

PROYECTO FIN DE CARRERA

Presentado a

**LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

Para obtener el título de

INGENIERO ELÉCTRICO

por

Luis Alejandro Montoya Salazar

Validación de protecciones adaptativas por medio de simulación en tiempo real

Sustentado el día mes de año frente al jurado:

Composición del jurado

- *Asesor:* Gustavo Andrés Ramos L., Profesor Asistente, Universidad de Los Andes
- *Jurados :* Mario Alberto Ríos M., Profesor Asociado, Universidad de Los Andes

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	4
2	OBJETIVOS.....	4
2.1	Objetivo General.....	4
2.2	Objetivos Específicos	4
2.3	Alcance y productos finales.....	4
3	DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO ...	5
4	MARCO TEÓRICO Y CONSIDERACIONES	5
4.1	Marco Teórico.....	5
4.1.1	Flujo de Línea.....	5
4.1.2	Corto Circuito.....	6
4.1.3	Coordinación de Protecciones	7
4.2	Consideraciones y suposiciones importantes.....	9
5	TRABAJO REALIZADO	10
5.1	Descripción del Resultado Final	10
5.2	Trabajo computacional	10
6	VALIDACIÓN DEL TRABAJO	14
6.1	Metodología de prueba	14
6.2	Validación de los resultados del trabajo	14
7	DISCUSIÓN.....	17
8	CONCLUSIONES.....	18
9	AGRADECIMIENTOS.....	18
10	REFERENCIAS	19
11	APENDICES	21

Tabla de Ilustraciones

Figura 1 Sección del sistema IEEE 13 nodos bajo estudio	9
Figura 2 Diagrama en bloques de las funciones principales del algoritmo.	11
Figura 3 Diagrama de flujo del algoritmo propuesto	12
Figura 4 Programa realizado en NI LabVIEW.	13
Figura 5 Programa realizado en LabVIEW	13
Figura 6 Resultado de la curva de configuración de un relé. $x_{In50} = 20$; $DIAL = 2$; $x_{In51} = 0,7$	14
Figura 7 En la izquierda, curva de configuración para un relé conservando la corriente de arranque inicial. En la derecha, curva de configuración de los relés del sistema conservando las corrientes de arranque del caso base.	15
Figura 8 Resultado de la curva de configuración en ETAP de un relé. $x_{In50} = 20$; $DIAL =$ 2 ; $x_{In51} = 0,7$	15
Figura 9 Secuencia de disparos dada por ETAP	16
Figura 10 Secuencia de disparos dada por el programa desarrollado.....	17

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad el constante desarrollo y deseos por mejorar las fuentes de energías alternativas, ha impulsado el progreso e implementación de edificaciones de energía neta cero, de tal modo que se pueda decidir en qué momento es más conveniente (económica o condición operativa) tomar o inyectar energía a la red.

A medida que este tipo de agentes se hacen partícipes del mercado energético, la red puede presentar diferentes estados de operación (tantos como dos elevado al número de generadores que pueden hacerse partícipes de la operación del sistema, $2^{\# \text{ gener.}}$) esto quiere decir que si se cuenta con tres generadores y la red siempre está en operación, el sistema tiene 8 posibles estados incluyendo el caso base. Es por esta razón que se hace necesario disponer de alguna medida que sea capaz de llevar a cabo la coordinación de las protecciones de manera automática, partiendo del estado de operación del sistema; esto con el fin de poder mantener la confiabilidad y seguridad del sistema.

El objetivo principal de este proyecto, es el de simular dicho esquema que permite coordinar un dispositivo de sobrecorriente (OCD¹ de sus siglas en inglés) partiendo del estado en que se encuentra el sistema al que pertenece.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar y diseñar un esquema de coordinación de protección adaptativa para un sistema de distribución activa y validarlo en el sistema de prueba IEEE 13 nodos.

2.2 Objetivos Específicos

Identificar los posibles modos de operación, definir la coordinación de protecciones que se ajuste a la condición. Adicionalmente se desea identificar el esquema, dispositivos y arreglo de dispositivos de protecciones que aseguran una coordinación adaptativa de sobrecorriente. Para posteriormente validar en un sistema de prueba la coordinación de protección adaptativa.

2.3 Alcance y productos finales

- Identificar los posibles modos de operación, definir la coordinación de protecciones que se ajuste a la condición.
- Identificar el esquema, dispositivos y arreglo de dispositivos de protecciones que aseguran una coordinación adaptativa.
- Plantear la ubicación de los dispositivos de protección adaptativa.
- Validar en un sistema de prueba la coordinación de protección adaptativa.

¹ Overcurrent Device.

3 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

La implementación de las protecciones adaptativas representa una enorme ventaja a los sistemas eléctricos, pues su confiabilidad resulta aún mayor y sus tiempos de respuesta se ven reducidos significativamente, aunque algunos ingenieros de protecciones debido a su criterio conservador las implementan de tal modo que su respuesta sea similar a relés (relays) electromecánicos [1]. sea cual fuere el caso, la protección debe ser capaz de aislar la falla en el menor tiempo posible, del mismo modo que el sistema debe ser afectado en la menor medida mediante la remoción de pequeñas partes afectadas del sistema, lo que se denomina como selectividad.

En [1] se muestra cómo es posible implementar un esquema de protección adaptativa de sobrecorriente en una planta industrial bajo ciertos parámetros de configuración del sistema.

En [2] se muestra cómo es posible analizar un sistema para que basados en el estado de operación del sistema a proteger, el dispositivo encargado de hacer la protección pueda adquirir nuevamente sus datos de ajuste.

En [3] se plantea un esquema para llevar a cabo la selección de parámetros de los dispositivos de protección adaptativos. Sin embargo, como se menciona en [2] estas simulaciones y selección de parámetros para los elementos clásicos de protección suele hacerse off-line, de modo que esto se convierte en un proceso iterativo de ajuste que puede tomar tiempo considerable; adicionalmente también es importante resaltar que los esquemas diseñados para la evolución de las protecciones en los diferentes estados de operación requieren de una validación previa a la implementación, por lo que se vuelve trascendental poder acceder al sistema de forma simulada para modificar los estímulos y obtener respuestas del modelo en tiempo real.

4 MARCO TEÓRICO Y CONSIDERACIONES

4.1 Marco Teórico

4.1.1 Flujo de Línea

El flujo de línea constituye una de las variables más relevantes de este proyecto, ya que es uno de los parámetros necesarios para llevar a cabo la configuración del relé de sobrecorriente temporizado (unidad 51). Este flujo de línea se calculó mediante la siguiente expresión.

$$I_{ij}^* = \frac{V_i - V_j}{Z_b} \quad (\text{Ec. 1})$$

4.1.2 Corto Circuito²

El estudio de corto circuito es una de las herramientas más importantes para llevar cabo el análisis de los sistemas de potencia, pues es gracias a ésta que se puede establecer cuáles son los valores de las variables de estado estable bajo condición de falla del sistema.

Una de las variables que permite llevar a cabo este estudio es la matriz de impedancias, Z_{bus} (también conocida como Z_{barra}). Esta puede ser calculada de varias formas. Una de ellas es a través de la inversión de la matriz de admitancias del sistema, Y_{bus} , método que no suele ser ciento por ciento efectivo pues es posible que dicha matriz sea singular; dado que se requiere de un método con el cual se pueda obtener siempre la Z_{bus} , para este trabajo se utilizó el método de construcción de la misma a través de inserción de nodos.

Dado que las corrientes de carga del sistema suelen ser de menor magnitud que las que circulan a través del sistema debido a la falla, éstas se desprecian, y por tal motivo en el cálculo de la Z_{bus} [4] no entran dichas impedancias.

Como se mencionó previamente el método utilizado para la construcción de dicha matriz es el de agregación de nodos; dicho método se basa en cuatro casos:

- Caso1: Adición de un nuevo bus p al nodo de referencia a través de una impedancia Z.
- Caso2: Adición de una conexión de impedancia Z entre el nodo p y un bus k existente.
- Caso3: Adición de una conexión entre un bus existente k y el nodo de referencia a través de una impedancia Z.
- Caso4: Adición de una conexión de impedancia Z entre dos buses existentes.

Al contar con la Z_{bus} se puede llevar a cabo el cálculo de la corriente de falla en un bus j mediante la expresión:

$$I_j^f = \frac{V_j}{Z_{jj}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Sin embargo dado que este proyecto requiere conocer las corrientes que se tienen en las demás barras es necesario determinar la variación de voltaje en cada barra debido a la falla en el bus j, y esto se puede lograr mediante el siguiente planteamiento:

² Las ecuaciones de esta sección (4.1.2) fueron tomadas de [5]

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ -V_f \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1i} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ Z_{i1} & & Z_{ii} & & Z_{in} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{ni} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_f'' \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_{1i} * I_f'' \\ \vdots \\ -Z_{ii} * I_f'' \\ \vdots \\ -Z_{ni} * I_f'' \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde V_f es el voltaje de prefalla del nodo en el que se estudiará la falla. Una vez se conocen las variaciones en los voltajes de cada bus, se puede determinar el voltaje en cada barra durante la falla como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_f \\ \vdots \\ V_f \\ \vdots \\ V_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_f - Z_{1i} * I_f'' \\ \vdots \\ V_f - V_f \\ \vdots \\ V_f - Z_{ni} * I_f'' \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4})$$

Finalmente se puede conocer la corriente que fluye por cada rama durante la falla en un nodo determinado a través de la siguiente expresión:

$$I_{ij}'' = \frac{V_i - V_j}{Z_b}$$

Donde I_{ij} es el valor de la corriente que fluye desde el nodo i al nodo j ; V_i y V_j son los voltajes en las barras i y j durante la falla, los cuales están conectados a través una línea de impedancia Z_b . [5]

4.1.3 Coordinación de Protecciones³

La coordinación de protecciones de un sistema de distribución se realiza a través de diferentes equipos, ya sean fusibles, breakers, interruptores, entre otros. Para el caso de este trabajo se tomaron en cuenta los elementos que controlan los disparos de los interruptores de potencia al detectar una sobrecorriente de fase o falla simétrica, es decir las unidades de relé 50 y 51, donde la primera corresponde al accionamiento instantáneo (menor o igual a 50ms) y la segunda al temporizado (tiempos definidos por parámetros).

Para poder configurar y accionar las unidades relé, como se establece en [6] y se explica en [7], es necesario conocer y determinar las siguientes variables:

- Establecer la relación de los transformadores de corriente, ya que este es el elemento que está encargado de escalar la corriente que circula a través de la línea o cable, para ser interpretada por el relé.

³ La ecuaciones de esta sección (4.1.3) son tomadas de [7]

Validación de protecciones adaptativas por medio de simulación en tiempo real

- Determinar la corriente de falla en cada nodo, ya que de esta depende la configuración de la unidad 50:

$$I_{arranque} = k * I_{falla} * \frac{SecCT}{PrimCT} * \frac{1}{I_{nom}} \quad (\text{Ec. 5})$$

- Conocer la corriente de carga del sistema en todos los puntos posibles: ya que de este parámetro depende la configuración de la unidad 51:

$$IEC : t = \frac{a * DIAL}{M^n - 1} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$ANSI : t = \frac{a * DIAL}{M^n - 1} + b * DIAL \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde los parámetros ‘a’, ‘b’ y ‘n’ de las ecuaciones 6 y 7 depende del tipo de curva que se desea trabajar en el relé:

Tabla 1 Constantes ecuación exponencial IEC

Constantes de forma para ecuación exponencial según norma IEC		
Tipo de Curva	a	n
Tiempo Inverso Estándar	0.14	0.02
Muy Inversa	13.5	1
Extremadamente Inversa	80	2
Tiempo Inverso Largo	120	1

Tabla 2 Constantes ecuación exponencial IEC

Constantes de forma para ecuación exponencial según norma ANSI			
Tipo de Curva	a	n	b
Tiempo Inverso Estándar	59.5	2	1.8
Muy Inversa	39.22	2	0.982
Extremadamente Inversa	56.4	2	0.243
Tiempo Inverso Largo	0.103	0.02	0.228

- Finalmente se precisa conocer los parámetros de diseño como los son k del instantáneo, y k del temporizado, así como también el tipo de curva a

seleccionar. Estos parámetros van de la mano con los que hacen referencia a las limitaciones físicas del manejo del dispositivo como lo son los pasos de las unidades 50 y 51, del mismo modo que los límites de configuración de los factores multiplicadores de corriente y el DIAL.[6][7]

4.2 Consideraciones y suposiciones importantes

En el desarrollo de este proyecto se encontraron una serie de limitaciones computacionales (PSAT)[15], las cuales se pudieron resolver sobre la marcha. Por lo anterior, este proyecto parte de cuatro suposiciones que deben ser consideradas.

La primera consta en asumir el sistema bajo estudio, IEEE 13 (Figura 1) [8] totalmente balanceado, ya que esto hace parte de una de las limitaciones del programa utilizado para el desarrollo del proyecto.

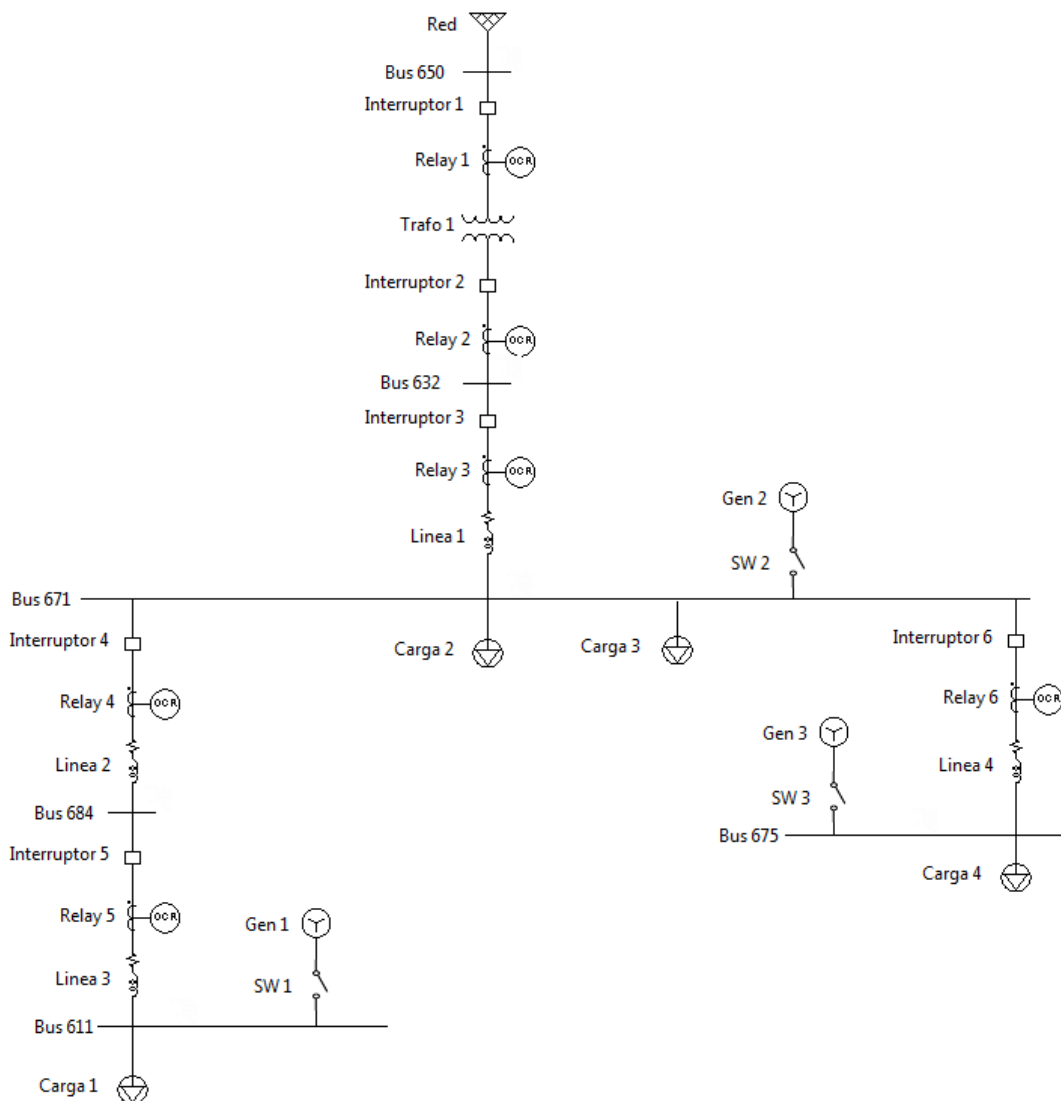


Figura 1 Sección del sistema IEEE 13 nodos bajo estudio

La segunda consta en tomar las cargas del sistema mayormente inductivas como lo son motores, caso para el cual la protección se realiza con datos de placa como lo es la corriente a plena carga (FLA) como se establece en el NFPA70 – NEC2011 artículo 430, y por tal motivo la protección de la misma permanece invariante.

La tercera hace referencia a sobredimensionar la capacidad del elemento térmico del interruptor para el caso más crítico y así poder operar en los demás estados de operación.

Finalmente se asume que el seccionador ubicado entre los buses 671 y 692 del sistema está siempre cerrado y por ende se muestra solo el bus 671. [6][7][9]

5 TRABAJO REALIZADO

El desarrollo de este proyecto ha llevado a disponer de una metodología adicional a la tradicional para realizar la coordinación de protecciones de sobrecorriente de fase de forma automatizada; esto ha sido posible al utilizar los parámetros especificados en normas, y métodos clásicos de estimación de parámetros característicos de los sistemas de potencia, parámetros que pueden ser calculados de formas alternativas, en las cuales se disponga de mejores tiempo de cálculo para mejorar el desempeño del algoritmo sugerido (Este algoritmo será tratado en la sección 5.2).

5.1 Descripción del Resultado Final

El trabajo se comenzó a desarrollar evaluando las diferentes configuraciones de los relés para los posibles modos de operación del sistema de potencia bajo estudio, proceso mediante el cual no fue posible detectar algún patrón o parámetro que pudiera establecer la configuración de las nuevas protecciones en otro estado de operación del sistema.

Dada la ausencia de dicha facilidad de reconfiguración se estableció que la forma más adecuada de contar con una coordinación de protecciones de sobrecorriente satisfactoria era mediante el estudio y configuración offline de los OCD, lo cual no satisface la posibilidad de reconfiguración del sistema de forma arbitraria, por tal motivo se continuó la búsqueda de alternativas.

Finalmente se realizó un algoritmo que mediante la estimación de parámetros del sistema lleva a cabo la configuración de los OCD de forma automática, basándose en el estado de conexión de los generadores que alimentan a la red y el conocimiento de las características eléctricas de los elementos.

5.2 Trabajo computacional

El trabajo computacional tuvo 3 partes que influyeron de manera significativa en el desarrollo del algoritmo, las aproximaciones tomadas en cuenta, la construcción de la Zbus, y la validación de la configuración calculada. Esta última será tratada más adelante

El algoritmo fue desarrollado utilizando el programa Power System Analysis Toolbox (PSAT) desarrollado por Federico Milano [16], y para utilizarlo es necesario definir el sistema bajo estudio; para ello se tuvo en consideración lo recomendado en el capítulo 4 en la sección 5 (página 101) de [10] dado que se trata de un sistema de distribución, con líneas de longitud menor a 50 millas se puede simplificar su representación al modelo π despreciando los elementos $Y/2$. Sin embargo se resalta que ninguna línea presente en el sistema bajo estudio excede la longitud de una milla, por lo que la aproximación puede considerarse suficientemente apropiada.

Dado que la ecuación 8 no cumple la desigualdad para todo el sistema la necesidad del uso de dos OCD por línea no se hace necesaria; y dado que en términos generales para los sistemas de distribución las impedancias son relativamente grandes la inecuación no cumplirá.

$$\frac{Z_{TH} + Z_L}{Z_{TH}} \geq 1.3 \quad (\text{Ec. 8})$$

Adicionalmente, como ya se mencionó en la sección 4.1.2 el algoritmo desarrollado utiliza el método de adición de nodos.

Como se muestra en la Figura 2 la configuración de los relés depende de la estimación del estado del sistema, lo cual se obtiene mediante la solución de un flujo de carga del sistema (la cual se adquiere cada que se modifica la topología) o la estimación obtenida mediante los datos adquiridos por unidades PMU (estimación que se encuentra fuera de los alcances de este proyecto).

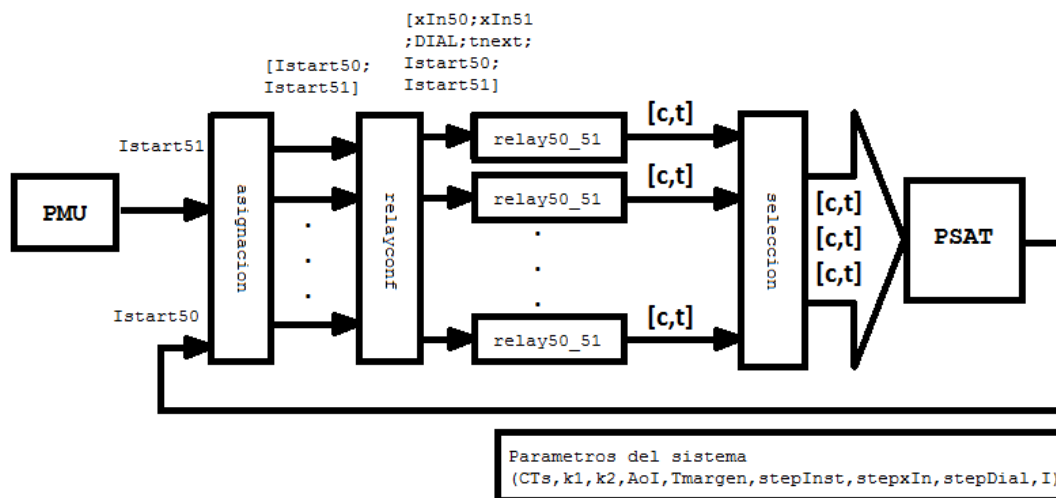


Figura 2 Diagrama en bloques de las funciones principales del algoritmo.

A partir de este punto lo que se realiza en este algoritmo se muestra en la Figura 3 que se muestra a continuación.

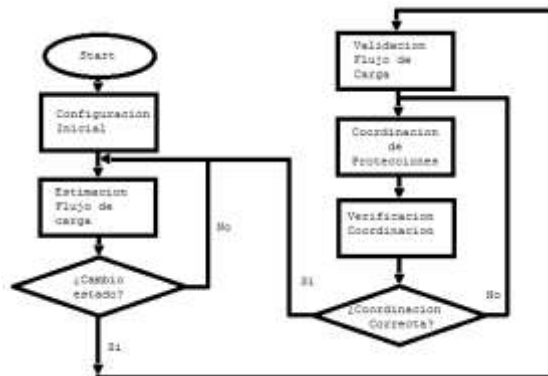


Figura 3 Diagrama de flujo del algoritmo propuesto

En esencia el algoritmo comienza realizando la configuración inicial de las protecciones de sobrecorriente; luego evalúa si se ha realizado la conexión de nuevas fuentes de generación para así realizar la nueva configuración de los relés.

Este proceso de configuración de los relays se realiza mediante la estimación de las corrientes de carga a través del flujo de línea y la estimación de las corrientes de falla en cada punto del sistema a través la Z_{bus} . Estas estimaciones solo se realizan en los momentos en que ocurre un cambio de estado en el sistema.

A continuación se muestra una tabla de resultados de las configuraciones de los relés que realiza el programa para 4 posibles casos de los ocho posible.

Tabla 3 Resultados de la configuración de relays para 4 configuraciones diferentes incluyendo el caso base

Estado G1 G2 G3	Nodo	xIn50	xIn51	DIAL
0 0 0	650	20	0.4	4
	632	20	0.8	1
	671	8.8	0.8	1
	684	20	0.6	2
	611	20	0.6	2
	675	5.55	0.4	1
0 0 1	650	20	0.4	4
	632	20	0.8	1
	671	13.15	0.8	1
	684	20	0.6	2
	611	20	0.6	2
	675	8	0.6	1
0 1 1	650	20	0.3	6
	632	20	0.6	2
	671	16.85	0.6	1
	684	20	2.3	1
	611	20	2.3	1
	675	10.7	0.7	1
1 1 1	650	20	0.3	6
	632	20	0.6	2
	671	20	0.6	2
	684	20	2.5	1
	611	20	2.5	1
	675	12.4	0.5	1

Validación de protecciones adaptativas por medio de simulación en tiempo real 13

En la Figura 4 y Figura 5 se muestra el resultado final del programa computacional que se desarrolló para realizar el estudio de protecciones adaptativas en sistemas de distribución a través de simulación real time. La puesta en marcha del mismo se explica en la sección 0.

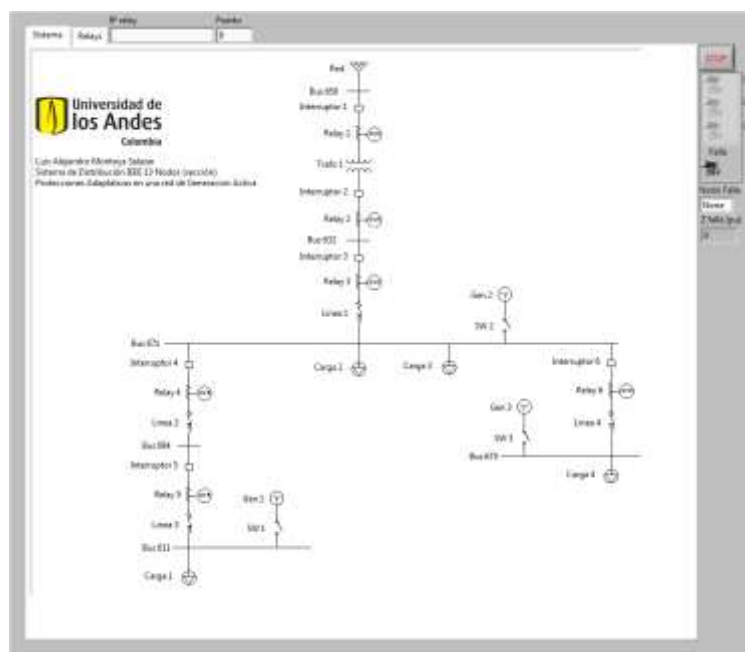


Figura 4 Programa realizado en NI LabVIEW.

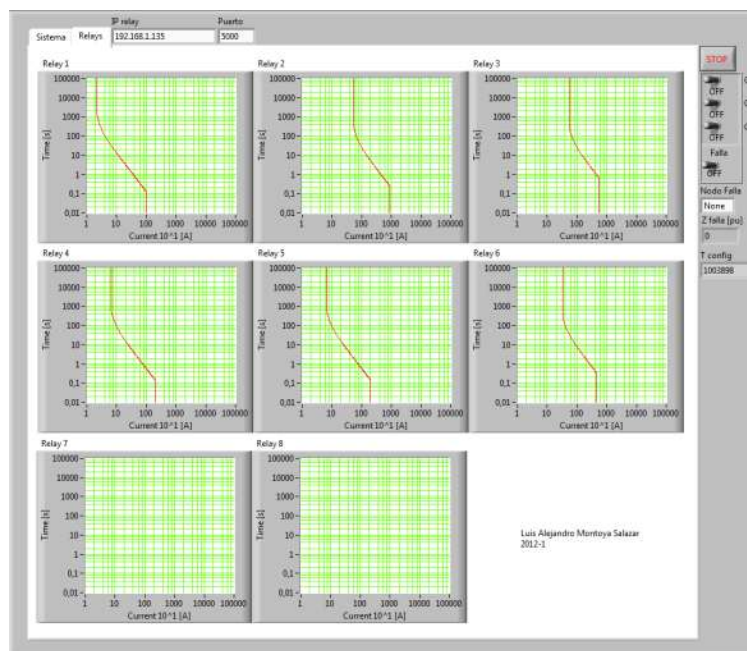


Figura 5 Programa realizado en LabVIEW

6 VALIDACIÓN DEL TRABAJO

6.1 Metodología de prueba

Las pruebas de validación del algoritmo se realizaron a través de comparaciones con configuraciones offline realizadas en el software ETAP de modo que fuera posible establecer el paralelo con una herramienta de tipo comercial a nivel industrial.

Una vez validada las configuraciones se prosigue a ejecutar el programa y verificar que efectivamente se tienen respuestas similares con las secuencias de disparos de los OCD.

Los ejemplos pertinentes a las pruebas anteriormente mencionadas serán ilustrados en la sección 6.2.

6.2 Validación de los resultados del trabajo

Como se mencionó en la sección anterior, primero se validó que los parámetros de configuración de las protecciones fueran válidos, situación que se muestra en las siguientes ilustraciones (Figura 6 y Figura 8).

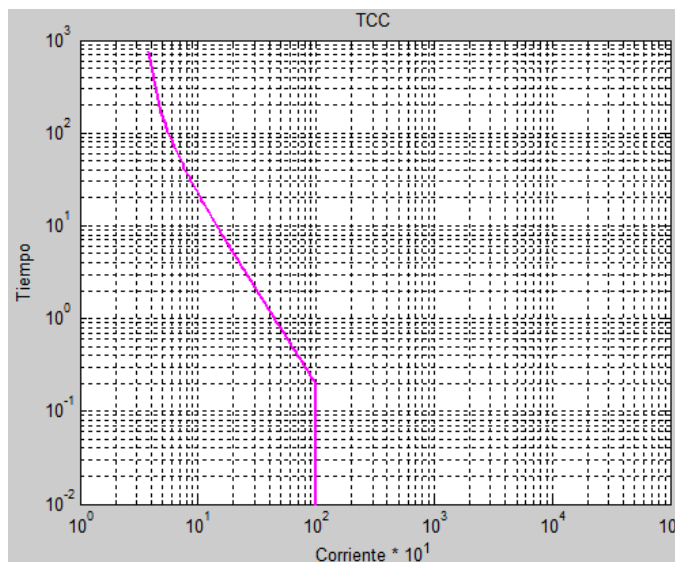


Figura 6 Resultado de la curva de configuración de un relé. $xIn50 = 20$; $DIAL= 2$; $xIn51=0,7$

Como se muestra en la Figura 6 la curva muestra una configuración apropiada, pues no excede ninguno de los límites de los parámetros de configuración del relé modelo L-90 [11]. Otro aspecto que se resalta del modelo computacional desarrollado es la capacidad del algoritmo en escoger la configuración de los OCDs en su totalidad o conservar la corriente de arranque del caso base y configurarlos mediante la variación de otros parámetros del dispositivo, esto se puede observar en la Figura 7.

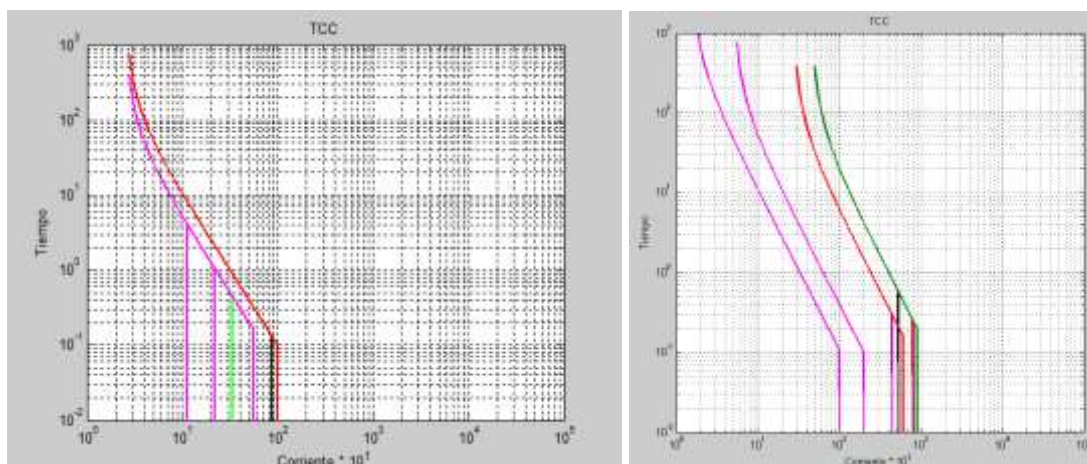


Figura 7 En la izquierda, curva de configuración para un relé conservando la corriente de arranque inicial. En la derecha, curva de configuración de los relés del sistema conservando las corrientes de arranque del caso base.

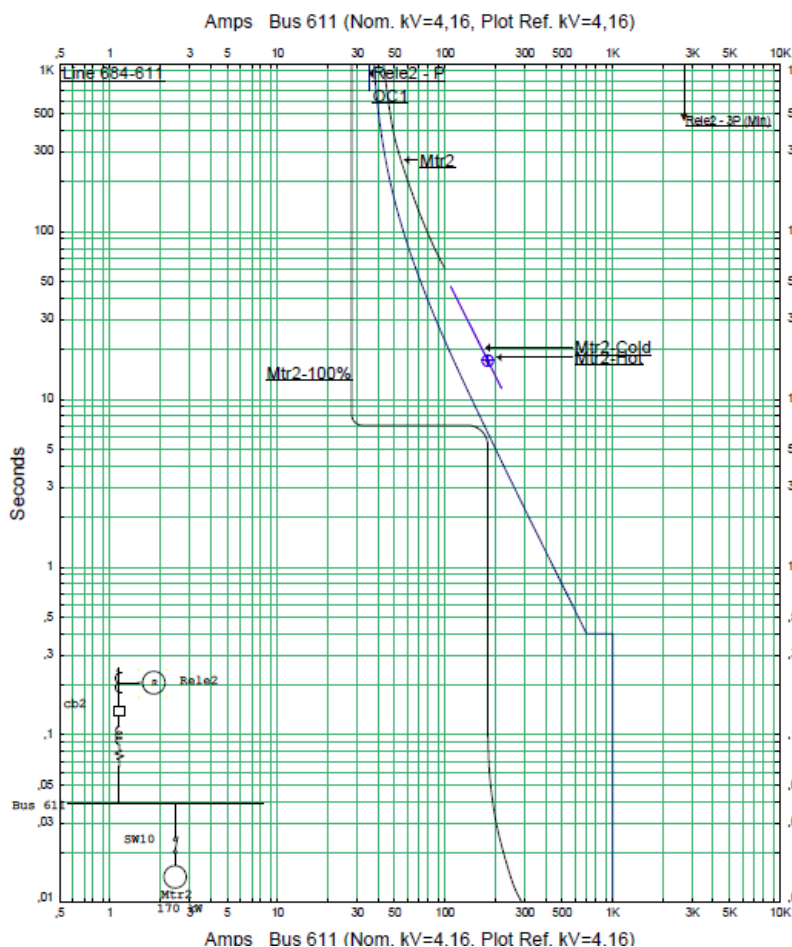


Figura 8 Resultado de la curva de configuración en ETAP de un relé. $xIn50 = 20$; $DIAL = 2$; $xIn51 = 0,7$

Como es posible apreciar en la curvar del OCD se ajusta de manera adecuada a la curva de la carga permitiéndola arrancar sin presentar inconvenientes. Es preciso

recordar que estos parámetros de ajuste son los calculados por el mismo algoritmo desarrollado así como los resultados gráficos mostrados en la Figura 6.

Adicionalmente se muestra en la Figura 9 que la secuencia de disparos resulta apropiada como se muestra a continuación en el software ETAP, de forma análoga se muestran estos mismos resultados en el programa desarrollado en la Figura 10.

Finalmente es posible señalar que el desempeño del proyecto desarrollado resulta adecuado para realizar el estudio de protecciones bajo un esquema de adaptabilidad autónoma online, esto se debe a la capacidad del algoritmo de detectar el estado de configuración del sistema, y estimación del tanto las corrientes del sistema tanto en falla como en operación sin contingencia.

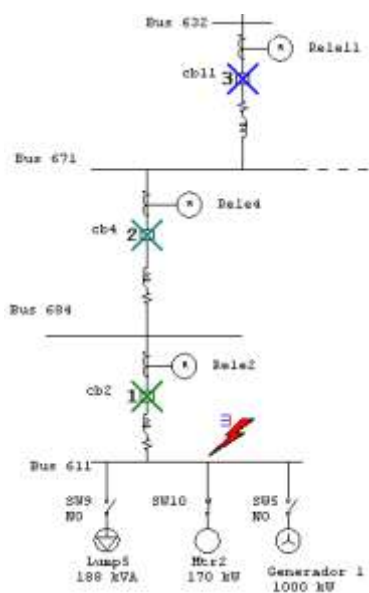


Figura 9 Secuencia de disparos dada por ETAP

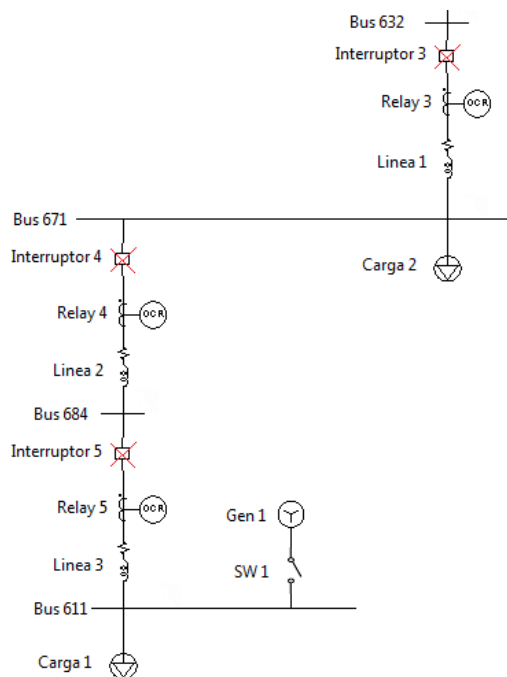


Figura 10 Secuencia de disparos dada por el programa desarrollado

7 DISCUSIÓN

El presente proyecto presenta una forma de realizar protecciones adaptativas, sin embargo queda como trabajo futuro el cambio del algoritmo de cálculo de la matriz Zbus con el fin de mejorar los tiempos de cálculo del algoritmo; adicionalmente queda pendiente realizar un ejecutable que permita crear el sistema que se desea probar de forma más efectiva y menos engorrosa.

El algoritmo de protecciones adaptativas permite evidenciar que la tarea de coordinación de protecciones puede ser automatizada, siempre y cuando estén bien definidos los criterios de diseño, limitaciones físicas de los equipos y se cuente con buenas reglas de priorización de tareas.

Si bien es posible afirmar que en el presente documento se presenta un algoritmo que puede coordinar las protecciones de un sistema eléctrico de distribución, que ha sido validado con el unifilar presentado en la Figura 1; es importante resaltar que para casos en los que las variables de diseño (o físicas de los equipos) no permanecen constantes en todo el sistema, es necesario llevar a un siguiente nivel de desarrollo este algoritmo para que permita efectuar una coordinación adecuada. Esto podría solucionarse mediante la indexación de los equipos, para así llevar a cabo una configuración más específica.

Es importante resaltar que a pesar de tener tiempos de desarrollo significativos, los tiempos de validación de los modelos propuestos son menores al realizarse a través de simulación en tiempo real, mediante herramientas verificadas.

8 CONCLUSIONES

A través del algoritmo desarrollado se presenta otra alternativa a la realización de protecciones adaptativas ya que su validación no se hace offline como suele hacerse en la mayoría de los casos sino que se propone realizar una validación en tiempo real a través de una plataforma hardware de prototipado industrial como lo es la compact RIO.

El algoritmo desarrollado permite visualizar el desempeño del sistema de distribución en el ámbito de protecciones de sobrecorriente de fase a medida que se insertan o se extraen fuentes de generación.

El correcto funcionamiento del algoritmo depende de la correcta descripción del sistema de distribución sobre el cual se desarrolla la prueba.

Fue posible corroborar que las protecciones son reconfiguradas a medida que el sistema entra en diferentes estados de operación, así como también fue posible validar que la selectividad del sistema se realiza de forma satisfactoria.

Fue posible notar que tanto el correcto funcionamiento del algoritmo, como la adecuación de los tiempos de respuesta apropiados tienen una dependencia importante del buen dimensionamiento de los CTs, para este caso fue necesario el dimensionamiento de las corrientes de carga aumentadas en un factor del 15% aunque para el caso del transformador, fue importante hacer un dimensionamiento mayor.

El desarrollo de este proyecto permite evidenciar las facilidades de la simulación en tiempo real, ya dependiendo del grado de desarrollo de la herramienta, se puede analizar los tiempos de reacción y respuesta del sistema al generar cambios o estímulos que permiten hacer cambios de estados.

9 AGRADECIMIENTOS

Agradezco ante todo a Dios por haberme dado la salud y oportunidad de poder cursar esta carrera de la forma más satisfactoria posible. También agradezco a mis hermanos, por brindarme un apoyo excepcional a lo largo de toda la carrera, en especial a mis padres, Luis Alfonso Montoya y Gloria Patricia Salazar, por la paciencia y dedicación que tuvieron conmigo.

En el ámbito académico agradezco a todos mis amigos y compañeros que me acompañaron a lo largo de este proceso como Diana Pardo, Sergio Bacca y Juan Felipe Restrepo, así como también resalto el apoyo desinteresado brindado en algunos inconvenientes de este proyecto del Profesor Gustavo Andrés Ramos, Davis Montenegro y Oscar Gómez Carmona.

10 REFERENCIAS

- [1] Soares, A.H.M.; Vieira, J.C.M.; , "Case study: Adaptive overcurrent protection scheme applied to an industrial plant with cogeneration units," Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES , vol., no., pp.1-5, 21-24 April 2008.
- [2] Zhongwei Li; Weiming Tong; Fengge Li; Shenghu Feng; , "Study on Adaptive Protection System of Power Supply and Distribution Line," Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on , vol., no., pp.1-6, 22-26 Oct. 2006.
- [3] Jing Ma; Chao Mi; Tong Wang; Jie Wu; Zengping Wang; , "An adaptive protection scheme for distributed systems with distributed generation," Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE , vol., no., pp.1-6, 24-29 July 2011.
- [4] S. ARSLAN; " Zbus Building Algorithm", Noviembre 15 de 2009. [En Línea] Disponible: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25846-zbus-building-algorithm>
- [5] W. STEVENSON, J GRAINER, "Análisis de Sistemas de Potencia", McGraw-Hill, Mexico, 1996, pp. 131-158
- [6] "IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems," IEEE Std 242-2001 (Revision of IEEE Std 242-1986) [IEEE Buff Book], pp. 580 – 635
- [7] J. ZAPATA, "Protección de Sistemas de Transmisión y Distribución de Electricidad", Universidad de los Andes, 2009, pp. 60.
- [8] IEEE PES (2012). "Distribution Test Feeders", [En Línea]. Disponible: www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html
- [9] National Electric Code, "NFPA70 ", NEC2011, 2011, Artículo 430.
- [10] A. BERGEN, V. VITTAL, "Power System Analysis", Segunda Edición, Prentice Hall, 2000, pp 110 – 102.
- [11] General Electric (2012), "L90" [En Línea]. Disponible: <http://www.gedigitalenergy.com/multilin/catalog/l90.htm>
- [12] Brahma, S.M.; Girgis, A.A.; , "Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.19, no.1, pp. 56- 63, Jan. 2004
- [13] Casto, Andres F.; Protecciones Eléctricas de sobre corriente adaptativas para sistemas de distribución con generación distribuida. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Los Andes.
- [14] Suárez C., Sergio M.; Impacto de las protecciones eléctricas en las redes de media tensión con generación distribuida. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Los Andes.
- [15] F. MILANO. "Power System Analysis Toolbox", Reference Manual for PSAT versión 2.1.2, Junio 26 de 2008.

-
- [16] Dr. Federico Milano Webpage (2012), "PSAT". [En Línea] Disponible:
<http://www.uclm.edu/area/gsee/Web/Federico/psat.htm>

11 APENDICES

- A. Para instalar el programa desarrollado en este proyecto de grado debe descomprimir los archivos contenidos en la carpeta MATLAB.zip y copiarlos en la ruta C:\...\MATLAB\R2011a
- B. En el archivo sistema2.m debe definir el sistema de distribución al cual desea aplicar el esquema de protección adaptativa.
- C. Si desea cambiar los parámetros de diseño debe modificar la variable Configuracion.mat de la siguiente forma:
 - a. Configuracion.Aol= (El primer digito define el tipo de norma, 1x=Ansi, 2x=IEC. el segundo digito especifica el tipo de curva a utilizar: (1)Tiempo inverso estandar, (2)Muy inversa, (3)Extremadamente inversa, (4)Tiempo inverso Largo)
 - b. Configuracion.k1=(factor de dimensionamiento de la corriente de la unidad 50)
 - c. Configuracion.k2=(factor de dimensionamiento de la corriente de la unidad 51)
 - d. Configuracion.stepDial=(define los pasos con los que se ajusta el DIAL)
 - e. Configuracion.stepInst=(define los pasos con los que se ajusta la unidad 50)
 - f. Configuracion.stepxIn=(define los pasos con los que se ajusta la unidad 51)
 - g. Configuracion.tmargen=(define el tiempo margen de configuración de los relays temporizados)
- D. Guarde la estructura creada en el paso C como Configuracion.m en la ruta C:\...\MATLAB\R2011a
- E. En el archivo main_run.m y main_run2.m, en la sección %% Inserción Generadores agregue la línea <<PV.store(x,11)=gx;>> tantas veces como generadores haya definido en el punto B. los signos << >> son para indicar la línea de código y por lo tanto no se ponen la x hace referencia al generador x-esimo. Esto implica que si se definen 5 generadores debe copiarse esta línea 5 veces variando x desde 1 hasta 5.
- F. En el archivo main_run.m y main_run2.m, en la sección %% Configuracion Relays agregue la línea <<rc1=relayconf(k1,k2,C(x,1),C(x,2),Aol,tmargen,t,cts(1,1),cts(1,2),stepInst,stepxIn,stepDial); >> tantas veces como relés haya definido, donde x empieza en 1 y termina en el número de relés que se desea poner.
- G. En el archivo instrumentos defina los CTs especificando primero el valor de la corriente bobinado primario seguido del secundario (e.g 500 5), separados por un espacio entre ellos. Importante: Recuerde definir un CT por cada línea.

- H. En la tras antepenúltima línea `<<rc=[rc1;rc2;rc3;rc4;rc5;...;rcx];>>` agregue tantos rcx donde se encuentran los puntos suspensivos como relays tenga.
- I. Descomprima la carpeta LabVIEW.zip y modifique el archivo Parametros haciendo una matriz de mx3 donde m es el mayor entre número de CTs y 7. En la columna 1 va el valor del primario de los CTs, en la segunda columna el secundario de los CTs, y en la 3 columna los parámetros que se listan en C, los espacios que no se usa deben ser llenados con 0 y las columnas deben ir separadas por ; (punto y coma).
- J. Hasta este punto cuenta con un método de configuración adaptativa offline.
- K. A continuación se hace una documentación gráfica ya que la disposición del código depende de cada persona, por tal motivo se muestra cada uno de los estados que contiene la máquina de estados. No olvide ajustar cada uno de los parámetros del código, para que el número de nodos, así como el de relés sea el adecuado; adicionalmente se recomienda inicializar las variables de los registros de la máquina de estados.

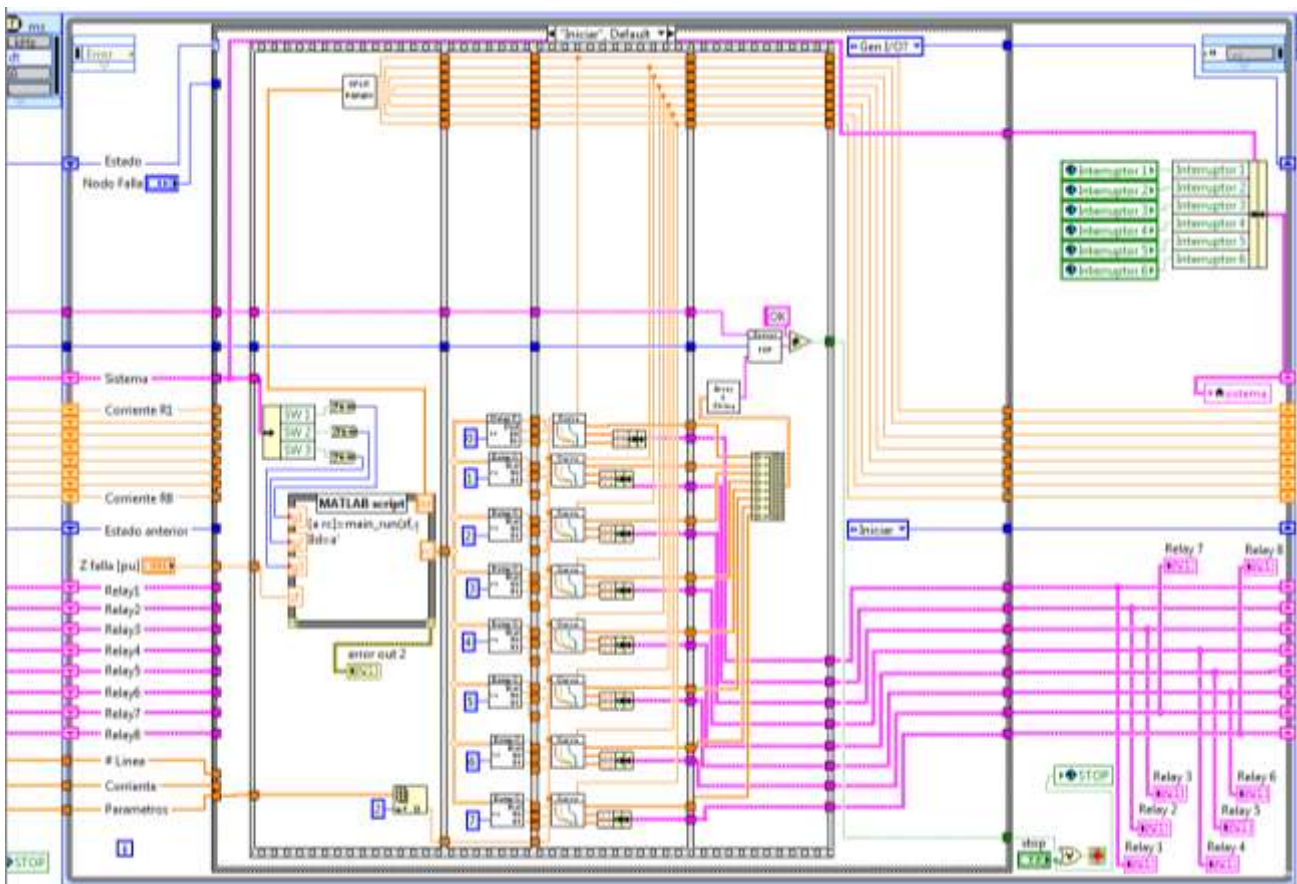


Ilustración 1 Estado Inicializar

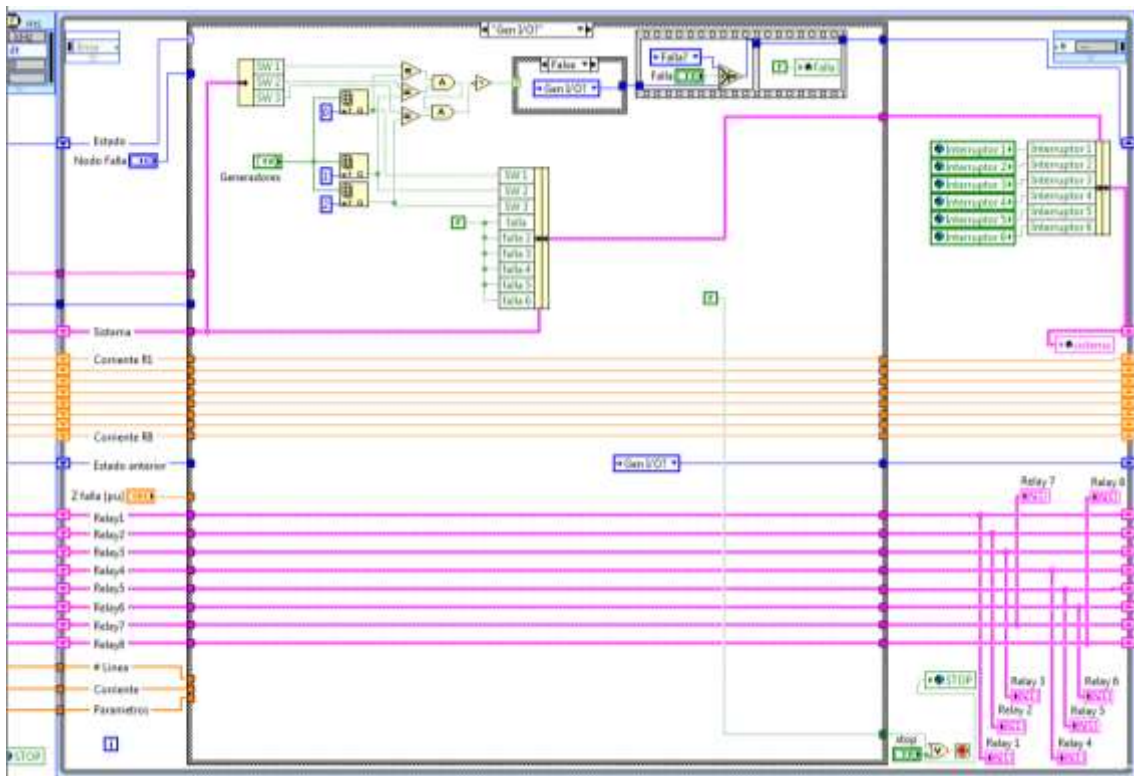


Ilustración 2 Estado Gen I/O

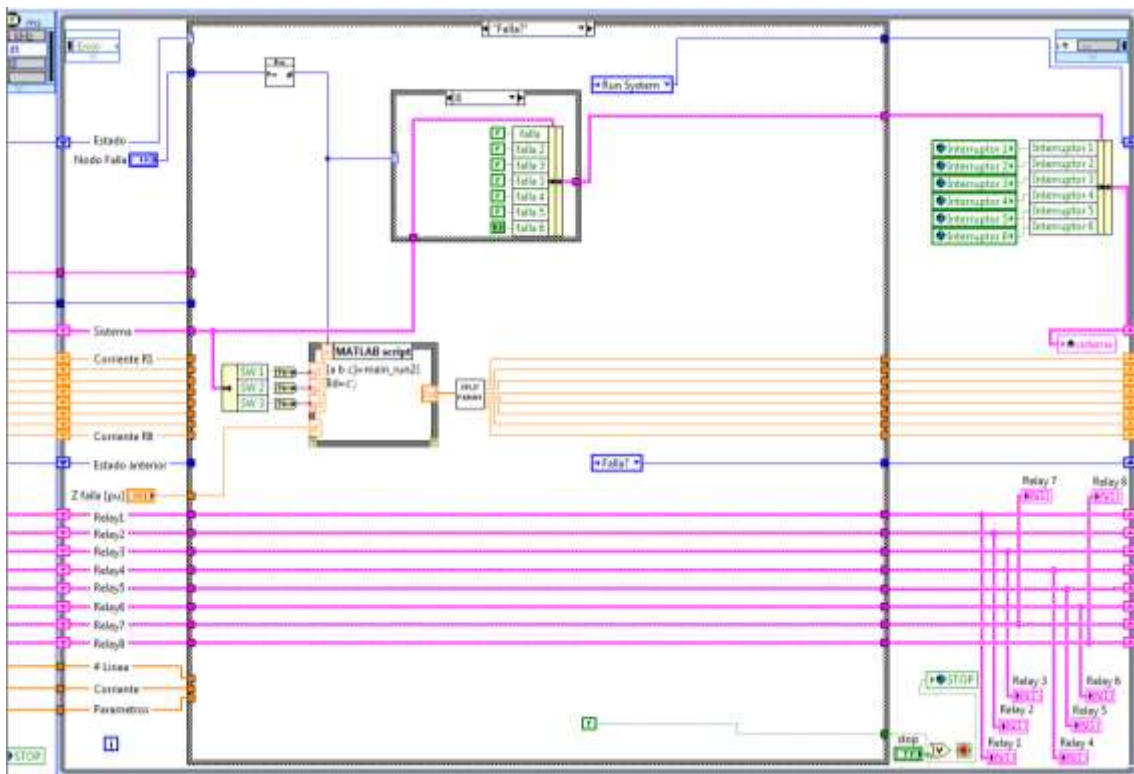


Ilustración 3 Estado Falla

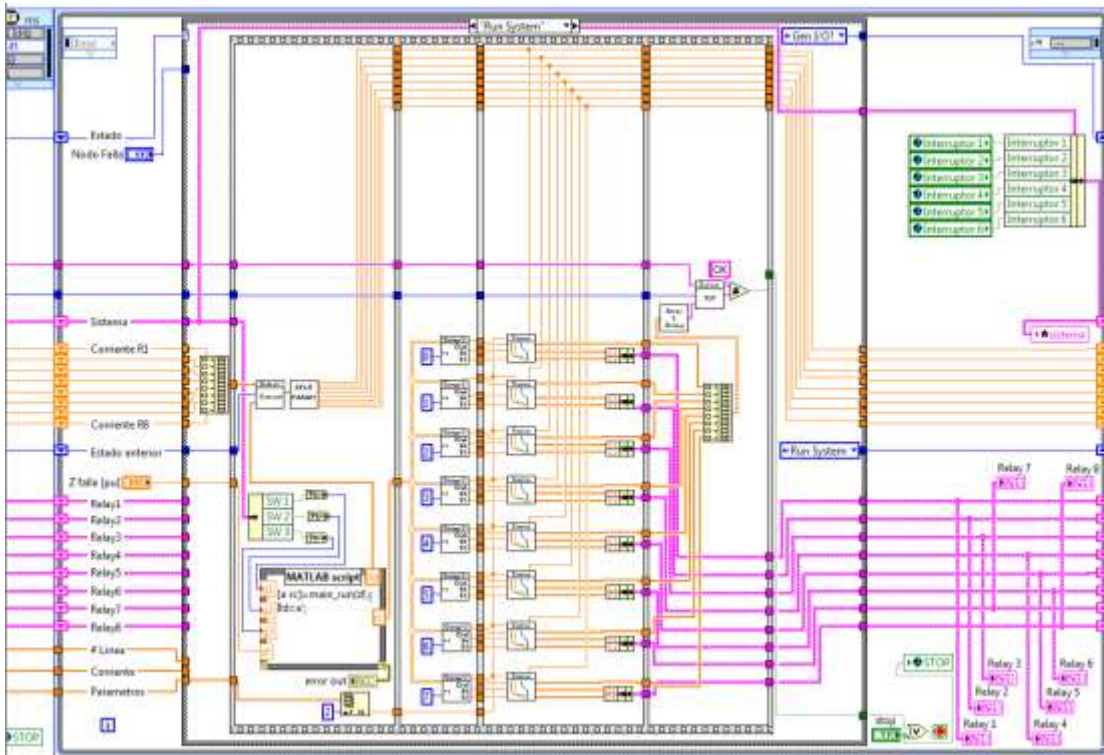


Ilustración 4 Estado Run System

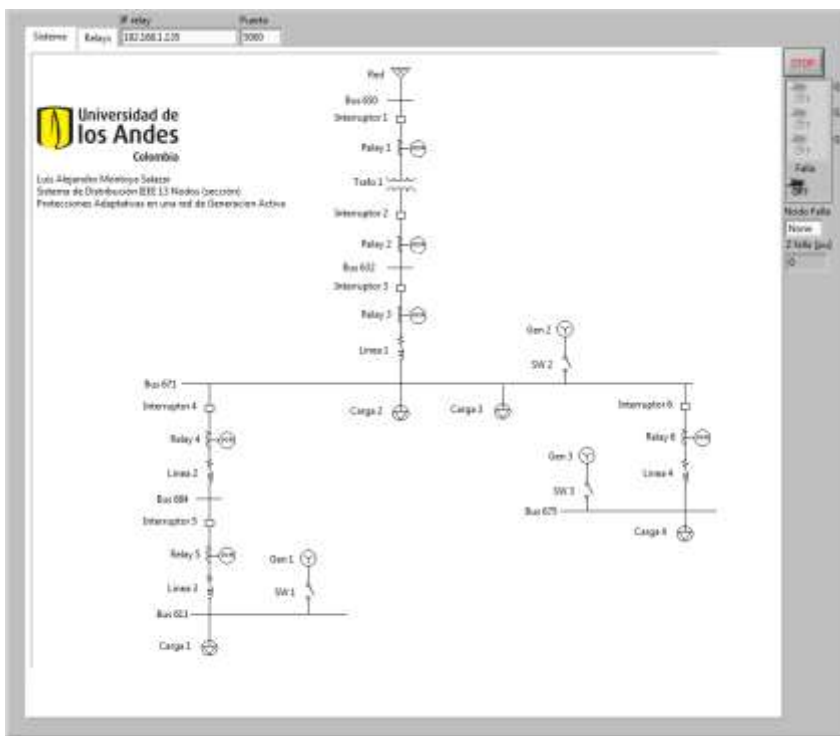


Ilustración 5 Pestaña Sistema de la interfaz gráfica

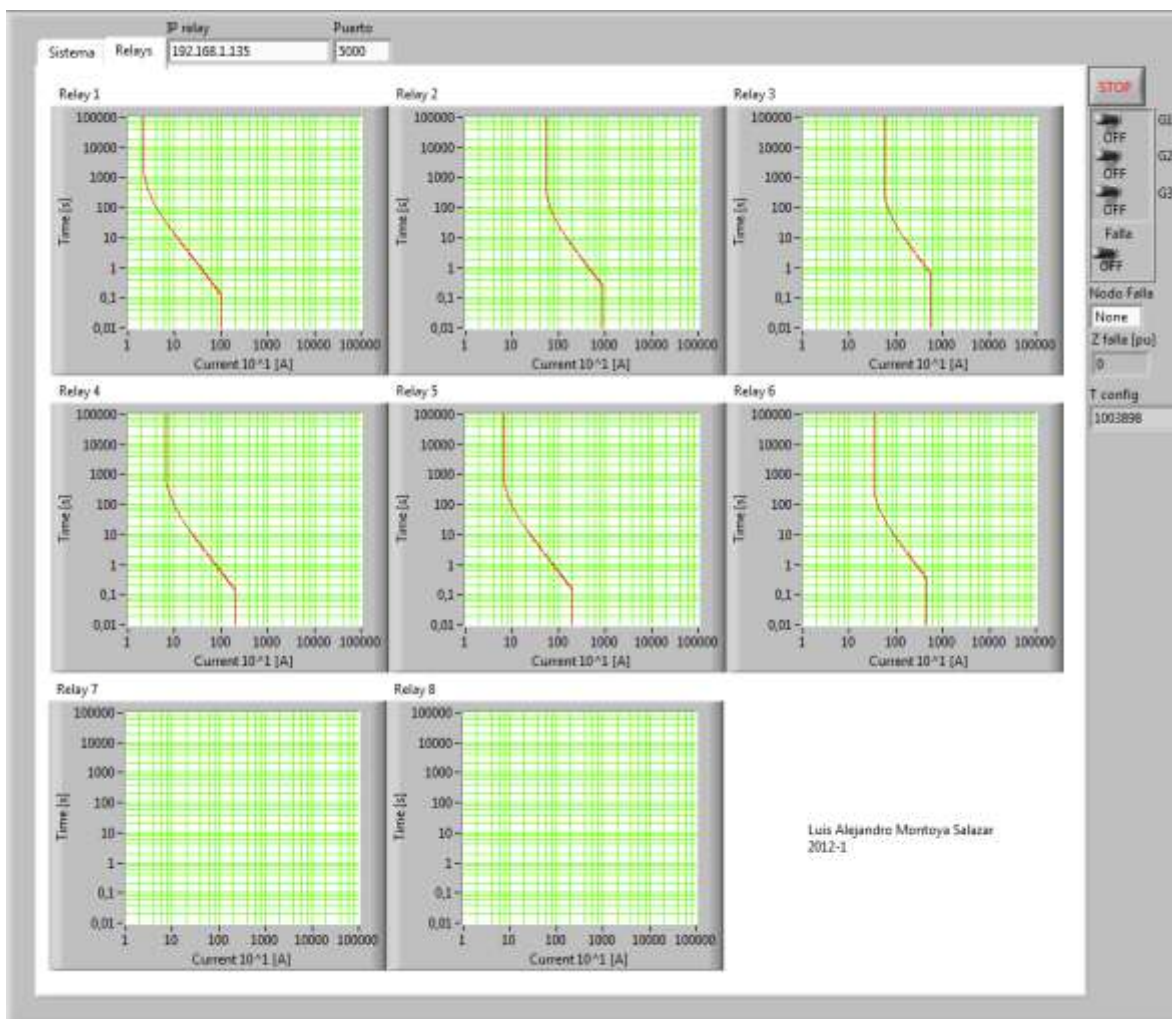


Ilustración 6 Pestaña Relay de la interfaz gráfica

- L. Si está trabajando en la versión RT ha terminado.
- M. Si está trabajando en la versión RT-HIL no olvide estar conectado a una red LAN o WAN y disponer de la IP del otro dispositivo, así como también de tener permisos para el manejo del puerto 5000.

Funcionamiento

Una vez tenga definido el sistema, dispondrá de unos interruptores que le permitirán conectar o desconectar los generadores, así como dos casillas una para indicar el valor de la impedancia de falla simétrica y otra para indicar el nodo en el que quiera tener la falla. Finalmente solo debe activar la casilla de falla para ver la secuencia de disparos que se genera. Adicionalmente, durante cualquier momento de la operación del sistema podrá cambiar por la pestaña de Relay, donde podrá visualizar la curva de configuración de cada uno de los relays.



**SISTEMA DE BIBLIOTECAS
IDENTIFICACIÓN TRABAJO DE GRADO**

FECHA DE ELABORACIÓN		
DD	MM	AAAA
07	06	2012

NIT: 860.007.386-1

1. IDENTIFICACIÓN AUTOR(ES) DEL TRABAJO DE GRADO

CÓDIGO	DOCUMENTO DE IDENTIDAD		APELLIDOS	NOMBRES	CORREO ELECTRÓNICO
	TIPO	NÚMERO			
200812720	CC :	1032430847	Montoya Salazar	Luis Alejandro	la.montoya463@uniandes.edu.co
	CC :				
	CC :				
	CC :				
	CC :				
	CC :				

PROGRAMA	Pregrado	:	ENTREGÓ FORMATO: <input checked="" type="checkbox"/> SB-10 "Entrega trabajo de grado y autorización de uso a favor de la Universidad de los Andes". Documento con el cual, el autor permite que su trabajo sea utilizado por la Universidad, para fines de consulta y de mención en sus catálogos bibliográficos, tanto físicos como en línea.
FACULTAD	Facultad de Ingeniería	:	
DEPARTAMENTO	Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica	:	

1.1 IDENTIFICACIÓN DE TRABAJO DE GRADO PARA DOBLE TITULACIÓN

PROGRAMA	No Aplica	:	TESIS PARA DOBLE TITULACIÓN: Si el trabajo de grado presentado aplica para obtener dos (2) titulaciones, por favor marque esta casilla y diligencie la información de esta sección.
FACULTAD	No Aplica	:	
DEPARTAMENTO	No Aplica	:	

2. INFORMACIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO:
Implementación de protecciones adaptativas por medio de simulación RT-HIL

DESCRIPCIÓN FÍSICA		MATERIAL ACOMPAÑANTE (Cantidad):		FECHA DE ELABORACIÓN DD MM AAAA 2012
Número de páginas:	19	Casetes Audio:	Discos compactos:	
Ilustraciones:	15	Casetes Video:	Diapositivas:	
		Disquetes:	Otros: ¿Cuáles?	

***RESUMEN DEL TRABAJO DE GRADO:**

En la actualidad el desarrollo de prototipos y estrategias de control se hacen cada vez más complicado, lo que implica un incremento significativo en los costos del desarrollo de los proyectos; dado este constante crecimiento en los costos del desarrollo de prototipos, se ha desarrollado una estrategia de diseño que consta de dos etapas, la primera constituye la simulación en tiempo real (RTs) y la segunda la implementación en hardware in the loop (HIL). Esta estrategia permite hacer una depuración más cercana a la implementación física de los sistemas, puesto que se puede ver la respuesta y la interacción de los dispositivos tal y como si se tuviera en físico el diseño final. Adicionalmente, se ha reconocido la ventaja que representa el desarrollo de sistemas mediante simulaciones HIL en la industria automotriz, aeroespacial, militar entre otras; esto se debe a que en la mayoría de los casos no se dispone del tiempo suficiente como para esperar un primer prototipo sobre el cual desarrollar un sistema embebido o estrategia de control. Esto implica que el desarrollo de prototipos a través de simulación HIL disminuye los tiempos de desarrollo al permitir el desarrollo de tarea en paralelo, que anteriormente eran secuenciales.

OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO:

- Desarrollar la instrumentación necesaria para hacer posible la interfaz HIL, así como el ajuste de las salidas, tanto análogas como digitales que la potencia entregada en la señales sea la suficiente como para accionar el hardware.
- Desarrollar, mejorar o implementar un esquema que permita hacer el ajuste de una protección partiendo de variables del sistema o estímulos a nivel software.
- Contribuir al estudio de protecciones adaptativas mediante un caso de estudio que implementa RT-HIL.

CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE GRADO:

METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE GRADO:

A través del trabajo presentado se ofrece otra alternativa al momento de realizar la validación de protecciones adaptativas ya que su validación no se hace offline como suele hacerse en la mayoría de los casos, sino que se propone realizar una validación en tiempo real a través de una realimentación hardware (HIL) por medio de dos equipos de prototipado industrial como lo es la CompactRIO.

Si bien es cierto que el costo que implica contar con los equipos adecuados para realizar validaciones RT-HIL es alto, este se puede ver desde dos perspectivas: primera, el costo y tiempo que implica hacer pruebas RT-HIL siempre será más reducido que aquel en el que se incurre al disponer de todos los elementos físico y realizar pruebas con los mismos; segundo, dado que se trata de plataformas altamente flexibles para el desarrollo de aplicaciones, es posible utilizarlas en otros proyectos de requerimientos similares, lo que convierte a este costo de desarrollo en un costo diluible.

El protocolo de comunicaciones implementado con un servidor de acceso múltiple, da la flexibilidad al cliente (humano) de modificar los parámetros configurados por el cliente (algoritmo) lo que permite tener un control de respaldo frente a la posible existencia de una configuración errada (sea causada por comunicación, defecto del algoritmo o contingencia/mantenimiento del cliente algoritmo).

La plataforma utilizada para desarrollar el esquema de validación RT-HIL facilita en gran medida la instrumentación de las señales debido a la gran flexibilidad que posee, ya que permite acondicionar las señales para hacer uso de las velocidades que ofrece una arquitectura basada en FPGA.

*PALABRAS CLAVES (TEMAS) DEL TRABAJO DE GRADO:

Simulación Real-Time, Hardware In the Loop (HIL), Protecciones Adaptativas, CompactRIO

ACUERDOS DE CONFIDENCIALIDAD: NO TIENE ACUERDO(S) TIENE ACUERDO(S)

Si selecciona tener acuerdo de confidencialidad, por favor diligencie el siguiente cuadro:

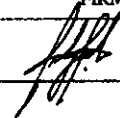
Persona natural o jurídica	Desde			Hasta		
	DD	MM	AAAA	DD	MM	AAAA

3. FIRMAS

AUTORES (Nombre completo)

*FIRMAS

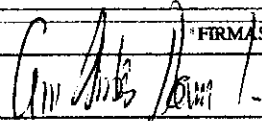
Luis Alejandro Montoya Salazar



DIRECTORES / ASESORES (Nombre completo)

*FIRMAS

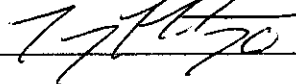
GUSTAVO ANDRÉS RAMÍREZ LÓPEZ



JURADO / LECTOR (Nombre completo)

*FIRMAS

Davis Montenegro Martínez



Las firmas de Autor y Director/Asesor son obligatorias. Si tiene inconvenientes con el registro de la firma del Jurado/Lector, deberá tramitar ante la respectiva Facultad la autorización para registrar las firmas de pares o un sello que justifique la ausencia de la firma faltante.



ENTREGA EJEMPLAR TRABAJO DE GRADO Y AUTORIZACIÓN DE SU USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Yo Luis Alejandro Montoya Salazar , mayor de edad, vecino de Bogotá D.C., identificado con la Cédula de Ciudadanía N° 1032430847 de Bogotá , actuando en nombre propio, en mi calidad de autor del trabajo de tesis, monografía o trabajo de grado denominado: Implementación de protecciones adaptativas por medio de simulación RT-HIL

, hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos del ser el caso, en formato digital o electrónico (CD-ROM) y autorizo a LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento. PARÁGRAFO: La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato virtual, electrónico, digital, óptico, usos en red, internet, extranet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

EL AUTOR - ESTUDIANTES, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y tiene la titularidad sobre la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL ESTUDIANTE - AUTOR, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Bogotá D.C., a los siete 7 días del mes de Junio de Dos Mil Doce 20 12 .

EL AUTOR - ESTUDIANTE.

(Firma)
Nombre Luis Alejandro Montoya Salazar
C.C. N° 1032430847 de Bogotá

SB-10