

APENDICE E

GUIA DE APRENDIAZAJE

Protección Sobrecorriente En Líneas De Distribución

Coordinación de Relés

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas.

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Bucaramanga

2025

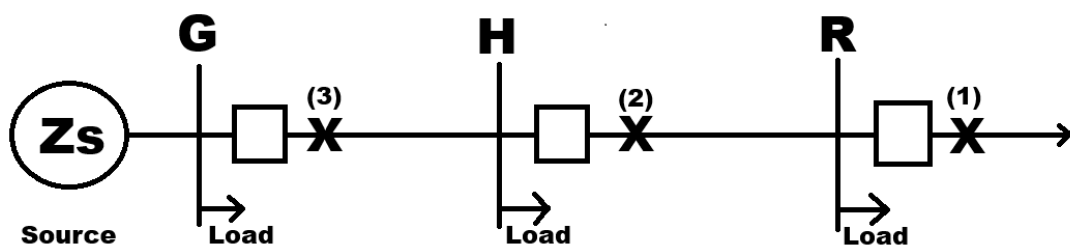


Figura 1 : Circuito de tres barrajes

El sistema que se muestra en la Figura 1 es un circuito de subtransmisión de 34,5 kV con las siguientes características.

Sección de la línea	G-H	H-R	R-final
Longitud	10 mi	20 mi	30 mi
Conductor ACSR	Linnet	Linnet	Linnet
Espaciamiento equivalente	5.0 pies	5.0 pies	5.0 pies

Tabla 1 características de la sección de línea

La capacidad de falla en el bus G se conoce a partir de estudios de fallas del sistema de transmisión, que proporcionan los siguientes datos.

Capacidad de fallo del sistema	
Condiciones Máximas	200MVA
Condiciones Mínimas	100MVA

Tabla 2 Capacidad de fallo del sistema

Para coordinar los relés de sobrecorriente de fase G, H, R se proporcionan los siguientes datos:

Cargas: Cada una de las cuatro cargas en los buses G, H, R y la línea radial desde R es de 3MVA y se proyecta que crezca a 5MVA. Cada carga es alimentada por un transformador reductor de 5MVA que está protegido por fusibles en el lado de 34.5kV. El fusible de 34.5kV tiene la característica de despeje total que se muestra en Figura 1. Se considera lo suficientemente preciso para conectar estos puntos mediante líneas rectas. Los relés en G, H y R deben coordinarse con este tipo de fusible. No hay generación en ninguno de los sitios de carga.

Relés: Los relés en G, H y R son todos los relés de tiempo inverso con características que se muestran en la curva característica de tiempo-corriente de sobrecorriente inversa. Se requiere que el MOC sea el doble de la corriente de carga máxima estimada. También se requiere que cada relé tenga un CTI de 0.3 s entre su operación y la del relé adyacente.

Tiempo (s)	500	10	1	0.1
------------	-----	----	---	-----

Corriente (A)	160	220	520	1600
---------------	-----	-----	-----	------

Tabla 3: Datos Curva Característica tiempo-corriente

Transformadores de corriente: Las relaciones de los transformadores de corriente son las siguientes.

G: 200/5	H:200/5	R:100/5
----------	---------	---------

Tabla 4: Relación de transformación

Coordinación de respaldo: El relé en G debe coordinarse con los relés en el lado de la fuente de G que también sean de tipo de tiempo inverso y con las siguientes configuraciones.

CT: 200/5	Tap: 8	TD:4
-----------	--------	------

Tabla 5: características coordinación de respaldo

De acuerdo a lo anterior resolver:

1. Calcular de manera manual las corrientes de falla trifásica máxima y mínima en cada ubicación de la falla.
2. Realizar la coordinación de los relés realizando los cálculos manuales, escoger entre los 3 tipos de relés cual es el más adecuado.
3. Haciendo uso del modelo de Simulink Protección Sobrecorriente identificar y comparar las corrientes de falla trifásica en cada ubicación de la falla.
4. Realizar la simulación configurando los parámetros según los cálculos manuales y analizar las siguientes configuraciones.
 - *Falla en el barraje R*
 - *Falla en el barraje H*
 - *Falla en el barre G*

Verificar que los tiempos de operación de los relés coincidan los cálculos teóricos

Nota: Se anexan las tablas de conductores y las curvas características del estándar IEEE.

Table C.3a Inductive reactance x_d of ACSR bundled conductors in ohms per mile for 1 ft radius at 60 Hz.

Code	Area (cmil)	Strands		Diameter (in.)	GMR (ft)	Single cond.	2 – Conductor spacing (in.)				
		AL	ST				6	9	12	15	18
Brant	397 500	24	7	0.772	0.0258	0.4438	0.2681	0.2394	0.2219	0.2084	0.1973
Chickadee	397 500	18	1	0.743	0.0241	0.4521	0.2647	0.2435	0.2260	0.2125	0.2014
Oriole	336 400	30	7	0.741	0.0255	0.4452	0.2676	0.2401	0.2226	0.2091	0.1980
Linnet	336 400	26	7	0.721	0.0243	0.4511	0.2731	0.2430	0.2255	0.2120	0.2009
Merlin	336 400	18	1	0.684	0.0222	0.4620	0.2712	0.2485	0.2310	0.2175	0.2064
Ostrich	300 000	26	7	0.680	0.0229	0.4583	0.2581	0.2466	0.2291	0.2156	0.2045

Table C.2 Resistance of ACSR conductors (Ω /mile).

Code	Area (cmil)	Strands		Diameter (in.)	dc 25 °C	ac-60 Hz			
		AL	ST			25 °C	50 °C	75 °C	100 °C
Ibis	397 500	26	7	0.783	0.224	0.226	0.249	0.271	0.294
Brant	397 500	24	7	0.772	0.226	0.227	0.250	0.273	0.295
Chickadee	397 500	18	1	0.743	0.229	0.231	0.254	0.277	0.300
Oriole	336 400	30	7	0.741	0.262	0.268	0.295	0.322	0.349
Linnet	336 400	26	7	0.721	0.265	0.267	0.294	0.321	0.347
Merlin	336 400	18	1	0.684	0.270	0.273	0.300	0.328	0.355
Ostrich	300 000	26	7	0.680	0.297	0.299	0.329	0.359	0.389

Table C.4 Inductive reactance spacing factor, x_d .

	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	—	−0.2794	−0.1953	−0.1461	−0.1112	−0.0841	−0.0620	−0.0433	−0.0271	−0.0128
1	0.0	0.0116	0.0221	0.0318	0.0408	0.0492	0.0570	0.0644	0.0713	0.0779
2	0.0841	0.0900	0.0957	0.1011	0.1062	0.1112	0.1159	0.1205	0.1249	0.1292
3	0.1333	0.1373	0.1411	0.1449	0.1485	0.1520	0.1554	0.1588	0.1620	0.1651
4	0.1682	0.1712	0.1741	0.1770	0.1798	0.1825	0.1852	0.1878	0.1903	0.1928
5	0.1953	0.1977	0.2001	0.2024	0.2046	0.2069	0.2090	0.2112	0.2133	0.2154
6	0.2174	0.2194	0.2214	0.2233	0.2252	0.2271	0.2290	0.2308	0.2326	0.2344
7	0.2361	0.2378	0.2395	0.2412	0.2429	0.2445	0.2461	0.2477	0.2493	0.2508
8	0.2523	0.2538	0.2553	0.2568	0.2582	0.2597	0.2611	0.2625	0.2639	0.2653

Table C.2, table C.3a y table C.4 sacadas del Paul M. Anderson, C. H. (2022). *Power System Protection 2- Edicion*. IEEE PRESS.

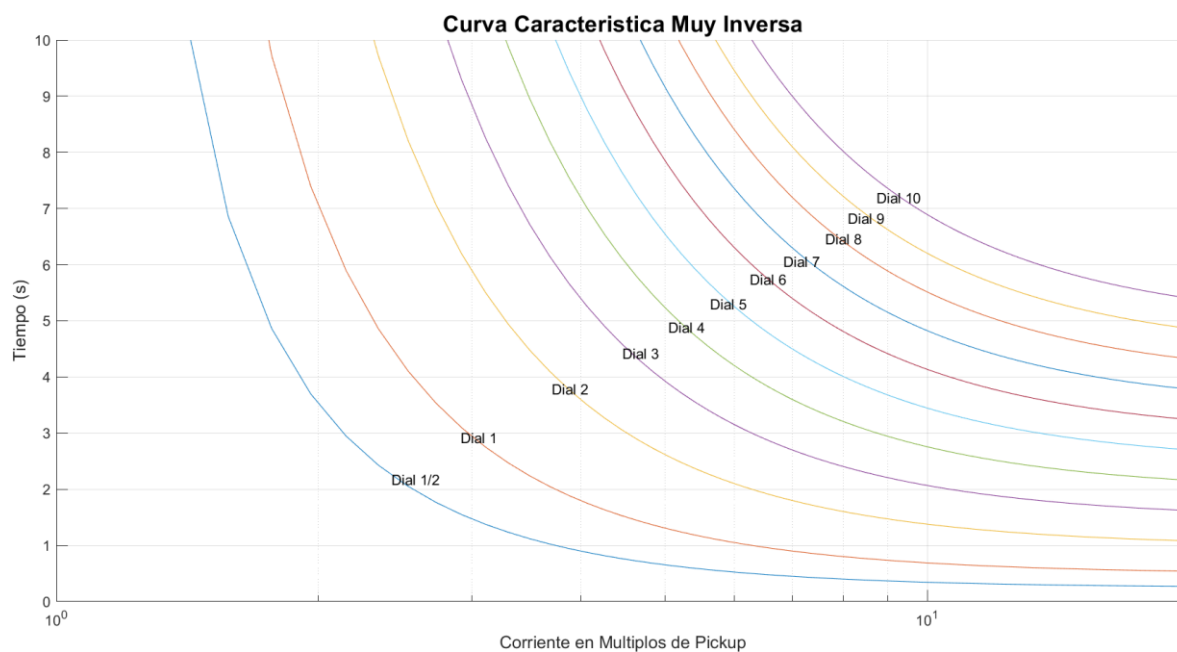


Figura 2: Curva Corriente vs Tiempo Muy Inversa

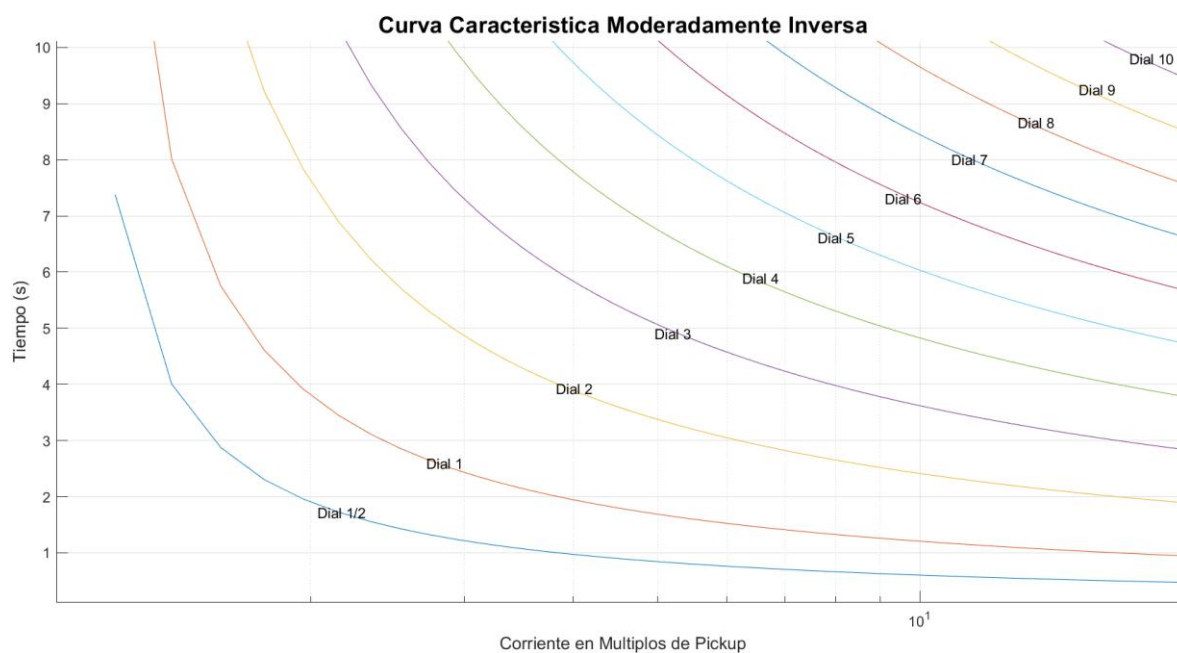


Figura 3: Curva Corriente vs Tiempo Moderadamente Inversa

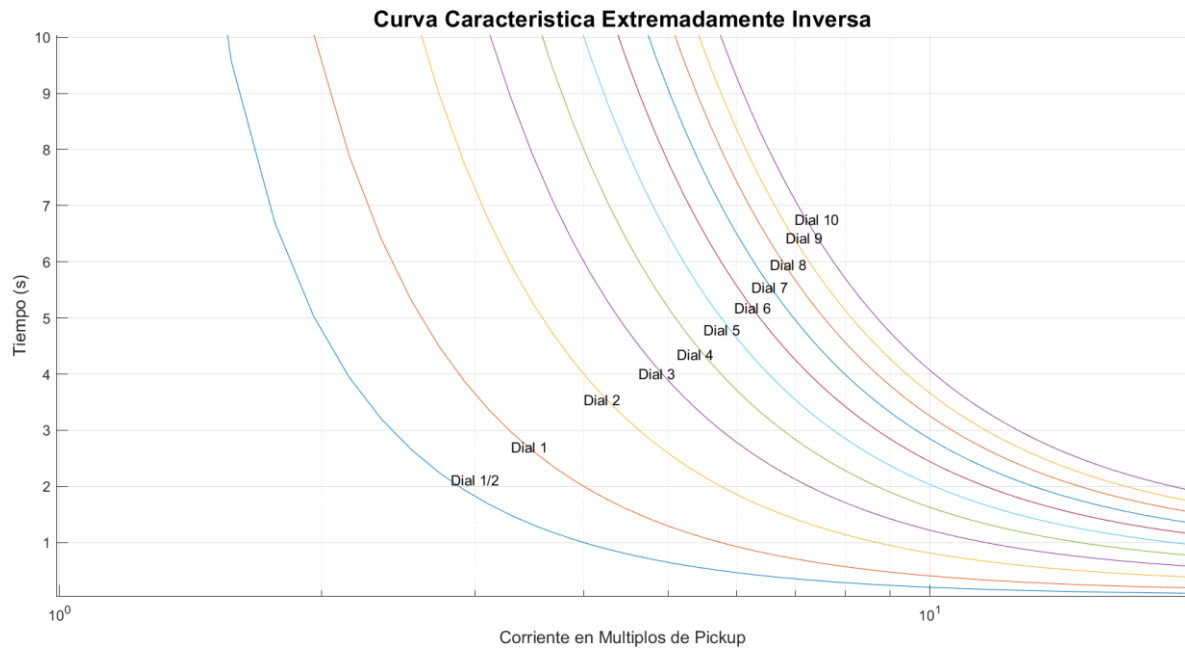


Figura 4: Curva Corriente vs Tiempo Extremadamente Inversa

Las curvas de la Figura 2, Figura 3 y Figura 4 fueron diseñadas siguiendo los parámetros y ecuaciones IEEE Power and Energy Society. (2018). *IEEE Standard for Inverse Time Characteristics Equations for Overcurrent Relay. IEEE Std C37.112.*

Solución:

Tomamos los parámetros de la línea según el tipo “linnet” en base a la tabla

$$R_a = 0.294 \, \Omega/mi \text{ según la tabla C.2}$$

$$X_a = 0.4511 \, \Omega/mi \text{ según la tabla C.3}$$

$$X_d = 0.1953 \, \Omega/mi \text{ según la tabla C.4}$$

$$Z = R_a + j(X_a + X_d) = 0.294 + j0.6464 \, \Omega/mi$$

Valores base tomando como $S_{base} = 100 \, MVA$ y $V_{base} = 34.5 \, kV$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(34.5kV)^2}{100MVA} = 11.9025 \, \Omega \quad (1)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} * V_{base}} = \frac{100MVA}{\sqrt{3} * (34.5kV)} = 1673.4790A \quad (2)$$

Valores por unidad

$$S_{pu} = \frac{S}{S_{base}} \quad (3)$$

$$S_{pu_{minima}} = \frac{100MVA}{100MVA} = 1pu \quad S_{pu_{maxima}} = \frac{200MVA}{100MVA} = 2pu$$

$$V_{pu} = \frac{V}{V_{base}} = \frac{34.5 \, kV}{34.5kV} = 1pu \quad (4)$$

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_{base}} \quad (5)$$

$$Z_{pu/mi} = \frac{0.294 + j0.6464 \, \Omega/mi}{11.9025 \, \Omega} = 0.0247 + j0.0543 \, pu/mi$$

$$Z_{pu \, G-H} = \left(0.0247 + j0.0543 \frac{pu}{mi}\right) * 10mi = 0.247 + j0.543 \, pu$$

$$Z_{pu \, H-R} = \left(0.0247 + j0.0543 \frac{pu}{mi}\right) * 20mi = 0.494 + j1.086 \, pu$$

$$Z_{pu \, R-final} = \left(0.0247 + j0.0543 \frac{pu}{mi}\right) * 30mi = 0.741 + j1.629 \, pu$$



Figura 5 Circuito en condiciones mínimas



Figura 6 Circuito en condiciones máximas

Para el Relé R

Paso 1: Corrientes de carga

$$I_{LD \max} = \frac{S}{\sqrt{3} * V} \quad (1)$$

$$\frac{5MVA}{\sqrt{3} * (34.5kV)} = 83.6739 A$$

Paso 2: Corrientes de cortocircuito

$$I_{pu} = \frac{V}{|Z_{pu}|} \quad (2)$$

$$I = I_{base} * I_{pu} \quad (3)$$

PUNTO 1

Corrientes de falla trifásica máxima y mínima en cada ubicación de la falla

Falla	$I_{base} (A)$	z_{pu}	I_{pu}	$I (A)$
1	1673.4790	$0.741 + j2.629$	0.3661	612.660
2		$0.247 + j1.543$	0.6436	1077.0511
3		$j1$	1	1673.5

Tabla 6: Corrientes Trifásica de Falla en Condiciones Mínimas

Falla	$I_{base} (A)$	$z_{pu} (\Omega)$	I_{pu}	$I (A)$
1	1673.4790	$0.741 + j2.129$	0.4436	742.448
2		$0.247 + j1.043$	0.9330	1561.355
3		$j0.5$	0.5	3347.0

Tabla 7: Corrientes Trifásica de Falla en Condiciones Máximas

PUNTO 2

Paso 3: Corriente de arranque

$$MOC_R = 2 * 83.6739 A = 167.3479 A = I_{PR} \text{ Corriente en el primario}$$

Paso 4: Corriente en múltiplos de Pick-up

Haciendo uso de la ecuación de las corrientes en múltiplos de pick-up tenemos los siguientes resultados

$$XPU = \frac{160}{167.3479} = 0.9560$$

Tiempo (s)	500	10	1	0.1
Corriente pickup	1	1.375	3.25	10

Tabla 8: Característica del fusible del transformador reductor en múltiplos de pickup

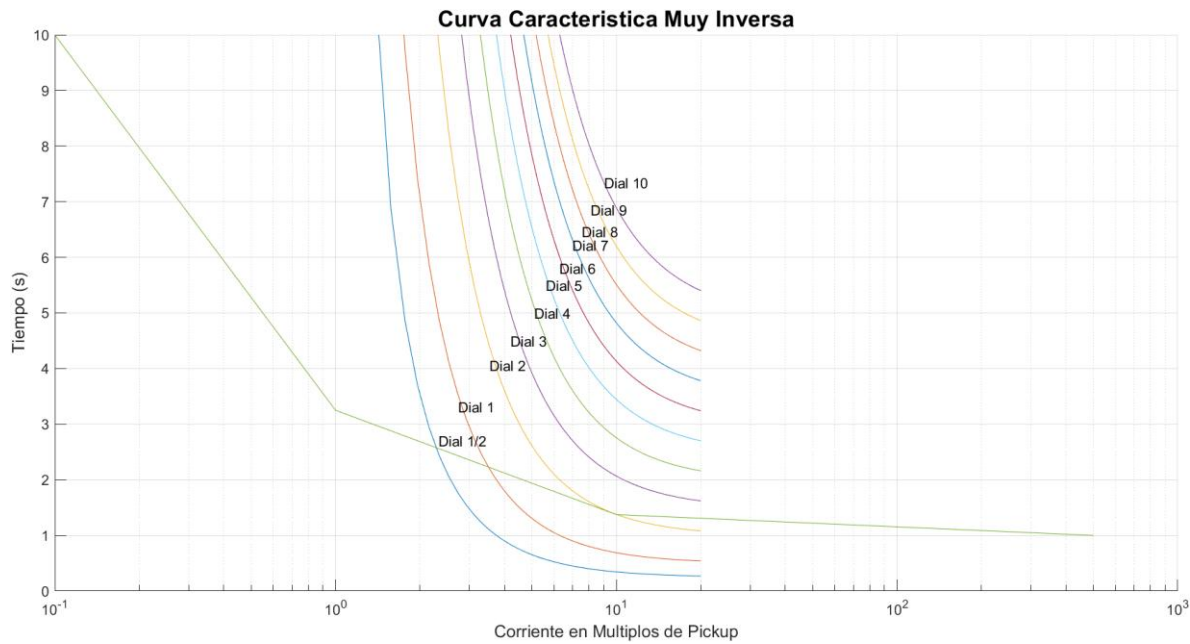


Figura 7: Curvas características de tiempo-corriente de sobrecorriente inversa con respecto al relé R

Paso 5: Dial

Tomamos como referencia los datos obtenidos en el paso anterior y graficamos con respecto a la gráfica de la Figura 7 de esto concluimos que el Dial que funciona para este relé es el Dial 1.

Definiendo el Dial =1 nos enfocamos en esa curva e interceptamos con respecto a

$$XPU_{R\ max} = \frac{742.448}{167.3479} = 4.4365$$

Para lo cual obtenemos que el tiempo de operación $T_{R\ max} \approx 1.494\ s$

Para el Relé H

Para coordinar el siguiente relé repetimos los pasos 3, 4 y 5.

Paso 3: Corriente de arranque

$$MOC_H = 2 * MOC_R = 334.6958\ A = I_{PH}\ \text{Corriente en el primario}$$

Paso 4: Corriente en múltiplos de Pick-up

$$XPU_{H\ max} = \frac{742.448}{334.6958} = 2.2182$$

$$T_{CRH} = T_{R\ max} + CTI = 1.494\ s + 0.3\ s = 1.794\ s$$

Graficamos $XPU_{H\ max}$ vs T_{CRH} con respecto a la Figura 2 para lo cual obtenemos que el Dial = $\frac{1}{2}$

Interceptamos la curva de Dial = $\frac{1}{2}$ con respecto a

$$XPU_{H\ max} = \frac{1561.355}{334.6958} = 4.6649$$

Para lo cual obtenemos que el tiempo de operación $T_{R\ max} \approx 0.6921\ s$

Para el Relé G

Para coordinar el ultimo relé repetimos los pasos 3, 4 y 5.

Paso 3: Corriente de arranque

$$MOC_G = 2 * 251.0218 = 502.0437\ A = I_{PH}\ \text{Corriente en el primario}$$

Paso 4: Corriente en múltiplos de Pick-up

$$XPU_{H\ max} = \frac{1561.355}{502.0437} = 3.1099$$

$$T_{CRH} = T_{H\ max} + CTI = 0.6921\ s + 0.3\ s = 0.9921\ s$$

Graficamos $XPU_{H\ max}$ vs T_{CRH} con respecto a la Figura 2 para lo cual obtenemos que el Dial = $\frac{1}{2}$

Interceptamos la curva de Dial = $\frac{1}{2}$ con respecto a

$$XPU_{H\ max} = \frac{3347}{502.0437} = 6.6667$$

Para lo cual obtenemos que el tiempo de operación $T_{R\ max} \approx 0.4546\ s$

PUNTO 3 Y PUNTO 4

Para hacer uso de la simulación Relé Protección Sobrecorriente, se configura según los resultados en los cálculos manuales de los cuales se obtuvieron los siguientes parámetros

Voltaje Base= 34.5 kV

Potencia base =100 MVA

Potencia en condiciones máximas = 200 MVA

Cargas= 5MVA

Para el Relé G

Distancia de Línea: 16.0934 km

Resistencia de la Línea: 0.1826 Ohms/km

Inductancia de la Línea: 0.4016/377 H/km

Tap: 12

Relación de transformación: 40

Dial: $\frac{1}{2}$

Para el Relé H

Distancia de Línea: 32.1868 km

Resistencia de la Línea: 0.1826 Ohms/km

Inductancia de la Línea: 0.4016/377 H/km

Tap: 8

Relación de transformación: 40

Dial: $\frac{1}{2}$

Para el Relé R

Distancia de Línea: 48.2802 km

Resistencia de la Línea: 0.1826 Ohms/km

Inductancia de la Línea: 0.4016/377 H/km

Tap: 8

Relación de transformación: 20

Dial: 1

De la simulación obtenemos los siguientes resultados

Falla	I(A) Cálculos Manuales	I (A) Cálculos Simulación
1	742.448	724.7
2	1561.355	1532
3	3347.0	3320

Tabla 9: Comparativo corrientes fallas trifásicas cálculos manuales y simulados

Como podemos observar por medio de la comparación las corrientes son muy cercanas lo cual nos indica que el sistema está funcionando de manera correcta

Tiempo de operación	Tiempo (s) Cálculos Manuales	Tiempo (s) Cálculos Simulación
R	1.4949	1.456
G	0.6921	0.6929
H	0.4546	0.412

Tabla 10: Comparativo tiempos de operación cálculos manuales y simulados

De la misma manera realizamos la comparación de los tiempos de operación del relé, que al configurar el sistema con los parámetros de los cálculos manuales los resultados deberían ser lo más cercanos posibles.

En las siguientes imágenes vemos cómo se comporta la corriente cuando falla cada uno de los relés y como se ven afectados los otros.

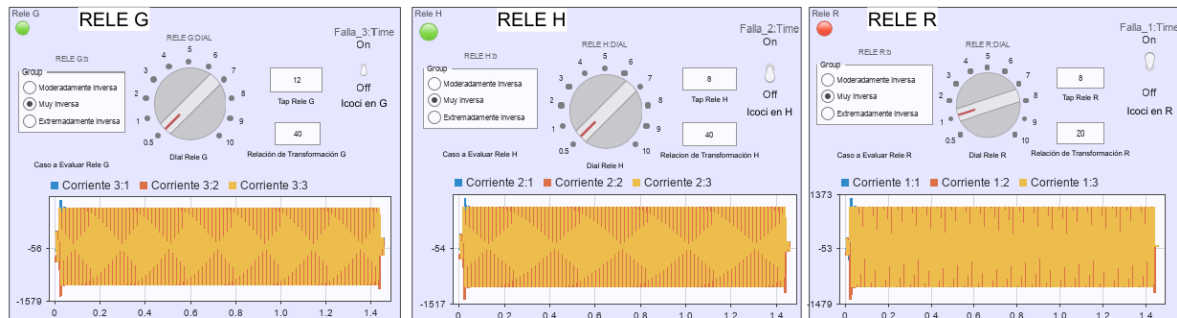


Figura 8: Sistema cuando entra en falla el barraje R

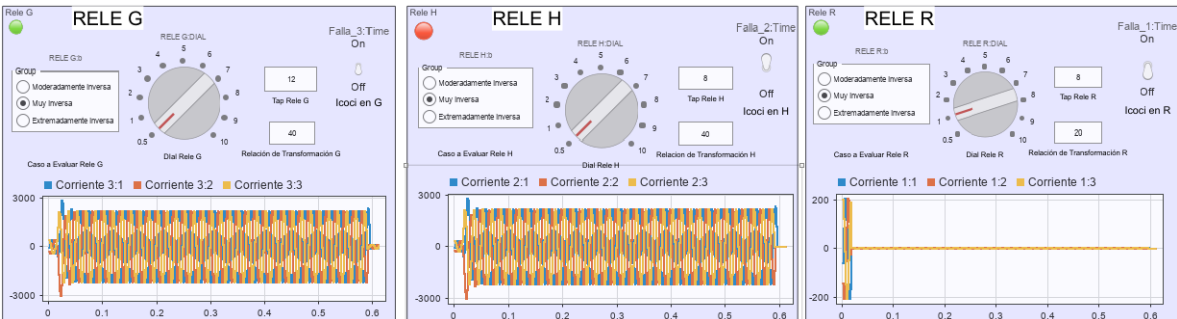


Figura 9: Sistema cuando entra en falla el barraje H

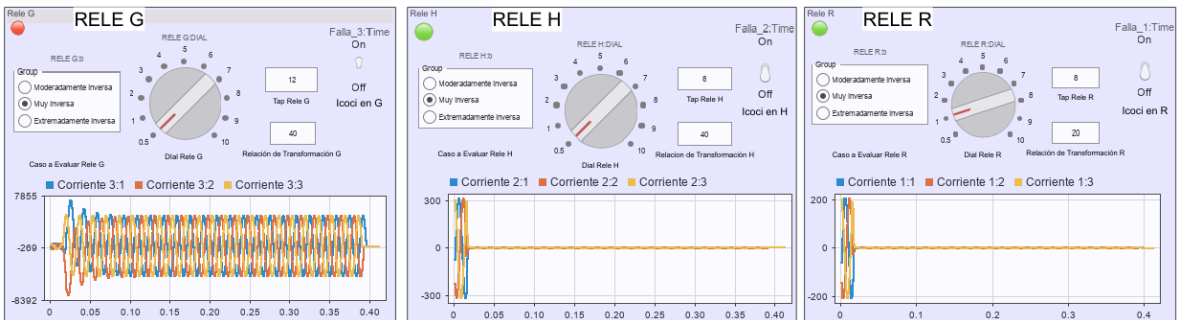


Figura 10: Sistema cuando entra en falla el barraje G

Tal como se puede observar en las Figura 8, Figura 9 y Figura 10 el circuito se abre según el tiempo de operación de cada uno de los relés, los relés aguas debajo de las fallas no funcionan dado que el sistema se abre en el punto de la falla.