



**FACULTAD
DE INGENIERIA**

Universidad de Buenos Aires

**CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN
SISTEMAS EMBEBIDOS**

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

**Equipo adquisidor de descargas
parciales**

Autor:

Ing. Pablo Severini

Director:

Dr. Ing. Marcos Maillot (UTN FRGP)

Codirector:

Ing. Cristian Bonini (UTN FRGP)

Jurados:

Mg. Ing. Mara Fusco (FIUBA)

Esp. Ing. Facundo Adrián Lucianna (FIUBA)

Esp. Ing. Santiago Salamandri (FIUBA)

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad de Barcelona,
entre junio de 2020 y junio de 2021.*

Resumen

Una Descarga Parcial (DP) es un mecanismo de ruptura dieléctrica que tiene lugar en los sistemas aislantes de máquinas y equipos eléctricos de potencia. Su ocurrencia genera deterioros acumulativos en el sistema aislante que pone en riesgo sus propiedades dieléctricas, por este motivo es de interés su medición. El presente trabajo trata sobre el desarrollo de un equipo para medir DP en máquinas y equipos eléctricos de potencia. El equipo desarrollado está basado en un microcontrolador LPC4370, puede funcionar de forma autónoma y es capaz de adquirir, almacenar y procesar pulsos de DP bajo una serie de parámetros configurables. La información obtenida es utilizada para representar de forma adecuada en lo que se conoce como Patrón de DP. Este constituye una herramienta estándar para el análisis de los sistemas aislantes de máquinas y equipos eléctricos de potencia.

Agradecimientos

Esta sección es para agradecimientos personales y es totalmente **OPCIONAL**.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Descargas parciales	1
1.1.1. Medidores de descargas parciales	2
1.2. Estado del arte	3
1.3. Objetivos y alcance	5
1.3.1. Objetivos	5
1.3.2. Alcance	5
2. Introducción específica	7
2.1. Requerimientos	7
2.2. Descripción general del sistema	9
2.3. Aislación óptica	9
2.4. Filtrado y adaptación	10
2.5. Procesamiento	10
2.6. Muestreo de datos	11
2.7. Listado de las herramientas utilizadas	12
3. Diseño e implementación	15
4. Ensayos y resultados	17
4.1. Banco de pruebas	17
4.2. Ensayos de amplitud	17
4.3. Ensayos de disparo	17
4.4. Ensayos de fase	17
4.5. Tiempos de procesamiento y almacenado	17
4.6. Pruebas en campo	17
5. Conclusiones	19
5.1. Trabajo obtenido	19
5.2. Conocimientos aplicados	19
5.3. Trabajo futuro	20
Bibliografía	21

Índice de figuras

1.1. Esquema básico de DP en el interior de un aislante.	1
1.2. Forma de onda de una descarga parcial capturada por un HFCT (high frequency current transformer).	2
1.3. Patrón de descargas parciales.	2
1.4. HFCT de la empresa BlueBox.	3
1.5. Equipo Falcon de Techimp.	4
1.6. Equipo ICMmonitor de Pdix.	4
1.7. MPD600 de Omnicrom.	4
2.1. Diagrama en bloques de sistema.	9
2.2. Representación esquemática de un optoacoplador.	9
2.3. Muestreo discreto de una señal analógica.	11
2.4. Efecto <i>aliasing</i> en señales analógicas.	12
2.5. Filtro pasabajos <i>anti-aliasing</i>	12

Índice de tablas

Dedicado a... [OPCIONAL]

Capítulo 1

Introducción general

En este capítulo se realiza una breve introducción de los elementos externos que interactúan con el sistema con la finalidad de brindar un marco de comprensión general antes de realizar un abordaje específico. También se explica el alcance y objetivos del presente trabajo.

1.1. Descargas parciales

Según IEEE

(Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery) «Una DP (descarga parcial) es una descarga eléctrica que cortocircuita parcialmente el material aislante ubicado entre dos conductores. Cuando la tensión excede cierto valor crítico, se produce una ionización gaseosa transitoria en el sistema aislante, a dicha ionización se la denomina DP» [1]

Una descarga parcial es un fenómeno de disrupción eléctrica. Se caracteriza por ser un pulso de corriente de alta frecuencia el cual se produce en el seno de un sistema aislante de una máquina o equipo eléctrico de potencia de media o alta tensión como consecuencia de la presencia de oclusiones gaseosas, impurezas aristas aguzadas u otras anomalías que distorsionan la distribución de las líneas de campo eléctrico, figura 1.1.

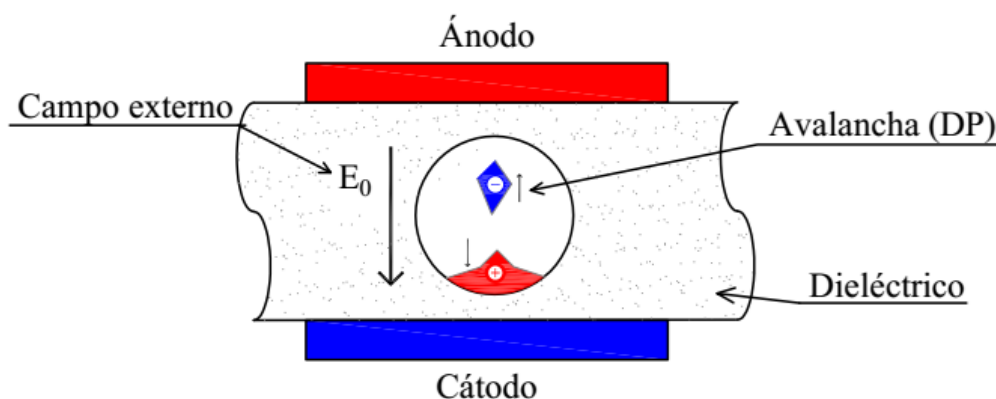


FIGURA 1.1. Esquema básico de DP en el interior de un aislante.

La ocurrencia de este fenómeno provoca un deterioro del sistema aislante. Dependiendo del medio en el que este fenómeno se manifiesta y cuál sea la causa que lo origina, el deterioro del sistema es acumulativo.

1.1.1. Medidores de descargas parciales

La técnica eléctrica más utilizada para medir una DP, se basa en registrar las corrientes que se producen en el seno del medio aislante mediante la utilización de sensores inductivos pasivos de alta frecuencia conectados en las derivaciones a tierra de los equipos que se desean ensayar. Cuando la DP se produce en el interior del sistema aislante, las corrientes que circulan hacia tierra pasan a través de un sensor inductivo; induciendo una fuerza electromotriz proporcional a la carga involucrada, figura 1.2.

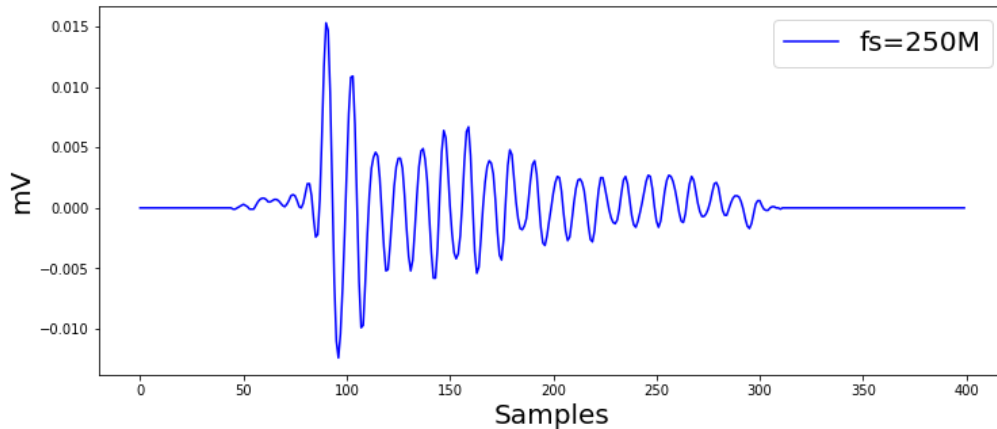


FIGURA 1.2. Forma de onda de una descarga parcial capturada por un HFCT (high frequency current transformer).

Las DP registradas son utilizadas dentro de un sistema de referencias, en su eje de ordenadas se representa la máxima amplitud del pulso y en el eje de abscisas el momento angular correspondiente de la senoide de referencia de 50 Hz. Por medio de la superposición de múltiples eventos sobre un mismo periodo de 50 Hz se conforma lo que se conoce en la literatura especializada como Diagrama de Magnitud - Fase o Patrón de DP, figura 1.3.

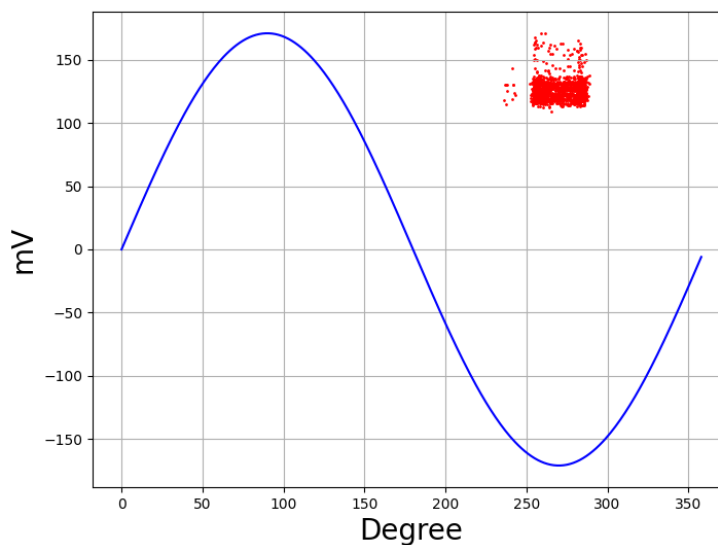


FIGURA 1.3. Patrón de descargas parciales.

Los patrones de descargas parciales permiten identificar, por medio de su interpretación, diferentes tipos de DP [2], y mediante la identificación del tipo es posible emitir un diagnóstico y conocer el grado de severidad de una falla, ya que distintos tipos de DP tienen asociados distintos riesgos [3].

Sensor inductivo Los transformadores de corriente de alta frecuencia (HFCT), figura 1.4, son sensores inductivos adecuados para adquisiciones de DP. Estos se instalan abrazando la pantalla del cable de descarga a tierra sobre el que se desea medir la descarga parcial.



FIGURA 1.4. HFCT de la empresa BlueBox.

1.2. Estado del arte

Actualmente existen equipos de medición de descargas parciales fabricados por empresas extranjeras como TechImp, PD Power Diagnostix, Omnicrom. Si bien esta gama de equipos abarca un amplio rango de características, ninguno proporciona una herramienta considerada de bajo costo para nuestro país, que permita a cooperativas o medianas empresas acceder a esta herramienta de diagnóstico. Al mismo tiempo, este equipo proporciona una herramienta de base para implementar algoritmos propios para procesamiento over the edge; características que no tienen los actuales equipos en el mercado, los cuales operan con herramientas de procesamiento muy anticuadas.

Entre los equipos existentes se pueden mencionar los siguientes por su similitud.

TechImp Falcon

- Solución “económica” para monitoreo constante de descargas parciales.
- Adquisición automática y generación del patrón de descargas parciales.
- Separación de las diferentes actividades de descargas.
- Ancho de banda 30 Mhz resolución 12 bits.
- Conexión ethernet.

PD Power Diagnostix ICMmonitor



FIGURA 1.5. Equipo Falcon de Techimp.

- Creación del patrón y display para visualización in-situ.
- Analizador de espectro.
- Posibilidad de monitoreo remoto.
- Conexión TCP.



FIGURA 1.6. Equipo ICMmonitor de Pdex.

Omicrom MPD600

- Medición y análisis de descargas
- Permite grabar, analizar y mostrar las señales.



FIGURA 1.7. MPD600 de Omnicrom.

1.3. Objetivos y alcance

1.3.1. Objetivos

El objetivo de este trabajo fue generar un equipo adquisidor de descargas parciales de calidad, de bajo costo y de producción nacional. A su vez, se buscó generar las bases para obtener un equipo abierto con capacidad de hacer procesamiento over the edge.

1.3.2. Alcance

El alcance del trabajo incluyó:

- El desarrollo del prototipo del producto.
- El desarrollo del firmware.
- El diseño del circuito esquemático.
- Confección de un manual de uso.
- Pruebas de validación y verificación.

Capítulo 2

Introducción específica

Durante este capítulo se brinda un marco orientativo sobre los requerimientos específicos del proyecto, la teoría básica involucrada y las tecnologías utilizadas para su realización.

2.1. Requerimientos

El trabajo realizado es un equipo adquirente de descargas parciales que tiene como cliente a la UTN FRGP. A continuación se listan los requerimientos acordados al iniciar el trabajo. Cabe destacar que todos fueron cumplimentados en su totalidad con excepción de los requerimientos 23 y 24 que fueron modificados, de mutuo acuerdo con el cliente, sin generar deterioro alguno en las características del equipo.

- Req 1: El dispositivo deberá, mediante el procesamiento de las adquisiciones, detectar los picos máximos de los pulsos de DP y representarlos sobre una senoide de referencia de frecuencia industrial - 50 Hertz - en fase con la tensión de ensayo (generar un patrón de DP).
- Req 2: El dispositivo deberá funcionar como un sistema *stand-alone*.
- Req 3: El dispositivo debe mantener la fecha y hora por medio de un RTC.
- Req 4: El dispositivo deberá tener un puerto de acceso serial (preferentemente diferencial) para configuración y acceso a datos remoto.
- Req 5: El dispositivo deberá contar con un puerto USB para la descarga de los patrones de DP.
- Req 6: El dispositivo deberá permitir modificar el umbral de disparo a partir del cual se comenzará a procesar una señal.
- Req 7: El dispositivo deberá permitir modificar la cantidad de muestras que serán procesadas por disparo (máximo 1000).
- Req 8: El dispositivo deberá permitir modificar la cantidad de disparos (máximo 1000) que componen a un patrón de DP.
- Req 9: El dispositivo deberá permitir configurar el RTC.
- Req 10: El dispositivo deberá permitir planificar la generación automática de un patrón DP cada periodos múltiplos de 1 hora (calendario).
- Req 11: El dispositivo deberá permitir generar un patrón de DP con los parámetros configurados a demanda y transferirlo por el puerto serie.

- Req 12: El dispositivo deberá permitir poner al sistema en modo “ARMADO” y “DESARMADO”.
- Req 13: En modo “ARMADO” el dispositivo deberá cumplir con las adquisiciones preestablecidas por calendario.
- Req 14: En modo “DESARMADO” el dispositivo no estará operativo.
- Req 15: La entrada de señal de referencia debe poder detectar los cruces por cero de una senoide de 50 Hz, y saber su polaridad.
- Req 16: La entrada de señal de referencia debe ser opto-acoplada.
- Req 17: El dispositivo deberá llevar un contador en milisegundos a partir de la señal de cruce por cero. De forma tal que se pueda saber en todo momento si está transcurriendo un semiciclo positivo o negativo y saber cuánto tiempo transcurrió desde su inicio.
- Req 18: Se deben poder adquirir señales con una ancho de banda entre 0.1 MHz y 40 MHz con una resolución mínima de 8 bits.
- Req 19: La amplitud máxima de la señal de entrada será de 1 Vpp.
- Req 20: La entrada para el sensor analógico deberá ser de 50 ohms diferencial.
- Req 21: El dispositivo deberá detectar cuando la señal muestreada supere el umbral de disparo, si esto sucediera las siguientes muestras (cantidad definida anteriormente en la configuración) deberán ser comparadas entre sí y preservar la de mayor magnitud. El valor obtenido deberá ser almacenado en memoria, junto con un timestamp, la polaridad del semiciclo de referencia y su momento angular. Este proceso debe ser repetido hasta que se cumplan los disparos que componen un patrón DP.
- Req 22: Deberá indicar su estado “ARMADO - DESARMADO” por medio de un led de estado.
- Req 23: Deberá permitir “ARMAR - DESARMAR” al sistema por medio de una tecla física.
- Req 24: Deberá realizar la acción de transferir a un pendrive el contenido total de la memoria interna por medio de una tecla física.
- Req 25: El dispositivo deberá listar todos los patrones de DP almacenados bajo el siguiente identificador “AAMMDhmm” en base a la fecha de generación del patrón.
- Req 26: El dispositivo deberá permitir seleccionar al patrón por medio de su identificador y solicitar su transferencia por puerto serie.

Los requerimientos 23 y 24 fueron modificados debido a que el almacenamiento de las descargas parciales es realizado directamente en el pendrive. De esta forma se puede reducir el costo en el diseño y se elimina la necesidad de transferir archivos entre memorias. Ambos requerimientos fueron reemplazados por el siguiente:

- Deberá almacenar en el pendrive el patrón de DP al finalizar su adquisición.

2.2. Descripción general del sistema

En la figura 2.1 se brinda una introducción de los módulos principales que abarcan el sistema y su interacción, por medio de este se busca brindar una mejor percepción de algunos temas abordados en este capítulo.

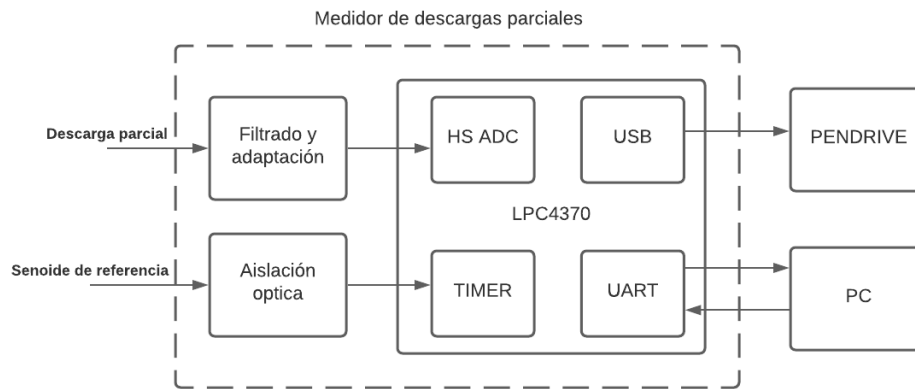


FIGURA 2.1. Diagrama en bloques de sistema.

La funcionalidad principal del equipo es adquirir DPs que son almacenadas y procesadas en conjunto a su senoide de referencia para obtener un diagrama magnitud-fase.

2.3. Aislación óptica

Un optoacoplador es un dispositivo que vincula de forma óptica un diodo led y un fototransistor a través de material aislante transparente. Utilizados como interfaz entre circuitos con diferentes potenciales de masa, los optoacopladores reemplazan la aislación por medio de transformadores y relés. También son utilizados para aislar circuitos lógicos y líneas de potencia evitando cambios de impedancia, mejorando la capacidad de aislación entre entrada y salida y facilitando la eliminación del ruido. Para este equipo se seleccionó el optoacoplador LTV357 de la empresa liteon, el mismo cumple con los requisitos de ser de bajo costo, tener una aislación de 3750 Vrms y una respuesta lineal hasta 2 KHz de frecuencia.[4],[5]

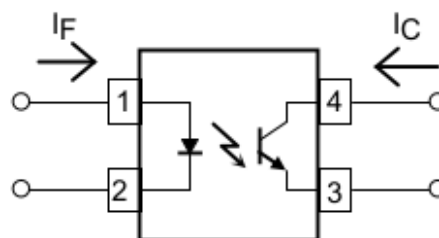


FIGURA 2.2. Representación esquemática de un optoacoplador.

2.4. Filtrado y adaptación

Una etapa de filtrado y adaptación es un punto crítico para cualquier diseño de adquisición de señales analógicas. La señal proveniente de los sensores puede contener componentes de frecuencia fuera del ancho de banda de interés. También es posible que los niveles de tensión de la señal no utilicen al máximo el rango dinámico de entrada perdiendo bits de conversión. La saturación por sobretensión también es un elemento que perjudica a la calidad de las mediciones y en algunos casos puede destruir al equipo. La etapa de filtrado está diseñada para dejar pasar las frecuencias dentro de la banda de interés atenuando en gran parte a todas aquellas fuera de rango. La etapa de adaptación permite llevar los niveles de tensión de entrada al máximo rango dinámico permitido, esto puede realizarse por medio de amplificación o atenuación de la señal dependiendo el caso. En esta etapa también se implementan protecciones por sobretensión que puedan arruinar al equipo, normalmente diseñadas con diodos de alta velocidad.

2.5. Procesamiento

La etapa de procesamiento es la encargada de orquestar todos los módulos del sistema. El equipo utiliza como microcontrolador principal un LPC4370 de la firma NXP. La elección fue determinada porque posee un conversor analógico digital de alta velocidad (80 MSPS) combinado con un procesador ARM cortex M4 y dos ARM cortex M0. También incluye en la versión con encapsulado TFBGA100 dos periféricos USB de alta velocidad, puerto serie, reloj de tiempo real y entradas de propósito general [6].

Fue determinante para su elección el periférico ADCHS y su bajo costo. Gracias a que los principales módulos del desarrollo pudieron ser resueltos con los periféricos internos, solo fue necesario implementar de forma externa la etapa de aislación óptica y la etapa de adaptación y filtrado de señal.

Periféricos utilizados:

HS ADC - Conversor analógico digital de alta velocidad

El LPC4370 TFBGA100 dispone de 3 conversores analógicos digitales de alta velocidad. Este es un periférico complejo que permite realizar adquisición analógicas a una tasa de muestreo de 80 MSPS con una resolución de 12 bits. Para poder manejar este flujo de datos proporciona conexión por DMA. Otra característica importante es el sistema de disparo del trigger, que permite dos umbrales de disparo por flanco ascendente o descendente.

Timers

Dispone de 4 timers de 32 bits, que permiten ser configurados como contadores o temporizadores. Para permitir una mejor adaptación a los tiempos de aplicación, proporcionan prescaler y diferentes opciones suministro de clock.

USB

Dispone de 2 puertos USB 2.0 con velocidad de transferencia de hasta 480 mbits/s. Uno de ellos con tecnología on-the-go UART. Ambos soportan DMA y cumplen con las especificaciones Universal Serial Bus 2.0

RTC - Reloj de tiempo real

Dispone de un reloj de tiempo real con registros específicos para funcionar en bajo consumo. Este módulo requiere de un cristal propio de 32 KHz para generar una base de tiempo de 1 Hz independiente al CPU, también posee una línea de alimentación dedicada que puede ser alimentada por batería.

2.6. Muestreo de datos

Para procesar y almacenar las señales analógicas de alta frecuencia proveniente del pulso de una descarga parcial es preciso realizar un muestreo de amplitud de la señal. El concepto de muestreo de amplitud de una señal analógica en intervalos de tiempo discretos se muestra en la figura 2.3. La señal analógica debe ser muestreada en intervalos de tiempo discretos t_s , este intervalo debe ser cuidadosamente escogido para asegurar una precisa representación de la señal analógica original. Está claro que a mayor cantidad de muestras adquiridas mayor será la precisión de la representación digital, pero si pocas muestras son tomadas se alcanza un punto en donde se pierde información crítica de la señal. Este punto está definido por los criterios de Nyquist [7].

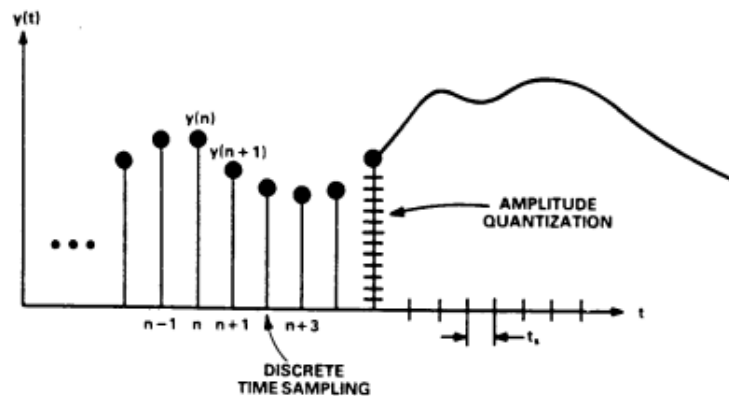
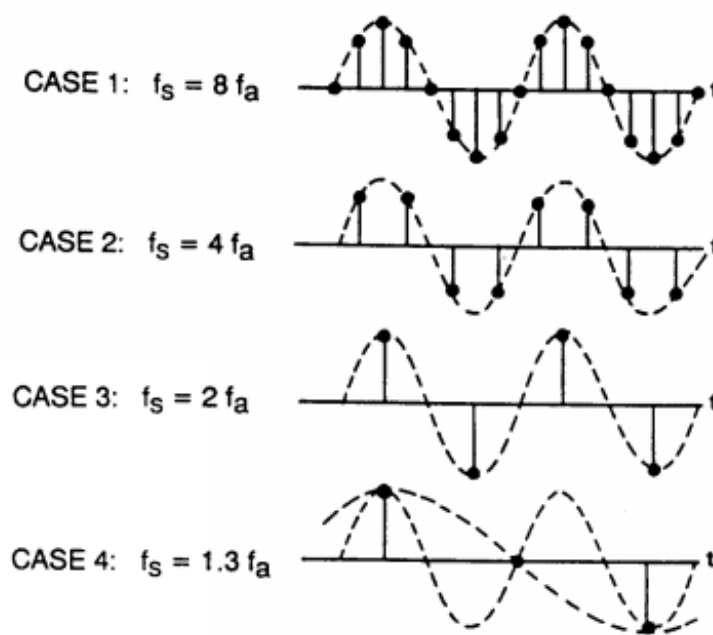


FIGURA 2.3. Muestreo discreto de una señal analógica.

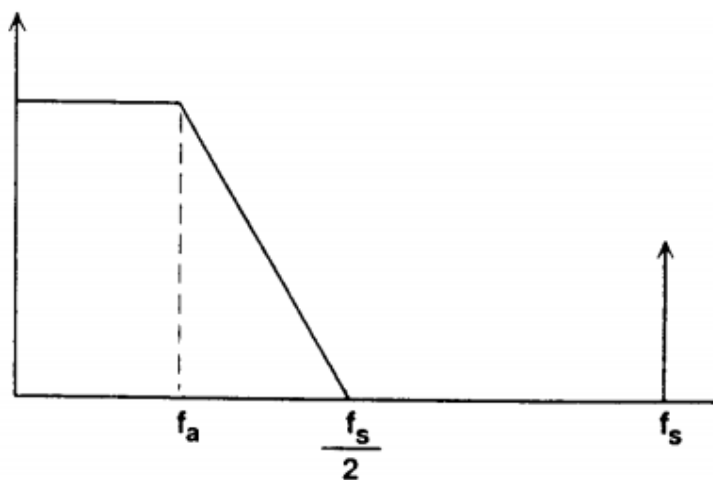
Criterios de Nyquist

- Una señal analógica con un ancho de banda de f_a debe ser sampleado a una tasa de muestreo $f_s > 2f_a$ para evitar pérdida de información.
- Si $f_s > 2f_a$ entonces un fenómeno llamado Aliasing ocurre en el ancho de banda de la señal

Con el fin de comprender la implicación del aliasing se debe considerar los cuatro casos representados en la figura 2.4 de una señal senoidal muestreada en el dominio del tiempo. En el caso 1 está claro que la cantidad de muestras es adecuada para preservar la información. En el caso 2 solo se realizaron 4 muestras por ciclo, pero aun así es una cantidad adecuada para preservar la información. En el caso 3 se representa un caso de la condición límite ambiguo donde $f_s = 2f_a$. Si la relación entre los puntos muestreados y la señal fuese tal que el muestreo coincidiera con los cruces por cero toda la información se perdería. En el caso 4 la figura representa la situación donde $f_s < 2f_a$ y la información obtenida de las muestras dan como resultado una senoide de frecuencia inferior a $f_s/2$, en este caso una frecuencia fuera de banda se entrelaza con ancho de banda de Nyquist.

FIGURA 2.4. Efecto *aliasing* en señales analógicas.

Por lo expuesto anteriormente un conversor analógico digital debe ser precedido por un filtro anti-aliasing, figura 2.5, que tenga suficiente atenuación a partir de la frecuencia de corte $f_s/2$ para prevenir que frecuencias fuera de banda indeseadas se entrelazan

FIGURA 2.5. Filtro pasabajos *anti-aliasing*.

2.7. Listado de las herramientas utilizadas

Para este trabajo se utilizaron las siguientes herramientas de hardware:

- Placa LPC Link2 como programador y debugger.
- Placa LPC Link2 como placa de desarrollo.
- Fuente de alimentación conmutada Minileaf 0-30V 10A

- *Osciloscopio Siglent SDS1202X-E de 200 MHz para verificar las mediciones y tiempos realizados por el equipo.*
- *DDS FY6900 de 60 MHz para la generación de señales en el banco de pruebas.*
- *Analizador lógico Saleae para el control de tiempos.*
- *Multímetro.*

También se utilizaron la siguiente herramientas de software:

- *Mcuxpresso ide 11.3 para el diseño del firmware.*
- *Python 3 para la generación de scripts para el banco de prueba y scripts de procesamiento de datos.*
- *Planilla de cálculos.*
- *Minicom para acceder a la interfaz.*

Capítulo 3

Diseño e implementación

- 3.1. Diseño del Hardware**
- 3.2. Diseño del Firmware**
- 3.3. Interfaz de usuario**
- 3.4. Herramientas de usuario**
- 3.5. Prototipo funcional**

Capítulo 4

Ensayos y resultados

- 4.1. Banco de pruebas**
- 4.2. Ensayos de amplitud**
- 4.3. Ensayos de disparo**
- 4.4. Ensayos de fase**
- 4.5. Tiempos de procesamiento y almacenado**
- 4.6. Pruebas en campo**

Capítulo 5

Conclusiones

Durante este capítulo se realiza un breve resumen del trabajo realizado, los problemas encontrados y los resultados obtenidos. También se incluye una reseña de posibles implementaciones futuras.

5.1. Trabajo obtenido

El trabajo finalizó con el desarrollo exitoso de un prototipo medidor de descargas parciales. Este se armó utilizando una placa de desarrollo “LPC Link 2” y un breakout para el filtrado de la señal analógica y adquisición de la senoide de referencia. El equipo logrado es de bajo costo, tamaño reducido y cumple con todos los requerimientos pautados con el cliente a excepción de los requerimientos Req 23 y Req 24 que fueron modificados sin perjudicar la funcionalidad del equipo.

Este prototipo es capaz de generar un patrón de descargas parciales de forma autónoma y almacenarlo en un pendrive USB. Para esto permite configurar una serie de parámetros que luego serán utilizados en la adquisición del patrón. Además de realizar un patrón de descargas parciales el equipo permite, de forma optativa, almacenar el muestreo completo de cada descarga parcial. Los datos obtenidos pueden ser accedidos por medio del puerto serie usando la interfaz de usuario implementada o pueden procesarse desde la unidad flash utilizando una serie de scripts provistos realizados en Python.

Por medio de las pruebas realizadas pudo validarse la correcta medición de descargas parciales sintetizadas de forma digital, también se validó la correcta confección del patrón de descargas parciales. Debido a la pandemia global causada por el COVID-19 no fue posible realizar pruebas en el laboratorio de la Universidad Tecnológica Nacional Regional General Pacheco.

En cuanto a la planificación se cumplió dentro de los plazos esperados a pesar de haberse manifestado el principal riesgo: “restricciones de velocidad para realizar la adquisición”. Se invirtió una suma de tiempo sustancial en mitigar este riesgo, durante esta etapa se intentó resolver la adquisición por medio de un FPGA y un convertor externo de alta velocidad de forma exitosa. Finalmente fue reemplazado por el LPC4370 por motivos de costo y complejidad.

5.2. Conocimientos aplicados

Durante la realización de este proyecto se aplicaron conocimientos adquiridos en el transcurso de la especialidad. Las asignaturas que más aportaron para la realización de este trabajo fueron:

- *Gestión de proyecto para crear la documentación relativa a la planificación y seguimiento.*
- *Programación de microcontroladores para la implementación del firmware en C del microcontrolador ARM M4 elegido.*
- *Ingeniería de software para seguir buenas prácticas de diseño y documentación.*

5.3. Trabajo futuro

A fin de lograr un equipo apto para el mercado como actividades de mejora a futuro se propone:

- *Utilizar los dos cortex M0 para revertir los efectos del filtro de forma digital y hacer un resampling de la señal con el objetivos de mejorar la precisión del máximo obtenido.*
- *Permitir la carga de parámetros de configuración por medio del pendrive USB.*
- *Implementar un sistema de pre-trigger que permita mantener n muestras posteriores al momento del disparo.*

Bibliografía

- [1] IEEE. *IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery*. 1.^a ed. IEEE Publications, 2010. URL: <https://teslapishro.ir/wp-content/uploads/2019/12/IEEE-Std-1434-2010.pdf>.
- [2] E. y F. Kreuger Galski. «Computer-aided recognition of Discharge Sources». IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 27.1, págs. 1702-1711-55. IEEE Publications, 1992. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/123443>.
- [3] A. y col. Cavallini. «Indexes of the Recognition of Insulation System Defects Derived from Partial Discharge Measurements». IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston, Estados Unidos. IEEE Publications, 2002. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/995986>.
- [4] *Photocoupler Application Note*. Toshiba. URL: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=13438>.
- [5] *Photocoupler LTV-357T Series*. Lite-On. URL: <https://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS70-2001-012/LTV-357T%20series%20201606.pdf>.
- [6] *LPC4370 Product datasheet*. NXP Semiconductors. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/LPC4370.pdf>.
- [7] *Fundamentals of sampled data systems*. Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an-282.pdf>.