

# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA**

**“CONSTRUCCIÓN DE MONITOR DE FALLA A TIERRA  
PARA SISTEMAS DE C.A.”.**

**REPORTE DE APLICACIÓN DE CONOCIMIENTOS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

**PRESENTA:**

**LUIS ALBERTO MEZA CRUZ**

**ASESOR:**

**MTRO. EFRAÍN GONZÁLEZ REYES**

**TOLUCA, MÉXICO, AGOSTO DE 2016.**



**UAEM** | Universidad Autónoma  
del Estado de México

DEPTO. DE EVALUACIÓN PROFESIONAL

No. Oficio: 0029/2016

Ciudad Universitaria, Toluca, Méx. a 16 de junio del 2016

**C. LUIS ALBERTO MEZA CRUZ**  
**PASANTE DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA**  
**PRESENTE.**

En respuesta a su solicitud, a continuación transcribo el tema aprobado por esta Dirección, que propuso el **MTRO. EFRAIN GONZÁLEZ REYES**, con el fin de que lo desarrolle en la modalidad de **REPORTE DE APLICACIÓN DE CONOCIMIENTOS** le informo que se autoriza la **impresión de su trabajo** para presentar su Evaluación Profesional.

**“CONSTRUCCIÓN DE MONITOR DE FALLA A TIERRA PARA SISTEMAS DE C. A.”.**

**RESUMEN**

**INTRODUCCIÓN**

**CAPÍTULO I. FALLAS A TIERRA (ORIGEN Y PROTECCIÓN)**  
**CAPÍTULO II. ESPECIFICACIÓN Y DISEÑO DE MONITOR DE FALLA A TIERRA**  
**CAPÍTULO III. APLICACIÓN DEL DISEÑO**  
**CAPÍTULO IV. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL**  
**CONCLUSIONES**  
**BIBLIOGRAFÍA**  
**GLOSARIO**  
**ANEXOS**

Ruego a usted tomar nota de que en cumplimiento a lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses, como requisito indispensable para sustentar su Evaluación Profesional.

Así mismo, para la elaboración de la **REPORTE DE APLICACIÓN DE CONOCIMIENTOS** y demás trámites, deberá sujetarse a la reglamentación respectiva de esta Universidad.

**A T E N T A M E N T E**  
**P A T R I A , C I E N C I A Y T R A B A J O**

*“2016, Año del Aniversario de la Universidad Autónoma del Estado de México”*

*“2016 Año de Leopoldo Flores Anales”*

**M. EN I. RAÚL VERA NOGUEZ**  
**DIRECTOR**  
FACULTAD DE INGENIERÍA



\*\*/Saha©

Cerro de Coatepec S/N, Ciudad Universitaria; Toluca México  
Tel. (722) 2-14-08-55 / 2-15-13-51

[www.uaemex.mx](http://www.uaemex.mx)

## AGRADECIMIENTOS

A la empresa GRG Protecciones, en especial al Ing. Fidel González Aguilar por la confianza para el desarrollo de éste proyecto. Ha sido un buen comienzo.

A la Universidad Autónoma del Estado de México, en especial a la Facultad de Ingeniería por el apoyo, la confianza y la visión brindada a lo largo de mi estadía.

A mi asesor Mtro. Efraín González Reyes por la supervisión de éste reporte de aplicación de conocimientos y las sugerencias realizadas.

Quiero agradecer de manera especial al Centro Abhirati por su fantástica esencia, labor y por su enseñanza.

A mis compañeros de la facultad que se convirtieron en parte de mi familia. Agradezco a ellos por compartir y hacer muy divertidos todos los días.

A mis amigos Aldo, Guillermo, Armeaga, Miguel, Heraclio, Jonatan, Varela, Carlos, Hugo, Zeltzín, Jessica, Néstor, Eduardo, Alonso.

A los catedráticos de la carrera, me llevo algo especial de cada uno de ellos. Agradezco en especial a los profesores Dr. Eduardo Rodríguez, M. en C. Sergio Jiménez, Dra. Guadalupe Moran, Dr. Carlos Vera, Lic. Ludivina Estrada, M en E. Diana Arriaga, Lic. M.A Araceli Ibarra, M. en I. Javier Conde, Ing. José Ávila, Ing. Darío Méndez, Ing. Alejandro Neyra, por sus invaluable aportaciones en lo profesional y personal.

**DEDICATORIAS**

Cuando se emprende una aventura es necesario contar con algún tipo de apoyo, cómplice que nos recuerde que la vida es bella en cualquier instante pese a las circunstancias que se presenten. A mis padres, hermanos y sobrinos dedico este trabajo. Fue toda una odisea el llegar a este momento.

A Vicky, Vane, Andrea... había escuchado conceptos de los ángeles, la belleza y el amor desde el punto de vista de diferentes escritores pero no había sido capaz de verla y entenderla. Me han entregado la mejor carta, como lo cita el poeta persa Rumi, "*Aquí hay una carta para todo el mundo. Ábrela. Dice; vive*".

A Enrique, Moisés, Noel, Leonardo, César, Óscar... mis hermanos del camino. Alguna vez creí imposible este momento, pero ustedes siempre confiaron, sobre todo en los tiempos de mayor aprendizaje.

Las estrellas y soles comenzaron con polvo cósmico.

# ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUMEN</b>   | <b>1</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>  | <b>2</b>  |
| <b>1 CAPÍTULO I: Fallas a Tierra (Origen y Protección)</b>   | <b>6</b>  |
| <b>1.1 Antecedentes</b>                                      | <b>7</b>  |
| <b>1.2 Conceptos Preliminares</b>                            | <b>10</b> |
| 1.2.1 Tensión  | 10        |
| 1.2.2 Corriente  | 10        |
| 1.2.3 Resistor   | 11        |
| 1.2.3.1 Selección de una resistencia                         | 11        |
| 1.2.3.2 Resistencias de puesta a tierra                      | 11        |
| 1.2.4 Tipos de Cargas  | 12        |
| <b>1.3 Sistema Eléctrico</b>                                 | <b>12</b> |
| 1.3.1 Generación de energía                                  | 13        |
| 1.3.2 Transmisión  | 14        |
| 1.3.2.1 Conductores eléctricos                               | 15        |
| 1.3.2.2 Consideraciones para la elección de cable            | 15        |
| 1.3.3 Subestaciones  | 18        |
| 1.3.4 Distribución   | 18        |
| 1.3.5 Consumo  | 19        |
| 1.3.5.1 Fase   | 19        |
| 1.3.5.2 Neutro   | 21        |
| 1.3.5.3 Tierra   | 21        |
| <b>1.4 Fallas Eléctricas</b>                                 | <b>22</b> |
| 1.4.1 Sobretensión   | 22        |
| 1.4.2 Sobrecorriente   | 23        |
| 1.4.3 Sobrecarga   | 23        |
| 1.4.4 Cortocircuito  | 23        |
| 1.4.4.1 Corrientes simétricas y asimétricas                  | 24        |
| 1.4.5 Tipos de fallas eléctricas.                            | 26        |
| 1.4.5.1 Falla trifásica total (Simétrica)                    | 28        |
| 1.4.5.2 Falla bifásica o línea-línea                         | 28        |
| 1.4.5.3 Falla bi o trifásica a tierra o doble línea a tierra | 29        |
| 1.4.5.4 Falla monofásica o línea-tierra                      | 30        |
| 1.4.5.5 Falla por arco                                       | 30        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1.5</b> | <b>Protección de Falla a Tierra</b>   | <b>31</b> |
| 1.5.1      | ¿Que origina una falla a tierra?  | 31        |
| 1.5.2      | Consecuencias de una falla a tierra   | 32        |
| 1.5.2.1    | Consecuencias en el cuerpo humano   | 33        |
| 1.5.2.2    | Daños materiales  | 34        |
| 1.5.3      | Normas relacionadas para la protección de falla a tierra.                           | 36        |
| 1.5.4      | Tipos de puesta a tierra  | 37        |
| 1.5.4.1    | Conexión sólidamente a tierra   | 38        |
| 1.5.4.2    | Conexión a tierra por baja resistencia  | 39        |
| 1.5.4.3    | Conexión a tierra por alta resistencia  | 41        |
| 1.5.4.4    | Conexión a tierra flotante  | 42        |
| 1.5.5      | Métodos de detección de falla a tierra.   | 43        |
| 1.5.5.1    | Protección residual   | 44        |
| 1.5.5.2    | Sensor de secuencia cero  | 45        |
| 1.5.5.3    | Protección de regreso a tierra  | 46        |
| <b>2</b>   | <b><i>CAPÍTULO II: Especificaciones y Diseño del Monitor de Falla a Tierra.</i></b> | <b>47</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Definición de un Monitor de Falla a Tierra HRG</b>                               | <b>48</b> |
| 2.1.1      | ¿Cómo funciona?   | 49        |
| <b>2.2</b> | <b>Planteamiento del Problema</b>   | <b>51</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Diseño de Prototipo</b>  | <b>54</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Descripción de Módulos.</b>  | <b>56</b> |
| 2.4.1      | Sensor de corriente   | 56        |
| 2.4.2      | Acondicionamiento de señal  | 57        |
| 2.4.3      | Control   | 59        |
| 2.4.4      | Interfaz de usuario   | 60        |
| 2.4.5      | Interfaz de potencia  | 61        |
| <b>2.5</b> | <b>Propuesta Final de Diseño</b>  | <b>62</b> |
| 2.5.1      | Fuente de alimentación  | 62        |
| 2.5.2      | Sensor de corriente   | 63        |
| <b>3</b>   | <b><i>CAPÍTULO III: Aplicación del Diseño</i></b>                                   | <b>65</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Implementación de Sensor</b>   | <b>66</b> |
| 3.1.1      | Pruebas de funcionamiento   | 67        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>3.2</b> | <b>Implementación de Acondicionamiento de señal</b> | <b>71</b>  |
| 3.2.1      | Acondicionamiento de señal a 500 mA                 | 73         |
| <b>3.3</b> | <b>Acondicionamiento de Control</b>                 | <b>75</b>  |
| 3.3.1      | Características del PIC 18F4550                     | 76         |
| 3.3.2      | Memoria EEPROM                                      | 78         |
| 3.3.3      | ADC   | 80         |
| 3.3.4      | Desarrollo de programa                              | 83         |
| <b>3.4</b> | <b>Acondicionamiento de Interfaz de Usuario</b>     | <b>87</b>  |
| 3.4.1      | LCD   | 87         |
| 3.4.2      | Selectores del sistema                              | 89         |
| <b>3.5</b> | <b>Acondicionamiento de Interfaz de Potencia</b>    | <b>90</b>  |
| 3.5.1      | Transistores  | 91         |
| 3.5.2      | Conexión de carga                                   | 92         |
| 3.5.2.1    | Diodo de Rueda libre                                | 94         |
| <b>4</b>   | <b><i>CAPÍTULO IV: Validación Experimental.</i></b> | <b>96</b>  |
| <b>4.1</b> | <b>Ensamble de Módulos</b>                          | <b>97</b>  |
| <b>4.2</b> | <b>Validación de Visualización</b>                  | <b>99</b>  |
| 4.2.1      | Pantalla principal                                  | 99         |
| 4.2.2      | Menú  | 100        |
| <b>4.3</b> | <b>Validación de Respuesta del Sistema</b>          | <b>103</b> |
| 4.3.1      | Validación del modo <i>prueba</i>                   | 103        |
| 4.3.2      | Validación del modo <i>analógico simulado.</i>      | 104        |
| 4.3.3      | Validación del modo <i>analógico real.</i>          | 106        |
| 4.3.4      | Modelado de estructura física                       | 109        |
|            | <b><i>Conclusiones</i></b>                          | <b>110</b> |
|            | <b><i>Bibliografía</i></b>                          | <b>113</b> |
|            | <b><i>Glosario</i></b>                              | <b>117</b> |
|            | <b><i>Anexos</i></b>                                | <b>124</b> |



# RESUMEN

En la actualidad, algunas empresas que requieren procesos ininterrumpidos, como la extracción de petróleo y sus derivados o la ventilación en minas, necesitan de un suministro de energía eléctrica constante aunque exista una falla en el sistema eléctrico de sus instalaciones. Una solución a este inconveniente es colocar un sistema a tierra por alta resistencia HRG. Un sistema HRG cuenta con diversos dispositivos electrónicos que constituyen un monitor de falla a tierra como PLC's, temporizadores y SSR's. Este trabajo se centró en el diseño y construcción de un monitor de falla a tierra para sistemas de C.A. con parámetros de tiempo e intensidad eléctrica programables para la empresa GRG Protecciones. También se centró en las pruebas del sistema para verificar su viabilidad y desarrollo de productos en volumen.

Para el desarrollo de este monitor fue necesario obtener datos previos y segmentar el problema de forma gradual (método de análisis), de esta manera se aseguró el correcto funcionamiento por etapa. Los parámetros de diseño tanto en tiempo como en intensidad eléctrica, fueron propuestos por la empresa GRG Protecciones en base a las diferentes normas con las que operan este tipo de monitores de protección de falla a tierra.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios dentro de las especificaciones requeridas al inicio del diseño para tiempos de disparo mayores a 2 segundos, con corrientes de 0-5 A. Los análisis de estas respuestas fueron importantes para la continuación de esta primera versión del monitor de falla a tierra, principalmente en el tiempo de respuesta.

# INTRODUCCIÓN

El primer concepto que se tiene registrado de electricidad, fue introducido por Thales de Mileto, quien observó que después de frotar el ámbar, éste tenía la propiedad de atraer objetos más livianos, y aunque no llegó a definirse con exactitud, se creía que la electricidad residía en el objeto frotado. De aquí se ha derivado el término electricidad, proveniente de la palabra *elektron*, que en griego significa ámbar, y que la empezó a emplear hacia el año 1600 d. C. (*Después de Cristo*), el físico y médico inglés Willian Gilbert, cuando encontró esta propiedad en otros cuerpos.

De los siglos XV - XX, se dieron grandes avances en la rama eléctrica, gracias a los estudios de personas como Volta (1745), Faraday (1831), Franklin (1752) y Tesla (1893) (EPEC, 2006). Uno de estos avances fue la llegada de los motores de C.A (*Corriente Alterna*) de Tesla y con ello se dio una revolución industrial debido a la aplicación variada de estos motores, principalmente en el sector industrial. Al mismo tiempo que se cambiaba la forma de maquilar los productos en las empresas, también se empezó a elevar el número de sucesos indeseables como los accidentes eléctricos.

Los problemas y riesgos que representaba la corriente alterna, aun con sus enormes beneficios, se tuvieron que solucionar o mejorar en el menor tiempo posible por dos aspectos fundamentales: *la seguridad del personal y la protección de los equipos eléctricos*. El auge de estas mejoras se dio en la segunda guerra mundial, en donde los barcos y submarinos, a pesar de ser un transporte seguro en condiciones normales, se veía vulnerable en tormentas y cambios de velocidad en su viaje (Land, Eddins, & Klimek, 2004). Algunas de sus mejoras, son aún la base de las que hoy se rige a nivel mundial y se ven descritas en normas como la primera edición de la norma CEI 479, aparecida en el año 1974 (Pérez L. , 1999). Particularmente, este trabajo se apoya de las publicaciones nacionales e internacionales como NRF-168-PEMEX-2012 Banco de Resistencias, PROY-M-NRF-048-PEMEX-2007, IEEE Std 142-1991 y IEEE Std 242-1986, las cuales describen una manera eficiente y segura de trabajar con equipo eléctrico y de esta manera evitar accidentes.

Una falla eléctrica se puede definir como una anomalía del sistema que causa variaciones en las magnitudes de tensión, intensidad eléctrica y frecuencia. Dichas fallas pueden causar daños al sistema eléctrico sino se atiende de manera inmediata. Las fallas más comunes pueden ser

cortocircuitos, sobrecargas, corrientes de fuga y sobretensiones transitorias. Puesto que las fallas anteriormente mencionadas son casi inherentes a un sistema eléctrico, ya sea comercial o residencial, se deben de proteger tanto a las personas como a los equipos eléctricos con los diferentes dispositivos de protección y puestas a tierra, de tal forma que las fallas eléctricas no representen un riesgo al operar o al entrar en contacto con dichos equipos. Existen varios métodos y criterios para la puesta a tierra de un sistema eléctrico, teniendo cada uno un propósito específico que satisfacen las necesidades del consumidor.

Algunas estadísticas muestran que de todas las fallas eléctricas presentes en un sistema eléctrico, la más común es el cortocircuito (GE Energy, 2012). Un cortocircuito monofásico, también conocido como falla a tierra, cortocircuito o falla monofásica, es el contacto no intencional entre alguna de las fases y la malla de tierras. Un sistema eléctrico, ante una falla como cortocircuito, puede ser protegido por una correcta puesta a tierra. Un sistema puesto a tierra es un sistema en el cual, al menos un conductor o punto (usualmente la mitad del devanado o neutro), es conectado a la malla de tierras ya sea sólidamente o mediante una impedancia que limita el flujo de intensidad eléctrica a un valor igual o mayor que la carga capacitiva actual del sistema. Algunos de los propósitos de este método, es reducir los riesgos de choques eléctricos en el personal que está en contacto con partes metálicas energizadas y limitar la corriente máxima de falla a valores que no resulten perjudiciales a los generadores, transformadores y demás equipos del sistema (IEEE, 1996).

En algunas ocasiones las empresas, ya sea por norma o por llevar un control adecuado de sus instalaciones eléctricas, requieren una medición constante de la corriente de falla que circula por el neutro. Una solución a estos requerimientos, es monitorear la intensidad eléctrica mediante un relevador de corriente. Los relés de monitoreo de falla a tierra son diseñados para aplicaciones industriales y su objetivo es proporcionar seguridad y una inmediata y confiable detección de fallas a tierra de C.A. Los relés de corriente pueden monitorear la intensidad eléctrica que fluye por un conductor y compararla entre dos umbrales de medida. La intensidad eléctrica es medida en valores RMS (*Root Mean Square – Raíz media Cuadrática*), y pueden ser programables al igual que el tiempo de respuesta. Una característica importante de estos sensores, es que además de alarmar en presencia de una falla eléctrica, cuenta con la capacidad

de detectar el punto de origen o responsable de la falla y de esta manera solucionar lo más rápido posible el imperfecto en el sistema eléctrico. (Neria, 2010)

El presente reporte de aplicación de conocimientos consta de cuatro capítulos en donde se desglosa el desarrollo de la construcción del monitor de falla a tierra para sistemas de CA (*Corriente Alterna*). En el capítulo uno se aborda las definiciones relacionadas a los sistemas de fallas a tierra, así como los diferentes tipos de soluciones existentes en el mercado, considerando los diferentes parámetros y variables, centrándose en los relevadores de corriente.

Se dedica el capítulo dos al diseño del monitor de falla a tierra. Para ello se dividió el problema en bloques a fin de hacer más práctico y fácil de afrontar el problema. Al final la suma de esas diferentes etapas, que son tanto señales analógicas como digitales, dio como resultado un prototipo de un relevador de corriente ideal.

El capítulo tres describe la aplicación del diseño, considerando las variables que se puede encontrar en el desarrollo del mismo y que afectan de manera directa no solamente a la programación de un microcontrolador, sino al diseño del prototipo original.

Las pruebas y resultados se mencionan en el capítulo cuatro. Aquí se hace una recapitulación de las pruebas finales del monitor de falla, considerando dos aspectos fundamentales que son, la magnitud de corriente sensada y el tiempo de respuesta, ambos programables y medidos con equipos previamente calibrados y certificados por Grupo Clam<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Empresa dedicada a proveer servicios de calibración, reparación y venta de instrumentos de medición que opera bajo la norma NMX-EC-17025-IMNC-VIGENTE.

# **CAPÍTULO I:**

# **Fallas a Tierra**

## **(Origen y**

## **Protección)**

En este capítulo se abordan las definiciones relacionadas a los sistemas de fallas a tierra, así como los diferentes tipos de soluciones existentes en el mercado, considerando los diferentes parámetros y variables, centrándose en los relevadores de corriente.

## 1.1 Antecedentes

A partir de que se adoptó a la electricidad, a finales del siglo XIX, como fuente de alimentación para las diversas máquinas e iluminación, comenzó a surgir una variedad de ramas de estudio para la corriente alterna en concreto, por ser la que trae consigo mayores beneficios en comparación con la corriente directa. Algunas de estas ramas son la distribución de la corriente eléctrica, el medio por el cual se distribuye, la seguridad y la fiabilidad con la que se realiza dicho proceso. En cuestiones de seguridad, una falla eléctrica a tierra, no era algo fuera de lo habitual y se combatía con los medios tradicionales como cuadrillas de rescate o bomberos.

A pesar de que los primeros submarinos datan desde 1863, el auge y con ello la mejora de los mismos, se dio en la segunda guerra mundial (1940). Normalmente los submarinos estadounidenses de la Segunda Guerra Mundial tenían dos baterías compuestas por 126 células de ácido-plomo, cada una a 2,2 V. Cada célula contenía aproximadamente 23,000 Ah (*Amperes Hora*), y con ambas baterías en paralelo, podrían producir más de 15 kA (Kilo Amperes) para cargas normales como la propulsión bajo el agua, armas, y las necesidades de la tripulación del barco. Una conexión defectuosa o un cortocircuito pueden provocar un arco eléctrico con valores superiores a 4 MW (MegaWatts), que podría producir daños considerables e incluso la pérdida total del submarino.

Durante años los problemas relacionados a fallas eléctricas fueron atribuidos a la falta de mantenimiento y cada gran evento dio lugar a un nuevo impulso de mantenimiento. Con la llegada de la energía nuclear, la propulsión principal se basó en la generación y uso de vapor, de esta manera la cantidad total de electricidad utilizada en los submarinos aumentó enormemente. Esta nueva tecnología, trajo consigo algunos eventos poco tomados en cuenta como el arco eléctrico. En 1975 ocurrió un accidente a bordo del submarino Parche (SSN 683), debido a un arco eléctrico, en donde la destrucción total de una turbina generadora, causó grandes daños y un incendio, controlado afortunadamente, como se muestra en la Figura 1.

Con el evento del submarino Parche (SSN 683), la Armada se dio cuenta de que los incendios eléctricos iban incrementando y poniendo en riesgo a la tripulación (Land, Eddins, & Klimek, 2004).



*Figura 1.* Daños causados por arco eléctrico a bordo del USS Parche (SSN 683)

En 1978, se puso en marcha la primera investigación para contrarrestar estos efectos con APL (*Applied Physics Laboratory*) y NAVSEC (*Naval Ship Engineering Center*). Después de recabar información y pruebas al respecto, se decidió crear los primeros sensores para arcos eléctricos basados en termocuplas. Para ello se necesitaba que el arco eléctrico se produjese y una vez detectado, se cortaba el suministro de energía eléctrica. Este método de sensar la falla eléctrica, resultó poco conveniente debido a las altas temperaturas características de los arcos eléctricos, los cuales oscilan entre 3000 y 6000 grados centígrados (Land, Eddins, & Klimek, 2004).

En la década de 1980 las fallas eléctricas empiezan a tomar una relevancia considerable y en las normas de seguridad se establece el uso de puesta a tierra para sistemas de baja y media tensión. La creciente demanda permitió una variedad en los diferentes métodos de puesta a tierra, como los bancos de resistencias, los cuales son hoy en día fundamentales en empresas de combustibles



fósiles. Los bancos de resistencias tienen como objetivo fundamental la continuidad del servicio. Una suspensión temporal del suministro de energía eléctrica trae serias consecuencias, no sólo desde el punto de vista de producción, sino que muchas veces afecta seriamente a las plantas de proceso. En industrias donde se manejan productos petroquímicos o gases explosivos, como son las plataformas de PEMEX (*Petróleos Mexicanos*), se limita la corriente de falla de una fase mediante resistencias de puesta a tierra. La finalidad es limitar la corriente de falla hasta una cierta magnitud para hacer operar las protecciones (Rosales, Robles, & López, 2003).

En la década del 2000 y hasta la fecha, la evolución de las diferentes protecciones existentes como fusibles, disyuntores, interruptores termomagnéticos y los relevadores de corriente, han tenido un gran avance, a tal punto que no se limita a proteger el equipo eléctrico una vez detectada la falla sino que lo puede sentir antes de que se dé una falla e incluso mantener el proceso operando de forma continua, con niveles de corriente y tiempo programables. Lo anterior se logra gracias a la implementación de sistemas electrónicos como parte de los sensores. La unión de los dispositivos electrónicos como microprocesadores y microcontroladores con los dispositivos de falla a tierra da como resultado una nueva generación para estos sensores y monitores de corriente, en los que compañías como Schneider Electric, Eaton, I-gard, Schweitzer Engineering Laboratories entre otras, van a la vanguardia ofreciendo mayor control de los sucesos en tiempo real y de fácil interacción con el usuario.

La empresa GRG, interesada en crear un producto elaborado en México, empezó a desarrollar un prototipo de Monitor de Falla a Tierra. Al construir este monitor, se optimizó de forma directa en la que hasta ahora se han venido desarrollando los productos que requieran este dispositivo, tal es el caso de los tableros HRG (*High Resistance Grounding – Puesta a Tierra por Alta Resistencia*). Un tablero HRG asegura la continuidad del suministro eléctrico en presencia de una falla a tierra mediante un sistema de puesta a tierra del neutro por alta resistencia, así como también limita la corriente del arco eléctrico en el caso de fallas monofásicas.

## **1.2 Conceptos Preliminares**

Es importante definir algunos conceptos clave que se mencionarán a lo largo del texto. Estos conceptos a pesar de tener una relativa sencillez en su definición, son parte fundamental y clave para el planteamiento del problema y la posterior solución.

### **1.2.1 Tensión**

Se define voltaje, tensión eléctrica o diferencia de potencial entre los extremos de un componente como el trabajo necesario para mover una carga eléctrica de uno al otro terminal de dicho componente (Hyde, J., Regué, J., Cuspinera, A., 1997). El trabajo necesario es la presión que ejerce una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza electromotriz (FEM) sobre las cargas eléctricas o electrones en un circuito eléctrico cerrado, para que se establezca el flujo de una corriente eléctrica. A mayor diferencia de potencial o presión que ejerza una fuente de FEM sobre las cargas eléctricas o electrones contenidos en un conductor, mayor será el voltaje o tensión existente en el circuito al que corresponda ese conductor.

La unidad de medida es el volt (V) y se define como el voltaje que hay entre dos puntos tales que para trasladar una carga de 1 culombio de un punto a otro hay que ejercer un trabajo de 1 Joule.

### **1.2.2 Corriente**

La corriente eléctrica o intensidad eléctrica, es la cantidad de carga o cargas (electrones) que fluyen a través de una superficie por unidad de tiempo. Los electrones que se mueven en grupos se les denominan “Flujo de electrones”. La cantidad de cargas que fluyen por segundo por una sección transversal de un conductor determinado se llama 1 culombio y la corriente es de 1 Amperio (A). (Pérez J. C., 2007).

### 1.2.3 Resistor

Un resistor es un dispositivo eléctrico pasivo diseñado para oponerse a la circulación de la corriente eléctrica. Debe operar en forma tal que no sea alterada por factores externos como la intensidad del campo electromagnético, la temperatura y la humedad principalmente. Si alguno de estos factores llega a presentarse, la resistencia puede alterar sus propiedades y con ello su valor de oposición al flujo de intensidad eléctrica. La unidad de medida de la resistencia es el ohm ( $\Omega$ ). Las aplicaciones más importantes de este dispositivo pasivo son las siguientes:

- Limitar la intensidad eléctrica.
- Calentamiento de procesos.

#### 1.2.3.1 Selección de una resistencia

Una resistencia es útil si cumple con el propósito específico para el cual se ha seleccionado. Una correcta selección de una resistencia en corriente continua o alterna, en ocasiones llega a determinar el éxito de un sistema, y por esta razón es necesario considerar algunos parámetros:

- Resistencia fija, variable o de precisión
- Potencia nominal<sup>2</sup>
- Material de la resistencia
- Tolerancia de error

#### 1.2.3.2 Resistencias de puesta a tierra

Las resistencias de puesta a tierra se usan en sistemas eléctricos industriales con el fin limitar la intensidad eléctrica que fluye por alguna trayectoria. En este caso en particular, limita la corriente máxima de falla a un valor que no dañe los equipos en los sistemas eléctricos, normalmente son de un valor bajo y los materiales de los que son fabricados varía. Para el caso

---

<sup>2</sup> La potencia nominal incluye los valores de corriente, resistencia y voltaje, los cuales son valores eficaces para los cuales están diseñados, sin carga en caso de energía o en condiciones que no afecten el valor de la resistencia como la temperatura.

en el que se deban utilizar en instalaciones costa afuera, los perfiles y cubierta de lámina que los integren, deben ser de acero inoxidable. Algunas de sus características principales son:

- Temperatura: Mayor a 800 C
- Tensión de operación: Hasta 110 KV (*Kilo Volts*)
- Corriente nominal: Hasta 5000 A

#### **1.2.4 Tipos de Cargas**

Una carga activa o carga dinámica es un componente o un circuito que funciona como una resistencia no lineal de corriente estable. La carga convierte toda la energía consumida en trabajo útil, por ejemplo: todos los sistemas que utilizan resistencias.

Una Carga Reactiva son las cargas que requieren de una cantidad de energía para magnetización por lo que del 100% de la energía consumida no toda se convierte en trabajo útil. En éste tipo de carga, nos encontramos con dos tipos: La Carga Reactiva Inductiva, por ejemplo: Motores, transformadores, balastos, y la Carga Reactiva Capacitiva, por ejemplo: Los capacitores y algunos motores.

En la actualidad la mayor parte de las cargas son combinadas Activa + Reactiva y se representan como una demanda de Potencia Aparente, medida en Kilo Volts Amperes (KVA) o total del sistema. De lo anterior se deriva un parámetro que es el Factor de Potencia (F.P.), el cual se expresa como la relación entre la Potencia Activa o Real y la Potencia Aparente o total del sistema (Rosales, Robles, & López, 2003).

### **1.3 Sistema Eléctrico**

Uno de los objetivos de la energía eléctrica es ayudar a tener un avance tecnológico e industrial. Para lograr dicho objetivo, es necesario contar con el equipo necesario y adecuado, de lo

contrario se corren algunos riesgos como el de estar por debajo de las expectativas de producción constantemente, el riesgo de elevar los costos e incluso ocasionar accidentes.

La estructura de un sistema eléctrico se define como el conjunto de instalaciones, conductores y equipo necesario para la generación y distribución de la energía eléctrica. (Guirado, Asensi, & Jurado, 2006). De acuerdo a la definición anterior, un sistema eléctrico contempla de forma general todos los pasos que hay desde su creación hasta su uso particular.

### **1.3.1 Generación de energía**

La generación de energía eléctrica puede ser de diferente origen, por ejemplo en una central eléctrica, si esta se da en un medio terrestre o de alternadores, si se encuentra en un barco en un medio marítimo. Una central eléctrica es una instalación que utiliza una fuente de energía primaria para hacer girar una turbina que, a su vez, hace girar un alternador, que produce energía eléctrica de corriente alterna sinusoidal a voltajes de media tensión, entre 6 y 30 KV, tensión que se eleva mediante los transformadores de salida de la central, para ser inyectada en la red de transporte. Lo anterior se hace debido a que en el sistema interconectado la energía eléctrica es transmitida a alto voltaje (muy superior al requerido en la industria) con el propósito de disminuir las pérdidas técnicas por conducción ( $I^2R$ ). La frecuencia del sistema de corriente alterna que se genera es fija y está normalizada: 50 Hz en Europa y 60 Hz en gran parte de América.

Un transformador cuyo voltaje secundario sea superior al primario se llama transformador elevador. Si el voltaje secundario es inferior al primario, este dispositivo recibe el nombre de transformador reductor. El producto de la corriente por el voltaje es constante en cada juego de bobinas, de tal forma que en un transformador elevador el aumento de voltaje de la bobina secundaria viene acompañado por la correspondiente disminución de corriente.

### 1.3.2 Transmisión

El sistema de distribución en la industria está constituido por el conjunto de conductores eléctricos (cables, alambres, barrajes, etc.), cuya función principal es la de transmitir la energía eléctrica requerida para que los equipos de la planta operen bajo condiciones específicas.

El transporte se hace en alta tensión (400, 220 y 132-110 KV) para disminuir las pérdidas. Algunos valores típicos de tensión, se muestran en la Figura 2, en donde pueden variar de acuerdo al diseño de los generadores o a la región del planeta donde se realice<sup>3</sup>. Los materiales más utilizados en la fabricación de conductores eléctricos son el cobre y el aluminio, aunque el cobre es el más aceptado por sus notables ventajas mecánicas y eléctricas. El uso de uno u otro material dependerá de las características eléctricas (capacidad para transmitir la electricidad), mecánicas (resistencia al desgaste, maleabilidad, etc.), del uso específico que se le quiera dar y el costo.

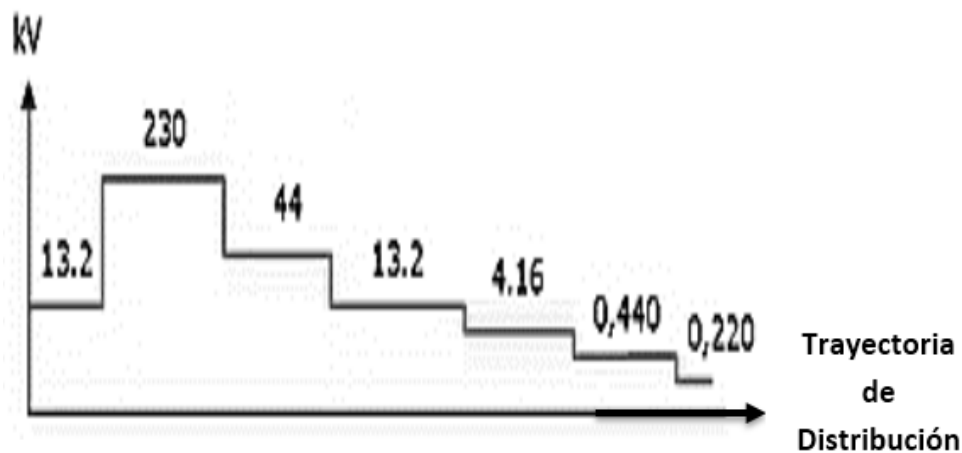


Figura 2. Valores de tensión a lo largo del sistema de transmisión, desde la generación en una planta eléctrica hasta el consumidor final

<sup>3</sup>Los valores de voltaje para el consumidor final en Europa es de 220 V. En la mayoría de América estos valores son de 120 V.

### 1.3.2.1 Conductores eléctricos

Los conductores eléctricos son el medio por el cual se transmite la energía eléctrica artificial, de esta manera se logra crear un medio seguro por el que se transmite la energía de un punto A a un punto B.

El aislamiento es la parte del conductor que separa de manera segura la tensión aplicada. En algunos casos, este mismo aislante contiene reforzamiento (ver Figura 3) en la constitución del mismo, que sirve para protegerlo de daños físicos. Cuando se necesita implementarlo para uso rudo como las extensiones eléctricas de tipo industrial, se refuerza con una cubierta para dar una mayor protección.

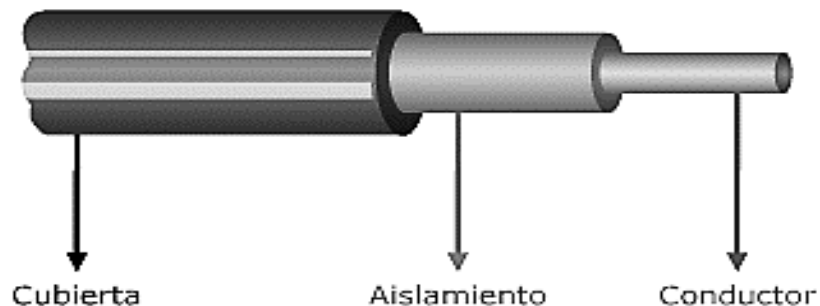


Figura 3. Componentes de un conductor eléctrico

### 1.3.2.2 Consideraciones para la elección de cable

Las pérdidas por disipación de calor en un conductor es una característica normal que se produce en cualquier sistema eléctrico. Una forma de expresar ésta pérdida es obteniendo la potencia de la fuente, la cual es proporcional al cuadrado de la corriente transportada por la impedancia del conductor ( $I^2R$ ), de ésta manera se deduce la potencia. Una forma de reducir éstas pérdidas es elevando la tensión y reduciendo la intensidad eléctrica de la fuente ( $I = P/V$ ), como tradicionalmente se hace en las empresas hidroeléctricas. Por tanto, mientras mayor sea el nivel

de tensión seleccionado, menor será la corriente circulante y por ende menor será la pérdida de energía por disipación de calor.

Todos los conductores poseen una resistencia. Sin embargo, se necesita de una cierta cantidad de energía para forzar el flujo de una corriente eléctrica a través de él. El voltaje que se pierde forzando el flujo de corriente se conoce como *caída de voltaje*. De ahí que, independientemente del tamaño de conductor seleccionado, es imposible prevenir que se presenten caídas de tensión, pero sin embargo debe mantenerse dentro de límites prácticos y razonables.

Algunas normas como la IEEE, Std. 1459<sup>4</sup>, recomiendan que los conductores se seleccionen de forma que la caída de voltaje no exceda del 3% para circuitos auxiliares o ramales y de un 2% para circuitos alimentadores principales. La caída de voltaje en cualquier caso puede determinarse empleando la ley de Ohm. Caída de voltaje (en volts = corriente (amperes) x impedancia (ohms)). La fórmula se muestra en la Ecuación 1.

$$V = IR$$

Ecuación 1.

La impedancia o resistencia total del circuito, depende a su vez de la longitud del mismo y del calibre del conductor.

En la Figura 4 se puede apreciar las pérdidas de los conductores para varios voltajes y varias longitudes de una carga de 1.000 KVA (*Kilo-Volt-Ampere*). Al duplicar el nivel de tensión eléctrica, las pérdidas se reducen por un múltiplo de cuatro y por tanto, se debe considerar este factor al seleccionar el nivel de voltaje cuando se proyectan nuevas plantas industriales o expansión de las actuales. (Pérez J. C., 2007)

---

<sup>4</sup> Normatividad sobre la energía eléctrica, en la que se definen varios parámetros asociados a la tensión para cuantificar el flujo de energía eléctrica en circuitos monofásicos y trifásicos en condiciones sinusoidales, no sinusoidales, equilibradas y desequilibradas.



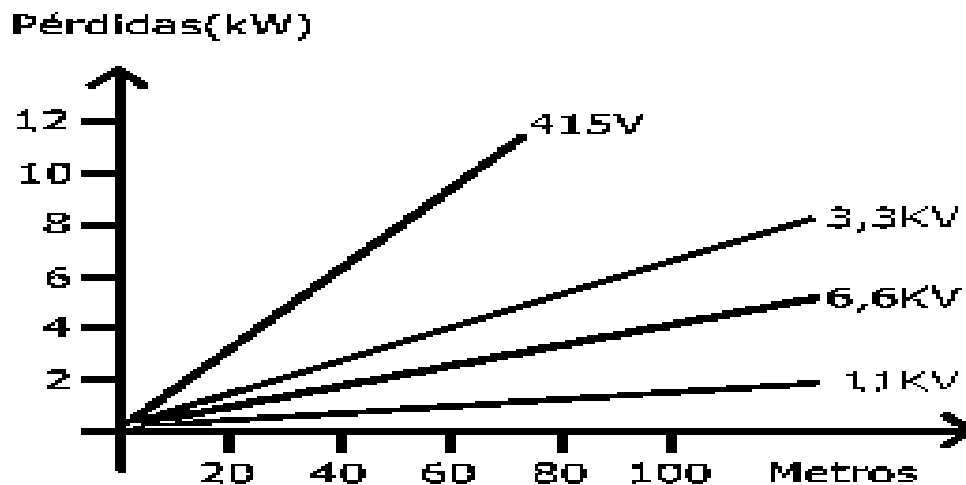


Figura 4. Pérdidas por caídas de voltaje

En la práctica, con seguir normas como las siguientes, se puede mantener dentro de los estándares admisibles las caídas de tensión. Algunas recomendaciones son:

- Ningún conductor se debe cargar más del 80% de su capacidad portadora.
- Los conductores del circuito alimentador de cualquier equipo eléctrico: motor, transformador, condensadores, cargas resistivas etc.; deben seleccionarse con una capacidad portadora igual o superior al 125% de la corriente de placa del elemento.
- En circuitos de potencia o alumbrado no deben utilizarse conductores de sección transversal inferior al No. 14 AWG. Conductores más delgados únicamente en los circuitos de control.
- Se recomienda un nivel de voltaje alto para el sistema de distribución secundario.
- Como la caída es afectada por la corriente y la impedancia, se deben usar conductores con poco espaciado.
- Se debe usar conductor de barras de baja impedancia.
- En ciertos casos, dos cables más pequeños en paralelo pueden tener una impedancia más baja que un cable sólo grande.
- Se recomienda usar tramos cortos para alimentadores de bajo voltaje.
- Aumentar el factor de potencia en servicio del circuito.
- Se recomienda el uso de transformadores de tipo regulador de voltaje.

- La temperatura máxima admisible debe considerarse en el diseño y mantenimiento de los equipos, atendiendo al tipo de proceso que se lleve a cabo como refinación, extracción, petroquímica, etc.

Los puntos mencionados anteriormente, conciernen en primer lugar, a la seguridad de las instalaciones eléctricas. Es deseable tener áreas de sección transversal de los conductores mayores que las requeridas para la seguridad y para una operación económica (NOM, 2012). Los mayores costos en la inversión inicial al seleccionar conductores más gruesos, se ven retribuidos en el tiempo con el ahorro de energía.

### **1.3.3 Subestaciones**

Las subestaciones son el lugar donde se encuentran los transformadores, para cambiar a los niveles de tensión de las líneas, los elementos de mando y de protección, que sirven para manipular y proteger la red (interruptores, seccionadores, fusibles, pararrayos, etc.), y los elementos de medida, que permiten conocer en todo momento la situación del sistema y los valores de las variables más importantes. De algunas de esas subestaciones salen líneas a menor tensión que forman las redes de distribución en media tensión (de 66 a 1 KV).

### **1.3.4 Distribución**

Las redes de distribución de energía se encuentran en áreas urbanas y rurales, pueden ser aéreas o subterráneas. La red de distribución está formada con los siguientes valores característicos para México según la CFE (Ver Tabla 1).

Tabla 1

*Clasificación de tensión dada por C.F.E.*

| Clasificación de tensión               | Rangos de tensión comprendida (KV) |
|--|------------------------------------|
| Alta tensión a nivel de transmisión    | $V_{LL} \geq 220$                  |
| Alta tensión a nivel de subtransmisión | $35 < V_{LL} < 220$                |
| Media tensión                          | $1 < V_{LL} \leq 35$               |
| Baja tensión                           | $V_{LL} \leq 1$                    |

### 1.3.5 Consumo

Por último están los consumidores de esa energía eléctrica que se genera en las centrales. Esos consumidores, también llamados cargas, se conectan a la red en alta tensión (grandes industrias y, sobre todo, las redes de distribución de media tensión), en media tensión (industrias, distribución a las ciudades y redes de distribución en baja tensión) y en baja tensión (la mayoría de los consumidores como, por ejemplo, pequeñas industrias y los consumidores domésticos finales). Generalmente son identificados como tomas de corriente en donde las diferentes cargas serán conectadas como ventiladores, motores, extractores, etc. (Guirado, Asensi, & Jurado, 2006).

#### 1.3.5.1 Fase

Si se hace un análisis de una señal, sinusoidal en el caso de generación de corriente alterna, nos encontraremos con algunos parámetros interesantes como lo son amplitud, frecuencia y fase. La forma de onda es determinada por los generadores de energía eléctrica, los cuales se basan en un juego de atracción y repulsión de polos de imanes, parecido a un motor, solo que la diferencia consiste en que a partir del movimiento, se crea una corriente eléctrica. La forma de onda típica se muestra en la Figura 5.

La amplitud representa la energía que transporta esta señal en cada instante de tiempo, puede ser voltaje, corriente o potencia. La amplitud pico representa la cantidad máxima de energía transportada.

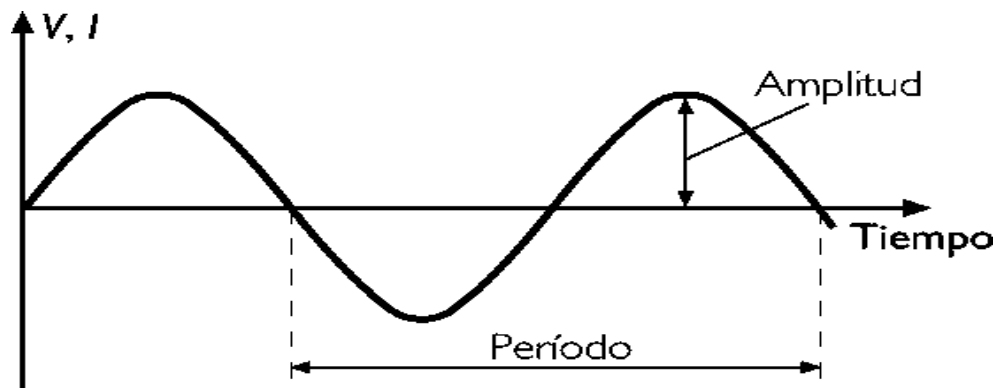


Figura 5. Parámetros de una onda sinusoidal

El periodo se refiere al tiempo en segundos, que una señal necesita para completar un ciclo. El periodo es la inversa de la frecuencia y se define como el número de periodos en un segundo.

Matemáticamente, una señal senoidal puede expresarse como se muestra en la Ecuación 2. Para este caso en particular, donde se describe el valor de una fase o en otras palabras, el valor de la tensión en una fase es:

$$x(t) = A \text{Sen}(\omega t \pm \phi); \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$x(t)$  = Valor de la tensión en el instante  $t$ .

$A$  = Amplitud máxima en volts (también llamado valor pico).

$\omega$  = Frecuencia angular. Su relación con el número de ciclos por segundo (frecuencia) es:  $\omega = 2\pi f$

$t$  = Tiempo en segundos.

$\phi$  = Ángulo de fase inicial de la señal en radianes, también conocida como el desplazamiento de la onda en el tiempo.

La fase de una señal, describe la posición de la forma de onda relativa al tiempo cero, de esta manera se puede determinar éste parámetro.

#### **1.3.5.2 Neutro**

Si se observa nuevamente la Figura 5, se puede notar que sobre el eje vertical oscila la energía en valores positivos y negativos periódicamente. La energía varía con respecto al tiempo (eje horizontal). Inicialmente su valor es cero y aumenta hasta llegar a un punto máximo denominado valor pico y decrece hasta llegar a cero nuevamente. Un breve instante después empieza a crecer y decrecer de igual manera pero negativamente hasta llegar nuevamente a cero con respecto al eje vertical. Un neutro tanto para sistemas monofásicos como trifásicos, es una referencia en donde se mide una diferencia de potencial.

Para medir una tensión, se necesita de dos puntos de referencia conocidos, uno de ellos es la propia línea (fase) y el otro punto es una referencia en donde se medirá el voltaje con respecto a ese punto. Este punto denominado neutro no posee cargas positivas ni negativas y cuyo potencial con respecto a tierra es igual a cero en sistemas monofásicos, bifásicos y trifásicos balanceados. (CFE, 2010)

#### **1.3.5.3 Tierra**

La tierra se puede considerar como una masa gigantesca con propiedades prácticamente ilimitadas para absorber grandes cantidades de electricidad estática o carga sin cambiar su potencial, es decir, una masa que debido a sus dimensiones tiene muy baja impedancia o muy alta capacitancia. Por lo tanto, la tierra se define normalmente como aquella masa conductiva con tales propiedades eléctricas que el potencial promedio es considerado como igual a cero en cualquier punto. Sin embargo, esta definición involucra una tierra ideal, la cual en la práctica, para zonas delimitadas de la superficie de la tierra, se comporta de manera diferente.

La finalidad primordial de la tierra es garantizar la protección de las personas que estén en contacto directo con equipos eléctricos o con sus gabinetes o partes metálicas, limitando su tensión en caso de una descarga atmosférica o falla a tierra de la fase y garantizando el disparo inmediato de las protecciones disponibles en las instalaciones en caso de corto circuito.

## **1.4 Fallas Eléctricas**

Un cortocircuito o falla eléctrica, como se les llama comúnmente, es una anomalía en el suministro de energía eléctrica presente en un sistema eléctrico. Al existir una falla eléctrica se pone en riesgo la integridad de la instalación, de los bienes materiales y del personal. Una anomalía en el circuito eléctrico puede causar la disminución del aislamiento entre conductores de fases o entre conductores y tierra por debajo de los valores normales de la impedancia de carga.

Una de las causas más comunes presentes de una falla eléctrica es por sobretensión, sobrecorriente o una sobrecarga, originada dentro del mismo circuito eléctrico o por influencia de algún factor externo.

### **1.4.1 Sobretensión**

Una sobretensión es una descarga alta, rápida y pasajera en un circuito eléctrico que ocurren cuando algo eleva la carga eléctrica en un momento dado en el circuito. Esta subida puede aumentar la corriente que viaja hacia el alambrado eléctrico de la vivienda o el sistema eléctrico de una empresa, por la cual se afecta el alumbrado, líneas de producción, motores, etc. Existen muchos factores que causan las sobretensiones, entre ellas el alambrado eléctrico defectuoso o dañado o prender y apagar de repente un dispositivo de alta potencia eléctrica como un aire acondicionado o un motor eléctrico grande o descargas atmosféricas (ver Figura 6).

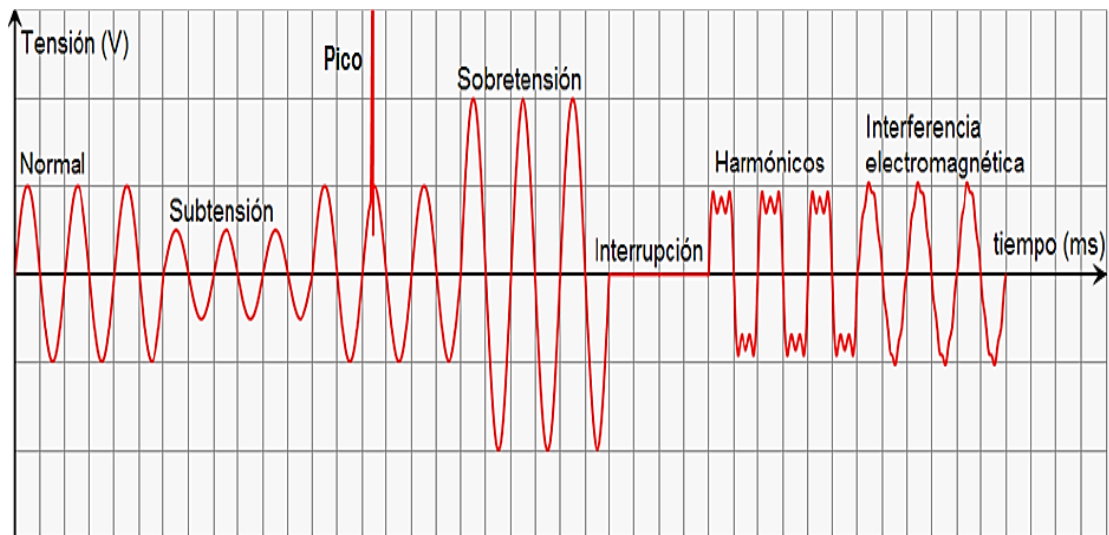


Figura 6. Tipos de sobretensiones vistas en una señal eléctrica

### 1.4.2 Sobrecorriente

Uno de los motivos por los que se genera un cortocircuito es por una sobrecorriente. Una sobrecorriente es cualquier corriente eléctrica en exceso del valor nominal de los equipos o de la capacidad de conducción de corriente de un conductor. La sobrecorriente puede ser causada por una sobrecarga, un cortocircuito o una falla a tierra.

### 1.4.3 Sobrecarga

Una sobrecarga se da cuando un equipo es excedido de su capacidad nominal, de plena carga o de un conductor que excede su capacidad de conducción de corriente nominal, cuando tal funcionamiento, persiste por suficiente tiempo, puede causar daños o sobrecalentamiento peligroso.

### 1.4.4 Cortocircuito

Un cortocircuito es un evento en el cual una fuente suministra energía a una carga de baja impedancia, ya sea de manera accidental o intencionalmente entre dos puntos de diferente

potencial, permitiendo que una corriente fluya de un conductor (fase) a tierra o a otro conductor (incluyendo un arco eléctrico).

Cuando hay un cortocircuito presente en un sistema eléctrico, puesto que la impedancia es baja y recordando la Ecuación 1, la corriente de falla tiende a infinito. En la práctica la corriente es muy alta y está limitada por las condiciones físicas de los conductores o dispositivos afectados. En circuitos industriales llega a valores de los miles de amperios (KA). Bajo estas circunstancias, la tensión tiende a cero en el punto de falla porque la impedancia es muy cercana a cero, pero la fuente sigue en su voltaje pleno alimentando la falla.

Una falla eléctrica se produce normalmente por algún tipo de contacto mecánico, como una rotura de conductores, caída de objetos metálicos entre conductores, sobretensiones. Una vez que existe la falla eléctrica se genera una pérdida de aislamiento en los conductores, lo que puede causar de manera moderada un cortocircuito sin consecuencias pero también puede causar un arco eléctrico y con ello un incendio como el que se mostró en la Figura 1. Otra característica de un cortocircuito es que, en términos de porcentaje, su presencia es de monofásicos 80%, bifásicos 15% y trifásicos 5% (IEEE, 1996).

#### ***1.4.4.1 Corrientes simétricas y asimétricas***

La corriente de cortocircuito *disponible* se define como el valor máximo posible de la corriente de cortocircuito que pueda producirse en un lugar determinado del sistema de distribución, asumiendo que no hay fallas relacionadas que puedan afectar esta corriente, como las impedancias de fallas arco, ya que estas, reducen la falla de corriente. La corriente de cortocircuito disponible está directamente relacionada con el tamaño y la capacidad de las fuentes de energía que abastecen el sistema y suele ser independiente de la corriente de carga del circuito. Cuanto mayor sea la capacidad de las fuentes de energía de alimentación del sistema, mayor será la corriente de cortocircuito disponible. Los principales factores que determinan la magnitud y duración de las corrientes de cortocircuito son el tipo de fallo, fuentes de corriente de falla presentes, y las impedancias entre las fuentes y el punto del cortocircuito.

Cuando se suscita un corto circuito, se observan dos características particulares que puede tener la señal de corriente en ese lapso de tiempo y que son característicos. Estas características son



la corriente simétrica y asimétrica. Los términos de corriente simétrica y asimétrica, es debido a la forma de onda de la corriente alterna con respecto al eje cero. Si las envolventes de los picos positivos y negativos de la forma de onda de corriente son simétricos alrededor del eje cero, son llamadas corrientes simétricas. De no ser simétricas alrededor del eje cero la envolvente, se le llama corriente asimétrica. En la Figura 7 se observan dos señales sinusoidales, una simetría con respecto al eje cero (línea continua) y la otra que tiene un offset con respecto al eje cero (línea discontinua).

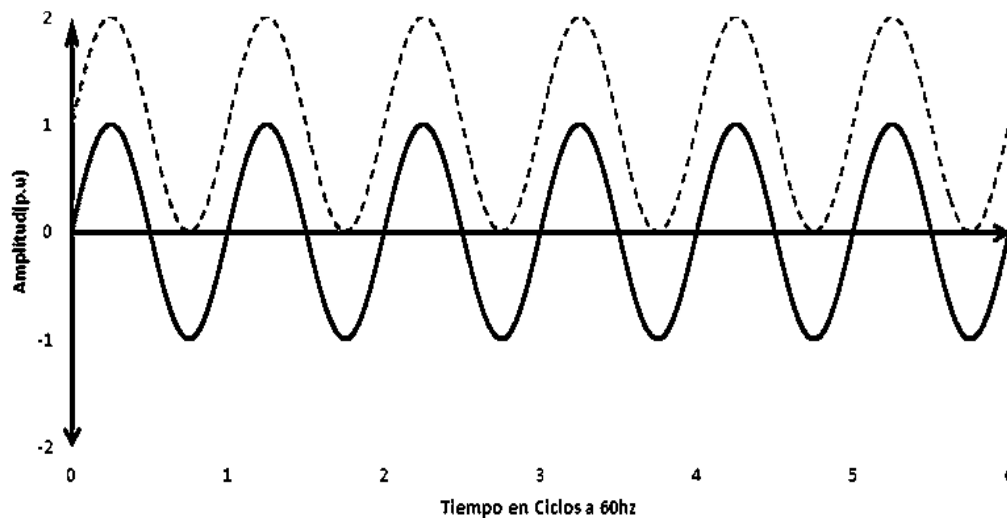


Figura 7. Ondas de C.A.

La cantidad de desplazamiento que se producirá en una forma de onda de corriente alterna con respecto al eje cero, depende del tiempo que se produce la falla, de las resistencias (cargas lineales) y las reactancias de red del sistema eléctrico alimentado.

En un corto circuito se presentan armónicos en la corriente de corto circuito y de las cuales se puede obtener información importante para las protecciones de los mismos, ya sea para baja tensión (BT) o media tensión (MT). En BT y MT se presentan algunas etapas o estados que son

importantes a considerar tanto para la protección como para el diseño de un sistema eléctrico, dichas etapas son:

- Subtransitorio: Corresponde a los 10 o 20 primeros milisegundos del defecto.
- Transitorio: A continuación del anterior y que se prolonga hasta 500 milisegundos.
- Permanente o reactancia síncrona: Superior a 500 milisegundos.

El tiempo de estos estados cobra relevancia si se desea proteger un sistema contra cortocircuitos, mediante interruptores automáticos temporizados o retardados, ya que interrumpe la corriente en un tiempo determinado a partir de la detección de la falla.

La relevancia de la corriente asimétrica radica en dos aspectos importantes. El primero es la fuerza electromagnética ejercida sobre las piezas del equipo que llevan la corriente y el segundo es la energía térmica generada por la corriente de falla. Si una corriente tiene una duración prolongada, el efecto térmico o de calentamiento es mucho mayor. La simetría por tanto, influye en el diseño y la aplicación de dispositivos que estarán expuestos a la corriente de falla y deben ser considerados, debido tanto a las fuerzas mecánicas y a los efectos térmicos colocados en los equipos de protección.

#### **1.4.5 Tipos de fallas eléctricas.**

Una falla eléctrica por corto circuito, se puede clasificar de diferentes formas, atendiendo a su origen, la forma o medio por la cual se origina, por los daños que causa, etc. La IEEE, en su publicación *Violet Book*<sup>5</sup>, menciona una clasificación que sirve como estándar internacional. Los tipos de falla descritos en el *Violet Book*, hacen mención de circuitos que tienen tres fases presentes y la clasificación se da de acuerdo a la combinación de los conductores involucrados.

Cada una de las fallas que se muestra en la Figura 8 genera una corriente de amplitud definida y características específicas. La razón de llamarse fallas asimétricas es debido a que las corrientes post-falla son diferentes en magnitudes y no están desfasadas en 120 grados. En el

---

<sup>5</sup> Libro de la IEEE que hace referencia a la clasificación y prevención de fallas eléctricas.

estudio de éstas corrientes, se utiliza generalmente el método de componentes simétricas, el cual constituye una importante herramienta para analizar sistemas desequilibrados.

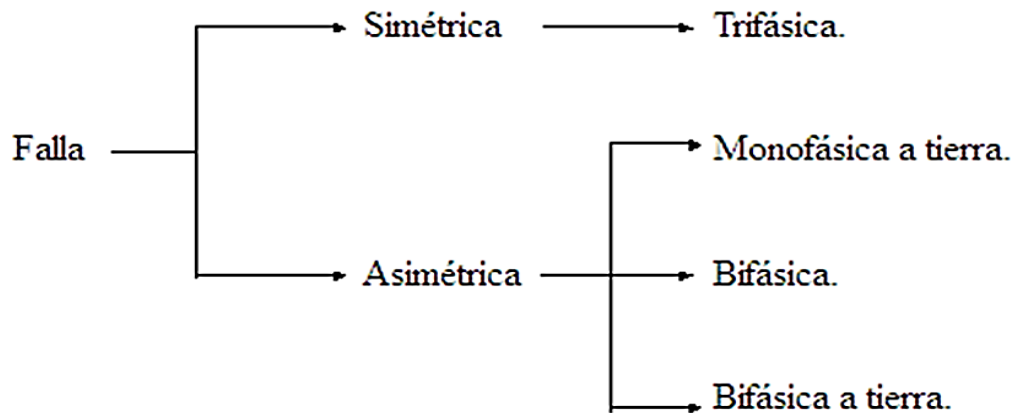


Figura 8. Clasificación de Fallas

En sistemas de distribución, para los efectos de evaluar las máximas corrientes de fallas, sólo se calculan las corrientes de cortocircuito trifásico y monofásico.

Las fallas monofásicas a tierra pueden generar corrientes de falla cuya magnitud pueden superar a la corriente de falla trifásica, sin embargo, esto es más frecuente que ocurra en sistemas de transmisión o de distribución en media tensión, sobre todo cuando la falla se ubica cerca de la subestación. Es poco frecuente que la corriente de falla monofásica supere en amplitud la corriente generada por una falla trifásica. La magnitud de la falla monofásica puede superar a la generada por una falla trifásica en el mismo punto, en el caso de que la falla no involucre la malla de tierra.

Una de las formas en que los fallos eléctricos se clasifican es en base a la presencia de aire en la trayectoria de circuito de falla. Si la ruta contiene aire (a poca distancia de aire), la falla se llama falla de arco, de lo contrario el fallo se llama falla sólida. Por falla sólida, la impedancia de falla se considera insignificante (muy baja). Por otro lado, debido a la alta impedancia de aire, la corriente de fallo de arco es siempre menor que la falla sólida. La Falla de arco libera gran

cantidad de energía a los medios aéreos y causa un *Arco eléctrico o destello de arco*, que produce muy altas temperaturas (superiores a 5.000 grados F). Por lo tanto, la formación de fallas por arco eléctrico se considera más peligrosa que una falla sólida. Para el cálculo de la corriente de cortocircuito, se consideran las fallas sólidas.

#### 1.4.5.1 *Falla trifásica total (Simétrica)*

Una falla sólida trifásica describe la condición en la que los tres conductores se mantienen físicamente juntos con una impedancia cero entre ellos, justo como si estuvieran sólidamente juntos. Para un sistema simétrico equilibrado, la magnitud de corriente por defecto se equilibra igualmente dentro de las tres fases. Si bien este tipo de falla no ocurre con frecuencia, sus resultados se utilizan para la selección de dispositivos de protección, ya que de este tipo de falla, generalmente se obtienen los valores máximos de corriente de cortocircuito. En la Figura 9 se proporciona una representación gráfica de una falla sólida trifásica (GE Energy, 2012).

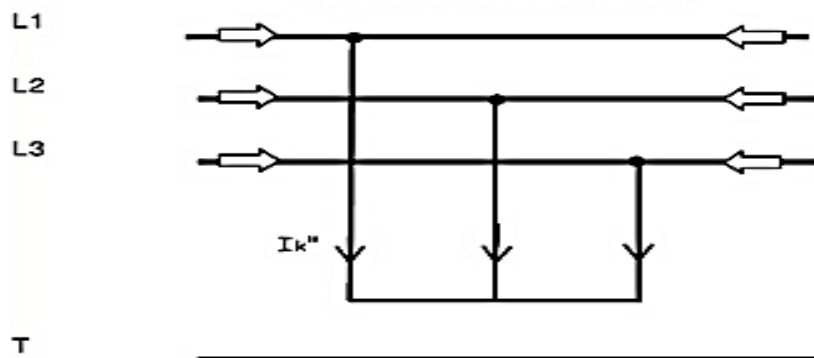


Figura 9. Falla simétrica

#### 1.4.5.2 *Falla bifásica o línea-línea*

Las fallas sólidas línea a línea (ver Figura 10), son más comunes que las fallas trifásicas y tienen corrientes de falla que son aproximadamente el 87% de la corriente trifásica falla sólida. Este tipo de fallo no está equilibrado dentro de las tres fases y su corriente de falla rara vez se calcula

para las calificaciones de equipo, ya que no proporciona la corriente máxima de falla magnitud. La corriente de línea a línea se puede calcular multiplicando el valor de tres fases por 0.866, cuando la impedancia  $Z_1 = Z_2$ .

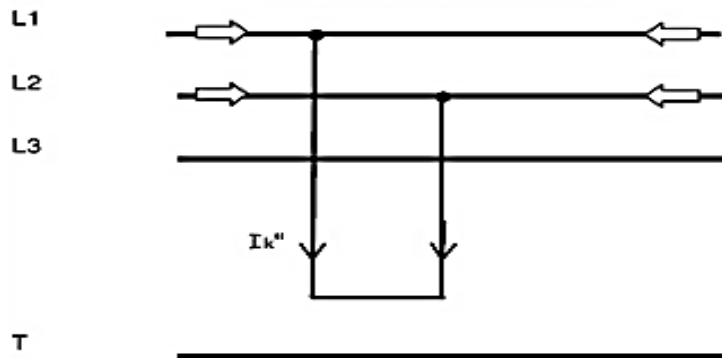


Figura 10. Falla línea-línea

#### 1.4.5.3 Falla bi o trifásica a tierra o doble línea a tierra

Una falla Línea – Línea - Tierra, son típicamente los fallos que incluye dos conductores de fase a tierra y se caracteriza por ser una falla desequilibrada. Las magnitudes de las corrientes de falla bifásica a tierra suelen ser mayores que las de las fallas Línea - Línea, pero son menos que los de fallas trifásicas. En la Figura 11 se muestra su representación eléctrica y se observan dos líneas a tierra.

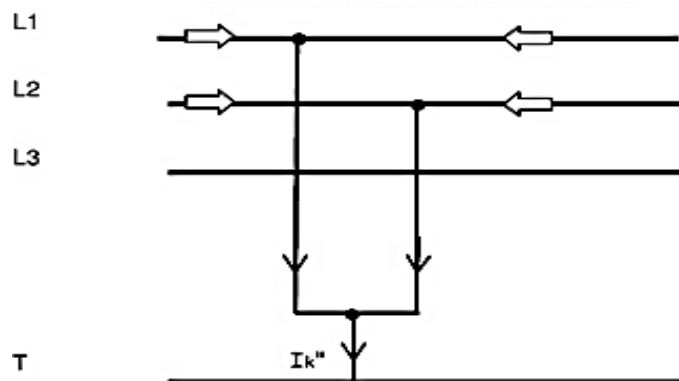


Figura 11. Falla doble a tierra

#### 1.4.5.4 Falla monofásica o línea-tierra

Las fallas Línea-Tierra, ver Figura 12, son el tipo más frecuente de los problemas y suelen ser menos perturbador para el sistema. La intensidad eléctrica en la falla de fase puede variar desde un valor cercano a cero hasta un valor ligeramente mayor que la corriente de falla sólida trifásica. En fallas de línea a tierra, la magnitud de la corriente se determina por el método en el que el sistema está conectado a tierra y la impedancia de la trayectoria de retorno a tierra de la corriente de defecto. (IEEE, 2006)

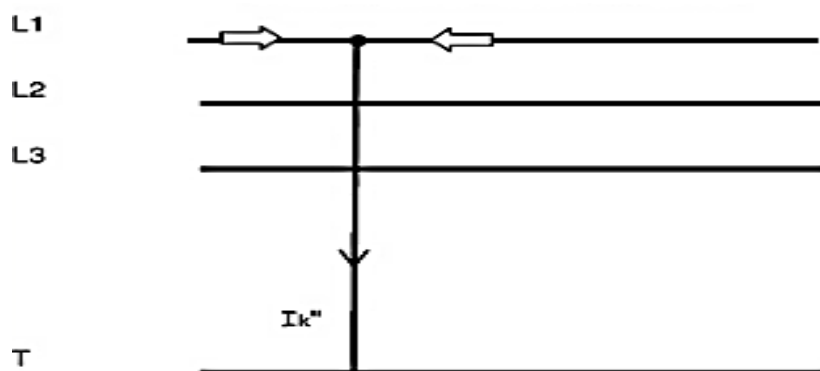


Figura 12. Falla línea - Tierra

#### 1.4.5.5 Falla por arco

Una falla de arco es susceptible de presentarse en cualquier parte del sistema eléctrico, ya sea distribución, transmisión o subtransmisión. El tipo de falla de arco se presenta por el debilitamiento dieléctrico del medio aislante entre dos fases cuyo potencial puede ser elevado o cuya distancia entre fases disminuye hasta el punto de contacto ocasionando la falla de arco, siendo el aire el conductor de la corriente de falla. Las fallas de arco se limitan a sistemas en los que los valores de tensión son mayores a 120 volts debido a la gran cantidad de energía requerida para sostener un arco eléctrico, dicho de otro modo, la resistencia de arco es mayor. En redes de alta tensión (superiores a 500 volts), la resistencia de arco es muy baja y se aproxima a cero (falla sólida). Como se muestra en la Tabla 2, en redes de mayor voltaje, la formación de fallas por arco es superior y muestran tener una corriente de falla a tierra que van desde 0% a 100%

de la corriente de falla sólida, en función de la tensión del sistema y el tipo de fallo en cuestión. Cuanto mayor sea la posible magnitud de corriente de falla, menor es la resistencia de arco.

Tabla 2

*Valores mínimos de corriente de falla en fallas trifásicas sólidas.*

| Tipo de falla de arco | Sistema de Tensión |           |
|-----------------------|--------------------|-----------|
|                       | 480Y/277V          | 208Y/120V |
| Trifásica             | 89%                | 12%       |
| Línea a Línea         | 74%                | 2%        |
| Línea a Tierra        | 38%                | 1%        |

## 1.5 Protección de Falla a Tierra

### 1.5.1 ¿Que origina una falla a tierra?

De la diversidad de fallas eléctricas que existen, en este reporte de aplicación de conocimientos, se centrará en las fallas a tierra. Recordando que en el punto 1.4.4 se abordó la definición de cortocircuito, es más claro entender la importancia de proteger los sistemas eléctricos de alguna posible falla, en el especial una falla a tierra, el cual se suscita cuando una de las fases del sistema entra en contacto directo a tierra o con alguna parte metálica que se encuentre aterrizada. Las fallas a tierra pueden originarse de diferentes formas pero las más comunes son, reducción del aislamiento, daños físicos en el aislamiento de conductores o una cantidad excesiva de transitorios que pueden dañar el aislamiento. Estos problemas se pueden presentar debido a la humedad, contaminación ambiental, esfuerzos mecánicos, deterioro del aislamiento, etc. Aunque algunas de las situaciones anteriores pueden ser controladas con un buen programa de mantenimiento, siempre existe el riesgo latente de una falla, más comúnmente durante la instalación o mantenimiento de los equipos. (GE Energy, 2012).

La corriente de falla a tierra, también conocida como corriente de fuga, siempre retornará a la fuente que la origina, como se muestra en la Figura 13, ya sea a través del conductor de tierra o por cualquier otro medio que le ofrezca menor resistencia, incluyendo, claro está, un ser humano. La corriente de falla que recorre al sistema de vuelta al sistema tiene que ser de una magnitud muy baja y por ello se recomienda la protección de los equipos. Si la intensidad eléctrica de falla es muy alta, puede llegar a afectar el aislante de los conductores, electrificar o ionizar ciertas áreas o dispositivos, dando paso a nuevas fallas a tierra causados por la degradación del material aislante.

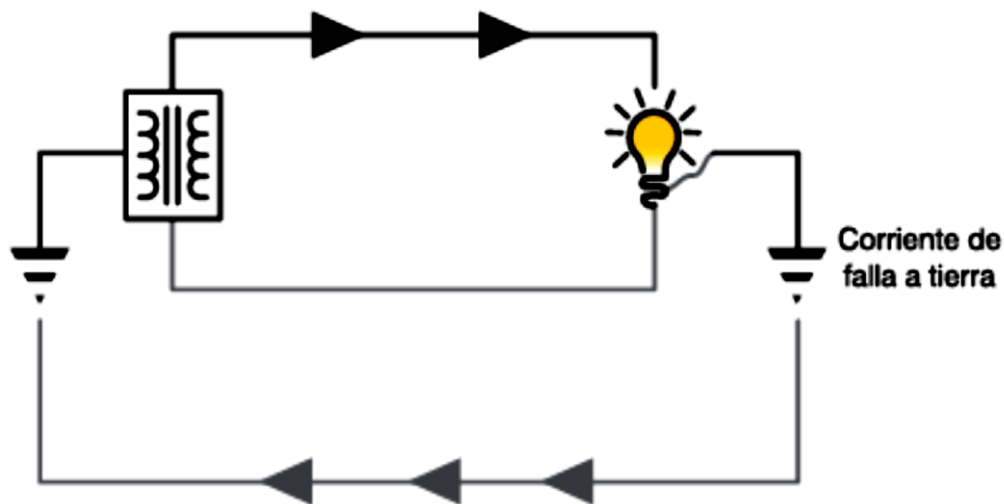


Figura 13. Trayectoria de Corriente de Fuga

### 1.5.2 Consecuencias de una falla a tierra

Ante una falla eléctrica, siempre se debe tener en cuenta que habrá daños colaterales de dos tipos principalmente: daños humanos y daños materiales. Ambos son indeseables en cualquier ámbito, ya sea residencial o industrial. Las consecuencias de una falla a tierra pueden ir desde la interrupción del suministro de energía eléctrica, gracias a un adecuado sistema de protección, hasta la destrucción completa de los equipos por explosión o incendio e incluso quemaduras o



electrocución de personas que se encuentre cerca del área de la falla. Las consecuencias de una falla a tierra van directamente ligadas al método de puesta a tierra que se esté utilizando. Los accidentes eléctricos más comunes ocurren cuando una persona se hace parte del camino por donde fluirá la corriente a tierra. A este flujo se le llama *Falla a Tierra*.

#### **1.5.2.1 Consecuencias en el cuerpo humano**

Una corriente de fuga eléctrica puede ser peligrosa debido a la circulación de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano. El impacto sobre el cuerpo humano depende de: el valor de la corriente, tipo de corriente, por qué parte del cuerpo circula, la duración y la frecuencia.

Hay dos tipos de contacto de los que se hace referencia, el directo e indirecto. Se habla de Contacto directo cuando una persona entra en contacto con partes vivas o conductores que están normalmente energizados. El contacto indirecto se da cuando una persona entra en contacto con un elemento que accidentalmente esta energizado y que usualmente no lo está. Esto podría suceder por una falla en la protección básica. Si una persona entra en contacto con este elemento energizado, circulará una corriente a través de él.

En la norma IEC 60479-1 <sup>6</sup>se mencionan datos como se observan en la Figura 14, en donde se indican los efectos que produce una corriente alterna de frecuencia comprendida entre 15 y 100 Hz con un recorrido mano izquierda -los dos pies. Se distinguen las siguientes zonas:

- Zona 1: Habitualmente ninguna reacción.
- Zona 2: Habitualmente ningún efecto fisiológico peligroso.
- Zona 3: Habitualmente ningún daño orgánico. Con duración superior a 2 segundos se pueden producir contracciones musculares dificultando la respiración, paradas temporales del corazón sin llegar a la fibrilación ventricular.
- Zona 4: Riesgo de parada cardiaca por: fibrilación ventricular, parada respiratoria, quemaduras graves.

---

<sup>6</sup> Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). IEC 60479: “Efectos de las corriente eléctrica circulando a través del cuerpo humano” - Parte 1 “Efectos de la corriente eléctrica alterna de frecuencias comprendidas entre 15 y 100 Hz”.

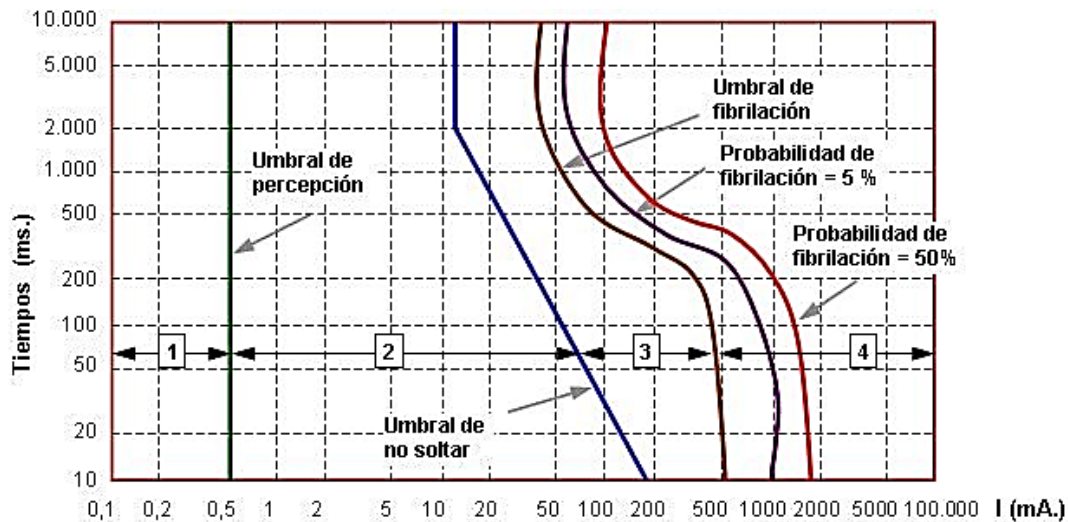


Figura 14. Impacto fisiológico de la corriente sobre el cuerpo humano

Cuando una corriente mayor a 30 mA circula por alguna parte del cuerpo humano, hay un serio peligro para la persona si la corriente no es interrumpida rápidamente. Por este motivo se ha fijado en 30mA el umbral de detección cuando se requiere proteger a la gente contra contacto directo.

### 1.5.2.2 Daños materiales

La magnitud de la corriente de falla a tierra varía de manera importante según el método de puesta a tierra que se esté empleando. Aunque la falla a tierra puede alcanzar valores de corriente de hasta miles de amperes, la NEC 2011, en el artículo 230.95 inciso (A), indica que el ajuste máximo para la protección de falla a tierra deberá ser de 1200 A (Amperes) y el tiempo máximo de retraso para corrientes de 3000 A o más deberá ser de 1 segundo (GE Energy, 2012).

La elección de ajuste en amperes para seleccionar cada dispositivo de protección, depende básicamente de las características del circuito a ser protegido, por ejemplo si se alimentan cargas individuales los niveles de corriente pueden ser de 5 a 10 A, pero por otro lado si el circuito alimenta múltiples cargas y cada carga cuenta con su protección individual, los ajustes de protección del alimentador deberán ser mayores a fin de permitir que las protecciones “aguas abajo” operen ante fallas de menor magnitud en sus respectivos circuitos.

Si el sistema no cuenta con un esquema de protección adecuado, los efectos de una falla a tierra pueden ser muy destructivos.

En la Tabla 3 se describen algunos de los daños en la infraestructura que podría causar una falla a tierra.

Tabla 3

*Causas y efectos de las fallas a tierra.*

| Tipo de falla  | Causa  | Efecto   |
|----------------|--|--|
| Sobrecarga     | Incremento desmedido de la carga conectada.                                  | Calentamiento gradual de conductores y equipos de la red eléctrica, riesgo de incendio.  |
| Cortocircuito  | Conexión franca entre conductores de fase y/o conductor neutro.              | Grandes esfuerzos mecánicos y térmicos que se producen súbitamente en el momento de la falla, riesgo de destrucción de equipos e incendio. |
| Falla a tierra | Degradación parcial o total de aislamientos que permite la fuga de corriente | Corriente eléctrica que puede circular por el cuerpo de las personas en contacto con equipos eléctricos, riesgo de electrocución.          |

### 1.5.3 Normas relacionadas para la protección de falla a tierra.

A pesar de que el NEC<sup>7</sup> (NOM001 en México) ha sufrido diversos cambios a través de los años, los artículos correspondientes a la protección de falla a tierra no han cambiado. A continuación se citan algunos puntos establecidos en diferentes normas.

➤ **NOM001-SEDE-2005 en México (NEC-2011)**

- **215-10. Protección de equipos contra fallas a tierra.** Todos los alimentadores con una corriente eléctrica de desconexión de 1000 A o más, en un sistema conectado en estrella y sólidamente conectado a tierra con una tensión eléctrica a tierra de más de 150 V, pero que no supere 600 V entre fases, deben estar dotados de equipo de protección contra fallas a tierra de acuerdo con las disposiciones de la sección 230-95.
- **230-95. Protección de equipo contra fallas a tierra.** Se debe proveer protección a los equipos contra fallas a tierra en las acometidas de sistemas en “Y” (estrella) sólidamente puestos a tierra con tensión eléctrica a tierra superior a 150 V, pero que no supere 600 V entre fases para cada dispositivo de desconexión de la acometida de 1 000 A nominales o más.
- **240-13. Protección de los equipos por falla a tierra.** Se debe proteger a los equipos contra fallas a tierra de acuerdo con lo establecido en 230-95 para instalaciones eléctricas sólidamente conectadas a tierra y en estrella, de más de 150 V a tierra pero que no superen 600 V entre fases, para cada dispositivo individual utilizado como medio de desconexión a la red del edificio o estructura que sea de 1000 A nominales o más.

Resumiendo los artículos anteriores de las normativas mencionadas, a continuación se enumeran las características con las que debe contar un sistema eléctrico que se requiera el uso de una protección de falla a tierra:

1. Tener al menos un sistema sólidamente puesto a tierra.

---

<sup>7</sup> National Electrical Code. Estándar estadounidense para la instalación segura de alumbrado y equipos eléctricos

2. Colocar una protección en instalaciones donde el sistema tenga un voltaje de línea a línea de entre 260 y 600 V.
3. Que el sistema cuente con un dispositivo de desconexión de 1000 A o más.
4. Que la carga alimentada no sean bombas contra incendios.

Las 4 características anteriores aplican para la NOM001 en México y para el NEC- 2011, sin embargo, existen algunas características adicionales mencionadas en el NEC-2011

1. El ajuste máximo de la protección de falla a tierra deberá ser de 1200 A y el tiempo máximo de retraso para corrientes de 3000 A o más deberá ser de 1 segundo. (NEC 230.95A)
2. El sistema completo de protección de falla a tierra y no solamente la unidad de disparo individual, deberá ser probado en la instalación inicial. (NEC 230.95C)

#### 1.5.4 Tipos de puesta a tierra

El término *tierra* se utiliza comúnmente en la industria eléctrica para referirse a dos aspectos: *tierra del equipo* y *puesta a tierra del sistema*. Puesta a tierra del equipo significa la conexión de toma de tierra de los materiales conductores que no lleven corriente como conducto, bandejas de cables, cajas de empalme y marcos de motor. Puesta a tierra del sistema significa la conexión de toma de tierra a los puntos neutros de conductores portadores de corriente, como el punto de un circuito, un transformador, maquinaria rotativa, o un sistema, ya sea sólida o con un dispositivo limitador de corriente neutral. La Figura 15 ilustra los dos tipos de conexión a tierra.

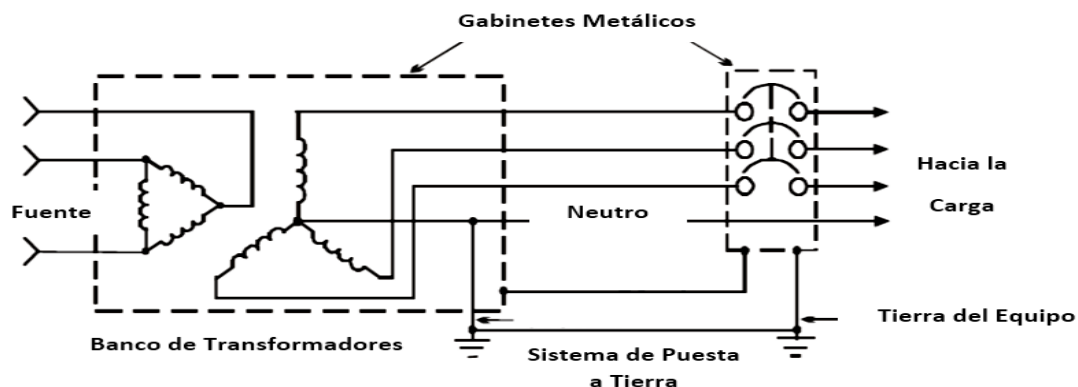


Figura 15. Tipos de conexión a tierra

Un sistema de puesta a tierra es aquel en el que al menos un conductor o punto (por lo general el hilo medio o punto de transformadores o generadores bobinados neutral) está conectado a tierra intencionalmente, ya sea sólidamente o a través de una impedancia (IEEE Standard 142-1991 1.2 (IEEE, 1996)).

Los tipos de conexión a tierra del sistema, normalmente utilizados en sistemas de potencia industrial y comercial, son base sólida, conexión a tierra por baja resistencia, conexión a tierra de alta resistencia, y sin conexión a tierra.

Uno de los propósitos del sistema de puesta a tierra es el de controlar la tensión con respecto a tierra dentro de límites predecibles. También es el de prever un flujo de corriente que permitirá la detección de una conexión no deseada entre los conductores del sistema y tierra (una falla a tierra) y de esta manera iniciar la operación de dispositivos de protección para retirar el voltaje de estos conductores.

#### ***1.5.4.1 Conexión sólidamente a tierra***

Sólidamente Puesto a Tierra se refiere a la conexión del neutro de un generador, transformador de potencia directamente a tierra. Los transformadores de potencia suelen tener en el devanado primario, una conexión delta y en el secundario una conexión estrella. Ésta configuración puede ser convenientemente protegida contra sobre voltajes y fallas a tierra mediante la conexión sólidamente a tierra. La conexión es como se muestra en la Figura 16, la cual muestra que se puede aplicar a conexiones tipo delta o estrella. Éste sistema permite flexibilidad ya que la razón por la que se ve favorecido esta conexión es porque se pueden conectar cargas de línea a neutro.

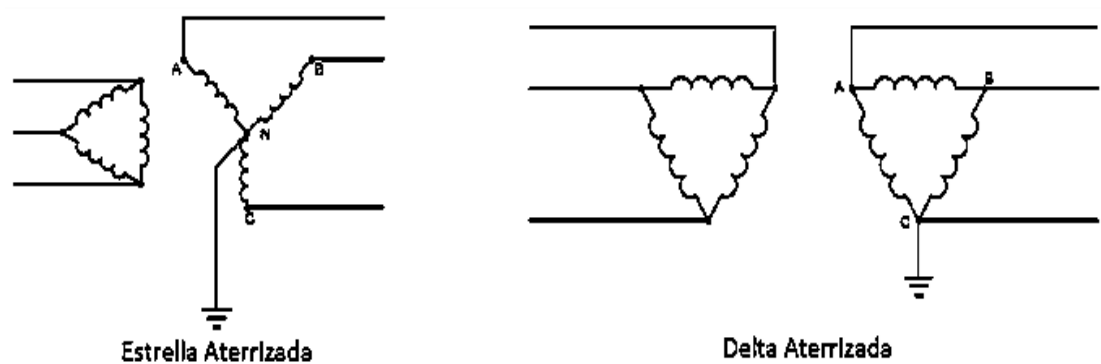


Figura 16. Sistema sólidamente a tierra

Cuando se utiliza ésta configuración en sistemas de 600 V o más se tienen que utilizar relevadores de protección residuales o de secuencia cero. Los interruptores normalmente cuentan con transformadores de corriente que proveen la señal de cada una de las fases para el relevador de sobre corriente y el relevador de falla a tierra toma la señal de la estrella que se forma con los transformadores de corriente para incrementar la sensibilidad de fallas a tierra. Los métodos de detección como secuencia cero y residual serán analizados más adelante.

Una de las desventajas del sistema sólidamente puesto a tierra es que las magnitudes de falla a tierra que se alcanzan, pudieran ser tan grandes que podrían destruir los equipos por completo. Sin embargo, si estas fallas se liberan rápidamente los daños a los equipos estarían dentro de niveles *aceptables*.

#### 1.5.4.2 Conexión a tierra por baja resistencia

El sistema de baja resistencia a tierra es similar al sistema de puesta a tierra sólidamente, en la que las sobretensiones transitorias no son un problema. La resistencia limita la magnitud de la corriente de falla a tierra para reducir la relación de daños durante fallas a tierra. La conexión se muestra en la Figura 17.

En éste sistema se limita la corriente de falla a tierra a un valor entre 100A y 1000A, siendo el valor más común de 400A. El valor de ésta resistencia se calcula como:

$$R = \frac{V_{L-N}}{I_g};$$

Ecuación 3

Donde

$R$  = Resistencia de baja resistencia.

$V_{L-N}$  = Voltaje de Línea a Neutro del sistema.

$I_g$  = Corriente de falla a tierra deseada.

Éste sistema tiene la ventaja de que facilita la liberación inmediata y de forma selectiva de la falla a tierra. El método utilizado para detectar esta falla se basa en utilizar un relevador de sobre corriente. Al presentarse una falla el voltaje en el neutro se eleva casi al voltaje de línea a neutro y comienza a fluir una corriente a través de la resistencia. Una vez que el relevador detecta la falla envía la señal de apertura al interruptor en baja tensión asociado.

El aterrizamiento a través de Baja Resistencia se utiliza en sistemas de media tensión de 15 KV y menores, particularmente en donde se utilizan grandes máquinas rotativas y donde se busca reducir la falla a tierra a cientos de amperes en lugar de miles de amperes.

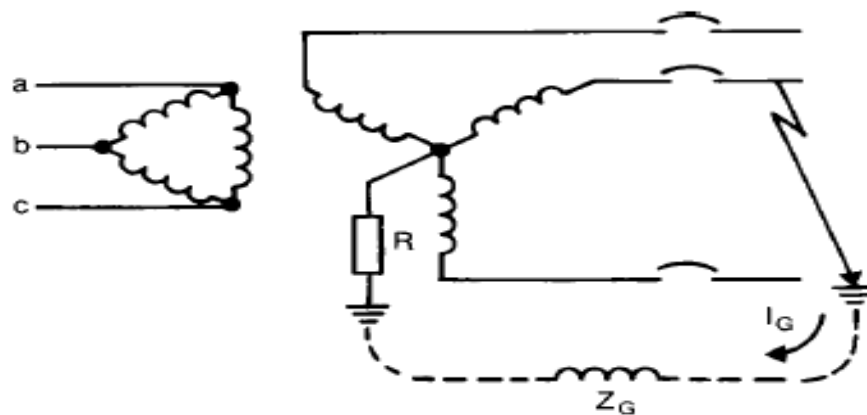


Figura 17. Puesta a tierra por baja resistencia



Un ejemplo, para determinar la resistencia éste método, puede ser una corriente de falla de 600 A y una tensión de 2400 V. Retomando la Ecuación 3, la resistencia es de 4 ohms para un sistema de 4160 V.

### 1.5.4.3 Conexión a tierra por alta resistencia

Una conexión por alta resistencia es aquella donde se inserta una resistencia intencionalmente que limita la corriente de falla a tierra de tal manera que la corriente puede fluir durante un período prolongado sin exacerbar el daño. Para éste método se utiliza una resistencia de neutro de alto valor óhmico. La resistencia es utilizada para limitar  $I_g$  (corriente de falla a tierra) y típicamente se limita a 10 A o menos. La magnitud de fallo de corriente es predecible independientemente de la ubicación de la falla, ya que la resistencia de puesta a tierra insertada en el neutro es muy grande en comparación con la impedancia del resto de la vía de falla a tierra.

Cuando se tiene un sistema como éste, no se requiere una liberación inmediata de la falla ya que la corriente está limitada a un nivel muy bajo y a menudo pueden mantener la continuidad del servicio bajo condiciones de falla a tierra hasta un tiempo favorable para un corte de energía eléctrica para borrar el fallo. Los dispositivos de protección asociados a un sistema de Alta Resistencia permiten al sistema seguir trabajando con la presencia de una falla a tierra y envían una alarma en lugar de disparar y abrir la protección asociada. En la Figura 18 se muestra la conexión típica de éste método.

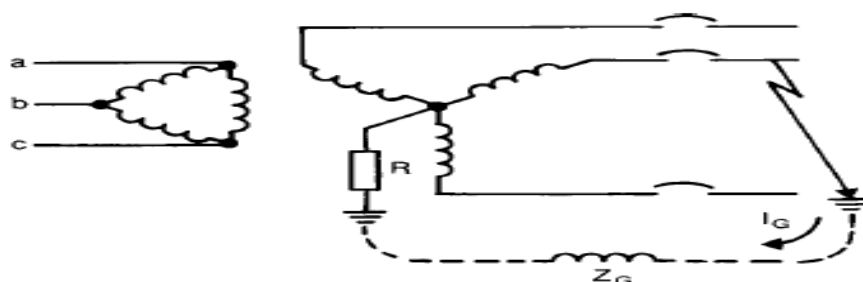


Figura 18. Puesta a tierra por alta resistencia

Para calcular la resistencia, con los datos de 1-5 A y una tensión de 277 V, la resistencia se calcula recurriendo a la Ecuación 3, en donde se observa que la resistencia varía de 56 – 277 ohms para un sistema de 480 V.

Las ventajas de utilizar éste sistema son las siguientes:

1. Continuidad del Servicio. La primera falla a tierra no requiere interrumpir el servicio.
2. Se reducen sobrevoltajes transitorios debido a fallas recurrentes.
3. Un trazador de señal o sistema de pulsos facilita la ubicación de la falla.
4. Se elimina la necesidad de un sistema coordinado de relevadores de falla a tierra.

Típicamente éste sistema puede ser utilizado en sistemas de Baja Tensión en donde no se tienen cargas monofásicas, en Media Tensión donde se requiere la continuidad del servicio y la corriente capacitiva no es muy alta y en retrofits (técnica de renovación de instalaciones, equipo, etc.) en donde se tenía previamente un sistema no aterrizado.

#### ***1.5.4.4 Conexión a tierra flotante***

Éste sistema se define como aquel que no cuenta con una conexión intencional a tierra. Sin embargo siempre existe un acoplamiento capacitivo entre los conductores de línea del sistema y también entre conductores de línea y tierra. A éste sistema también se le conoce como Sistema aterrizado por Capacitancia.

Cuando el sistema se encuentra operando sin falla alguna, las corrientes capacitivas y los voltajes a tierra por fase son iguales y desplazados 120 grados uno del otro por lo que se tiene un sistema vectorial totalmente balanceado (GE Energy, 2012).

En la Figura 19 se muestra el efecto capacitivo que se crea en un sistema trifásico. La corriente de falla a tierra que fluye en el sistema, es la corriente de carga capacitiva del sistema, por lo general sólo unos pocos amperios.

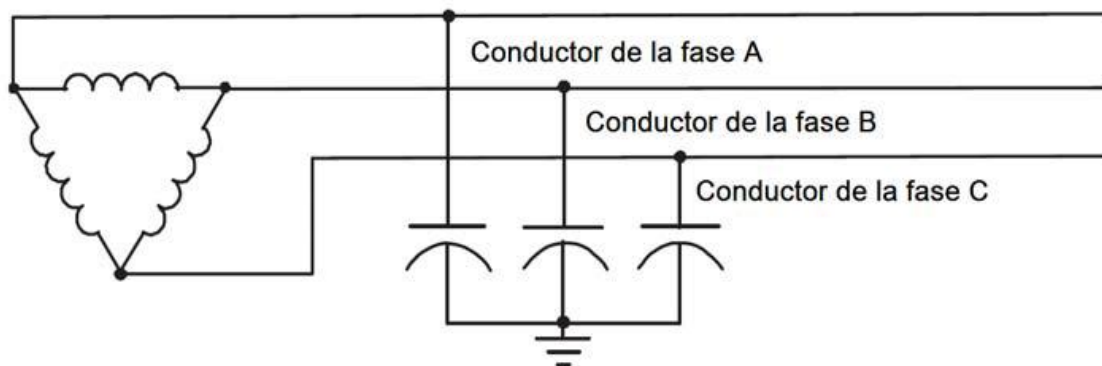


Figura 19. Conexión a tierra flotante

Cada que se presenta una falla en ésta configuración se genera un sobre voltaje que puede ser muchas veces mayor en magnitud que el nominal (6 a 8 veces) el cual es resultado de la resonancia entre la reactancia inductiva del sistema y la capacitancia distribuida a tierra. Si la falla a tierra es intermitente o se permite que continúe, el sistema podría ser sometido a posibles sobretensiones graves a tierra, que puede ser tan alta como la tensión de fase seis u ocho veces. Esto puede perforar el aislamiento y provocar fallas a tierra adicionales. Estas sobretensiones son causadas por la carga repetitiva de la capacitancia del sistema, o por la resonancia entre la capacitancia del sistema y las inductancias de los equipos en el sistema. Éstos sobre voltajes pueden causar fallas en el aislamiento del sistema.

### 1.5.5 Métodos de detección de falla a tierra.

El flujo de corriente de falla a tierra puede ser monitoreado de diferentes formas ya sea para monitorear la corriente proveniente de la carga de afectada o la corriente que regresa al neutro de la fuente, ya sea un transformador o un generador. Cuando se monitorea la corriente que proviene de la carga con falla, todos los conductores de alimentación del sistema son monitoreados individualmente y cuando se monitorea el regreso de la falla a tierra únicamente se monitorea el neutro. Para realizar éste monitoreo se utilizan transformadores de corriente ya

sea en todas las líneas o en el neutro dependiendo del método que se esté empleando. Los dispositivos de protección que reciben las señales provenientes de los transformadores de corriente deben tener la capacidad de ajustar los valores de “pick-up” o de disparo, así como la capacidad de ajustar los retrasos de tiempo.

La protección principal contra el contacto directo es la prevención física del contacto, mediante barreras, gabinetes aislantes, etc. Esta clase de medida de protección se conoce como Protección Básica. La protección principal contra contactos indirectos es la desconexión automática de la alimentación del equipo respectivo. Esta clase de protección se conoce como Protección de Falla, en donde normalmente se utiliza un monitor de corriente de falla.

#### 1.5.5.1 Protección residual

La protección residual es comúnmente utilizada en sistemas de media tensión. Éste sistema consiste de la utilización de 3 transformadores de corriente interconectados los cuales envían una señal proporcional de la corriente de falla a tierra al relevador o dispositivo de protección para que actúe. Éste sistema no es utilizado a menudo en equipos de baja tensión, sin embargo están disponibles sistemas de baja tensión con 3 transformadores de corriente conectados de manera residual como se muestra en el siguiente diagrama (ver Figura 20).

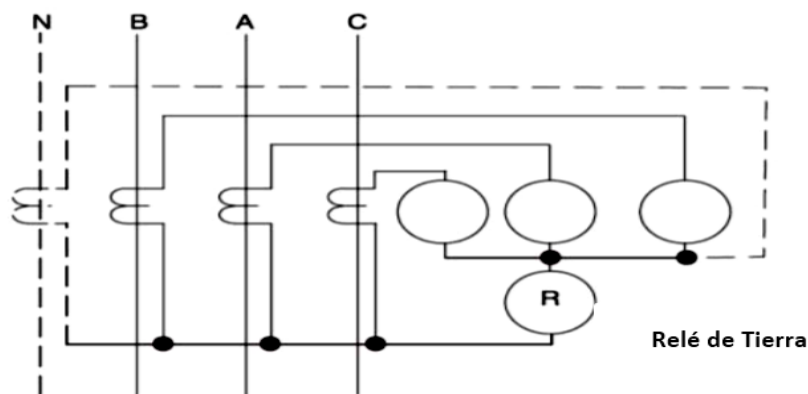


Figura 20. Método de detección residual

Cuando se tienen sistemas de 3 fases 4 hilos en donde se alimentan cargas monofásicas, se debe agregar un cuarto transformador de corriente para monitorear la corriente consumida por dichas cargas monofásicas (GE Energy, 2012).

La selectividad del esquema o tipo de protección residual depende de la relación de transformación de los *Transformadores de Corriente*, los cuales deben ser de la capacidad suficiente para las cargas normales del circuito. En este sistema de protección residual no se utilizan disparos instantáneos debido a que durante el arranque de algunas cargas como motores se puede generar algún desbalance “normal” entre fases el cual generaría un disparo del dispositivo de protección.

#### 1.5.5.2 *Sensor de secuencia cero*

El método de Núcleo balanceado o de secuencia cero, se basa en la sumatoria vectorial de las intensidades eléctricas. En éste método se utiliza solamente un transformador de corriente el cual monitorea las tres fases del sistema (y el neutro, si existe) al mismo tiempo. A diferencia del método residual, el transformador de corriente es de menor capacidad de intensidad eléctrica, ya que únicamente monitorea un posible desbalance y no la corriente de carga de cada línea.

En condiciones de operación normal (balanceado entre fases), la suma vectorial de las corrientes que circulan a través del TC (*Transformador de Corriente*) es cero. Cuando se presenta una falla a tierra la corriente circula a través de conductor de tierra y genera un desbalance en la salida del TC lo que genera la operación del dispositivo de protección (ver Figura 21).

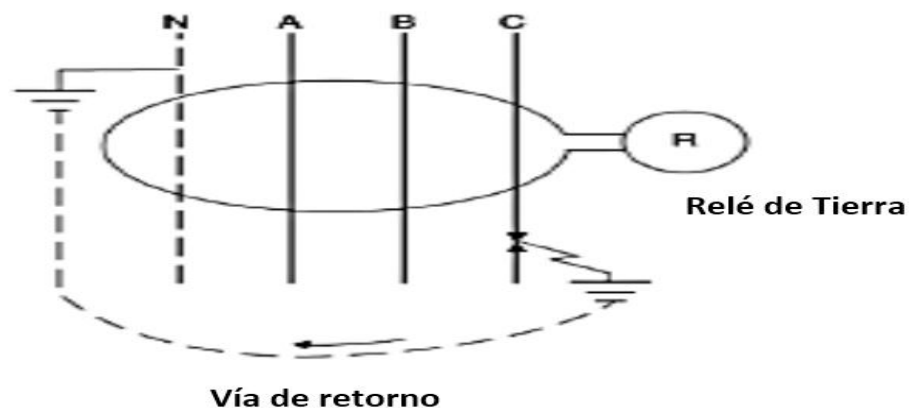


Figura 21. Método de detección de secuencia cero

### 1.5.5.3 Protección de regreso a tierra

Al colocar un transformador de corriente en el neutro aterrizado, con un relevador de protección asociado (ver Figura 22), provee un método de detección de bajo costo, debido a que solo se monitoreara la corriente de falla a tierra. El ajuste de detección de falla puede ser fijado a unos valores de intensidad eléctrica muy bajos (GE Energy, 2012).

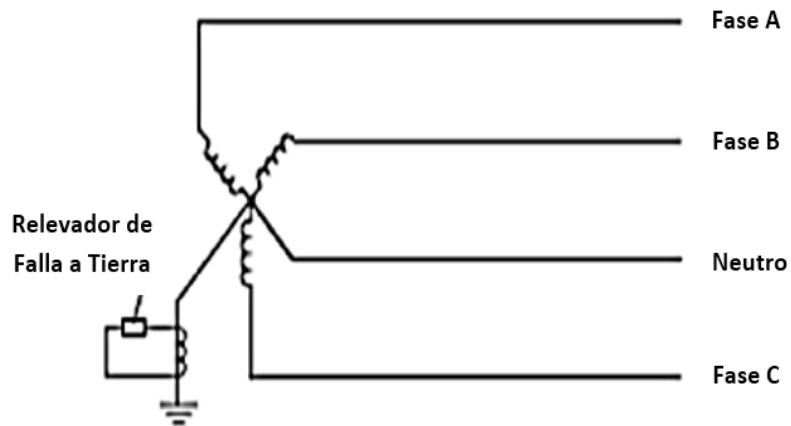


Figura 22. Protección de regreso a tierra

En sistemas aterrizados por baja resistencia en 5 y 15 KV, se utiliza frecuentemente éste método, donde las corrientes de falla a tierra son relativamente bajas.

También se utiliza en sistemas sólidamente aterrizados de 480 V, 3 fases 3 hilos o 3 fases 4 hilos. Para proveer una protección adecuada, el relevador debe ser cableado para disparar el interruptor principal del secundario y establecer un retraso de tiempo para permitir que el interruptor dispare y si una vez que el interruptor abrió se mantiene la falla a tierra, se debe enviar una señal para que la protección del lado primario opere.

**CAPÍTULO II:**  
**Especificaciones y**  
**Diseño del Monitor**  
**de Falla a Tierra.**

Este capítulo describe el diseño del monitor de falla a tierra. Para ello se dividió el problema en bloques a fin de hacer más práctico y fácil de afrontar el problema. Al final la suma de esas diferentes etapas, que son tanto señales analógicas como digitales, dio como resultado un prototipo de relevador de corriente ideal.

## **2.1 Definición de un Monitor de Falla a Tierra HRG**

Un relevador, también conocido como relé, es un interruptor cuyo control corre por cuenta de un circuito eléctrico. Desarrollado en la primera mitad del siglo XIX por el físico norteamericano Joseph Henry, a través de una bobina y un electroimán que incide sobre diversos contactos para la apertura o el cierre de otros circuitos, que funcionan de manera independiente.

Monitoreo es el proceso sistemático de recolectar, analizar y utilizar información para hacer seguimiento al progreso de un programa en pos de la consecución de sus objetivos, y para guiar las decisiones de gestión. El monitoreo se realiza una vez comenzado un programa o una secuencia de un proceso y continúa durante todo el período de implementación. A veces se hace referencia al monitoreo como proceso, desempeño o evaluación formativa.

Un relevador de falla a tierra para sistemas de conexión a tierra por alta resistencia, es un sensor que combina la técnica de monitoreo para verificar a cada instante los parámetros con los que ha de funcionar, estos parámetros pueden ser corriente (corriente residual), tensión eléctrica o frecuencia. Los parámetros sensados sirven como datos para tomar decisiones como, activar los contactos del propio relevador y darle un uso específico para el cual es requerido. Uno de estos usos específicos podría ser el de alarmar en presencia de una falla tierra.

El relé de falla a tierra se utiliza como protección de un sistema eléctrico, principalmente para alimentadores, transformadores, generadores y motores. La conexión típica se expone en la Figura 23, en donde se muestra un transformador de corriente en la resistencia de puesta a tierra (GE Energy, 2012).



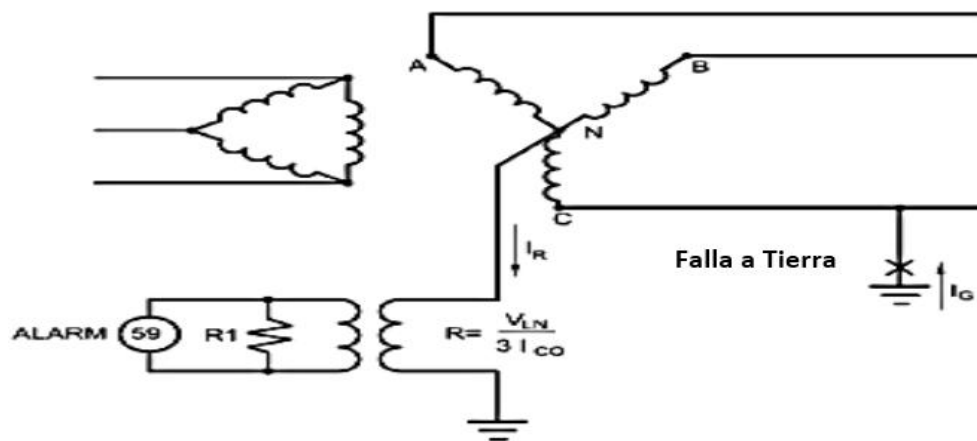


Figura 23. Esquema simple de detección de falla a tierra en un sistema de alta resistencia

La norma ANSI 50/51, 50N/51N, 50G/51G, hace referencia a la protección de sistemas trifásicos contra sobrecargas y cortocircuitos de fase a fase (Merlin Gerin, 2003). Un relé de sobrecorriente basado en las normas 50 y 51, son aquellos relés que tienen por función principal la medición permanente de la intensidad eléctrica de un circuito en particular, a fin de compararlo con los valores de ajustes y establecer si existen elevados niveles de corriente de falla, producto de una sobrecarga o un corto circuito.

### 2.1.1 ¿Cómo funciona?

Un relevador de falla a tierra por sí solo no tiene funcionalidad alguna. Este sensor es producido con el objetivo de proteger sistemas eléctricos en conjunto con otros dispositivos que potencializan sus características. Un tablero o gabinetes de falla a tierra, integran los componentes necesarios para mantener un proceso ininterrumpido, seguro y programable a diferentes corrientes y tiempos de respuesta.

Los diferentes tipos de sistemas operan bajo el principio de equilibrio de corriente, es decir, supervisan que la corriente que sale de cualquiera de las fases va a volver a otra fase o al neutro. Si una corriente circula fuera de una fase, pero vuelve por el camino de tierra (conducto, tuberías, tierra, acero de construcción, etc.), entonces, se ha producido una falla a tierra.

Todos los sistemas de puesta a tierra se componen de: un transformador de corriente (TC), una caja de relé o lógica para determinar el valor de disparo y la hora actual, y un mecanismo operativo para disparar el interruptor o switch. Algunos sistemas tienen un panel de prueba para simular una falla a tierra, modo en el que se pueden conmutar y verificar el estado de los interruptores o contactos, además de inspeccionar la sección visual del sistema como luces indicadoras o la correcta funcionalidad del panel de control. En la siguiente ilustración (Figura 24) se muestra un tablero minero de la empresa: Transformadores y Subestaciones de México. Este tablero es idealmente para minas. Estos tableros se caracterizan por tener un monitor de falla a tierra (Comformity Services, 2007). Además cuenta con un TC diferencial, luces indicadoras, botones, interruptores termomagnéticos, un contactor trifásico y un botón de paro de emergencia. Cabe destacar que cada tablero existente debe cumplir con ciertas normas según sea su aplicación. Estas normas describen el tipo de pintura, tipo de tornillos, tipos de material del gabinete, tipo de cable, conectores, entre otros. Además, estas normas hacen referencia al tipo de conexión eléctrica que requiere cada instalación y las pautas de seguridad que se deben de cumplir para una seguridad de trabajo más eficiente.

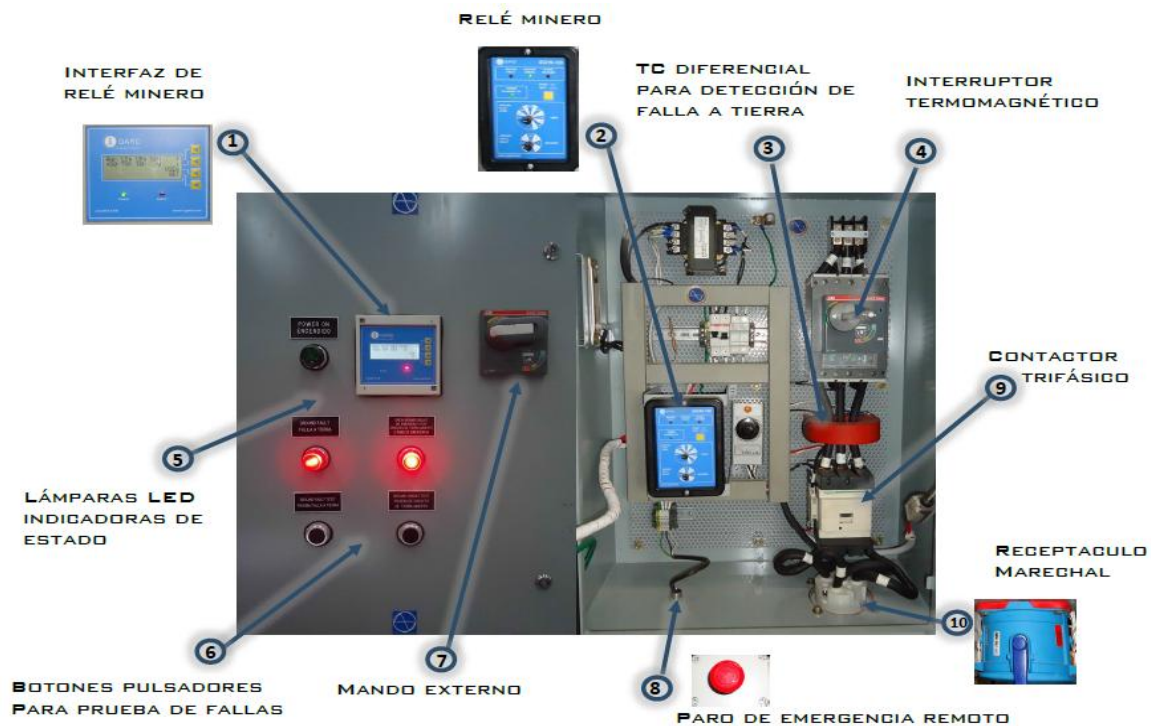


Figura 24. Tablero Minero de Protección de Falla a Tierra

## 2.2 Planteamiento del Problema

La empresa GRG Protecciones es una empresa dedicada a la manufactura eléctrica, específicamente a la construcción de tableros de protecciones para la industria petrolera y minera, ubicada en la zona industrial de Toluca, México.

GRG Protecciones se propuso la meta de desarrollar un relevador de falla a tierra de marca propia, caracterizado por ser un producto nacional a diferencia del resto de los relevadores en el mercado mexicano, los cuales son de marcas extranjeras reconocidas como EATON (Irlanda), I-Gard(Canadá), Bender(Alemania), ABB(Suiza), entre otros.

La idea central fue desarrollar un relevador de falla a tierra por alta resistencia, que pudiera satisfacer las necesidades de clientes como PEMEX, los cuales se basan en normas nacionales

(NRF-168) e internacionales (IEEE-142), para la operación de sus equipos en plataformas marinas y de esta manera asegurar la seguridad del proceso y las instalaciones.

El enunciado principal con el que se definió el diseño, mencionaba que el relevador de falla a tierra, debería cumplir con las siguientes características, tal y como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

*Características de Monitor de Falla a Tierra.*

| Parámetro                     | Valor    |
|-------------------------------|----------|
| Corriente de falla            | 0.1@5 A  |
| Tiempo de retardo             | 0@15 s   |
| Tiempo de retardo instantáneo | 250 ms   |
| Tiempo de parpadeo            | 0.1@60 s |
| Contactos auxiliares          | 2        |

Algunos datos adicionales con los que debería cumplir el relevador, es la resistencia mecánica. Debe soportar ambientes con 70% de humedad, climas secos con temperaturas de hasta 85 grados centígrados, resistente al agua, polvo y golpes.

El diseño del prototipo empezó atendiendo las necesidades de los dispositivos que constituyen el tablero, los cuales se conforman por los siguientes dispositivos descritos a continuación y que también se muestran en la Figura 25.

### **Exterior**

- 3 Alarmas visibles (Luz Verde (LV), Luz Roja (LR), Luz Ámbar (LA))
- 1 Botón de prueba
- 1 Botón de silenciar
- 1 Botón de pulsar
- 1 Botón de restablecer

## Interior

- 1 PLC (*Control Lógico Programable*)
- 1 Sensor de corriente con retardo al encendido
- 1 Temporizador para el efecto de pulsar



Figura 25. Elementos externos de tablero de falla a tierra

Algunas de las características que adicionalmente debe cumplir el prototipo, son las 2 siguientes condiciones, una para condición normal y la otra es en presencia de falla a tierra. Estas condiciones se describen a continuación.

## **NORMAL**

- Siempre se está midiendo la corriente del neutro.
- LV está encendido.
- Se despliega los valores de corriente en el neutro ( $I_n$ ), tiempo de retardo ( $t_d$ ) en presencia de falla, tiempo indicador de pulsos ( $t_f$ ), valor de la máxima corriente establecida para sensar ( $I_p$ ).

Para la etapa de falla, se tienen 2 modos de acceder. Una es de manera normal, es decir, si la corriente medida es mayor a la establecida por el usuario. La segunda es si se desea hacer una prueba sin necesidad de sensar corriente de entrada.

## **FALLA/PRUEBA**

- LV se apaga después de  $t_d$ .
- LR se enciende después de  $t_d$ .
- Se habilita el ventilador después de  $t_d$ .
- Se habilita la alarma sonora después de  $t_d$ .
- Se habilita el indicador pulsar después de  $t_d$ , cada  $t_f$  establecido.
- La sección de Falla/Prueba se queda enclavado hasta que se reinicie.

## **2.3 Diseño de Prototipo**

Hasta ahora se ha descrito lo que es una falla a tierra y los diferentes métodos que existen como HRG, varillas sólidas, LRG; entre otros, y así disminuir los riesgos laborales y los posibles daños que se puedan llegar a causar. Este documento se centra en el método HRG, el cual es una solución para el problema de neutros flotados en procesos ininterrumpidos como procesos petroquímicos, refinerías, plantas eléctricas entre otros. Una característica importante de un sistema HRG es que limita, más no erradica, la falla por completo. Para erradicar por completo la falla a tierra, es necesario atender el origen de la falla, el cual puede ser un cable mal aislado

en contacto con alguna fase, un motor o ambos. Cualquiera que sea el caso, debe atenderse de manera inmediata.

Este proyecto se basó en un diseño modular por las ventajas que se obtienen, tales como: la realización de pedidos de material electrónico de manera más eficiente, fácil identificación de cambios necesarios en los equipos ante una anomalía en los dispositivos, facilidad de ensamble, entre otras. Cada módulo o etapa, debe de cumplir con una función específica y en conjunto, funcionar como un sistema único. El prototipo se conforma de las siguientes etapas (ver Figura 26), en donde de manera general, se trata de englobar por módulos la funcionalidad individual de cada bloque y una vez que se conjuguen todas, el sistema estará listo para un prototipo que permita hacer pruebas técnicas.

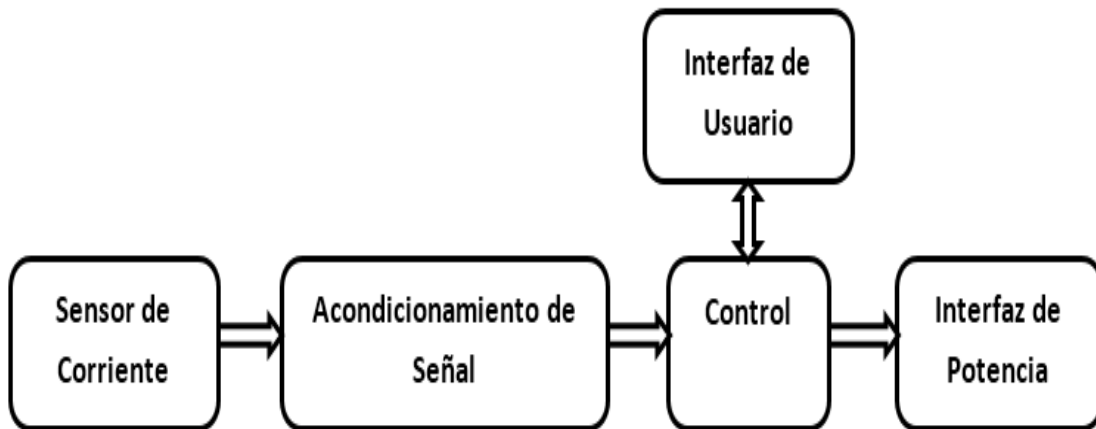


Figura 26. Módulos del Diseño de Prototipo

La construcción de éste monitor de falla a tierra tuvo como objetivo mostrar la viabilidad del producto para su desarrollo en volumen. La viabilidad dependió del costo-beneficio y los resultados técnicos que se reportaron. Para fines de diseño y la presentación se centró la atención en los módulos de: Sensor de Corriente, Acondicionamiento de Señal, control e Interfaz de usuario. Al trabajar con módulos anteriormente mencionados se puede evaluar si era viable su construcción.

## 2.4 Descripción de Módulos.

Si se toma la Figura 25 como un bloque completo, la complejidad de la solución al problema planteado hasta ahora, se elevará y se limitará a encontrar un producto con esas características específicas o cercanas a estas. La solución a un problema tan complejo fue trabajar por bloques, modularmente y darle una apertura mayor a la solución del sistema. Otra ventaja que ofrece el trabajar modularmente un problema, es que permite incorporar otros bloques adicionales en caso de ser necesario.

### 2.4.1 Sensor de corriente

Este módulo es la *entrada* al sistema. Para solucionar la interacción con una señal eléctrica y el sistema, se planteó la posibilidad de contar con un sensor capaz de medir el flujo de intensidad eléctrica que circula a través del conductor de neutro del sistema eléctrico. La manera de realizar la medición de corriente se puede hacer con diferentes métodos como resistencia Shunt, transformadores de corriente, sensores de efecto hall entre algunos otros como se observa en la Figura 27.

La medición por transformador de corriente, efecto hall, y la bobina Rogowski, se basan en el efecto de inducción electromagnética, la cual consiste en obtener energía eléctrica a partir de variaciones de un flujo magnético. Cuando circula una corriente eléctrica por un conductor, se crea un campo magnético. Michael Faraday pensaba que se podría producir el proceso inverso, es decir, que un campo magnético produzca una corriente eléctrica y por lo tanto una diferencia de potencial (Hyde, J., Regué, J., Cuspinera, A., 1997).



| Tipo de técnica                     | Shunt de corriente | Transformador de corriente | Efecto Hall | Bobina Rogowski | Rotación de Faraday |
|-------------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------|-----------------|---------------------|
| Característica                      |                    |                            |             |                 |                     |
| Linealidad                          | Muy Buena          | Buena                      | Buena       | Muy Buena       | Muy Buena           |
| Capacidad de medir altas corrientes | Muy Baja           | Buena                      | Buena       | Muy Buena       | Muy Buena           |
| Dependencia de la temperatura       | Media              | Baja                       | Alta        | Muy Baja        | Muy Baja            |
| Medida de corriente continua        | Si                 | No                         | Si          | No              | Si                  |
| Medida de corriente alterna         | Si                 | Si                         | Si          | Si              | Si                  |
| Saturación e Histéresis             | No                 | Si                         | Si          | No              | No                  |

Figura 27. Comparativa de métodos de medición de corriente eléctrica

La técnica de resistencia Shunt consiste en colocar una resistencia en serie con el conductor del que se va a medir corriente y de ésta manera medir la caída de tensión en esta resistencia o serie de resistencias.

Una técnica de medición reciente es la de efecto Faraday. El FOCS (Fiber optic current sensor) se basa en el efecto Faraday magneto-óptico que produce birrefringencia circular no recíproco cuando se aplica un campo magnético en la dirección de propagación del haz de luz (Aerssens & Gusarov, 2011).

La elección del dispositivo que realizará esta labor fue en base a los requerimientos de diseño y para ello se consideró las comparativas de cada una, aunado al costo de implementación y desarrollo.

#### 2.4.2 Acondicionamiento de señal

En todo sistema electrónico resulta vital la comunicación adecuada de diferentes etapas aunque éstas no sean de la misma procedencia o magnitud. Toda señal y voltaje relacionado entre etapas de un sistema, debe ser dentro de sus parámetros físicos, los cuales normalmente son dados por

un fabricante que desarrolla estos dispositivos en términos de voltaje, corriente, impedancia, entre otros. Las características para la construcción de este monitor de falla a tierra implican diferentes señales como son, señales analógicas senoidales y señales analógicas de corriente directa como se ilustra en la Figura 28.

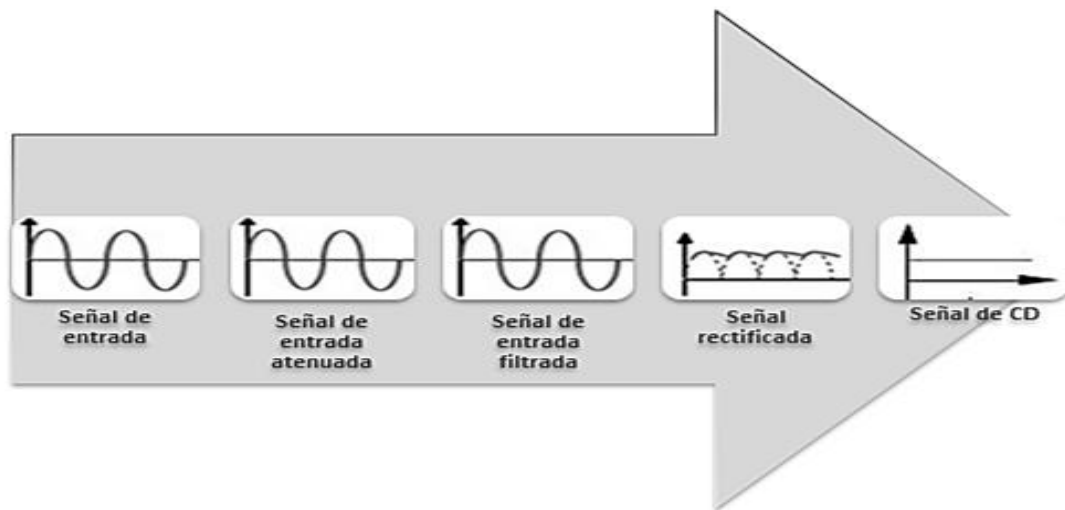


Figura 28. Etapas del módulo de acondicionamiento de Señal

Se observa en la Figura 28 un primer módulo que es la señal de entrada, es decir la señal de corriente alterna que se va a sensar al 100%. El segundo módulo hace referencia al paso siguiente del proceso del sensado de corriente, que es el de atenuar la señal de tal forma que pueda ser procesada por un dispositivo electrónico. En el tercer módulo a pesar de que se ha atenuado y se podría procesar dicha señal, es necesario filtrar la señal de corriente alterna y evitar el *acarreo* de posibles frecuencias adicionales indeseables llamados armónicos. Después de filtrar la señal de C.A (*Corriente Alterna*), es importante rectificar la señal y filtrar de nuevo para obtener una señal variable de C.D (*Corriente Directa*) dependiente del nivel de intensidad eléctrica detectado por el sensor de corriente.

### 2.4.3 Control

La etapa de control es el centro de procesamiento del sistema, el que toma las decisiones para las cuales fue programado. Habilita las funciones correspondientes de la interfaz de potencia y también de la interfaz de usuario después de que es detectada una falla a tierra. Al igual que en etapas y módulos previos, la posibilidad de elegir entre un sistema digital y/o analógico, seguía abierto en esta etapa. Para elegir entre uno y otro está en función de los parámetros y especificaciones técnicas con las que debe cumplir y la eficiencia que muestre el factor costo – beneficio.

El trabajo del módulo de Control consiste en procesar la señal adquirida del módulo de Acondicionamiento de Señal y compararla con una corriente programada ( $I_p$ ) previamente por el usuario y activar eficazmente las salidas del relevador de falla a tierra de acuerdo a un tiempo de retardo ( $t_d$ ) al que fue programado. En caso de ser activado el monitor por una falla a tierra una prueba, la función de parpadeo o flicker, mostrará los pulsos con el tiempo programado y la secuencia siempre será la misma.

El tiempo de retardo de señal en caso de existir una falla, obedeció principalmente a dos necesidades de los requerimientos del diseño. La primera necesidad se da por las condiciones que representa el sistema eléctrico en donde siempre se encuentran ruidos indeseables, los cuales pueden dar una falsa alarma. Esto se debe a que las sobrecorrientes pueden darse por un instante de tiempo muy pequeño, algunos del orden de nano segundos. Este tipo de sobrecorrientes es debido a condiciones ajenas a una falla a tierra como previamente se vio en el Capítulo I. Como característica de los sobrevoltajes, y directamente con ello las sobrecorrientes, es la alta frecuencia que presenta en un instante de tiempo muy pequeño. La segunda necesidad se debe a requerimientos del diseño solicitados por GRG Protecciones, basados en la norma ANSI 50, que establece el disparo instantáneo y la 51 es el disparo temporizado.

El tiempo de parpadeo es una secuencia igual a una función lógica XOR. Para ello dispondremos de tres salidas llamadas LV (exterior del tablero), secuencia 1 (*sec1*) y secuencia 2 (*sec2*) identificadas dentro del tablero. La secuencia de esta función se visualiza de mejor en el diagrama de tiempos en la Figura 29.

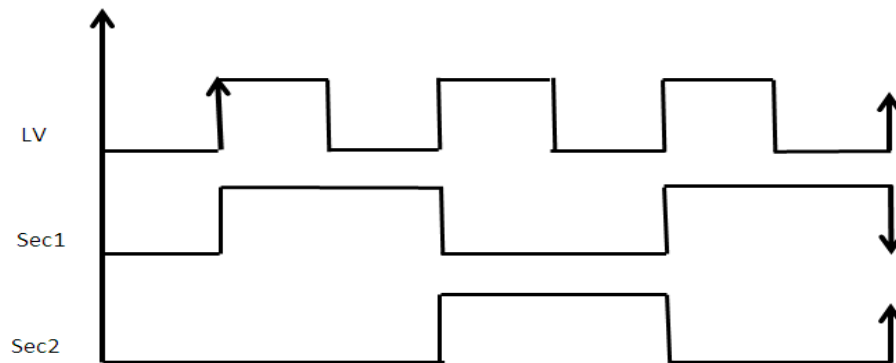


Figura 29. Secuencia de función Flicker.

#### 2.4.4 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario se refiere a la manera en la cual interacciona el usuario con el monitor de falla a tierra. Ésta interacción involucra como se va a establecer la corriente a la que el monitor debe funcionar, el ajuste de tiempo  $t_d$  y  $t_f$ , la activación del modo prueba, y la visualización de LV y LR.

Para una interacción sencilla con el usuario, se pensó en colocar indicadores luminosos para indicar el nivel de corriente a sensar, cuestión que resulta un tanto complicado para el usuario, de acuerdo a lo visto en otros modelos analógicos en el mercado, por lo que la posible integración de una pantalla LCD (*Display de cristal Líquido*) podría solucionar el problema y de esta manera sea accesible con cualquier tipo de usuario, incluso el que no esté especializado en el área eléctrica.

En ésta misma interfaz se planteó la manera de establecer los niveles de corriente mediante botones, switches o incluso una pantalla táctil que evite colocar botonería adicional. Cualquiera que sea la elección, como se ha mencionado anteriormente, depende de la relación de costo-beneficio y la eficiencia de los dispositivos en cuestiones técnicas de su propio funcionamiento

y la resistividad mecánica que presente, tomando en cuenta que estará sometido a una alto nivel de humedad (70%R.H) y posibles golpes.

#### 2.4.5 Interfaz de potencia

En este punto se abordará lo referente al modo de interactuar con el mundo exterior, ya no desde una selección de parámetros iniciales sino desde una respuesta a una falla a tierra.

Recapitulando un poco, una vez presente la falla, se tendrán las siguientes salidas del sistema a una tensión de 120 VCA.

- |                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| ➤ LV            | ➤ Sec1                |
| ➤ LR            | ➤ Sec2                |
| ➤ Alarma Sonora | ➤ Contacto auxiliar 1 |
| ➤ Ventilador    | ➤ Contacto auxiliar 2 |
| ➤ LA            |                       |

Como se puede observar, son nueve contactos que deben activarse a un voltaje de línea de 120 V@5 A. Los siete primeros son propios del monitor de falla a tierra y los últimos dos obedecen a cuestiones de diseño, es decir, los contactos que requiere el cliente y que se le proporcionan para que pueda utilizarlo para diversas tareas.

La interfaz de potencia requiere manejar altos niveles de tensión y de intensidad eléctrica a su salida. Para ello se ha pensado en algunos dispositivos como relevadores, SCR's, TRIAC's o algún dispositivo de potencia que pueda solventar dicho problema con eficiencia.

Fue importante considerar que cualquiera que sea la interfaz a implementar, debía de tener un tiempo de conmutación menor a 250 ms a petición de GRG. Además de considerar que el optar por alguna solución en este módulo, da una perspectiva del tamaño final del prototipo, es decir,

si se usan relevadores como solución, el tamaño de los mismos son grandes en comparación de usar algún transistor de potencia y el tamaño del gabinete del monitor se hace mayor.

## 2.5 Propuesta Final de Diseño

Una vez que se revisó el prototipo y lo aprobó la empresa GRG, se plantearon algunas modificaciones, las cuales fueron, retomar algunos componentes existentes en el inventario de la empresa y trabajar con ellos. En específico se trataban de dos componentes: una fuente de alimentación y un sensor de corriente.

### 2.5.1 Fuente de alimentación

La fuente es proporcionada como parte inicial de este prototipo. Las características se proporcionan en la Tabla 5.

Tabla 5

*Características de Fuente de Alimentación.*

| Parámetros            | Datos          |
|-----------------------|----------------|
| Fabricante            | EOS Power, Inc |
| Modelo                | VLT40-3200     |
| Tensiones de Salida   | V1= 5V@6A      |
|                       | V2= 12V@1.5A   |
|                       | V3= -12V@.5A   |
| Tensión de Entrada AC | 90@264V        |
| Eficiencia            | 82%            |
| Frecuencia            | 47-63 Hz       |
| Rizo                  | 50 mV          |
| Temperatura           | -40-70°C       |
| Dimensiones           | 102x51x28 mm   |

La importancia de considerar estas características es que podía influir directamente en el módulo de filtrado y en la interfaz de potencia, motivo por el cual se tuvo que adaptar a estos valores, de tal manera que la potencia demandada a la fuente estuviera dentro de estos parámetros para un correcto funcionamiento. De igual manera se consideró de vital importancia la temperatura a la cual funciona correctamente la fuente ya que será sometida a niveles de temperatura poco estables, aproximadamente entre 15 y 55 grados centígrados.

### 2.5.2 Sensor de corriente

Existe una gran variedad de sensores para la medición de corriente alterna. La selección de cada sensor y el método empleado para ello, determinará su éxito en los resultados. Cual sea la elección para este caso en particular, se buscaba medir C.A mediante un método que permitiera obtener C.D a la salida y ésta fuera medible.

El sensor para este prototipo inicial fue el transductor i-snail VC10, el cual es un sensor que mide corriente alterna (Ver Anexo A). El sensor es de modo no invasivo ya que no hay que desconectar el cable de su trayectoria original (ver Figura 30).

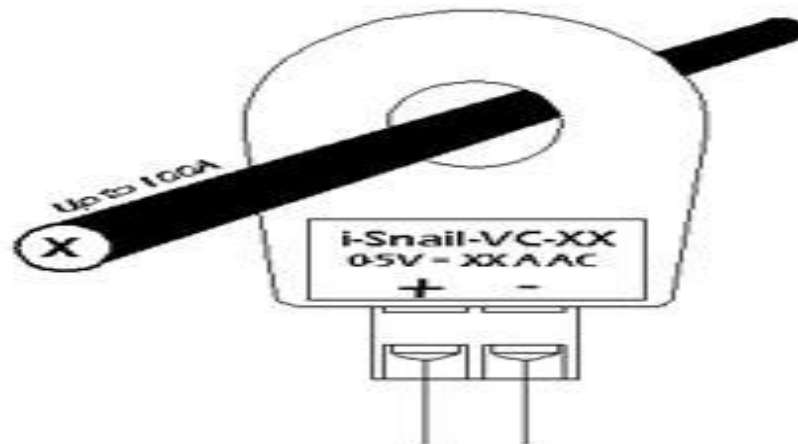


Figura 30. Transductor de Corriente

Las características del sensor se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6

*Características del Transductor i-Snail-VC10.*

| Parámetros               | Datos                  |
|--------------------------|------------------------|
| Fabricante               | ELKOR                  |
| Orificio para conductor  | 13.7 mm                |
| Rango de Corriente (RMS) | 0-10 A                 |
| Precisión                | 0.5 %                  |
| Sensibilidad             | 0.5V/A                 |
| Rigidez dieléctrica      | 2.5 KVRMS por 1 minuto |
| Alimentación requerida   | Autosuficiente         |
| Salida                   | 0-5 V                  |
| Temperatura              | -40 – 50 °C            |

Para este sensor se observó que la salida, al ser normalizada, se convierte en un transductor, debido a que proporciona valores estandarizados.



# **CAPÍTULO III:**

## **Aplicación del**

### **Diseño**

El desarrollo de un prototipo está inconcluso si no se implementa físicamente el diseño y las pruebas para verificar su funcionalidad. En esta unidad se tratara al primer punto del complemento del diseño, la implementación de cada módulo como se mencionó en la unidad anterior.

### 3.1 Implementación de Sensor

Este transductor de corriente proporciona una salida estándar que permite la manipulación de los voltajes analógicos a conveniencia, es decir, que incorpora el sensor y el acoplamiento de la señal en un solo bloque. La salida, según los datos del fabricante, es prácticamente lineal como se muestra en la Figura 31. La ecuación para obtener los voltajes del transductor es la siguiente: (Ver Ecuación 4).

$$V_o(V) = 0.5I_{RMS}; \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$V_o$  = Voltaje de salida del transductor.

$I_{RMS}$  = Corriente RMS que pasa por el transductor.

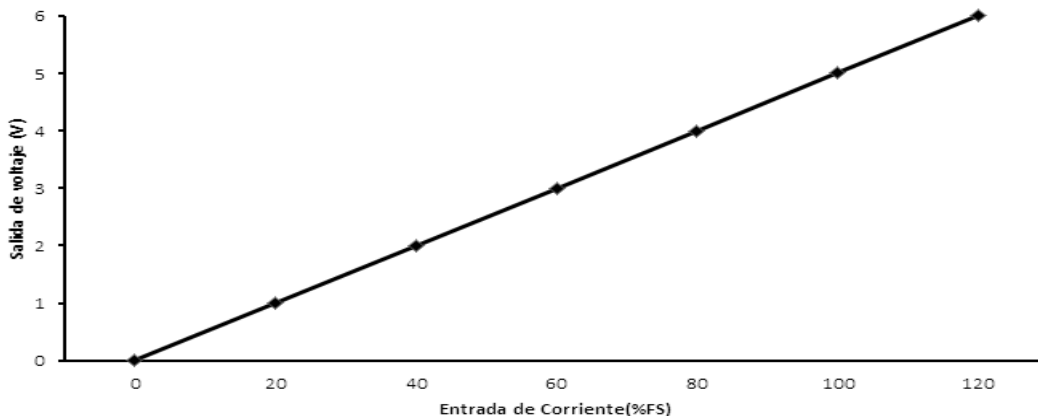


Figura 31. Respuesta del Transductor

### 3.1.1 Pruebas de funcionamiento

Una consideración importante en el diseño del monitor, es establecer los valores mínimos y máximos a los que ha de operar el sistema en términos de tensión del transductor. Para ello se comparó la hoja de datos proporcionada por el fabricante y los datos de las mediciones observadas en unas pruebas propuestas para ver el comportamiento del transductor a diferentes corrientes. Para realizar las pruebas se utilizó el siguiente material:

- Single Phase Relay Protection Test Set (GDJB-II)
- Transductor i-Snail-v10
- Multímetro

La función principal del medidor de relé GDJB-II es la de proporcionar una corriente tal y como una fuente de corriente lo hace, pero éste probador de relevadores, además de proveer corriente, mide el tiempo de cierre de contactos de un relevador interno, lo que permite medir el tiempo de respuesta del elemento en medición como puede ser una prueba de carga de capacitancia, el tiempo de accionamiento de una bobina intermedia, etc. En este caso en particular, midió el tiempo de respuesta del transductor a una corriente dada, así como también ayudo a definir la linealidad y los valores mínimos de operación del transductor. Alguna de sus características se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7

*Características de Relay Protection Test Set (GDJB-II).*

| Parámetro               | Datos                 |
|-------------------------|-----------------------|
| Fabricante              | HV Hipot Electric Co. |
| Alimentación(AC)        | 120 V                 |
| Salida (V)              | 0-220V/3A             |
| Salida (A)              | 0-150A/7.5V           |
| Amperímetro Digital     | 4 1/2 dígitos         |
| Medidor de milisegundos | 0-99.9999s            |

Para desarrollar las mediciones propuestas, se realizaron las siguientes conexiones como se ve en la Figura 32 y se obtuvieron los siguientes resultados (ver Tabla 8).

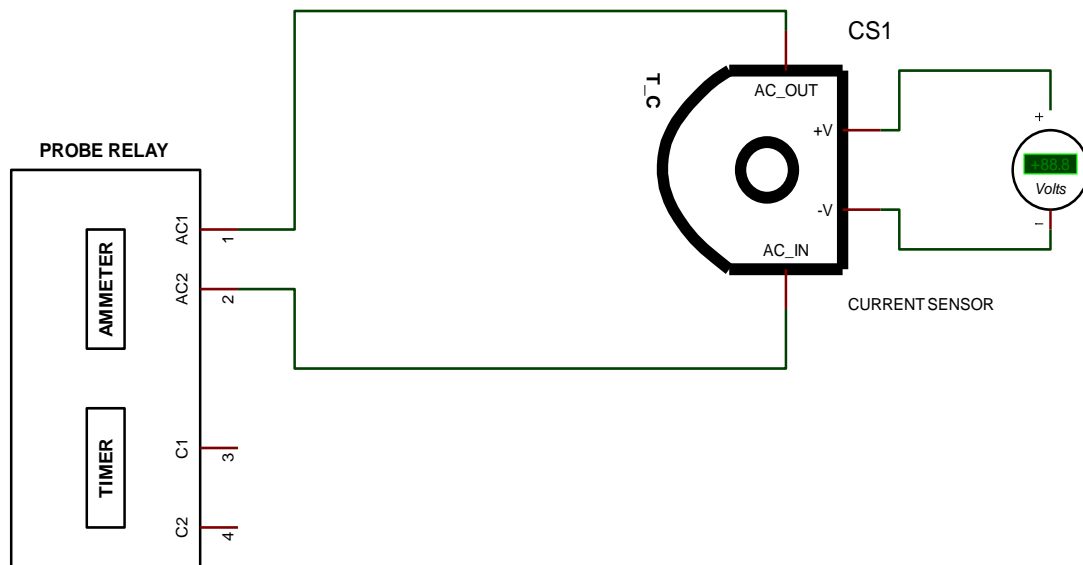


Figura 32. Diagrama para Medición del Transductor

Los rangos de corriente son de 0-5 A, que es el rango para la construcción del monitor. Se propusieron intervalos de 50 mA para ver mejor el comportamiento del transductor, y en los casos donde sea necesario, buscar una solución lo más linealmente posible para obtener una respuesta adecuada. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

*Respuesta del Transductor a Diversas Corrientes.*

| Fuente(mA) | V_mV  | Calculado | Fuente(mA) | V_mV | Calculado | Fuente(mA) | V_mV | Calculado |
|------------|-------|-----------|------------|------|-----------|------------|------|-----------|
| 100        | 14.8  | 50        | 1750       | 851  | 875       | 3400       | 1690 | 1700      |
| 150        | 39.1  | 75        | 1800       | 876  | 900       | 3450       | 1710 | 1725      |
| 200        | 65    | 100       | 1850       | 902  | 925       | 3500       | 1740 | 1750      |
| 250        | 90.8  | 125       | 1900       | 920  | 950       | 3550       | 1770 | 1775      |
| 300        | 116   | 150       | 1950       | 932  | 975       | 3600       | 1790 | 1800      |
| 350        | 142.5 | 175       | 2000       | 975  | 1000      | 3650       | 1820 | 1825      |

|      |       |     |      |      |      |      |      |      |
|------|-------|-----|------|------|------|------|------|------|
| 400  | 168.2 | 200 | 2050 | 1002 | 1025 | 3700 | 1840 | 1850 |
| 450  | 193.8 | 225 | 2100 | 1028 | 1050 | 3750 | 1870 | 1875 |
| 500  | 220   | 250 | 2150 | 1060 | 1075 | 3800 | 1890 | 1900 |
| 550  | 245   | 275 | 2200 | 1080 | 1100 | 3850 | 1910 | 1925 |
| 600  | 270   | 300 | 2250 | 1110 | 1125 | 3900 | 1940 | 1950 |
| 650  | 294   | 325 | 2300 | 1130 | 1150 | 3950 | 1970 | 1975 |
| 700  | 321   | 350 | 2350 | 1160 | 1175 | 4000 | 1900 | 2000 |
| 750  | 347   | 375 | 2400 | 1190 | 1200 | 4050 | 1900 | 2025 |
| 800  | 370   | 400 | 2450 | 1210 | 1225 | 4100 | 2000 | 2050 |
| 850  | 395   | 425 | 2500 | 1230 | 1250 | 4150 | 2000 | 2075 |
| 900  | 420   | 450 | 2550 | 1260 | 1275 | 4200 | 2000 | 2100 |
| 950  | 446   | 475 | 2600 | 1290 | 1300 | 4250 | 2000 | 2125 |
| 1000 | 471   | 500 | 2650 | 1310 | 1325 | 4300 | 2000 | 2150 |
| 1050 | 497   | 525 | 2700 | 1330 | 1350 | 4350 | 2100 | 2175 |
| 1100 | 523   | 550 | 2750 | 1360 | 1375 | 4400 | 2100 | 2200 |
| 1150 | 546   | 575 | 2800 | 1380 | 1400 | 4450 | 2100 | 2225 |
| 1200 | 572   | 600 | 2850 | 1410 | 1425 | 4500 | 2200 | 2250 |
| 1250 | 598   | 625 | 2900 | 1440 | 1450 | 4550 | 2200 | 2275 |
| 1300 | 624   | 650 | 2950 | 1460 | 1475 | 4600 | 2200 | 2300 |
| 1350 | 649   | 675 | 3000 | 1490 | 1500 | 4650 | 2200 | 2325 |
| 1400 | 673   | 700 | 3050 | 1510 | 1525 | 4700 | 2300 | 2350 |
| 1450 | 699   | 725 | 3100 | 1540 | 1550 | 4750 | 2300 | 2375 |
| 1500 | 725   | 750 | 3150 | 1560 | 1575 | 4800 | 2300 | 2400 |
| 1550 | 750   | 775 | 3200 | 1590 | 1600 | 4850 | 2300 | 2425 |
| 1600 | 776   | 800 | 3250 | 1620 | 1625 | 4900 | 2400 | 2450 |
| 1650 | 800   | 825 | 3300 | 1640 | 1650 | 4950 | 2400 | 2475 |
| 1700 | 827   | 850 | 3350 | 1670 | 1675 | 5000 | 2400 | 2500 |

Tabla 9. Respuesta del Transductor a Diversas Corrientes (Continuación)

En la Figura 33, se aprecia que hay una linealidad aceptable para el rango de 0-5 A. La línea punteada representa los valores ideales según la Ecuación 4. La línea continua representa el valor real medido con el voltímetro.

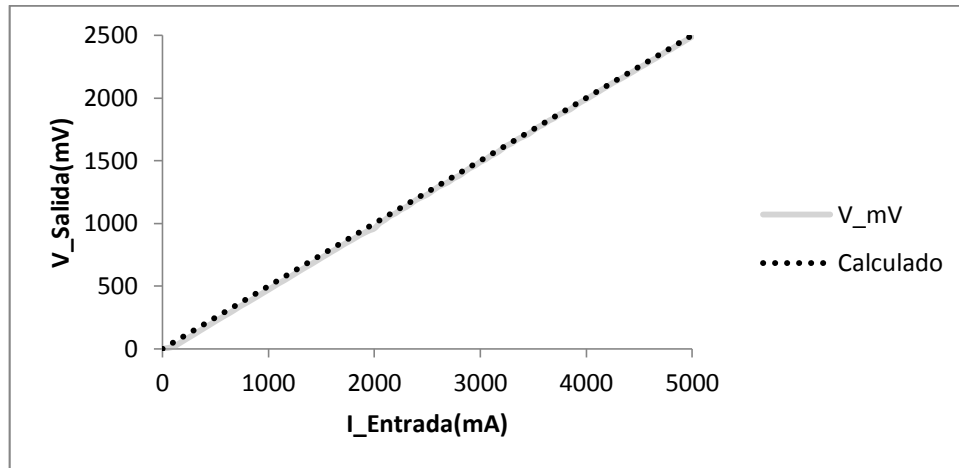


Figura 33. Respuesta del Transductor de 0-5A

Debido a que la respuesta del transductor no es totalmente lineal, principalmente en valores menores a 1 A, se observó que el transductor está diseñado idealmente para corrientes “Altas (mínimo 1 A)” para una buena lectura, con una sensibilidad de 500mV/A, es decir, 500 $\mu$ V/mA aproximadamente. Para el error relativo porcentual se usó la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_{rp} = \frac{|VT - VR|}{VT} * 100\% \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$\varepsilon_{rp}$  = Error relativo porcentual.

$VT$  = Voltaje teórico.

$VR$  = Voltaje real.

Aplicando la Ecuación 5 en corrientes desde 1 A, se obtuvo un error de 5% en general.

Una solución al problema de las intensidades eléctricas con valores menores a un ampere, el cual muestra un error de hasta un 70%, principalmente en valores de 100-500 mA como se muestra en la Figura 34, era el de proponer un acondicionamiento que puede ser un amplificador operacional o un arreglo de programación propio del bloque de control. En la Figura 34, la línea punteada representa la respuesta ideal y la línea continua es la respuesta medida con el multímetro. En esta sección se centrara en entregar una señal de 0-5 V.

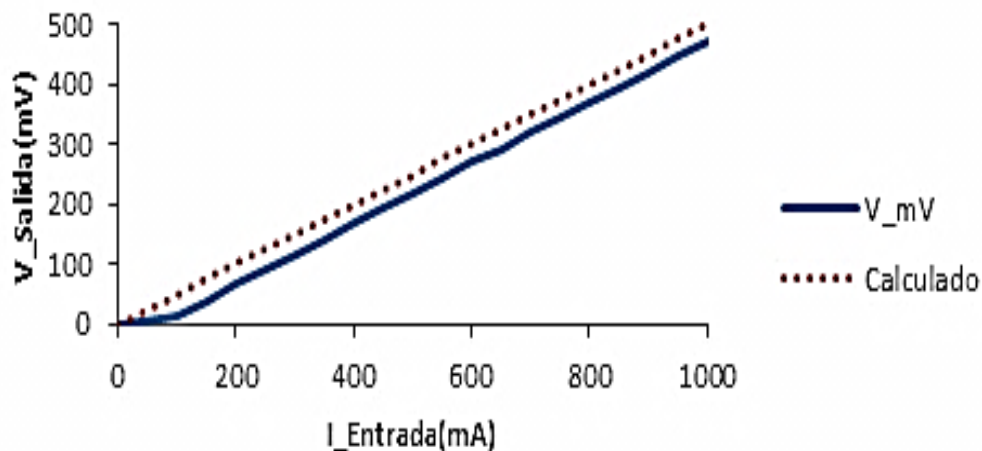


Figura 34. Respuesta del Transductor de 0-1 A

### 3.2 Implementación de Acondicionamiento de señal

Los resultados anteriormente mostrados en el punto 3.1.1, mostraron que la linealidad relativa que presenta la respuesta del transductor, se va perdiendo entre más pequeña es la corriente que circula por el conductor a sensar. Para solucionar este problema fue necesario acondicionar la salida de tal manera que se pueda obtener una lectura adecuada. Los resultados se muestran en la siguiente Tabla 10, en donde se contempla la salida ideal, salida real y el error existente entre ambas.

Tabla 10

*Respuesta del Sensor Hasta 500 mA.*

| I(mA) | Out_Vcd(mV)_Teórica | Out_Vcd(mV)_Real | Error  |
|-------|---------------------|------------------|--------|
| 0     | 0                   | 0                | 0.00%  |
| 50    | 25                  | 2                | 92.00% |
| 100   | 50                  | 23               | 54.00% |
| 150   | 75                  | 48               | 36.00% |
| 200   | 100                 | 74               | 26.00% |
| 300   | 150                 | 129              | 14.00% |
| 400   | 200                 | 180              | 10.00% |
| 500   | 250                 | 230              | 8.00%  |

La solución para los errores mostrados en la Tabla 10, se pueden ajustar mediante software en la programación misma del microcontrolador, pero considerando que el error tan grande es debido al poco voltaje de entrada, se consideró una amplificación a la entrada. La Figura 35 muestra que para valores cercanos a cero, la linealidad se pierde debido a la poca sensibilidad del sensor para estas corrientes y con ello el error crece. La salida ideal se muestra con la línea continua, mientras que la línea punteada representa la respuesta real del transductor i-snail VC10.



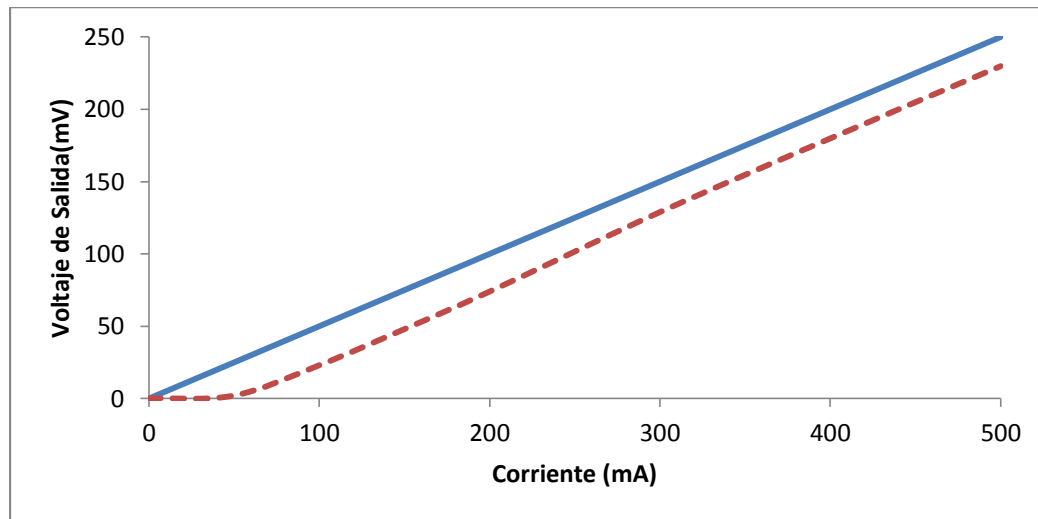


Figura 35. Respuesta del transductor i-snail VC10 a 500mA

### 3.2.1 Acondicionamiento de señal a 500 mA

Se buscó obtener una respuesta lineal a la entrada del módulo de control, la cual es una señal analógica, con valores de [0-5] VCD, por lo que se recurre a un amplificador que cumpla con éstas características.

La ecuación con la que se obtendrá la respuesta del amplificador viene dada por la Ecuación 6, que es básicamente la ecuación de la recta en términos de voltaje (Johnson, 2000).

$$V_{out} = mV_{in} + V_0 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$V_{out}$  = Tensión de salida deseada.

$m$  = Pendiente de la recta (Ganancia).

$V_{in}$  = Tensión de entrada.

$V_0$  = Tensión de offset.

De los datos de la Tabla 10 se observó que la variación del voltaje de salida era de 0 a 230 mV, aunque lo ideal era que fuese de 0 a 5 V. En éste último rango se asegura una lectura correcta para corrientes pequeñas en las que se pierde la linealidad del sensor.

Aplicando la Ecuación 6, resultaron dos ecuaciones:

$$\begin{aligned} 0 &= 0m + V_0 \text{ --- (a)} \\ 5 &= 0.23m + V_0 \text{ --- (b)} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 7}$$

De la Ecuación 7(a) se obtuvo  $V_0 = 0$  y sustituyendo en (b)  $m = 21.73$ .

Con la ganancia conocida, el siguiente paso consistió en seleccionar un amplificador operacional que cumpliera con los requisitos de diseño. Después de una investigación previa y con antecedente del uso en otros proyectos, se tomó la decisión de seleccionar el OPAMP (*Amplificador Operacional*) LM358. Éste amplificador cuenta con una alimentación simétrica de 16 V, un Slew Rate de 0.3 y cuenta con dos amplificadores por circuito integrado (Ver Anexo B). Las características de éste OPAMP cumplían con todos los requisitos de diseño y por ello se seleccionó.

De acuerdo a la Ecuación 8, se requería un amplificador. Una configuración que cumplió con estas características fue una configuración de un amplificador no inversor. Su función de transferencia es la siguiente (Ecuación 8).

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \text{Ecuación 8}$$

El amplificador es ideal para este tipo de acondicionamientos debido a que tiene una resistencia de entrada mayor a 1 MΩ, lo que permite que la señal tenga una atenuación mínima. Además proporciona ganancias altas en lazo cerrado.

Se Propuso  $R_2 = 270K\Omega$ , y aplicando este valor a la Ecuación 8 se obtuvo  $R_1 = 13.02K\Omega$ . Los valores obtenidos, como  $R_2$ , es un valor comercial de resistencia, mientras que  $R_1$  es un valor no comercial, por lo que se optó por usar una resistencia variable de precisión. Además se observó

en este acoplamiento que  $R_1$  era mayor  $10K\Omega$ , valor que se recomienda cuando se usa OPAMP's. El circuito resultante es el siguiente (ver Figura 36).  $S_{+V}$  indica la entrada del sensor de corriente y  $S [0-500]$  indica la salida del acondicionador de señal.

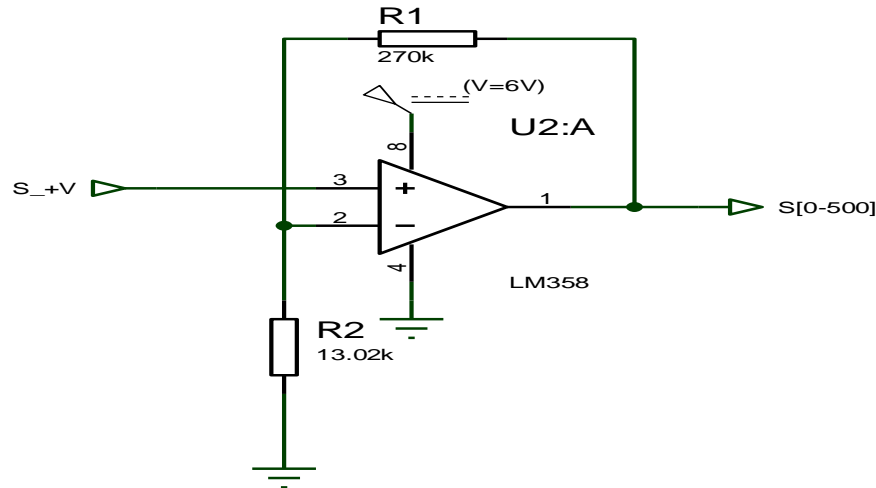


Figura 36. Circuito acondicionador a 500 mA

### 3.3 Acondicionamiento de Control

Los primeros desarrollos de monitores de corriente en el mercado, son completamente analógicos, basados en amplificadores operacionales y dispositivos pasivos principalmente. Los resultados de funcionamiento son bastante aceptables, dentro de las normas de seguridad y algunos hasta con respuestas menores a 1 segundo. A pesar de que actualmente se cuenta con dispositivos digitales, GRG desea incursionar al mercado de protecciones eléctricas, específicamente a relevadores de corriente para HRG. La parte central de este monitor se basa en el control de los datos, tanto de entrada como de salida.

La solución que se tomó para el acondicionamiento de control es un microcontrolador PIC (*Circuito Integrado Programable*) 18F4550 (Ver Anexo C), el cual contará con las siguientes características:

- Menú para selección de corriente en el neutro
- Menú para selección de Td
- Menú para selección de Tf
- Selección modo Test/Reset

### 3.3.1 Características del PIC 18F4550

Los PICs son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip Technologies Inc. La familia 18FXXXX presenta un alto desempeño por las herramientas con las que cuenta internamente como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11

*Características del PIC 18F4550.*

| Parámetro                             | Valor  |
|---------------------------------------|--|
| Tipo de Memoria de programa           | Flash  |
| Capacidad de memoria de Programa (KB) | 32   |
| Velocidad de CPU (MIPS)               | 12   |
| RAM (Bytes)                           | 2,048  |
| EEPROM (bytes)                        | 256  |
| Comunicación de periférico digitales  | 1-UART, 1-A/E/USART, 1-SPI, 1-I2C1-MSSP(SPI/I2C) |
| Capture/Compare/PWM                   | 1 CCP, 1 ECCP                                    |
| Temporizadores                        | 1 x 8-bit, 3 x 16-bit                            |
| ADC                                   | 13 canales de 10-bits                            |

|                                      |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Comparadores                         | 2                     |
| USB                                  | 1, FS Device, USB 2.0 |
| Temperatura(C)                       | -40 @ 85              |
| Rango de Operación de voltaje<br>(V) | 2 @ 5.5               |
| Número de Pines                      | 40                    |
| Frecuencia de Operación              | Hasta 48Mhz           |

Tabla 11. Características del PIC 18F4550 (Continuación)

El microcontrolador dispone de diferentes buses para el acceso a la memoria del programa y la memoria de datos. Esto permite acceder simultáneamente a ambas memorias, es decir, se puede ejecutar una instrucción mientras se lee de la memoria de programa la siguiente instrucción.

El tiempo de ejecución completa de una instrucción (lectura de instrucción + ejecución) se realiza en un ciclo del procesador (4 ciclos de reloj , $4T_{OSC}$ ) excepto las que modifican el programa, estas tardan dos ciclos. Lo anterior se puede desarrollar de la siguiente manera (Ecuación 9) para un cristal de 4MHz.

$$T = \frac{1}{F_{OSC}} = \frac{1}{4MHz} = 250ns \quad \therefore \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$T$  = Periodo de oscilación.

$F_{Osc}$  = Frecuencia de oscilación.

Dado que el microcontrolador tarda cuatro ciclos, el tiempo de ejecución viene dada por  $4 \cdot T$ , entonces el tiempo de ejecución es  $4 \cdot (250ns)$ , entonces el tiempo de ejecución es de  $1\mu s$ .

Para el oscilador interno del microcontrolador, que es de 8 MHz, el tiempo de ejecución es de 500ns.

### 3.3.2 Memoria EEPROM

La EEPROM es una matriz de memoria permanente, separada de la RAM de datos y de la memoria de programa, se utiliza en almacenamientos de larga duración de los datos del programa. No está mapeada directamente en los registros de archivo o en la memoria del programa, sino que se trata indirectamente a través de los registros especiales de la función (SFRs).

Cuatro SFRs se utilizan para leer y para escribir los datos en la EEPROM así como la memoria del programa. Son: EECON1, EECON2, EEDATA y EEADR.

Los datos EEPROM permiten la lectura y escritura de bytes. Cuando se conecta al bloque de la memoria de datos, el EEDATA sostiene los 8bits de datos para la lectura/escritura y el registro EEADR lleva a cabo el direccionamiento de la localización de la EEPROM.

La memoria de datos EEPROM se clasifica como muy resistente a los ciclos de escritura/borrado. Un byte escribe y automáticamente borra la localización y escribe los datos nuevos (borrar-antes-escribir). El tiempo de escritura se controla por un contador de tiempo en el chip. Para el proceso de escritura y lectura se tiene que modificar el registro EECON1, el cual se conforma por los siguientes bits (ver Tabla 12)

Tabla 12

Registro EECON1.

|       |       |     |       |                      |       |       |       |
|-------|-------|-----|-------|----------------------|-------|-------|-------|
| R/W-x | R/W-x | U-0 | R/W-0 | R/W-x                | R/W-0 | R/S-0 | R/S-0 |
| EEPGD | CFGS  | --  | FREE  | WRERR <sup>(1)</sup> | WREN  | WR    | RD    |
| Bit 7 |       |     |       |                      |       | Bit 0 |       |

Bit 7. EEPGD: Bit de selección para acceso a la memoria Flash/EEPROM

1 = Acceso a memoria Flash

0 = Acceso a memoria EEPROM

Bit 6. CFGS: Bit de selección de acceso a memoria Flash (programa)-EEPROM (datos)/configuración.

1 = Acceso a configuración de registros

0 = Acceso a memoria Flash o memoria EEPROM

Bit 5. No implementado: Leer como "0"

Bit 4. FREE: Bit de habilitación del borrado de una fila de memoria flash

1 = Borrado de fila de la memoria flash apuntada por TBLPTR en el siguiente comando de escritura (el bit se pondrá a '0' cuando la operación de borrado se haya completado)

0 = Ejecuta solo escritura

Bit 3. WRERR: Bit de error de escritura en memoria Flash/EEPROM

1 = Se ha producido un error en la operación de escritura en la memoria

0 = La operación de escritura se completo

Bit 2. WREN: Bit de habilitación de la operación de escritura en la memoria

1 = Operación de la escritura en la memoria Flas/EEPROM habilitada

0 = Operación de la escritura en la memoria Flas/EEPROM deshabilitada

Bit 1. WR: Bit de control de escritura

1 = inicio de una operación de borrado/escritura en la memoria

0 = La operación de escritura se ha completado

Bit 0. RD: Bit de control de lectura

1 = Inicio de una operación de lectura en la memoria EEPROM

0 = La operación de lectura se ha completado

### 3.3.3 ADC

El convertidor analógico a digital (*ADC*) en el microcontrolador PIC es una herramienta útil. El uso del ADC permite interacción con todo tipo de periféricos, tales como potenciómetros, acelerómetros, giroscopios, y muchos otros tipos de sensores.

El ADC toma una señal digital analógica (0-5V) como su entrada y luego convierte la tensión a un valor digital binario. El PIC18f4550 cuenta con un ADC de 10 bits, esto significa que un nivel de tensión de 0 V debe ser leído como 0, y 5V como 1023 ( $2^{10} - 1$ ). La resolución depende del número de bits, en este caso es de 10 bits.

El tiempo de conversión  $T_c$  depende fundamentalmente del número de bits del conversor. La unidad básica es llamada  $T_{ad}$ , la cual se define como el tiempo necesario para ganar un bit adicional. La conversión total tarda entre 11 y 14  $T_{ad}$  (contando con la descarga final del condensador para estar listo para otra medida. El reloj del ADC se debe ajustar (como una fracción del oscilador principal) para que dicho  $T_{ad}$  no sea inferior al valor mínimo. Para la familia PIC18F4550, el  $T_{ad}$  mínimo es de 1.6  $\mu\text{s}$  y  $T_c = 14 T_{ad}$ . En cambio para la familia PIC18F2520/4520 tenemos un  $T_{ad}$  mínimo de 0.75  $\mu\text{s}$  y un  $T_c = 11 T_{ad}$ .

Aunque es muy conveniente tener un ADC integrado dentro del microcontrolador, en términos de nivel de ruido, la cercanía del microcontrolador con la línea de reloj, rápidos cambios en las



líneas digitales, comunicaciones, etc. no es el mejor sitio para ubicar un ADC. Esto quiere decir que si se está muy interesado en la precisión, tal vez sería conveniente considerar un ADC aparte.

La familia PIC18F4550 tiene 3 registros (Ver Tabla 13) de control asociados al ADC (ADCON0, ADCON1 y ADCON2). Además de los registros de control tenemos otros dos registros ADRESH y ADRESL (AD result High/Low) donde se guarda el resultado de la conversión.

Registro ADCON0: Permite seleccionar (CHS) el canal del que tomaremos la medida. También tiene el bit que habilita el conversor (ADON) y (GO) que inicia el proceso de conversión.

Tabla 13

*Registros Asociados al ADC.*

| Bit #   | MSB      |          | Selección de canal         |       |       |       | LSB        |        |
|---------|----------|----------|----------------------------|-------|-------|-------|------------|--------|
|         | Bit 7    | bit 6    | bit 5                      | bit 4 | bit 3 | bit 2 | bit 1      | bit 0  |
| Nombre  | X        | X        | CHS3                       | CHS2  | CHS1  | CHS0  | GO         | ADON   |
| Función | No usado | No usado | Desde 0 (0000) a 12 (1100) |       |       |       | Launch ADC | ON/OFF |

ADON: Encendido (1) o apagado (0) del módulo ADC.

GO: Se pone a 1 para iniciar el proceso de conversión. Cuando la conversión ha terminado el módulo lo pone a 0. Así es como sabemos que podemos recoger el resultado (en ADRESH/ADRESL)

CHS: selecciona cuál de los posibles 13 canales analógicos se conectan al ADC para medir.

Registro ADCON1: Dedicado a seleccionar cuales de los posibles canales se van a usar como entradas analógicas y a programar el uso o no de voltajes de referencia externos (distintos de los valores 0 y 5V por defecto).

En la Tabla 14 se muestran los bits y configuración para el registro de canales analógicos.

Tabla 14

*Registros Asociados al Número de Canales Analógicos.*

| Bit #   | MSB      |          | Tensiones de Referencia     |       | LSB                                    |       |       |       |
|---------|----------|----------|-----------------------------|-------|--|-------|-------|-------|
|         | bit 7    | bit 6    | bit 5                       | bit 4 | bit 3                                  | bit 2 | bit 1 | bit 0 |
| Nombre  | X        | x        | VCFG1                       | VCFG0 | PCFG3                                  | PCFG2 | PCFG0 | PCFG0 |
| Función | No usado | No usado | Uso (1) de Vref (+),Vref(-) |       | Reparto canales digitales / analógicos |       |       |       |

VCFG1: Por defecto (0). Si es 1 se tomara como Vref- el voltaje presente en AN2.

VCFG0: Lo mismo que el anterior pero para Vref+. Por defecto usaremos Vdd (alimentación, típicamente 5 o 3.3V) como Vref+. Si es 1 se usa el voltaje presente en AN3 como Vref+.

PCFG: Posiblemente no se necesiten todos los posibles canales analógicos. Estos bits permiten decidir cuáles de los pines se dedican a canales analógicos y cuales permanecen como canales digitales. Los valores posibles van desde 0000 (todos analógicos) a 1111 (todos digitales).

Los canales analógicos se denotan en la hoja de especificaciones como AN0, AN1, AN2, etc. Los dispositivos con 8 canales (252/452) los reparten entre el puerto A y el E.

El registro ADCON2 (Tabla 15) contiene información para determinar los tiempos Ta y Tc del conversor y la forma en la que el resultado (10 bits) se guarda en ADRESH:

Tabla 15

*Registro ADCON2.*

| Bit #   | MSB           |          | Tiempo de adquisición      |       |       | LSB           |       |       |
|---------|---------------|----------|----------------------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
|         | bit 7         | bit 6    | bit 5                      | bit 4 | bit 3 | bit 2         | bit 1 | bit 0 |
| Nombre  | ADFM          | x        | ACQT2                      | ACQT2 | ACQT2 | ADCS2         | ADCS1 | ADCS0 |
| Función | Formato usado | No usado | Programación T adquisición |       |       | Reloj del ADC |       |       |

ADCS: Seleccionan la velocidad del reloj del ADC como una fracción ( $div = 2, 4, 8, 16, 32, 64$ ) del reloj principal (aunque también es posible asociarlo a un oscilador RC independiente). El inverso de la frecuencia del ADC determina el llamado  $T_{ad}$ , que viene a ser el tiempo dedicado a obtener cada bit del resultado (Tutoriales PIC, 2015).

### 3.3.4 Desarrollo de programa

Dado lo grande que pudiera resultar el programa se optó por segmentar o dividir los problemas del enunciado que se pedía en el enunciado del diseño. En el enunciado del diseño se requerían mediciones de tensión, de tiempos, salidas y entradas digitales. La idea principal que se debe tener es que se estaba midiendo una tensión eléctrica en todo instante, por lo que se debería monitorear una entrada analógica.

En la Figura 37 se muestra el diagrama de flujo del programa principal, es decir, el monitoreo constante de los niveles de intensidad eléctrica que fluye a través del neutro. Recordando que se cuenta con variables de salida como LV, LR, LA, VENT (*Ventilador*), AS (*Alarma sonora*), variables de entrada como SW ( $T_d$  (*tiempo de retardo*),  $I_p$  (*Corriente Programada*),  $T_f$  (*tiempo de pulso*),  $\times 10$ ).

La descripción del programa principal empieza configurando el microcontrolador, cargando las variables que hay en la memoria EEPROM interna del PIC. Una vez configurado, muestra por la pantalla una presentación breve del relé de corriente (saludo inicial) y muestra los datos leídos de la memoria. La variable lectura compara la lectura hecha por el ADC en tiempo real y compara con el valor de  $I_p$  (corriente programada). Para entrar al modo de falla (corriente en el neutro) se puede hacer de dos formas, mediante el modo de prueba (Test) o bien por una corriente mayor a la programada (Falla en el sistema eléctrico). Si todo funciona normal hasta este paso, hay opción de modificar los parámetros de corriente y tiempo.

El compilador utilizado para la programación del microcontrolador fue el CCS Compiler. Este es un compilador en lenguaje C compatible con la familia de microcontroladores Microchip y el simulador de circuitos Isis Proteus (CCS, 2015).

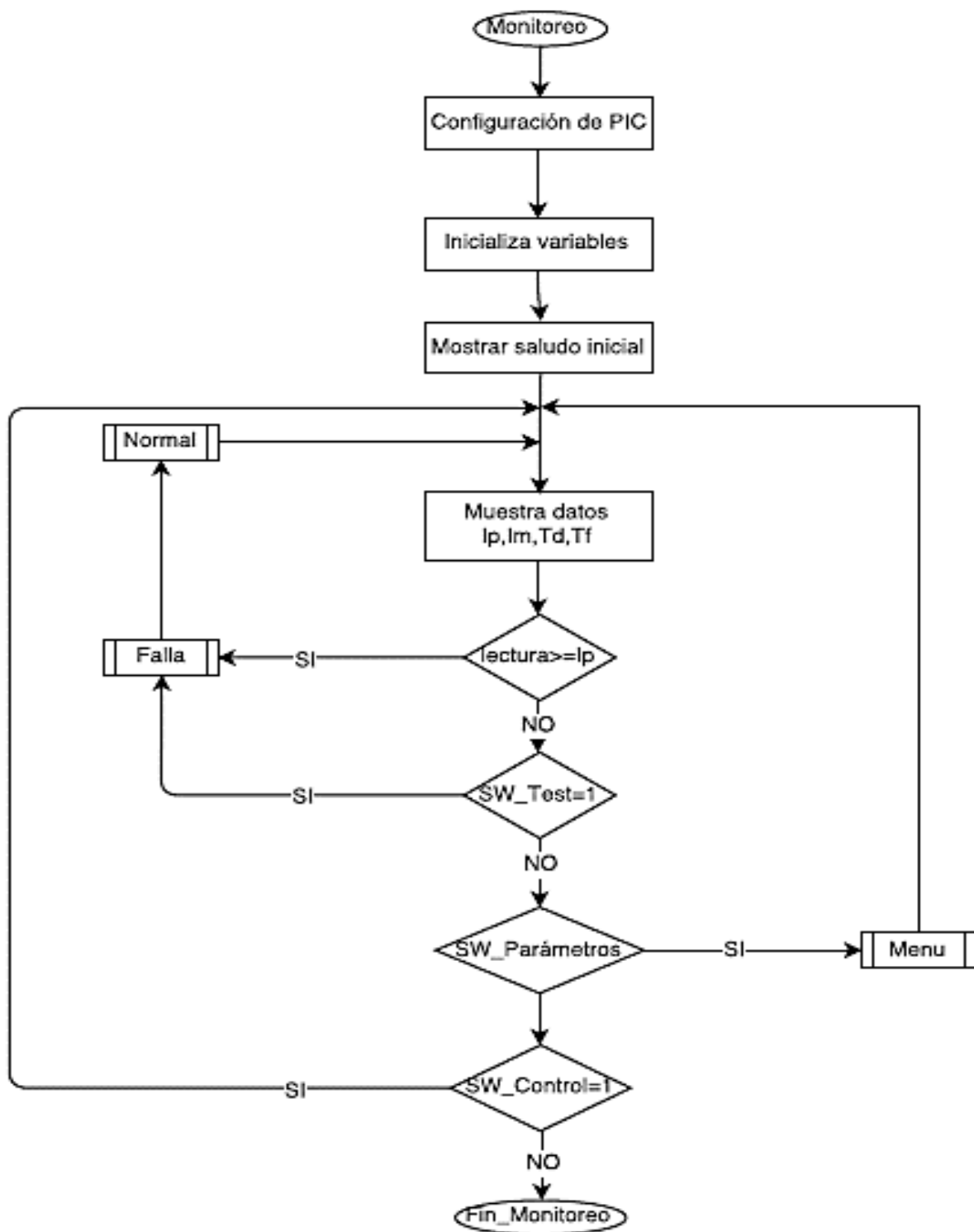


Figura 37. Programa Principal

Las subrutinas empleadas se muestran en la Figura 38. Si la corriente medida por el sensor es mayor a la indicada, se entra en la subrutina de falla, en la que se espera un tiempo retardo definido por el usuario y activa las salidas asociadas al proceso de falla y se queda enclavado hasta esperar una petición de Reset hecha por el usuario, volviendo todo a un estado *Normal*.

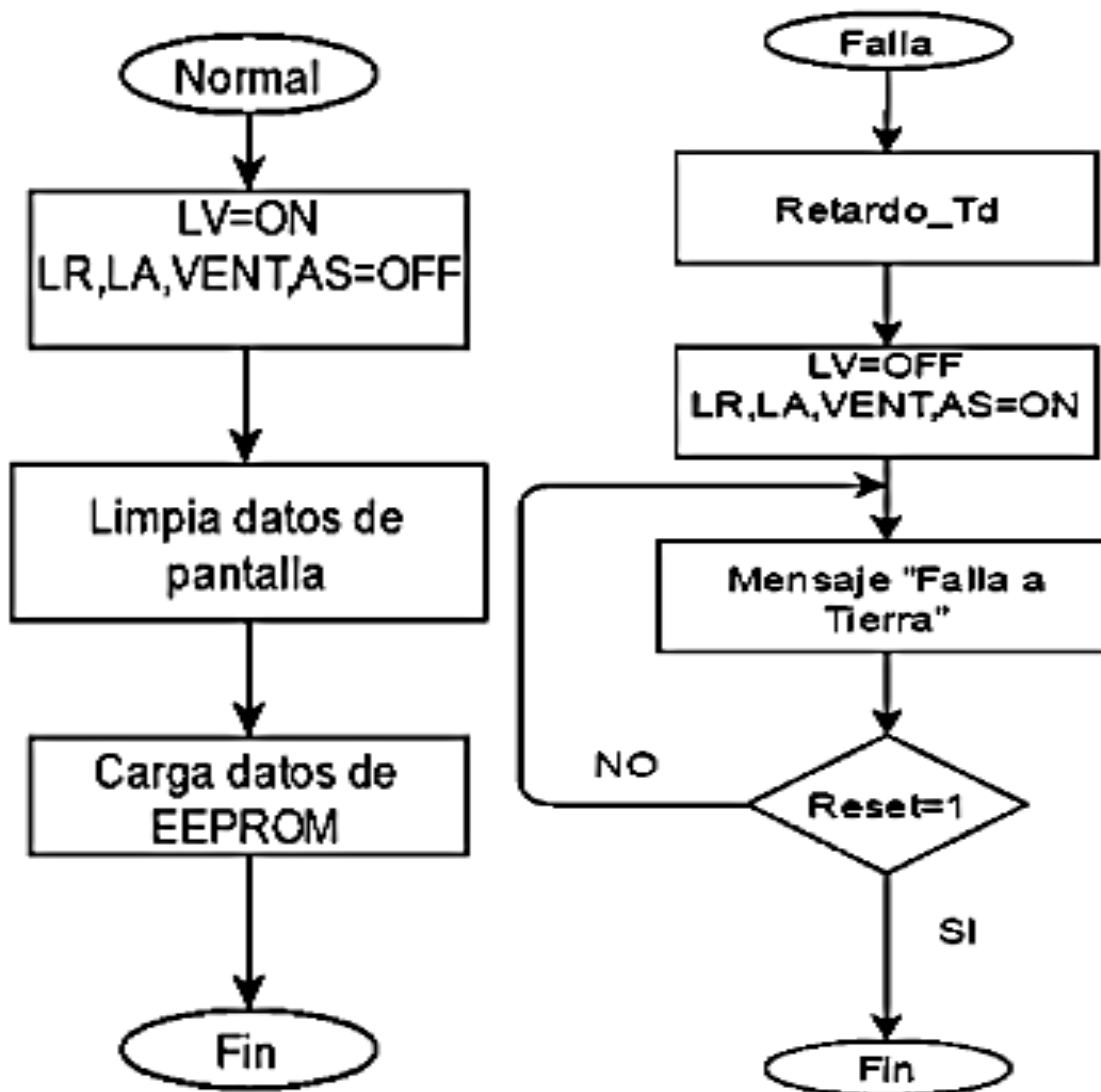


Figura 38. Subrutinas del Programa Normal y Falla

Si se entra en la sección de menú (Ver Figura 39), activando cualquiera de los parámetros a cambiar (Ip, td, tf), se borran los datos almacenados en la EEPROM del PIC y se alistan para

guardar nuevos valores de la selección. Estos valores pueden ser programados con una posible escala (x10). Después de seleccionar los valores, se guardan en una localidad de la memoria y vuelve todo a un estado normal (subrutina Normal).

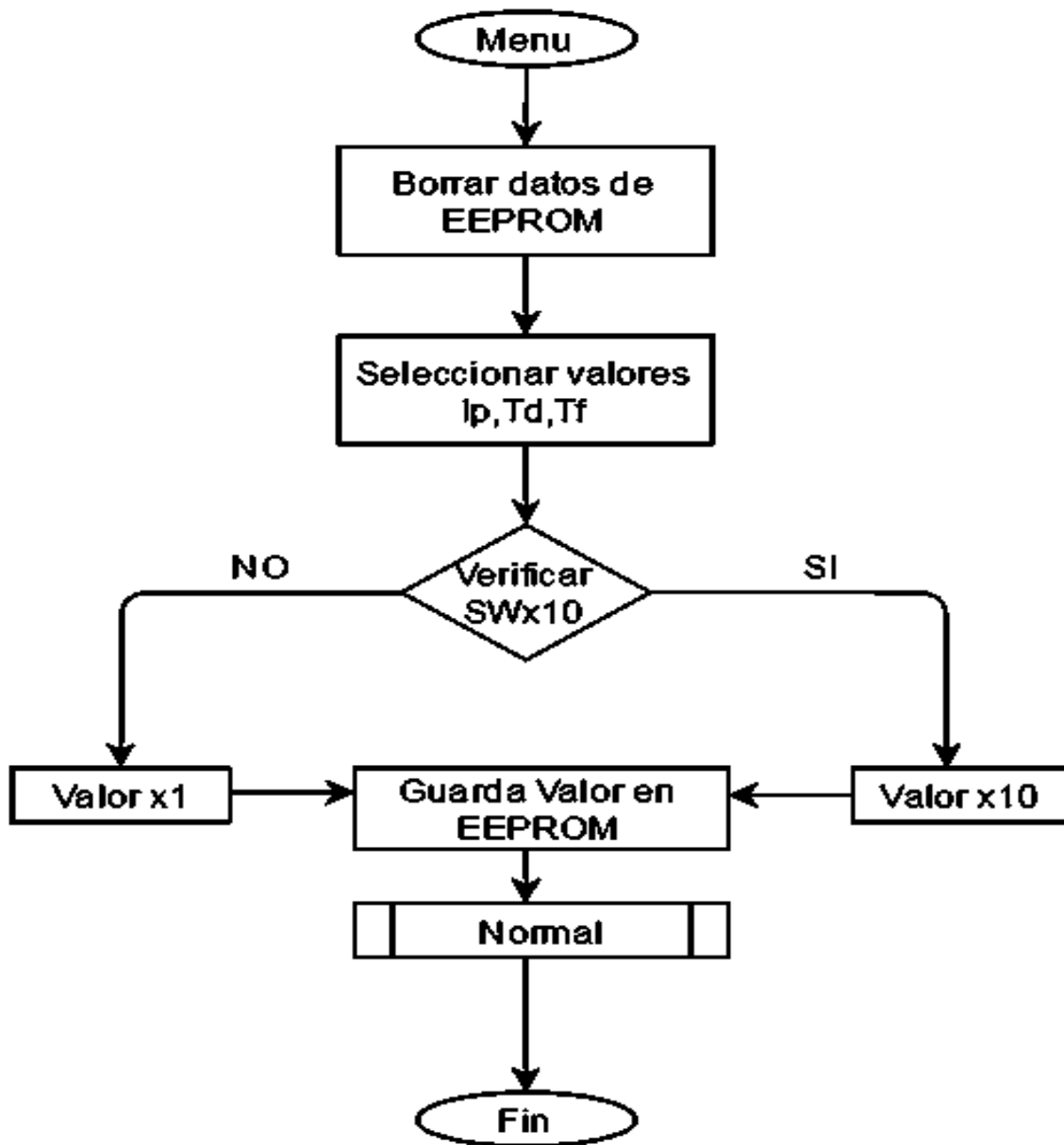


Figura 39.Subrutinas de Menú

### 3.4 Acondicionamiento de Interfaz de Usuario

La manera en que se programara las corrientes a sensar por el relevador, será por medio de cuatro interruptores, cuatro botones y una pantalla LCD de 16x2 (Ver Anexo D). EL LCD que se seleccionó se puede modificar por uno de mayor número de líneas y facilitar aún más la comprensión de la información mostrada en la pantalla. Su repercusión en el programa, de ser modificado, no será determinante para cambiar las líneas del programa.

La descripción de los botones es la siguiente:

- SW para programar Corriente
- SW para programar T\_Delay
- SW para programar T\_Flicker
- SW para seleccionar escala x1 o x10
- Interruptor para seleccionar valores
- Interruptor para acceder a menú
- Interruptor para ajustar números
- Interruptor para Test/Reset

#### 3.4.1 LCD

Una manera sencilla de interactuar con los valores programados es mediante una pantalla LCD (*Display de Cristal Líquido*). Ésta pantalla es controlada por el microcontrolador y tiene las siguientes características (Ver Tabla 16).

Tabla 16

*Características de LCD.*

| Pin | Nombre          | Conexión                  |
|-----|-----------------|---------------------------|
| 1   | V <sub>SS</sub> | 0 V                       |
| 2   | V <sub>CC</sub> | +5 V                      |
| 3   | V <sub>EE</sub> | Contraste del LCD 0 V     |
| 4   | R <sub>S</sub>  | Instrucción Registro/Dato |
| 5   | R/W             | Escribir 0/Leer 1         |
| 6   | E               | Enable, 0 V               |
| 7   | DB0             | Dato de Entrada/Salida    |
| 8   | DB1             | Dato de Entrada/Salida    |
| 9   | DB2             | Dato de Entrada/Salida    |
| 10  | DB3             | Dato de Entrada/Salida    |
| 11  | DB4             | Dato de Entrada/Salida    |
| 12  | DB5             | Dato de Entrada/Salida    |
| 13  | DB6             | Dato de Entrada/Salida    |
| 14  | DB7             | Dato de Entrada/Salida    |
| 15  | LED-            | Tensión para LED          |
| 16  | LED+            | Tensión para LED          |

El diagrama que a continuación se presenta en la Figura 40, muestra la conexión con el microcontrolador y la conexión estándar de alimentación de la pantalla LCD, en la que se puede cambiar la intensidad luminosa o dejarla fija. Las entradas indican de donde provienen dichas señales como lo son las salidas del microcontrolador [D0-D7].



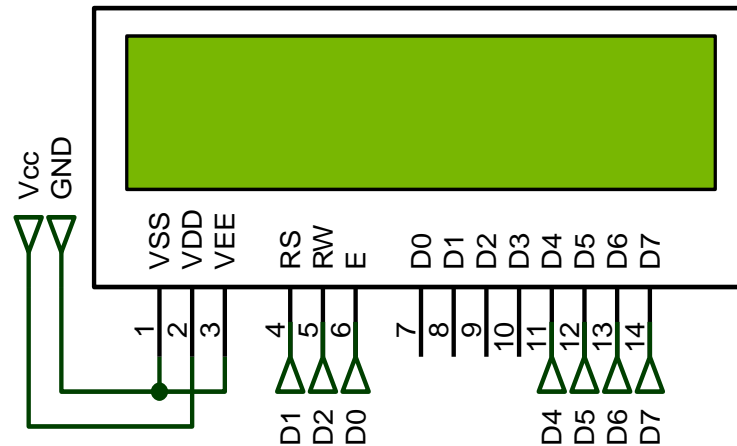


Figura 40. Conexión de LCD

### 3.4.2 Selectores del sistema

Las señales digitales se identifican por estados lógicos, una entrada digital se considera como activa cuando su tensión es de 5 V (salvo modelos con 3,3 V), y desactivada cuando su tensión es de 0 V. Son los dos únicos casos posibles, de tal forma que se puede identificar con 1 y 0 respectivamente.

Las resistencias Pull-Down aseguran que, cuando el interruptor está abierto, toda posible fluctuación de tensión residual decaiga en la resistencia, consiguiendo a la entrada un valor lógico de 0 (*bajo*). En el caso de haber obviado la resistencia, al abrir el interruptor, no se puede asegurar que a la entrada fueran a existir valores de tensión menores que 2,5 v.

En el caso de la resistencia Pull-Up, el comportamiento es justamente al revés, asegurando un valor lógico de 1 (*alto*). Un valor típico de estas resistencias es 10 k $\Omega$ , y sus aplicaciones son de lo más variadas debido a su comportamiento y bajo consumo de corriente. Por destacar una aplicación, son muy utilizadas en comunicaciones I2C para evitar colisiones entre distintos voltajes operando sobre un bus común.

En la Figura 41 se muestra la conexión de selectores que se empleó, con una configuración Pull-Up. El nombre de cada selector se encuentra en la parte superior de cada uno y la salida dicha señal se encuentra en la parte de en medio, señalando el destino de su conexión, que son los

puertos [B7-B2] y [E2, E1] del microcontrolador. El uso de diferente tipo de botones es debido a la practicidad que representan en usarlos, como un pulso momentáneo de esa señal y no de forma permanente.

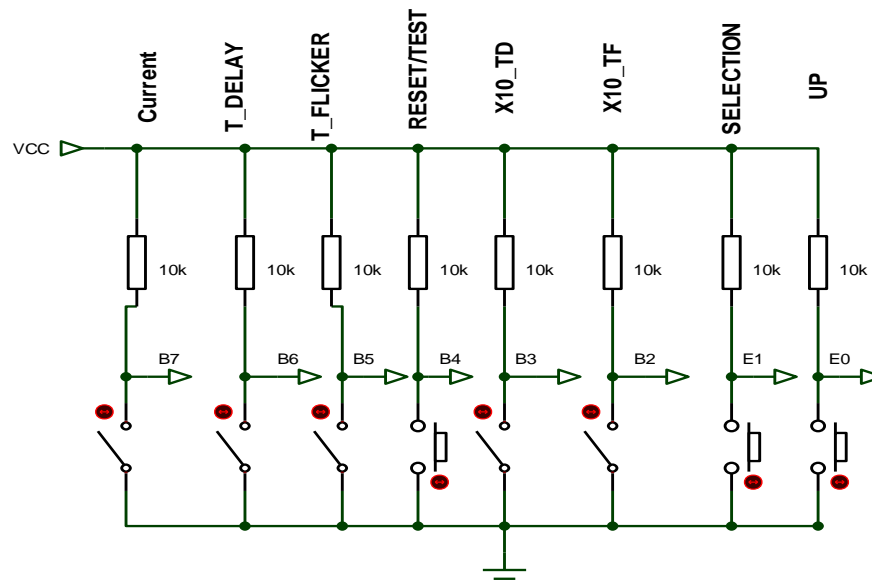


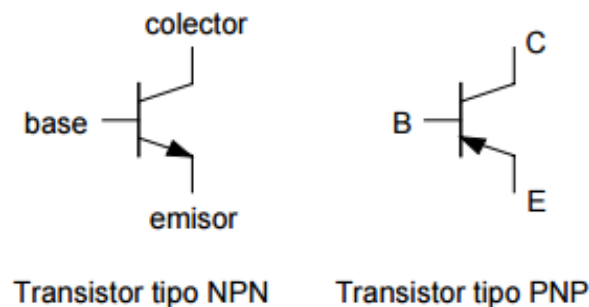
Figura 41. Conexión de Selectores

### 3.5 Acondicionamiento de Interfaz de Potencia

Para la aprobación del prototipo, se consideró hasta el módulo de control a petición de GRG Protecciones. El módulo de potencia se incluyó en otra etapa del proyecto debido a algunas consideraciones, como el tiempo de respuesta de las diferentes opciones a usar, es decir, las diferentes interfaces de potencia que se podían emplear como relevadores, optoacopladores, relevadores de estado sólido. Cada una de estas opciones tiene un tiempo de respuesta diferente. La potencia disipada y los costos, por mencionar algunos, también podían influir en la decisión de optar por uno u otro. Los datos que a continuación se desarrollan en este punto, son con fines de mostrar la funcionalidad del prototipo, no así para su aprobación final de la construcción del monitor de falla a tierra.

### 3.5.1 Transistores

El Transistor es un componente electrónico formado por materiales semiconductores como el silicio o germanio. Consta de tres terminales -emisor, colector y base-, que atendiendo a su fabricación, puede ser de dos tipos: NPN y PNP. En la *Figura 42* se muestran los símbolos de circuito y nomenclatura de sus terminales. En funcionamiento normal, la flecha en el emisor indica el sentido de la corriente que circula por el emisor del transistor.



*Figura 42.* Símbolos del Transistor

Uno de los objetivos del transistor es controlar una potencia mayor con una menor en la entrada, esto debido a una amplificación que se da mediante la configuración del transistor en conjunto con dispositivos pasivos. El transistor bipolar basa su funcionamiento en el control de la corriente que circula entre el emisor y el colector, mediante la corriente de base. Definimos los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  (de corriente continua) como la relación existente entre la corriente de colector y la de emisor, o la de emisor y la de base, es decir:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}; I_E = I_C + I_B; V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$\beta$  = Factor de ganancia del transistor

$I_C$  = Corriente del Colector

$I_B$  = Corriente de Base

$I_E$  = Corriente de Emisor

$V_{CE}$  = Voltaje Colector - Emisor

$V_{CB}$  = Voltaje Colector - Base

$V_{BE}$  = Voltaje Base - Emisor

La Ecuación 10 representa la ganancia que ofrece el transistor en corriente directa, es decir, la relación que expresa cuanto se amplifica la corriente en el transistor. La  $\beta$  del transistor es un parámetro importante por ser el que determina la ganancia, aunque este parámetro no es fijo, ya que varía con la temperatura y la corriente del colector (Floyd, 2001).

En función de las tensiones que se apliquen a cada una de las tres terminales del transistor podemos conseguir que éste en una región u otra de funcionamiento. Por regiones de funcionamiento entendemos valores de corrientes y tensiones en el transistor, que cumplen unas relaciones determinadas dependiendo de la región en la que se encuentre. La región de funcionamiento de corte es cuando no circula corriente por sus terminales. Concretamente, y a efectos de cálculo, decimos que el transistor se encuentra en corte cuando se cumple la condición:  $I_E = 0$  o  $I_E < 0$  (Esta última condición indica que la corriente por el emisor lleva sentido contrario al que llevaría en funcionamiento normal). Para polarizar el transistor en corte basta con no polarizar la unión base-emisor del mismo, es decir, basta con que  $V_{BE}=0$ . La región activa es cuando está operando el transistor para el propósito que fue implementado y como característica, existen corrientes en todos sus terminales y se cumple que la unión base-emisor se encuentra polarizada en forma directa y la de colector-base en inversa.

### **3.5.2 Conexión de carga**

Una vez que se obtiene la salida del PIC como resultado del control, es importante conocer las características técnicas del dispositivo de carga para definir el arreglo de circuitería pasiva y

activa correcta, recordando que el objetivo de la interfaz de potencia es comunicarse con un voltaje de corriente alterna a partir de una señal de corriente directa en un momento específico, en otras palabras, a partir de una señal menor en la entrada, se puede controlar un dispositivo que requiera una señal mayor o diferente en términos de corriente y voltaje. Para esta demostración del prototipo se consideró un ventilador, el cual tiene la función de ventilar el sistema una vez que se detecta la falla a tierra.

A continuación se listan los datos del relevador así como los del microcontrolador para el funcionamiento óptimo de la interfaz de potencia dada una señal pequeña.

- Corriente Nominal de relevador a 5V: 72 mA
- Resistencia de la bobina del relevador: 69  $\Omega$
- Tiempo de respuesta del relevador: 10 ms

Se trabajó con un transistor TIP31 (Ver Anexo E) que proporciona una  $h_{fe}=25$ . Dada que la corriente nominal es de 72 mA, entonces se requiere que  $I_C$  sea aproximadamente igual a 72 mA. El valor mínimo de corriente de la base es:

$$I_{B(mín)} = \frac{I_{C(sat)}}{\beta_{CD}} = \frac{72mA}{25} = 2.88mA \quad \text{Ecuación 11}$$

Para asegurar el disparo, se considera 5 veces la corriente de base, es decir que, si  $I_{B(mín)} = 2.88mA$  entonces  $I_B = 14.4mA$ . Calculando la resistencia de la base se tiene:

$$I_B = \frac{V_{Pin} - 0.7}{R_B} \therefore R_B = \frac{V_{Pin} - 0.7}{I_B} = \frac{5 - 0.7}{14.4mA} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$R_B = 298.6\Omega$$

La potencia de la resistencia de base ( $P_{R_B}$ ) se calculó de la siguiente manera:

$$P = V \cdot I \therefore P_{R_B} = V_{Pin} \cdot I_B$$

$$P_{R_B} = 5 \cdot 14.4mA = 72mW$$

Ecuación 13

Ajustando las resistencias a valores comerciales  $R_B = 270\Omega$  a  $1/4 W$ . El diagrama se muestra en la Figura 43.

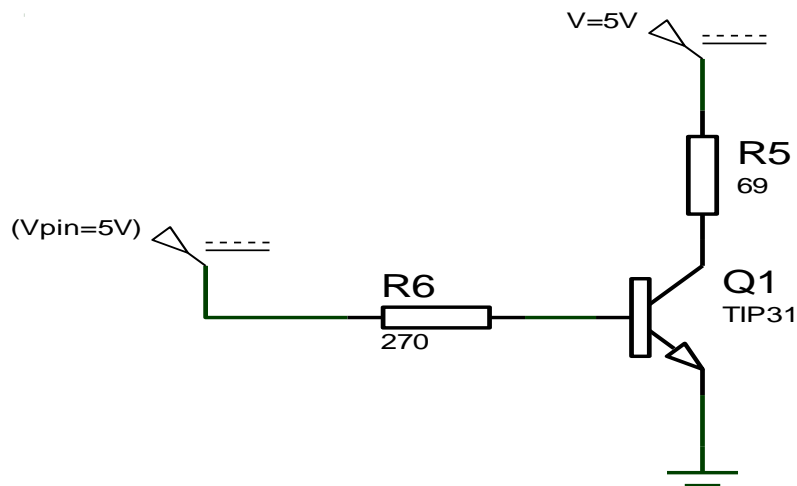


Figura 43. Acoplamiento de Potencia

### 3.5.2.1 Diodo de Rueda libre

Frecuentemente llamado “diodo de rueda libre”, se asocia con los circuitos que tienen electroimanes en circuitos de corriente continua, en el que se utiliza como parte de una protección de una corriente inversa, característico de un inductor. En el momento del corte, la energía almacenada tiende a hacer circular una corriente en el mismo sentido anterior al corte.

El diodo permite esta circulación y, gracias a su débil umbral de conducción ( $< 1 \text{ V}$ ), evita toda sobretensión en las terminales de la bobina. La sobretensión derivada del corte de una carga inductiva es un fenómeno transitorio causado por la liberación de la energía almacenada en la bobina en el momento del corte. Un dispositivo inductivo genera un voltaje de acuerdo con la ecuación:

Donde

$V_L$  = Tensión del inductor

$L$  = Valor de la inductancia

$$V_L = L \frac{d_i}{d_t}$$

Ecuación 14

Cuando la corriente cae repentinamente a cero,  $di/dt$  es muy grande, lo que resulta en una tensión de magnitud muy alta, que puede resultar dañino a otros componentes. El diodo de rueda libre proporciona un camino para que la corriente inductiva fluya. El diodo freewheeling (de rueda libre) se conecta en paralelo con la carga inductiva y de esta manera evita sobrevoltajes, permitiendo que, cuando el transistor conmute a corte, la corriente que venía circulando por la bobina continúe ahora su paso por el diodo, con lo cual la bobina siente que su corriente disminuye suavemente a medida que circula por el diodo.

# **CAPÍTULO IV:**

## **Validación**

### **Experimental.**



Una parte importante del diseño de un proyecto es la materialización del mismo y de esta manera comprobar los aciertos y mejorar las etapas que requieran atención e incluso, volver a comenzar un proyecto desde cero, considerando las experiencias adquiridas en el pasado. En esta unidad se reportaran las pruebas hechas al diseño que se implementó en la unidad anterior.

#### **4.1 Ensamble de Módulos**

La incorporación de cada etapa se muestra en la Figura 44. En ella se puede observar que alguna de las salidas son totalmente digitales y otras más, como la alarma sonora y el ventilador, son analógicas y funcionan a 120 VCA. En la interfaz de potencia se añadió el diodo de rueda libre para proteger de sobrevoltajes al transistor como se mencionó anteriormente.

Para comprobar el funcionamiento, se realizaron de dos maneras, una es el modo prueba y el otro es el modo analógico, es decir, realizando el monitoreo en tiempo real. Además se comprobaron los valores programables ( $T_d$  (*Tiempo de Retardo*),  $I_p$  (*Corriente Programable*) y  $T_f$  (*Tiempo de Pulso*)) tomando en cuenta que el sistema estaba completo.

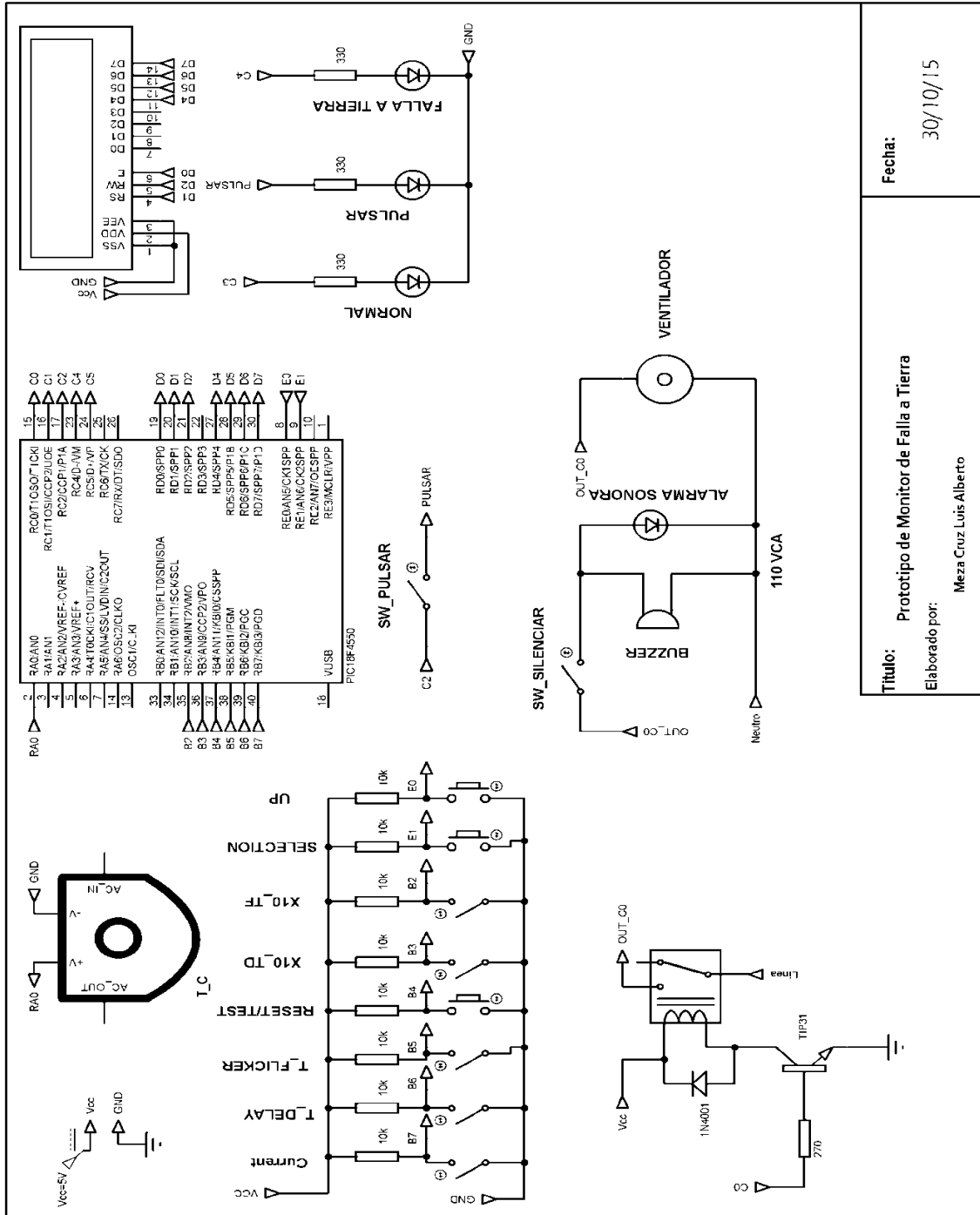


Figura 44. Ensamble de Módulos

**Título:** Prototipo de Monitor de Falla a Tierra  
**Elaborado por:** Meza Cruz Luis Alberto  
**Fecha:** 30/10/15

## 4.2 Validación de Visualización

En este punto se comprueba el funcionamiento de la interfaz de usuario. Se pretende que con la pantalla LCD se pueda visualizar los parámetros con los cuales funciona el sistema, así como su correcto almacenamiento y lectura en la memoria EEPROM.

### 4.2.1 Pantalla principal

Al encender el sistema se visualiza cuatro valores establecidos como se muestra en la Figura 45. Los valores que son guardados en la EEPROM ( $T_d$ ,  $T_f$ ,  $I_p$ ) se despliegan en el LCD de tal manera que se ocupan las dos filas y, que a pesar de que por cuestiones del tamaño del LCD no se pone el nombre de cada parámetro, se indica el nombre de cada valor con sus respectivas unidades.

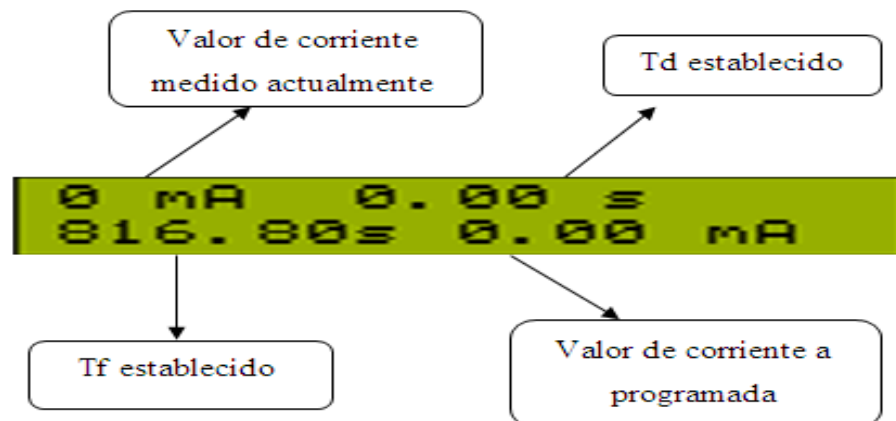


Figura 45. Pantalla Principal del Sistema

Esta pantalla se modificará únicamente si se cambia algún parámetro y se deben de cumplir, principalmente, la del monitoreo de corriente, la cual ejecuta las salidas del sistema.

#### 4.2.2 Menú

Para la interacción del menú se necesita manipular las entradas del sistema que es la botonería que se mostró en la Figura 41 , a través de ellos se puede acceder al menú. Para modificar cada parámetro, se identificó cada botón correspondiente, al seleccionar uno de ellos, se accede al parámetro seleccionado y se lleva el conteo de cada uno presionando el botón “UP”, de ser necesario, se puede escalar el conteo previo con el botón X10\_TD o X10\_TF, según sea el caso. Estos botones modifican los valores del tiempo td y tf respectivamente, dándole una escala seleccionada x10.

Se consideró guardar 3 valores fundamentales para el funcionamiento del sistema como tal, uno de ellos corresponde a la corriente Ip, al tiempo de delay td y al tiempo de flicker tf. Como se necesitaban valores definidos por el usuario, se optó por usar la memoria EEPROM del mismo PIC y no utilizar una memoria externa. La descripción de la memoria y su uso se puede verificar en la hoja de especificaciones. Las direcciones utilizadas son:

- Corriente: [0..30]
- td: [40..70]
- tf: [100..130]

Para acceder a los diferentes parámetros, basta cerrar el switch del parámetro a modificar como td, tf o corriente, uno a la vez y seleccionar los valores que se desean programar.

Para ajustar el valor de la corriente, se cuenta con algunos valores previamente programados. Estos valores se muestran en la Tabla 17. La sumatoria de los valores da como resultado un rango de 0-10 A, e intervalos de 10 mA.

Tabla 17

*Valores de Corriente Disponibles*

| Referencia       | Direccionamiento de Memoria |    |    |    |     |     |     |      |      |      |
|------------------|-----------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Posición         | 0                           | 1  | 2  | 3  | 4   | 5   | 6   | 7    | 8    | 9    |
| Valor en Memoria | 10                          | 20 | 40 | 80 | 160 | 320 | 640 | 1280 | 2560 | 5110 |

Para seleccionar un valor, a continuación se debe de presionar el botón UP, este iniciara un conteo mientras este presionado. Los valores del contador hacen referencia a una posición que contiene un valor mostrado en la Tabla 17. Esta tabla la debe tener en cuenta el usuario para la programación de la corriente a sensar en el neutro En los diversos valores, una vez seleccionado se mostrara una imagen parecida a la Figura 46, en donde los valores del contador y la posición de la memoria son diferentes. Habrá que mantener presionado el botón UP hasta que ambos sean iguales y continuar el proceso, de ser seleccionado otro valor, este se sumara al que ya estaba guardado, en este caso, 40 mV.

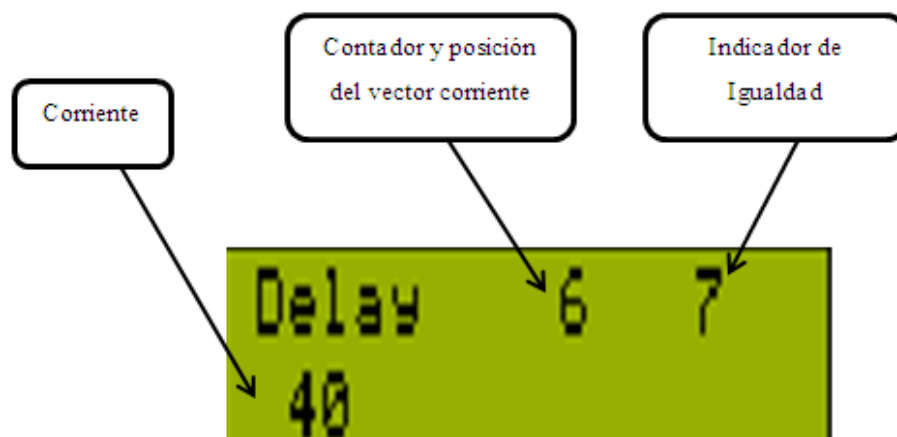


Figura 46. Programación de corriente

En seguida, se seleccionó la posición 5, la cual tiene el valor de 320, más 40 que ya se tenía almacenado, da como resultado los 360 mA que se muestran en la Figura 47.



Figura 47. Valor programado de corriente

Para salir de la programación, basta con presionar de nuevo el switch Current y como es de esperarse, el switch Corriente, al estar abierto, no modifica los valores de td y tf.

Para los valores de tf y td, se tienen arreglos similares a los de corriente, que constan de valores que se programaron previamente. En las Tablas 16 y 17, se muestran los valores en memoria de td y tf respectivamente. En la sumatoria de los valores, se tomó en cuenta los requisitos iniciales de diseño, en los que para td se pide 15 segundos y para tf 60 segundos. Los valores anteriores se alcanzaron, primeramente con los valores pre programados y adicionalmente activando el interruptor X10\_TD y X10\_TF respectivamente.

Tabla 18

*Valores de Td Disponibles.*

| Referencia       | Direccionamiento de Memoria |    |     |     |     |     |
|------------------|-----------------------------|----|-----|-----|-----|-----|
| Posición         | 0                           | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   |
| Valor en memoria | 0                           | 50 | 100 | 200 | 400 | 800 |

Tabla 19

*Valores de Tf Disponibles.*

| Referencia       | Direccionamiento de Memoria |     |     |     |      |      |
|------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|------|------|
| Posición         | 0                           | 1   | 2   | 3   | 4    | 5    |
| Valor en memoria | 100                         | 200 | 400 | 800 | 1600 | 3200 |

### 4.3 Validación de Respuesta del Sistema

A continuación se describe la respuesta del sistema visualizando la entrada analógica y salida digital. Cabe aclarar que la señal de una corriente alterna es idéntica a una señal de voltaje de corriente alterna, es decir, es una señal senoidal con una frecuencia de 60 Hz. Todos los datos correspondientes como corriente pico y corriente RMS, se calculan de igual manera que una señal de voltaje RMS.

#### 4.3.1 Validación del modo *prueba*

El modo de prueba consistió en verificar la funcionalidad del sistema sin una falla a tierra real, sino simulada, de esta manera se puede dar un panorama general del funcionamiento del monitor y su aplicación que se le pueda dar en un futuro inmediato por el usuario final. El modo de prueba se logra cuando este activado el interruptor de Test por tres segundos y se pueda ingresar al sistema como si estuviese ocurriendo una falla a tierra, con la única diferencia que la corriente en el neutro es cero. La respuesta al modo test no incluye el tiempo de retado  $T_d$ , es decir, es instantánea la respuesta. Como se muestra en la Figura 48, todas las salidas se activan, excepto LV. El Ventilador, LR, son siempre activas, no hay interruptor alguno en el sistema que modifique ésta respuesta, sin embargo para LA y AS, se puede activar o no, dado que tiene un interruptor externo ya que no es de alta prioridad estas salidas. Se recomendó que la alarma sonora se desactivara por el usuario una vez que se le da verifica su funcionalidad o bien, se le

dé seguimiento a la falla debido a que funciona a 90 dB y puede llegar a ser molesto, incluso peligroso para el usuario en un cuarto cerrado como lo es un cuarto de control.

|    |    |    |            |    |
|----|----|----|------------|----|
| LR | LV | LA | VENTILADOR | AS |
|----|----|----|------------|----|

Figura 48. Respuesta del Modo Test

La función de LA es enviar pulsos con la secuencia mostrada en la *Figura 29*, pero ésta sólo se activa cuando se va a identificar la carga que está causando la falla a tierra.

Cuando se presione el botón de Reset, las salidas son como se ve en la *Figura 49*. LV se activa porque está en modo normal el sistema y las salidas relacionadas a la falla a tierra son desactivadas.

|    |    |    |            |    |
|----|----|----|------------|----|
| LR | LV | LA | VENTILADOR | AS |
|----|----|----|------------|----|

Figura 49. Respuesta del Modo Normal

En general, el modo de prueba se utiliza para comprobar que las salidas del sistema funcionan correctamente cuando se suscita la falla y se pueden observar mediante las alarmas visibles y audibles. La pantalla tendrá una visualización parecida a la que se muestra en la *Figura 50*. En la que se muestran los parámetros previamente programados y como característica, la corriente en el neutro es menor a la corriente programada, en este caso es cero.

|         |         |
|---------|---------|
| 1500 mA | 0.25 s  |
| 1.00s   | 0.00 mA |

Figura 50. Pantalla Normal del Modo Test

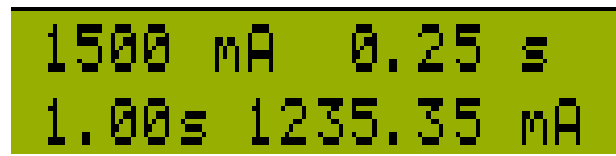
#### 4.3.2 Validación del modo *analógico simulado*.

A diferencia del modo de prueba, el modo analógico tendrá una corriente en el neutro igual o mayor a la programada por el usuario. Para la validación se consideraron algunos ejemplos que



a continuación se citan. Cabe mencionar que para lograr la simulación del monitor de falla a tierra, se utilizó el simulador de circuitos ISIS. Para simular el sensor de corriente, se colocó una fuente de tensión variable, de tal manera que pueda simular el funcionamiento del sensor, es decir que varíe de 0-5 VCD.

Como primer ejemplo se consideró una intensidad eléctrica de 1.5 A. El display muestra que se ha configurado el dispositivo para sensar 1.5 A, con un  $t_d = 250\text{ms}$  y un  $t_f = 1\text{s}$  (Ver *Figura 50*). Como se mencionó anteriormente, la única diferencia de respuesta visible del sistema es la corriente en el neutro, en este caso que es simulado, la variación de tensión en la entrada. Cuando ésta no se rebasa, se mostró la misma respuesta que la *Figura 49* y en el LCD se visualizó el siguiente mensaje de la *Figura 51*. Como se puede observar, la corriente en el neutro es menor a la programada y por esa razón permanece el sistema en modo normal, sin falla a tierra.



*Figura 51.* Corriente en el Neutro del Modo Analógico

Cuando la corriente va subiendo de intensidad por cuestiones físicas o eléctricas del mismo sistema eléctrico, puede que se alcance un valor superior o igual al programado, en cuyo caso las salidas visibles son las mismas que las mostradas en la *Figura 48*. La respuesta obtenida en el simulador ISIS<sup>8</sup>, se muestra en la *Figura 52*. Una vez que el valor de corriente en el neutro es alcanzada por la falla, el prototipo de relevador de falla a tierra tendrá que verificar y esperar el  $t_d$  y si al termino del  $t_d$  la corriente sigue siendo igual o mayor a la corriente programada, en este caso 250 ms, el sistema entra en el modo de falla a tierra y de la misma forma se visualiza en el display.

En la *Figura 52* se muestran los medidores del temporizador para 250 ms y se observó que estaban dentro del margen de tolerancia del 10% de error, al igual que 1 s para el tiempo de

---

<sup>8</sup> Intelligent Schematic Input System (Sistema de Enrutado de Esquemas Inteligente). Programa de diseño y simulación electrónica desarrollado por LabCenter Electronics.

pulsación. LV apagado, LR encendido, ventilador funcionando, alarma sonora encendido pero está activado el sw silenciar, por lo que no se escuchara por ahora. LA también está funcionando con el efecto flicker con el tf programado.

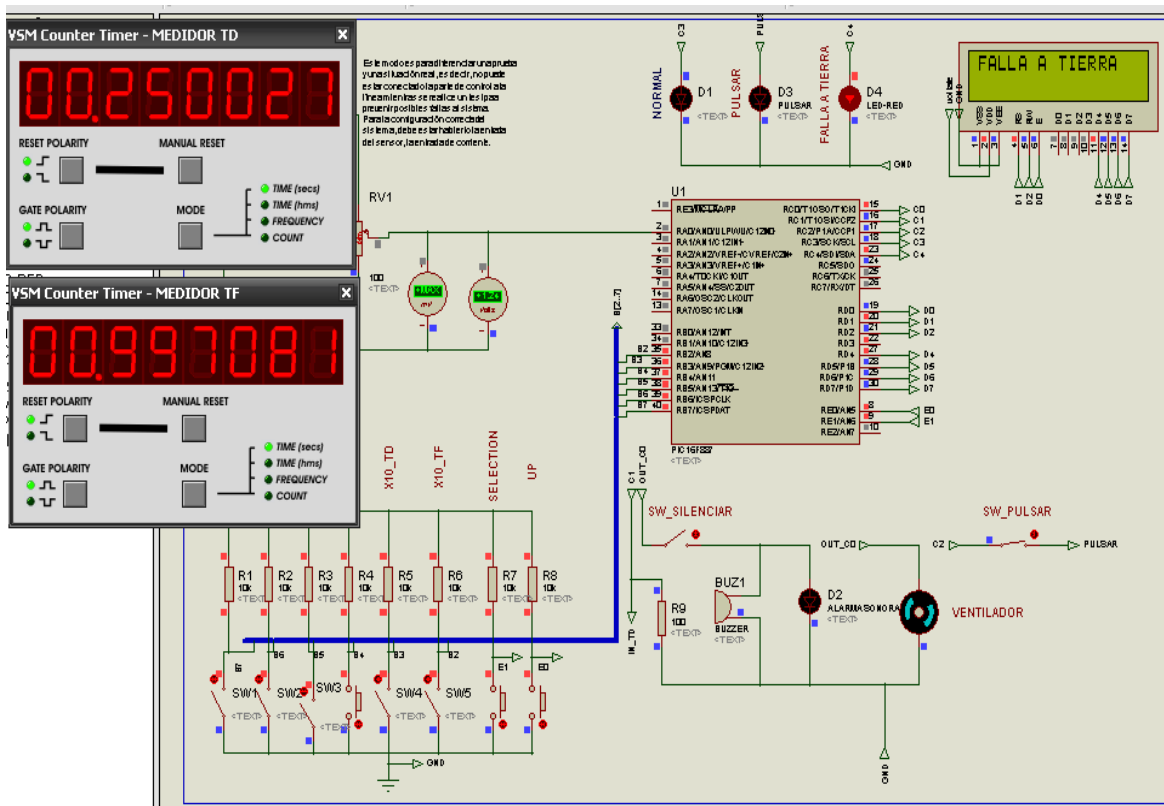


Figura 52. Falla a Tierra Simulada

### 4.3.3 Validación del modo *analógico real*.

Para esta prueba se consideró una corriente de 1 y 5 A. con un tiempo instantáneo ( $t_d=0$  s) y el tiempo de pulsos permanece en 1 segundo en ambos casos. También se hizo uso inyector de corriente GDJB-II, el cual fungió como una fuente de intensidad eléctrica variable, en otras palabras, sustituyó al transformador que se deseaba proteger de una falla a tierra.

En terminos de señales, en la entrada del sistema hay una señal senoidal correspondiente a la corriente que fluye por el neutro y se pretende obtener una señal de corriente directa variable de 0- 5V, en la Figura 53, se muestran dichas señales. De lado izquierdo se observa claramente la señal senoidal desde su estado inicial cero, está señal, como se menciono anteriormente, tiene los mismos parámetros de una señal RMS. En esta misma imagen (lado izquierdo), se observa que hay una señal que se aproxima a ser constante, su salida es similar a una señal de tipo rampa hasta alcanzar su valor máximo en un tiempo de 820 ms(lado derecho), que es cuando alcanza el 90 % del valor final de la respuesta. De esta figura se pudo obtener información vital del sistema, como el tipo de respuesta que presenta que es aproximada a un sistema de primer orden debido al filtro que ocupa el transductor de corriente y la salida es muy próxima a lo que se especifica en la Tabla 6. Si la entrada es de 1 A, la salida es aproximadamente 0.5 Vcd. El ocupar un filtro de primer orden está caracterizado en esta respuesta por el tiempo en que tarda en responder el sistema, lo que suponía algo indeseable por estar muy por encima de las especificaciones de diseño al tener un tiempo instantaneo de 800 ms pero a su vez resultó tener una respuesta muy estable como una señal pura de cd.

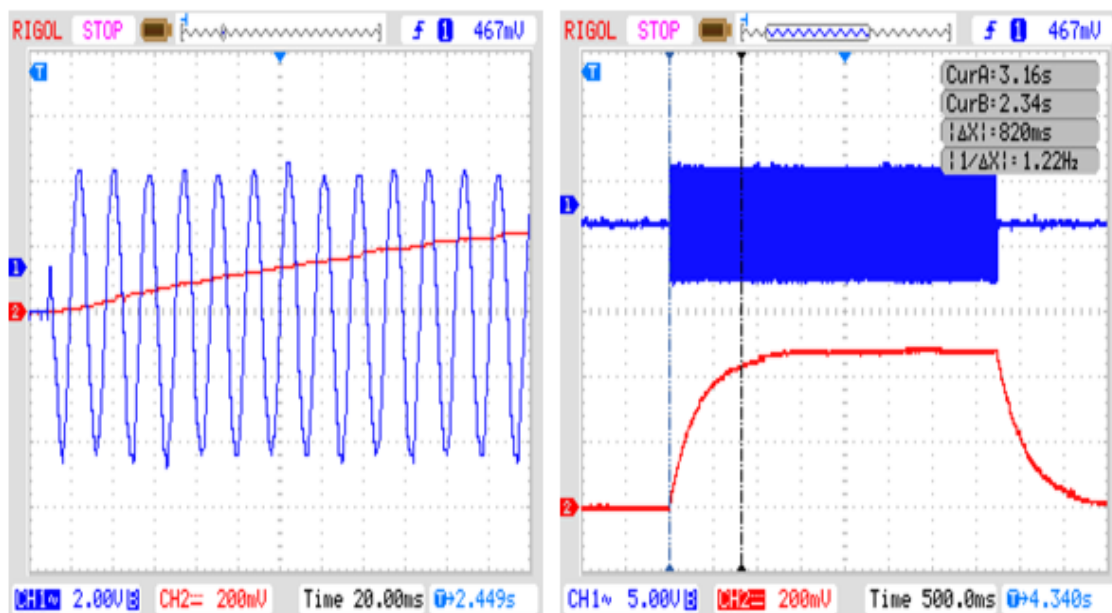


Figura 53. Respuesta del Sistema a 1 Ampere

La respuesta a 5 amperes debería suponer una respuesta similar a la que se obtuvo a 1 A y en efecto, es similar, pero la respuesta de corriente directa empieza a presentar un ligero incremento del voltaje de rizo como se observa en la Figura 54 (lado derecho). La respuesta sigue siendo similar a la de un sistema de primer orden dado que la topología del transductor no ha cambiado. El impacto que tendrá este incremento del voltaje de rizo se refleja directamente en la estabilidad de la lectura en el LCD y la interferencia que puede llegar a tener en corrientes cercanas a este valor pero que se considera aceptable dado que 5 A es el rango máximo. El tiempo de respuesta es similar a 1 A. de 800 ms que representa un 90 % del valor máximo de la señal de corriente directa, que en este caso es de 2.5 V.

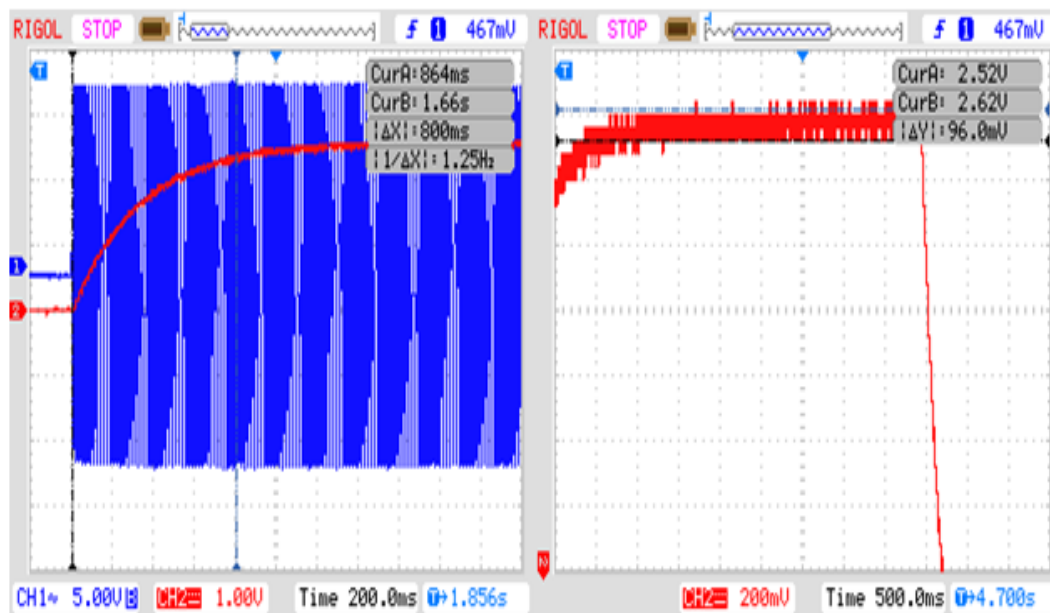


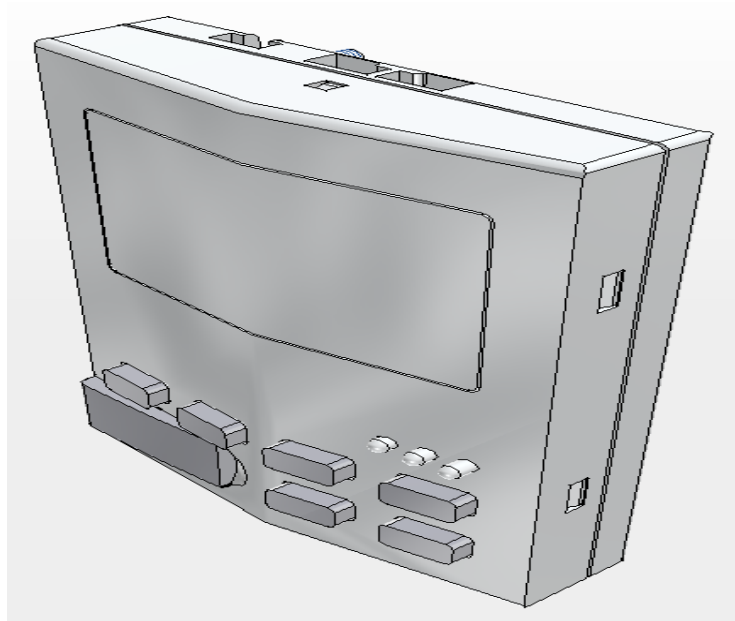
Figura 54. Respuesta del Sistema a 5 Amperes

Para agregar las salidas auxiliares, se consideró colocar un relevador de contactos N.C y N.A para cumplir con las especificaciones del diseño. La activación de este relevador es en paralelo con LR.

#### 4.3.4 Modelado de estructura física

Una parte primordial de un diseño es la parte de la presentación final, lo que involucra no solo la funcionalidad sino su estructura física, la cual debe ser tan robusta como lo exija el entorno donde se colocará de tal modo que pueda proteger la parte interna y a la vez que resulte atractivo para el cliente final.

El prototipo final tiene un tamaño máximo de 170x150x100 mm, mismas que se pueden reducir con otro tipo de elementos electrónicos, en específico con dispositivos de montaje superficial. En GRG Protecciones se tiene la idea de montar las placas de PCB en un gabinete parecido al que se muestra en la Figura 55, el cual es un panel de operador para motores<sup>9</sup>.



*Figura 55.* Monitor de Control con LCD

El panel de operación se maneja mediante botonería y puertos por donde se puede programar o comunicar los dispositivos internos que constituyen el control de motor.

---

<sup>9</sup> Formato CAD cortesía ABB Control.

# Conclusiones

A lo largo del proceso de diseño se presentaron diversas situaciones de las cuales se puede hacer un recuento para próximos productos en serie o bien algún producto con características diferentes. A pesar de que este monitor tuvo una respuesta del transductor demasiado lenta para los objetivos que se perseguían, se concluyó con éxito ya que el resto de las etapas ha funcionado de una forma bastante aceptable y misma que fue vista y aprobada por GRG Protecciones para continuar en la mejora de este proyecto.

En la presentación de esta primera etapa del proyecto se hicieron algunas propuestas como la de reducir el tiempo de respuesta del sistema. Para esta respuesta se observó que debe tener un equilibrio entre la respuesta del sistema en corriente directa y el nivel de filtrado que tenga al existir una corriente en el neutro. Una respuesta demasiado filtrada como la que se mostró en la Figura 53 ralentiza la respuesta del sistema, mientras que una poco filtrada, no puede ser leída correctamente por el ADC de un microcontrolador.

La elección del microcontrolador se puede modificar en todo sentido, es decir, se puede cambiar por alguno más sencillo si se decide tomar de manera independiente una lectura de la corriente por medio de un ADC externo de mayor resolución y dejar que un circuito se encargue de administrar o controlar las salidas y entradas del sistema. En cuanto al almacenamiento de datos en la memoria RAM, se puede realizar 10000 veces esta acción, es decir, que se puede programar el monitor de falla a tierra esta cantidad de veces. Las consideraciones de tipo de botonería a usar es importante debido a que se someterá a una humedad bastante alta, por lo que se requiere una protección de entrada IP68 que es hermético al polvo y a prueba de agua.

El uso de una interrupción en el programa es menester debido a que un programa extenso va acumulando pequeños retardos en su desarrollo, por lo que al llegar al punto donde se requiere un retardo determinado, este se verá influenciado por el determinado más lo acumulado a lo largo del programa. Otro aspecto de porque es importante utilizar una interrupción es porque una interrupción anda *monitoreando* el programa cada cierto tiempo determinado, por lo regular cada 6 microsegundos, lo que permite reaccionar más rápido al sistema debido a que cuando surja la falla a tierra, la respuesta será instantánea y no tendrá que esperar a que termine el programa o la rutina que estaba ejecutando.

Las pruebas de tiempo realizadas con el inyector de corriente GDJB-II, tanto en el modo de Prueba como en el modo Analógico, resultaron casi perfectas, con un error de 0.5%. El porcentaje de error para Td resulta vital para el funcionamiento correcto del sistema por la razón de que un excesivo crecimiento de la corriente de falla puede poner en riesgo al monitor de falla a tierra así como a las cargas que estén aguas abajo del transformador de alimentación del complejo industrial debido al calentamiento que se puede presentar en el que contiene a las resistencias de HRG. Cabe aclarar que si bien, la respuesta debe estar dentro de los parámetros de diseño, no resulta útil este relevador para la prevención de arco eléctrico en tal caso es necesario otro dispositivo con características más específicas para la prevención, principalmente en la respuesta que es alrededor de los 15 microsegundos.

Finalmente se concluyó que éste monitor de falla a tierra puede ser usado para corrientes de 0.1 a 5 A, siempre y cuando la respuesta de tiempo instantáneo sea de 2 segundos, lo cual podría ser una desventaja para determinados sistemas que buscan una respuesta más rápida. Si se consideran estas observaciones importantes, el sistema resulta confiable para el objetivo principal que es el de mantener un suministro de energía eléctrica sin interrupciones en áreas donde los procesos no pueden ser interrumpidos.



# Bibliografía

- ABB. (2013). *Ultimos Desarrollos en Protección ante Fallas Eléctricas y Sobretensiones*. Obtenido de [http://www02.abb.com/global/boabb/boabb011.nsf/0/d49ef0e966024afcc1257b870056a78e/\\$file/ABB+-+Presentacion+Falla+a+Tierra+-+Bolivia+-+Mayo+2013+A+Tolcachier.pdf](http://www02.abb.com/global/boabb/boabb011.nsf/0/d49ef0e966024afcc1257b870056a78e/$file/ABB+-+Presentacion+Falla+a+Tierra+-+Bolivia+-+Mayo+2013+A+Tolcachier.pdf)
- Aerssens, M., & Gusarov, A. (2011). *Faraday effect based optical fiber current sensor for tokamaks*. Obtenido de IEEE Xplore: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6172868>
- CCS. (Mayo de 2015). *CCS*. Obtenido de CCS Downloads: <http://www.ccsinfo.com/>
- CFE. (2010). *Generalidades Instalaciones Aéreas en Media y Baja Tensión*. Obtenido de Comisión Federal de Electricidad CFE: [http://www.cfe.gob.mx/negocio/4\\_Informacionalcliente/Lists/Normas%20de%20distribucion/Attachments/2/Generalidades.pdf](http://www.cfe.gob.mx/negocio/4_Informacionalcliente/Lists/Normas%20de%20distribucion/Attachments/2/Generalidades.pdf)
- Comformity Services. (2007). *Ground Fault Protection Testing*. Obtenido de [http://www.emersonnetworkpower.com/documentation/en-us/services/ers/documents/erseti\\_allar0407e\\_05-yt-02.pdf](http://www.emersonnetworkpower.com/documentation/en-us/services/ers/documents/erseti_allar0407e_05-yt-02.pdf)
- EPEC. (2006). *historia La historia de la electricidad*. Recuperado el 17 de Diciembre de 2014, de EMPRESA PROVINCIAL DE ENERGÍA DE CÓRDOBA: <http://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/historia.pdf>
- Floyd, T. L. (2001). *Dispositivos Electrónicos*. México, D.F: Editorial Limusa.
- GE Energy. (2012). *Protección de Falla a Tierra*. Obtenido de <http://apps.geindustrial.com/publibrary/checkout/LAPL0079?TNR=Articles|LAPL0079|generic>
- Guirado, R., Asensi, R., & Jurado, F. (2006). *Tecnología Eléctrica*. Madrid: McGraw-Hill.
- Hyde, J., Regué, J., Cuspina, A. (1997). *Control Electronemático y Electrónico*. México, DF: Alfaomega.

- IEEE. (1996). *IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. New York: IEEE.
- IEEE. (2006). *IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit currents in Industrial and Commercial Power Systems*. New York: IEEE.
- Johnson, C. D. (2000). *Process Control Instrumentation Technology*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Land, H. B., Eddins, C. L., & Klimek, J. M. (2004). *Land Evolution of Arc Fault Protection Technology at APL*. Obtenido de Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory: <http://www.jhuapl.edu/techdigest/TD/td2502/Land.pdf>
- Merlin Gerin. (2003). *Sepam Protección y Control*. Obtenido de Schneider-Electric: [http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER\\_ELECTRIC/content/live/FAQS/161000/FA161875/es\\_ES/Sepam%20S20%20&%20S40%20\(CatalogoESP%202002\).pdf](http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/161000/FA161875/es_ES/Sepam%20S20%20&%20S40%20(CatalogoESP%202002).pdf)
- Neria, F. (2010). Lo que usted debe saber acerca de la Falla a Tierra. *ElectriQO*, 12-17.
- NOM. (2012). *NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012 Instalaciones Eléctricas (utilización)*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: [www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5280607&fecha=29/11/2012](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5280607&fecha=29/11/2012)
- Pérez, J. C. (2007). *inicio Sistema Eléctrico Industrial*. Obtenido de Sistema de Información de Eficiencia Energética y Energías Alternativas: <http://www.si3ea.gov.co/Eure/8/inicio.html>
- Pérez, L. (1999). *ntp\_400*. Obtenido de Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo: [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp\\_400.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_400.pdf)
- Rosales, I., Robles, E., & López, J. (2003). *14 Aterrizamiento de Los Equipos de Potencia*. Recuperado el Diciembre de 2014, de Instituto de Investigaciones Eléctricas: <http://www.iie.org.mx/gee/arti/14.pdf>

Tutoriales PIC. (2015). *picferalia.blogspot*. Obtenido de Conversor ADC:  
<http://picferalia.blogspot.mx/2012/07/conversor-adc.html>

# Glosario

**ADC**

Analog-to-Digital Converter (Convertidor Analógico Digital). Es un dispositivo electrónico capaz de convertir una señal analógica, ya sea de tensión o de corriente, en una señal digital.

**Aguas abajo**

Tomando un punto de referencia fijo de un sistema eléctrico, aguas abajo hace referencia a un punto por debajo de este punto, en sentido del flujo de corriente eléctrica.

**Aguas arriba**

Toma un punto de referencia fijo de un sistema eléctrico, aguas arriba es hacia o más cercano a éste punto de referencia o fuente.

**Alta tensión**

Sistemas eléctricos en donde el nivel de tensión es superior a 35 KV a 220KV.

**Arco eléctrico**

Es la descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial colocados a baja presión o al aire libre.

**Baja tensión**

Sistemas eléctricos en donde el nivel de tensión es menor a 1000 Volts.

**Banco de Resistencias**

Un banco de resistencias es un conjunto de elementos resistivos(resistencias) dispuestos en diferentes arreglos ya sea en serie, paralelo o una combinación de ambos para aplicaciones industriales generalmente para alta potencia, como control de motores, generadores, arranque, sub estaciones, transportes eléctricos entre otros.

**Birrefringencia Circular**

Fenómeno por el que una sustancia transmite la luz polarizada circularmente hacia la derecha, a diferente velocidad que hacia la izquierda. La birrefringencia circular depende de la forma en la que interacciona el campo electromagnético.

**Carga capacitiva**

Cualquier conductor que esté separado por un material aislante (incluido el aire) constituye un condensador o una carga capacitiva. De ésta manera es como siempre existe un acoplamiento

capacitivo entre los conductores de línea del sistema y también entre conductores de línea y tierra.

**CCM**

CCM (Siglas referentes a Cuarto de Control de Motores) es un tablero que alimenta, controla y protege circuitos cuya carga esencialmente consiste en motores que usan contactores o arrancadores como principales componentes de control.

**Corriente capacitiva**

Es la intensidad eléctrica que fluye a través de una carga capacitiva.

**Corriente nominal**

Es la corriente que se debe suministrar para que una unidad funcione en su punto óptimo de rendimiento.

**Cortocircuito**

Aumento brusco de la intensidad eléctrica de una instalación por la unión accidental o intencional de dos conductores de distinta fase.

**Costa afuera**

Explotación de los hidrocarburos fuera de la costa.

**Disyuntor**

Un interruptor diferencial, también llamado disyuntor por corriente diferencial o residual, es un dispositivo electromecánico que se coloca en las instalaciones eléctricas con el fin de proteger a las personas de las derivaciones causadas por faltas de aislamiento entre los conductores activos y tierra o masa de los aparatos.

**Falla a tierra**

Es una conexión indeseada entre los conductores de red y tierra.

**Falla eléctrica**

Anormalidad del sistema que causa variaciones en las magnitudes de voltaje, corriente y frecuencia.

**Falla monofásica**

Conocido como cortocircuito monofásico o como falla a tierra, la cual se define como un contacto no intencional entre alguna de las fases y la malla de tierras.

**Falla por arco**

Es una falla eléctrica generada por un arco eléctrico, la cual tiene la característica de suceder entre dos conductores cercanos pero que no se tocan en contacto directo o físico.

**Falla sólida**

Es un cortocircuito que se presenta cuando los conductores (línea, neutro o tierra) están conectados entre sí, presentando una impedancia cero en dicha conexión por lo que se obtiene la condición máxima de corriente máxima.

**Falla trifásica**

Es una falla eléctrica en la que se ven involucrados los tres conductores (sistemas trifásicos) se mantienen físicamente juntos con una impedancia cero entre ellos.

**IEEE**

Corresponde a las siglas de The Institute of Electrical and Electronics Engineers, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, una asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización, entre otras cuestiones relacionadas en el área eléctrica y electrónica.

**Inducción electromagnética**

La inducción electromagnética consiste en obtener energía eléctrica a partir de variaciones de un flujo magnético.

**Interruptor termomagnético**

Es un elemento de protección contra cortocircuitos y sobrecargas en el consumo eléctrico. Su función principal es prevenir incendios.

**IP**

Ingress Protection (IP) es el grado de protección proporcionado por las envolventes contra agentes externos de un dispositivo, tales como polvo, agua, cuerpos sólidos, etc.

**Media tensión**

Sistemas eléctricos en donde el nivel de tensión está en los rangos mayores de 1000 hasta 35000 Volts.

**Microcontrolador**

Es un circuito integrado que en su interior contiene una unidad central de procesamiento (CPU), unidades de memoria (RAM y ROM), puertos de entrada y salida y periféricos, las cuales están interconectadas.



**Monitor de falla a tierra**

Es un dispositivo electrónico que monitorea una corriente determinada en el neutro.

**Neutro flotado**

Es cuando un sistema eléctrico en configuración estrella, no tiene el neutro conectado a tierra.

**Polarización**

Polarizar un transistor significa fijar las tensiones y las corrientes de modo que tomen un determinado valor, al cual le corresponde en el plano de las características un punto Q bien definido, denominado punto corte o de saturación del circuito.

**Potencia nominal**

Potencia máxima que soporta un dispositivo para operar en condiciones normales.

**Protección Básica**

Es la protección base con la que cuenta un equipo correctamente instalado, es decir, cuenta con una tierra conectada al gabinete o parte metálica con el fin de drenar la corriente de falla por éste conductor.

**Protección residual**

Es un sistema que sensa corrientes residuales. Usado normalmente en sistemas de 3 fases 4 hilos.

**Puesta a tierra**

También conocida como conexión a tierra, se define como la conexión de un conductor, ya sea de manera intencional o accidental, entre un circuito o equipo eléctrico y la tierra o algún cuerpo que sirva como tierra con capacidad para conducir una corriente de falla probable.

**Relevador de corriente.**

Es un tipo de relé de protección que funciona cuando la corriente de carga excede un valor determinado. El tiempo de respuesta puede ser instantáneo o bien con un tiempo definido. El número de dispositivo asignado por la norma es ANSI50/51.

**Relevador de falla a tierra**

El relevador de falla a tierra detecta la salida del TC que se utiliza como sensor cuando ocurre una falla a tierra, y ya sea instantáneamente o después de un cierto retardo, cierra un circuito que a su vez abre el interruptor de un circuito.

**Resistencia de arco**

Es la oposición a una formación de arco eléctrico en función del aislante de un conductor eléctrico y su nivel de tensión, siendo determinante éste último.

**Retrofit**

Técnica de renovación de instalaciones, equipo, etc.

**Selectividad**

Es la función de elegir adecuadamente un dispositivo en función de los parámetros que se buscan como tiempo o corriente.

**Sensor de corriente**

Es el elemento que se encuentra en contacto directo con la magnitud que se va a evaluar y sufre cambios en sus propiedades con las que va a sensar dicha corriente, en este caso el campo magnético.

**Sensor no invasivo**

Es aquel sensor que no interfiere físicamente en la trayectoria del conductor, es decir, no se tiene que abrir para ser sensado.

**SFR**

Special Function Registers (SFR). Es el área destinada a registros especiales de un microcontrolador. No puede ser usada para almacenar datos de memoria, es exclusiva para correcto funcionamiento del microcontrolador.

**Sistema aterrizado**

Es la conexión de los dispositivos a tierra mediante las diferentes técnicas de puestas a tierra.

**Sistema de puesta a tierra por alta resistencia (HRG)**

Es la conexión de una resistencia entre el neutro y tierra para rangos menores a 10 Amperes. Recomendada para sistemas de baja tensión.

**Sistema de puesta a tierra por baja resistencia**

Es la conexión entre el neutro y la tierra del sistema eléctrico, para corrientes de 50 a 400 Amperes. Se encuentran comúnmente en los sistemas de media tensión.

**Sistema de resistencia a tierra**

Es un método de puesta a tierra mediante una resistencia. Ésta resistencia está conectada entre el neutro del secundario del transformador y la toma a tierra.

**Sobrecarga**

Es la acción de exceder la capacidad de carga de un nominal de un conductor y es sobrepasada su capacidad de conducción.

**Sobretensión**

Es un descarga alta, rápida y pasajera de tensión eléctrica en un circuito eléctrico.

**Termocupla**

Son sensores de temperatura eléctricos. Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo, al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera una tensión muy pequeña, del orden de los mili volts el cual aumenta con la temperatura.

**Tierra flotante**

Es cuando un sistema no tiene conexión a tierra.

**Transductor de corriente**

Es un dispositivo que tienen la misión de traducir o convertir la señal física en otra distinta entendible por el sistema, es decir convierte una señal no interpretable por el sistema en otra interpretable por dicho sistema. Un transductor suele incluir al sensor.

**Transformador de corriente**

También referenciado como T.C, es un dispositivo que da una corriente menor proporcional a una entrada de mayor corriente. Típicamente la corriente del secundario es de 1 o 5 A. Su función principal son dos, transformar la corriente y aislar los instrumentos de protección y medición conectados a los circuitos de alta tensión.

**Transitorios**

Son incrementos de tensión y/o corriente con magnitudes de hasta miles de volts y amperes que se transmiten a través de los elementos de un sistema eléctrico en alta, media y baja tensión.

# **Anexos**

Los anexos mencionados a lo largo de este reporte de aplicación de conocimientos, se encuentran en el disco anexo. En este disco se encuentra una carpeta general llamada *Anexos*.

Dentro de ésta se encuentran:

- Anexo A: Contiene información adicional del sensor i-Snail
- Anexo B: Contiene información del amplificador Operacional
- Anexo C: Contiene información del Microcontrolador
- Anexo D: Contiene información del LCD
- Anexo E: Contiene información transistor utilizado en el bloque de potencia