

## **A. MANUAL DE USUARIO**

### **INTRODUCCIÓN**

Esta herramienta permite modelar y simular las condiciones de funcionamiento de un sistema eléctrico de potencia, compuesto de tres cargas, un generador, un transformador, seis líneas (dos representadas por un modelo pi y las otras cuatro representadas por un modelo de línea corta), y una barra infinita, con el fin de realizar estudios del comportamiento que presenta el sistema de potencia ante una gran perturbación.

La herramienta fue desarrollada en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), y permite modificar directamente los datos de entrada tales como: parámetros del sistema de potencia, parámetros de la máquina síncrona, condición de la operación pre-falla, tiempos de falla y tiempos de simulación.

Esta herramienta virtual permite realizar simulación del comportamiento dinámico del sistema eléctrico de potencia ante una gran perturbación. Estas simulaciones se realizan teniendo en cuenta simplificaciones empleadas en estudios de estabilidad, como los transitorios asociados a la red, así como los transitorios de la máquina. Así mismo las expresiones algebraicas y diferenciales del sistema se resuelven simultáneamente aplicando la regla trapezoidal como método de integración.

### **REQUISITOS E INSTALACIÓN**

Para ejecutar el programa se necesita tener una versión de MATLAB R2020a o superior, primero se abre la carpeta de archivos “Software”, y se tienen dos formas de ejecutar la aplicación:

1. Se abre Matlab y se observa que en current folder esté la carpeta “Software” abierta, luego se ejecuta el archivo “SEP\_Tiempo\_Real.mlapp”, este abre el App Designer donde se encuentra el design view y el code view, en estos elementos se puede observar la parte gráfica y el código del aplicativo, si se quiere ejecutar se debe dar la opción run.
2. Se busca la carpeta “Software” se abre y luego se ejecuta “SEP\_Tiempo\_Real.mlapp” (se recomienda que Matlab no esté abierto), se abre primero Matlab y después el aplicativo.

## **EXPLICACIÓN DEL APLICATIVO**

Una vez ejecutada la aplicación se despliega la ventana principal que se encuentra dividida en tres grandes partes:

### **1. DESARROLLO DEL SISTEMA EN ESTADO ESTABLE**

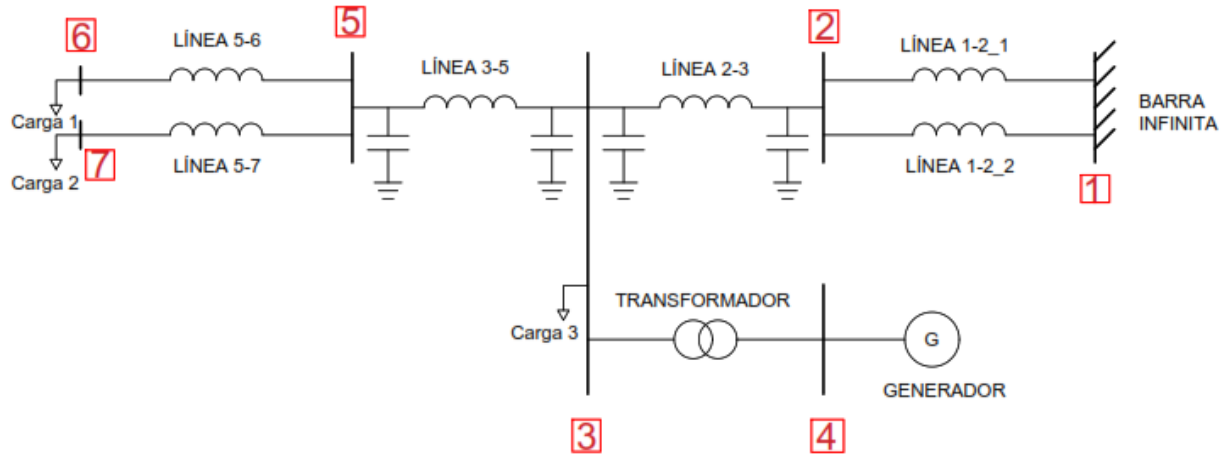
En esta parte se busca encontrar las tensiones en las barras, así como las condiciones iniciales de las ecuaciones diferenciales, para lo cual se modela el sistema eléctrico de potencia, y este modelado consta de varias partes que son:

#### **1.1. GRÁFICA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA**

El siguiente esquema corresponde al sistema de potencia utilizado (ver Figura 1)

### **Figura 1**

*Esquema del sistema eléctrico de potencia*



## 1.2. PARÁMETROS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

En este apartado se muestra la información de las resistencias y reactancias, para los modelos de la línea y el transformador (ver Figura 1), así como un parámetro adicional para la admitancia de los modelos de línea pi (línea 2-3, 3-5), toda la información que se presenta (ver Figura 2) se puede editar por el usuario siempre y cuando se respeten los modelos seleccionados.

**Figura 2**

*Parámetros de los elementos del sistema de potencia*

**Parámetros del sistema de potencia [P.U]**

Línea 1-2\_1

R 
X

Transformador

R 
X

Línea 5-6

R 
X

Línea 1-2\_2

R 
X

Línea 3-5

R 
X

B

Línea 5-7

R 
X

Línea 2-3

R 
X

B

**Tabla 1**

*Explicación de los parámetros para los elementos del sistema de potencia*

Parámetro	Descripción
R	Resistencia del elemento seleccionado
X	Reactancia del elemento seleccionado
B	Admitancia de la línea seleccionada.

### 1.3. PARÁMETROS DEL GENERADOR

Corresponde a los parámetros del generador seleccionados para el modelo (ver Figura 3), todos estos son modificables según datos del generador que se va a emplear.

**Figura 3**

*Parámetros del generador*

**Parámetros del generador**

$X_d$	1.81	$X'_d$	0.3	$X''_d$	0.23	$R_a$	0.003
$X_q$	1.76	$X'_q$	0.65	$X''_q$	0.25	$X_l$	0.15
$K_D$	0	$H$	3.5	$T'_{d0}$	8		

**Tabla 2**

*Explicación de los parámetros del generador.*

Parámetro	Descripción	Unidad
$X_d$	Reactancia síncrona del eje directo	Pu
$X_q$	Reactancia síncrona de eje en cuadratura	Pu
$X'_d$	Reactancia transitoria de eje directo	Pu
$X'_q$	Reactancia transitoria de eje en cuadratura	Pu
$X''_d$	Reactancia subtransitoria de eje directo	Pu
$X''_q$	Reactancia subtransitoria de eje en cuadratura	Pu
$X_l$	Reactancia de dispersión de estator	Pu
$R_a$	Resistencia de estator	Pu
$T'_{d0}$	Constante de tiempo transitoria de eje directo	S
$H$	Constante de inercia	S
$K_D$	Coeficiente de torque amortiguado	Pu

1.4. TIPO DE BARRA

En este apartado (ver Figura 4) se encuentran los parámetros de entrada para seleccionar el tipo de barra según la operación del sistema de potencia, todo esto es modificable según los datos que se tengan del sistema eléctrico de potencia.

Figura 4

Tipo de barra.

Tipo de barra

Barra SLACK

V10.9008

$\Phi$ 10

Barra 4 PV

P4 [MW]644

V41.03

Barra 7 PQ

P7 [MW]167

Q7 [MVar]100

Barra 3 PQ

P3 [MW]210

Q3 [MVar]136

Barra 6 PQ

P6 [MW]267

Q6 [MVar]100

Tabla 3

Explicación del tipo de barra.

Parámetro	Descripción	Unidad
V	Magnitud de tensión de la barra seleccionada.	Pu
$\Phi$	Ángulo de tensión de la barra seleccionada.	° Grados
P	Potencia activa de la barra seleccionada.	MW
Q	Potencia reactiva de la barra seleccionada.	MVar

1.5. SOLUCIÓN DE ESTADO ESTABLE

Los parámetros de salida para las ecuaciones algebraicas son la magnitud de tensión y ángulo en cada barra (ver Figura 5), así como las condiciones iniciales del modelo diferencial del sistema (ver Figura 5). También se calcula la resistencia y reactancia de Thévenin vista desde los terminales del generador hasta la barra infinita del sistema (ver Figura 5), y está compuesto por un botón (“1. Solución de estado estable”) que al hacer clic realiza la operación y da solución a los parámetros de salida.

Figura 5

Parámetros de salida

Sistema en estado estable

Thevenin del sistema

V1

V2

V3

V4

V5

V6

V7

Rth

Φ1

Φ2

Φ3

Φ4

Φ5

Φ6

Φ7

Xth

yfd0

dwr0

δ0

1. Solución de estado estable

TABLA 4

EXPLICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SALIDA.

Parámetro	Descripción	Unidad
Er	Tensión real en la barra seleccionada	Pu
Ei	Tensión imaginaria en la barra seleccionada	Pu
Yfd0	Flujo del rotor	Pu
dwr0	Variación de la velocidad del rotor	Pu

$\delta_0$	Ángulo del rotor por el cual el eje q adelanta la referencia	° Grados
Rth	Resistencia de Thévenin vista desde los terminales del generador hasta la barra infinita	Pu
Xth	Reactancia de Thévenin vista desde los terminales del generador hasta la barra infinita	Pu
Botón	" 1. Solución de estado estable", soluciona y muestra los parámetros de salida	

## 2. SELECCIÓN DE LA PERTURBACIÓN DEL SISTEMA

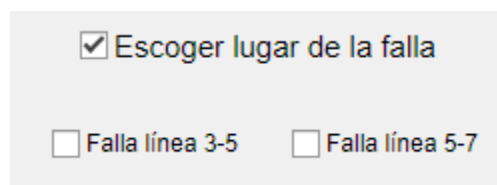
En esta parte se busca encontrar la solución de los diferentes parámetros que se presentan si se escoge una condición de falla o una condición de cambio de carga.

### 2.1. SISTEMA EN FALLA

Para esta aplicación se tiene implementado dos fallas trifásicas en el sistema de potencia, para seleccionar la falla que se desea analizar se selecciona el recuadro (ver Figura 6).

**Figura 6**

*Selección de falla trifásica que se desea tener en la aplicación*



☒ Escoger lugar de la falla

☐ Falla línea 3-5    ☐ Falla línea 5-7



También se debe seleccionar cuanto tiempo (s) estará activa la falla trifásica (ver Figura 7).

**Figura 7**

*Configuración de tiempo de la falla trifásica.*



**Tabla 5**

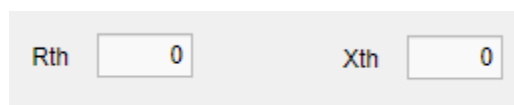
*Explicación de la configuración del tiempo de la falla trifásica.*

Parámetro	Descripción
Duración de la falla	Cuanto tiempo dura la falla trifásica.

En el tiempo en que esta activa la falla, también se necesita conocer la resistencia y reactancia de Thévenin (ver Figura 8) vista desde los terminales del generador hasta la barra infinita.

**Figura 8**

*Parámetros de salida cuando esta activa la falla.*



**Tabla 6**

*Explicación de los parámetros de salida cuando esta activa la falla.*

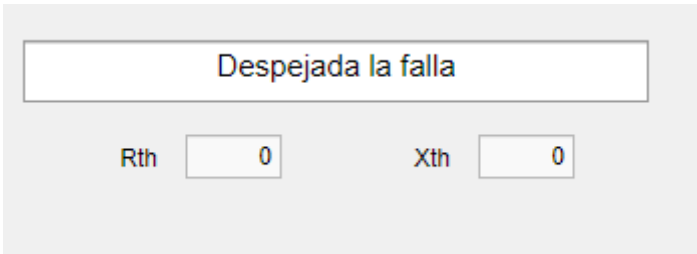
Parámetro	Descripción	Unidad
-----------	-------------	--------

Rth	Resistencia de Thévenin vista desde los terminales del generador hasta la barra infinita	Pu
Xth	Reactancia de Thévenin vista desde los terminales del generador hasta la barra infinita	Pu

En el tiempo en que se despeja la falla, es necesario conocer la resistencia y reactancia de Thévenin (ver Figura 9) vista desde los terminales del generador hasta la barra infinita.

**Figura 9**

*Parámetros de salida cuando esta despejada la falla.*



**Tabla 7**

*Explicación de los parámetros de salida cuando esta despejada la falla.*

Parámetro	Descripción	Unidad
Rth	Resistencia de Thévenin vista desde los terminales del generador hasta la barra infinita	Pu
Xth	Reactancia de Thévenin vista desde los terminales del generador hasta la barra infinita	Pu

## 2.2. CAMBIO DE CARGA

Primero se selecciona la opción cambio de carga, luego se escoge las nuevas potencias activas y reactivas de cada carga, para el parámetro de salida se tiene la impedancia de Thévenin. (ver Figura 10)

**Figura 10**

*Cambio de carga*

Cambio de carga

☐ Cambio de carga

Carga 1

P6 [MW]  Q6 [MVar]

Carga 2

P7 [MW]  Q7 [MVar]

Carga 3

P3 [MW]  Q3 [MVar]

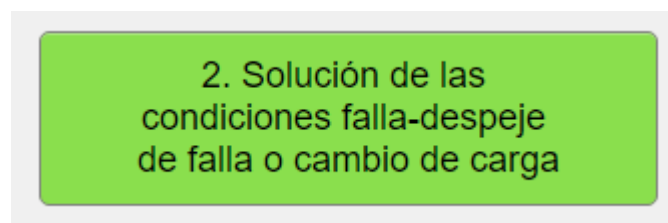
Thevenin del sistema

Rth  Xth

**Tabla 8***Explicación del cambio de carga*

Parámetro	Descripción	Unidad
P	Potencia activa de la barra seleccionada	MW
Q	Potencia reactiva de la barra seleccionada	MVAr
Rth	Resistencia de Thévenin vista desde los terminales del generador hasta la barra infinita	Pu
Xth	Reactancia de Thévenin vista desde los terminales del generador hasta la barra infinita	Pu

También se tiene un botón llamado “2. Solución de las condiciones falla-despeje de falla o cambio de carga” que, al hacer clic permite encontrar los parámetros de salida para las dos condiciones expuestas.

**Figura 11***Botón de ejecución***Tabla 9***Explicación del botón de ejecución*

Parámetro	Descripción
-----------	-------------

	“2. Solución de las condiciones falla-despeje de falla o cambio de carga”,
Botón	soluciona y muestra los parámetros de salida para la condición en falla, después de falla o cambio de carga

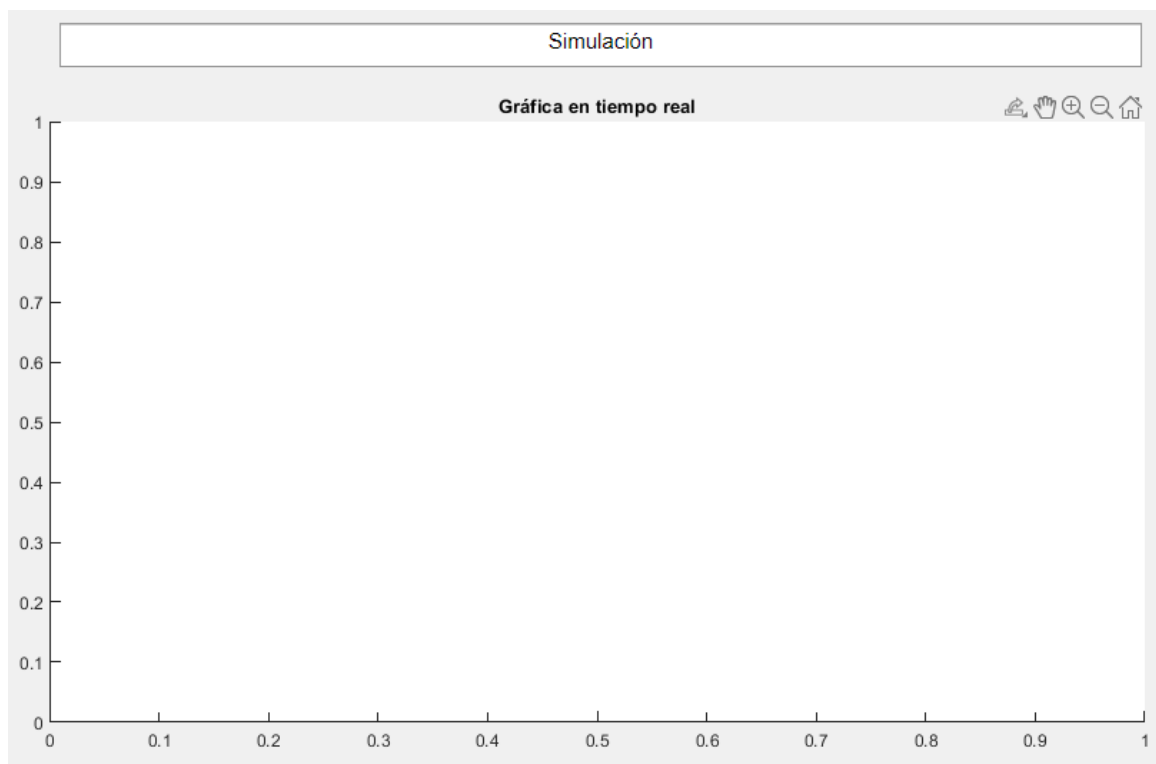
### 3. SIMULACIÓN

#### 3.1. GRÁFICA

Corresponde a la gráfica en la que se dibuja el parámetro seleccionado para el tiempo estipulado de simulación (ver Figura 12).

**Figura 12**

*Gráfica donde se muestra el cambio de las variables de salida en el tiempo.*



### 3.2. TIEMPO DE SIMULACIÓN

Se encuentra los parámetros donde se configura la gráfica correspondiente a la simulación (ver Figura 13).

**Figura 13**

*Parámetros de la simulación.*

Inicio de la simulación	<input type="text" value="0"/>	Final de la simulación	<input type="text" value="4"/>	Paso de integración	<input type="text" value="0.05"/>
-------------------------	--------------------------------	------------------------	--------------------------------	---------------------	-----------------------------------

**Tabla 10**

*Explicación de los parámetros de simulación.*

Parámetro	Descripción
Inicio de la simulación	Selecciona cuando inicia la simulación
Final de la simulación	Selecciona cuando termina la simulación
Paso de integración	Paso en que se ve el siguiente punto

### 3.3. GRÁFICA A OBSERVAR

Se selecciona cual es la gráfica que se desea observar, teniendo que escoger una variable de cualquiera de las siguientes secciones (ver Figura 14):

- Variables de las ecuaciones diferenciales.
- Magnitud de tensión en las barras.
- Corriente de los elementos.

- Corrientes En el sistema.

Cuando se selecciona alguno de estos recuadros y al dar clic en el botón de “3. Empezar simulación” se gráfica el parámetro de salida seleccionado, cuando el tiempo final de la simulación acaba, se puede escoger otra variable de alguno de los recuadros, para visualizar su gráfica.

**Figura 14**

*Parámetro de salida de la simulación*

☒ Escoger variable que desea graficar

Variables de las ecuaciones diferenciales

☐ Yfd   ☐ dwr   ☐ dδ   ☐ Te

Magnitud de tensión en las barras

☐ V1m   ☐ V2m   ☐ V3m   ☐ V4m   ☐ V5m   ☐ V6m   ☐ V7m

Corrientes de los elementos

☐ Ig   ☐ IL1   ☐ IL2   ☐ IL3

Corrientes en el sistema

☐ I12m\_1   ☐ I12m\_2   ☐ I23m   ☐ I43m   ☐ I35m   ☐ I56m   ☐ I57m

**3. Empezar simulación**

**Tabla 11**

*Explicación de los parámetros de salida de la simulación.*

Parámetro	Descripción
Yfd	Flujo del rotor
dwr	Variación de la velocidad del rotor
dδ	Ángulo del rotor por el cual el eje q adelanta la referencia
V1m	Magnitud de tensión en la barra 3
V2m	Magnitud de tensión en la barra 2
V3m	Magnitud de tensión en la barra 3
V4m	Magnitud de tensión en la barra 4
V5m	Magnitud de tensión en la barra 5
V6m	Magnitud de tensión en la barra 6
V7m	Magnitud de tensión en la barra 7
Ig	Magnitud de corriente del generador
IL1	Magnitud de corriente de la carga 1
IL2	Magnitud de corriente de la carga 2
IL3	Magnitud de corriente de la carga 3
I12m_1	Magnitud de corriente que va de la barra 1 a la barra 2 por la línea 1-2_1
I12m_2	Magnitud de corriente que va de la barra 1 a la barra 2 por la línea 1-2_2
I23m	Magnitud de corriente que va de la barra 2 a la barra 3 por la línea 2-3



I43m	Magnitud de corriente que va de la barra 4 a la barra 3 por el transformador
I35m	Magnitud de corriente que va de la barra 3 a la barra 5 por la línea 3-5
I56m	Magnitud de corriente que va de la barra 5 a la barra 6 por la línea 5-6
I57m	Magnitud de corriente que va de la barra 5 a la barra 7 por la línea 5-7
Botón	“3. Empezar simulación”, soluciona y muestra los parámetros de salida

## EJECUTAR

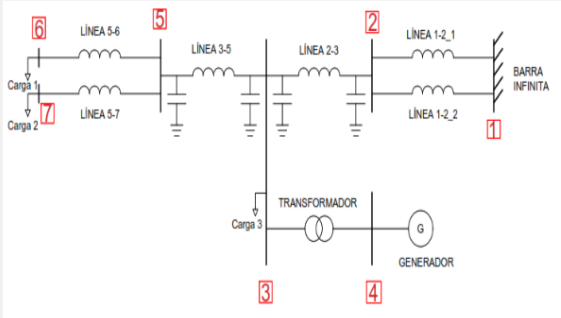
El paso a paso para ejecutar la aplicación correctamente es el siguiente:

### 1. Estado estable

Como se observa en la Figura 15 se tiene los parámetros de entrada del sistema de potencia, del generador y el tipo de barra que se adecua según el sistema a utilizar, se busca encontrar los parámetros de salida (sistema en estado estable y Thévenin del sistema), para esto se debe ejecutar el botón “1. Solución de estado estable”, después el sistema empieza a ejecutar y se sabe cuándo acaba si los parámetros de salida dejan de ser cero.

## Figura 15

*Estado estable del sistema*



**Parámetros del sistema de potencia [P.U]**

Línea 1-2_1		Transformador		Línea 5-6	
R	0	R	0	R	0
X	0.5	X	0.15	X	0.5

Línea 1-2_2		Línea 3-5		Línea 5-7	
R	0	R	0.01	R	0
X	0.93	X	0.1	X	0.93
		B		0.175	

Línea 2-3	
R	0.01
X	0.1
B	
0.175	

**Parámetros del generador**

X <sub>d</sub>	1.81	X' <sub>d</sub>	0.3	X'' <sub>d</sub>	0.23	R <sub>a</sub>	0.003
X <sub>q</sub>	1.76	X' <sub>q</sub>	0.65	X'' <sub>q</sub>	0.25	X <sub>i</sub>	0.15
K <sub>D</sub>	0	H	3.5	T' <sub>d0</sub>	8		

**Tipo de barra**

Barra SLACK		Barra 4 PV		Barra 7 PQ	
V1	0.9008	Φ1	0	P4 [MW]	644
		V4	1.03	P7 [MW]	167
				Q7 [MVar]	100

Barra 3 PQ		Barra 6 PQ	
P3 [MW]	210	P6 [MW]	267
Q3 [MVar]	136	Q6 [MVar]	100

**Sistema en estado estable**

**Thevenin del sistema**

V1	0	V2	0	V3	0	V4	0	V5	0	V6	0	V7	0	R <sub>th</sub>	0
Φ1	0	Φ2	0	Φ3	0	Φ4	0	Φ5	0	Φ6	0	Φ7	0	X <sub>th</sub>	0
Vf <sub>d0</sub>	0	dwr <sub>0</sub>	0	δ <sub>0</sub>	0										

**1. Solución de estado estable**

## 2. PERTURBACIÓN EN EL SISTEMA

Como se observa en la Figura 16 se tiene dos estilos de perturbaciones (fallas trifásicas y cambio de carga), se tiene que seleccionar algunos de los tres recuadros (Falla línea 3-5, Falla línea 5-7 y cambio de carga), una vez seleccionado se cuadran los parámetros de entrada según sea el caso y se hace clic en el botón “2. Solución de las condiciones de falla-despeje o cambio de carga”, esta empieza a ejecutar y se sabe que ha terminado cuando los parámetros de salida (Impedancia de Thévenin) deja de ser cero.

**Figura 16**

*Perturbación del sistema*

Sistema en falla

☒ Escoger lugar de la falla

☐ Falla línea 3-5
 ☐ Falla línea 5-7

Duración de la falla

Rth
 
 Xth

Despejada la falla

Rth
 
 Xth

Cambio de carga

☐ Cambio de carga

Carga 1

P6 [MW]
 
 Q6 [MVAR]

Carga 2

P7 [MW]
 
 Q7 [MVAR]

Carga 3

P3 [MW]
 
 Q3 [MVAR]

Thevenin del sistema

Rth
 
 Xth

Autores:  
 Jorge Andrés Balaguera Parada  
 Oscar David Nieto Rueda

Trabajo de grado para optar por el título  
 de Ingeniero Electricista

Director:  
 Hermann Raúl Vargas Torres

2. Solución de las  
 condiciones falla-despeje  
 de falla o cambio de carga

### 3. SIMULACIÓN

Como se observa en la Figura 17 se tiene que ingresar los parámetros de entrada (inicio de la simulación, final de la simulación y paso de la integración), después se tiene que seleccionar uno de los parámetros de salida que se quiera ver en la gráfica (variables de las ecuaciones diferenciales, magnitud de tensión en las barras, corrientes de los elementos y corrientes en el sistema) después se realiza clic en el botón “3. Empezar simulación” y ejecuta el código, para ver el sistema en estado estable se mantiene presionado cualquier botón del teclado y empiezan a aparecer los puntos en la gráfica, si se desea iniciar con la perturbación seleccionada anteriormente (2. Perturbación en el sistema) se deja de mantener presionado el botón y se presiona la tecla enter una sola vez, dando paso a la perturbación en el sistema. Cuando se ejecuta todo el tiempo de simulación se puede seleccionar cualquier parámetro de salida que se quiera observar.

**Figura 17**

*Simulación*

