

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**DISEÑO DE SIMULADOR DE FALLAS DE LÍNEAS ELÉCTRICAS  
PARA EL ANALIZADOR TRIFÁSICO FLUKE 434.**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PRESENTA:  
ING. LUIS ANTONIO MURILLO OSORIO**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ**



"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

Cd. Madero, Tamps., 01 de Diciembre de 2017

**OFICIO No.:** U2.130/17  
**ÁREA:** DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
**ASUNTO:** AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

**C. ING. LUIS ANTONIO MURILLO OSORIO**  
**NO. DE CONTROL G94070483**  
**PRESENTE**

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
SECRETARIO :	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
VOCAL :	M.C. HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
SUPLENTE :	M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
DIRECTOR DE TESIS :	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

**"DISEÑO DE SIMULADOR DE FALLAS DE LÍNEAS ELÉCTRICAS PARA EL ANALIZADOR TRIFÁSICO FLUKE 434"**

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta, esperando que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

**ATENTAMENTE**  
"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"®

**DRA. ADRIANA ISABEL REYES DE LA TORRE**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS**  
**DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



c.c.p.- Archivo  
Minuta

AIRT 'RCG'mé.cda'



Ave. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz Col. Los Mangos, C.P. 89440 Cd. Madero, Tam.  
Tel. (833) 357 48 20. e-mail: itcm@itcm.edu.mx  
www.itcm.edu.mx



## **Agradecimientos:**

Quiero dar las gracias a las siguientes personas que directamente e indirectamente participaron en este proyecto de tesis y de vida:

- A Dios por darme vida.
- A mi esposa Juanis por darme ánimos.
- A mi hija Denisse por su cariño.
- A mis padres.
- Al Dr. Gastón Hernández Martínez por su confianza en mi persona para este proyecto.
- Al Dr. Pedro Martín García Vite por su apoyo con el convertidor de potencia para este proyecto.
- A todos los maestros del posgrado por permitirme entrar a sus clases.
- A mis compañeros de posgrado por su amistad y sus conocimientos.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada.

## **Resumen:**

Diseño de simulador de fallas de líneas eléctricas para el analizador trifásico Fluke 434.

Esta tesis propone el diseño de un simulador de fallas de líneas eléctricas que permita recrear una falla eléctrica de forma segura, utilizando voltajes seguros para los estudiantes, profesores etc.

Y este simulador se utiliza en conjunto con el analizador trifásico Fluke 434 para mostrar los oscilogramas de voltajes y corrientes. La idea es que las fallas eléctricas se puedan repetir las veces que sean necesarias sin perder la calidad de los oscilogramas.

## **Abstract:**

Power line fault simulator design for the Fluke 434 three-phase analyzer.

This thesis proposes the design of a power line fault simulator that allows to recreate an electrical fault in a safe way, using safe voltages for students, teachers, etc.

And this simulator is used in conjunction with the Fluke 434 three-phase analyzer to display the oscillograms of voltages and currents. The idea is that electrical faults can be repeated as many times as necessary without losing the quality of the oscillograms.

# Índice

	<i>Página</i>
Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
Índice general	V
Lista de Figuras	VII
Lista de Tablas	X
<b>Capítulo 1: Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Hipótesis	3
1.6. Alcances y limitaciones	3
1.6.1. Alcances	3
1.6.2. Limitaciones	4
<b>Capítulo 2: Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Sistema trifásico	6
2.1.1. Corriente trifásica	6
Naturaleza y aplicaciones	6
2.2. Fallas eléctricas	7
2.2.1. ¿Qué es una falla eléctrica?	7
2.2.2. Tipos de fallas eléctricas	8
2.3. Fallas de línea a tierra	10
2.3.1. Falla de línea a tierra (cortocircuito monofásico a tierra)	11
2.4. Equipos de medición de calidad de la energía	13
2.4.1. ¿Qué es la calidad de la energía?	13
2.4.2. Equipos para medición de calidad de la energía	14
Referencias	20
<b>Capítulo 3: Diseño del simulador</b>	<b>21</b>
3.1. ¿Cuál es la idea?	22
3.2. Tipo de microprocesador a utilizar	22

3.3.	Etapas de diseño	25
3.3.1.	Obtención de los oscilogramas de fallas	25
3.3.2.	Modificando los oscilogramas	26
3.3.3.	Simulador	26
3.4.	Modo de demostración del analizador Fluke 434	27
	Referencias	30
<b>Capítulo 4: Construcción del simulador</b>		<b>31</b>
4.1.	Software	32
4.2.	Hardware	45
4.2.1.	Simulador	45
4.2.2.	Analizador Fluke	48
4.3.	Diagrama de operación del simulador	51
4.4.	Desarrollo del simulador	53
	Referencias	71
<b>Capítulo 5: Resultados</b>		<b>72</b>
5.1.	Casos de estudio	73
<b>Capítulo 6: Conclusiones</b>		<b>81</b>
6.1.	Conclusiones	82
6.2.	Aportaciones	83
6.3.	Trabajos futuros	83
<b>Apéndice A Programas en MATLAB.</b>		<b>84</b>
<b>Apéndice B Código y diagrama del simulador.</b>		<b>97</b>

# Lista de Figuras

	<i>Página</i>	
Figura 2.1	Sistema de tres tensiones trifásicas	6
Figura 2.2	Oscilograma de falla de línea a tierra sostenida.	10
Figura 2.3	Falla de línea a tierra.	10
Figura 2.4	Red de secuencia	12
Figura 2.5	Analizador Fluke 434 con sus sondas de tensión y pinzas amperimétricas.	15
Figura 2.6	Vista superior del Analizador.	16
Figura 2.7	Técnico utilizando el analizador en campo	16
Figura 2.8	Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico.	17
Figura 2.9	Diagrama vectorial de un analizador correctamente conectado.	18
Figura 3.1	Arduino Nano.	23
Figura 3.2	Convertidor D/A AD5308.	24
Figura 3.3	Diagrama a bloques del simulador de fallas.	25
Figura 3.4	Modo demostración del analizador Fluke 434.	27
Figura 3.5	Pinza amperimétrica del analizador Fluke 434.	28
Figura 3.6	Selector de escalas de corriente de la pinza amperimétrica.	29
Figura 4.1	Red Tres Estrellas (TTE)-Teotihuacán (TTH) modelado en ATP-Draw.	32
Figura 4.2	Abriendo un archivo de oscilograma en ATPDraw.	33
Figura 4.3	Gráfica de voltajes por fase	33
Figura 4.4	Forma de exportar gráficas de ATPDraw a MATLAB	35
Figura 4.5	Gráfica de voltajes de ATPDraw en MATLAB	36
Figura 4.6	Gráfica de corrientes de ATPDraw en MATLAB	36
Figura 4.7	Voltajes en estado estable a 8 bits de resolución	38
Figura 4.8	Corrientes en estado estable a 8 bits de resolución	38
Figura 4.9	Voltajes de falla de línea a tierra simulada en ATPDraw-EMTP	39
Figura 4.10	Voltajes de falla de línea a tierra convertido a 8 bits en MATLAB	39
Figura 4.11	Corrientes de falla de línea a tierra simulada en ATPDraw-EMTP	40
Figura 4.12	Corrientes de falla de línea a tierra convertido a 8 bits en MATLAB	40
Figura 4.13	Voltajes de falla de doble línea simulada en ATPDraw-EMTP	41
Figura 4.14	Voltajes de falla de doble línea convertido a 8 bits en MATLAB	41
Figura 4.15	Corrientes de falla de doble línea simulada en ATPDraw-EMTP	42
Figura 4.16	Corrientes de falla de doble línea convertido a 8 bits en MATLAB	42
Figura 4.17	Voltajes de falla de triple línea simulada en ATPDraw-EMTP	43
Figura 4.18	Voltajes de falla de triple línea convertido a 8 bits en MATLAB	43
Figura 4.19	Corrientes de falla de triple línea simulada en ATPDraw-EMTP	44
Figura 4.20	Corrientes de falla de triple línea convertido a 8 bits en MATLAB	44
Figura 4.21	Tarjeta de desarrollo Arduino NANO	45
Figura 4.22	Palabra de 16 bits que recibe el convertidor AD5308	46
Figura 4.23	Convertidor AD5308 montado en una tarjeta convertidora	47
Figura 4.24	Conexiones entre Arduino NANO y el convertidor AD5308	47



Figura 4.25	Pantalla de inicio del analizador Fluke 434 y conexión en estrella	48
Figura 4.26	Teclas de funciones y botón “SETUP” del analizador Fluke 434	49
Figura 4.27	Pantalla “SETUP” y opciones en la parte inferior de la pantalla	50
Figura 4.28	Menú “SELECT FUNCTION” con la activación del modo “DEMO”	50
Figura 4.29	Diagrama de flujo del simulador de fallas	51
Figura 4.30	Montaje del Arduino NANO y el convertidor D/A	53
Figura 4.31	Señales generadas con el Arduino NANO y el convertidor AD5308	54
Figura 4.32	Tarjeta de desarrollo Arduino DUE	56
Figura 4.33	Señales senoidales defasadas 120° generadas con el Arduino DUE	57
Figura 4.34	Conexión de los botones de selección de falla en el Arduino DUE	58
Figura 4.35	Botones de selección de falla montados en la tablilla de experimentos	58
Figura 4.36	Convertidor de DC-DC modelo PEM1-S12-S12-S	59
Figura 4.37	Conexión del convertidor PEM1-S12-S12-S en fuente simétrica	60
Figura 4.38	Diagrama del circuito de amplificación para las señales de voltaje	61
Figura 4.39	Señal de voltaje visto en el analizador Fluke 434	62
Figura 4.40	Tablilla de experimentos con las 3 fases de voltajes	62
Figura 4.41	Señal trifásica en voltaje generada por el simulador	63
Figura 4.42	Oscilograma de voltajes de fase	64
Figura 4.43	Diagrama del circuito de amplificación para las señales de corriente	65
Figura 4.44	Señales de corriente vistas en el analizador Fluke 434	65
Figura 4.45	Oscilograma de falla de doble línea correspondiente a voltajes de fase	66
Figura 4.46	Oscilograma de falla de doble línea correspondiente a corrientes de fase	67
Figura 4.47	Vista superior del simulador de fallas de líneas eléctricas	67
Figura 4.48	Vista superior del simulador	68
Figura 4.49	Simulador de Fallas de Líneas Eléctricas conectado al analizador Fluke 434	69
Figura 4.50	Simulador de fallas con sus cables para voltajes y corrientes de fase	70
Figura 4.51	Vista posterior de analizador con los cables del simulador	70
Figura 5.1	Simulador de Fallas de Líneas Eléctricas con sus accesorios	73
Figura 5.2	Oscilograma de Falla de línea a tierra de voltajes de fase simulado en ATPDraw	74
Figura 5.3	Oscilograma de Falla de línea a tierra de voltajes de fase visto en el analizador	74
Figura 5.4	Oscilograma de Falla de línea a tierra en corrientes de fase simulado en ATPDraw	75
Figura 5.5	Oscilograma de Falla de línea a tierra de corrientes de fase visto en el analizador	75
Figura 5.6	Oscilograma de Falla de doble línea de voltajes de fase simulado en ATPDraw	76
Figura 5.7	Oscilograma de Falla de doble línea de voltajes de fase visto en el analizador	76
Figura 5.8	Oscilograma de Falla de doble línea de corrientes de fase simulado en ATPDraw	77
Figura 5.9	Oscilograma de Falla de doble línea de corrientes de fase visto en el analizador	77
Figura 5.10	Oscilograma de Falla de triple línea de voltajes de fase simulado en ATPDraw	78
Figura 5.11	Oscilograma de Falla de triple línea de voltajes de fase visto en el	78

Figura 5.12	analizador Oscilograma de Falla de triple línea de corrientes de fase simulado en ATPDraw	79
Figura 5.13	Oscilograma de Falla de triple línea de corrientes de fase visto en el analizador	79

# Lista de Tablas

		<i>Página</i>
Tabla 2.1	Especificaciones Técnicas del analizador Fluke 434.	19
Tabla 3.1	Especificaciones Técnicas del Arduino Nano.	23

# *Capítulo*

1

---

## **Introducción.**

## **1.1 ANTECEDENTES.**

El analizador de calidad de energía trifásico Fluke 434, ofrece una serie de potentes funciones para la comprobación de sistemas de distribución eléctrica. Algunas de estas funciones permiten obtener una visión general del funcionamiento del sistema eléctrico, mientras que otras le sirven para examinar detalles específicos.

El modelo Fluke 434 incorpora funciones adicionales como interarmónicos, transitorios, utilización de la energía, memoria adicional para almacenar pantallas y datos.

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

El laboratorio del área de maestría y de licenciatura cuentan con este analizador Fluke 434, pero no se tiene el entrenamiento adecuado que no ponga en riesgo al alumno y que no se produzcan daños al equipo.

Ante esta carencia, se propone crear un simulador de fallas de líneas eléctricas, para que los profesores tengan una herramienta que les permita enseñar y entrenar a sus alumnos a utilizar un analizador de este tipo, muy necesario en la industria, de forma segura.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN.**

Debido a lo peligroso que resulta operar sistemas eléctricos trifásicos, para monitorear la calidad de la energía. El poder generar fallas de líneas eléctricas trifásicas en un laboratorio presenta varios inconvenientes, entre ellas el manejar tensiones y corrientes que pueden provocar lesiones, daños permanentes o la muerte de quien o quienes estén operando el equipo sin la debida precaución.

También replicar las fallas de líneas puede resultar costoso y peligroso para las instalaciones del laboratorio.

## **1.4 OBJETIVOS.**

### **1.4.1 Objetivo general.**

Diseñar y construir un simulador de fallas de líneas trifásicas para utilizarlo con el analizador Fluke 434.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- a) Construir un simulador de fallas.
- b) Buscar la opción más adecuada para generar las señales de fallas.
- c) El prototipo permita simular las siguientes fallas:
  - 1. Falla de línea a tierra.
  - 2. Falla de dos líneas.
  - 3. Falla de tres líneas.

## **1.5 HIPÓTESIS.**

Es posible desarrollar un generador de fallas en líneas eléctricas simuladas para un analizador Fluke 434 para su correspondiente análisis.

## **1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES.**

### **1.6.1 Alcances.[1]**

Diseñar y armar un prototipo simulador de fallas de líneas eléctricas con componentes de uso comercial. Que cuente con un interruptor por cada tipo de falla de las antes mencionadas en el apartado 1.4.2.

Cada falla generada debe durar casi 50ms y restablecerse la señal trifásica de forma normal.

Se sustituirán las sondas de tensión y las pinzas amperimétricas ya que los voltajes que se utilizarán son muy pequeños, las escalas de las pinzas amperimétricas son de 10mV/A

para corrientes hasta 40A y de 1mV/A para corrientes hasta 400A, por lo tanto para el sensado de corrientes las pinzas amperimétricas solo inyectan al analizador 0.4V como máximo. El analizador tiene una función de demostración que permite manejar una sensibilidad máxima de 2 Vrms para utilizar un generador de prueba.

Por lo tanto para transferir las señales del simulador de fallas al Fluke 434 se utilizarán conectores banana para los voltajes y conectores BNC para las corrientes, ya que son los tipos de conectores que utiliza el analizador.

### **1.6.2 Limitaciones.**

Las señales a generar se van a escalar en valores por unidad (P.U.), ya que no podrá manejar altos voltaje y altas corrientes, que se generan en una falla eléctrica real. Por lo que solo se utilizará un voltaje máximo de 2 Vrms y en el sensado de corrientes, voltajes en el orden de los milivoltios para representar las corrientes, como se explicó previamente en la sección 1.6.1. El analizador se activará en el modo demostración para realizar este propósito.

# *Capítulo*

2

---

**Marco teórico.**



## 2.1 SISTEMA TRIFÁSICO.

### 2.1.1 CORRIENTE TRIFÁSICA.[2]

#### NATURALEZA Y APLICACIONES.

La tensión trifásica, es esencialmente un *sistema de tres tensiones alternas, acopladas*, (se producen simultáneamente las 3 en un generador), y *desfasadas 120° entre sí* (o sea un tercio del Periodo).

Estas tensiones se transportan por un sistema de 3 conductores (3 fases), o de cuatro (tres fases + un neutro). Por convención las fases se denominan A , B, C, y N para el conductor neutro si existe.

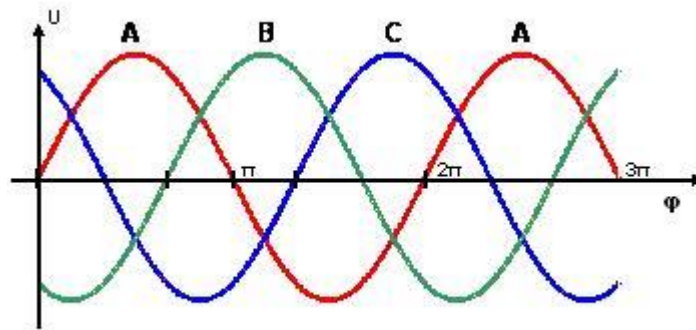


Fig. 2.1 Sistema de tres tensiones trifásicas

Este sistema de producción y transporte de energía, en forma trifásica, desde el generador a los receptores está universalmente adoptado, debido a que presenta economía en el material de los conductores, para la misma potencia eléctrica transmitida, y además permite el funcionamiento de motores eléctricos muy simples duraderos y económicos, de campo rotatorio, como los motores asíncronos de rotor en cortocircuito (motores de "jaula de ardilla"), que son los empleados en la mayoría de las aplicaciones de baja y mediana potencia.

Los receptores monofásicos, se conectan entre dos conductores del sistema de 3 o 4 conductores, y los motores y receptores trifásicos, a las 3 fases simultáneamente.

En el caso de un edificio de viviendas, por ejemplo, se reparten las cargas de cada planta entre las distintas fases, de forma que las 3 fases queden aproximadamente con la misma carga (sistema equilibrado)

Los transformadores para la corriente trifásica son análogos a los monofásicos, salvo que tienen 3 devanados primarios y 3 secundarios.

## **2.2 FALLAS ELECTRICAS.**

### **2.2.1 ¿Qué es una falla eléctrica?[3]**

Una falla es cualquier evento que interfiere con el flujo normal de corriente, colocando al sistema en un punto de operación fuera de lo normal.

La mayoría de las fallas dan origen a corrientes circulantes por trayectorias no previstas y de magnitudes elevadas. En sistemas de baja potencia y baja tensión, las fallas son provocadas generalmente por la pérdida del nivel de aislamiento eléctrico de los elementos activos. En los sistemas de alta tensión, la mayoría de las fallas son producidas por descargas atmosféricas que dan como resultado el flameo de aisladores y la aparición de nuevas rutas de corriente a través del aire ionizado. La elevada tensión de la descarga atmosférica crea caminos de aire ionizado entre los conductores de la línea de transmisión y la torre metálica, los cuales son visibles como arcos eléctricos. Estos se convierten en caminos entre el conductor y tierra. Una vez ionizado el aire, este se convierte en un camino de baja impedancia que continúa sirviendo de ruta alterna para la corriente eléctrica, aún después de desaparecer la sobretensión originada por la descarga atmosférica.

Las altas tensiones de las líneas de transmisión son incapaces de ionizar el aire y producir arcos, pero son suficientes para mantener el arco una vez que este existe. Por esta razón, estos arcos eléctricos, una vez formados, permanecen bajo condiciones normales de

operación y se hace necesario extinguirlos de alguna manera para recuperar el estado que el sistema tenía antes de la descarga atmosférica.

### **2.2.2 TIPOS DE FALLAS ELÉCTRICAS.[3]**

La experiencia muestra que entre el 70 y 80% de las fallas en las líneas de transmisión son fallas monofásicas a tierra (o línea a tierra).

Aproximadamente en el 5% de las fallas intervienen las tres fases con o sin tierra (fallas trifásicas simétricas).

Otras fallas son Línea - Línea (L-L) y Línea - Línea - Tierra (L-L-T). Además se podrán presentar las fallas serie como consecuencia de la operación inapropiada de los interruptores al no presentar un cierre simultáneo los tres polos quedando sin cerrar una o dos de las fases.

Las fallas también pueden presentarse por la rotura de uno o dos conductores activos. La sola pérdida de la trayectoria de corriente produce falla del sistema, la cual puede verse empeorada si el conductor hace contacto directo con tierra o con un elemento que esté en contacto con tierra, como por ejemplo la torre de transmisión.

Con excepción de las fallas trifásicas donde los tres conductores son afectados de la misma forma, todas las demás fallas dan origen a un desbalance entre las fases y se les denomina fallas asimétricas.

Las corrientes que fluyen en las diferentes partes de un sistema de potencia, inmediatamente después de que ocurre una falla, difieren de aquellas que fluyen unos ciclos después y antes de que los interruptores reciban la orden de suspender el flujo de corriente de la línea en ambos lados de la falla. Las corrientes que se observan durante el tiempo comprendido entre el momento en que ocurre la falla y el instante de tiempo en que se aísla la falla, difieren ampliamente de las corrientes que fluyen bajo condiciones normales de operación y de estado estable.

Dos de los factores de los que depende la selección apropiada de los interruptores de corrientes de cortocircuito son la corriente que fluye inmediatamente después de que la falla ocurre y la corriente que el interruptor debe interrumpir. En el análisis de fallas se calculan los valores de esas corrientes para los diferentes tipos de fallas en varios puntos del sistema. Los

datos que se obtienen de los cálculos de fallas sirven para determinar los valores de operación de los elementos que controlan los interruptores.

Las condiciones de cortocircuito son situaciones anormales e indeseables para el sistema, por lo tanto, deben prevenirse en lo posible y se deben controlar los niveles de cortocircuito resultantes, en el caso que estos aparezcan, para reducir sus efectos negativos sobre el sistema.

Entre los principales efectos de las corrientes de cortocircuito se encuentran las siguientes:

1. Corrientes de gran magnitud que producen:

a). Calentamiento por encima de lo normal en los elementos del sistema, el cual reduce su período de vida útil, por la disminución del nivel de aislamiento en los equipos (devanados, conductores, etc.). En algunas ocasiones producen la destrucción total del elemento.

b). Esfuerzos electromecánicos excesivos que pueden romper los aisladores de sujeción, o los conductores.

2. Caída de tensión que puede producir:

a). Desconexión de motores debido a la desconexión de contactores por causa del bajo voltaje que alimenta las bobinas.

b). Efecto inverso de sobretensión que se presenta en ciertos tipos de falla. Por ejemplo, en los cortocircuitos monofásicos a tierra, y dependiendo de la resistencia de puesta a tierra vista en el punto de falla, se pueden originar aumentos en las tensiones de las fases no falladas.

3. Aumento de la abertura angular que puede producir:

a). Pérdida de la estabilidad del sistema.

b). Pérdida del sincronismo entre los generadores del sistema que puede alterar las condiciones operativas del sistema.

También se deben tener en cuenta las consecuencias de los arcos eléctricos que pueden surgir durante un cortocircuito y su propagación.

### 2.3 FALLA DE LÍNEA A TIERRA.[4]

La falla de línea a tierra representa el 80% de las fallas en los sistemas eléctricos de potencia.

A continuación se presenta el oscilograma de una falla de línea a tierra, que es el tipo más común en los sistemas eléctricos de potencia.

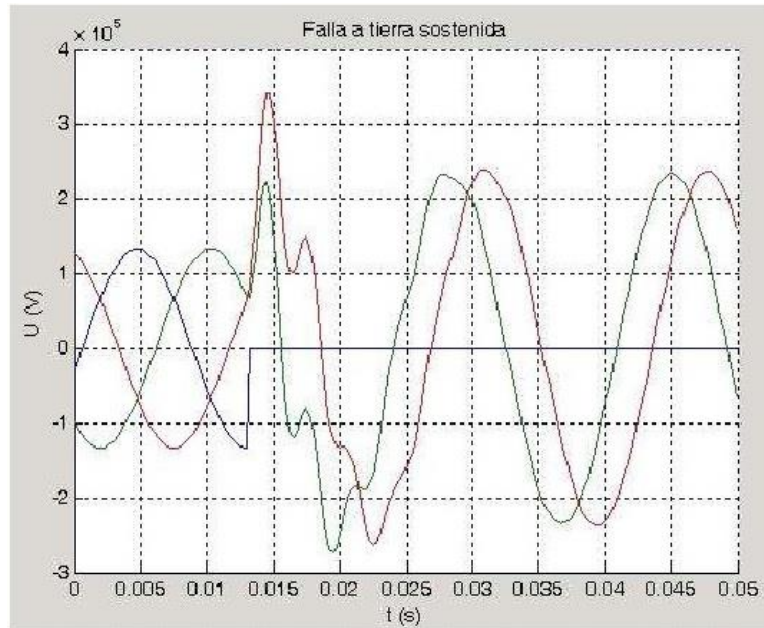


Fig. 2.2 Oscilograma de falla de línea a tierra sostenida

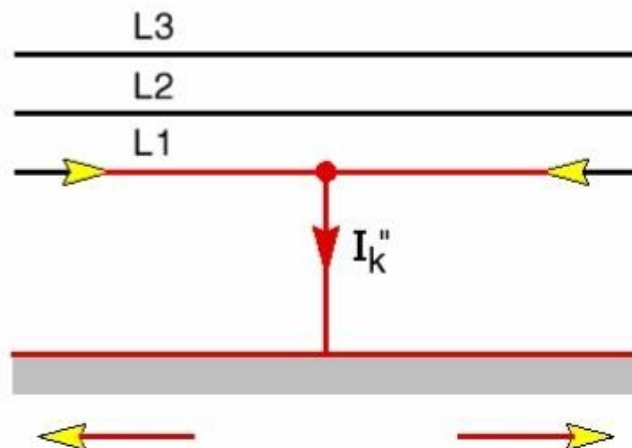


Fig. 2.3 Falla de línea a tierra.

### 2.3.1 Falla de línea a tierra (cortocircuito monofásico a tierra)[5][6]

Supongamos un generador con punto neutro a tierra en el que acontece una falla monofásica a tierra, por ejemplo en la fase L1 (fase A) como se muestra en la figura 2.3, los valores de condición en los terminales de falla son:

$$\mathbf{I_B} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{I_C} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{V_A} = \mathbf{0}$$

Aplicando estas condiciones terminales a las expresiones de los coeficientes del sistema de corrientes dadas y definiendo el factor de fase, que es un operador que al multiplicarlo por otro vector, origina un cambio en la fase del mismo, sin alterar el módulo, este factor es  $\mathbf{a} = 1 \angle 120^\circ$ :

$$\mathbf{I_{0A}} = 1/3 (\mathbf{I_A} + \mathbf{I_B} + \mathbf{I_C}) = 1/3 \mathbf{I_A}$$

$$\mathbf{I_{1A}} = 1/3 (\mathbf{I_A} + \mathbf{aI_B} + \mathbf{a^2I_C}) = 1/3 \mathbf{I_A}$$

$$\mathbf{I_{2A}} = 1/3 (\mathbf{I_A} + \mathbf{a^2I_B} + \mathbf{aI_C}) = 1/3 \mathbf{I_A}$$

Luego se cumple que:  $\mathbf{I_{0A}} = \mathbf{I_{1A}} = \mathbf{I_{2A}} = 1/3 \mathbf{I_A}$

**Ec.2.1**

De la 2ª Ley de Kirchhoff aplicada a las caídas de tensión en las distintas redes de secuencia, resulta:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V_{0A}} \\ \mathbf{V_{1A}} \\ \mathbf{V_{2A}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{E_{1A}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Z_0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z_1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Z_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I_{0A}} \\ \mathbf{I_{1A}} \\ \mathbf{I_{2A}} \end{bmatrix} \quad \text{Ec.2.2}$$

Aplicadas a este caso resulta:

$$\mathbf{V_{0A}} = - \mathbf{I_{0A}} \mathbf{Z_0} = - 1/3 \mathbf{I_A} \mathbf{Z_0}$$

$$\mathbf{V_{1A}} = \mathbf{E_{1A}} - \mathbf{I_{1A}} \mathbf{Z_1} = \mathbf{E_{1A}} - 1/3 \mathbf{I_A} \mathbf{Z_1}$$

$$\mathbf{V_{2A}} = - \mathbf{I_{2A}} \mathbf{Z_2} = - 1/3 \mathbf{I_A} \mathbf{Z_2}$$

Dado que  $\mathbf{V_A} = 0$ , resulta:  $\mathbf{V_{0A}} + \mathbf{V_{1A}} + \mathbf{V_{2A}} = \mathbf{0}$ . Entonces:

$$1/3 \mathbf{I_A} \mathbf{Z_0} + \mathbf{E_{1A}} - 1/3 \mathbf{I_A} \mathbf{Z_1} + - 1/3 \mathbf{I_A} \mathbf{Z_2} = \mathbf{0}, \text{ por lo tanto:}$$

$$\mathbf{I_A} = \frac{3 \mathbf{E_{1A}}}{\mathbf{Z_1} + \mathbf{Z_2} + \mathbf{Z_3}}$$

Luego las C.S. resultan:

$$\mathbf{I}_{0A} = \mathbf{I}_{1A} = \mathbf{I}_{2A} = 1/3 \mathbf{I}_A = \mathbf{E}_{1A} / (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0) \quad \text{Ec.2.3}$$

Las C.S. de las tensiones de fase serán:

$$\mathbf{V}_{1A} = \mathbf{E}_{1A} - \mathbf{Z}_1 / (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0) \mathbf{E}_{1A} = (\mathbf{Z}_0 + \mathbf{Z}_2) / (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0) \mathbf{E}_{1A}$$

$$\mathbf{V}_{2A} = - \mathbf{I}_{2A} \mathbf{Z}_2 = - \mathbf{Z}_2 / (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0) \mathbf{E}_{1A}$$

$$\mathbf{V}_{0A} = - \mathbf{I}_{0A} \mathbf{Z}_0 = - \mathbf{Z}_0 / (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0) \mathbf{E}_{1A}$$

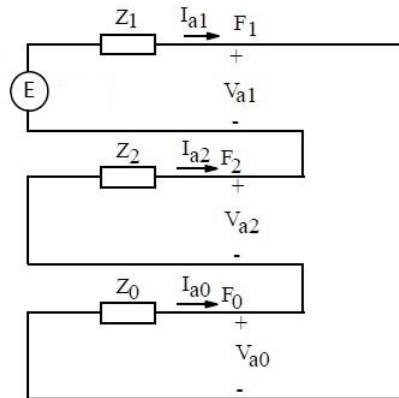
Dado que  $V_A = 0$ , las tensiones normales en las fases B y C serán:

$$\mathbf{V}_B = \mathbf{V}_{0A} + \mathbf{a}^2 \mathbf{V}_{1A} + \mathbf{a} \mathbf{V}_{2A} = - \mathbf{j} \sqrt{3} \mathbf{E}_{1A} (\mathbf{Z}_2 - \mathbf{a} \mathbf{Z}_0) / (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0)$$

$$\mathbf{V}_C = \mathbf{V}_{0A} + \mathbf{a} \mathbf{V}_{1A} + \mathbf{a}^2 \mathbf{V}_{2A} = \mathbf{j} \sqrt{3} \mathbf{E}_{1A} (\mathbf{Z}_2 - \mathbf{a}^2 \mathbf{Z}_0) / (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0)$$

Las ecuaciones [1] y [3] son las ecuaciones especiales para una falla línea - tierra, se utilizan junto a las ecuaciones [2] y las relaciones de las componentes simétricas, para determinar todas las tensiones y corrientes en la falla.

Si las tres redes de secuencia del generador se conectan en serie, como se ve en la figura 2.4, vemos que las corrientes y tensiones resultantes satisfacen las ecuaciones anteriores, puesto que las tres impedancias de secuencia están entonces en serie con la tensión  $E_{1A}$ .



**Fig. 2.4 Red de secuencia.**

Con las redes de secuencia así conectadas, la tensión en cada red de secuencia es la componente simétrica de  $V_A$  de tal secuencia.

La conexión de las redes de secuencia, tal como se ve en la figura 2.4, es un procedimiento conveniente de recordar para la resolución de una falla línea - tierra, ya que todas las ecuaciones necesarias pueden ser determinadas a partir de la conexión de la red de

secuencia. Si el neutro del generador no está a tierra, la red de secuencia cero está abierta y  $Z_0$  es infinita.

Como la ecuación [3], demuestra que  $I_{1A}$  es cero, cuando  $Z_0$  es infinita,  $I_{2A}$  e  $I_{0A}$  tienen que ser cero también. Por lo tanto, no circula corriente por la línea a, toda vez que  $I_A$  es la suma de sus componentes y éstas son todas cero.

Por otra parte, si la puesta a tierra del neutro del generador se efectúa a través de una impedancia  $Z_n$  dicha impedancia formará parte de la red de secuencia cero tomando el valor triplicado de su valor.

## 2.4 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE CALIDAD DE LA ENERGÍA.

### 2.4.1 ¿Qué es la calidad de la energía? [7]

La calidad de la energía se entiende cuando la energía eléctrica es suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes.

Cuatro parámetros pueden servir como referencia para clasificar los disturbios de acuerdo a su impacto en la calidad de la energía:

- **Variaciones de frecuencia** que raramente ocurren en sistemas alimentados por las compañías suministradoras, siendo más común que se encuentren en sistemas aislados de motor-generador en los que las variaciones de carga provocan variaciones de frecuencia.
- **Variaciones de amplitud** pueden ocurrir en diferentes formas y rangos de duración que van desde transitorios de muy corta duración hasta condiciones de estado estable.
- **Variaciones en la forma de onda de voltaje** o corriente producidas por cargas no lineales, denominada distorsión armónica, siendo una condición de estado estable.



- **Desbalanceo entre las fases** de un sistema polifásico causado principalmente por la operación de cargas monofásicas desiguales que afectan principalmente a máquinas rotatorias y circuitos rectificadores trifásicos.

En México se cuenta con la “ Ley del servicio público de energía eléctrica y su reglamento 1993 ” que define las condiciones de suministro de la energía eléctrica, estableciendo en el capítulo V artículo 18 del suministro y venta de energía eléctrica que “El suministrador de energía eléctrica deberá ofrecer y mantener el servicio en forma de corriente alterna en una, dos o tres fases, a las tensiones alta, media y baja disponibles en la zona de que se trate observando que:

- La frecuencia sea de 60 Hz, con una tolerancia de  $\pm 0.8$  %.
- Que las tolerancias en el voltaje de alta, media o baja tensión, no excedan de  $\pm 10\%$  y tiendan a reducirse progresivamente”.

En la actualidad cada vez es más extendido el uso de equipo electrónico sensible y continuamente las velocidades de procesamiento se incrementan por lo que es indispensable que las instalaciones se realicen con apego a las normas, se cuente con equipos de protección adecuado y se reduzcan los disturbios en el sistema eléctrico, para lo cual es importante establecer una coordinación entre la compañía suministradora, los fabricantes de equipos y los usuarios.

#### **2.4.2 Equipos para medición de calidad de la energía.[8]**

En el mercado actual existen muchas marcas y modelos de equipos para la medición de la calidad de la energía.

Por lo general existen 3 tipos de equipos muy utilizados:

- Equipos para la identificación de problemas.
- Registradores.
- Analizadores.

Los Equipos para la identificación de problemas son utilizados para obtener información en tiempo real para realizar diagnósticos sobre fallas.

Los Registradores se utilizan para monitorear la calidad de la energía y poder obtener tendencias de la tensión eléctrica.

Los Analizadores son equipos muy utilizados para fallas que no se pueden localizar de inmediato, en estas fallas se monitorea el voltaje y la corriente en un intervalo de tiempo para poder realizar diagnósticos y resolver problemas como transitorios de alta velocidad o perturbaciones en la tensión.

Para este trabajo de tesis se utilizó el analizador de calidad de la energía marca Fluke, modelo 434. La marca Fluke es muy reconocida a nivel internacional por la calidad de sus equipos así como la variedad de dispositivos para las necesidades industriales ya sea de uso diario o para análisis y estudio.

En las figuras 2.5, 2.6 y 2.7 se muestra el analizador Fluke 434.



**Fig. 2.5 Analizador Fluke 434 con sus sondas de tensión y pinzas amperimétricas.**



**Fig. 2.6 Vista superior del Analizador.**

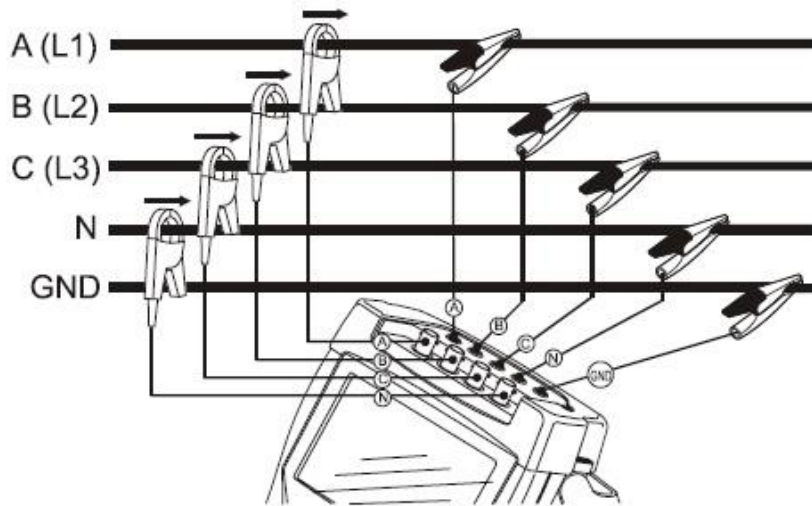
En la figura 2.6 se observan las terminales para voltajes y corrientes del analizador.



**Fig. 2.7 Técnico utilizando el analizador en campo.**

En la figura 2.7 se observa a un técnico utilizando el analizador con alto voltaje.

### Conexión del analizador a un sistema eléctrico [8]



**Fig. 2.8 Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico.**

En la figura 2.8 se muestra las conexiones del analizador, el analizador cuenta con 4 entradas BNC para pinzas amperimétricas para la corriente y 5 entradas tipo banana para las tensiones.

Siempre que sea posible, elimine la tensión de los sistemas eléctricos antes de realizar las conexiones y evite trabajar solo.

#### 2.4.3 Procedimiento de conexión:

Coloque primero las pinzas amperimétricas alrededor de los conductores de fase A (L1), B(L2), C(L3) N(neutro). Las pinzas están marcadas con una flecha que indica la polaridad de señal correcta.

A continuación, lleve a cabo las conexiones de tensión: comience con la toma de tierra y luego siga con N, A(L1), B(L2) y C(L3), sucesivamente. Para obtener un resultado correcto cuando realice las mediciones, conecte siempre la entrada de tierra. Compruebe siempre dos veces las conexiones. Asegúrese de que las pinzas amperimétricas están firmemente conectadas y completamente cerradas alrededor de los conductores.

Para mediciones monofásicas, utilice la entrada de corriente A(L1) y la entrada de tensión de tierra y N(neutro).

A(L1) es la fase de referencia para todas las medidas.

Antes de realizar alguna medición, configure el analizador para la tensión, frecuencia y configuración del cableado del sistema eléctrico que desea medir.

Las pantallas de osciloscopio y diagrama fasorial resultan útiles para comprobar si los cables de tensión y las pinzas amperimétricas están conectadas correctamente. En el diagrama vectorial, las corrientes y tensiones de fase L1(A), L2(B) y L3(C) deben aparecer sucesivamente cuando se observan en el sentido de las agujas del reloj, como se muestra en la figura 2.9.

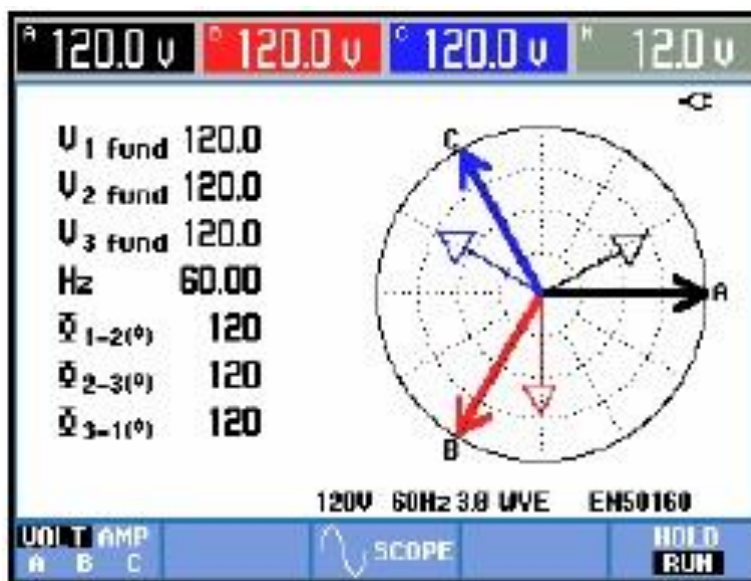


Fig. 2.9 Diagrama vectorial de un analizador correctamente conectado.

**Tabla 2.1 Especificaciones Técnicas del analizador Fluke 434[8]**

Voltajes de entrada	
Número de entradas	4(3 fases + neutro)
Voltaje de entrada máximo	1000 Vrms
Rango de voltaje nominal	50V a 500V
Voltaje de pico máximo de medición	6 kV
Impedancia de entrada	4 MΩ/5pF
Ancho de banda	>10 kHz, hasta 100 kHz para transitorios
Escalas	1:1, 10:1, 100:1, 1000:1 y variable
Corrientes de entrada	
Número de entradas	4 (3 fases + neutro)
Tipo	Clamp con transformador de corriente salida en mV
Rango	1 Arms a 400 Arms en clamp incluido en el equipo
Impedancia de entrada	50kΩ
Ancho de banda	>10 kHz
Escalas	0.1,1,10,100,1000 mV/A
Frecuencia nominal	40 Hz a 70 Hz
Sistema de muestreo	
Resolución	Convertidor analogo a digital de 16 bits en 8 canales
Velocidad máxima de muestreo	200kS/s en cada canal simultaneamente

## REFERENCIAS

- [1] Manual de usuario del analizador trifásico Fluke 434, Agosto 2004
- [2] Estudio de fallas asimétricas Ing. Gustavo L. Ferro Universidad Nacional de Mar del Plata.
- [3] Análisis de Sistemas de Potencia, John J. Grainger y William D. Stevenson Jr. McGraw Hill 1996
- [4] Power Quality Monitoring: Waveform Analysis, Dan Carnovale, P.E. IEEE 6 de Mayo 2008.
- [5] Wave Characteristics of Underground Cable Failures, S. Kulkarni, A. Allen, D. Lee, S. Chopra, S. Santoso, T. Short. The University of Texas at Austin and Electric Power Research Institute-EPRI
- [6] Método de las componentes simétricas, Alberto G. Martínez. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rosario. Santa Fe, Argentina. 2014
- [7] Calidad de la energía, Ing. Eugenio Téllez Ramírez. Automatización, Productividad y Calidad S.A.de C.V.
- [8] Fluke 434-II/435-II/437-II Service manual, Febreaury 2013.

# *Capítulo*

3

---

## **Diseño del simulador.**



### 3.1 ¿CUÁL ES LA IDEA?

La idea es que se puedan simular las fallas de un sistema eléctrico cualquiera las veces que sean necesarias, con voltajes y corrientes de magnitudes totalmente seguras para el usuario.

Para este proyecto se pueden utilizar dos enfoques, el primero sería un sistema analógico y el segundo un sistema digital.

El utilizar un sistema analógico con elementos pasivos (transformadores, interruptores, etc.) para generar las fallas, es que no se puedan obtener fácilmente las formas de ondas de las fallas a estudiar. También tenemos la problemática de que dichos elementos puedan dañarse por obvias razones. Además que si se quiere simular otro sistema eléctrico para su estudio, tendría que modificarse las conexiones de los elementos, por lo tanto es poco práctico utilizar este enfoque por la diversidad de problemas que presenta.

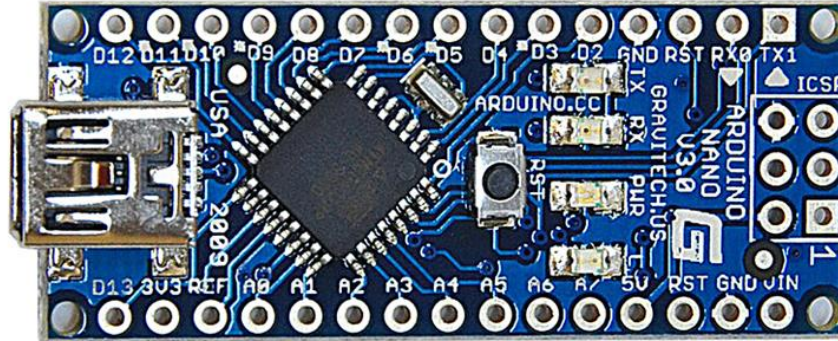
La mejor manera para diseñar el simulador es utilizar un sistema digital, donde se puedan generar los oscilogramas de las fallas sin que se modifiquen en magnitud, ni las formas de onda.

Cuando se modela un sistema eléctrico en algún software especializado para su análisis, las gráficas obtenidas pueden utilizarse con las adecuaciones necesarias, para ser usadas en un sistema digital, las dos grandes ventajas es que solo se necesita un solo circuito generador y si se desea simular otro sistema solo se cambian los oscilogramas.

### 3.2 TIPO DE MICROPROCESADOR A UTILIZAR.[9]

Para este proyecto se propone utilizar un microprocesador de uso común y de bajo costo. Como primer acercamiento se propone utilizar el microcontrolador ATMEGA328P utilizados en la plataforma ARDUINO. El Arduino tiene la gran ventaja que su entorno de programación es muy flexible, existe mucha información, así como también muchos dispositivos diseñados para ese sistema.

Para empezar se tomó la decisión de usar el Arduino Nano que tiene el mismo microcontrolador ATMEGA328P pero con una presentación de encapsulado pequeño.



**Fig. 3.1 Arduino Nano.**

**Tabla 3.1 Especificaciones Técnicas del Arduino Nano[9]**

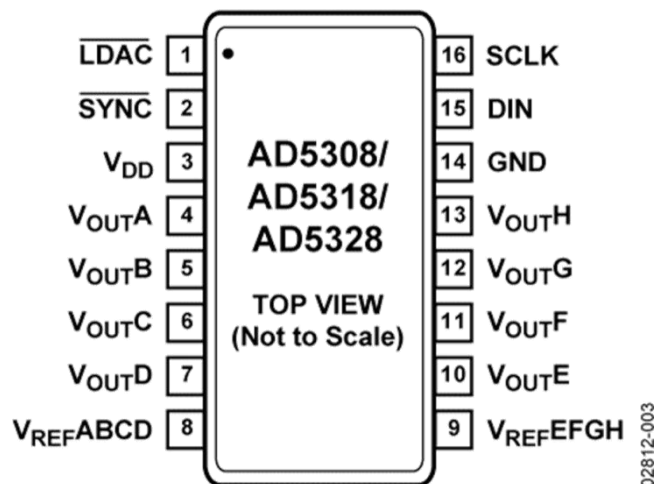
Microcontroller	ATmega328
Architecture	AVR
Operating Voltage	5 V
Flash Memory	32 KB of which 2 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
Clock Speed	16 MHz
Analog I/O Pins	8
EEPROM	1 KB
DC Current per I/O Pins	40 mA (I/O Pins)
Input Voltage	7-12 V
Digital I/O Pins	22
PWM Output	6
Power Consumption	19 mA
PCB Size	18 x 45 mm
Weight	7 g

Obviamente al utilizarse un sistema digital para generar señales analógicas se necesita un convertidor digital-análogo, pero el Arduino Nano no cuenta con dichos convertidores, por lo tanto se necesita conectarse un convertidor externo y debido al tipo de proyecto se necesitan generar seis señales, las cuales tres son para voltajes y 3 para corrientes.

Como en total se necesitan seis convertidores D/A, la mejor opción es utilizar un solo circuito integrado que tengan los convertidores necesarios, y para manejar la menor cantidad de cables de comunicación del Arduino Nano hacia los convertidores, se toma la decisión de usar la comunicación serie. Con esto se evita tener una mayor posibilidad de fallas al realizar los experimentos debido a tantos puntos de conexión.

Se toma la decisión de usar una resolución de 8 bits como punto de inicio para verificar si esta resolución sea la adecuada, así como también no manejar una gran cantidad de datos.

Al realizar la búsqueda del convertidor D/A se encontró con un modelo que se adecua a las necesidades del proyecto. El convertidor seleccionado es el AD5308 el cual cuenta con 8 convertidores D/A (con lo cual satisface la cantidad de canales necesarios), es de 8 bits de resolución y utiliza comunicación serie SPI (Serial Peripheral Interface), el cual solo necesita de 4 cables para realizar la comunicación entre el Arduino y el convertidor. (Fig. 3.2)[10]



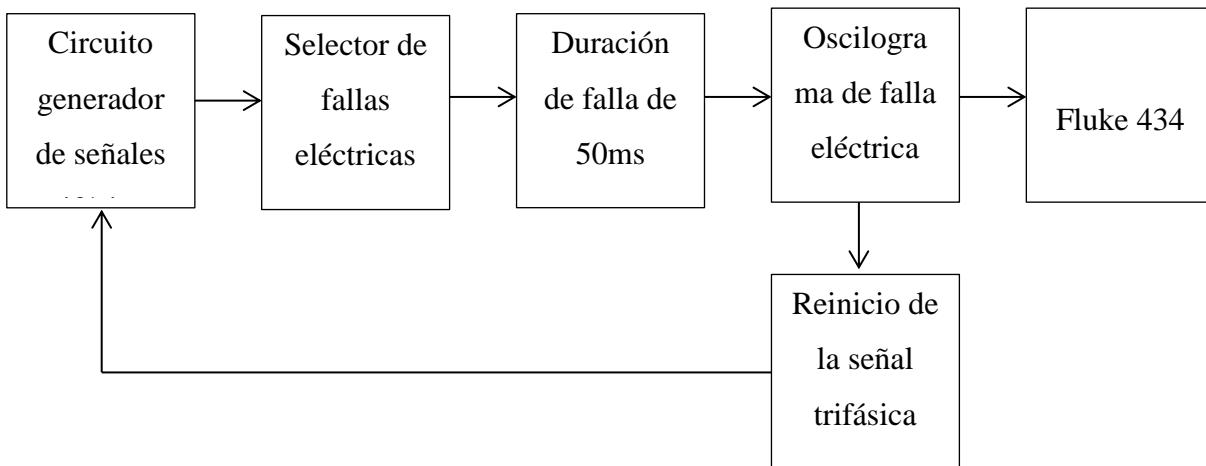
**Fig. 3.2** Convertidor D/A AD5308[10]

### 3.3 ETAPAS DE DISEÑO.

El simulador de fallas requiere que se le suministre al analizador las señales de un sistema eléctrico en estado estable y en cualquier momento se puede simular una falla.

Después de cierto tiempo se restablezca a sus condiciones iniciales para volver a repetir el proceso ya sea la misma falla u otra distinta.

En la figura 3.3 se muestra el diagrama a bloques de operación del simulador propuesto.



**Fig. 3.3 Diagrama a bloques del simulador de fallas.**

#### 3.3.1 Obtención de los oscilogramas de fallas.

Después de definirse como debe operar el simulador, se requiere obtener los oscilogramas de las fallas a simular. Por lo tanto se requiere trabajar con un sistema eléctrico real de donde se han obtenido los oscilogramas de fallas para su estudio.

El utilizar un caso real nos brinda la solidez que requiere este proyecto, se tomó la decisión de utilizar el circuito de una línea de transmisión llamada Tres Estrellas(TTE) – Teotihuacán (TTH), que son los nodos que conforman dicho circuito. [11]

Este circuito tiene líneas de transmisión de 242.8 km, ya ha sido estudiado y por lo tanto permite que los oscilogramas de las fallas tengan la validez para este trabajo de tesis. [11]

Para esto se propone utilizar el software ATPDraw-EMTP© para recrear las fallas eléctricas del sistema a analizar. Este software es muy versátil ya que permite modelar cualquier sistema eléctrico y poder analizarlo. De esta manera obtendremos las tablas de valores de cada falla, tanto del voltaje como de la corriente para cada fase.

### **3.3.2 Modificando los oscilogramas.**

Los oscilogramas que se obtengan tienen que convertirse a valores digitales de 8 bits para ser usados por el microcontrolador, debido a la gran cantidad de información que tienen los oscilogramas, recordemos que se necesitan 6 oscilogramas por falla. Por conveniencia se realizará con un programa en MATLAB el escalamiento de la información que se obtuvo en ATPDraw. Al obtener los valores digitales comprendidos de 0 hasta 255 (resolución de 8 bits) estos se pueden usar en formato de tabla en el Arduino.

### **3.3.3 Simulador.**

Al inicio el simulador tiene que mostrar las señales del sistema en modo estable, esa señal también se obtendrá por medio de ATPDraw. Se manda llamar cada valor contenido en las tablas y se pasan al convertidor D/A para generar las señales, estas señales van a tener que adecuarse a los valores que requiere el analizador.

Para el simulador se utilizarán las interrupciones del Arduino para llamar los oscilogramas de las fallas. Las tablas obtenidas en el MATLAB se anexarán al cuerpo del programa que se grabe en el Arduino.

### 3.4 MODO DEMOSTRACIÓN DEL ANALIZADOR FLUKE 434.

Como la idea de este proyecto es poder simular fallas reales pero de forma segura, esto significa manejar voltajes y corrientes adecuadas al equipo.

El analizador Fluke 434 dentro de sus múltiples funciones tiene un modo de demostración, esta opción modifica la sensibilidad del equipo en el caso del voltaje para que reciba un voltaje máximo de 2 Vrms. En la figura 3.4 se muestra el modo Demostración.

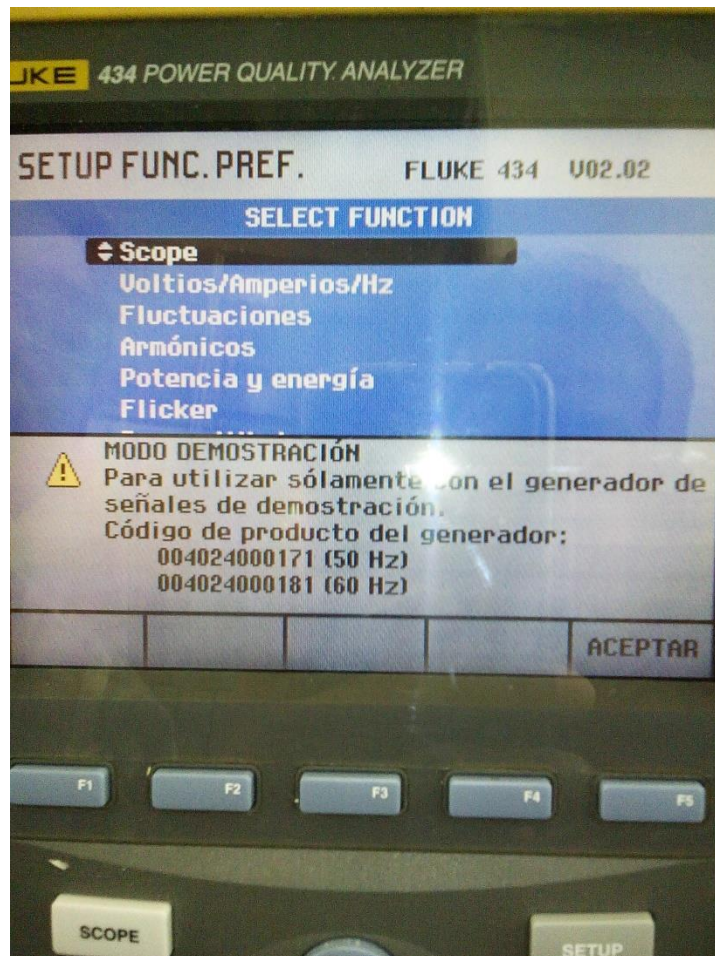


Fig. 3.4 Modo demostración del analizador Fluke 434.

En el modo demostración al recibir un voltaje pequeño el instrumento lo muestra en pantalla como un voltaje de mayor valor, por lo tanto es muy adecuado para los objetivos que se buscan.

Desgraciadamente no se pudo encontrar información de que voltaje se necesita para representar por ejemplo 127 V. Entonces se conectó un generador de funciones a uno de los bornes de una de las fases del analizador, se generó una señal senoidal de 60 Hz y se fue aumentando la amplitud de la señal hasta obtener una lectura en el analizador de 127 V. De esta forma se pudo obtener que para representar 127 V de corriente alterna se necesitan aplicarle al analizador 0.76 V de CA. Con esta información se puede calcular que niveles de voltajes se necesitan en los convertidores Digital-análogo.

En el caso de la lectura de corriente las pinzas amperimétricas cuentan con un sensor de efecto Hall, por lo cuál a la salida proporciona un voltaje, este voltaje es una representación de la corriente que se esta midiendo. En la figura 3.5 se muestra una pinza amperimétrica del analizador.



**Fig. 3.5 Pinza amperimétrica del analizador Fluke 434.**

Las escalas de corriente del analizador están representadas en mV/A, esto significa que por cada ampere de corriente que pasa por la pinza, esta entrega a su salida cierta cantidad de milivoltios.

Las pinzas incluidas en el equipo tienen dos escalas para medir corriente, una es de 10mV/A con una máxima corriente de 40A y la otra es de 1mV/A con una máxima corriente de 400A como se muestra en la figura 3.6. En la configuración del analizador también se tiene que seleccionar la misma escala que se seleccionó en las pinzas. Por lo que se observa que independientemente de la escala seleccionada en la pinzas el voltaje máximo que proporcionan es de 0.4V. Con esta información se tiene cubierto qué voltajes son necesarios para representar las corrientes en el analizador.



**Fig. 3.6 Selector de escalas de corriente de la pinza amperimétrica.**



## **REFERENCIAS**

[9] <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>

[10] AD5308/AD5318/AD5328 Analog Devices Datasheet 2002-2011

[11] Tesis "Desarrollo de un algoritmo de protección de distancia en relevadores SIEMENS para disparos de alta velocidad, conjugando dos técnicas de análisis de fallas en línea de transmisión" Ing. Carlos Abraham Soriano Rangel. Noviembre 2012.

# *Capítulo*

4

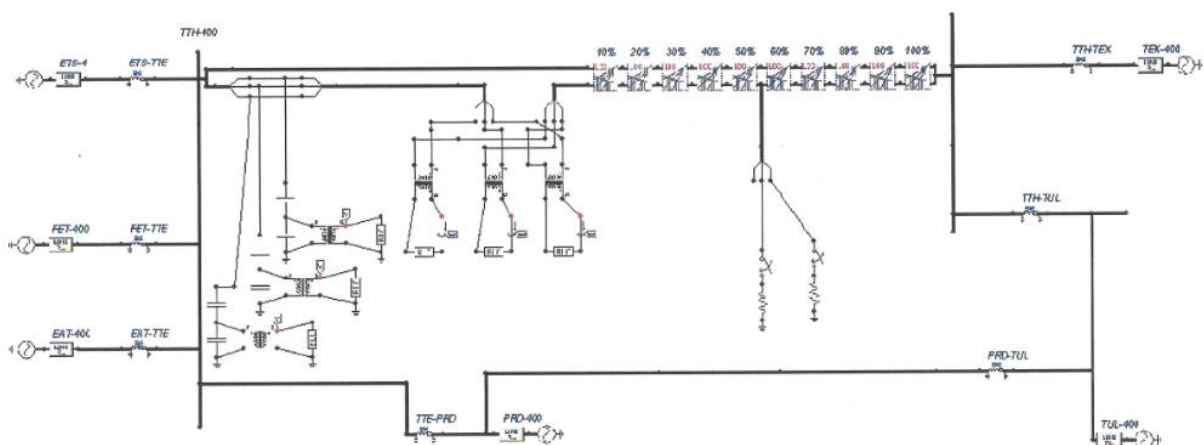
---

## **Construcción del simulador.**

#### 4.1 SOFTWARE.

La idea es que se pueda simular las fallas de un sistema eléctrico cualquiera las veces que sean necesarias, con voltajes y corrientes de magnitudes totalmente seguras para el usuario.

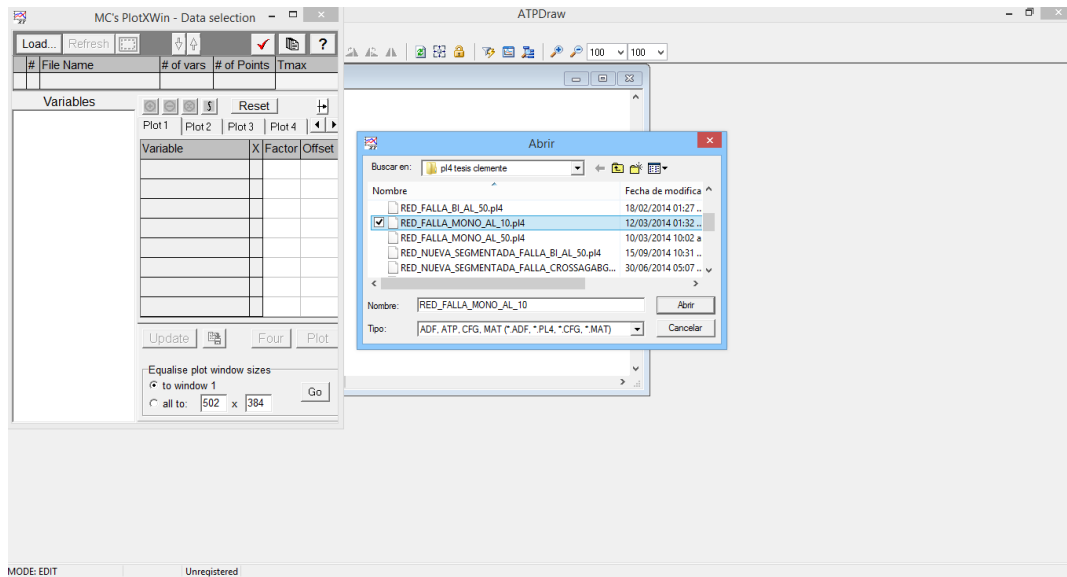
Como se comentó en el capítulo anterior, el modelo del sistema para generar los oscilogramas (Tres Estrellas (TTE) – Teotihuacán (TTH) mostrado en la figura 4.1), las fallas fueron obtenidas del trabajo de tesis del Ing. Carlos Abraham Soriano Rangel.



**Fig. 4.1 Red Tres Estrellas (TTE) – Teotihuacán (TTH) modelado en ATP-EMTP.**

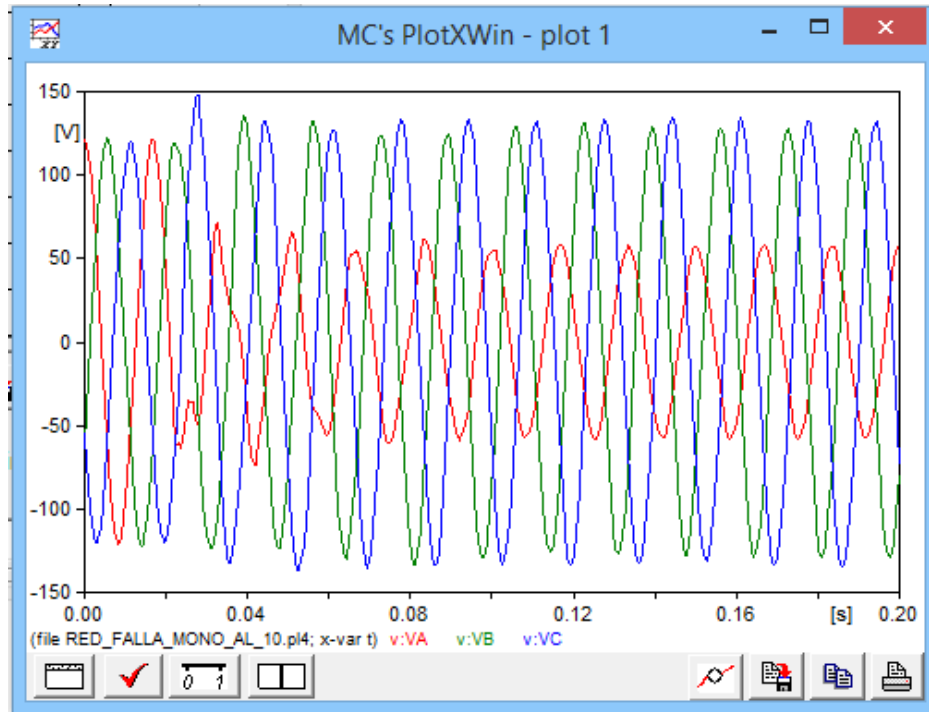
Estos oscilogramas que fueron generados por medio del software ATPDraw-EMTP©, se tomaron 3 que se necesitan para este proyecto de tesis.

Como primer paso se comenzó abriendo el archivo correspondiente a cada falla en ATPDraw-EMTP©, como se muestra en la figura 4.2.

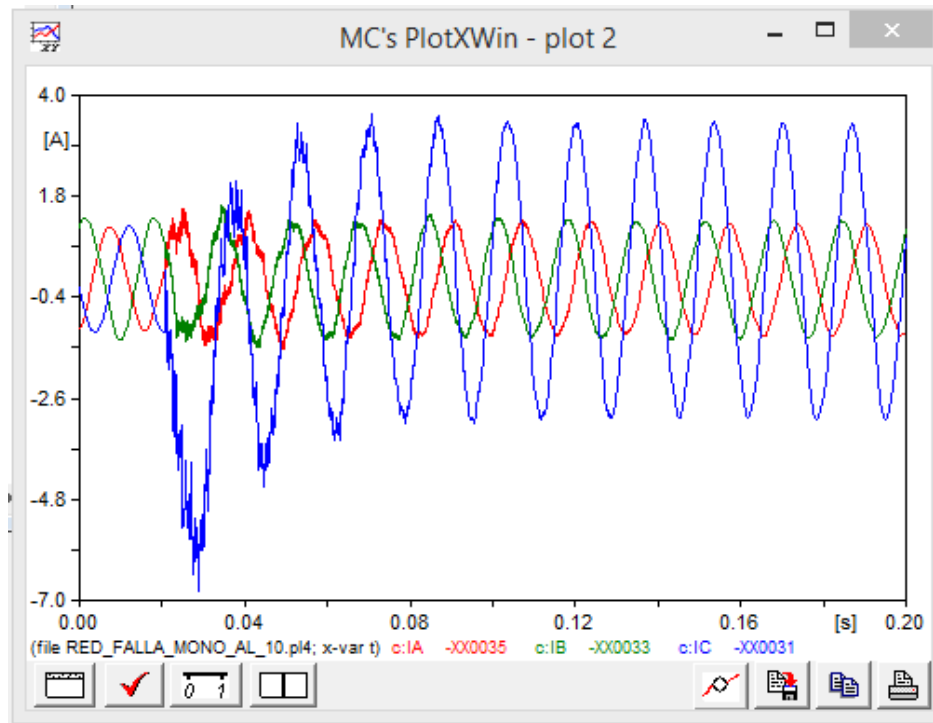


**Fig. 4.2** Abriendo un archivo de oscilograma en ATPDraw.

Con esto podemos ver las gráficas que corresponden a los voltajes y a las corrientes, como se puede apreciar en la figura 4.3 y 4.4.



**Fig. 4.3** Gráficas de voltajes por fase.



**Fig. 4.3 Gráficas de corrientes por fase.**

Como segundo paso se necesita convertir los datos que se obtienen de las gráficas a valores digitales, esto con la finalidad de construir tablas de valores de cada uno de los oscilogramas. Y estas tablas serán incorporadas al cuerpo del programa del Arduino, donde podrán ser llamadas en cualquier momento.

La cantidad de tablas donde se representan los voltajes y las corrientes a utilizar serán: 6 para falla de línea a tierra, 6 para falla de doble línea, 6 para falla trifásica y 6 en modo estable, dando un total de 24 tablas.

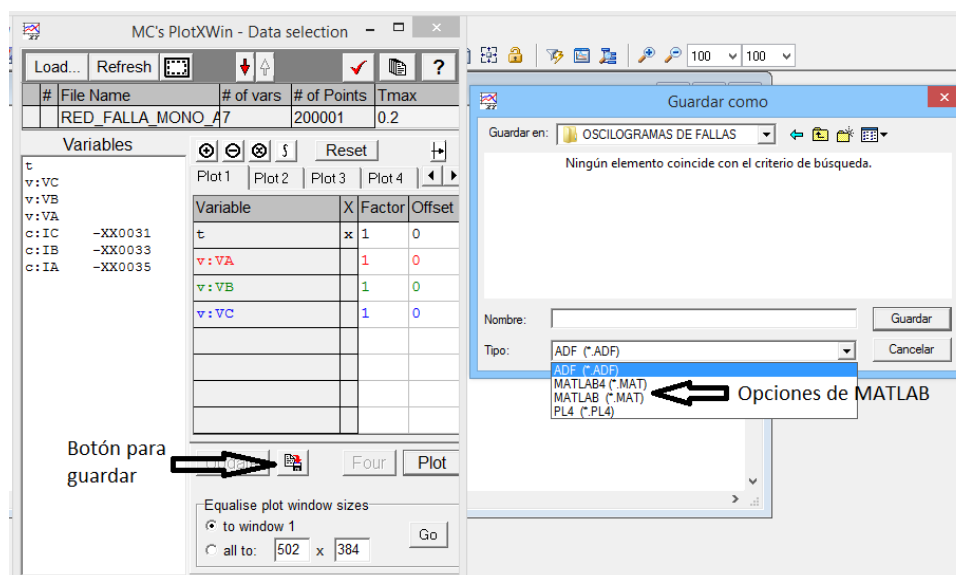
Cada oscilograma generado en ATPDraw es una tabla de valores donde el valor del voltaje y la corriente varían con respecto al tiempo. Por lo que para digitalizarlas es necesario escalar estos valores, como se comentó en el capítulo anterior se proponen datos de 8 bits.

Debido a que el software de ATPDraw no está diseñado para dicho propósito, se necesita extraer la información y utilizar otro software para escalar los datos. La ventaja es que el ATPDraw tiene la opción de exportar dichos datos a MATLAB. Por lo que en MATLAB se

puede realizar un programa para escalar a 8 bits y confirmar que los oscilogramas no sufran deformaciones y que se alejen de las gráficas originales.

En la ventana “Plot” de ATPDraw se seleccionan las gráficas de voltajes y corrientes que se quieren exportar a MATLAB, se da click en el botón “Save variables” , se le asigna un nombre y se escoge el tipo de archivo a exportar, en este caso en formato de MATLAB o sea .MAT.

En la figura 4.4 se puede ver cómo se exportan los datos a MATLAB.

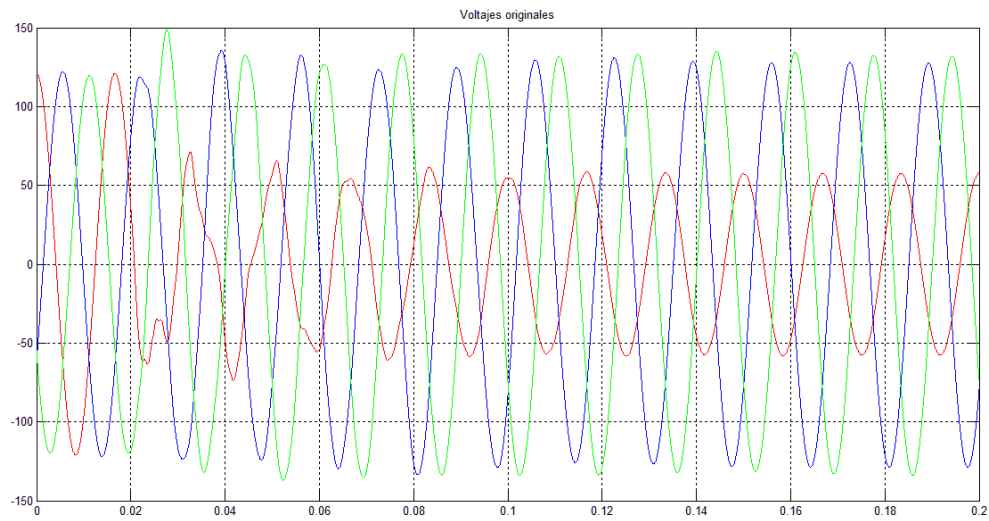


**Fig. 4.4 Forma de exportar gráficas de ATPDraw a MATLAB.**

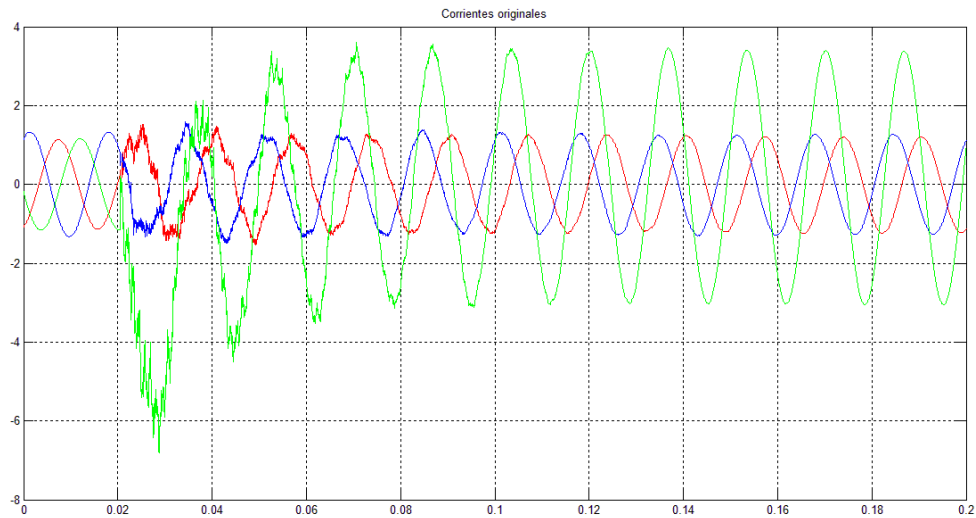
Debido a que ATPDraw puede generar una gran cantidad de datos debido a sus algoritmos esta opción es muy útil.

En MATLAB se carga el archivo .MAT, este archivo, recordando que están los datos para voltajes y corrientes, estos deben ser obviamente separados.

En la figura 4.5 y 4.6 se pueden observar las gráficas de voltajes y corrientes en MATLAB.



**Fig. 4.5 Gráfica de voltajes de ATPDraw en MATLAB.**



**Fig. 4.6 Gráfica de corrientes de ATPDraw en MATLAB.**

De esta forma se puede exportar cualquier gráfica de ATPDraw a MATLAB y se puede adecuar para utilizarlos en el Arduino NANO.

En MATLAB se diseña un programa para escalar los datos a valores de 8 bits, esos datos se insertarán en el programa del simulador en forma de tablas para ser llamados en cualquier momento.

Los oscilogramas obtenidos en ATPDraw, cada valor de voltajes o corrientes fueron calculados en incrementos de tiempo de  $1 \mu\text{S}$ , como se sabe que un periodo de la corriente alterna tiene  $16.66 \text{ mS}$ , significa que un solo periodo contiene 16,660 valores. Esto puede ser un inconveniente al querer utilizar tanta información en el sistema Arduino, porque una tabla se representa como una matriz y esa matriz tiene una cierta capacidad máxima de datos dentro de ella.

En Arduino una matriz puede ser declarada de tipo "WORD" que son de 16 bits, esto significa que tiene un máximo de 65,536 valores, si se dividen entre 16,660 valores de un periodo solo se obtienen casi 4 periodos de una señal de corriente alterna.

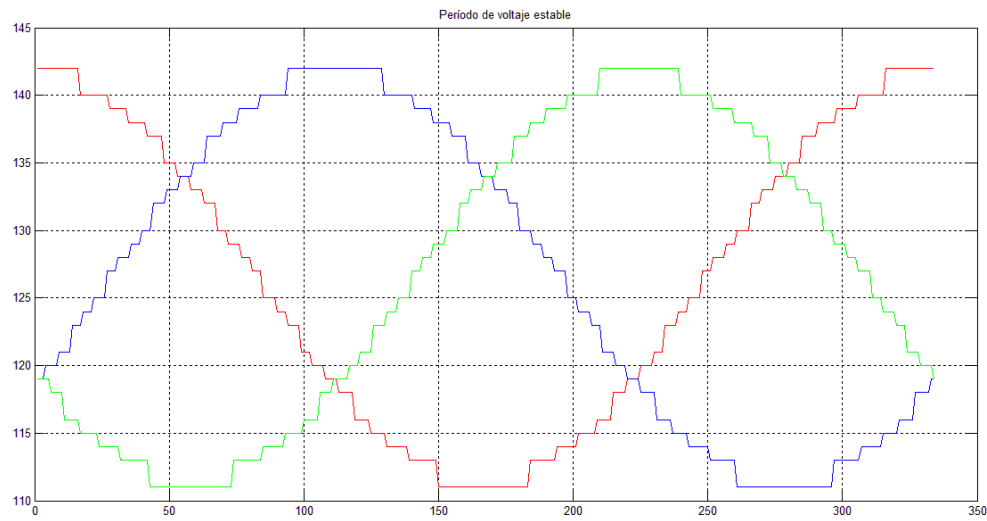
Que resulta insuficiente para poder representar una falla eléctrica simulada en ATPDraw, por lo tanto se sacrifican valores para tener menos muestras en un periodo y se puedan representar más ciclos de la corriente alterna.

Por lo que se decide tomar una muestra cada  $50 \mu\text{S}$ , con esto se obtienen 334 muestras en un periodo de la corriente alterna. Así se pueden almacenar el equivalente de 196 periodos de corriente alterna.

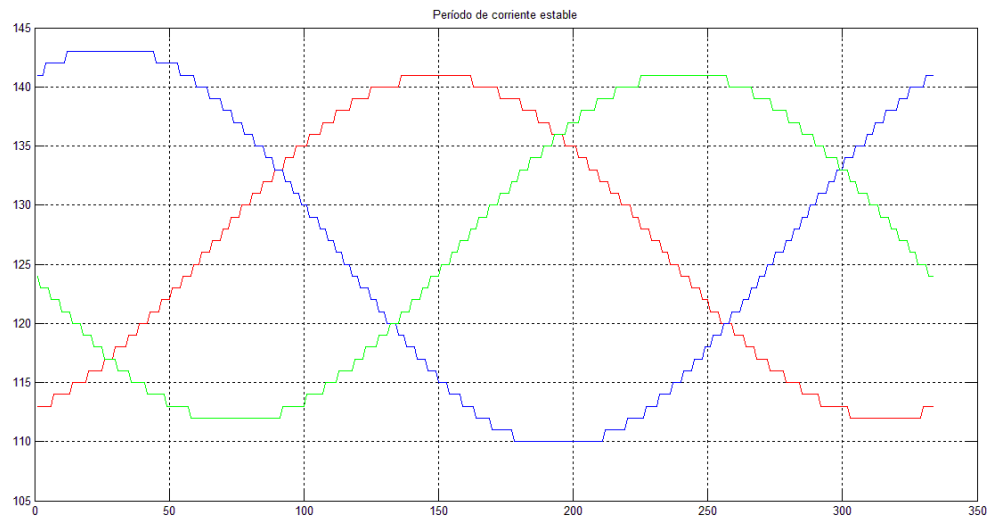
Al tener esas consideraciones presentes al momento de implementar el código en MATLAB, se pueden obtener las tablas que se requieren para el simulador.

Con la ayuda del programa se obtienen en primer lugar las gráficas de la señal trifásica en estado estable escaladas en 8 bits, como se observa en las figuras 4.7 y 4.8.





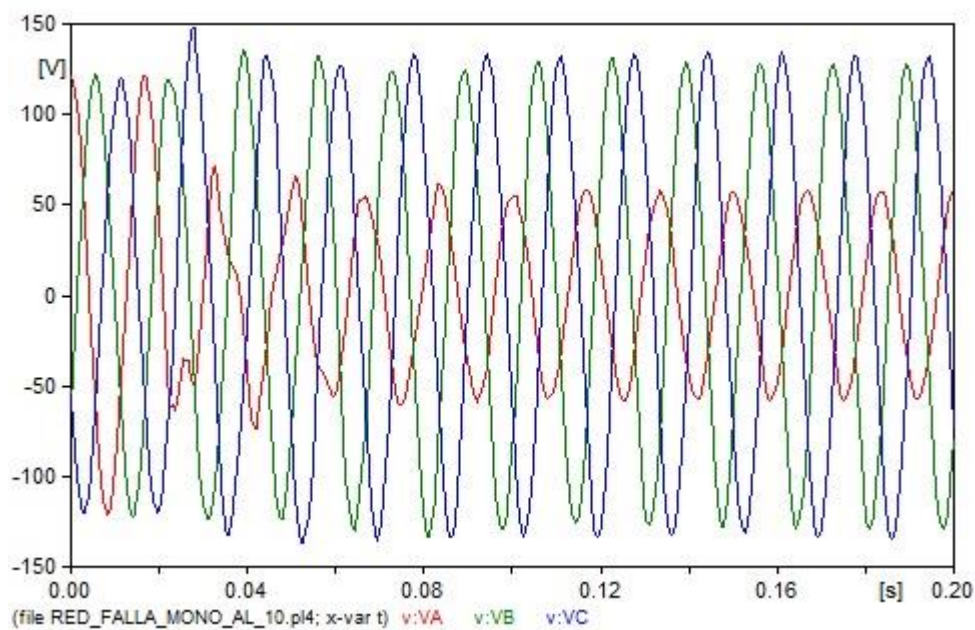
**Fig. 4.7 Voltajes en estado estable a 8 bits de resolución.**



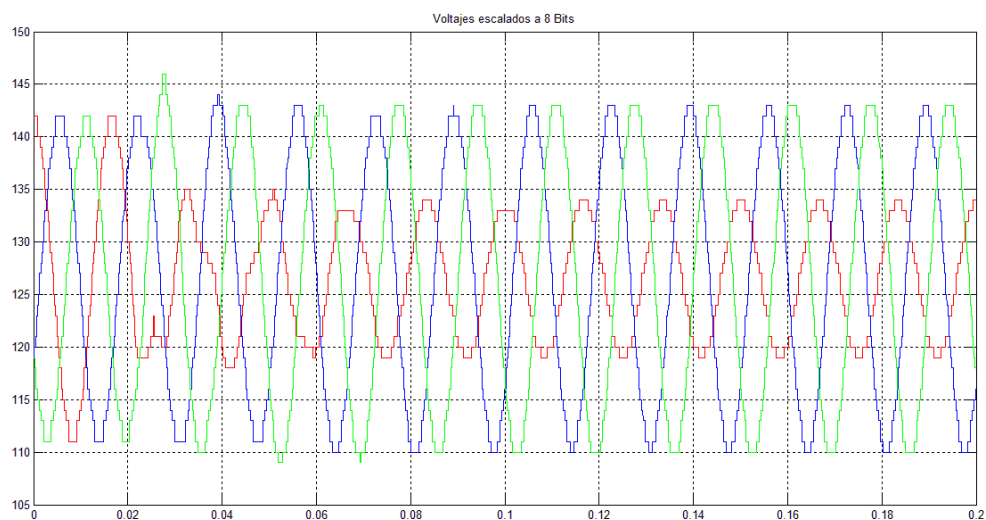
**Fig. 4.8 Corrientes en estado estable a 8 bits de resolución.**

En las figuras 4.9 y 4.10 se pueden observar las gráficas digitalizadas y cada color representa una tabla de valores.

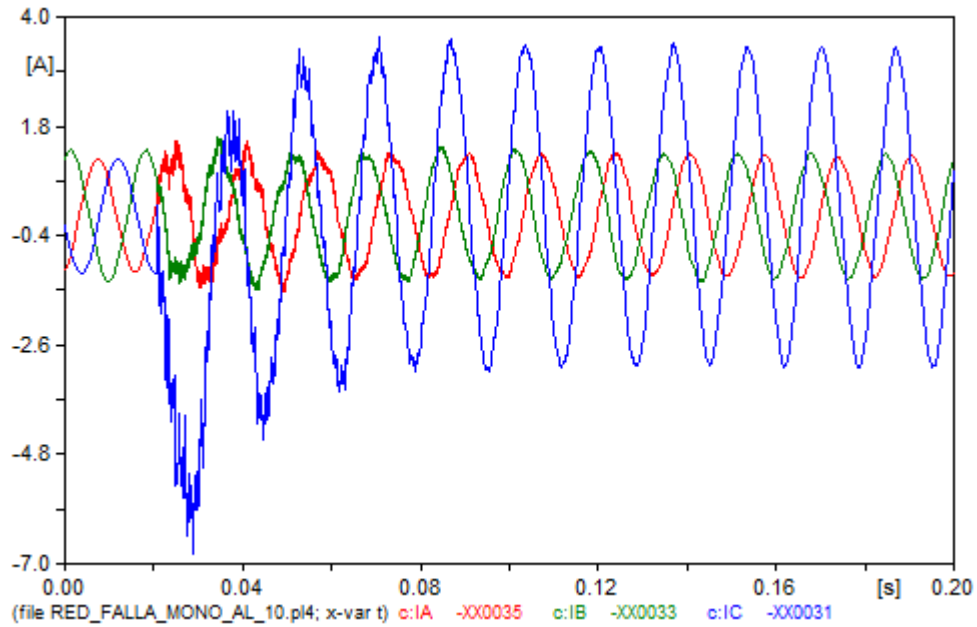
También se pueden apreciar que las señales no presentan mayor distorsión de las originales. A continuación se muestran los oscilogramas obtenidos en ATPDraw y su conversión a datos de 8 bits en MATLAB.



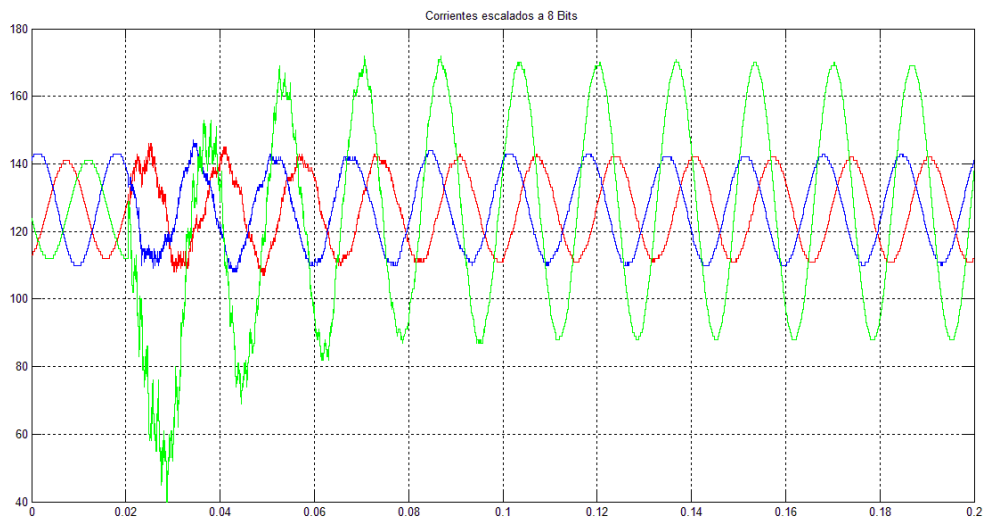
**Fig. 4.9 Voltajes de falla de línea a tierra simulada en ATPDraw-EMTP.**



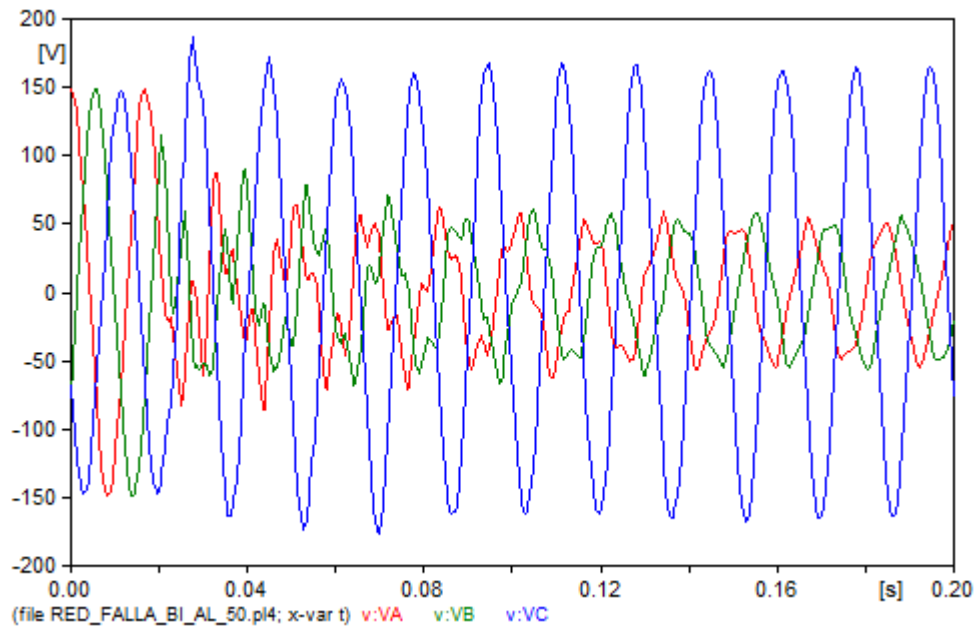
**Fig. 4.10 Voltajes de falla de línea a tierra convertido a 8 bits en MATLAB.**



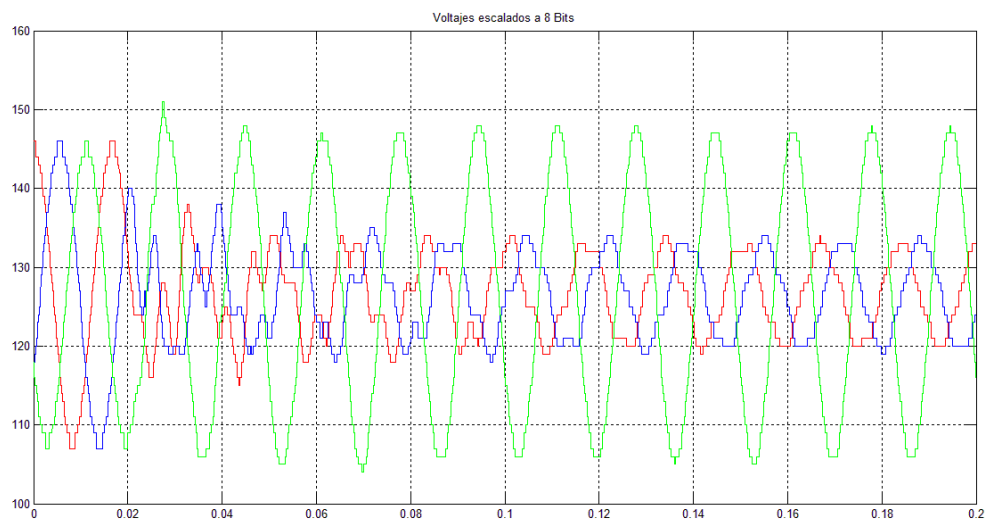
**Fig. 4.11** Corrientes de falla de línea a tierra simulada en ATPDraw-EMTP.



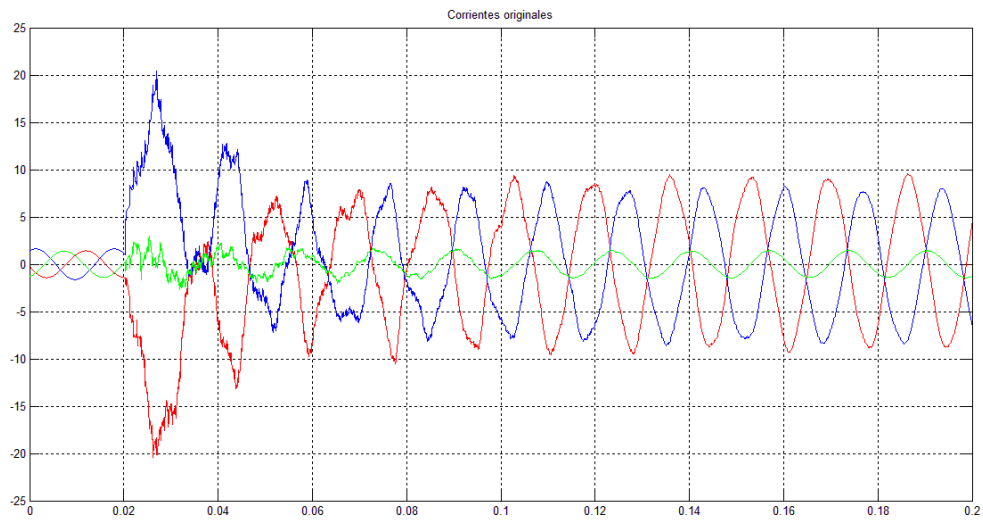
**Fig. 4.12** Corrientes de falla de línea a tierra convertido a 8 bits en MATLAB.



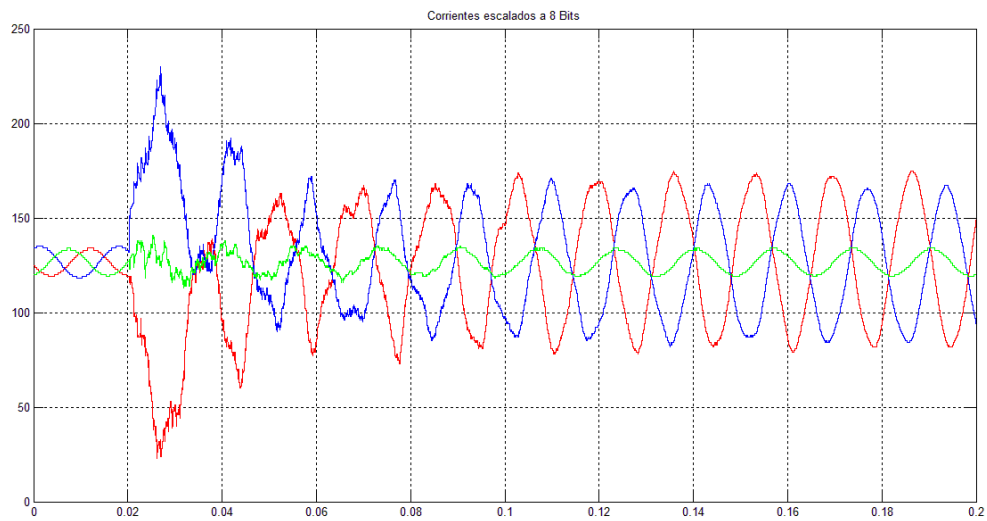
**Fig. 4.13** Voltajes de falla de doble línea simulada en ATPDraw-EMTP.



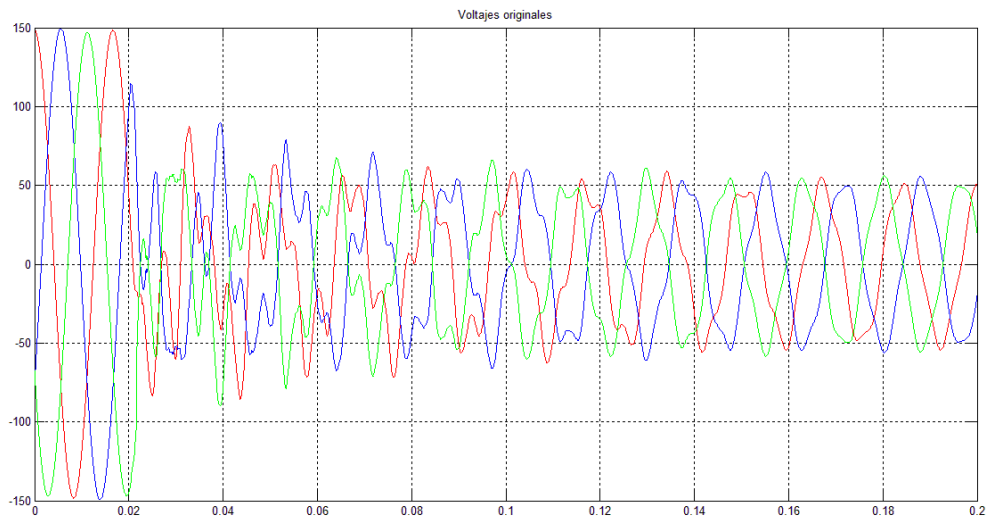
**Fig. 4.14** Voltajes de falla de doble línea convertido a 8 bits en MATLAB.



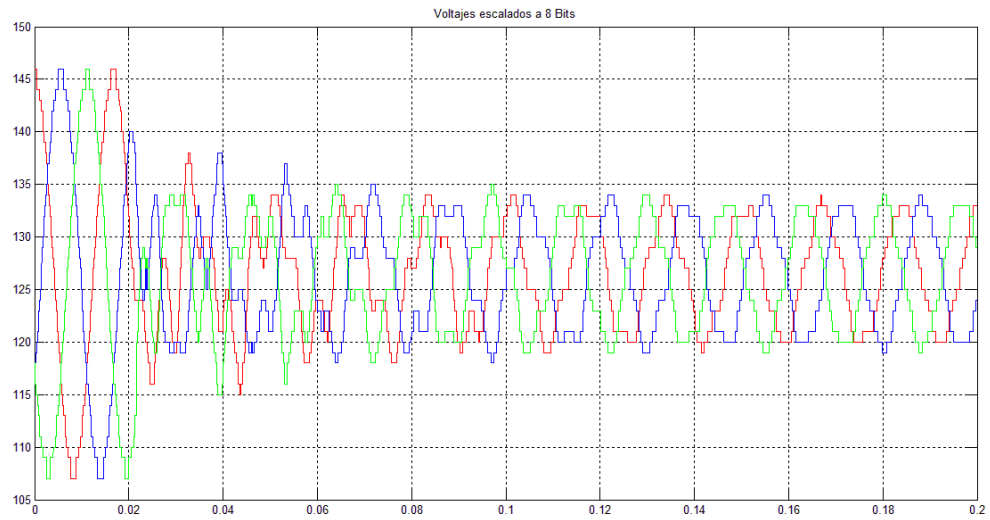
**Fig. 4.15 Corrientes de falla de doble línea simulada en ATPDraw-EMTP.**



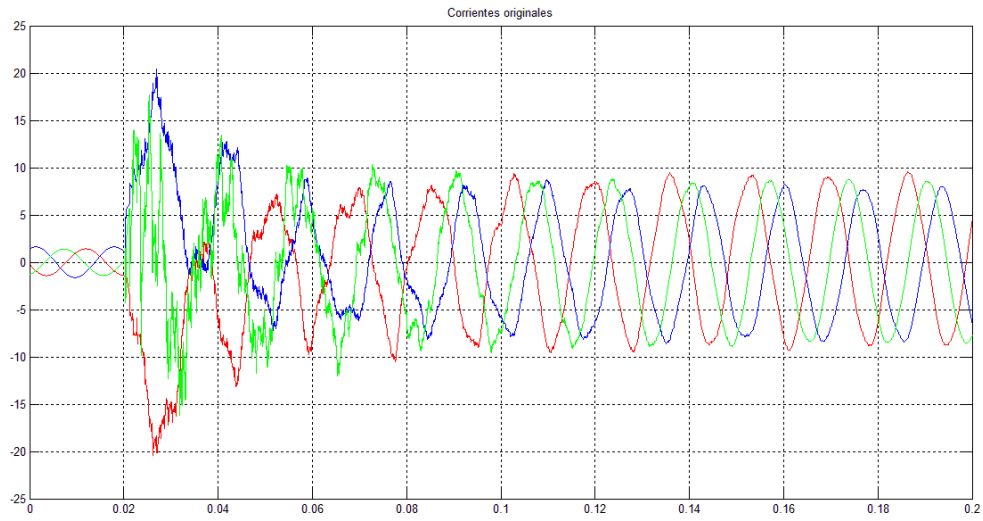
**Fig. 4.16 Corrientes de falla de doble línea convertido a 8 bits en MATLAB.**



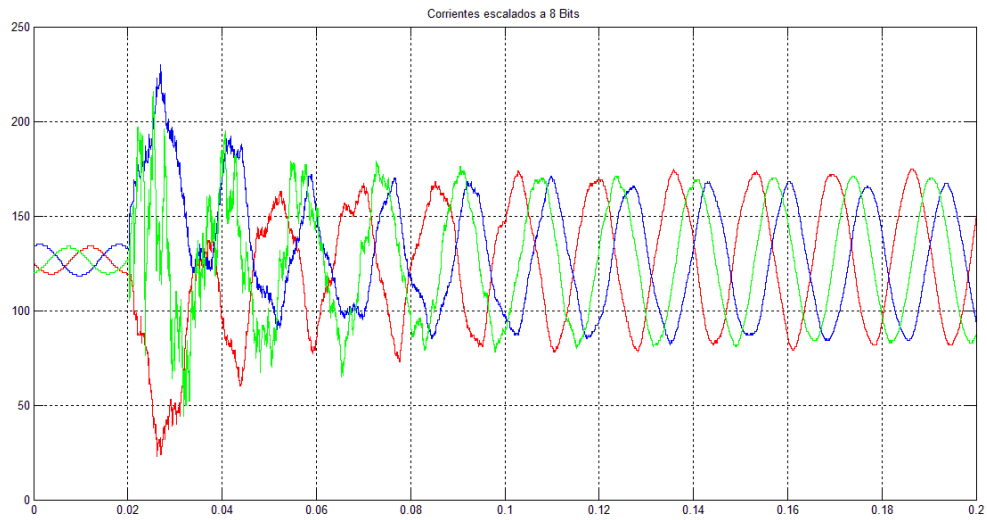
**Fig. 4.17 Voltajes de falla de triple línea simulada en ATPDraw-EMTP.**



**Fig. 4.18 Voltajes de falla de triple línea convertido a 8 bits en MATLAB.**



**Fig. 4.19** Corrientes de falla de triple línea simulada en ATPDraw-EMTP.



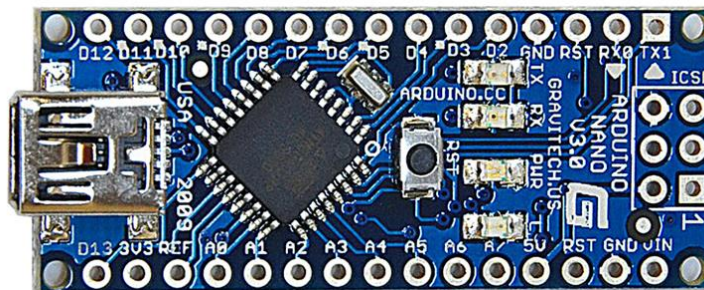
**Fig. 4.20** Corrientes de falla de triple línea convertido a 8 bits en MATLAB.

Como se pueden observar las gráficas obtenidas en MATLAB casi no tienen variaciones con respecto a las originales. Para poder exportar las tablas de valores de 8 bits y usarlos en el cuerpo del programa del Arduino NANO, se utiliza el comando “dlwrite” en MATLAB y se le asigna un nombre de archivo con extensión TXT. Y así solamente se copian los valores a las matrices en el programa de Arduino. Los programas en MATLAB se muestran en el apéndice A.

## 4.2 HARDWARE.

### 4.2.1 Simulador.

Al tener los oscilogramas en formato digital, se puede implementar la parte física del proyecto. Como primer paso tenemos la tarjeta de desarrollo Arduino NANO mostrado en la figura 4.21, el cual tiene el microcontrolador ATMEGA328P pero con un encapsulado de montaje superficial.[12]



**Fig. 4.21 Tarjeta de desarrollo Arduino NANO.**

La decisión de utilizar este microcontrolador como primer acercamiento radica en utilizar componentes electrónicos de uso común, que sean fáciles de conseguir y de bajo costo.

También tiene la ventaja de que existe mucha información sobre esta plataforma y de distribución gratuita.



La desventaja que presenta es que no cuenta con convertidores Digitales-Análogos, para la realización del prototipo se necesitan generar seis señales, por lo tanto se ocupan seis convertidores.

El tipo de comunicación de los convertidores Digital-Análogo puede ser de tipo paralelo o serie, en el tipo paralelo se presentan dos grandes desventajas:

- La tarjeta Arduino no cuenta con suficientes salidas de 8 bits (solo tiene 2 salidas de 8 bits).
- Como se deben usar seis convertidores, se utilizarían demasiadas conexiones.

En el tipo serie tiene la ventaja de que se utilizan pocas conexiones dependiendo del protocolo serie a utilizar (SPI, I<sup>2</sup>C, 3 WIRE, etc.). Se tomó la decisión de utilizar un convertidor serial de comunicación SPI que tiene 8 canales de salida, el cual es el convertidor D/A AD5308 de la compañía ANALOG DEVICES, muy conveniente para este proyecto ya que se necesitan 6 canales.[13]

Las conexiones que necesita el protocolo serie SPI son: alimentación, tierra, datos, reloj y activación del convertidor, por lo tanto solo son necesarios cinco conexiones entre el Arduino y el convertidor D/A, y la ventaja de utilizar pocas conexiones es que hay menos puntos donde pudiese existir fallas.

Este convertidor necesita recibir una palabra de 16 bits para funcionar, dentro de esa palabra están los 8 bits del dato digital para convertir a analógico, así como a cual canal va dirigido ese dato como se puede observar en la figura 4.22.

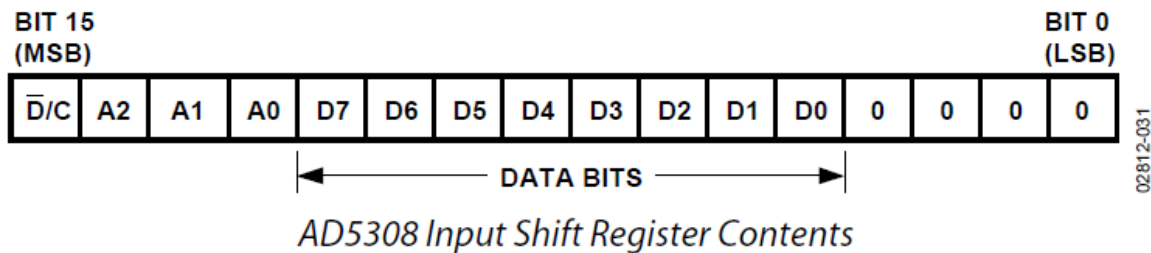
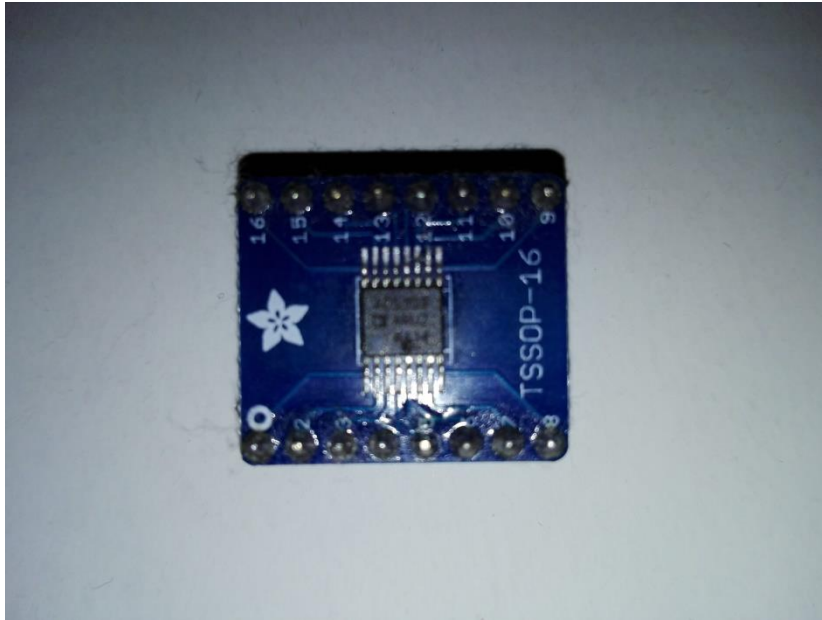


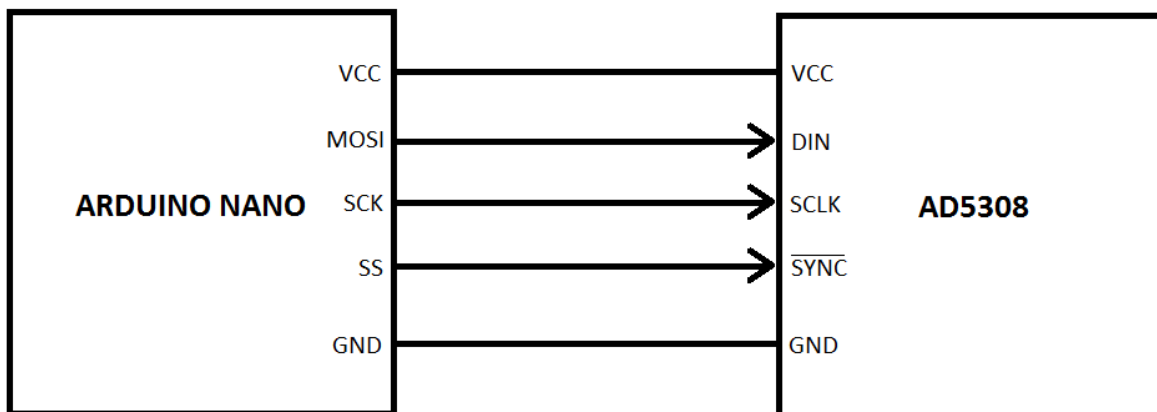
Fig. 4.22 Palabra de 16 bits que recibe el convertidor AD5308.

Ya que el encapsulado del convertidor es para montaje superficial, se soldó a una tarjeta convertidora para utilizarse en una tablilla de experimentos. En la figura 4.23 se puede apreciar el convertidor AD5308.



**Fig. 4.23** Convertidor AD5308 montado en una tarjeta convertidora.

En la figura 4.24 se pueden observar las conexiones necesarias entre el sistema Arduino y el convertidor AD5308.



**Fig. 4.24** Conexiones entre Arduino NANO y el convertidor AD5308.

Para las salidas analógicas del convertidor AD5308 se utilizarán amplificadores operacionales para adecuar las magnitudes de los voltajes. Y debido a que la alimentación del convertidor AD5308 es de fuente simple, las señales generadas van a ir montadas en una componente de corriente directa, por lo que los amplificadores serán alimentados con una fuente simétrica y mediante filtros eliminar la componente de directa.

Con los amplificadores se van a adecuar las señales a los valores de voltaje que necesita el analizador Fluke 434, como se comentó en el capítulo 3.4. Como los oscilogramas están simulados para ser vistos como T.P. y T.C., se ajustarán a valores para que representen 127V en el instrumento.

#### 4.2.2 Analizador Fluke.

Ya con simulador funcionando, es necesario conectarlo con conectores banana para los voltajes y conectores BNC para las corrientes.

En el analizador se debe configurar para ser utilizado en modo demostración, para lo cual encendemos el analizador, en la pantalla de inicio debemos verificar que la conexión para usarse con el simulador debe estar en estrella, como se puede ver en la figura 4.25.

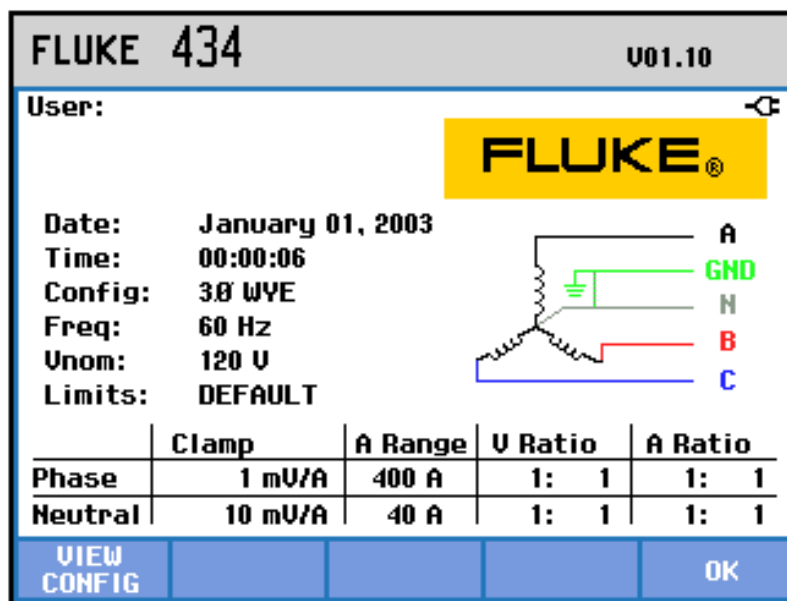


Fig. 4.25 Pantalla de inicio del analizador Fluke 434 y conexión en estrella.

También en esa pantalla debemos configurar los “clamps” para medir las corrientes, en este caso debemos elegir la opción de 10mV/A, esto significa que por cada 10mV que se inyecten al instrumento, estos serán representados como un amperio. Pero también se puede seleccionar cualquier otra configuración para representar corrientes más altas sin ningún problema, ya que para las señales de corriente la magnitud del voltaje de entrada es de solo 0.4V.

Para activar el “Modo Demostración” se oprime el botón “SETUP” como se puede observar en la figura 4.26 y en la pantalla aparecen varias opciones para ser seleccionadas por alguno de los cinco botones de funciones debajo de la pantalla del analizador.



**Fig. 4.26** Teclas de funciones y botón “SETUP” del analizador Fluke 434.

Al presionar el botón “SETUP” aparece la pantalla de inicio del instrumento y aparecen varias opciones en la parte inferior de la pantalla, se escoge la opción “FUNCTION PREF.” como se observa en la figura 4.27.

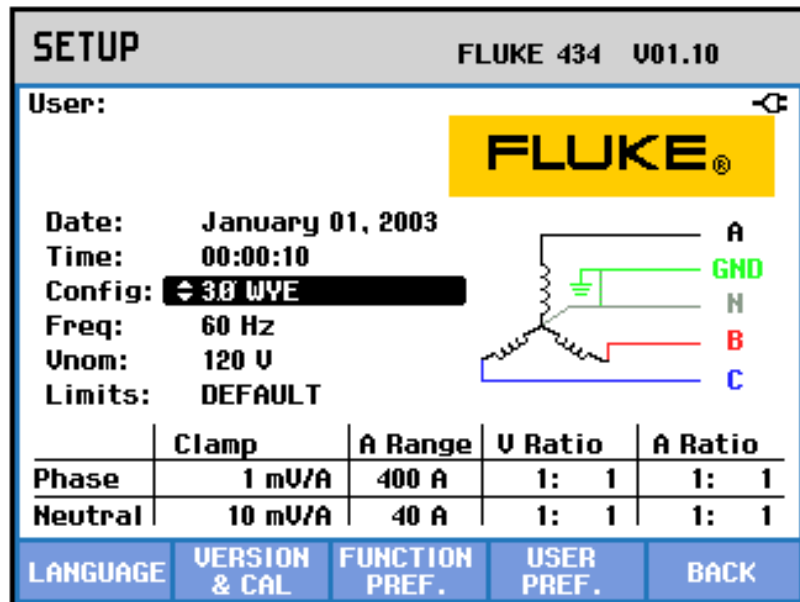


Fig. 4.27 Pantalla “SETUP” y opciones en la parte inferior de la pantalla.

Aparece un nuevo menú llamado “SELECT FUNCTION”, en la parte inferior de la pantalla hay tres opciones, entre esas opciones esta la opción de activar el modo demostración del instrumento, se presiona la tecla con la opción “DEMO” como se ve en la figura 4.28. De esta forma ya se tiene activado el modo demostración del analizador y con esto ya se pueden suministrar los voltajes que se necesitan para el simulador.

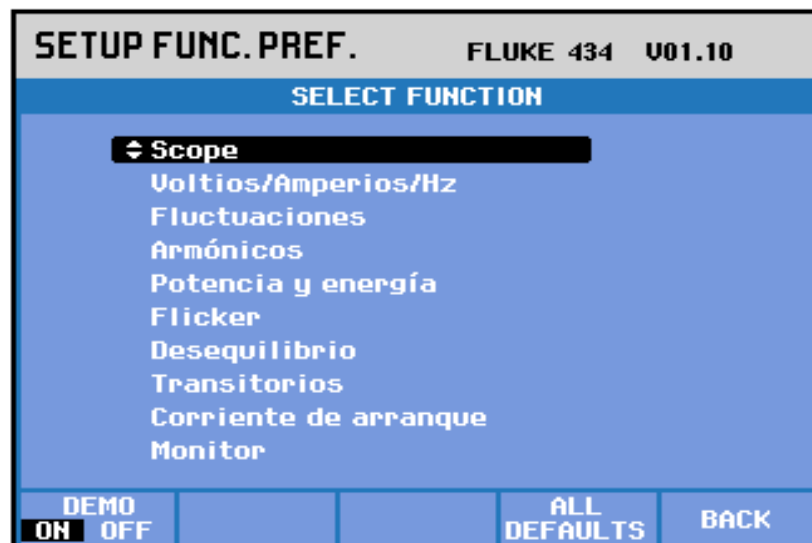
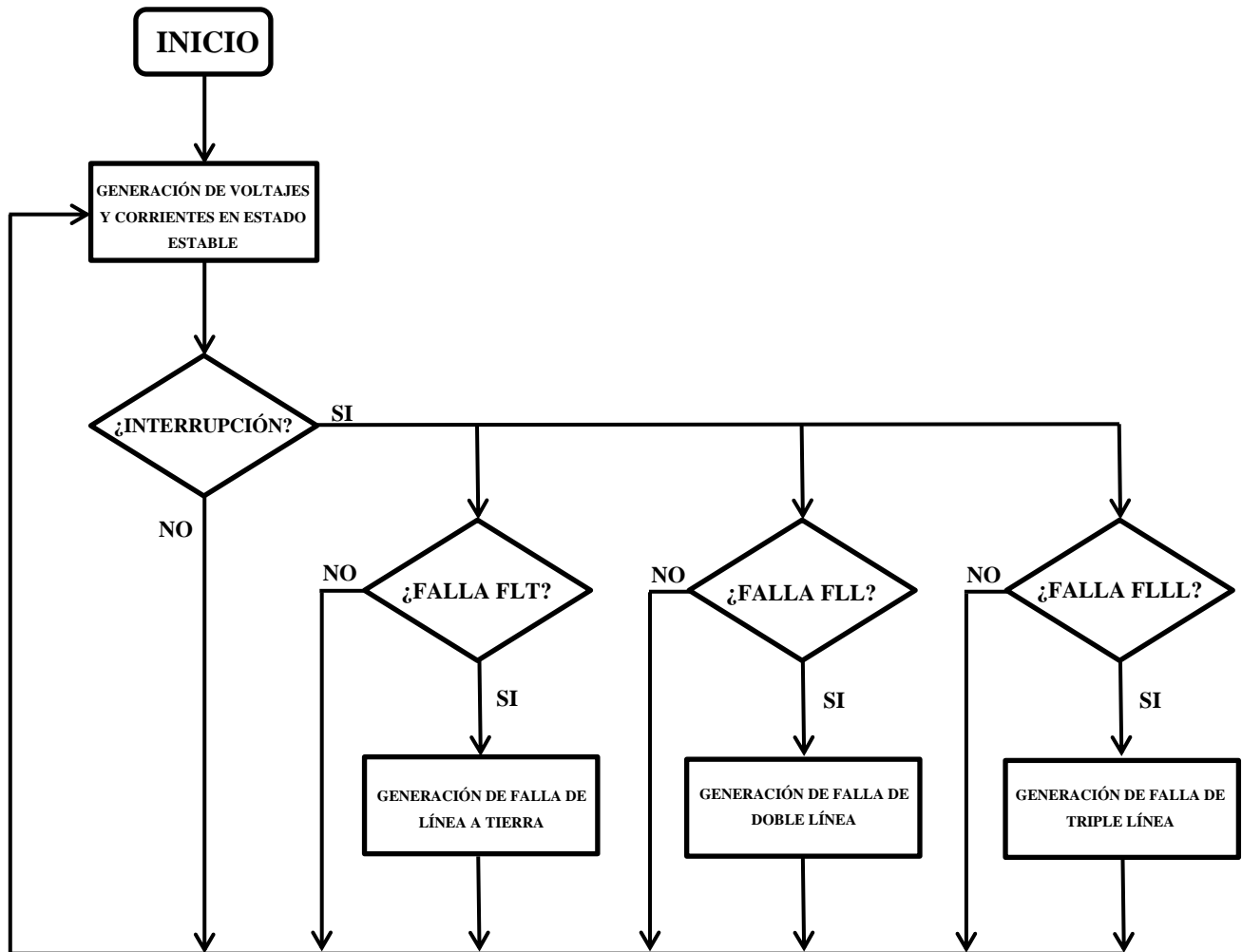


Fig. 4.28 Menú “SELECT FUNCTION” con la activación del modo “DEMO”.

### 4.3 DIAGRAMA DE OPERACIÓN DEL SIMULADOR.

A continuación se describe el diagrama de operación del simulador de fallas, como se puede apreciar en la figura 4.29.



**Fig. 4.29 Diagrama de flujo del simulador de fallas.**

La secuencia de operación del simulador se describe a continuación:

- El simulador de fallas inicia generando un periodo de la señal trifásica en voltajes y corrientes en estado estable.
- Si no se presenta una interrupción en el microcontrolador, el programa regresa al inicio y vuelve a generar otro periodo de la señal trifásica.

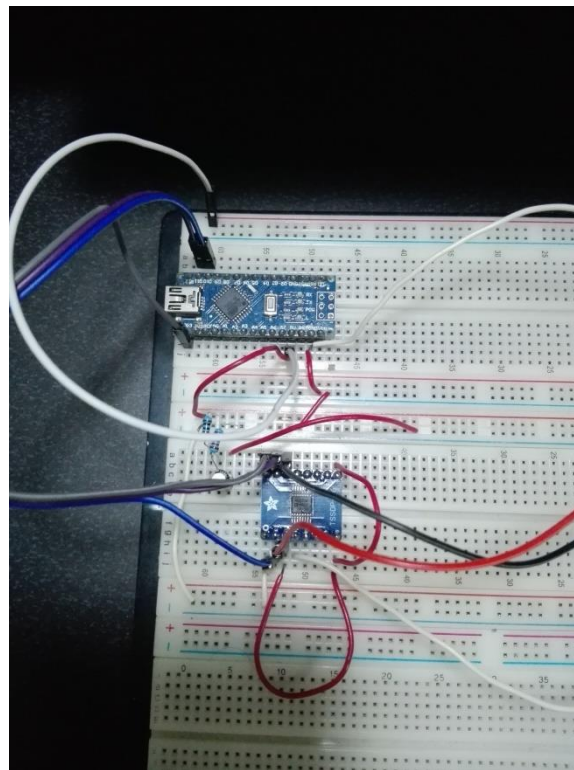
- El microcontrolador tiene activado tres interrupciones, una para Falla de Línea a Tierra, una para Falla de Doble Línea y la una para Falla de Triple Línea, para que en cualquier momento que se presente una interrupción se genere la falla deseada.
- Cuando se presenta una interrupción, el programa pasa a una rutina para generar la falla solicitada.
- Al terminar de generar la falla el programa regresa al inicio y vuelve a generar un periodo de la señal trifásica.
- Y vuelve a repetirse la misma secuencia.

Como se puede ver la lógica del programa es simple, ya que esta optimizado para que los ciclos de reloj que usan las instrucciones no produzcan interferencias con la generación de las señales.

#### 4.4 DESARROLLO DEL SIMULADOR.

Ya teniendo los oscilogramas a utilizar y la lógica del programa del simulador se pasa a la etapa de experimentación.

En primer lugar se realiza la conexión del Arduino NANO y el convertidor D/A AD5308 como se puede apreciar en la figura 4.30.



**Fig. 4.30 Montaje del Arduino NANO y el convertidor D/A.**

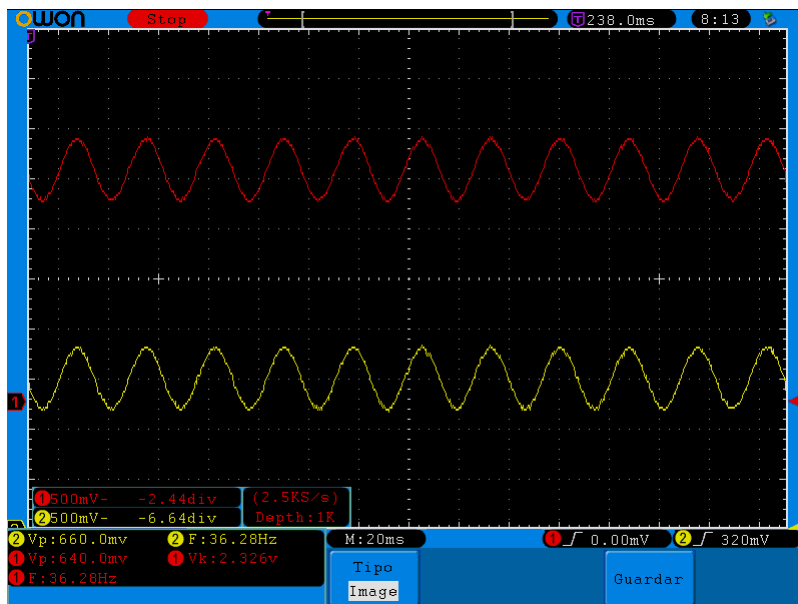
La primera prueba es generar una señal senoidal de 60 Hz para corroborar que el convertidor funcione al recibir la palabra de 16 bits con el dato y a cual salida va dirigido ese dato. Se realizó el programa en el ambiente de programación Arduino IDE[14], el lenguaje de programación de Arduino IDE es muy amigable y además cuenta con una librería para utilizar



el protocolo de comunicación serie SPI (Serial Peripheral Interface), con la cual solo es necesario definir unos parámetros para implementar la comunicación con el convertidor AD5308.

En el cuerpo del programa del Arduino se definió en una matriz 334 valores de un periodo de una señal senoidal y se programó para que se repitiera de forma infinita.

En la figura 4.31 se puede observar la generación de dos señales senoidales para comprobar que los datos se mandaron correctamente y a los canales deseados.



**Fig. 4.31 Señales generadas con el Arduino NANO y el convertidor AD5308.**

En las primeras pruebas realizadas se obtuvo una señal 25.40 Hz en cada uno de los seis canales del convertidor D/A. Se optimizó el software para que solo manejara las instrucciones necesarias, pero solo se logró alcanzar una frecuencia de máxima de 36.28 Hz por canal.

Como se puede apreciar está muy por debajo de la tolerancia mínima que se requiere para este proyecto.

Debido a que el Arduino NANO funciona con una velocidad de reloj de 16 MHz, se realizó una prueba con el mismo ATMEGA328P pero con una frecuencia de 20 MHz, que es la frecuencia máxima soportado por este tipo de microcontrolador.

Este cambio tuvo una mejora en la frecuencia de la señales senoidales pero solo alcanzó una frecuencia de 41.90 Hz.

Aunque se trató de modificar el cuerpo del programa y la librería del protocolo SPI, no se logró la frecuencia deseada, por lo que se determinó que se necesitaba una mayor frecuencia de reloj.

Debido a que el ATMEGA328P no puede funcionar a más frecuencia, se tomó la decisión de utilizar otra placa de desarrollo de la familia Arduino.

Investigando sobre otros modelos de la familia Arduino se encontró una con un microprocesador más potente, este modelo es el Arduino DUE, el cual cuenta con un microprocesador de 32 bits y con una frecuencia de reloj de 84 MHz, cinco veces más rápido comparado con el Arduino NANO que tiene 16MHz. A continuación se mencionan algunas de sus características[14].

**Características:**

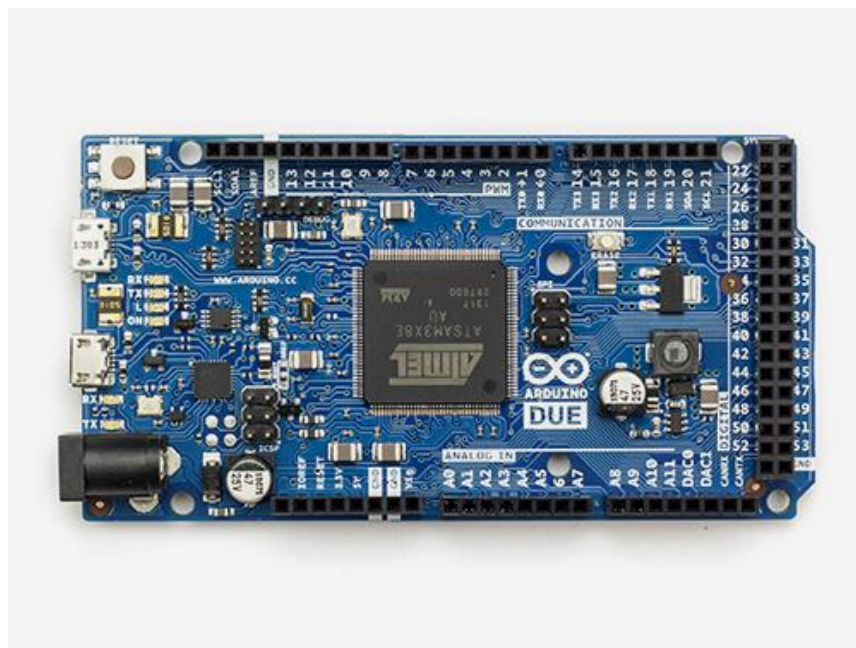
- Microcontrolador: AT91SAM3X8E.
- Voltaje de operación: 3.3V.
- Voltaje recomendado de entrada (pin Vin): 7-12V.
- Pines de entrada y salida digitales: 54 pines I/O, de los cuales 12 proveen salida PWM.
- Pines de entrada análogos: 12.
- Pines de salida análogos: 2.
- Corriente de salida total en los pines I/O: 130mA.
- Corriente DC máxima en el pin de 3.3V: 800mA.
- Corriente DC máxima en el pin de 5V: 800mA.
- Memoria Flash: 512 KB toda disponible para aplicaciones del usuario.
- SRAM: 96 KB (en dos bancos de: 64KB y 32KB).
- Velocidad de reloj: 84 MHz

Otra de las ventajas de esta tarjeta es que tiene 512Kb de memoria de programa, y eso permite tener suficiente espacio para almacenar los oscilogramas contra los 32 Kb de la tarjeta Arduino NANO.

Una ventaja del sistema Arduino, es que casi todos los programas realizados en ese entorno funcionan en placas con diferente microcontrolador o microprocesador, por lo tanto el programa inicial se migró a esta nueva plataforma sin ningún problema.

Solamente se tiene que tener cuidado con los voltajes de las entradas y salidas, ya que el Arduino NANO funcionan a 5V y en el Arduino DUE funcionan a 3.3V.

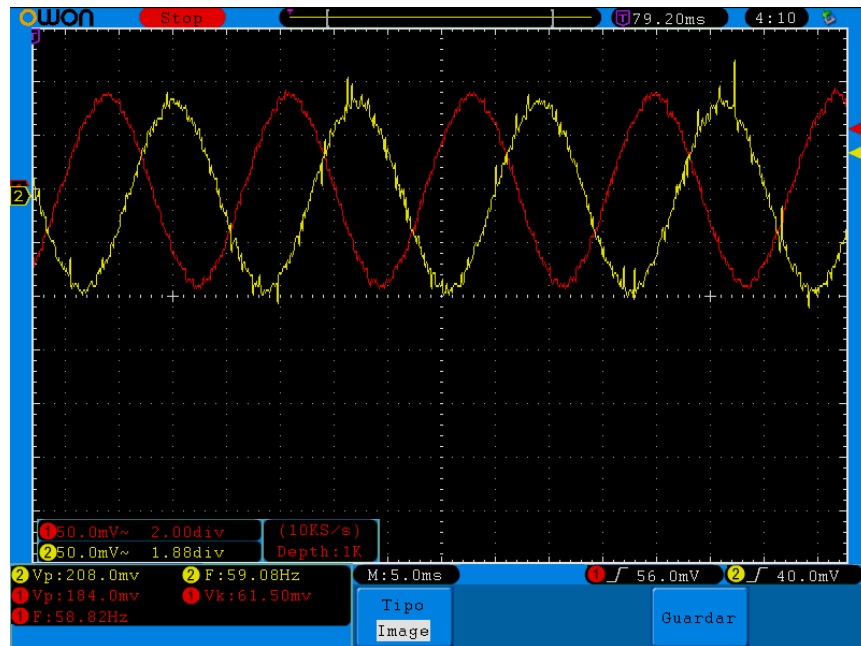
El uso de protocolo SPI es totalmente compatible con la tarjeta Arduino NANO, en la figura 4.32 se muestra la tarjeta Arduino DUE.



**Fig. 4.32 Tarjeta de desarrollo Arduino DUE.**

Cuando se conectó el Arduino DUE al convertidor D/A y unas pocas configuraciones al programa, se logró obtener las seis señales senoidales con una frecuencia de 59Hz, que representó una mejora importante con respecto de la otra tarjeta de desarrollo.

En la figura 4.33 podemos observar dos señales senoidales defasados  $120^\circ$  con una frecuencia de 59Hz.



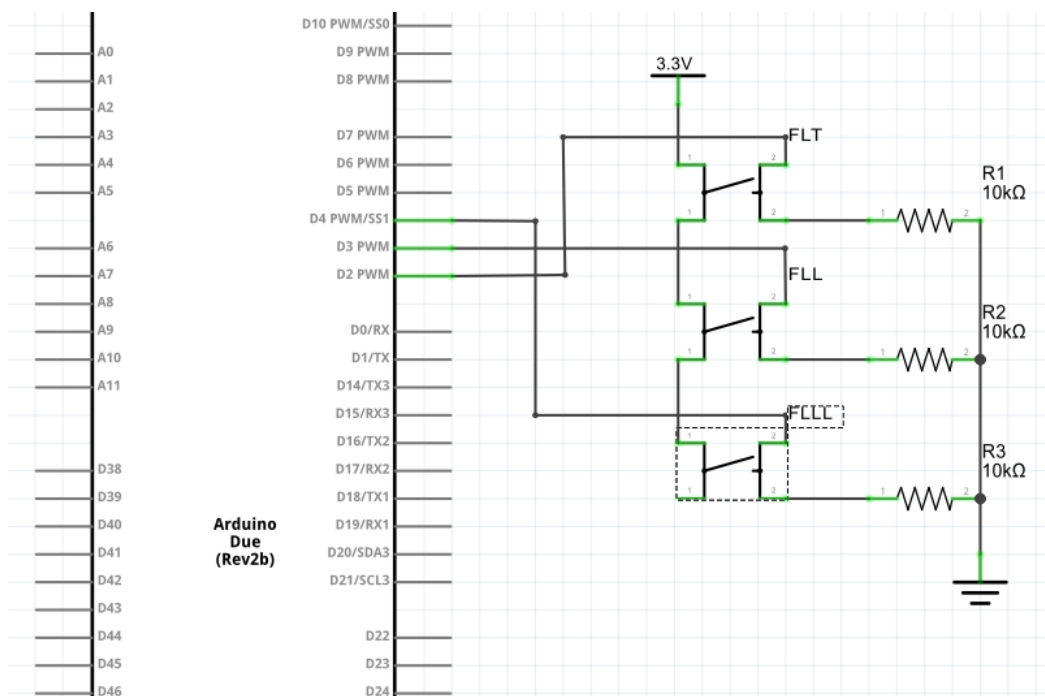
**Fig. 4.33 Señales senoidales defasadas  $120^\circ$  generadas con el Arduino DUE.**

Se revisaron las seis señales en las salidas del convertidor D/A comprobándose la correcta operación del programa.

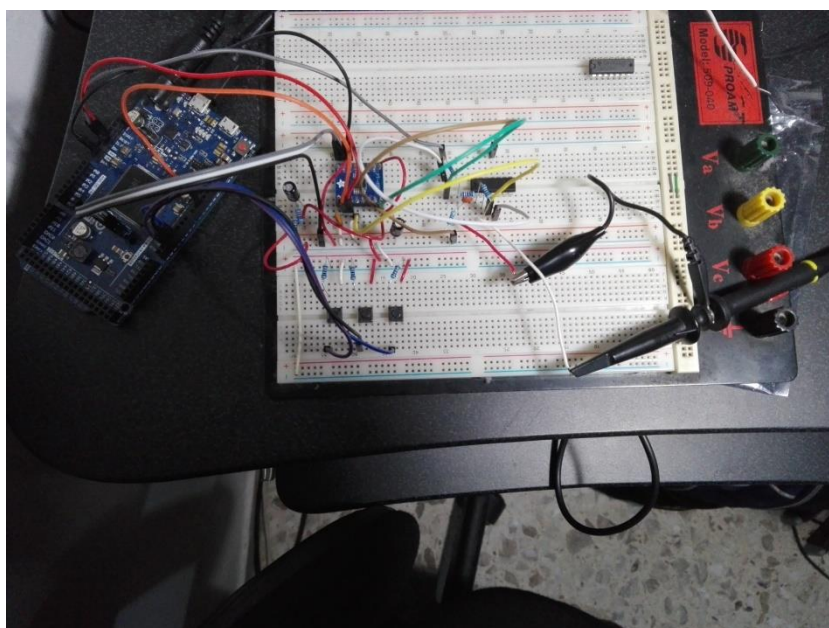
A continuación se procedió a la conexión de los botones de selección de las fallas, como se comentó, se utilizaron tres interrupciones del Arduino DUE. Los pines usados en el Arduino DUE para las interrupciones fueron:

- PIN 2 para Falla de Línea aTierra.
- PIN 3 para Falla de Doble Línea.
- PIN 4 para Falla de Tres Líneas.

Estos pines se conectaron cada uno con un interruptor y una resistencia, y en el programa se declararon estas interrupciones que se activarán al tener una transición de nivel bajo a nivel alto. La conexión se puede apreciar en la figura 4.34.



**Fig. 4.34** Conexión de los botones de selección de falla en el Arduino DUE.



**Fig. 4.35** Botones de selección de falla montados en la tablilla de experimentos.

En la figura 4.35 se muestra físicamente la conexión de los botones de selección de falla, cuando se presiona cualquiera de estos botones, el programa inicia una subrutina para graficar los oscilogramas de la falla seleccionada. Al terminar la subrutina de mostrar los oscilogramas de la falla regresa a inicio del programa, se vuelve a mostrar la señal trifásica en estado estable y en espera de que se vuelva a solicitar una falla.

En las salidas del convertidor D/A, los oscilogramas están montados en una componente de corriente directa, esto debido a que la fuente de alimentación del convertidor es de fuente simple, por lo tanto se necesita eliminar esa componente de directa y adecuar la señal a las magnitudes que requiere el analizador Fluke 434. Para este propósito se utilizaron amplificadores operacionales con filtros pasa altos para eliminar la componente de directa.

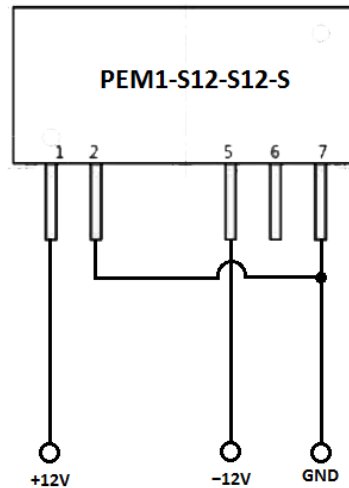
El Arduino DUE esta alimentado externamente con un fuente simple regulada de 12V, por lo que para tener una fuente simétrica de  $\pm 12V$  para alimentar a los amplificadores operacionales, se utilizó un convertidor de DC-DC de 12V de entrada y 12V de salida. La salida de voltaje se conectó en serie con los 12V de entrada y así se obtuvo una fuente simétrica de  $\pm 12V$ .

En la figura 4.36 se muestra el convertidor de DC-DC modelo PEM-S12-S12-S para tener una fuente simétrica, este convertidor proporciona una corriente máxima de salida de 83mA, aunque proporciona poca corriente es muy útil para alimentar los amplificadores operacionales ya que estos consumen poca corriente.



**Fig. 4.36 Convertidor de DC-DC modelo PEM1-S12-S12-S.**

A continuación se muestra en la figura 4.37 la conexión del convertidor PEM1-S12-S12-S para usarse como fuente simétrica.



**Fig. 4.37 Conexión del convertidor PEM1-S12-S12-S en fuente simétrica.**

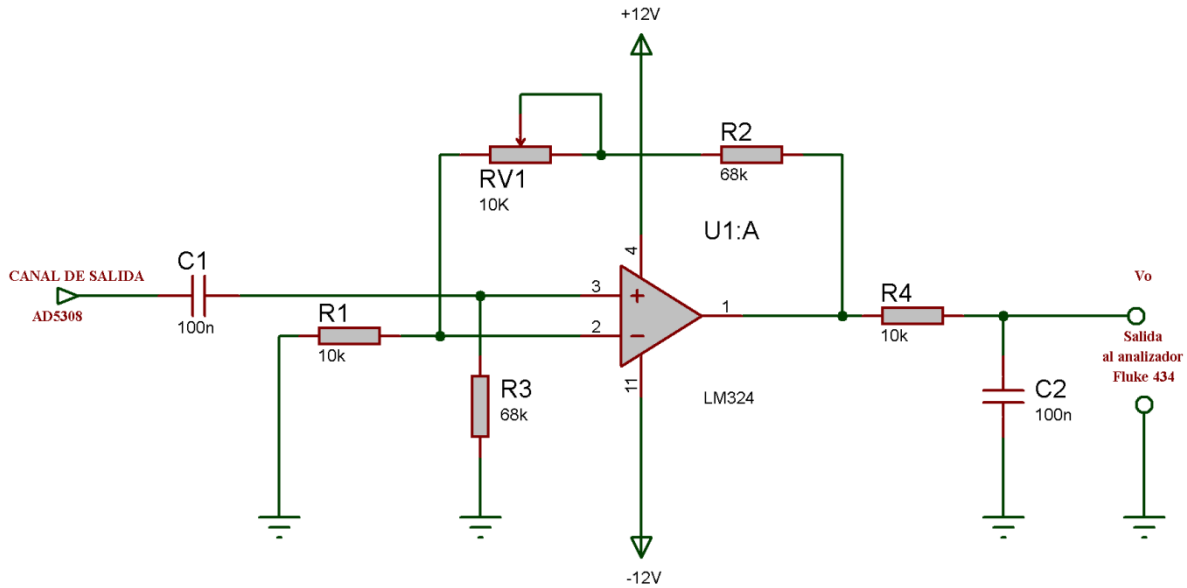
Para la adecuación de las señales de salida del convertidor D/A se utilizó el amplificador operacional LM324, el cual contiene cuatro amplificadores en un mismo encapsulado. La configuración que se utilizó en el amplificador fue la de “Amplificador No Inversor”, y a la entrada del amplificador operacional se le puso un filtro pasa-altos para eliminar la componente de directa[15].

De acuerdo a la fórmula de filtro pasa-altos:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{Ec.4.1}$$

Se propusieron los valores del capacitor y de la resistencia para que se eliminara la componente de directa, recordando que la componente de directa tiene 0Hz, por lo cual solo se necesita establecer que pase una frecuencia de unos cuantos Hertz para que no sea débil la señal senoidal.

Los valores propuestos para el capacitor fueron de  $0.1\mu\text{F}$  y una resistencia de  $68\text{K}\Omega$ , para permitir pasar frecuencias a partir de  $24.40\text{ Hz}$ . A continuación se muestra en la figura 4.38 la etapa de filtrado y amplificación para las señales de voltaje hacia el analizador.



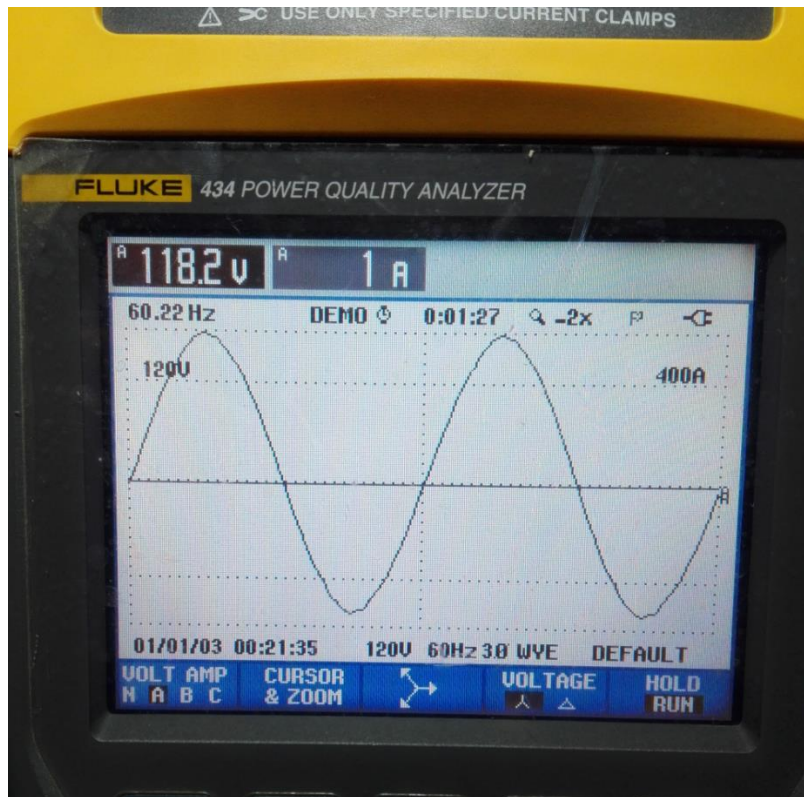
**Fig. 4.38 Diagrama del circuito de amplificación para las señales de voltaje.**

En la salida del amplificador operacional tiene un filtro pasa-bajos que permite eliminar las señales de ruido debido a las conversiones de la señal digital a analógica, como se puede observar en la figura 4.33.

Para este filtro en la salida del amplificador operacional la frecuencia de corte es a partir de  $159.15\text{ Hz}$ . Con esto se tiene una señal nítida de la corriente alterna de  $60\text{ Hz}$ .

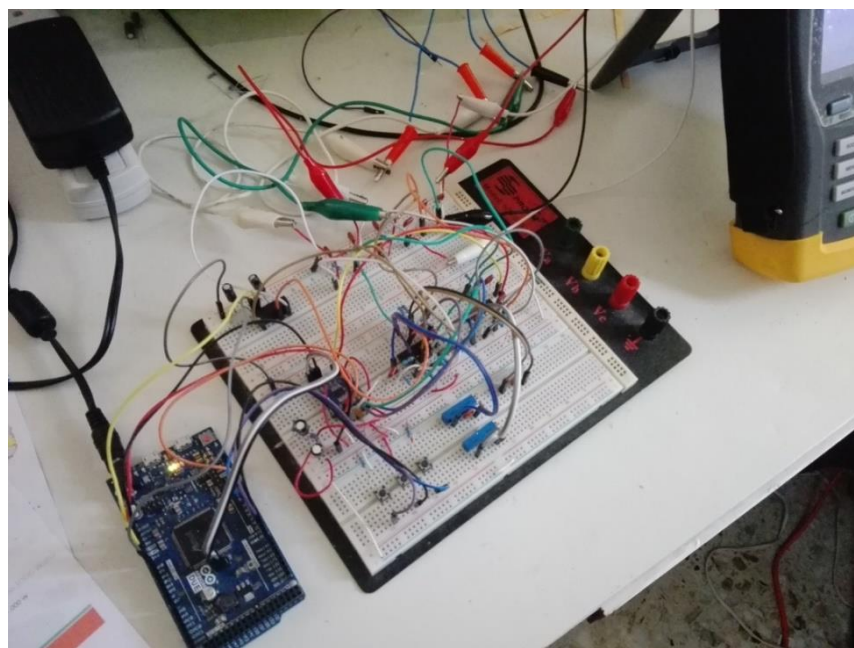
Como se puede observar en la figura 4.39, se tiene la señal senoidal en la función osciloscopio del analizador Fluke 434, con una frecuencia dentro de la tolerancia de los  $60\text{ Hz}$  y sin presencia de ruido de alta frecuencia en la señal. Debido a que señal generada por el convertidor D/A sin la componente de directa era mucho menor a los  $0.76\text{Vrms}$  que se necesitan en el analizador era necesario amplificarlos y con el potenciómetro realizar un ajuste fino de la magnitud de la señal de voltaje.





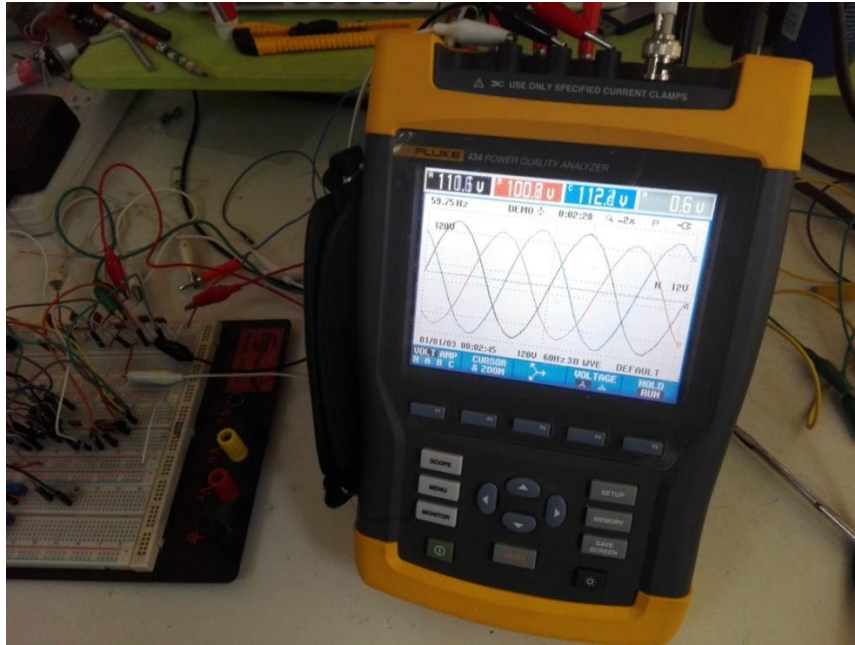
**Fig. 4.39** Señal de voltaje visto en el analizador Fluke 434.

Al tener excelente resultado el circuito se hizo lo mismo para las siguientes fases.



**Fig. 4.40** Tablilla de experimentos con las 3 fases de voltajes.

En la figura 4.40 se observa los tres circuitos para las fases en voltaje, y en la figura 4.38 se puede ver las tres fases en la pantalla del analizador defasadas  $120^\circ$  en estado estable.

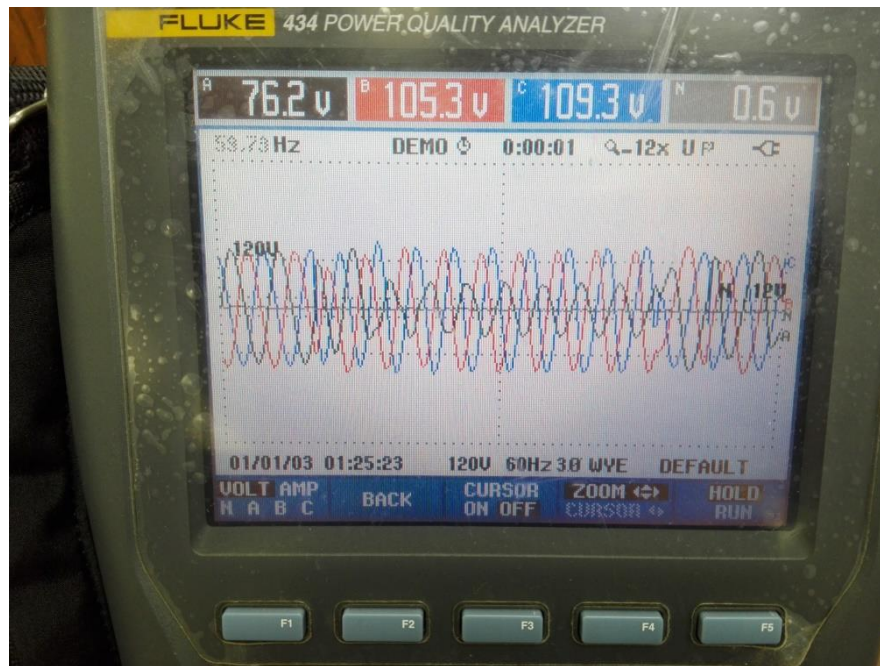


**Fig. 4.41** Señal trifásica en voltaje generada por el simulador.

Ya teniendo el circuito para adecuar las señales de los oscilogramas a los requerimientos del analizador, se procedió a probar los oscilogramas de las fallas en la parte de voltajes de fase. Para verificar que los oscilogramas generados por el simulador y los vistos en el analizador coincidan con las simulaciones.

Para poder revisar los oscilogramas debido a que se despliegan en fracciones de segundo, se utilizó la tecla F5 que es la para la función “HOLD”, con esto podemos congelar la imagen en pantalla y revisar el oscilograma en la pantalla.

En la figura 4.42 podemos observar la prueba de los botones del selector de fallas y los oscilogramas en voltajes de fase visto en la pantalla de analizador.



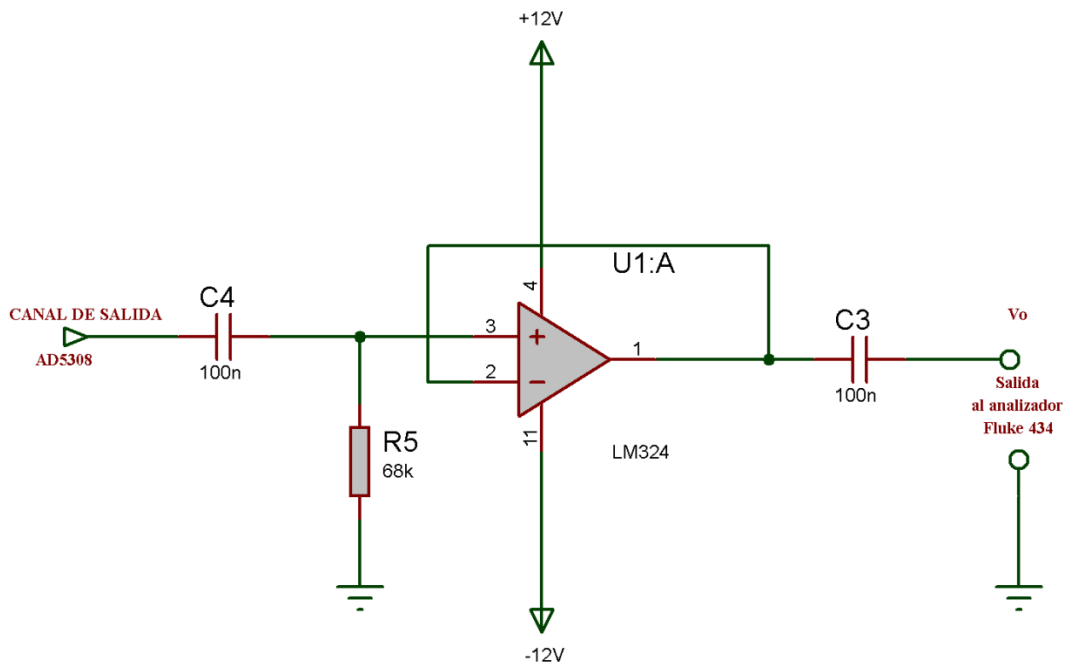
**Fig. 4.42** Oscilograma de voltajes de fase.

Ya habiendo comprobado que el oscilograma mostrado en pantalla coincide con el simulado en ATPDraw, se procedió a armar el circuito para las señales de corriente por fase.

La etapa que corresponde a corrientes de fase también son voltajes, recordando que las pinzas amperimétricas del analizador proporcionan una señal de voltaje y dicho voltaje es representado en el instrumento como una corriente.

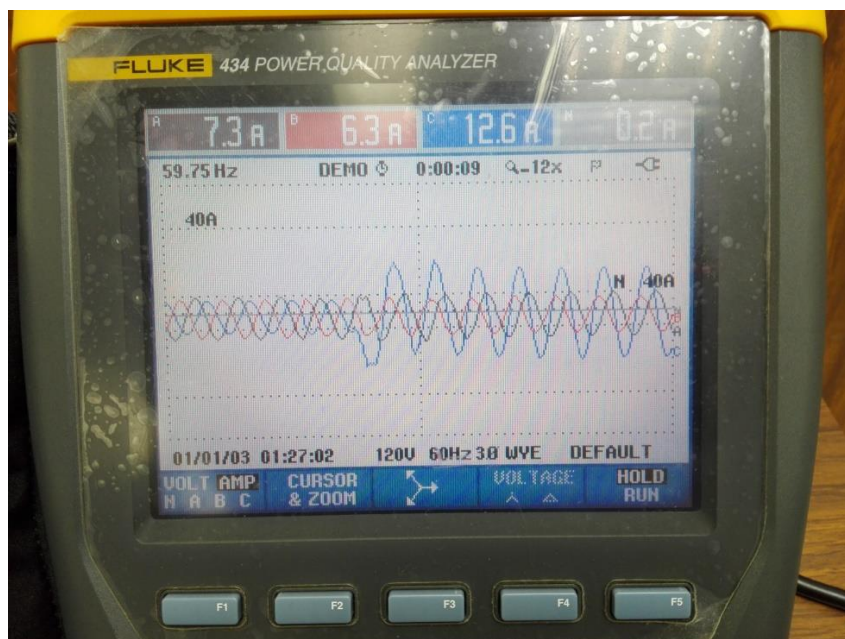
En esta etapa no hubo necesidad de amplificar la señal, solamente se eliminó la componente de directa y las señales de alta frecuencia. Por lo que el amplificador operacional se utilizó en la configuración de seguidor.

En la figura 4.43 se puede ver el diagrama de la etapa para las señales de corrientes de fase.



**Fig. 4.43 Diagrama del circuito de amplificación para las señales de corriente.**

En la figura 4.44 se observan las señales de corrientes de fase vistas en el analizador para comprobar que sean similares a las simuladas.



**Fig. 4.44 Señales de corriente vistas en el analizador Fluke 434.**



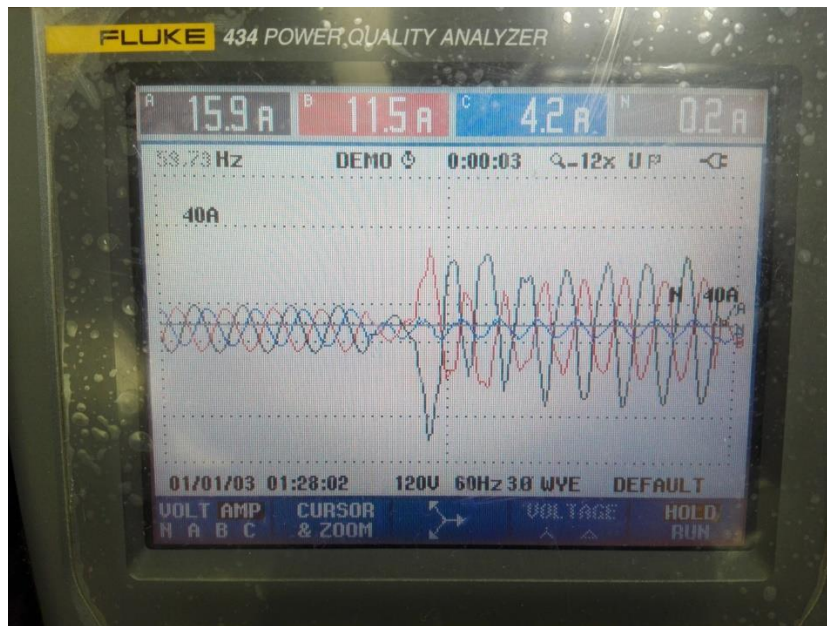
Se pudo comprobar que el oscilograma mostrado en la pantalla coincide con las corrientes de fase simuladas en ATPDraw. Los oscilogramas de voltajes y corrientes de fase de las figuras anteriores corresponden a la falla de línea a tierra, por lo que se realizó la prueba con el oscilograma de otra falla.

En la figura 4.45 se observa el oscilograma de voltaje de fase de una falla de doble línea, se pudo reproducir esta señal sin ningún problema y muy similar a la simulada en ATPDraw.



**Fig. 4.45 Oscilograma de falla de doble línea correspondiente a voltajes de fase.**

Igualmente en la figura 4.46 se puede observar la gráficas que corresponde a la falla de doble línea en corrientes de fase, también las gráficas mostradas en el analizador son muy similares a las de las simulaciones.



**Fig. 4.46** Oscilograma de falla de doble línea correspondiente a corrientes de fase.

Con la parte experimental terminada se procedió a armar el prototipo en pcb y colocarlo en una caja, se hicieron los cables con sus correspondientes conectores, se fabricaron cuatro cables con conectores “banana” para las señales de voltaje de fase y también tres cables coaxiales con conectores BNC para las corrientes de fase.



**Fig. 4.47** Vista superior del simulador de fallas de líneas eléctricas.

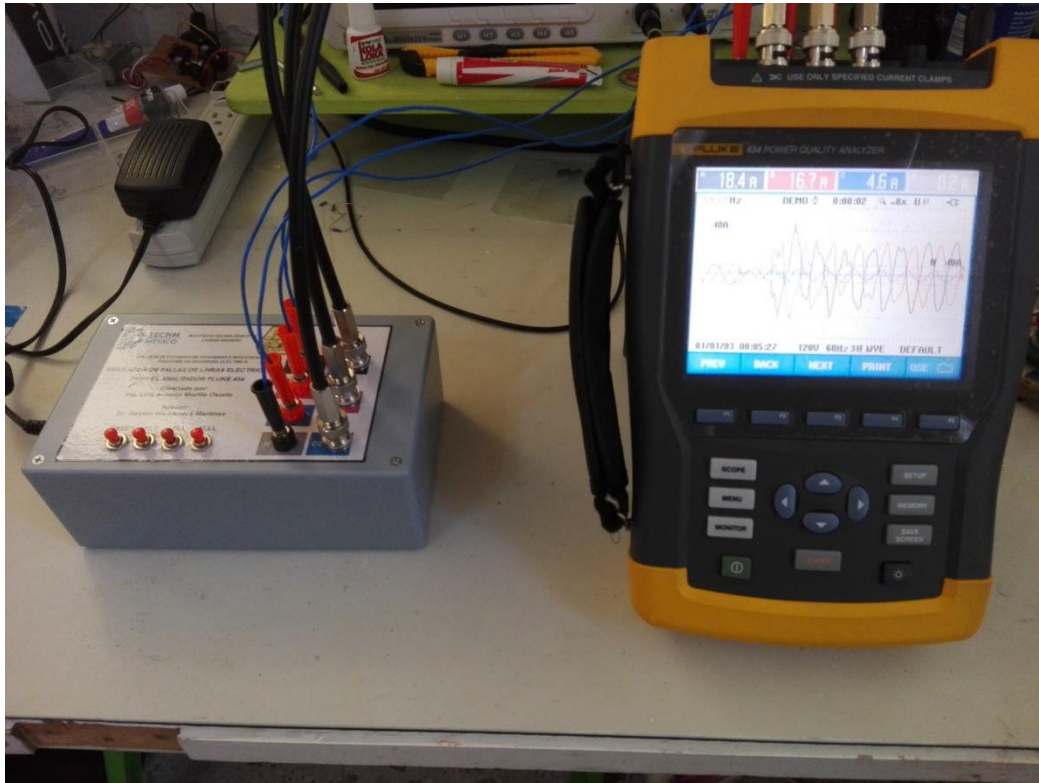
En la figura 4.44 se puede observar el tablero del simulador de fallas con los botones de selección de fallas, también con sus correspondientes conectores hembra para los voltajes y corrientes de fase.

A continuación se muestran imágenes del simulador ya armado y conectado al analizador Fluke 434.



**Fig. 4.48 Vista superior del simulador.**

En la figura 4.48 se muestra la vista superior del simulador de fallas donde se pueden observar los interruptores que activan las fallas, las terminales para las señales de voltajes y las señales de corrientes.



**Fig. 4.49** Simulador de Fallas de Líneas Eléctricas conectado al analizador Fluke 434.

En la figura 4.49 se observa el simulador conectado al analizador Fluke 434 y generando una falla eléctrica.



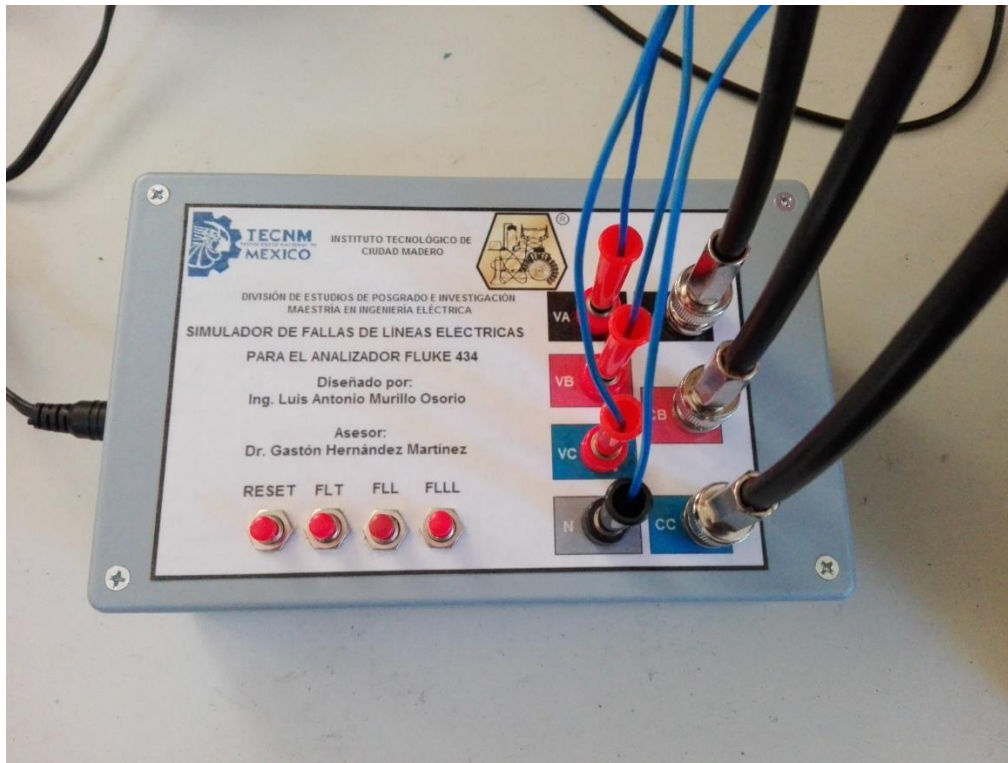


Fig. 4.50 Simulador de fallas con sus cables para voltajes y corrientes de fase.

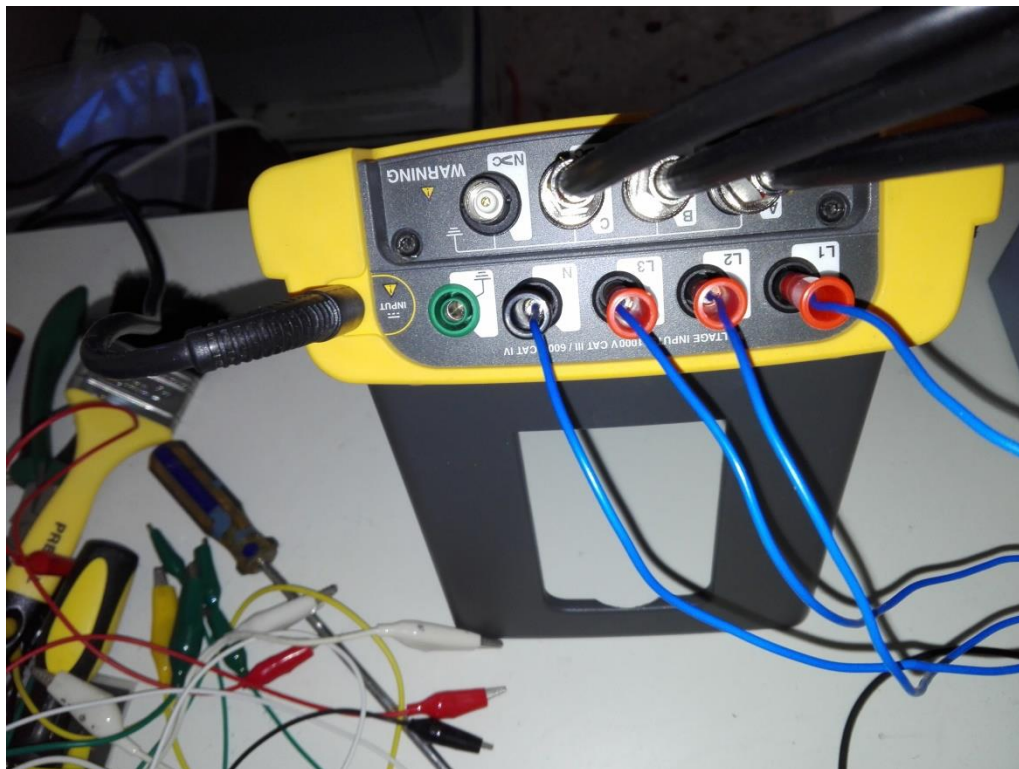


Fig. 4.51 Vista posterior de analizador con los cables del simulador.

## **REFERENCIAS**

[12] <http://arduino.cl/arduino-nano/>

[13] AD5308 Datasheet

[14] <http://arduino.cl/arduino-due/>

[15] Circuitos Analógicos Aplicados. Juan José González de la Rosa.

# *Capítulo*

5

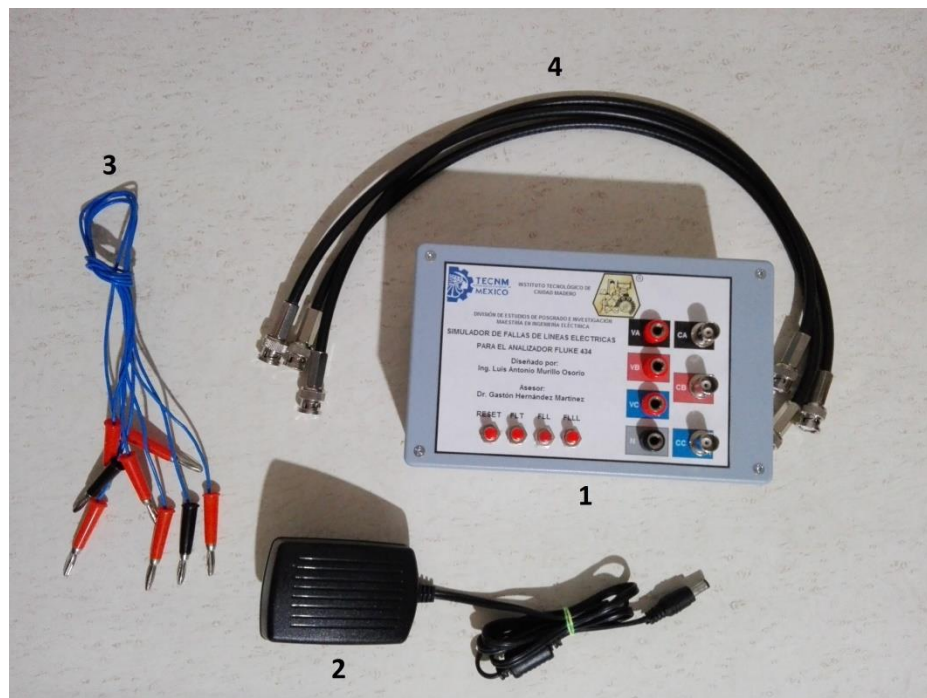
---

## **Resultados**

## 5.1 CASOS DE ESTUDIO.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del simulador de fallas desarrollado en esta tesis.

En la figura 5.1 se observa el simulador de fallas de líneas eléctricas con sus accesorios.



**Fig. 5.1 Simulador de Fallas de Líneas Eléctricas con sus accesorios.**

El simulador consta de las siguientes partes:

1. Simulador de Fallas de Líneas Eléctricas.
2. Fuente de alimentación de 12V regulada.
3. 4 cables “Banana” para señales de voltaje.
4. 3 cables BNC para señales de corriente.

A continuación se muestran los oscilogramas simulados en ATPDraw-EMTP y los oscilogramas generados por el simulador observados en el analizador Fluke 434.

a).- Falla Línea a Tierra.

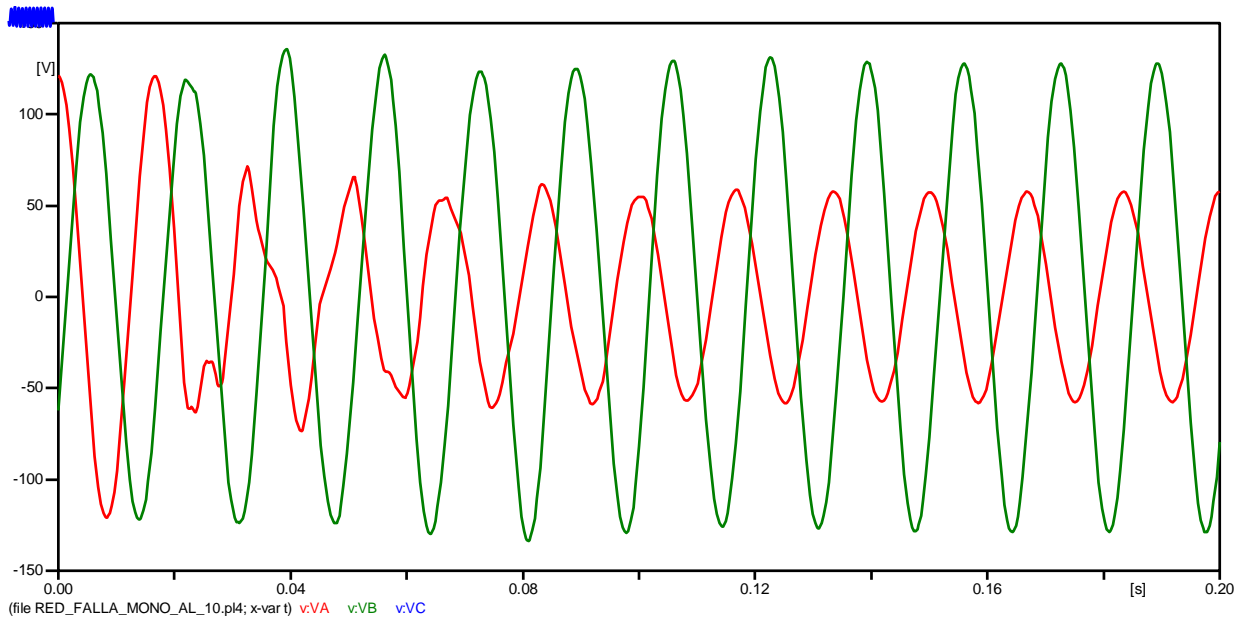


Fig. 5.2 Oscilograma de Falla de línea a tierra de voltajes de fase simulado en ATPDraw.

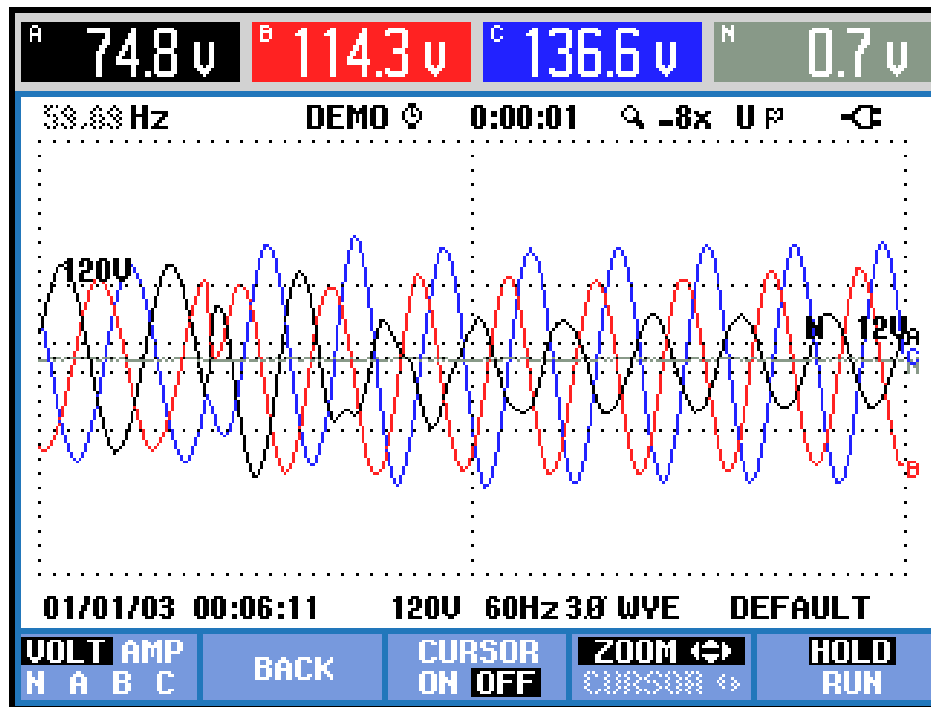
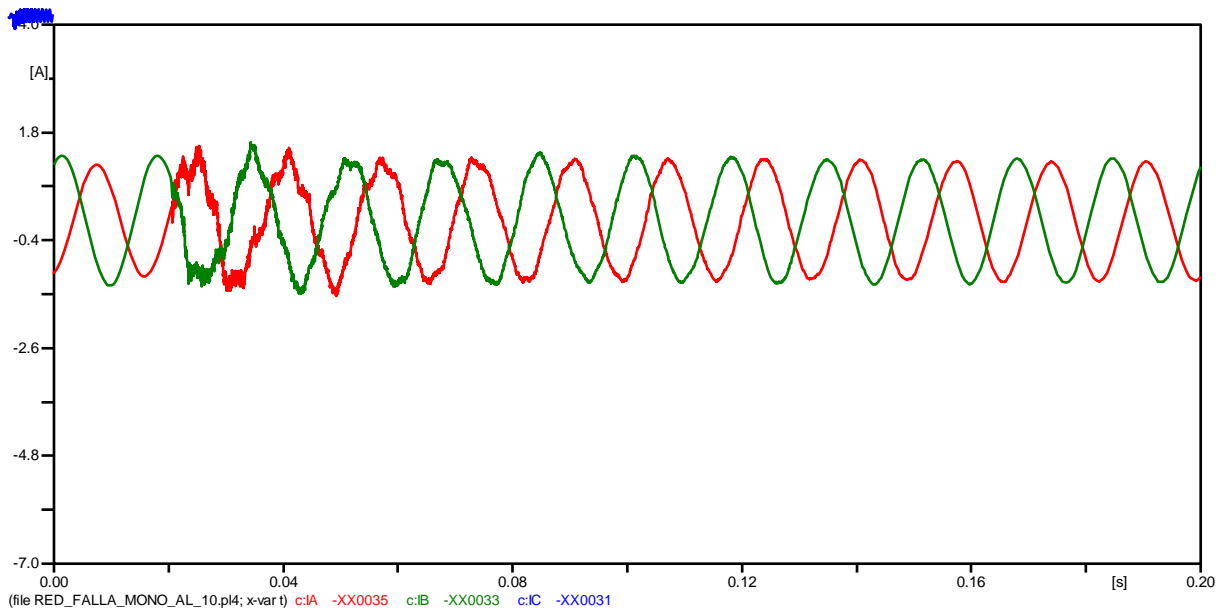
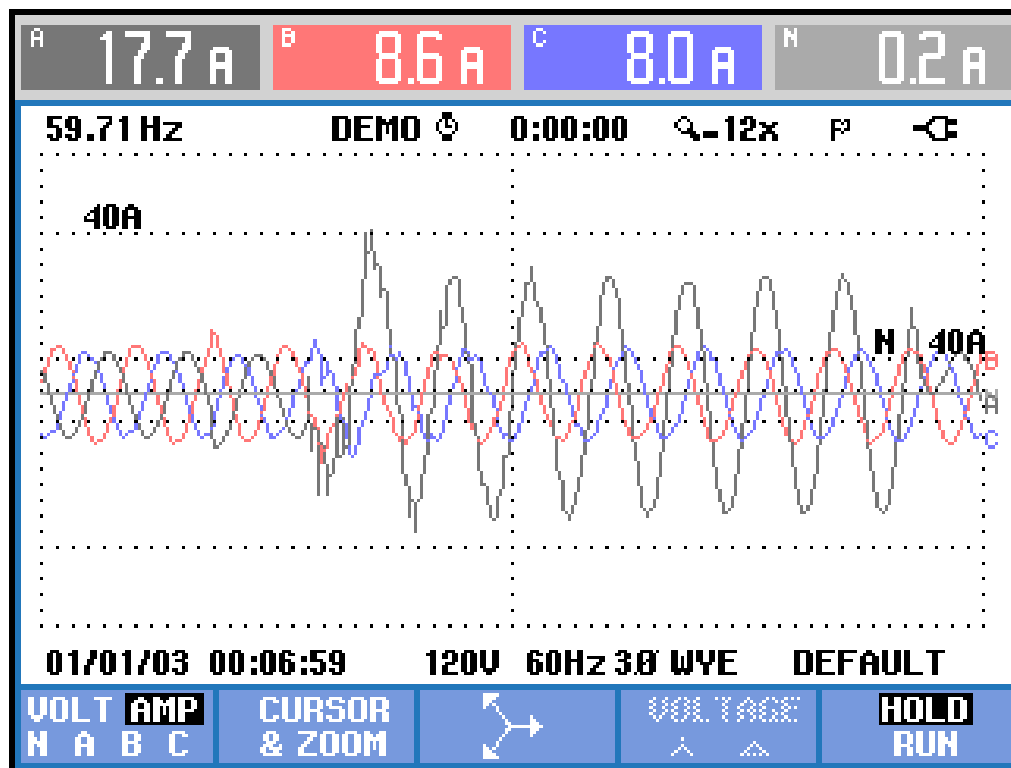


Fig. 5.3 Oscilograma de Falla de línea a tierra de voltajes de fase visto en el analizador.



**Fig. 5.4 Oscilograma de Falla de línea a tierra en corrientes de fase simulado en ATPDraw.**



**Fig. 5.5 Oscilograma de Falla de línea a tierra de corrientes de fase visto en el analizador.**

b).- Falla de dos Líneas.

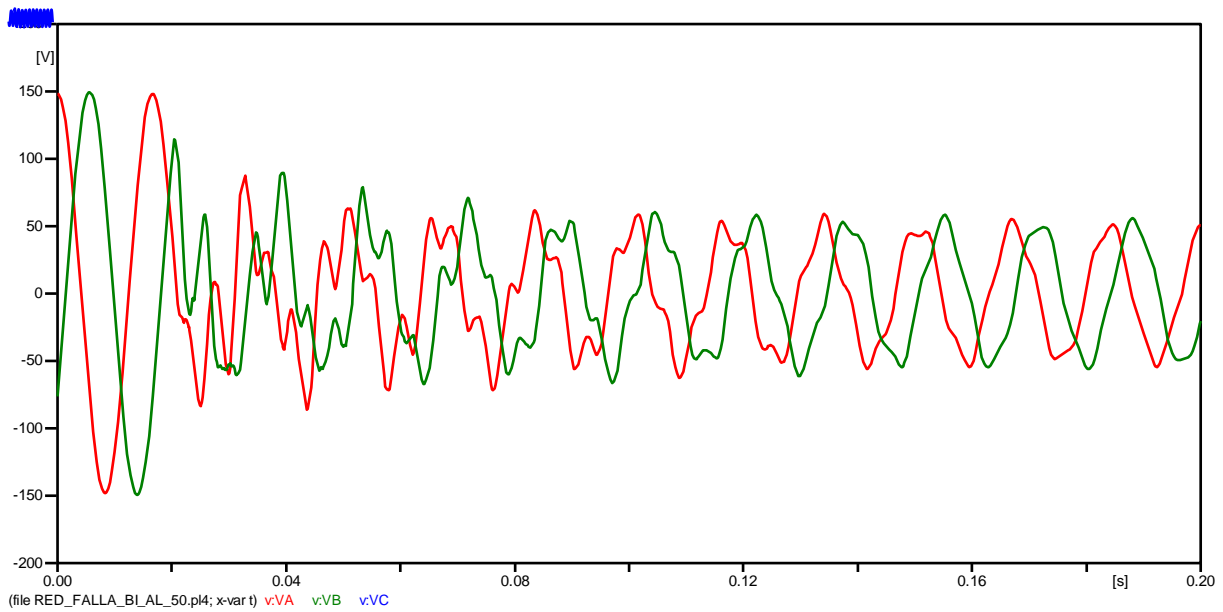


Fig. 5.6 Oscilograma de Falla de doble línea de voltajes de fase simulado en ATPDraw.

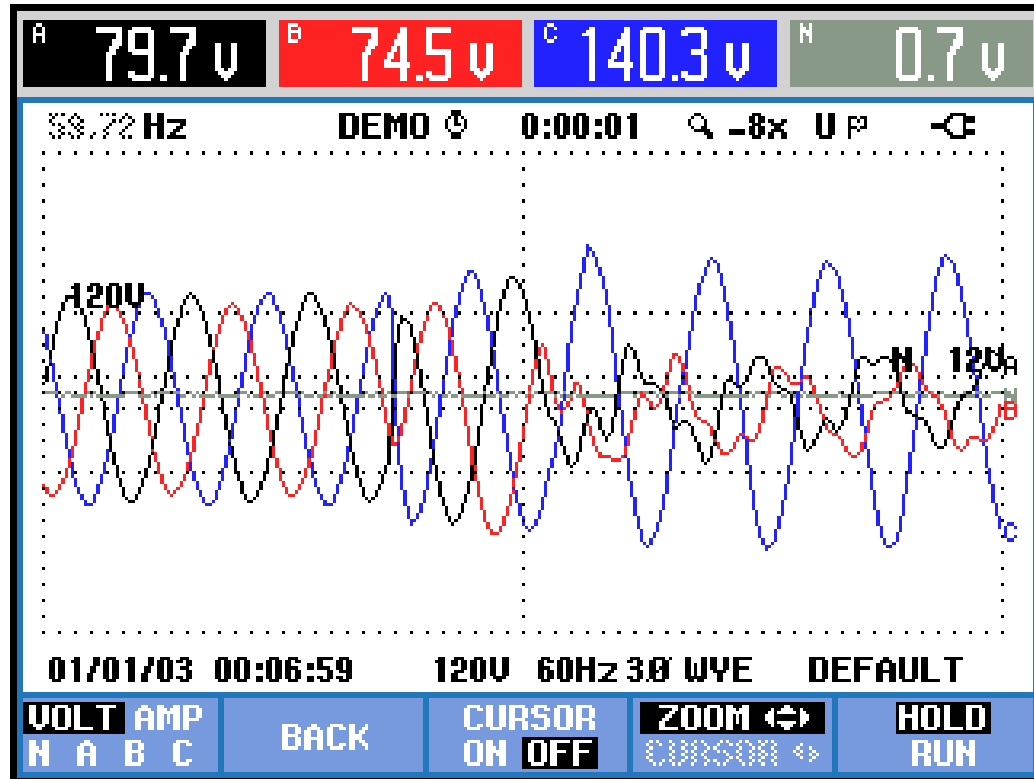


Fig. 5.7 Oscilograma de Falla de doble línea de voltajes de fase visto en el analizador.

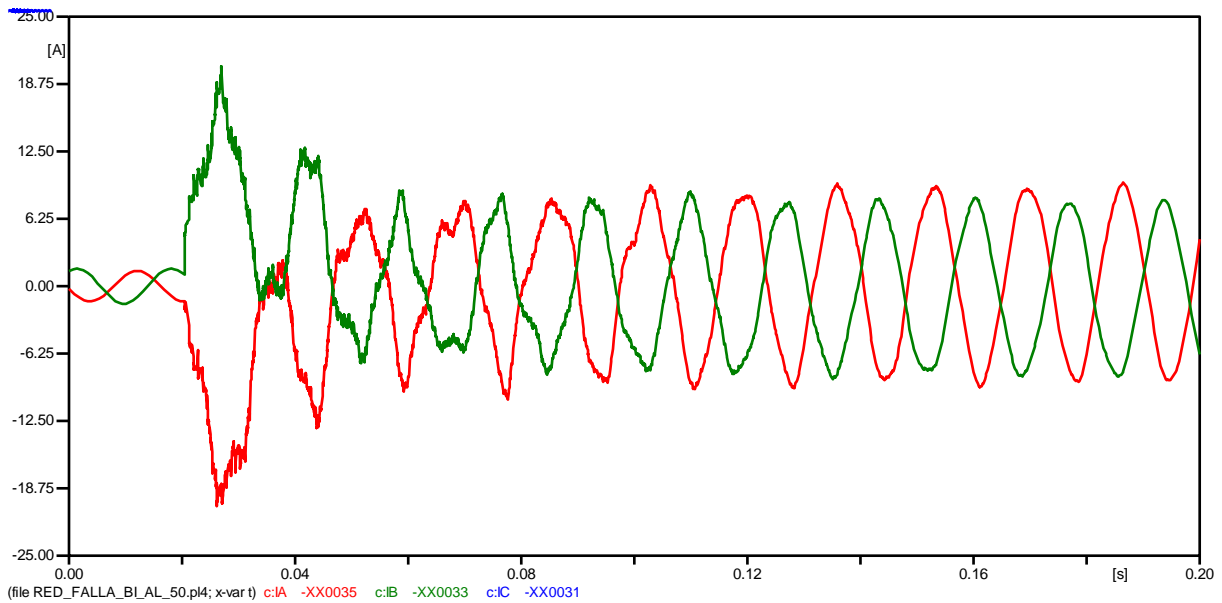


Fig. 5.8 Oscilograma de Falla de doble línea de corrientes de fase simulado en ATPDraw.

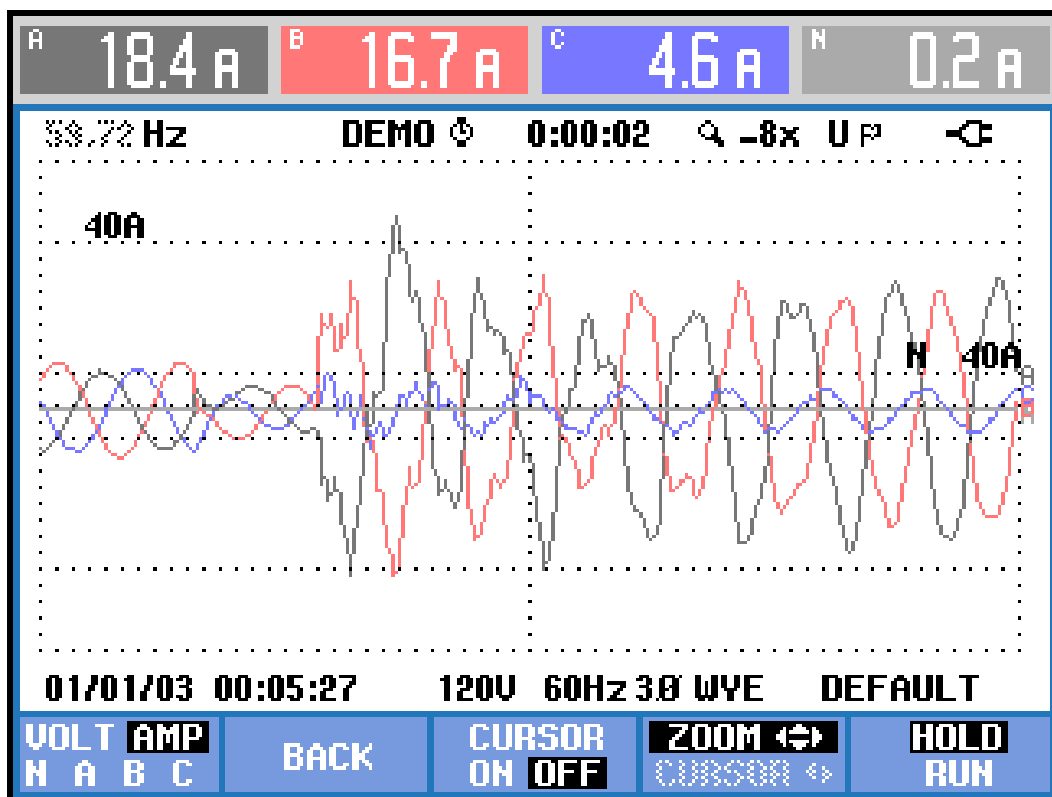


Fig. 5.9 Oscilograma de Falla de doble línea de corrientes de fase visto en el analizador.



c).- Falla de tres Líneas.

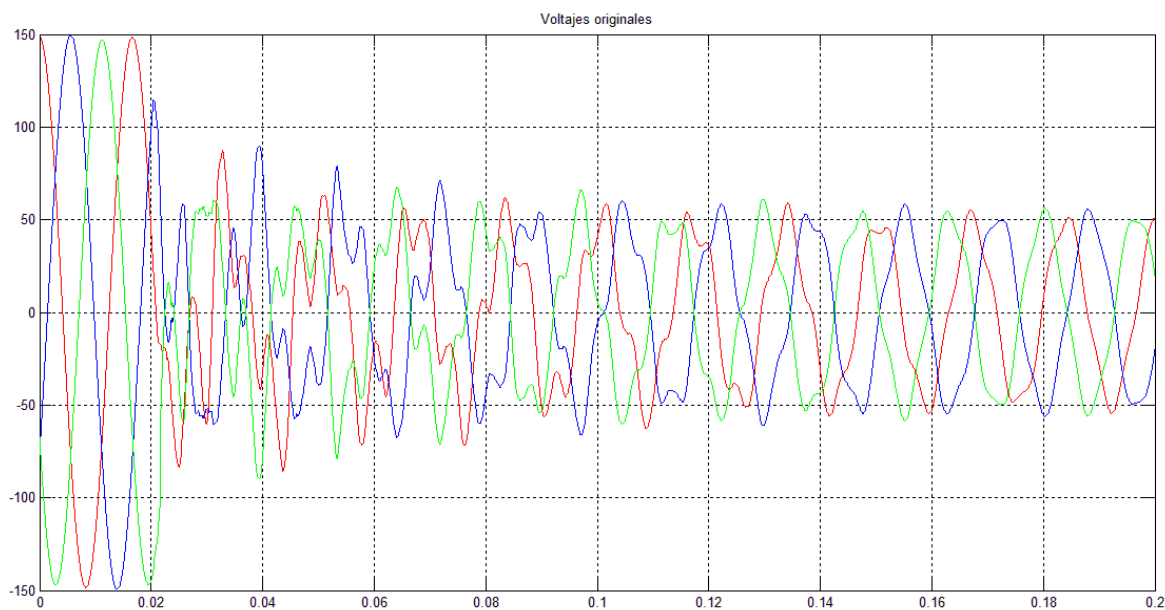


Fig. 5.10 Oscilograma de Falla de triple línea de voltajes de fase simulado en ATPDraw.

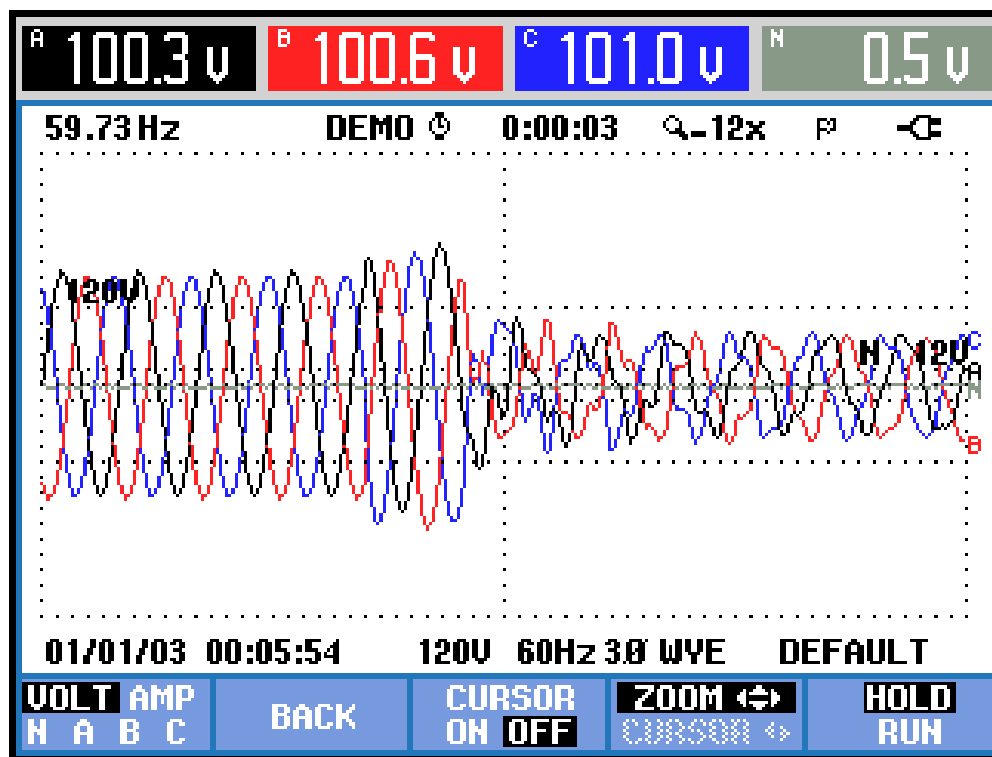


Fig. 5.11 Oscilograma de Falla de triple línea de voltajes de fase visto en el analizador.

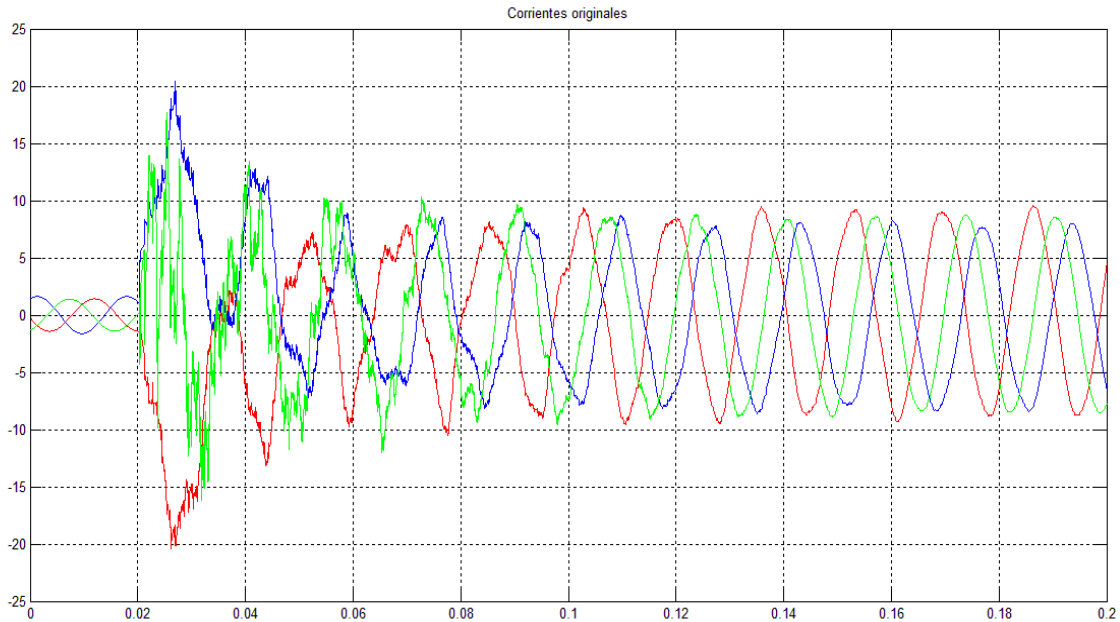


Fig. 5.12 Oscilograma de Falla de triple línea de corrientes de fase simulado en ATPDraw.

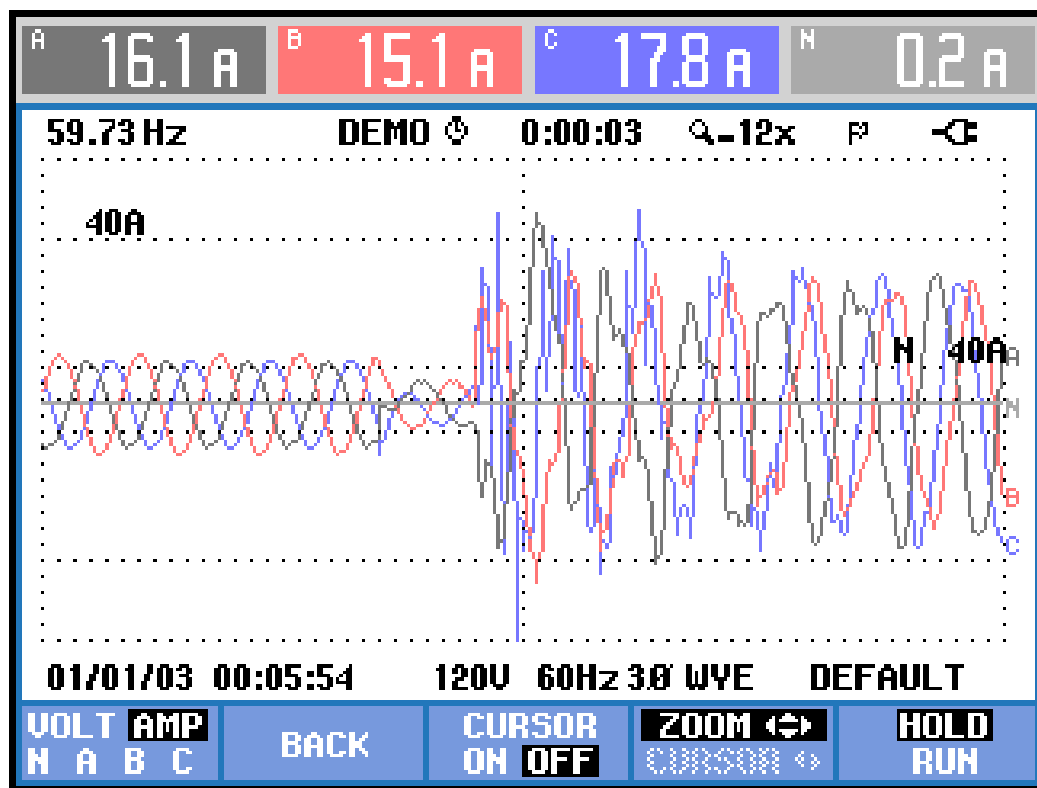


Fig. 5.13 Oscilograma de Falla de triple línea de corrientes de fase visto en el analizador.

Con las imágenes mostradas comparando los oscilogramas obtenidos en ATPDraw y los generados por el simulador, se puede observar que tienen una gran similitud.

Los pasos a seguir para utilizar el simulador son:

1. Encender el analizador Fluke 434.
2. Seleccionar el Modo Demostración.
3. Oprima el botón “SCOPE” del analizador para utilizar el osciloscopio.
4. Conectar los cables “Banana” de color rojo en VA, VB y VC en el simulador, y en el analizador en L1, L2 y L3.
5. Conectar el cable “Banana” de color negro en N en el simulador y en el analizador.
6. Conectar los cables BNC en CA, CB y CC en el simulador y en el analizador en A, B y C.
7. Conecte la fuente regulada de 12V en el simulador.
8. Si en caso que no aparezca la señal trifásica en el osciloscopio del analizador, oprima el botón “RESET” del analizador.
9. Cuando se quiera observar alguna de las fallas (FLT, FLL y FLLL), presione la falla que quiera observar y al mismo tiempo presione el botón F5 con la leyenda “HOLD” en el analizador para “capturar” la imagen del oscilograma de la falla.
10. Si se presiona de nuevo el botón “HOLD”, se vuelve a visualizar la señal trifásica en estado estable.
11. En caso de querer visualizar la misma u otra falla repita los pasos 9 y 10.

# *Capítulo*

6

---

## **Conclusiones.**

## **6.1 CONCLUSIONES.**

El objetivo de la presente tesis de diseñar un simulador de fallas ha sido satisfactorio, como se pudo constatar en los capítulos 4 y 5 fue posible adecuar los oscilogramas obtenidos de un sistema eléctrico en pequeñas señales de voltaje totalmente seguras para el usuario, de tal forma que se puedan mostrar en analizador Fluke 434 sin provocar daños y repetirlas cuantas veces se requiera.

Se pudo comprobar que utilizar un sistema de generación de fallas de tipo digital fue la mejor opción, ya que permite replicar con buena resolución los oscilogramas, que se obtienen de un software de simulación como lo es ATPDraw.

Otra gran ventaja fue no utilizar voltajes altos, que puedan dañar componentes. También tratar de replicar las fallas con cortos circuitos reales, estos no hubieran sido posibles dado que se tenían que considerar muchos factores.

Y tratar de igualar esas fallas de manera analógica hubiera resultado imposible, además que al provocar las fallas se hubieran tenido calentamiento en conductores y daños en los elementos que se fueran a utilizar. Eso hubiera provocado que los oscilogramas fueran aún más difíciles de igualar a las simulaciones.

La flexibilidad de este simulador permite con el mismo circuito poder simular otras fallas eléctricas con solo cambiar los datos de los oscilogramas, sin tener que modificar el circuito.

También se logró el objetivo de ser seguro para el usuario, ya que los voltajes generados son pequeños.

Este proyecto fácilmente puede tener más alcances que permitan otros usos, ya sea para la enseñanza o para utilizar en investigación.

Y como punto final, aunque el simulador “genera” una señal trifásica, el simulador utiliza una fuente simple de 12Vcd.

## 6.2 APORTACIONES.

Las aportaciones realizadas fueron:

- La realización de un software en MATLAB, con el cual se convirtieron en datos digitales de 8 bits los oscilogramas obtenidos en ATPDraw-EMTP. Y se obtienen los archivos de cada componente del oscilograma (voltajes y corrientes) en formato TXT.
- El diseño y armado de un simulador de fallas para ser utilizado en el analizador de calidad de la energía Fluke 434.

## 6.3 TRABAJOS FUTUROS.

Este prototipo puede ser complementado con un lector de tarjetas SD, ya que los oscilogramas que se utilizaron fueron grabados en el cuerpo del programa. Por lo tanto para poder utilizar otros se tiene que reescribir el programa del Arduino DUE.

Para hacer el proceso más simple se pueden grabar los oscilogramas en formato TXT en la tarjeta SD y que el prototipo lea la información de la tarjeta.

Otra mejora es realizar una etapa de potencia para poder conectarlo a relevadores de protección, para probar esquemas de simulaciones y análisis en los relevadores.

# *Apéndice*

A

---

## **Programas en MATLAB.**

```

%Este programa escala un gráfico de ATPDraw para mandarlo al simulador
Fluke 434

%Falla de línea a tierra correspondiente al archivo
%RED_FALLA_MONO_AL_10.PL4
clc
close all
clear all

%Carga de archivos de voltajes y corrientes
load('FALLA_LINEA_A_TIERRA.MAT');
load('FALLA_LINEA_A_TIERRA_CORRIENTES.MAT');

%Variables
ampI=10; %Porcentaje de amplificación para las señales
de corriente

%VOLTAJE FASE A
VA1=vVa*0.1; %Aquí se reducen los valores
VA1=round(VA1); %Aquí se redondean los valores

%VOLTAJE FASE B
VB1=vVb*0.1; %Aquí se reducen los valores
VB1=round(VB1); %Aquí se redondean los valores

%VOLTAJE FASE C
VC1=vVc*0.1; %Aquí se reducen los valores
VC1=round(VC1); %Aquí se redondean los valores

tam=size(VC1); %Se obtiene el número de valores

%CORRIENTE FASE A
CA1=iIaXx0035*ampI; %Aquí se reducen los valores
CA1=round(CA1); %Aquí se redondean los valores

%CORRIENTE FASE B
CB1=iIbXx0033*ampI; %Aquí se reducen los valores
CB1=round(CB1); %Aquí se redondean los valores

%CORRIENTE FASE C
CC1=iIcXx0031*ampI; %Aquí se reducen los valores
CC1=round(CC1); %Aquí se redondean los valores

%Esta parte escala los valores en rango de 8 bits (0 a 255) para voltajes

for n=1:tam(1)
    VA(n)=(VA1(n)*1.27)+127;
    VB(n)=(VB1(n)*1.27)+127;
    VC(n)=(VC1(n)*1.27)+127;
end

```



```

%Esta parte escala los valores en rango de 8 bits (0 a 255) para
%corrientes
for n=1:tam(1)
    CA(n)=( (CA1(n) *1.27)+127);
    CB(n)=( (CB1(n) *1.27)+127);
    CC(n)=( (CC1(n) *1.27)+127);
end

VA=floor(VA);           %Quita los puntos decimales
VB=floor(VB);           %Quita los puntos decimales
VC=floor(VC);           %Quita los puntos decimales
CA=floor(CA);           %Quita los puntos decimales
CB=floor(CB);           %Quita los puntos decimales
CC=floor(CC);           %Quita los puntos decimales

%Reduciendo cantidad a 334 muestras por periodo

n1=50:50:tam(1);        %Aquí reducimos de 200000 muestras a 4000
tamn1=size(n1);

tred=1:tamn1(2)-1000;   %Aquí tomamos las muestras de tiempo

%Reducción de muestras en voltaje y corriente
for nred=1:max(tred)
    VAred(nred)=VA(n1(nred));
    VBred(nred)=VB(n1(nred));
    VCred(nred)=VC(n1(nred));
end

for nred=1:max(tred)
    CAred(nred)=CA(n1(nred));
    CBred(nred)=CB(n1(nred));
    CCred(nred)=CC(n1(nred));
end

%Escribiendo los archivos para grabarlos al Arduino Due
dlmwrite('VA_estable.txt',VAred(1:334))
dlmwrite('VB_estable.txt',VBred(1:334))
dlmwrite('VC_estable.txt',VCred(1:334))
dlmwrite('CA_estable.txt',CAred(1:334))
dlmwrite('CB_estable.txt',CBred(1:334))
dlmwrite('CC_estable.txt',CCred(1:334))
dlmwrite('VA_LT.txt',VAred)
dlmwrite('VB_LT.txt',VBred)
dlmwrite('VC_LT.txt',VCred)
dlmwrite('CA_LT.txt',CAred)
dlmwrite('CB_LT.txt',CBred)
dlmwrite('CC_LT.txt',CCred)

%Gráficas
figure
plot(t,VA,'r',t,VB,'b',t,VC,'g');

```

```

xlim([0 0.2]);
%plot(tiempo,VA,'r',tiempo,VB,'b',tiempo,VC,'g');
hold
%plot(tiempo,VAo,'r',tiempo,VBo,'b',tiempo,VCo,'g');
title('Voltajes escalados a 8 Bits')
grid

figure(2)
plot(t,vVa,'r',t,vVb,'b',t,vVc,'g');
xlim([0 0.2]);
%plot(tiempo,VAo,'r',tiempo,VBo,'b',tiempo,VCo,'g');
hold
title('Voltajes originales')
grid

figure(3)
plot(t,CA,'r',t,CB,'b',t,CC,'g');
xlim([0 0.2]);
hold
title('Corrientes escalados a 8 Bits')
grid

figure(4)
plot(t,iIaXx0035,'r',t,iIbXx0033,'b',t,iIcXx0031,'g');
xlim([0 0.2]);
hold
title('Corrientes originales')
grid

figure(5)
plot(tred,VAred,'r',tred,VBred,'b',tred,Vcred,'g');
hold
title('Voltajes escalados a 8 Bits (reducido en muestras)')
grid

figure(6)
plot(tred,CAred,'r',tred,CBred,'b',tred,CCred,'g');
hold
title('Corrientes escalados a 8 Bits (reducido en muestras)')
grid

figure(7)
plot(tred(1:334),VAred(1:334),'r',tred(1:334),VBred(1:334),'b',tred(1:334),
VCred(1:334),'g');
hold
title('Período de voltaje estable')
grid

figure(8)
plot(tred(1:334),CAred(1:334),'r',tred(1:334),CBred(1:334),'b',tred(1:334),
CCred(1:334),'g');
ylim([105 145]);

```

```
hold
title('Período de corriente estable')
grid
```

```

%Este programa escala un gráfico de ATPDraw para mandarlo al simulador
Fluke 434

%Falla de doble línea correspondiente al archivo RED_FALLA_BI_AL_50.PL4
clc
close all
clear all

%Carga de archivos de voltajes y corrientes
load('FALLA_DOBLE_LINEA.MAT');
load('FALLA_DOBLE_LINEA_CORRIENTES.MAT');

%Variables
amp=4; %Porcentaje de amplificación para las señales de
corriente

%VOLTAJE FASE A
VA1=vVa*0.1; %Aquí se reducen los valores
VA1=round(VA1); %Aquí se redondean los valores

%VOLTAJE FASE B
VB1=vVb*0.1; %Aquí se reducen los valores
VB1=round(VB1); %Aquí se redondean los valores

%VOLTAJE FASE C
VC1=vVc*0.1; %Aquí se reducen los valores
VC1=round(VC1); %Aquí se redondean los valores

tam=size(VC1); %Se obtiene el número de valores

%CORRIENTE FASE A
CA1=iIaXx0035*amp; %Aquí se reducen los valores
CA1=round(CA1); %Aquí se redondean los valores

%CORRIENTE FASE B
CB1=iIbXx0033*amp; %Aquí se reducen los valores
CB1=round(CB1); %Aquí se redondean los valores

%CORRIENTE FASE C
CC1=iIcXx0031*amp; %Aquí se reducen los valores
CC1=round(CC1); %Aquí se redondean los valores

%Esta parte escala los valores en rango de 8 bits (0 a 255) para voltajes

for n=1:tam(1)
    VA(n)=(VA1(n)*1.27)+127;
    VB(n)=(VB1(n)*1.27)+127;
    VC(n)=(VC1(n)*1.27)+127;
end

%Esta parte escala los valores en rango de 8 bits (0 a 255) para

```

```

%corrientes
for n=1:tam(1)
    CA(n)=(CA1(n)*1.27)+127);
    CB(n)=(CB1(n)*1.27)+127);
    CC(n)=(CC1(n)*1.27)+127);
end

VA=floor(VA);           %Quita los puntos decimales
VB=floor(VB);           %Quita los puntos decimales
VC=floor(VC);           %Quita los puntos decimales
CA=floor(CA);           %Quita los puntos decimales
CB=floor(CB);           %Quita los puntos decimales
CC=floor(CC);           %Quita los puntos decimales

%Reduciendo cantidad a 334 muestras por periodo

n1=50:50:tam(1);        %Aquí reducimos de 200000 muestras a 4000
tamn1=size(n1);

tred=1:tamn1(2)-1000;   %Aquí tomamos las muestras de tiempo

%Reducción de muestras en voltaje y corriente
for nred=1:max(tred)
    VAred(nred)=VA(n1(nred));
    VBred(nred)=VB(n1(nred));
    VCred(nred)=VC(n1(nred));
end

for nred=1:max(tred)
    CAred(nred)=CA(n1(nred));
    CBred(nred)=CB(n1(nred));
    CCred(nred)=CC(n1(nred));
end

%Escribiendo los archivos para grabarlos al Arduino Due
dlmwrite('VA_estable.txt',VAred(1:334))
dlmwrite('VB_estable.txt',VBred(1:334))
dlmwrite('VC_estable.txt',VCred(1:334))
dlmwrite('CA_estable.txt',CAred(1:334))
dlmwrite('CB_estable.txt',CBred(1:334))
dlmwrite('CC_estable.txt',CCred(1:334))
dlmwrite('VA_LL.txt',VAred)
dlmwrite('VB_LL.txt',VBred)
dlmwrite('VC_LL.txt',VCred)
dlmwrite('CA_LL.txt',CAred)
dlmwrite('CB_LL.txt',CBred)
dlmwrite('CC_LL.txt',CCred)

%Gráficas
figure
plot(t,VA,'r',t,VB,'b',t,VC,'g');
xlim([0 0.2]);

```

```

%plot(tiempo,VA,'r',tiempo,VB,'b',tiempo,VC,'g');
hold
%plot(tiempo,VAo,'r',tiempo,VBo,'b',tiempo,VCo,'g');
title('Voltajes escalados a 8 Bits')
grid

figure(2)
plot(t,vVa,'r',t,vVb,'b',t,vVc,'g');
xlim([0 0.2]);
%plot(tiempo,VAo,'r',tiempo,VBo,'b',tiempo,VCo,'g');
hold
title('Voltajes originales')
grid

figure(3)
plot(t,CA,'r',t,CB,'b',t,CC,'g');
xlim([0 0.2]);
hold
title('Corrientes escalados a 8 Bits')
grid

figure(4)
plot(t,iIaXx0035,'r',t,iIbXx0033,'b',t,iIcXx0031,'g');
xlim([0 0.2]);
hold
title('Corrientes originales')
grid

figure(5)
plot(tred,VAred,'r',tred,VBred,'b',tred,Vcred,'g');
hold
title('Voltajes escalados a 8 Bits (reducido en muestras)')
grid

figure(6)
plot(tred,CAred,'r',tred,CBred,'b',tred,CCred,'g');
hold
title('Corrientes escalados a 8 Bits (reducido en muestras)')
grid

figure(7)
plot(tred(1:334),VAred(1:334),'r',tred(1:334),VBred(1:334),'b',tred(1:334),
VCred(1:334),'g');
hold
title('Período de voltaje estable')
grid

figure(8)
plot(tred(1:334),CAred(1:334),'r',tred(1:334),CBred(1:334),'b',tred(1:334),
CCred(1:334),'g');
ylim([105 145]);
hold

```

```
title('Período de corriente estable')  
grid
```

```

%Este programa escala un gráfico de ATPDraw para mandarlo al simulador
Fluke 434

%Falla de triple línea correspondiente al archivo RED_FALLA_TRI_AL_50.PL4
clc
close all
clear all

%Carga de archivos de voltajes y corrientes
load('VOLTAJES_TRIPLE_LINEA.MAT');
load('CORRIENTES_TRIPLE_LINEA.MAT');

%Variables
amp=4; %Porcentaje de amplificación para las señales de
corriente

%VOLTAJE FASE A
VA1=vVa*0.1; %Aquí se reducen los valores
VA1=round(VA1); %Aquí se redondean los valores

%VOLTAJE FASE B
VB1=vVb*0.1; %Aquí se reducen los valores
VB1=round(VB1); %Aquí se redondean los valores

%VOLTAJE FASE C
VC1=vVc*0.1; %Aquí se reducen los valores
VC1=round(VC1); %Aquí se redondean los valores

tam=size(VC1); %Se obtiene el número de valores

%CORRIENTE FASE A
CA1=iIaXx0035*amp; %Aquí se reducen los valores
CA1=round(CA1); %Aquí se redondean los valores

%CORRIENTE FASE B
CB1=iIbXx0033*amp; %Aquí se reducen los valores
CB1=round(CB1); %Aquí se redondean los valores

%CORRIENTE FASE C
CC1=iIcXx0031*amp; %Aquí se reducen los valores
CC1=round(CC1); %Aquí se redondean los valores

%Esta parte escala los valores en rango de 8 bits (0 a 255) para voltajes

for n=1:tam(1)
    VA(n)=(VA1(n)*1.27)+127;
    VB(n)=(VB1(n)*1.27)+127;
    VC(n)=(VC1(n)*1.27)+127;
end

%Esta parte escala los valores en rango de 8 bits (0 a 255) para

```



```

%corrientes
for n=1:tam(1)
    CA(n)=(CA1(n)*1.27)+127);
    CB(n)=(CB1(n)*1.27)+127);
    CC(n)=(CC1(n)*1.27)+127);
end

VA=floor(VA);           %Quita los puntos decimales
VB=floor(VB);           %Quita los puntos decimales
VC=floor(VC);           %Quita los puntos decimales
CA=floor(CA);           %Quita los puntos decimales
CB=floor(CB);           %Quita los puntos decimales
CC=floor(CC);           %Quita los puntos decimales

%Reduciendo cantidad a 334 muestras por periodo

n1=50:50:tam(1);        %Aquí reducimos de 200000 muestras a 4000
tamn1=size(n1);

tred=1:tamn1(2)-1000;   %Aquí tomamos las muestras de tiempo

%Reducción de muestras en voltaje y corriente
for nred=1:max(tred)
    VAred(nred)=VA(n1(nred));
    VBred(nred)=VB(n1(nred));
    VCred(nred)=VC(n1(nred));
end

for nred=1:max(tred)
    CAred(nred)=CA(n1(nred));
    CBred(nred)=CB(n1(nred));
    CCred(nred)=CC(n1(nred));
end

%Escribiendo los archivos para grabarlos al Arduino Due
dlmwrite('VA_estable.txt',VAred(1:334))
dlmwrite('VB_estable.txt',VBred(1:334))
dlmwrite('VC_estable.txt',VCred(1:334))
dlmwrite('CA_estable.txt',CAred(1:334))
dlmwrite('CB_estable.txt',CBred(1:334))
dlmwrite('CC_estable.txt',CCred(1:334))
dlmwrite('VA_LLL.txt',VAred)
dlmwrite('VB_LLL.txt',VBred)
dlmwrite('VC_LLL.txt',VCred)
dlmwrite('CA_LLL.txt',CAred)
dlmwrite('CB_LLL.txt',CBred)
dlmwrite('CC_LLL.txt',CCred)

%Gráficas
figure
plot(t,VA,'r',t,VB,'b',t,VC,'g');
xlim([0 0.2]);

```

```

%plot(tiempo,VA,'r',tiempo,VB,'b',tiempo,VC,'g');
hold
%plot(tiempo,VAo,'r',tiempo,VBo,'b',tiempo,VCo,'g');
title('Voltajes escalados a 8 Bits')
grid

figure(2)
plot(t,vVa,'r',t,vVb,'b',t,vVc,'g');
xlim([0 0.2]);
%plot(tiempo,VAo,'r',tiempo,VBo,'b',tiempo,VCo,'g');
hold
title('Voltajes originales')
grid

figure(3)
plot(t,CA,'r',t,CB,'b',t,CC,'g');
xlim([0 0.2]);
hold
title('Corrientes escalados a 8 Bits')
grid

figure(4)
plot(t,iIaXx0035,'r',t,iIbXx0033,'b',t,iIcXx0031,'g');
xlim([0 0.2]);
hold
title('Corrientes originales')
grid

figure(5)
plot(tred,VAred,'r',tred,VBred,'b',tred,Vcred,'g');
hold
title('Voltajes escalados a 8 Bits (reducido en muestras)')
grid

figure(6)
plot(tred,CAred,'r',tred,CBred,'b',tred,CCred,'g');
hold
title('Corrientes escalados a 8 Bits (reducido en muestras)')
grid

figure(7)
plot(tred(1:334),VAred(1:334),'r',tred(1:334),VBred(1:334),'b',tred(1:334),
VCred(1:334),'g');
hold
title('Período de voltaje estable')
grid

figure(8)
plot(tred(1:334),CAred(1:334),'r',tred(1:334),CBred(1:334),'b',tred(1:334),
CCred(1:334),'g');
ylim([105 145]);
hold

```

```
title('Período de corriente estable')  
grid
```

# *Apéndice*

# B

---

## **Código del simulador.**







































01,101,100,97,96,95,94,94,93,91,93,93,90,91,92,93,94,94,94,93,93,93,91,92,93,91,95,97,95,95,98,100,102,102,102,102,102,102,103,103,1  
05,105,106,109,109,109,112,114,116,117,118,117,115,116,117,116,117,118,118,121,122,121,122,124,126,128,127,127,126,126,126,125,1  
26,127,126,128,129,128,126,129,130,132,132,132,132,131,131,131,130,132,133,133,136,136,134,135,137,138,138,137,137,137,137,138,1  
37,138,140,139,142,144,143,143,145,147,148,147,147,147,145,146,146,147,149,150,151,154,154,152,155,157,158,159,159,159,158,160,1  
60,160,162,163,163,166,168,167,167,169,171,171,171,171,171,170,170,170,170,171,170,171,172,170,168,168,168,168,167,165,163,160,1  
60,160,158,159,159,157,158,157,154,153,153,153,152,149,148,146,144,144,143,143,144,142,143,143,141,139,139,139,138,136,135,134,1  
33,133,133,132,133,134,133,135,134,132,132,133,133,132,130,129,128,129,129,129,130,130,129,131,130,128,127,129,129,129,127,127,1  
26,124,125,124,125,125,125,125,125,123,121,121,122,121,119,118,117,116,116,116,116,117,117,115,117,115,113,112,112,112,111,109,1  
08,107,106,106,107,107,107,106,107,107,105,103,103,103,103,101,100,99,98,99,100,99,100,100,99,100,99,97,97,98,99,98,97,96,96,97,97,  
97,99,100,98,100,100,99,98,100,101,100,99,99,98,99,99,100,100,102,101,101,102,100,98,100,100,101,101,101,100,99,99,101,101,102,103,103  
,103,104,103,101,101,102,102,102,100,100,100,100,101,101,101,102,101,101,102,99,98,99,99,99,98,97,97,96,97,98,97,98,98,97,99,97,96,  
96,97,98,97,97,97,98,99,99,100,101,101,101,102,101,101,103,104,104,104,104,105,106,108,109,110,112,112,112,114,113,113,115,117,  
118,118,119,120,121,122,124,125,128,128,128,129,130,129,129,132,133,133,133,134,135,136,138,140,141,142,142,143,144,143,143,145,  
146,147,146,146,147,148,149,150,151,152,152,152,154,153,152,152,154,155,155,154,155,155,156,157,157,158,158,157,157,157,156,156,  
157,158,158,158,158,159,161,161,161,162,162,161,162,161,160,161,163,163,163,162,163,164,166,166,166,168,168,167,168,168,167,  
167,169,170,170,169,170,170,169,170,169,168,168,166,165,165,162,161,161,161,160,159,158,157,157,156,155,154,153,151,150,148,  
146,146,146,145,143,142,142,141,140,140,138,138,137,134,133,133,130,129,130,130,129,128,127,126,126,126,126,124,124,122,121,121,  
119,118,118,119,119,118,117,117,117,118,118,117,117,116,115,115,114,113,113,114,114,113,113,113,113,113,114,113,113,113,112,111,  
112,110,110,111,112,112,111,110,110,110,111,111,110,110,109,108,108,108,107,107,108,109,108,107,107,107,107,106,106,105,104,  
104,104,102,102,103,104,103,101,101,100,100,100,99,98,97,95,94,93,92,91,91,92,92,90,89,90,89,89,88,88,87,86,86,86,85,86,87,87,87,  
86,87,87,88,88,88,88,87,87,88,88,89,90,92,93,92,92,93,94,95,95,95,95,96,97,96,98,100,101,101,100,101,102,102,103,103,102,10  
3,102,103,104,103,104,106,107,107,107,107,107,108,109,109,108,109,108,108,109,110,110,111,113,113,113,112,113,114,115,115,115,11  
5,115,115,116,117,117,118,120,121,121,121,122,123,123,124,125,125,126,126,127,128,128,129,131,133,134,133,134,135,136,137,138,13  
8,139,140,140,142,143,143,145,148,149,148,149,150,150,151,153,152,153,154,154,155,157,157,158,160,161,162,161,162,162,163,164,16  
4,164,164,164,165,166,166,167,168,168,167,166,167,167,167,166,166,166,166,166,167,166,166,167,166,165,165,164,164,16  
4,164,163,163,163,163,164,163,164,165,164,162,162,162,162,162,162,162,161,161,160,161,162,161,162,162,162,160,158,158,157,15  
6,156,155,154,153,152,152,152,151,150,150,150,148,146,145,145,144,143,142,141,140,139,139,139,138,137,137,136,135,133,132,131,13  
0,130,129,127,127,126,125,125,125,123,123,123,122,120,118,117,117,116,116,115,114,114,113,113,113,112,111,111,111,110,108,107,10  
7,107,107,106,106,105,105,105,105,106,105,105,105,105,104,103,103,103,103,104,103,102,102,101,102,102,101,101,101,101,100,98,98,9  
8,98,98,97,98,97,97,98,98,97,97,97,95,95,95,95,95,94,94,94,94,94,94,94,94,93,93,92,91,91,91,91,91,90,90,90,90,90,89,89,8  
9,89,87,87,87,87,87,87,87,88,88,88,88,88,88,87,87,88,89,89,90,91,91,92,93,93,93,94,95,95,94,95,96,97,98,99,99,101,101,1  
02,104,104,104,105,106,107,106,107,108,110,111,112,112,113,114,115,116,117,118,118,119,120,120,119,121,122,123,124,125,126,1  
27,128,129,129,129,130,131,131,130,131,132,133,134,135,135,136,137,137,138,139,139,139,140,140,139,140,141,142,143,143,144,144,1  
45,145,146,147,147,147,148,149,149,148,149,151,152,152,153,153,154,155,155,156,157,157,157,158,158,158,159,160,161,162,163,163,1  
64,165,165,166,166,166,166,167,167,167,167,168,169,169,170,170,170,170,171,171,171,171,170,170,170,169,168,169,169,169,169,1  
68,168,168,167,167,166,165,165,165,164,163,162,162,162,162,162,161,160,159,159,158,157,157,155,155,154,153,152,152,152,152,1  
51,150,150,149,148,148,147,146,145,144,143,141,141,141,140,140,139,138,137,136,135,135,134,133,132,132,131,130,129,129,130,129,1  
29,128,127,127,126,125,125,124,123,122,122,121,120,120,120,120,120,119,118,118,117,116,116,116,115,114,114,113,112,112,112,112,1  
12,111,109,108,107,106,106,105,104,103,102,102,101,99,99,99,99,98,97,96,95,95,93,93,92,91,91,91,90,89,89,89,89,89,88,87,87,87,87,  
86,86,85,86,86,85,85,86,87,87,86,86,86,86,86,87,86,86,86,87,87,87,88,89,89,89,88,88,89,89,89,89,90,90,90,90,91,92,92,92,92,  
92,92,92,92,93,93,93,94,94,94,95,96,96,96,96,96,97,97,97,98,98,98,99,99,100,101,102,102,103,102,103,103,104,104,105,106,106,  
107,108,108,109,110,112,113,113,113,114,115,116,117,118,118,119,121,121,122,123,125,126,127,127,127,128,129,130,131,132,133,  
134,135,136,137,138,139,141,141,142,142,142,143,144,145,146,147,147,148,149,150,150,151,152,153,153,153,154,155,156,156,  
156,157,157,158,158,158,159,160,160,159,159,159,159,160,160,161,160,161,161,162,162,161,162,163,163,162,162,162,163,163,163,  
163,163,164,164,164,164,164,165,165,165,164,164,164,165,165,165,166,165,165,166,165,165,166,166,165,165,164,164,164,164,163,  
164,163,163,163,162,161,161,161,161,160,159,158,157,157,156,156,155,154,154,153,152,151,151,150,149,148,147,146,145,145,  
144,144,143,142,141,140,139,138,138,137,136,134,133,132,132,131,130,130,129,128,127,127,126,125,124,124,123,121,120,119,119,119,  
118,117,117,116,115,115,115,114,113,113,112,111,110,109,109,109,108,108,107,107,106,106,105,104,104,104,103,102,102,101,101,  
101,100,100,100,99,99,99,98,97,97,97,96,95,95,94,94,94,93,93,93,92,92,91,91,90,90,90,89,89,88,87,87,87,87,87,86,86,85,85,85,84,84,8  
4,84,83,83,83,83,83,83,84,83,83,84,84,84,84,84,84,84,85,86,86,87,87,87,88,88,89,89,89,90,91,91,91,91,92,93,94,94,95,96,96,96,9  
7,98,98,98,99,100,100,100,101,102,103,103,104,105,105,106,106,107,107,108,108,109,109,110,110,111,112,113,114,114,115,115,116,116  
,117,117,118,119,119,119,120,121,122,123,124,124,125,125,126,127,127,128,128,129,130,130,131,131,132,134,135,135,136,137,137,138,  
139,140,140,141,142,143,143,144,145,146,147,148,149,150,150,151,151,152,153,153,154,155,156,156,157,158,159,160,160,161,161,162,  
162,163,163,163,164,165,165,165,165,166,167,167,167,167,167,167,167,167,167,167,167,168,167,167,167,167,167,166,  
166,166,166,165,165,165,165,164,164,164,163,164,164,163,163,162,161,161,161,160,160,160,160,159,159,158,158,158,157,156,156,  
155,154,154,154,153,153,153,152,151,151,150,150,150,150,149,148,147,147,146,146,145,144,144,144,143,142,141,141,141,140,139,138,  
138,136,136,135,134,133,133,132,132,131,130,129,129,128,127,126,125,124,123,122,121,120,119,119,118,117,116,116,115,115,114,113,  
112,111,109,109,108,107,106,106,105,105,104,103,102,102,102,101,100,99,98,97,97,96,96,96,95,95,94,94,94,93,93};

const word  
ICLL[3000]={120,120,120,120,120,120,120,120,120,120,120,120,121,121,121,121,121,121,121,121,121,121,121,121,122,122,122,122,122,1  
22,122,122,122,123,123,123,123,123,123,123,123,123,124,124,124,124,124,124,124,124,125,125,125,125,125,125,125,125,126,126,126,1  
26,126,126,126,127,127,127,127,127,127,127,127,128,128,128,128,128,128,128,128,129,129,129,129,129,129,129,129,130,130,130,130,130,1

















171,172,173,174,174,173,173,173,173,172,173,172,171,171,171,171,170,171,171,171,170,169,168,168,167,167,166,165,164,163,163,  
162,162,161,162,161,160,159,158,157,156,155,154,154,152,152,151,151,150,149,150,150,149,148,147,146,145,145,144,143,143,142,141,  
141,140,140,140,140,138,137,137,136,136,135,134,134,133,132,132,132,131,131,131,131,130,128,127,126,126,125,124,123,122,121,  
121,121,119,119,119,117,116,115,113,112,112,111,109,109,107,106,106,105,104,103,103,102,101,99,98,97,96,95,94,93,92,92,91,91,91,  
0,89,89,89,88,86,85,84,84,83,83,82,82,81,81,81,81,80,81,81,81,80,79,78,78,79,78,79,78,79,79,79,80,80,81,80,80,80,81,81,81,82,82,8  
2,83,83,85,85,85,86,87,87,86,87,87,87,88,89,89,90,90,91,91,92,92,93,94,94,94,94,94,95,96,96,97,97,98,98,99,99,100,101,102,102,102,1  
03,104,105,107,108,108,110,110,112,113,114,114,116,117,117,117,118,119,120,121,122,123,124,125,126,127,128,129,130,131,132,132,1  
32,133,134,135,136,137,138,139,139,140,141,142,142,143,144,144,144,144,145,146,147,147,148,149,149,150,152,153,153,154,155,155,1  
55,155,156,157,158,159,159,160,160,161,161,162,162,162,163,164,163,163,163,164,164,165,165,166,166,166,166,167,167,166,167,167,1  
67,166,166,166,166,167,167,167,167,167,168,168,168,168,168,168,167,167,167,168,168,168,168,169,169,168,169,169,169,169,1  
69,169,168,168,168,169,169,169,169,169,169,169,169,169,169,168,168,168,167,166,166,166,166,166,165,165,165,164,164,164,163,162,1  
62,161,160,159,158,158,158,158,157,156,155,154,154,153,152,151,150,149,148,146,145,145,144,144,143,142,141,140,139,138,137,135,1  
34,133,133,131,129,129,128,128,127,126,125,124,123,123,122,121,119,119,118,117,116,115,115,114,114,113,112,112,111,110,109,109,1  
08,107,107,106,105,104,104,104,104,103,103,102,101,100,100,99,99,98,97,97,96,95,94,94,94,94,93,93,92,91,91,90,90,89,88,88,86,86,8  
6,86,86,86,85,84,84,83,83,83,82,81,81,81,80,80,80,80,81,81,80,80,80,79,79,79,79,79,79,78,79,80,80,81,81,81,81,82,82,82,83,83,84,8  
4,85,85,86,87,88,89,90,91,91,92,93,94,94,95,96,97,97,98,99,100,102,103,103,104,105,105,106,107,108,108,109,110,111,112,113,114,1  
15,116,117,117,118,118,119,120,120,121,121,123,123,124,124,126,127,128,128,129,129,130,130,131,131,132,132,133,134,135,135,136,1  
37,138,139,140,140,140,141,142,143,143,144,144,146,146,147,148,149,150,151,152,152,152,153,153,154,155,156,157,158,159,159,1  
60,162,162,163,163,164,164,164,165,166,166,167,167,168,169,169,169,170,171,171,171,171,172,172,172,173,173,173,174,174,174,1  
74,174,175,175,175,174,174,173,173,173,173,173,173,173,173,173,173,172,172,172,172,172,171,170,169,169,168,168,168,167,167,167,167,1  
66,166,166,166,166,165,164,163,163,162,162,161,161,161,161,160,159,159,159,159,158,157,156,155,155,155,154,154,153,153,1  
53,152,151,151,151,150,149,148,147,147,146,146,145,145,144,144,143,142,141,141,140,139,138,137,136,135,134,134,133,132,131,130,1  
30,129,127,127,126,125,124,122,121,120,119,118,117,117,115,114,114,113,112,111,110,109,108,107,105,104,103,103,102,101,101,100,9  
9,99,98,97,96,96,95,94,93,92,91,91,91,90,90,89,89,89,88,87,87,87,87,86,85,85,84,84,84,84,84,84,84,84,83,83,83,83,83,82,82,82,83,8  
3,83,83,83,84,84,83,84,84,84,84,84,84,84,85,85,85,85,86,86,86,86,86,87,87,87,87,88,88,89,89,90,91,91,91,92,93,93,94,9  
4,94,95,96,97,98,98,99,100,101,101,102,103,104,105,105,106,106,107,109,110,111,112,113,114,115,116,117,117,119,120,121,121,122,12  
3,124,125,127,128,129,130,131,132,133,133,134,135,136,137,137,138,139,140,141,142,143,144,144,145,146,146,147,148,149,149,150,15  
0,151,152};

const word  
IBLLL[3000]=[134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,135,135,135,135,135,135,135,135,135,135,135,135,135,  
135,135,135,135,135,135,135,135,135,135,135,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,133,133,133,133,  
133,133,133,133,133,133,133,132,132,132,132,132,132,132,132,131,131,131,131,131,131,131,131,130,130,130,130,130,130,129,129,  
129,129,129,129,128,128,128,128,128,128,128,127,127,127,127,127,126,126,126,126,126,126,125,125,125,125,125,125,125,124,  
124,124,124,124,124,123,123,123,123,123,123,122,122,122,122,122,122,122,121,121,121,121,121,121,121,121,120,120,120,  
120,120,120,120,120,120,119,  
118,118,118,118,118,118,118,118,118,118,118,118,118,118,118,119,119,119,119,119,119,119,119,119,119,119,119,119,119,119,  
119,119,119,120,120,120,120,120,120,120,120,120,121,121,121,121,121,121,121,121,121,121,122,122,122,122,122,122,122,123,123,  
123,123,123,123,124,124,124,124,124,124,124,125,125,125,125,125,125,126,126,126,126,126,126,126,127,127,127,127,127,127,128,  
128,128,128,128,128,129,129,129,129,129,129,130,130,130,130,130,130,131,131,131,131,131,131,131,131,132,132,132,132,132,  
132,132,132,133,133,133,133,133,133,133,133,133,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,134,135,  
135,  
134,  
155,156,156,156,156,157,157,157,157,158,158,168,167,167,167,168,168,168,167,167,167,166,169,168,168,168,167,177,178,177,176,175,  
174,173,172,172,171,170,171,170,170,178,178,177,182,181,180,180,179,178,177,176,175,175,174,174,174,174,179,178,183,187,185,183,  
181,180,179,178,178,178,179,179,179,184,181,183,192,190,189,188,186,186,185,185,187,187,187,190,191,193,192,193,202,202,202,  
203,202,203,203,204,205,206,207,209,215,215,212,214,216,220,219,218,218,217,217,217,218,219,219,220,222,222,226,223,223,230,225,  
221,219,216,215,213,212,211,211,210,215,213,212,210,210,211,214,209,206,203,201,200,198,197,198,198,198,195,194,195,195,196,201,  
197,195,193,192,191,191,191,191,195,195,193,190,193,189,189,194,193,190,188,187,187,187,187,186,188,189,192,188,188,189,185,184,  
190,184,181,179,178,176,176,176,179,178,177,175,176,176,172,173,176,173,169,167,165,164,165,164,164,160,160,161,161,160,159,158,  
159,160,155,152,151,149,149,151,150,151,146,148,145,142,143,141,139,144,139,135,133,132,131,132,132,133,130,130,129,127,126,124,  
123,126,128,123,121,120,121,122,122,122,120,122,123,121,122,123,120,122,126,122,121,122,123,124,123,124,128,129,130,130,129,131,  
129,130,134,132,129,127,130,130,133,131,133,132,131,133,132,132,132,132,132,132,132,132,132,132,132,132,132,132,132,132,132,132,  
125,122,124,127,125,123,123,122,122,122,124,126,123,123,124,122,122,123,123,125,126,123,123,123,123,127,128,130,131,132,134,134,  
133,136,134,137,141,139,137,139,138,141,141,143,145,146,149,150,150,153,151,154,157,160,157,157,156,158,161,163,164,164,165,167,  
168,169,171,171,174,176,173,173,175,177,180,180,180,182,183,182,183,184,185,184,188,190,188,184,185,185,186,187,188,190,189,189,  
190,188,188,187,188,189,192,184,184,183,185,186,185,187,186,185,186,184,184,185,181,183,184,180,178,179,180,180,181,182,183,183,  
182,183,182,184,182,184,184,180,180,181,181,182,184,184,184,185,186,185,186,187,186,185,186,180,179,178,178,177,176,175,  
173,172,170,169,169,165,163,162,158,157,156,156,155,154,152,150,148,146,145,143,139,140,140,134,132,133,134,134,134,134,  
133,131,131,128,127,126,124,124,125,121,118,118,119,120,119,120,118,119,119,117,116,115,113,115,115,111,112,112,113,114,114,  
114,113,113,113,111,111,111,109,112,112,109,108,109,111,112,113,112,112,111,111,109,109,109,108,109,109,109,107,109,110,112,113,  
112,113,111,111,110,108,107,108,107,109,109,105,105,106,108,109,109,109,108,107,105,104,103,104,102,102,103,102,100,100,101,102,  
101,101,100,97,96,95,94,94,93,91,93,93,90,91,92,93,94,94,94,93,93,91,92,93,91,95,97,95,95,98,100,102,102,102,102,102,102,103,103,







1,91,91,91,90,89,89,89,89,90,89,87,87,87,87,85,85,85,84,83,84,83,82,81,80,81,81,82,82,81,82,82,82,82,82,83,82,83,83,84,85,84,83,84,85,8  
4,85,85,85,86,86,86,87,86,86,87,89,90,90,91,90,90,90,90,91,92,93,93,93,94,94,94,95,96,97,98,99,100,100,101,102,102,104,105,105,106  
,108,108,108,109,109,110,111,112,112,114,115,115,116,116,117,118,118,119,121,122,123,123,124,124,125,125,126,126,127,128,129,129,  
130,130,132,133,134,135,136,137,138,138,139,140,141,142,143,144,144,145,145,145,146,146,147,147,147,148,149,149,150,151,151,151,  
152,153,154,154,154,154,155,155,155,155,156,156,157,157,158,158,158,159,159,161,162,163,163,164,166,166,166,167,168,168,168,169,  
169,169,169,169,170,170,170,171,171,171,171,171,171,170,171,171,170,170,171,171,170,169,168,168,168,167,167,166,166,166,166,  
165,165,165,165,165,165,164,164,164,164,163,163,164,164,163,162,162,161,161,159,160,160,160,159,159,158,158,157,156,155,155,  
154,153,153,152,151,150,149,148,148,147,146,145,144,143,142,141,141,140,139,139,139,139,138,137,136,135,135,134,133,132,132,132,  
131,130,129,128,127,127,126,126,125,124,124,122,121,121,120,119,119,118,117,116,115,114,112,112,111,110,109,108,107,107,106,105,  
104,103,102,102,101,100,100,99,98,97,96,95,95,94,93,92,92,91,91,90,89,89,89,89,88,88,87,87,86,85,85,84,84,84,84,83,83,82,82,82,  
82,82,82,82,82,82,82,82,83,83,82,82,82,82,82,83,83,83,84,84,84,84,84,84,85,86,86,87,87,87,87,86,87,88,88,88,89,90,90,90,  
90,91,92,92,93,93,94,95,96,96,96,97,98,99,100,100,101,101,101,103,103,104,105,105,106,107,108,109,110,110,111,112,113,114,114,115,  
116,117,118,118,118,120,120,121,122,122,123,124,125,125,127,128,129,129,130,131,132,133,133,134,135,136,137,138,139,139,140,141,  
142,143,143,144,145,146,147,148,149,150,151,152,152,153,154,154,155,155,156,156,156,157,158,159,159,160,160,160,160,161,162,  
162,162,163,163,163,164,164,164,164,164,164,165,164,164,165,165,166,166,166,166,167,167,167,167,168,168,168,169,169,169,  
168,169,168,169,  
162,161,161,161,160,160,159,159,159,158,158,157,157,156,156,155,154,153,153,152,152,151,151,150,149,149,148,148,147,146,146,145,  
144,144,143,142,141,140,139,138,137,136,135,134,134,133,132,131,129,129,128,127,127,126,125,124,123,122,122,121,121,120,119,118,  
117,116,116,115,114,114,113,113,112,112,111,110,110,109,108,108,107,106,105,105,104,104,103,102,101,101,100,99,99,98,97,97,96,96,  
95,95,94,94,93,93,92,92,91,91,91,90,90,89,89,88,87,87,87,86,86,86,85,85,85,84,84,84,84,84,83,83,82,82,82,82,82,81,81,82,82,81,81,81,  
81,81,81,82,82,82,82,83,83,83,84,84,84,85,85,86,86);

```
const int m=16; // MULTIPLICADOR PARA CORRIMIENTO
```

```
void setup() {
// put your setup code here, to run once:
// PONE slaveSelectPin COMO UNA SALIDA:
pinMode(slaveSelectPin, OUTPUT);
//INICIALIZA SPI:
SPI.begin();
SPI.beginTransaction(SPISettings(13000000,MSBFIRST,SPI_MODE1));
// SE ACTIVAN LAS INTERRUPCIONES PARA LA SELECCION DE LAS FALLAS
// SE ASIGNA EL PIN 2 PARA FALLA DE LINEA A TIERRA, PIN 3 PARA FALLA DE DOBLE LINEA Y PIN4 PARA FALLA DE TRES LINEAS
attachInterrupt( digitalPinToInterrupt(2), flt, RISING); //FALLA DE LINEA A TIERRA
attachInterrupt( digitalPinToInterrupt(3), fll, RISING); //FALLA DE LINEA A LINEA
attachInterrupt( digitalPinToInterrupt(4), flll, RISING); //FALLA DE 3 LINEA
}
void loop() {
// put your main code here, to run repeatedly:

word pos=0;

while (pos<334){

dac(0x0000|(VA[pos]*m)); //Como el DAC necesita una palabra del 16 bits donde se incluye el canal y el dato de 8 bits, se
conjugan por medio de operador OR
dac(0x1000|(VB[pos]*m));
dac(0x2000|(VC[pos]*m));
dac(0x3000|(IA[pos]*m));
dac(0x4000|(IB[pos]*m));
dac(0x5000|(IC[pos]*m));

pos++;
}
}

//ROUTINA PARA MANDAR DATOS AL DAC
```

```

void dac(int salida) {

    //Activa el DAC
    digitalWrite(slaveSelectPin, LOW);
    //Envía el dato vía SPI:
    SPI.transfer(highByte(salida));
    SPI.transfer(lowByte(salida));

    //Desactiva el DAC
    digitalWrite(slaveSelectPin, HIGH);

}

void fit(){
    word pos=0;

    while (pos<3000){

        dac(0x0000|(VALT[pos]*m)); //Como el DAC necesita una palabra del 16 bits donde se incluye el canal y el dato de 8 bits, se
        conjugan por medio de operador OR
        dac(0x1000|(VBLT[pos]*m));
        dac(0x2000|(VCLT[pos]*m));
        dac(0x3000|(IALT[pos]*m));
        dac(0x4000|(IBLT[pos]*m));
        dac(0x5000|(ICLT[pos]*m));

        pos++;
    }
}

void flI(){
    word pos=0;
    while (pos<3000){

        dac(0x0000|(VALL[pos]*m)); //Como el DAC necesita una palabra del 16 bits donde se incluye el canal y el dato de 8 bits, se
        conjugan por medio de operador OR
        dac(0x1000|(VBLL[pos]*m));
        dac(0x2000|(VCLL[pos]*m));
        dac(0x3000|(IALL[pos]*m));
        dac(0x4000|(IBLL[pos]*m));
        dac(0x5000|(ICLL[pos]*m));

        pos++;
    }
}

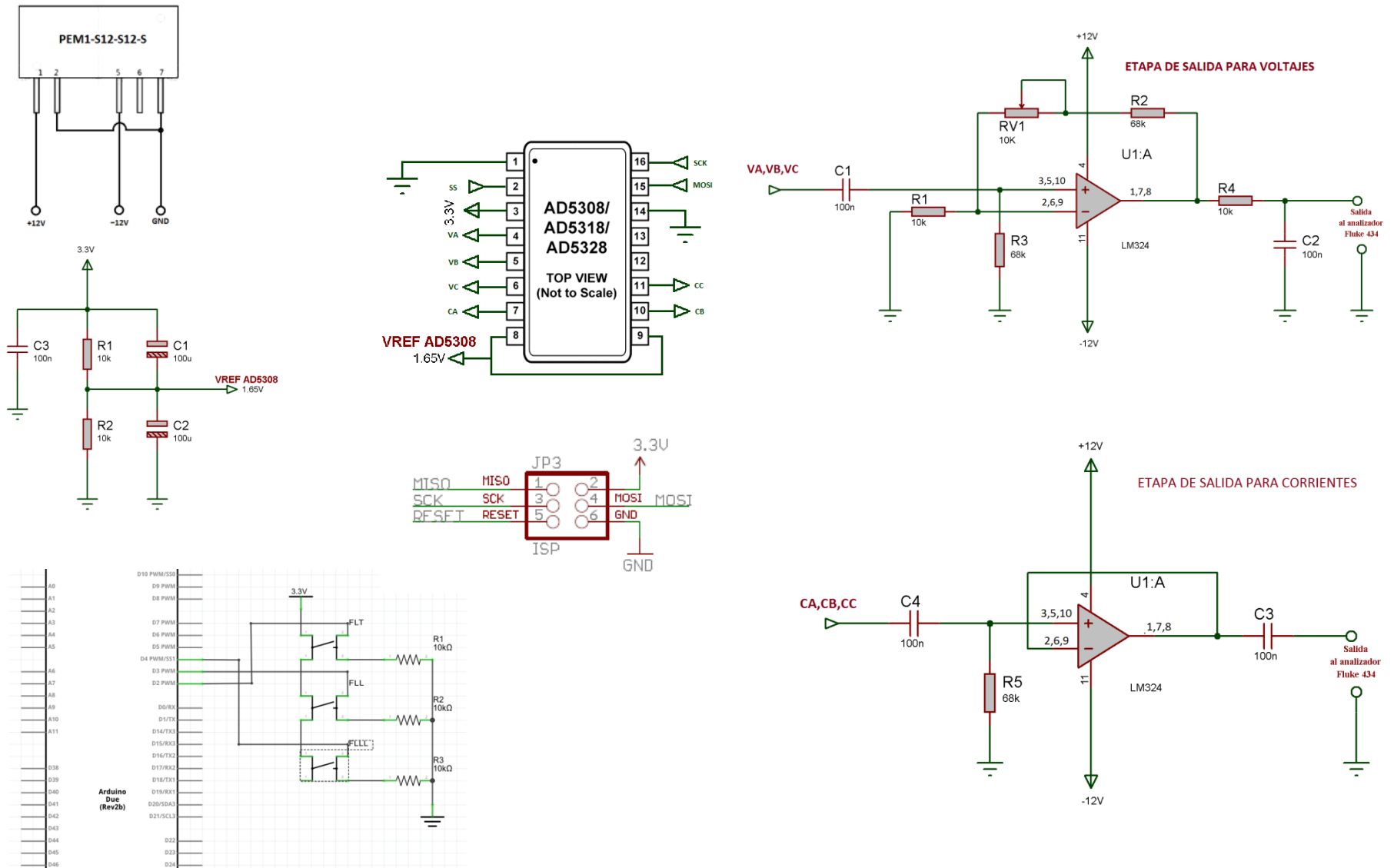
void flII(){
    word pos=0;
    while (pos<3000){

        dac(0x0000|(VALLL[pos]*m)); //Como el DAC necesita una palabra del 16 bits donde se incluye el canal y el dato de 8 bits, se
        conjugan por medio de operador OR
        dac(0x1000|(VBLLL[pos]*m));
        dac(0x2000|(VCLLL[pos]*m));
        dac(0x3000|(IALLL[pos]*m));
        dac(0x4000|(IBLLL[pos]*m));
        dac(0x5000|(ICLLL[pos]*m));

        pos++;
    }
}

```

# DIAGRAMA ESQUEMATICO DE SIMULADOR DE FALLAS DE LÍNEAS ELÉCTRICAS



**NOTA: TODAS LAS RESISTENCIAS SON DE PRECISIÓN**