricamente, cuando la frecuencia de muestreo es infinita, el muestreador está esencialmente cerrado, por lo que el sistema de datos muestreados o digital se convierte en un sistema de datos continuos.

En lo que respecta al límite inferior de la frecuencia de muestreo, se sabe que si la señal continua cambia rápidamente con respecto al tiempo, el muestreo con una frecuencia pequeña trae como consecuencia la pérdida de información importante entre los instantes de muestreo. Debido a esto, cabe la posibilidad de que la señal original no pueda ser reconstruida a partir de los datos muestreados. Debido a esto se concluye que la frecuencia de muestreo mínima que se necesita para reconstruir la señal original debe ser $2\omega_c$, donde ω_c es la frecuencia del mayor componente en frecuencia contenido en $f(t)$ (Kuo, 2007).

En otras palabras, el teorema del muestreo dicta que:

“Si una señal no contiene componentes en frecuencia mayores de ω_c rad/s, puede caracterizarse por completo con los valores de sus muestras tomadas en instantes separados por $T = \pi/\omega_c$ s.”

2.5. Procesamiento en Hardware

El procesamiento en Hardware, hoy día, es una de las herramientas más usadas para el desarrollo de proyectos basados en lógica digital, entre ellos el control digital, el análisis de datos, la adquisición de señales, etc. Esto debido a las grandes ventajas que ofrece este tipo de procesamiento, el cual hace más óptimo el uso de recursos y el tiempo de análisis.

2.5.1. FPGA (Arreglo de compuertas programables en campo)

Los FPGA consisten en circuitos integrados diseñados para tener características de configuración interna. Dicha configuración generalmente puede ser especificada mediante un hardware de lenguaje descriptivo, el posee cierta similitud con los circuitos ASIC (Circuito integrado para aplicaciones específicas), con la ventaja que los primeros pueden ser reconfigurados.

El primer FPGA fue introducido en 1984. Este dispositivo fue hecho a base de una matriz de bloques lógicos programables. Cada bloque lógico contenía 3 entradas *look-up-table* (*LUT*) el cual tenía la capacidad realizar cualquier función combinacional. Adicionalmente, había un simple multiplexor y un flip-flop dentro del bloque lógico.

Hoy día, los FPGA aún son la mejor solución para diseñadores quienes quieren verificar sus prototipos de diseño sin la necesidad de manufacturar el dispositivo. Sin embargo, los FPGA son demasiado lentos y bastante caros con respecto a los dispositivos ASIC, en caso de que se planee una producción en masa. Por otro lado, las características que poseen los FPGA como la parcial reconfiguración ofrecen nuevas ideas y nuevos mercados en donde pueden sacarle provecho a estos dispositivos (Wiśniewski, 2009).

2.5.2. Características del procesamiento basado en FPGA

1.- Rendimiento: Los FPGAs exceden la potencia de cómputo de los procesadores digitales de señales (DSPs) rompiendo el paradigma de ejecución secuencial y logrando más en cada ciclo de reloj. El controlar entradas y salidas (E/S) a nivel de hardware ofrece tiempos de respuesta más veloces y funcionalidad especializada que coincide con los requerimientos de una aplicación.

2.- Tiempo en llegar al mercado: La tecnología FPGA ofrece flexibilidad y capacidades de rápido desarrollo de prototipos para enfrentar los retos de que un producto se libere tarde al mercado. Se puede probar una idea o un concepto y verificarlo en hardware sin tener que pasar por el largo proceso de fabricación por el que pasa un diseño personalizado de ASIC. Posteriormente se pueden implementar cambios y realizar iteraciones de un diseño FPGA en cuestión de horas en vez de semanas. También existe hardware comercial listo para usarse (COTS) con diferentes tipos de E/S ya conectados a un chip FPGA programable por el usuario. El aumento en disponibilidad de herramientas de software de alto nivel disminuye la curva de aprendizaje con niveles de abstracción. Estas herramientas frecuentemente incluyen importantes núcleos IP (funciones pre-construidas) para control avanzado y procesamiento de señales.

3.- Precio: El precio de la ingeniería no recurrente de un diseño personalizado ASIC excede considerablemente al de las soluciones de hardware basadas en FPGA. La fuerte inversión inicial de los ASICs es fácilmente justificable para los fabricantes de equipos originales que embarcan miles de chips por año, pero muchos usuarios finales necesitan la funcionalidad de un hardware personalizado para decenas o cientos de sistemas en desarrollo. La misma naturaleza programable del silicio implica que no hay precio de fabricación o largo plazos de ejecución de ensamblado. Los requerimientos de un sistema van cambiando con el tiempo, y el precio de cambiar incrementalmente los diseños FPGA es insignificante al compararlo con el precio de implementar cambios en un ASIC antes de su lanzamiento.

4.- Fiabilidad: Mientras que las herramientas de software ofrecen un entorno de programación, los circuitos de un FPGA son una implementación segura de la ejecución de un programa. Los sistemas basados en procesadores frecuentemente implican varios niveles de abstracción para auxiliar a programar las tareas y compartir los recursos entre procesos múltiples. El software a nivel driver se encarga de administrar los recursos de hardware y el sistema operativo administra la memoria y el ancho de banda del procesador. El núcleo de un procesador sólo puede ejecutar una instrucción a la vez, y los sistemas basados en procesadores están siempre en riesgo de que sus tareas se obstruyan entre sí. Los FPGAs, que no necesitan sistemas operativos, minimizan los retos de fiabilidad con ejecución paralela y hardware preciso dedicado a cada tarea.

5.- Mantenimiento a largo plazo: Como se mencionó anteriormente, los chips FPGA son actualizables en campo y no requieren el tiempo y el precio que implica rediseñar un ASIC. Los protocolos de comunicación digital por ejemplo, tienen especificaciones que podrían cambiar con el tiempo, y las interfaces basadas en ASICs podrían causar retos de mantenimiento y habilidad de actualización. Los chips FPGA, al ser reconfigurables, son capaces de mantenerse al tanto con modificaciones a futuro que pudieran ser necesarias. Mientras el producto o sistema se va desarrollando, se pueden implementarle mejoras funcionales sin la necesidad de invertir tiempo rediseñando el hardware o modificando el diseño de la tarjeta (Thompson, 2004).

2.6. Comunicación USB

El USB es la solución más probable en caso de que se desee comunicar una computadora con cualquier dispositivo externo. El modo de comunicación es adecuado por su fabricación en masa, por los tipos periféricos estandarizados tan buenos como sus diseños de volumen reducido, incluyendo proyectos únicos es su tipo.

Para ser exitosa, una interfaz debe de complacer dos audiencias: a los usuarios quienes quieren usar el periférico y los desarrolladores quienes diseñan el hardware y escriben el código que se comunica con los dispositivos. El USB posee características para complacer a ambos (Axelson, 2005).

2.6.1. Beneficios para los usuarios

Desde las perspectivas de los usuarios, los beneficios otorgados por el USB consisten en la facilidad de uso, la velocidad y la seguridad en la transferencia de datos, la flexibilidad, bajo costo, y la conservación de energía. De estas, la facilidad de uso fue el mejor logro de diseño para el USB, y el resultado es una interfaz que satisface su uso por varias razones:

1.- Una interfaz para muchos dispositivos: El USB es suficientemente versátil para ser utilizable con una gran variedad de tipos de periféricos. A pesar de tener un tipo diferente de conector y un soporte de hardware para cada periférico, una interfaz es de mucha utilidad.

2.- Configuración automática: Cuando un usuario conecta un periférico USB a un ordenador, el sistema operativo detecta el periférico y carga el apropiado controlador de software. La primera vez que se conecta el periférico, el sistema operativo puede avisar el usuario que inserte el disco con el controlador de software, pero en caso de no poseerlo, la instalación es automática. No hay la necesidad de reiniciar el sistema antes de usar el periférico.

3.- Facilidad para conectar: Con el USB, no hay la necesidad de abrir el recinto de la computadora para añadir una tarjeta de expansión para cada periférico. Un típico ordenador posee cuatro o más puertos USB. Aun así, es posible expandir el número de puertos adicionando ejes con puertos adicionales.

4.- Cables fáciles: Los cables de conexión USB están enchavetados, de esta forma uno no puede conectar el periférico de manera errónea. Un segmento de cable puede ser tan largo como 5 metros. Con ejes de expansión, el periférico puede alcanzar los 30 metros desde su PC host. Los conectores USB son pequeños y compactos en contraste con el típico RS-232 y los conectores paralelos. Para asegurar que la operación sea segura, las especificaciones del USB incluyen a detalle los requerimientos que los cables y conectores deben tener.

5.- Conexión en caliente: Es posible conectar y desconectar un periférico USB cuantas veces se quiera, sin importar que el sistema y el periférico este energizado, sin dañar el ordenador o el dispositivo. El sistema operativo detecta cuando un periférico es añadido y lo prepara para su uso.

6.- No hay ajustes de usuarios: El periférico USB no posee ajustes que el usuario deba modificar como el puerto de dirección y las líneas de solicitud de interrupción (IRQ), de esta forma no hay puentes para enviar o utilidades de configuración para correr.

7.- Recursos de Hardware libres para otros dispositivos: Utilizando el USB para el mayor número de periféricos como sea posible, se liberan líneas IRQ para los periféricos que las requieran. El ordenador da una serie de direcciones para puertos y una línea IRQ hacia el controlador de host USB, pero los periféricos individuales no necesitan recursos adicionales o cualquier programa de computadora que involucre direcciones de puertos específicos o detectores de interrupciones por hardware. En contraste, los periféricos con otras interfaces pueden requerir puertos de direcciones dedicados, una línea IRQ, y un espacio de expansión.

8.- Suministro de energía no requerido (algunas veces): La interfaz USB incluye un suministro de energía y líneas de tierra que proveen un voltaje nominal de +5 V desde el ordenador o la fuente de energía del eje de expansión (hub). Un periférico que requiera de 500 mA puede sacar toda su energía desde el bus a pesar de tener que proporcionar una fuente de alimentación. En contraste, los periféricos que usan otras interfaces pueden tener que elegir entre la inclusión de una fuente de alimentación dentro del dispositivo o usar una voluminosa e inconveniente fuente externa.

2.6.2. Velocidad

El USB soporta tres buses de velocidad: alta velocidad a 480 Mb/s, velocidad media a 12 Mb/s, y baja velocidad a 1.5 Mb/s. Los controladores host USB en los ordenadores más actuales controlan las tres velocidades.

2.6.3. Fiabilidad

La fiabilidad del USB se debe a tanto el hardware como el protocolo para la transferencia de datos. Las especificaciones del hardware para los controladores del USB, los receptores y los cables garantizan una interfaz tranquila que elimina la mayoría del ruido que pudiese causar errores de datos. El protocolo USB permite la detección de errores en la recepción de datos y se notifica al mismo protocolo, de esta forma es posible retransmitir el dato. La detección, notificación y retransmisión se hacen en hardware y no requieren algún programa o la intervención de un usuario.

2.6.4. Bajo costo

Aunque el USB es más complejo que interfaces más sencillas, los componentes y los cables de conexión son baratos. Es más probable encontrar un dispositivo con una interfaz USB que uno con una interfaz más vieja o más reciente, como el IEEE-1394.

2.6.5. Bajo consumo de energía

Son circuitos ahorradores de energía y además poseen en su código la capacidad de reducir el suministro de energía en los periféricos USB cuando estos no estén en uso. La reducción de consumo de energía ahorra dinero, es ambientalmente amigable, y para dispositivos cargados mediante baterías, permite un mayor tiempo entre recargas.

2.6.6. Comunicación inalámbrica

El USB originalmente se desarrolló como una interfaz inalámbrica, pero hoy en día existen dispositivos inalámbricos, cuya interfaz de comunicación es USB.

3. Metodología

Desarrollo del sistema de adquisición de señales

3.1. Introducción

La base de este proyecto consiste en el diseño y la implementación de un sistema de adquisición de datos en hardware, el cual posee una etapa de acondicionamiento, capaz de filtrar y ajustar la señal de acuerdo a la necesidad requerida. Esta etapa en el sistema de adquisición es fundamental, debido a que las señales que se van a muestrear necesitan ser corregidas y adaptadas para una mejor eficiencia en la adquisición de datos, así como evitar el mayor ruido posible que el medio ambiente u otros factores pudieren alterar la naturaleza de la señal eléctrica.

Esta etapa de acondicionamiento se puede encontrar en cualquier sistema de adquisición de datos para cualquier sistema, y para su elaboración es necesario tener varias consideraciones en base a la respuesta que se desea obtener, como la selección de filtros y de dispositivos electrónicos. Es necesario calcular todos estos aspectos con fin de obtener la respuesta más idónea para nuestra adquisición de señales. En este capítulo se mostrarán el diseño, el desarrollo y la metodología usada para la implementación del sistema de adquisición de señales.

3.2. Especificaciones del sistema

El diseño del sistema a construir consta de un canal analógico, el cual tiene la capacidad de censar una señal eléctrica. Dicho sistema se ha diseñado exclusivamente para medir señales de corriente eléctrica otorgada por sensores especializados.

Las especificaciones que debe cumplir el diseño del sistema de adquisición de señales son:

- **Canales de entrada analógicos para las señales eléctricas:** 1 canales independiente, capaz de medir la intensidad de corriente en señales electicas.
- **Resolución del sistema:** 12 bits.
- **Tipos de señales eléctricas capaces de medir:** es capaz de medir señales eléctricas en corriente alterna (principalmente) y corriente directa.
- **Rango de medición:** el rango de operación del sistema está contemplado de -10 V a 10 V.
- **Frecuencia de muestreo:** 10 kHz.
- **Alimentación del sistema:** ± 7 V.
- **Número de muestras adquiridas:** 100,000 datos.
- **Interfaz de comunicación:** USB.

3.3. Diseño del sistema de adquisición de señales

La estructura completa del sistema de adquisición consiste en un sistema de acondicionamiento para la entrada del sensor, una tarjeta de adquisición de datos, una interfaz de comunicación USB y una FPGA para controlar todos los procesos tanto en la interfaz de comunicación como en la etapa de adquisición y condicionamiento de señales. El flujo de operación del proceso de funcionamiento del sistema se muestra en la Figura 3.1.

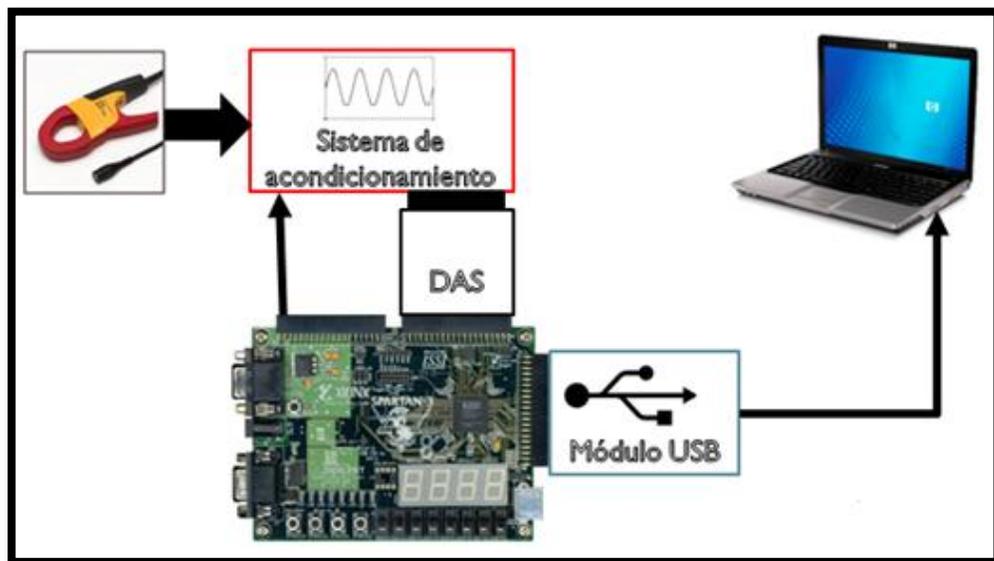


Fig. 3.1. Diagrama a bloques del sistema de adquisición de datos completo

Debido al enfoque del proyecto, el sistema de acondicionamiento en la entrada para el sensor ha sido rediseñado en base a un modelo ya probado. Gracias a esta nueva estructuración, la señal de entrada tendrá más beneficios que ayudarán al análisis de la misma. Por tal motivo, es necesario explicar el diseño previo del sistema de acondicionamiento y sus respectivos ajustes tanto en software como en hardware.

3.3.1. Modelo base del sistema de acondicionamiento

El acondicionamiento, en sistemas de adquisición de datos, tiene como objetivo ajustar señales que no siempre están en el rango de funcionamiento de algún sistema. De no existir algún acondicionamiento previo que ajuste la señal de entrada, mucha información en la señal original no podría ser registrada, haciendo cálculos erróneos o adquiriendo mal la señal, y en el peor de los casos podría causar daños en los sistemas en los que entran señales.

En esta etapa se han desarrollado los módulos necesarios para ajustar el voltaje y la corriente en la entrada de la etapa de adquisición. Debido al uso de diferentes sensores para adquirir las señales eléctricas, es necesario usar diferentes etapas para el acondicionamiento. Las etapas que el sistema de adquisición posee son las siguientes:

- Etapa seguidora de tensión
- Etapa de ajuste en magnitud
- Etapa de filtrado
- Etapa divisora de tensión para voltaje
- Etapa de aislamiento para voltaje

Este módulo posee diferentes tipos de acondicionamiento, dependiendo de la señal que se desee adquirir. Para este caso, la señal será solo de corriente.

3.3.1.1. Acondicionamiento de señales en corriente

El acondicionamiento usado para este tipo de señales se basa principalmente en el uso de elementos eléctricos pasivos (como resistencias y capacitores) y amplificadores operacionales TL084.

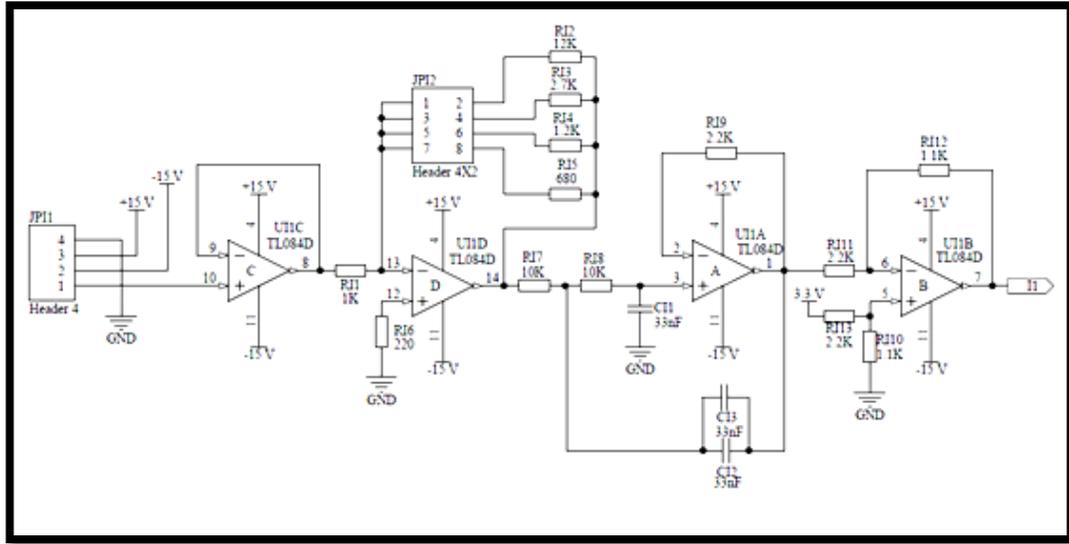


Fig. 3.2. Diagrama eléctrico del acondicionador de señal para corriente

El diagrama de la Figura 3.2 muestra el acondicionamiento para la corriente de una señal eléctrica. Este diagrama solo representa uno de los cuatro canales independientes que posee la tarjeta.

Este módulo de acondicionamiento presenta cuatro etapas diferentes para ajustar la señal, dependiendo de las necesidades requeridas.

Seguidor de voltaje

La primera etapa consiste en un circuito seguidor de voltaje, implementado en base a un amplificador operacional, tal y como se muestra en la Figura 3.3. Con este circuito como primera etapa se pretende eliminar cualquier caída de voltaje que pudiese presentar la señal eléctrica.

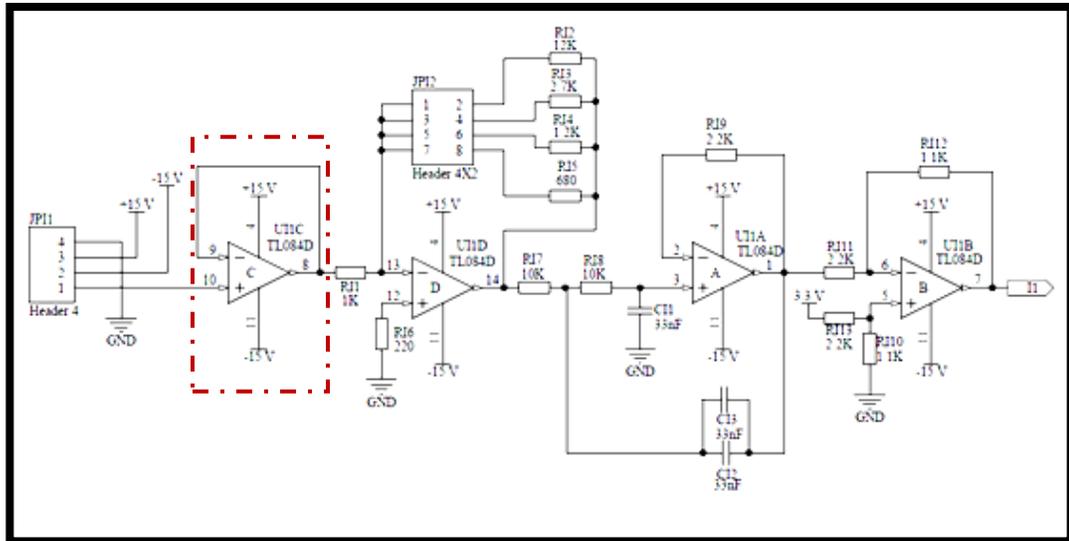


Fig. 3.3. Ubicación del seguidor de voltaje en el diagrama de acondicionamiento

Amplificador inversor

La segunda etapa consiste en un circuito de amplificación de magnitud, hecho nuevamente con un amplificador operacional. En esta etapa la magnitud de la señal puede ser ajustada dependiendo de la ganancia que se requiera. Existen cuatro diferentes tipos de ganancia, las cuales pueden ser seleccionadas con la ayuda de un jumper. Dependiendo de la ganancia elegida, la señal de salida se ajustará mejor a la resolución del sistema de adquisición de datos, haciendo más óptimo su rendimiento.

La selección de ganancias que posee el sistema es el siguiente:

Tabla 3.1. Valores usados en el sistema de selección automática

Resistencia de entrada	Resistencia de retroalimentación	Ganancia
1 k Ω	10 k Ω	10
1 k Ω	2.7 k Ω	2.7
1 k Ω	1.2 k Ω	1.2
1 k Ω	680 Ω	0.68

Es importante aclarar que en esta etapa la señal de salida tendrá un desfase de 180° con respecto a la señal original. Esto por efecto del circuito inversor.

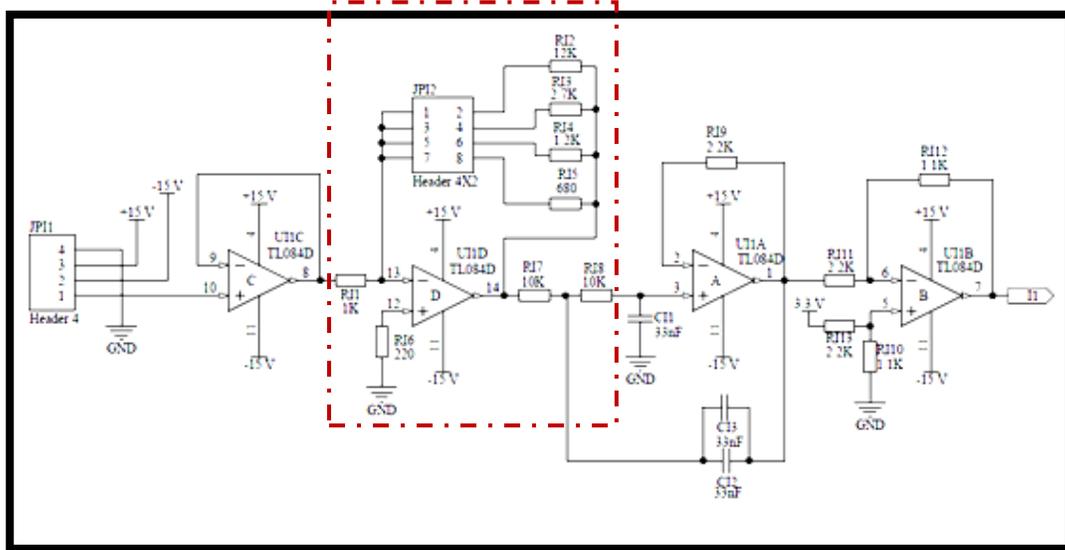


Fig. 3.4. Ubicación del amplificador inversor en el diagrama de acondicionamiento

Filtro Butterworth

La tercera parte del módulo de acondicionamiento consta de un filtro Butterworth pasabajos. Este filtro está diseñado para eliminar ruido de alta frecuencia que la señal fundamental pudiese tener.

Está constituido por elementos resistivos y capacitivos, así como elementos activos, en este caso un amplificador operacional; en la Figura 3.5 se puede apreciar la constitución de este circuito. Se trata de un filtro activo de segundo orden, con una frecuencia de corte de 360. De esta forma, al existir ruido de alta frecuencia, el filtro lo aplanara, dejando únicamente la señal fundamental de 60 Hz. Al ser un filtro de segundo, la frecuencia de corte tiene un caimiento logarítmico de 40dB por década, asegurando la integridad de la señal original.

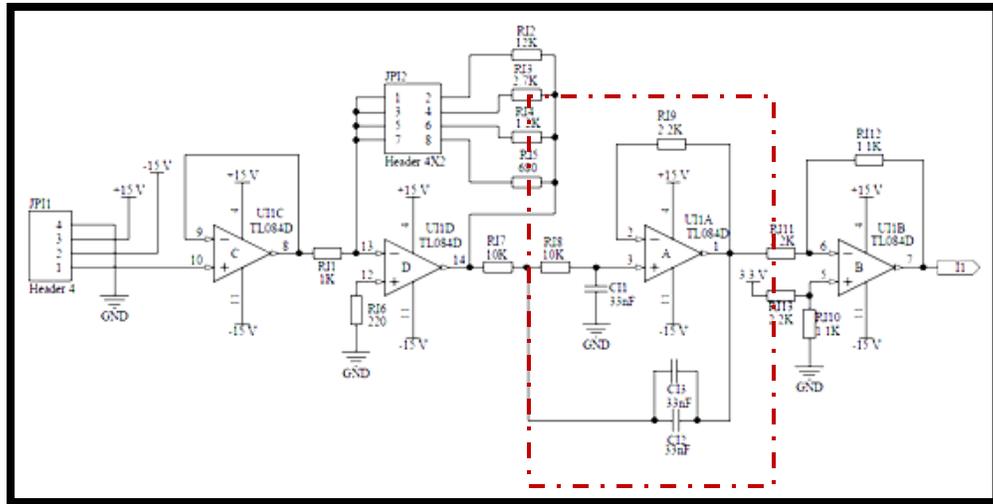


Fig. 3.5. Ubicación del filtro Butterworth en el diagrama de acondicionamiento

Amplificador inversor

La última etapa del módulo presenta un segundo amplificación inversor. En este caso la parte inversora del circuito corrige el desfase previo que tenía la forma de onda. De la misma forma, esta etapa presenta una ganancia que modifica la amplitud de la señal, sin embargo, a diferencia del primer circuito, esta ganancia es constante, ya que las resistencias usadas en la etapa no se pueden cambiar. El circuito para esta configuración se puede apreciar en la Figura 3.6.

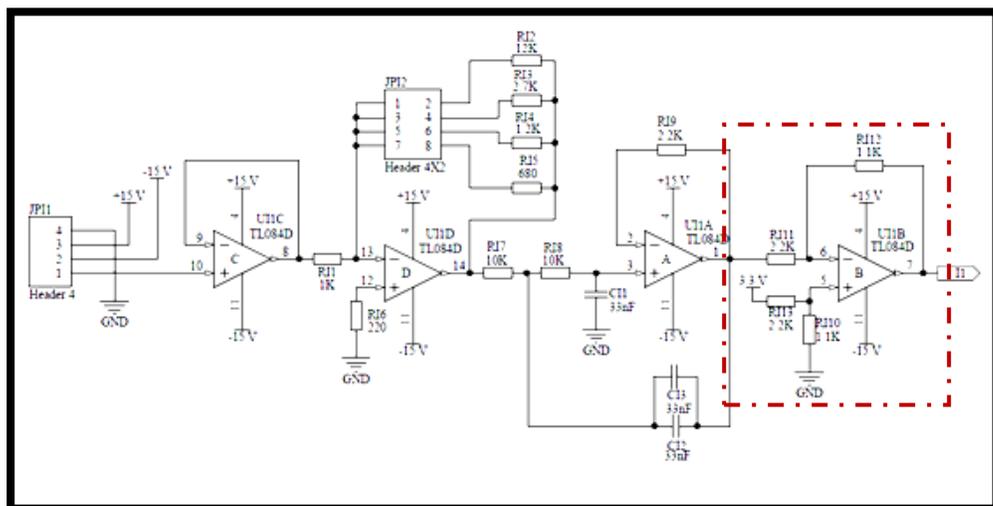


Fig. 3.6. Ubicación del circuito inversor en el diagrama de acondicionamiento

La ganancia del circuito se obtiene de la siguiente forma.

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i \quad 3.1$$

$$V_o = -\frac{2.2}{1.1} V_i = -\frac{1}{2} V_i \quad 3.2$$

3.3.2. Restructuración del módulo de acondicionamiento

El diseño anterior del módulo de acondicionamiento cuenta con un apartado de selección de ganancias en su primera etapa. Debido a que las señales eléctricas que entran en el sistema de acondicionamiento poseen diferentes niveles de tensión, al momento de ingresar en el sistema de adquisición de señales, estas pueden llegar a presentar diferentes magnitudes en su número de bits al momento de ser discretizada. Esto puede hacer que el proceso de adquisición pueda presentar errores al no concordar con el número de bits que posee el mismo convertidor, en este caso de 12 bits. El ajuste en magnitud trata de corregir la señal de tal forma que pueda alcanzar los 12 bits cuando sea discretizada.

En el nuevo diseño que yo propongo se ha cambiado esta etapa de selección manual con un diseño capaz de seleccionar la ganancia adecuada por medio de un procesamiento previo en hardware. Dicho procesamiento se planea efectuar con la ayuda de una FPGA. De este modo, la estructura del nuevo sistema de acondicionamiento queda de la siguiente forma.

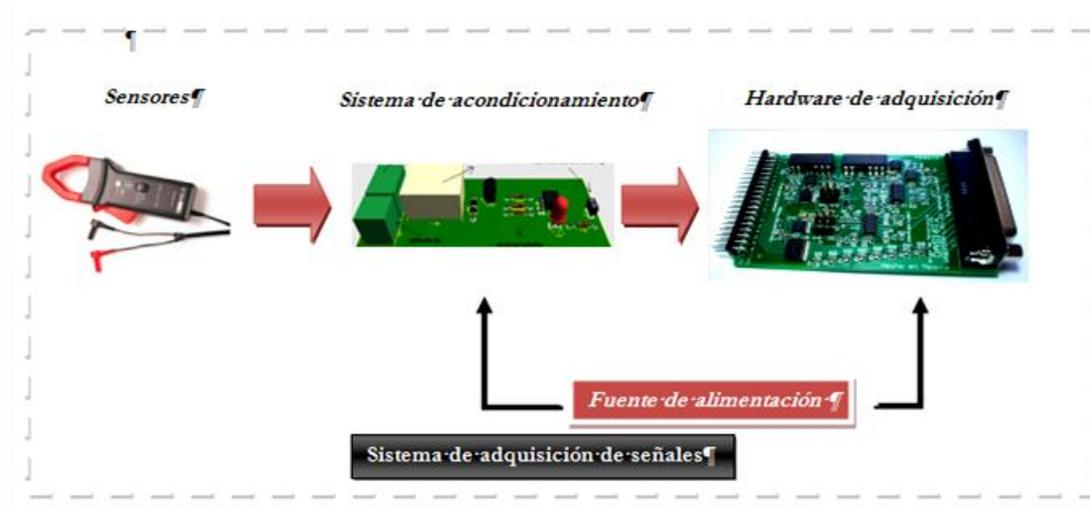


Fig. 3.7. Modelo a bloques del sistema de acondicionamiento de señales

3.3.2.1. Módulo de acondicionamiento rediseñado para corriente

A contraparte del diseño anterior, este nuevo sistema de acondicionamiento está constituido de tal forma que solo sea capaz de procesar señales de corriente, además de solo poder adquirir una sola señal; debido a esto el sistema solo es capaz de usar un solo canal. Esto hace que el sistema sea relativamente sencillo en comparación al anterior. Sin embargo, para lograr el ajuste automático en las ganancias del sistema, se ha implementado también un multiplexor analógico, el cual hace al sistema en hardware un tanto más robusto, haciendo difícil su implementación para más canales.

En este nuevo diseño, las ganancias en el circuito inversor basado en amplificadores operacionales fue cambiado de tal forma que tuviesen una ganancia más agresiva que en el diseño anterior (de un factor de cuatro), con el fin de limitar el voltaje que pudiese dañar la entrada del sistema de adquisición de datos. Debido a la complejidad del nuevo diseño, el esquemático completo del circuito se divide en tres partes. El circuito principal aparece en la figura 3.8, el circuito con la red de transistores aparece en la figura 3.9 y la salida del circuito aparece en la figura 3.10.

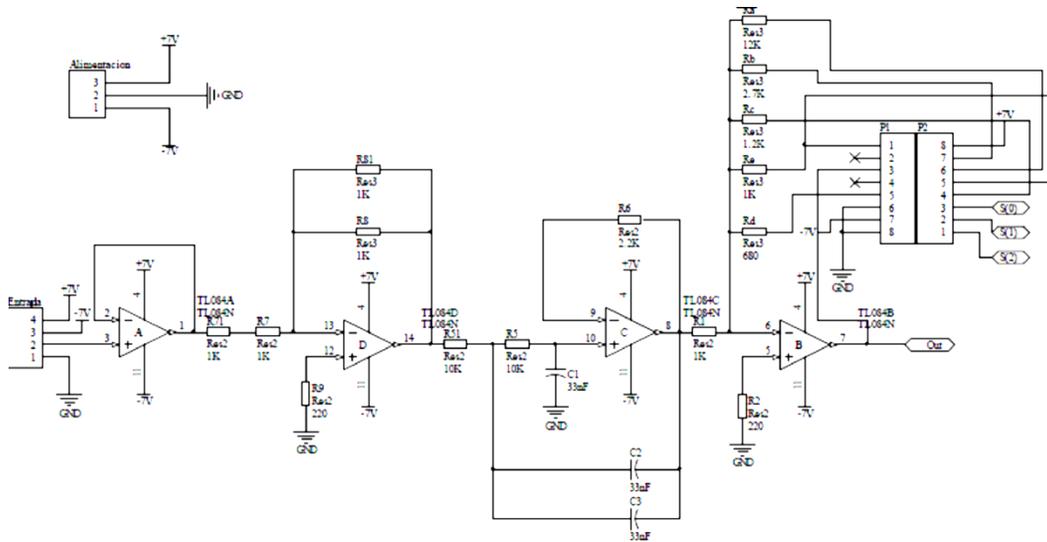


Fig. 3.8. Nuevo modelo esquemático del circuito principal

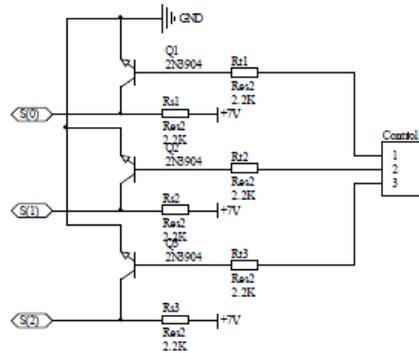


Fig. 3.9. Modelo esquemático de la configuración con transistores

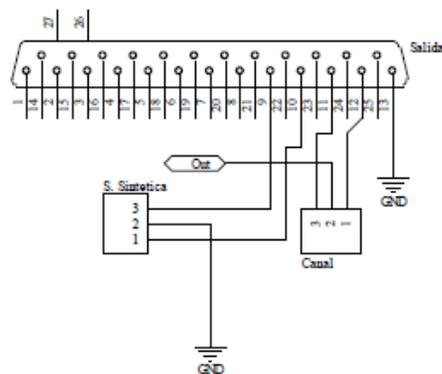


Fig. 3.10. Modelo esquemático de la salida en el sistema de acondicionamiento

En cuyo caso, este circuito mantiene las mismas configuraciones en el seguidor de voltaje y el filtro Butterworth; únicamente las ganancias en los circuitos inversores, siendo esta la etapa en donde se agrega el multiplexor analógico para la selección automática en base a la señal adquirida. Estas nuevas configuraciones pueden observarse en la figura 3.11.

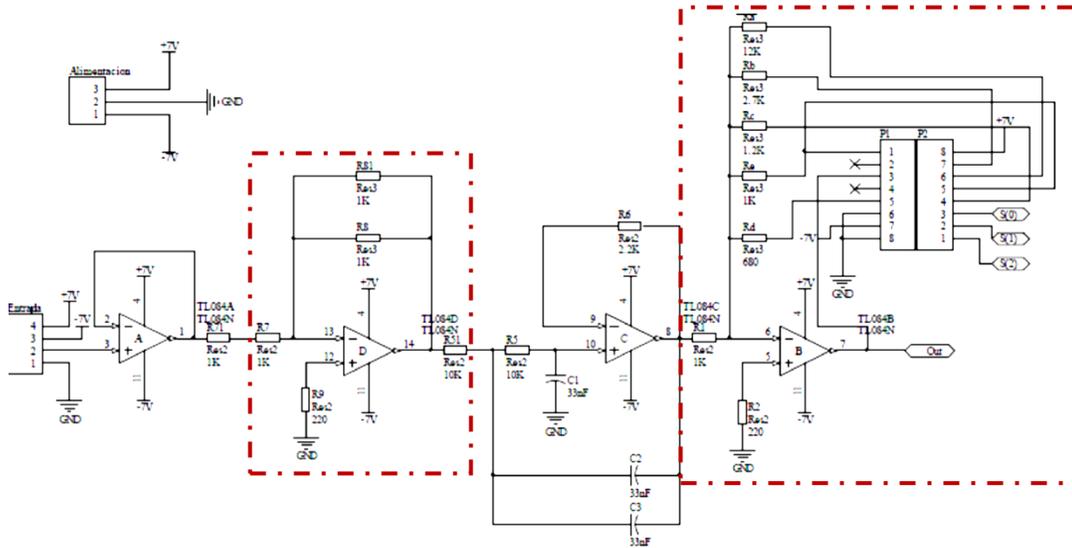


Fig. 3.11. Configuraciones cambiadas para el nuevo diseño

De la misma forma, las entradas en el circuito se conservan; esto con fin de alimentar a los sensores con una tensión eléctrica que da desde los +7 V hasta los -7V.

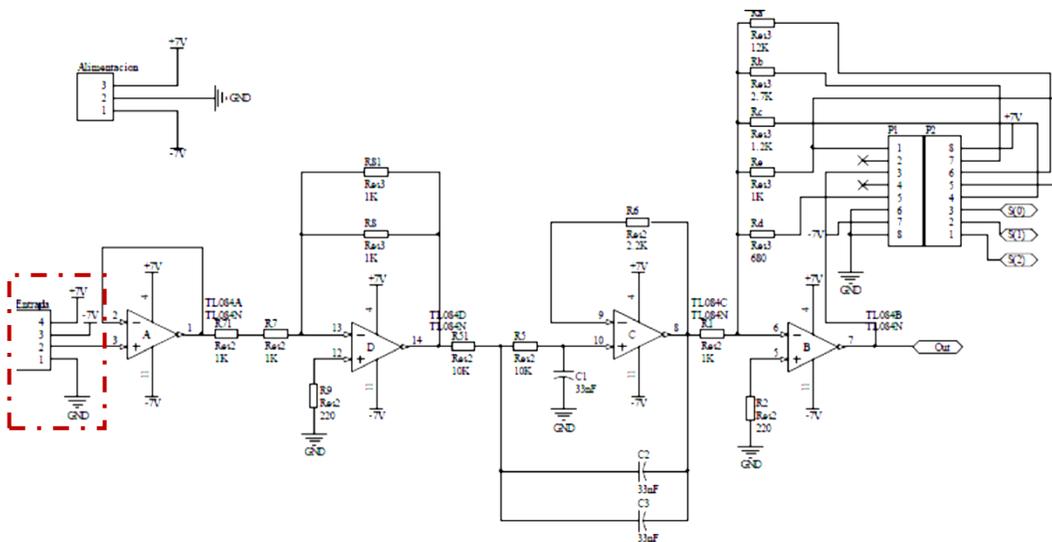


Fig. 3.12. Nuevo diseño en la alimentación

Para el caso de la salida física del sistema se ha acondicionado un conector tipo JACK DB 25 para garantizar el contacto entre el sistema de adquisición de señales (DAS) y el módulo de acondicionamiento.

3.3.3. Esquema de control en hardware

Como ya se había planteado anteriormente, el procesamiento del sistema en general será controlado en hardware, mediante una FPGA. Para esto, el dispositivo se encargará de controlar todos los módulos involucrados tanto en el procesamiento como en la adquisición de datos. Entre los módulos a controlar se encuentra el periférico para la comunicación USB, la selección digital de ganancias enviadas al multiplexor, la tarjeta de adquisición de datos (DAS) y el procesamiento interno para el control de la máquina de estados finitos.

La estructura digital que rige al sistema de adquisición de señales desarrollado se muestra en la Figura 3.13.

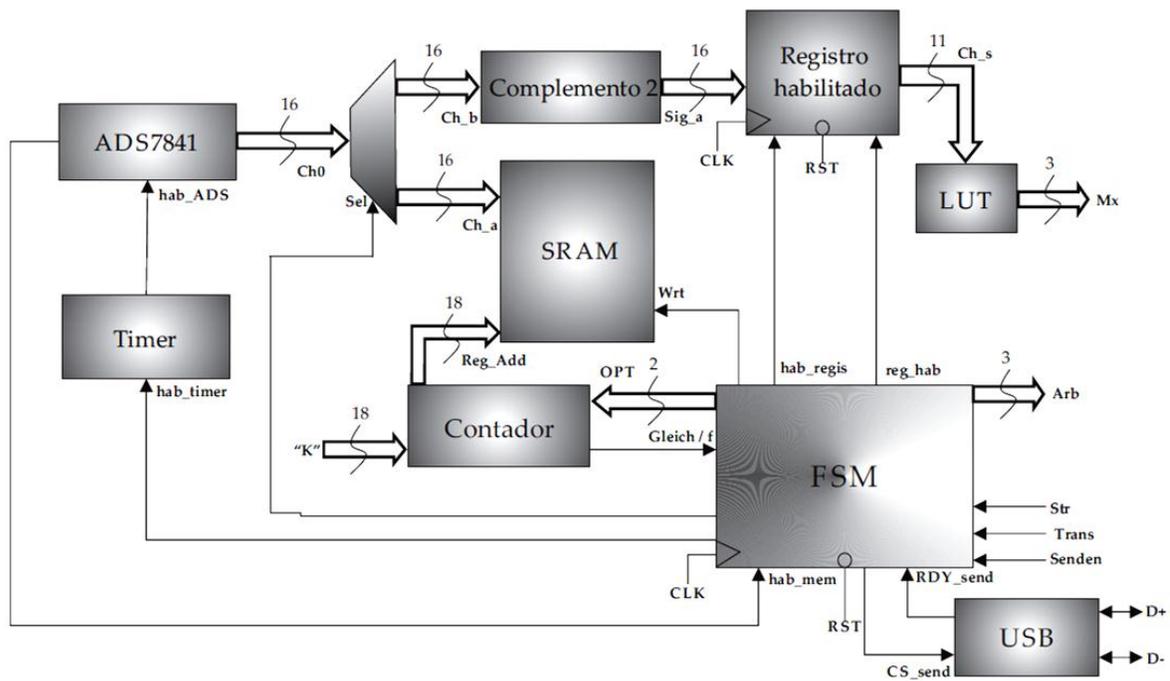


Fig. 3.13. Estructura digital del sistema en hardware

De acuerdo a la estructura mostrada, se puede visualizar como se hace uso de algunas herramientas propias de la FPGA, como lo es la memoria estática, y algunos periféricos externos como la conexión USB, la tarjeta DAS y el propio sistema de acondicionamiento.

Para la parte del hardware, la plataforma usada fue un modelo de FPGA Spartan™-3 Starter Kit Board. Es importante aclarar las características exactas de la plataforma usada, debido a que el archivo creado para programar el sistema en hardware solo puede funcionar en un sistema parecido.

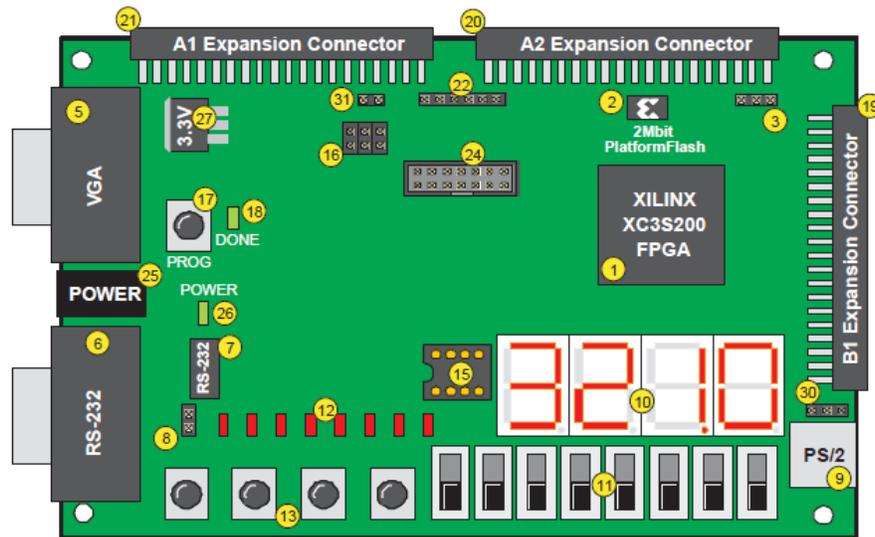


Fig. 3.14. Ilustración de la plataforma Xilinx Spartan-3 Starter Kit Board

La frecuencia de oscilación de la plataforma, la memoria estática, la gran cantidad de puertos de expansión y su forma de acoplamiento hace que la Spartan™-3 Starter Kit Board sea la mejor opción para diseñar en ella el control de los periféricos para el sistema de adquisición de señales.

El sistema planteado cuenta con varios bloques independientes, los cuales se van mapeando de manera secuencial gracias a la máquina de estados, la cual se encarga de procesar todas las entradas y salidas. Así mismo, el sistema en hardware está compuesto por registros, contadores, un módulo para usar el ADC, un módulo para enviar y recibir datos mediante comunicación USB, un temporizador y un módulo para la selección de ganancias.

3.3.4. Módulo convertidor analógico-digital (D/A)

Para convertir las señales de entrada de analógicas a digitales, se utilizó una tarjeta de adquisición de datos propia de la universidad en vez de usar un sistema comercial, la cual fue diseñada, desarrollada e implementada por el grupo de investigación HSP Digital. El diseño de este convertidor se muestra en la Figura 3.15.

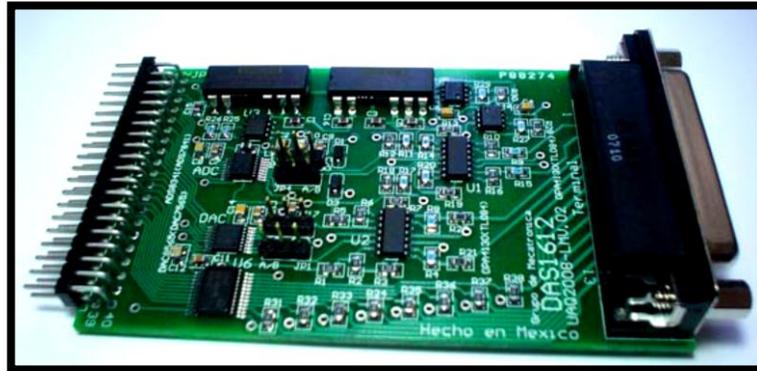


Fig. 3.15. Tarjeta de adquisición de datos DAS1612

El hardware cuenta con un sistema de adquisición de datos de 12 y 16 bits. Para el proyecto, se usó el sistema de 12 bits, concordando con el módulo en FPGA de autoajuste.

El sistema cuenta con un conector DB25 hembra, tal y como se muestra en la Figura 3.16, el cual debe ser alimentado a una fuente a 20 V como máximo. Gracias a esta alimentación, se puede ajustar el sistema para que tome un rango de entre 10 V y -10V. Si el sistema se alimenta con más voltaje, es posible provocar daños en el hardware.

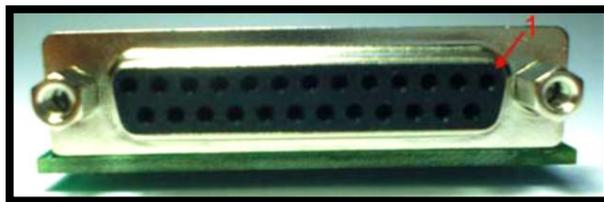


Fig. 3.16. Conector Jack DB25

Esta parte debe ser configurada por medio de pines, los cuales muestran a donde deben ser conectados, las entradas de alimentación y sus restricciones.

Para el caso de la lectura del sistema existe un conector JP5 macho, el cual da el resultado en base al rango mencionado anteriormente, entre los -10 V y 10 V. dicha conexión se muestra en la Figura 3.17.

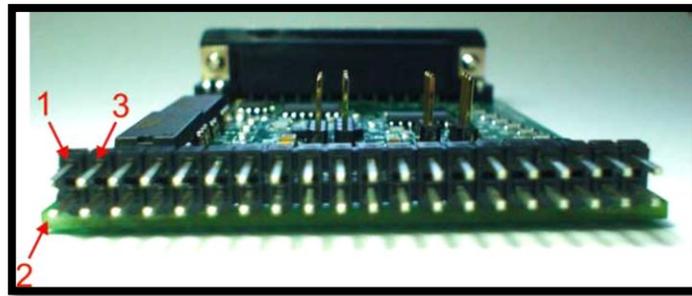


Fig. 3.17. Conector JP5

El conector también presenta varios pines de configuración, en los cuales deben entrar señales lógicas específicas para su correcto funcionamiento, tal y como e muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Pines de configuración para el conector JP5

Nombre	Pin	Spartan3			Opciones
		A1*	A2	B1	
GND	1				Tierra común
Vec5V	2				Alimentación
Vec3.3V	3				Alimentación
ENC_AX+	28	E4	A10	G15	
ENC_AX-	26	F4	A9	E16	
ENC_BX+	24	G4	B8	D16	
ENC_BX-	22	M10	B7	C16	
ENC_AY+	27	G5	B10	F15	
ENC_AY-	25	E3	A8	E15	
ENC_BY+	23	F3	A7	D15	
ENC_BY-	21	M7	B6	C15	
DAC_DIN	15	C2	D10	R7	SLEW = SLOW
DAC_LDAC	19	B1	B5	M6	SLEW = SLOW
DAC_RST	17	C1	B4	N6	SLEW = SLOW
DAC_SCLK	13	R5	D8	T7	SLEW = SLOW
DAC_SYNC	11	T5	D7	R10	SLEW = SLOW
ADC_DCLK	9	R6	E7	P10	SLEW = SLOW
ADC_BUSY	5	N7	D5	T3	SLEW = SLOW
ADC_DIN	7	T8	D6	N11	SLEW = SLOW
ADC_DOUT	4	N8	E6	C10	SLEW = SLOW

En base al canal por el que se necesite adquirir datos es como se elaborara el tren de bits correspondiente para la configuración adecuada del convertidor. Sin embargo, debido a

que el modulo en hardware de la tarjeta DAS fue desarrollado para ser genérico, es posible adquirir datos de manera simultánea para los cuatro canales que posee el dispositivo. Pese a esto, el sistema de la tarjeta DAS fue desarrollado para usar dos canales exclusivamente de forma simultánea. Es por esto que el proceso completo de adquisición y autoajuste contempla un solo canal (Canal 0). En la figura 3.18 se puede observar la forma en que se debe configurar el sistema de adquisición de datos. Como se menciono anteriormente, es posible obtener datos de los cuatro canales, aunque físicamente solo se puedan medir dos.

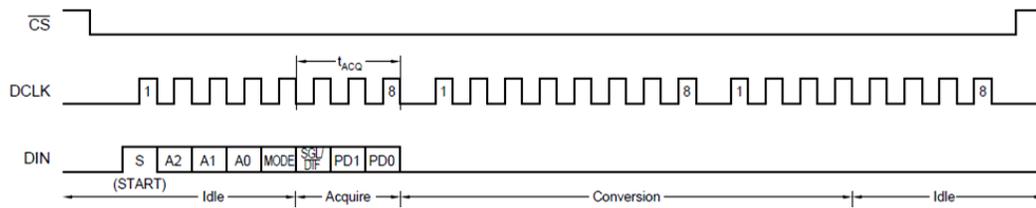


Fig. 3.18. Tren de configuración para el convertidor en el sistema DAS

Las entradas, tanto del sistema de acondicionamiento como el sistema de adquisición de datos, cuentan con conectores del tipo PLUG y JACK, de esta manera se reduce el margen de error que pudiese una conexión ordinaria y se incrementa el agarre entre los dos dispositivos.

3.3.5. Sistema de ajuste automático de ganancias y adquisición de datos

Debido a su principio de funcionamiento, el módulo de acondicionamiento automático de ganancias depende directamente de la adquisición de datos hecha por la tarjeta DAS. En esta etapa, el sistema comienza a discretizar los datos de entrada de la señal eléctrica a una frecuencia de 10 kHz después de haber sido acondicionada. Los valores que son adquiridos comienzan a ser evaluados en un registro habilitado después de cada ciclo de adquisición. De esta forma, el sistema logra detectar el valor más grande medido después de un tiempo de prueba estándar. En base a ese valor obtenido es como el sistema de ajuste automático selecciona el valor más adecuado para la señal en general.

Una vez hecha la selección, el sistema envía una señal binaria al multiplexor analógico de la tarjeta de acondicionamiento, cambiando de esta forma la amplitud de la señal de entrada. La forma en que la señal lógica entra al multiplexor se obtiene gracias a la conmutación de tres transistores ubicados en la tarjeta. En la Figura 3.19 se muestra el nuevo diseño del sistema de acondicionamiento, el cual posee un sistema de conmutación basado en transistores.

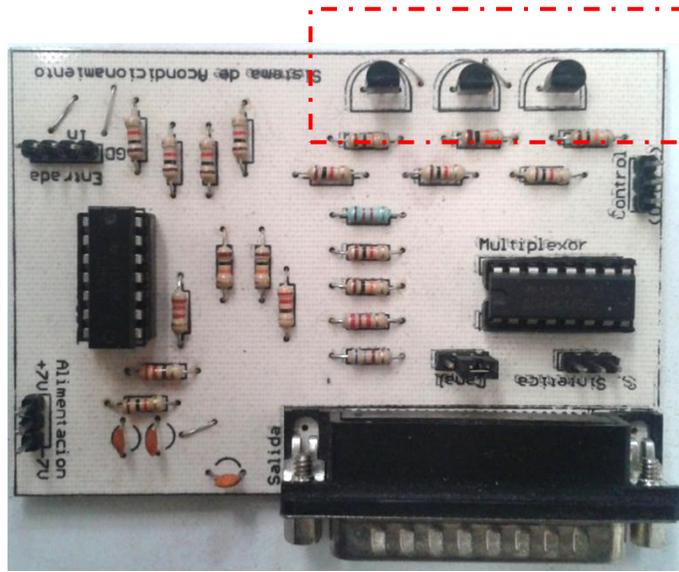


Fig. 3.19. Transistores encargados de la conmutación en el multiplexor

Gracias a la frecuencia de muestreo y a la velocidad de operación que tiene la plataforma, la señal adquirida es registrada de una forma precisa, además de poseer un mínimo margen de error gracias al tipo de convertidor que posee el sistema DAS.

Una vez realizada la selección automática es posible comenzar la adquisición de datos de la señal eléctrica ya acondicionada. Para esto, la señal adquirida es guardada en la memoria estática de la FPGA, para después enviar todos los datos a la computadora. De este modo es posible registrar los datos sin hacer un cambio significativamente grande en la frecuencia de muestreo; de lo contrario si se quisiera enviar dato por dato después de haber sido adquirido, la señal resultante podría presentar una resolución mucho más baja, debido a la reducción en la frecuencia de muestreo.

3.3.5.1. Protocolo de comunicación USB

Tras realizar la adquisición de datos y guardarlos en la memoria estática de la plataforma programable, el siguiente paso consistió en enviar la información medida a una computadora para el procesamiento de la señal.

Para ello, la mejor opción para transferir datos fue el protocolo USB. Gracias a esta herramienta era fácil enviar los datos al ordenador debido a que es una plataforma accesible para todos los equipos portátiles, ya que todas las computadoras modernas poseen puertos USB para poder conectar periféricos, a diferencia el RS- 232.

Debido a que la plataforma FPGA no contaba con un periférico de ese tipo, se desarrolló una tarjeta que pudiese soportar el protocolo de comunicación, mismo que se puede observar en la figura 3.20.

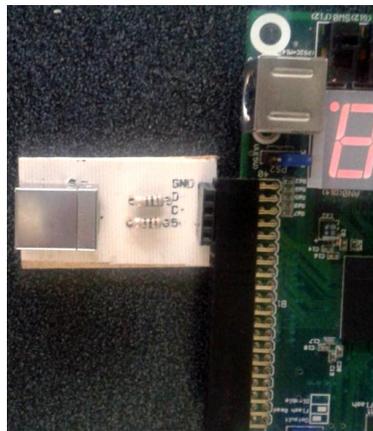


Fig. 3.20. Tarjeta USB acoplada a la plataforma FPGA

Al igual que el sistema DAS, el control para el protocolo de comunicación USB fue desarrollado en hardware, usando diferentes módulos para su integración al proyecto. La forma de transferencia entre los dos dispositivos consiste en enviar un paquete de 128 bits. Los datos almacenados en la memoria estática SRAM serían enviados uno por uno en paquetes de 128 bits de manera independiente., así como se muestra en la figura 3.21. Debido a que la longitud de cada dato registrado es de apenas 12 bits, el espacio restante se deja con valores nulos que no puedan ser capaces de alterar la señal medida.

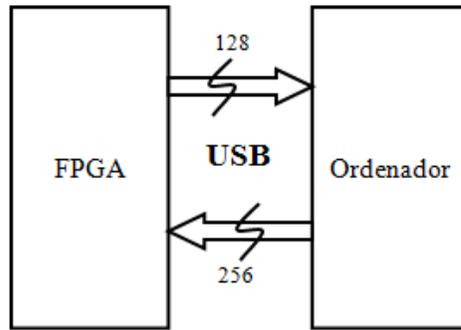


Fig. 3.21. Transferencia de datos mediante el protocolo USB

Es necesario aclarar que el sistema tiene la capacidad de registrar un total de 100,000 datos dentro de la memoria estática, lo que da un aproximado de 10 segundos de grabación a una frecuencia de muestreo de 10 kHz. De la misma forma, la memoria estática tiene la característica de guardar los datos aun cuando el sistema se llegue a reiniciar o apagar.

3.3.5.2. Sensores

La forma de medir la corriente en una fase fue usando un sensor de efecto Hall. Al fluir la corriente por un conductor, el sensor genera una señal proporcional en voltaje, debido a la interacción entre el campo magnético inducido por el sensor y la corriente variante en el tiempo que fluye a través del mismo. El sensor usado para realizar las mediciones se puede visualizar en la Figura 3.22.

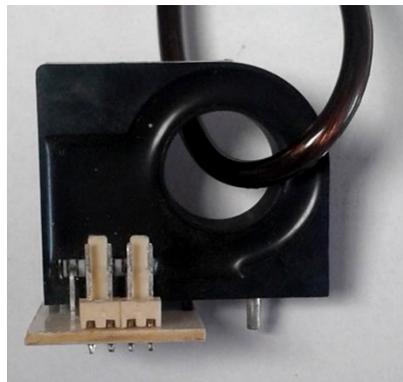


Fig. 3.22. Sensor usado para la medición de corriente

Para este caso en particular, el campo magnético inducido por el sensor es generado al alimentar el mismo con un voltaje positivo y negativo. Esta toma de energía se puede obtener directamente del sistema de acondicionamiento, el cual posee en su entrada el acoplamiento necesario para que el sensor pueda acoplarse directamente, tal y como se ve en la Figura 3.23.

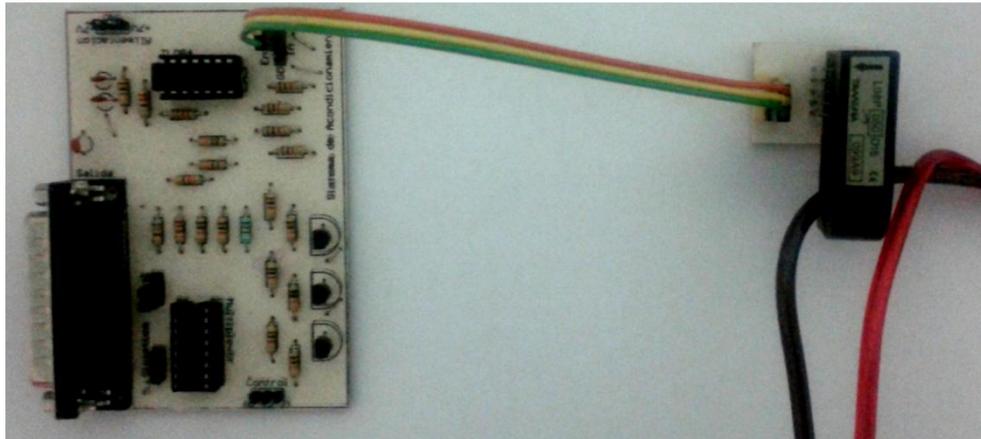


Fig. 3.23. Sistema de acondicionamiento acoplado al sensor de efecto Hall

La señal entregada por el sensor es proporcional a la corriente que pasa por el conductor, debido a ello la respuesta del transductor es una onda sinusoidal, cuya magnitud está dada en voltaje. Dicha señal se puede observar en la Figura 3.24.

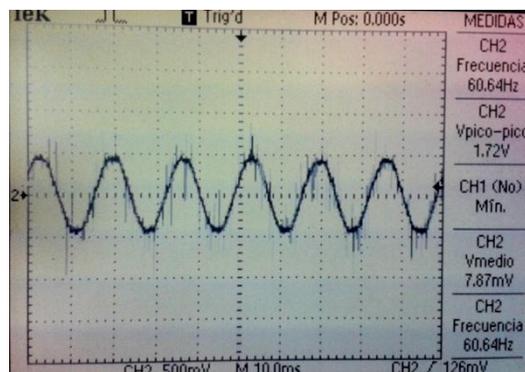


Fig. 3.24. Respuesta del sensor ante una carga resistiva

3.3.5.3. Integración final del sistema

La manera en que se puede integrar todo el sistema depende de dos puntos importantes. El primero consiste en el acoplamiento físico de todos los sistemas, incluyendo las tarjetas y los sensores. El segundo punto implica el control de todos los sistemas de forma sistemática.

Debido al tipo de conexiones que posee la tarjeta DAS, la FPGA y los sensores de efecto Hall, la manera de construcción de las tarjetas se hizo de tal forma que todos los dispositivos pudiesen interconectarse sin algún tipo de inconveniente. El sistema completo de adquisición de señales se muestra a continuación, en la Figura 3.25.

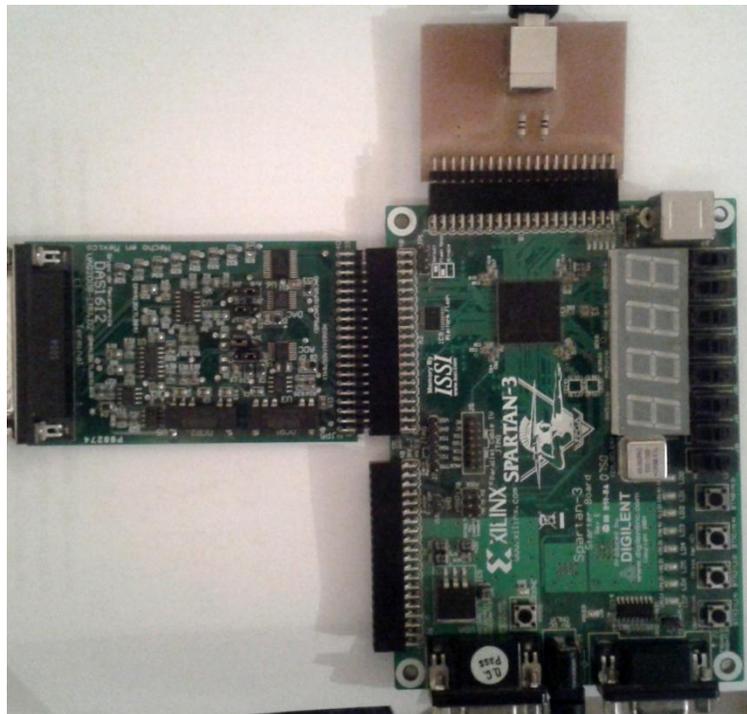


Fig. 3.25. Sistema completo de adquisición de señales

La manera en que el sistema se comporta es tipo secuencial, activando los diferentes módulos de acuerdo a la función previamente realizada. De esta forma la señal eléctrica es medida por el sensor de efecto Hall para después ser discretizada por el sistema de la tarjeta DAS. Se procesa un tiempo de $87 \mu\text{s}$ para calcular la mejor ganancia para aumentar o disminuir la señal de forma analógica. El proceso de adquisición se vuelve a activar,

mientras que los datos capturados se van almacenando en la memoria estática SRAM y, cuando la memoria se satura, los datos registrados son enviados uno por uno al ordenador.

Todo el proceso general del sistema ha sido desarrollado en hardware usando una máquina de estados finitos, la cual considera las entradas y las salidas en cada uno de los módulos para dar una respuesta secuencial.

El proceso completo de adquisición en hardware se puede dividir en tres partes importantes, la etapa de selección y ajuste automático de ganancias, la etapa de adquisición y registro de datos, y la etapa de transferencia y comunicación USB. Para poder visualizar el proceso en el sistema se encuentran se han usado los leds que posee la FPGA para que el usuario se pueda ubicar entre las diferentes etapas. Los leds usados son los más significativos de la plataforma.

Para interconectar los dispositivos que no tienen un conector especial, se usaron cables especiales, cuyas terminales aportaban un mejor agarre entre los sensores y las tarjetas, disminuyendo la posibilidad de que hubiese falsos contactos en el sistema.

3.4. Interfaz de usuario

La implementación en software fue la segunda etapa del proyecto. Se elaboró una plataforma que fuese práctica e intuitiva con usuario, sin dejar de tener los aditamentos necesarios para que se pudiese complementar con la estructura en hardware. De este modo, los datos registrados previamente en el sistema de adquisición podrían ser guardados como datos digitales dentro de un ordenador, para posteriormente ser analizados y procesados.

La plataforma fue diseñada en gtkmm, una interfaz oficial de C++ que sirve para diseñar interfaces gráficas y de usuario. Esta expansión tiene como ventaja el ser un software libre distribuido bajo la Licencia Pública General Reducida de GNU, por lo que no es necesario pagar para su uso.

La interfaz se compone de una sola ventana en donde aparecen diferentes herramientas para manipular la FPGA. Dicha interfaz se muestra en la Figura 3.26.

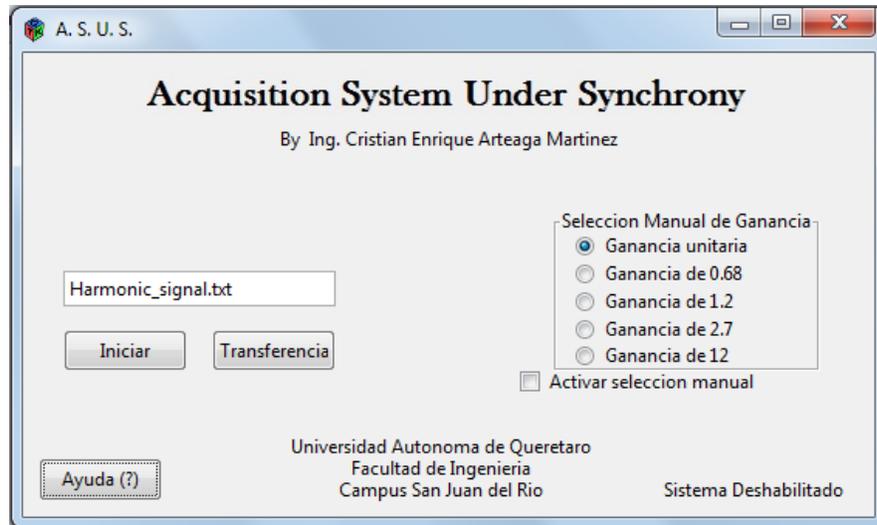


Fig. 3.26. Interfaz de usuario

La interfaz consta de dos secciones importantes, el inicio del proceso de adquisición de datos y el apartado de selección manual de ganancias. Gracias a este último es posible usar la selección automática diseñada en hardware, simplemente ajustar la ganancia de forma manual. Aquí se usa el mismo software para la selección y de ese modo cambiar el modo de operación en el multiplexor, en vez de usar los jumpers que existían en el modelo anterior.

Para comenzar con el proceso de adquisición y la transferencia de datos se deben usar los botones del lado izquierdo de la interfaz, los cuales controlaran la forma en que opera la FPGA. Sin embargo los cambios de operación entre los procesos internos de la plataforma siguen funcionando con la FPGA, por lo que ambos sistemas deben interactuar en conjunto para un buen desempeño.

La interfaz también cuenta con un botón de ayuda, la cual guiara al usuario de manera que sepa usar la interfaz y la plataforma en hardware, por si llega a ocurrir algún imprevisto durante el proceso.

Finalmente, la conexión entre el sistema en hardware y el sistema en software puede ser monitoreado gracias a un indicador montado en la interfaz, el cual indica si existe algún error de conexión entre las dos plataformas.

3.5. Pruebas del sistema

Para probar la eficiencia del sistema, se hicieron varias lecturas con el fin de analizar la capacidad de autoajustar los valores de la ganancia en el sistema, el cual serviría para mejorar los índices de la calidad de la energía.

Las pruebas consistieron principalmente en la adquisición de datos usando el sistema de acondicionamiento, y la adquisición de la señal sin aquel dicho sistema. Las pruebas se hicieron a una frecuencia de muestreo de 10 kHz.

3.5.1. Pruebas basadas en un generador de señales

La primera prueba que se llevó a cabo fue la adquisición de una señal perfecta, la cual posible gracias al uso de un generador de señales. Con este dispositivo fue posible ajustar la frecuencia de la onda a 60 Hz (la misma frecuencia que proporciona la CFE en la distribución de energía eléctrica), simulando así una señal eléctrica común.

De la misma forma, con el generador se pudo ajustar la amplitud de la señal eléctrica, siendo este la principal característica del proyecto. Las pruebas elaboradas en esta etapa se hicieron contrastando la respuesta de la medición con el sistema de acondicionamiento y la señal medida directamente.

3.5.2. Pruebas basadas en cargas lineales

La segunda prueba consistió en la adquisición y manipulación de la respuesta arrojada por el sensor de efecto Hall. En este caso, el sensor fue usado para medir una carga lineal, cuya respuesta no tuviese tantas variaciones.

La carga seleccionada consistió en una resistencia de agua de 1000 W, y se puede observar en la Figura 3.27.

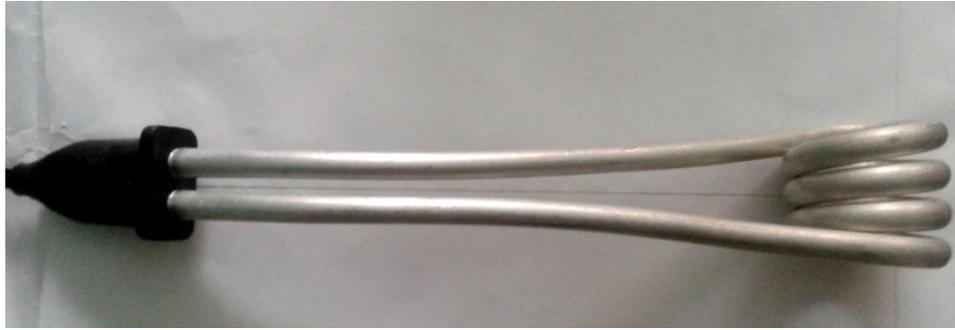


Fig. 3.27. Resistencia de agua usada como carga resistiva

Se usó una resistencia de agua debido a la gran cantidad de energía que esta consume. Gracias a esto la corriente que transite por los cables de alimentación en la resistencia fueron lo suficientemente grandes como para que el sensor de efecto Hall pudiese funcionar.

3.5.3. Pruebas basadas en cargas no lineales

La última prueba consistió en medir la respuesta del sensor de efecto Hall sobre una carga no lineal. En esta prueba, además de modificar la amplitud de la señal obtenida, se calcularon los principales índices de la calidad de la energía, a diferencia de las dos pruebas anteriores.

Esta prueba consiste en inducir armónicos en la forma de onda fundamental que posee la corriente eléctrica en la alimentación de la carga. Con ello se podrá visualizar los efectos que poseen este tipo de cargas, cuyos componentes están constituidos por impedancias inductivas y resistivas principalmente.

La carga seleccionada en esta prueba consistió en un horno de microondas. Gracias a que se trata de una carga no lineal, esta genera una serie de anomalías en la red eléctrica, haciendo posible el cálculo para la calidad de la energía. Así mismo, esta representa una carga cuyo consumo de electricidad es considerable, por lo que no habría problema en poder visualizar la corriente medida por el sensor. La carga usada se muestra en la Figura 3.28.

Las pruebas se realizarán únicamente con el sistema de acondicionamiento acoplado.



Fig. 3.28. Carga usada para la generación de armónicos

4. Resultados y análisis

En este capítulo se reportan los datos adquiridos a lo largo de las tres pruebas hechas con el sistema de adquisición de señales. Al hacerlo, se muestran de forma gráfica el comportamiento de cada señal, mientras que en la última prueba se cuantifican los índices de la calidad de la energía más importantes, mostrando las ventajas que posee el sistema de acondicionamiento aplicado al modelo ya preestablecido.

Debido a que el sistema solo tiene la capacidad de registrar los datos a través de un documento de texto, tanto las gráficas como los cálculos se harán con en MATLAB (Perez, 2002).

4.1. Interconexión entre el sistema en hardware y en software

Las primeras pruebas para la validación del sistema consistieron en la verificación de la conexión entre la plataforma en hardware basado en FPGA y la interfaz de usuario en la computadora.

Para ello se dejó al sistema medir datos constantes provenientes de una fuente de alimentación. Estas pruebas se hicieron sin usar el sistema de acondicionamiento elaborado, ya que su único propósito consistía en poner a prueba la conexión entre plataformas mediante basada en USB.

Las pruebas hechas bajo señales constantes se muestran en la Figura 4.1 en donde se puede observar el error mínimo que posee el convertidor del sistema. Las pruebas se hicieron sobre cinco niveles de voltaje diferentes. En color azul el nivel de tensión eléctrica es de 7.5 V, en color verde el nivel es de 5.2 V, en negro el nivel es de 3.3 V, en rojo el nivel esta en 2.5 V y en amarillo el nivel está a 0.5 V.

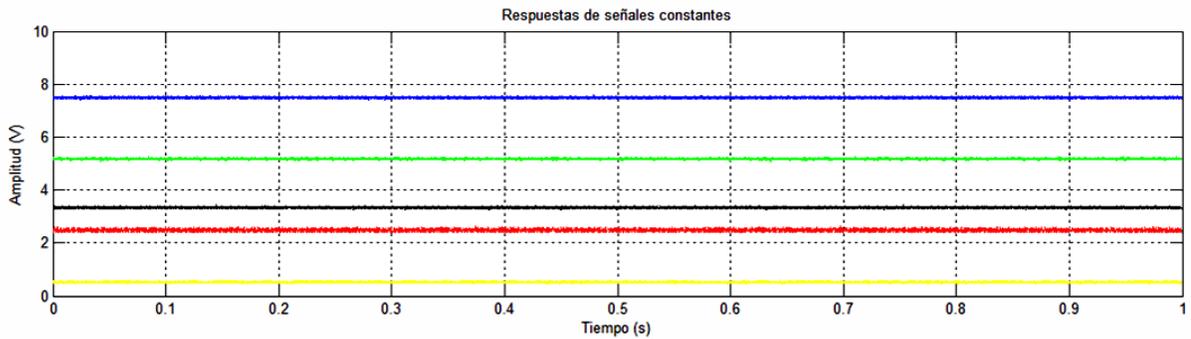


Fig. 4.1. Mediciones hechas sobre señales constantes

Las principales características de la señal medida se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Valores de las medidas realizadas a una tensión eléctrica constante

Valor establecido (V)	Valor promedio (V)	Error promedio (%)	Valor máximo (V)	Valor mínimo (V)
0.5	0.517	3.4	0.625	0.4443
2.5	2.4872	0.512	2.6514	2.3730
3.3	3.3331	1.003	3.4424	3.2227
5.2	5.177	0.4423	5.2881	5.0781
7.5	7.4916	0.112	7.5928	7.4023

Los datos arrojados muestran un porcentaje mínimo de error respecto al valor seleccionado en la fuente de voltaje, resaltando la alta precisión y exactitud que posee el sistema de adquisición sobre señales constantes. Al contar con estas características es posible aminorar posibles errores en el análisis de datos, provocados por el propio convertidor.

4.2. Análisis de datos en el generador de señales

Para el generador de señales se elaboraron varias pruebas, las cuales consistían en adquirir un número determinado de datos en un intervalo de tiempo de 0.25 segundos, en el cual se podía ver el efecto que tenía el sistema de acondicionamiento sobre una señal sintética.

La frecuencia a la que se ajustó la señal fue de 60 Hz, mientras que la frecuencia de muestreo del sistema se mantuvo en los 10 kHz. La diferencia de amplitud se puede observar en la Figura 4.2, en donde la señal original en color azul se amplifica 10 veces, dando una señal de mayor amplitud; dicha señal se muestra en color rojo.

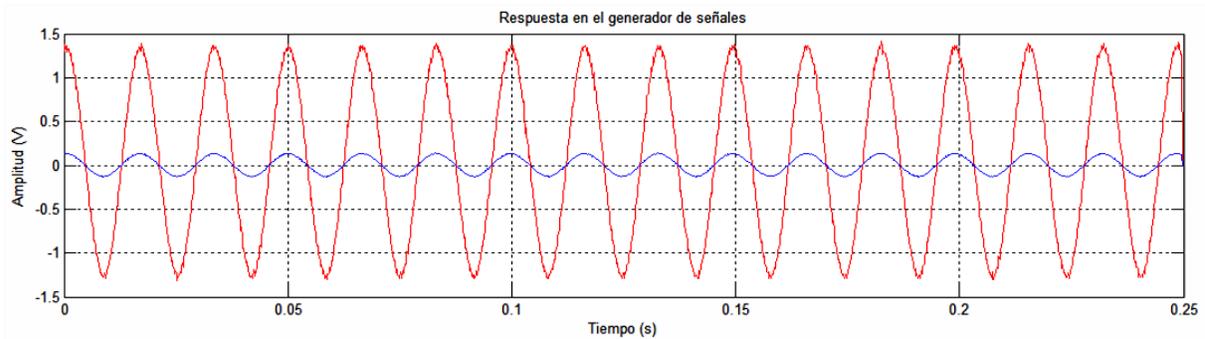


Fig. 4.2. Amplificación de una señal convencional sobre una ganancia de 10

De forma inversa, cuando el sistema detecta una señal grande en amplitud que pueda dañar al sistema de adquisición, esta se reduce por un factor establecido, haciéndola más pequeña. En la Figura 4.3 se muestra como una señal excesivamente grande se reduce al entrar al sistema de acondicionamiento.

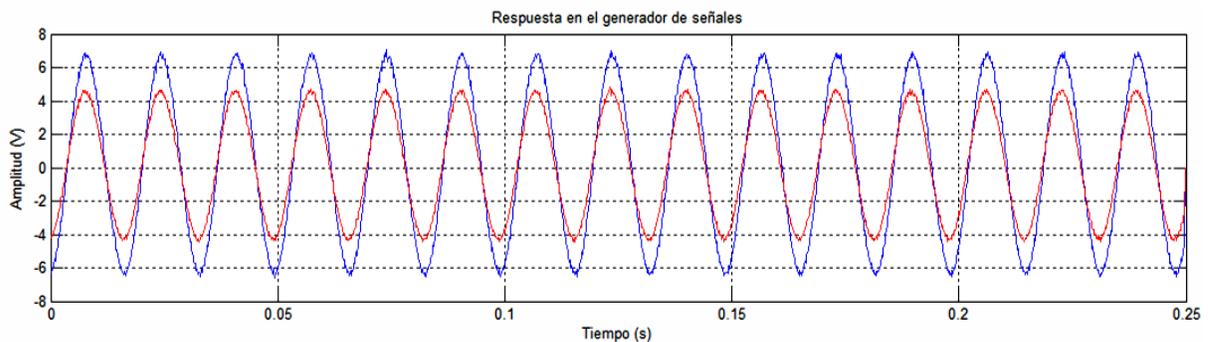


Fig. 4.3. Reducción de una señal bajo una ganancia de 0.68

Para el caso de la figura 4.3 la señal de entrada se representa de color azul. Dicha señal, al ser relativamente grande, activa el sistema para reduzca su amplitud, adecuándola para prevenir posibles daños en el sistema.

La Tabla 4.2 muestra una comparación entre las principales características de las dos señales medidas previamente, además de varias pruebas más hechas con fin de visualizar el efecto del sistema de acondicionamiento a través de cada una de las ganancias implementadas en el multiplexor.

Tabla 4.2. Comparación entre las señales originales y después de su acondicionamiento

Señal original			Señal acondicionada			Ganancia
V_p (V)	V_{pp} (V)	V_{RMS} (V)	V_p (V)	V_{pp} (V)	V_{RMS} (V)	
7.0557	13.6475	4.6106	4.8311	9.2969	3.1313	0.6812
0.1426	0.2729	0.0924	1.411	2.7246	0.9233	9.9924

4.3. Análisis de corriente en cargas lineales

Las primeras pruebas en donde se uso el sensor de efecto Hall fueron hechas con cargas lineales, o bien, cargas puramente resistivas. En este caso la carga usada consistió en una resistencia de agua de 1 kW de potencia, la cual consume una gran cantidad de corriente cuando está en funcionamiento, haciendo visible la señal para el sensor.

La Figura 4.4 muestra la comparación entre la señal medida directamente por el sistema de adquisición de señales y la señal acondicionada. Ambas, al ser cargas resistivas, no presentan algún tipo de anomalía en sus parámetros principales (frecuencia y amplitud). La señal original se muestra en color azul, mientras que la señal acondicionada está representada de color rojo.

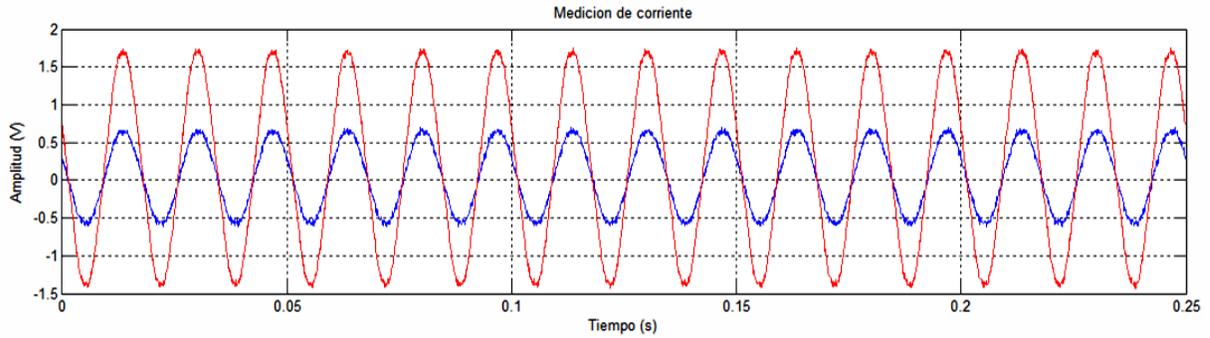


Fig. 4.4. Comparativa entre la señal original y la señal acondicionada

Debido a la naturaleza puramente resistiva de las señales, ninguna presenta algún tipo de distorsión armónica visible. Sin embargo, al analizar sus frecuencias fundamentales, los resultados indicaron una distorsión más clara en la señal amplificada. La Figura 4.5 muestra la amplitud de los armónicos en ambas señales, siendo la de color azul la señal original, mientras que la roja es la señal amplificada.

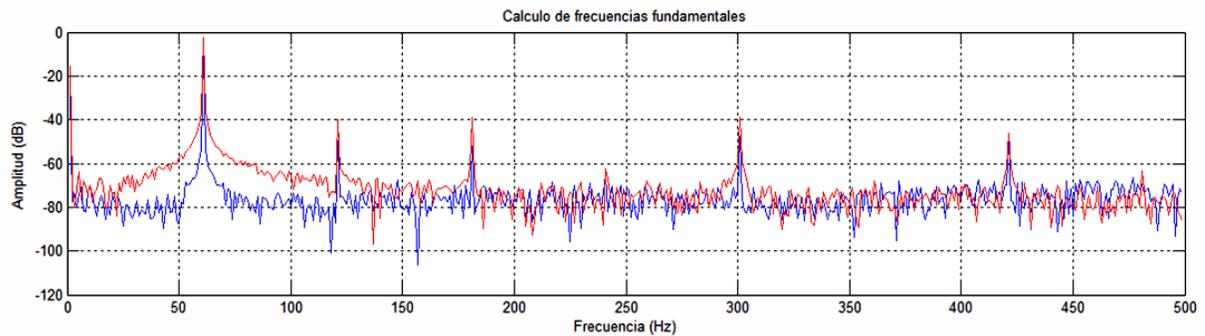


Fig. 4.5. Comparativa de frecuencia entre las dos señales medidas

De esta forma, la Figura 4.5 muestra que ambas señales poseen una frecuencia fundamental en los 60 Hz, debido a que es en esa posición donde se encuentra el valor más amplitud más grande. Así mismo, se puede visualizar como otras magnitudes, de -40 dB aproximadamente, existen en los armónicos de la frecuencia fundamental cercanas a los 120, 180 y 300 Hz. Con ello, al calcular el coeficiente de distorsión armónica sus resultados serán más apegados a la realidad.

En esta etapa del proyecto, se realizaron diez mediciones distintas bajo la misma carga, usando el sistema de adquisición de señales completo. La Tabla 4.3 muestra todas las mediciones hechas para cada señal adquirida, calculando los índices de la calidad de la energía más importantes.

Tabla 4.3. Mediciones realizadas sobre la carga resistiva

Numero de prueba	V_p (V)	V_{pp} (V)	V_{RMS} (V)	THD
1	1.7480	3.1787	1.1001	6.9466%
2	1.7773	3.2227	1.1037	6.8985%
3	1.7529	3.1885	1.1204	6.7923%
4	1.7529	3.1885	1.1012	6.5341%
5	1.7529	3.1885	1.1011	7.0378%
6	1.7480	3.1836	1.1012	6.9529%
7	1.7578	3.1934	1.0992	6.9419%
8	1.7529	3.1885	1.1023	6.4578%
9	1.7578	3.1934	1.1004	7.4394%
10	1.7578	3.2031	1.1008	6.8612%

Los datos analizados también comprobaron que el sistema posee una alta precisión en sus mediciones al no haber variaciones tan drásticas entre un valor y otro.

4.4. Análisis de corriente en cargas no lineales

Las últimas pruebas se basaron en calcular los índices de la calidad de la energía de corriente sobre cargas que tuviesen componentes inductivos o capacitivos, lo cual provocaría una alteración sobre la forma de onda fundamental.

Las pruebas se hicieron sobre el horno de microondas, el cual tuvo dos diferentes modalidades de medición.

- ❖ Prueba sobre horno de microondas
- ❖ Prueba de arranque sobre horno de microondas

Pruebas en las cargas

Las mediciones hechas en todas las cargas se hicieron en pleno funcionamiento. Gracias a la frecuencia de muestreo que posee el sistema, se pudo obtener una señal nítida de la corriente consumida por el aparato, tal y como se muestra en la Figura 4.6, en donde se puede apreciar los efectos de este tipo de cargas eléctricas.

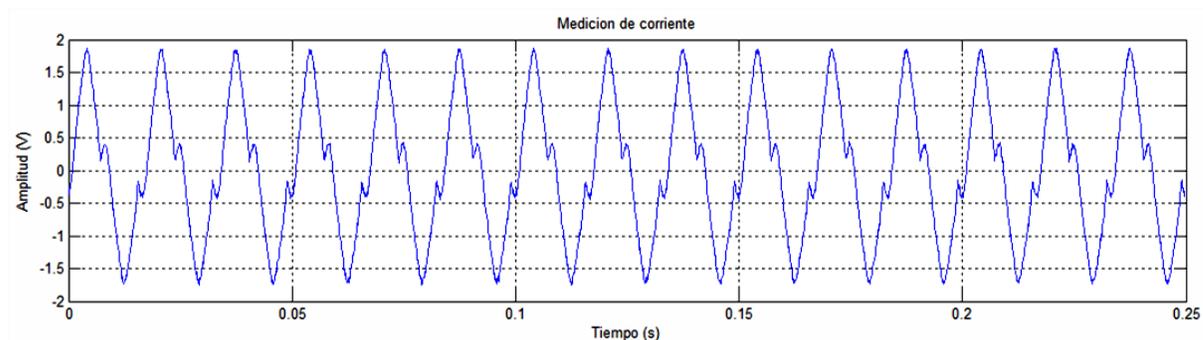


Fig. 4.6. Influencia de un horno de microondas en la red eléctrica

La segunda medición fue hecha a raíz de medir el consumo de corriente durante el arranque del horno, Figura 4.7. En ella se puede visualizar el tiempo de espera, la magnitud del pico de corriente y la señal nuevamente distorsionada por los armónicos.

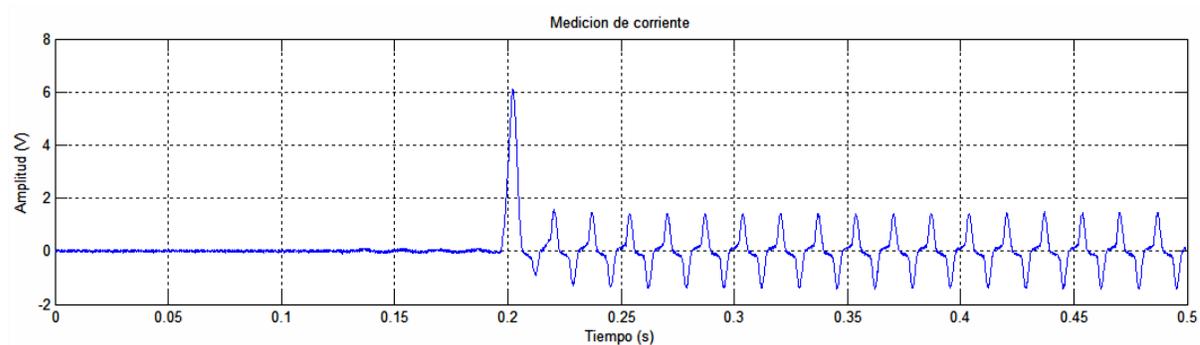


Fig. 4.7. Prueba durante el arranque del horno de microondas

La Figura 4.8 muestra también los principales armónicos y la magnitud en decibelios de la segunda prueba, en donde se puede percibir la gran distorsión que sufre la señal durante el arranque de la máquina.

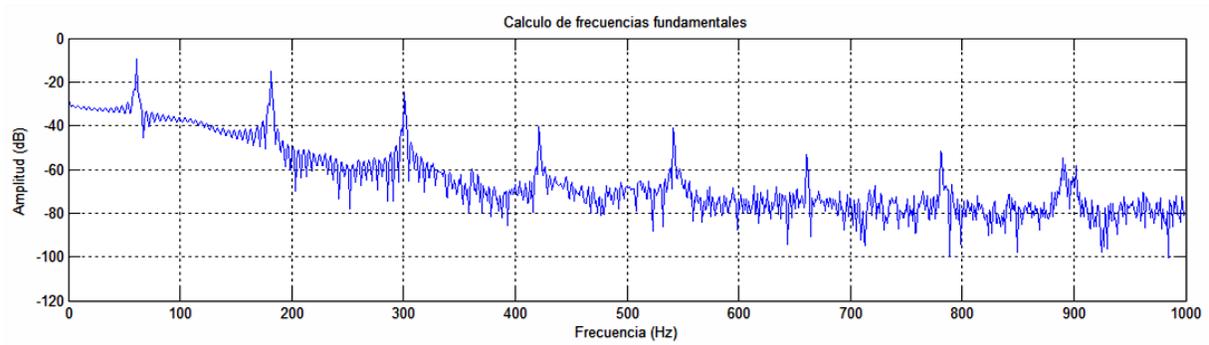


Fig. 4.8. Frecuencia fundamental y armónicos detectados durante el arranque de la maquina eléctrica

De esta forma, en la Figura 4.8 se muestra lo grandes que son los armónicos en la señal, pese a que la señal fundamental sigue estando en los 60 Hz.

Los resultados de los índices más importantes para cada una de las pruebas realizadas fueron los siguientes:

Tabla 4.4. Mediciones realizadas sobre cargas no lineales

Prueba	V_p (V)	V_{pp} (V)	V_{RMS} (V)	V_{cresta}	THD
Horno de microondas	1.9189	3.6865	1.0488	1.8297	46.936%
Prueba de arranque del horno de microondas	6.0986	7.5635	0.6872	8.874	80.2233%

5. Conclusiones y prospectivas

5.1. Conclusiones

La implementación de este proyecto, tanto en software como en hardware, tiene gran relevancia respecto a futuras aplicaciones que se puedan dar dentro de la institución, relacionadas con la adquisición de señales. Gracias a él, se pudo elaborar un sistema basado en FPGA capaz de discretizar señales analógicas con una gran resolución, permitiendo así analizar datos de señales que pudiesen presentar frecuencias altas. Si bien, el enfoque principal de dicho proyecto consistió en el análisis de la calidad de la energía en señales eléctricas, esté también es capaz de adquirir señales que no estén relacionadas enteramente con la electricidad, sean señales biométricas, de temperatura o de deformación, las cuales necesiten de un procesamiento y análisis posterior. Es aquí donde se puede resaltar la utilidad del sistema de acondicionamiento, el cual modifica la amplitud de la señal de entrada, adecuándola para obtener mediciones de mayor resolución o, en caso de ser señales grandes, reduciendo su amplitud para proteger el sistema.

Gracias a la versatilidad que posee el sistema respecto a su interfaz de comunicación, es posible usar cualquier ordenador o computadora que posea un puerto USB para hacer el análisis de cualquier señal medida, lo cual hace al sistema completo una buena herramienta que, además de versátil, es fácil e intuitiva de usar.

La interacción que existe entre el usuario y el sistema hace que el proyecto pueda ser además una herramienta didáctica importante en la elaboración de prácticas o proyectos en las materias relacionadas con el enfoque de estudio, ya sea electricidad o análisis de señales. Esto debido a que la interfaz, pese a ser una plataforma sencilla desarrollada en software, tiene las herramientas necesarias para usar el sistema de forma secuencial, haciendo que el sistema sea sencillo para quien este operando el trabajo.

La frecuencia de muestreo con la que fue diseñado el sistema en hardware hace que cualquier señal quede nítida una vez que se ejecute la adquisición, y así reducir el error en los procesos de análisis.

Por otra parte, los algoritmos implementados para la medición de la calidad de la energía obtuvieron resultados satisfactorios a través de las diferentes cargas en donde se analizaron. En el caso de las cargas puramente resistivas, los porcentajes arrojados para el coeficiente de distorsión armónica siempre se mantuvieron debajo del 5%, así como en el valor cresta, el cual estuvo debajo del 1.5. En cargas con cierta distorsión en su forma de onda fundamental los valores de THD y factor cresta fueron capaces de darnos a conocer el grado de distorsión que presentaba la señal influenciada por sus armónicos.

5.2. Prospectivas

Sin embargo, existen varias prospectivas que deben considerarse a futuro para el mejoramiento del sistema como conjunto. Entre ellas existe la desventaja que el sistema de acondicionamiento solo fue diseñado para medir señales en corriente. Si bien es posible medir señales de voltaje con el sistema, el enfoque de la calidad de la energía obliga a que el acondicionamiento para esta señal sea reestructurado, debido a los grandes niveles de tensión que se manejan en las máquinas de potencia, o simplemente máquinas que funcionen con corriente alterna. Así mismo, el sistema solo es capaz de adquirir una sola señal a la vez; esto influye directamente con el análisis trifásico de máquinas de potencia, el cual necesita forzosamente de tres canales para contemplar los valores de potencia real, reactiva y aparente, factor de potencia y otros cuantos índices de la calidad de la energía.

Otra desventaja importante que posee el sistema de acondicionamiento recae en la necesidad de cambiar el dispositivo de conmutación que hace posible la selección automática entre las ganancias predefinidas. Esto se debe a que el multiplexor usado para el desarrollo de este proyecto tiene una tolerancia de alimentación considerablemente baja, haciendo que señales grandes que no dañan el sistema, puedan presentar saturación en sus crestas y valles, deformando la señal original.

Un trabajo a futuro sobre este proyecto recae en el diseño de un sistema capaz de adquirir señales en una medición continua o ininterrumpida, la cual pueda ser capaz de adquirir un dato y enviarlo inmediatamente al ordenador sin la necesidad de guardar los datos adquiridos en la memoria estática o dinámica de la FPGA. Con esto se podría obtener un monitoreo constante sobre una señal determinada, la cual pudiese tener una aplicación directa en los sistemas de control.

6. Referencias

Abonza Covarrubias, J. (2008). *Sistema de supervisión, control y adquisición de datos para el ahorro de energía eléctrica*. México.

Alcande San Miguel, P. (2011). Electrotecnia. En P. Alcande San Miguel, *Electrotecnia* (pág. 233). Madrid: Ediciones Paraninfo.

Axelson, J. L. (2005). USB Complete: everything you need to develop USB peripherals. En J. L. Axelson, *USB Complete: everything you need to develop USB peripherals* (págs. 2-6). Madison: Lakeview Research LLC.

Balseca Cabrera, M. (2012). *Monitero de la calidad de la energía eléctrica en torno reconvertido a CNC del laboratorio de manufactura de la UAQ*. Universidad Autonoma Querétaro.

Bollen, M. H., & Gu, I. Y. (2006). Signal processing of power quality disturbances. En M. H. Bollen, & I. Y. Gu, *Signal processing of power quality disturbances* (pág. 6). Canadá: MOHAMED E. EL-HAWARY, SERIES EDITOR.

Caramia, P., Carpinelli, G., & Verde, P. (2009). Power Quality Indices in Liberalized Markets. En P. Caramia, G. Carpinelli, & P. Verde, *Power Quality Indices in Liberalized Markets* (pág. 24). West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.

Catterson, V. M., Bahadoorsingh, S., Rudd, S., McArthur, S. D., & Rowland, S. M. (2011). Identifying Harmonic Attributes From Online Partial Discharge Data. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 26 (3), 1811-1819.

Chen, S. (2003). A Quantitative Analysis of the Data Acquisition Requirements for Measuring Power Quality Phenomena. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 18 (4), 1575-1577.

Coughlin, R. F., & Driscoll, F. F. (1999). Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. En R. F. Coughlin, & F. F. Driscoll, *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales* (págs. 290-296). México: Prentice Hall.

Espinosa Ramírez, H. M. (2007). *Sistema de medición remota de energía eléctrica*. Oaxaca.

Forcada G., J. (1996). El Amplificador Operacional. En J. Forcada G., *El Amplificador Operacional* (págs. 1-8). México: Alfaomega.

Granados Liberman, D., Romero Troncoso, R. J., Osornio Ríos, R. A., García Pérez, A., & Cabal Yépes, E. (2011). Techniques and methodologies for power quality analysis and disturbances classification in power systems: a review. *IET Generation, Transmission & Distribution* , 5, 519-529.

Gu, Z., Tian, E., & Jinliang, L. (2013). Reliable H_{∞} filter design for sampled-data systems with consideration of probabilistic sensor signal distortion. *IET Signal Processing* , 7, 420-426.

Kuo, B. C. (2007). Sistemas de control digital . En B. C. Kuo, *Sistemas de control digital* (pág. 13). México: Grupo Editorial Patria.

Lara Cardoso, J. (2008). *Monitoreo de la calidad de la energía eléctrica de la línea*. Universidad de Guanajuato.

Mazin, H. E., Xu, W., & Huang, B. (2011). Determining the Harmonic Impacts of Multiple Harmonic-Producing Loads. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY* , 26 (2), 1187-1195.

Mejía Barrón, A. (2013). *Monitoreo remoto vía ethernet de la calidad de la energía en sistemas de baja tensión*. Universidad Autónoma de Querétaro.

Pallás Areny, R. (1993). Adquisición y distribución de señales. En R. Pallás Areny, *Adquisición y distribución de señales* (págs. 1-2). Barcelona: MARCOMBO.

Pallás Areny, R. (2003). Sensores y acondicionadores de señal. En R. Pallás Areny, *Sensores y acondicionadores de señal* (págs. 2-5). Barcelona: MARCOMBO.

Perez, C. (2002). MATLAB y sus aplicaciones en las ciencias y la ingeniería. En C. Perez, *MATLAB y sus aplicaciones en las ciencias y la ingeniería*. PEARSON EDUCACION.

Reyes de Luna, R. D. (2009). *Aplicación de la transformada Wavelet para en el análisis de calidad de la energía*. Instituto Politécnico Nacional.

Shin, Y.-J., Powers, E. J., Grady, M., & Arapostathis, A. (2006). Power Quality Indices for Transient Disturbances. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 21 (1), 253-261.

Thompson, M. (2004). FPGAs accelerate time to market for industrial designs. *EE Times* .

Trejo Perea, M. (2005). *Ahorro y análisis del consumo y calidad de la energía*. Universidad Autónoma de Querétaro.

Wildi, T. (2007). Máquinas eléctricas y sistemas de potencia. En T. Wildi, *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia* (págs. 665-666). México: PEARSON EDUCACIÓN.

WIŚNIEWSKI, R. (2009). Synthesis of compositional microprogram control units for programmable devices. En R. WIŚNIEWSKI, *Synthesis of Compositional Microprogram Control Units for Programmable Devices* (pág. 11). Zielona Góra.

7. Apéndice

7.1. Interfaz de usuario

En este apéndice se muestra las principales características que posee la interfaz de usuario desarrollada el control de transferencia de datos e inicio del proceso de adquisición.

La interfaz consta de una sola plataforma grafica tal y como se muestra en la Figura 7.1, la cual cuenta con las herramientas más básicas para inicializar el proceso del proyecto, así como la transferencia de datos y un botón de ayuda.

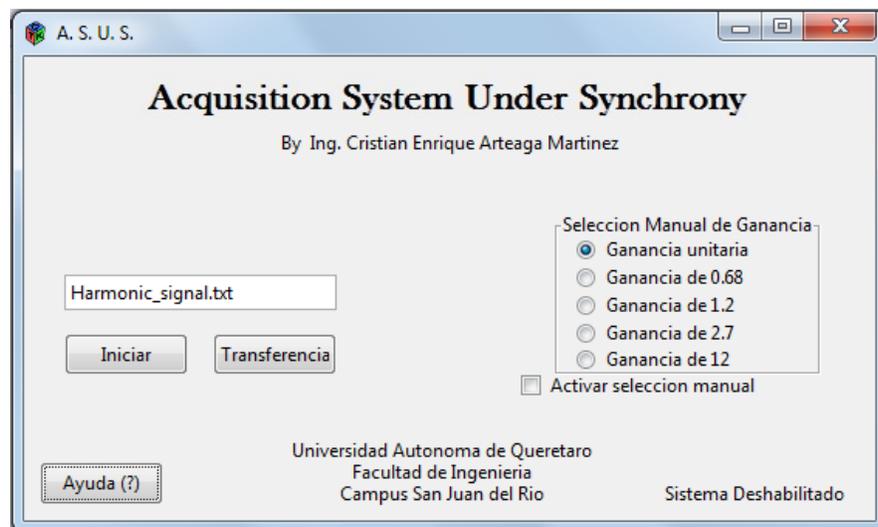


Fig. 7.1. Interfaz de usuario

El sistema A.S.U.S. (Acquisition System Under Synchrony, Sistema de Adquisición Sobre Sincronía), cuenta con dos botones principales que funcionan para iniciar el proceso de ajuste automático y la transferencia de datos de la memoria en la FPGA hacia el ordenador respectivamente.

Al presionar el botón “Iniciar”, el sistema en hardware comienza con el análisis para seleccionar la ganancia adecuada de forma automática. Sin embargo, también es posible iniciar el proceso usando directamente la FPGA. Al terminar de analizar y guardar los datos medidos, el siguiente paso consiste en presionar el botón de “Transferencia”. Con él, los datos guardados en la memoria estática de la FPGA se irán transfiriendo a la PC, y la interfaz de usuario guardara los datos de forma automática en un archivo de texto (.txt). Gracias al cuadro de texto es posible elegir el nombre del archivo donde se guardarán los datos, simplemente hay que colocar la terminación “.txt”.

La interfaz también cuenta con un apartado capaz de cambiar la modalidad de ajuste de ganancias de automático a manual, tal y como se ve en la Figura 7.2. Simplemente se debe activar la opción adecuada.

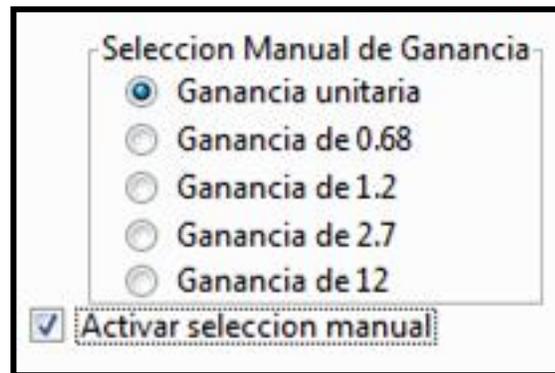


Fig. 7.2. Sistema de activación manual o automático

Para saber si hay conexión entre ambas plataformas, el sistema cuenta con un mensaje emergente cada que se ejecuta la interfaz de usuario, el cual avisa al usuario si se ha conectado satisfactoriamente el sistema, o si hay algún error en la conexión. Los mensajes pueden ser vistos en la Figura 7.3.

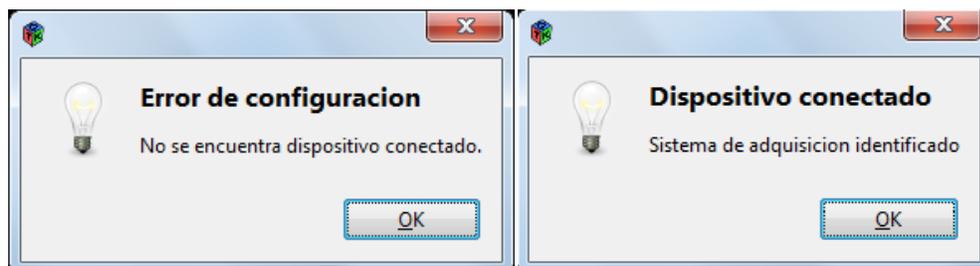


Fig. 7.3. a) Ventana indicativa de error de conexión
b) Ventana indicativa de conexión exitosa

Es necesario conectar el sistema en hardware a la computadora antes de ejecutar el programa, de no ser así, la interfaz de usuario podría no reconocer el dispositivo.

Pese a esto, una vez que se inicializa el software, la interfaz gráfica indica si efectivamente el sistema se conectó o si hubo un error. La indicación se muestra en la parte inferior derecha de la interfaz, tal y como se muestra en la Figura 7.4.

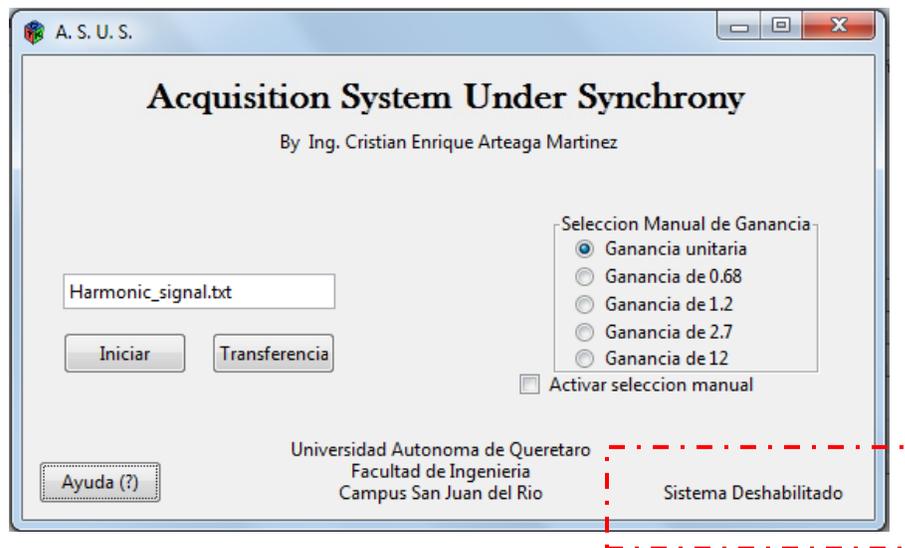


Fig. 7.4. Índice para indicación de conexión

7.2. Sistema en plataforma FPGA

Respecto al sistema desarrollado en hardware, también existen algunas especificaciones importantes para poder usarlo de forma complementaria con el sistema en software.

Las principales consideraciones del sistema son algunos de los periféricos que posee la FPGA, como lo son los botones y los leds.

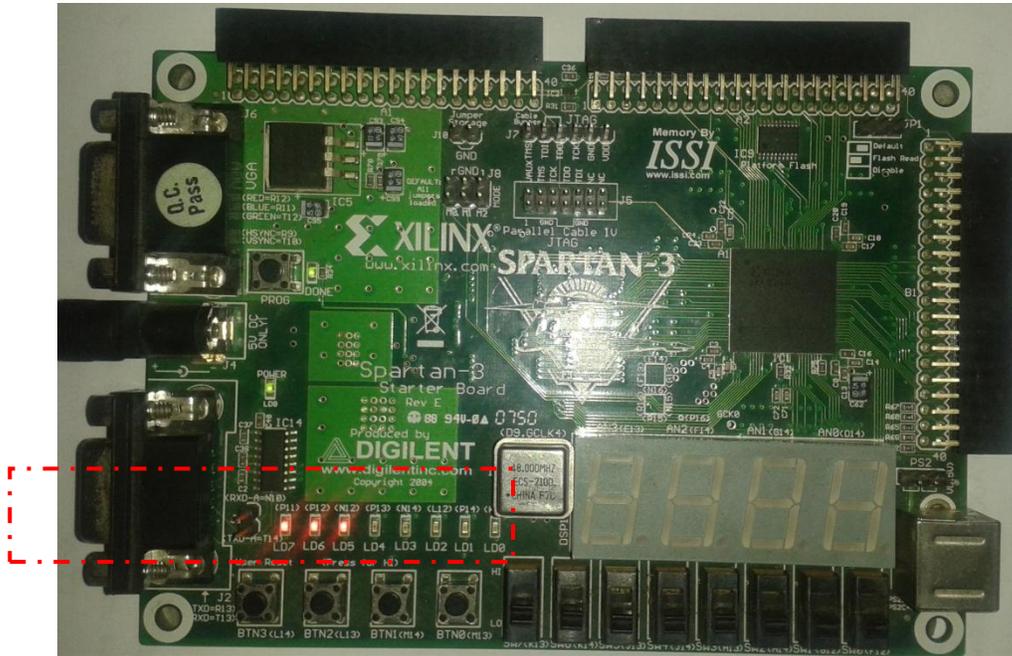


Fig. 7.5. Leds usados para la identificación del proceso

Las diferentes combinaciones de los leds y su significado se muestran a continuación.

Tabla 7.1. Descripción para cada combinación de leds

Nombre del proceso	Visualización		
	P11	P12	N12
Selección y ajuste automático	0	0	1
Adquisición y registro de datos	0	1	0
Transferencia y comunicación USB	1	0	0
Estado inicial	1	1	1

Existen dos formas de inicializar el sistema. Una de ellas consiste en usar la botonera que posee la FPGA para controlar el inicio de cada proceso. La Figura 7.6 muestra los botones usados en la plataforma FPGA para cambiar y comenzar de proceso.



Fig. 7.6. Botoneras usadas para activar el proceso de forma secuencial

Del mismo modo que los leds, los botones tienen un uso en particular dependiendo de la etapa en la cual se encuentre el proceso. La siguiente tabla muestra la función de cada uno de los botones.

Tabla 7.2. Función específica para cada botón en la FPGA

Función del proceso	Botón específico
Inicio de la etapa de selección y ajuste automático	L14
Inicio de la etapa de adquisición y registro de datos	L13
Inicio de la etapa de transferencia y comunicación USB	M14
Reset	K13

Por otro lado, el acoplamiento que existe entre la FPGA y la tarjeta de adquisición de datos (DAS) se lleva a cabo a través del puerto de expansión A2, tal y como se muestra en la Figura 7.7.

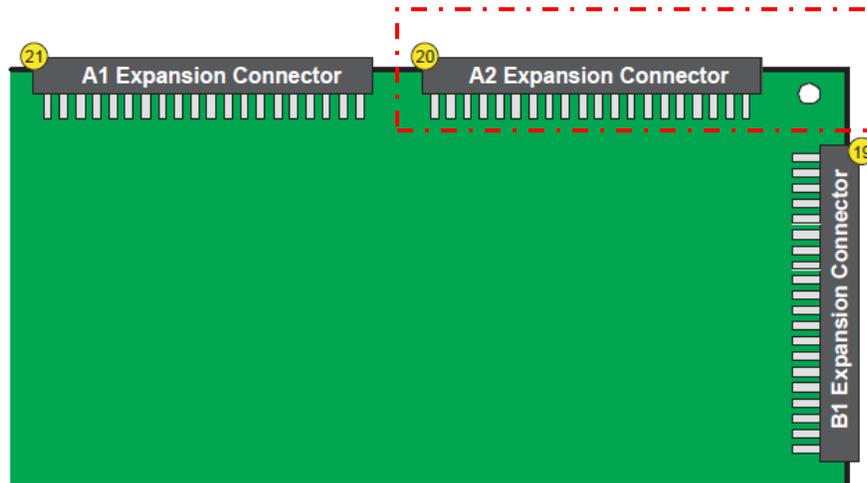


Fig. 7.7. Puerto de expansión usado para la conexión de la DAS

7.3. Sistema de acondicionamiento en hardware

El sistema de acondicionamiento cuenta también con algunas secciones que sirven como alimentación, entrada para la señal del sensor y la entrada de conmutación para el control del multiplexor.

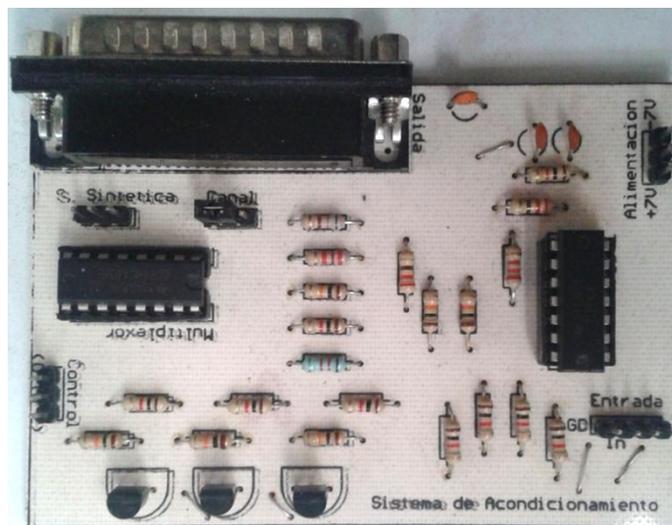


Fig. 7.8. Sistema de acondicionamiento en hardware

Para la alimentación, esta se tiene que hacer con un voltaje máximo de ± 7 V, así como su respectiva tierra. La misma tarjeta señala cual es la entrada adecuada de cada nivel de tensión.

Respecto a la entrada para la conmutación digital, es necesario entender la simbología que existe marcada en la tarjeta de acondicionamiento. En ella existe la leyenda “0 to 2”, en donde el 0 representa el bit menos significativo, mientras que el 2 representa el bit más significativo. Así mismo, estos tres pines van conectados a las siguientes terminales de la FPGA.

Tabla 7.3. Conexión entre el sistema de acondicionamiento y la FPGA

Nombre del esquemático	Número del conector	Pin del FPGA	Asociación al bit de control
PB-ADR0	4	C10	0
PB-ADR1	6	E10	1
PB-ADR2	8	C11	2