



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTROMECAÁNICA**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HOJA DE CÁLCULO PARA EFECTUAR LA
COORDINACIÓN DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS EN MEDIO VOLTAJE**

AUTOR:

LARA SÁNCHEZ JORGE ABRAHAM

**ING. DIEGO ORTIZ MSC.
DIRECTOR**

**ING. WASHINGTON FREIRE
CODIRECTOR**

Latacunga, Julio 2014



CONTENIDO

- ▶ Justificación
- ▶ Objetivos
- ▶ Introducción
- ▶ Metodología del proyecto
- ▶ Caso de estudio
- ▶ Resultados
- ▶ Conclusiones
- ▶ Trabajos futuros



JUSTIFICACIÓN



La necesidad de contar con una herramienta computacional no licenciada para profesionales especializados en el área de Coordinación de Protecciones Eléctricas generará un ahorro económico considerable a empresas, profesionales, estudiantes que en general trabajan o estudian las Protecciones Eléctricas de medio voltaje, con lo que se garantiza el objetivo de mejorar las capacidades y potencialidades de la ciudadanía en el Plan Nacional del Buen Vivir.

OBJETIVOS

Diseño e Implementación de una Hoja de Cálculo para efectuar la Coordinación de Protecciones Eléctricas en medio voltaje

- ▶ Establecer una metodología para el cálculo de cortocircuitos de distribución.
- ▶ Establecer las características de los diferentes dispositivos de protección en Distribución.
- ▶ Diseñar e Implementar el programa en la de Hoja de Cálculo.
- ▶ Utilizar los recursos gráficos de una Hoja de Cálculo para visualizar los resultados del proceso de coordinación.
- ▶ Validar el Programa, comparando los resultados obtenidos con el uso de herramientas computacionales existentes en el mercado.

INTRODUCCIÓN

En los Sistemas eléctricos de Potencia, es fundamental el conocimiento de todos los equipos que son parte del mismo, como son el generador, Transformador, Líneas de Transporte de energía, la carga conectada al SEP, entre otros, así como elementos de un equipo de protección como son: Batería de alimentación , elemento que garantiza la continuidad del suministro de la energía necesaria para el funcionamiento del equipo de protección, transformadores de medida para protección, relé de protección, Interruptor automático, entre otros.

En el caso particular de los sistemas de medio voltaje, deben partir desde la subestación que está integrada por transformadores de potencia, de allí parten n alimentadores primarios que suministran de energía eléctrica.

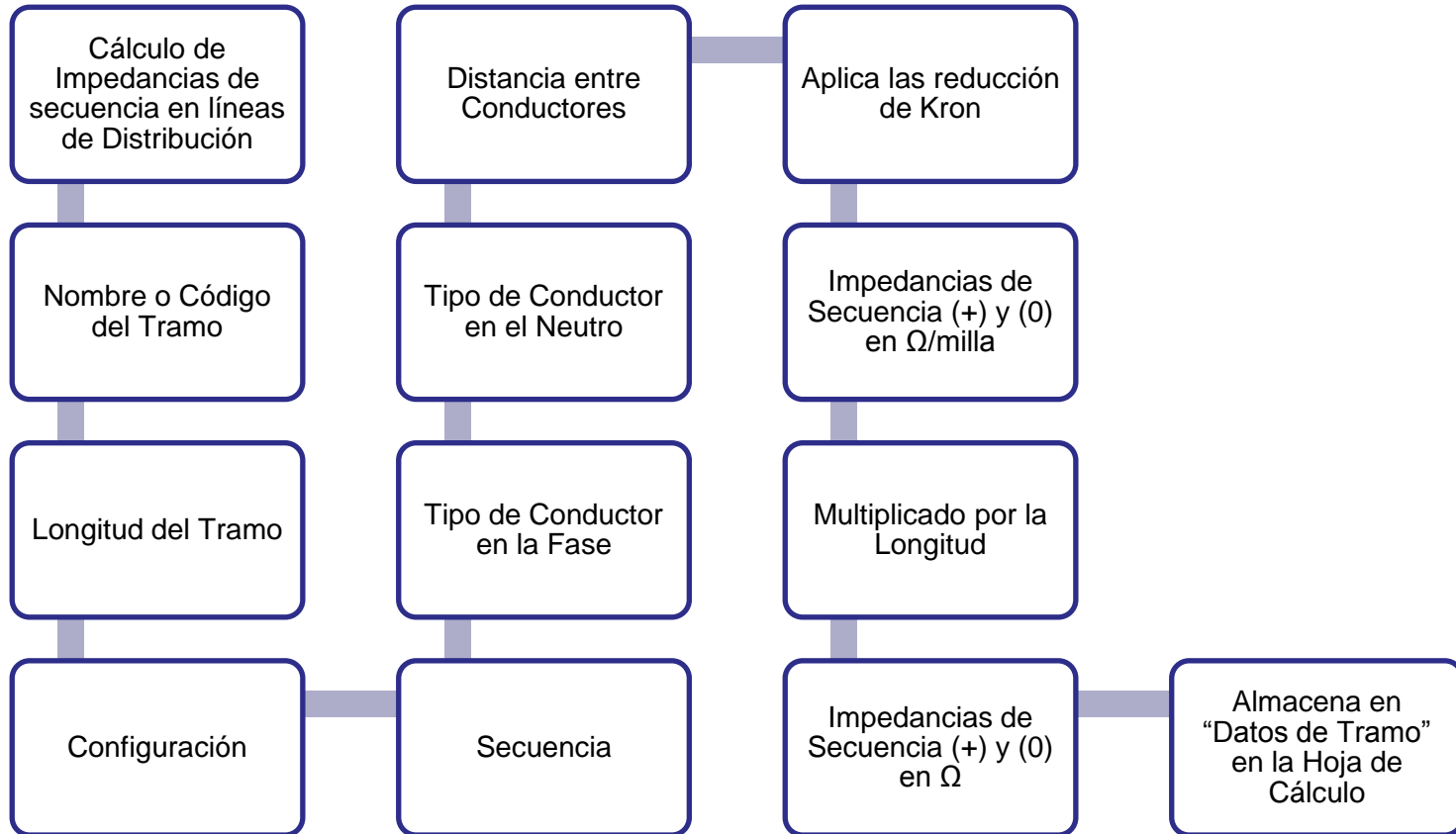
INTRODUCCIÓN

Los equipos de protección usados en medio voltaje, partiendo desde la Subestación son los relés de sobrecorriente, así como los equipos de corte como son los fusibles y los reconectores.

Además se lo debe complementar con un estudio de flujo de potencia para conocer condiciones pre falla y un estudio de cortocircuitos para conocer las corrientes máximas que circulan por todo el circuito para que lo equipos de protección puedan aislar esta corriente para cuidar y proteger los equipos conectados al alimentador.

METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Cortocuitos



METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Cortocuitos

$$\hat{Z}_{ii} = r_i + 0,0953 + j0,12134 \times \left[\ln \left(\frac{1}{\text{GMR}_i} \right) + 7,93402 \right] \Omega/\text{milla}$$

$$\hat{Z}_{nn} = r_n + 0,0953 + j0,12134 \times \left[\ln \left(\frac{1}{\text{GMR}_n} \right) + 7,93402 \right] \Omega/\text{milla}$$

$$\hat{Z}_{ij} = 0,0953 + j0,12134 \times \left[\ln \left(\frac{1}{D_{ij}} \right) + 7,93402 \right] \Omega/\text{milla}$$

$$\hat{Z}_{in} = 0,0953 + j0,12134 \times \left[\ln \left(\frac{1}{D_{in}} \right) + 7,93402 \right] \Omega/\text{milla}$$

$$Z_{00} = \hat{Z}_{ii} + 2 \times \hat{Z}_{ij} - 3 \times \left(\frac{\hat{Z}_{in}^2}{\hat{Z}_{nn}} \right) \Omega/\text{milla}$$

$$Z_{11} = Z_{22} = \hat{Z}_{ii} - \hat{Z}_{ij}$$

$$Z_{11} = Z_{22} = Z_{00} = r_i + j0,12134 \times \left[\ln \left(\frac{D_{ij}}{\text{GMR}_i} \right) \right] \Omega/\text{milla}$$

\hat{Z}_{ii} = Auto impedancia del conductor i en Ω / milla

\hat{Z}_{ij} = Impedancia mutua entre conductores i y j en Ω / milla

r_i = resistencia del conductor i en Ω / milla

r_n = resistencia del conductor n en Ω / milla

GMR_i = Radio Media Geométrica del conductor i en pies

GMR_n = Radio Media Geométrica del conductor n en pies

D_{ij} = distancia entre conductores i y j en pies

D_{in} = distancia entre conductores i y n en pies

Z_{00} = Impedancia de secuencia cero o homopolar

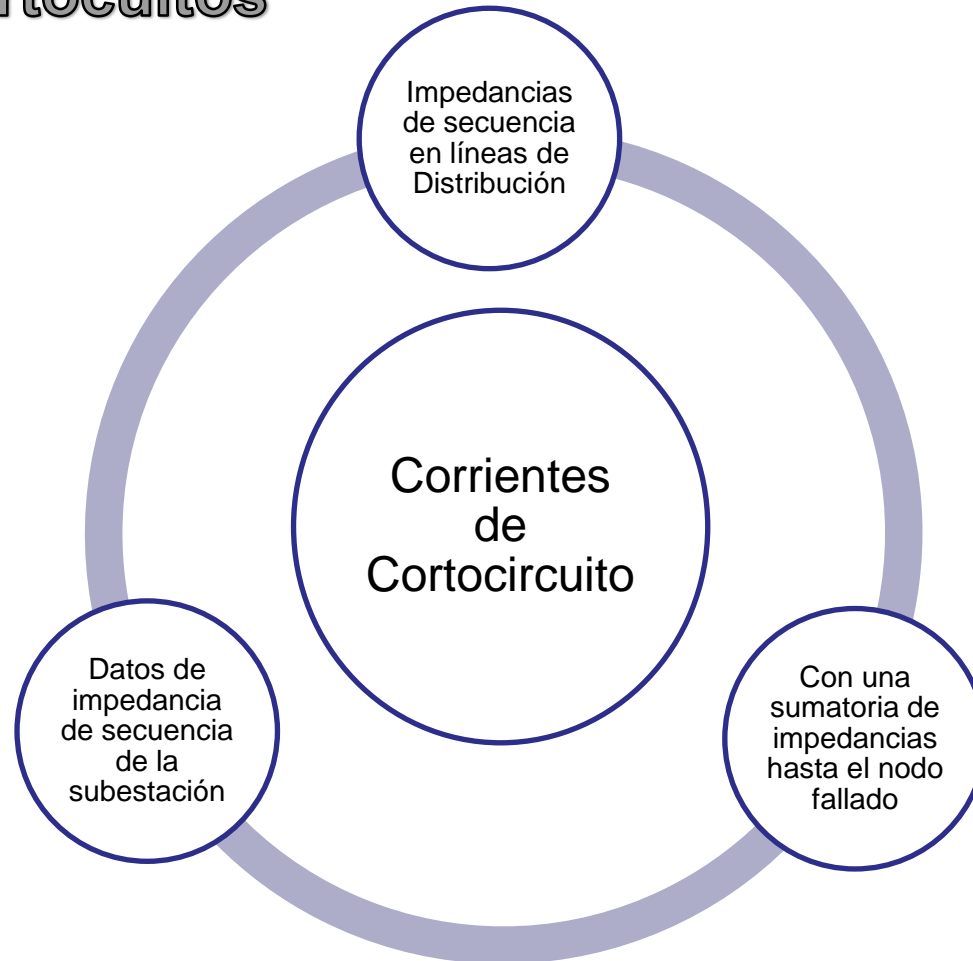
Z_{11} = Impedancia de secuencia positiva

Z_{22} = Impedancia de secuencia negativa



METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Cortocuitos



$$I_{LLL} = K_{\text{máx}} \cdot \frac{V}{Z_1 + Z_F}$$

$$I_{LLT} = K_{\text{máx}} \cdot V \cdot Y_2$$

$$Y_2 = \frac{a^2 \cdot (Z_0 + Z_1) - a \cdot Z_0 - Z_1}{Z_1 \cdot (Z_1 + Z_0) + Z_1 \cdot Z_0}$$

$$I_{LL} = K_{\text{máx}} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot V}{2Z_1 + Z_F}$$

$$I_{LT \text{ máx}} = K_{\text{máx}} \cdot \frac{V}{2Z_1 + Z_0}$$

$$I_{LT \text{ min}} = 3K_{\text{min}} \cdot \frac{V}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F}$$



METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Coordinación de protecciones

Modelado de los equipos



Curvas de daño térmico según la norma ANSI/IEEE C57.12.00-1980 y curva Inrush.



Fusibles de marca LUHFSEER



Reconectores Hidráulicos de la marca COOPER
Reconectores Electrónicos ABB PCD2000



METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Coordinación de protecciones

Modelado de los equipos



Relés de sobrecorriente tipo ANSI/IEEE, IEC y TIPO CO



Norma IEEE 242-1986 ("Buff Book").
ACSR, ACAR, AAAC, Cobre desnudo
Otros, el tipo de aislamiento y el tipo de material



METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Coordinación de protecciones

Fusibles Tipo T

Voltaje de Operación: 13,8 [kV]

Agregar		Borrar	
1T	25T	1T	25T
2T	30T	2T	30T
3T	40T	3T	40T
6T	50T	6T	50T
8T	65T	8T	65T
10T	80T	10T	80T
12T	100T	12T	100T
15T	140T	15T	140T
20T	200T	20T	200T

Regresar

Fusible Tipo K

Voltaje de Operación: 13,8 [kV]

Agregar		Borrar	
1K	25K	1K	25K
2K	30K	2K	30K
3K	40K	3K	40K
6K	50K	6K	50K
8K	65K	8K	65K
10K	80K	10K	80K
12K	100K	12K	100K
15K	140K	15K	140K
20K	200K	20K	200K

Regresar

"Fusible Tipo K y T"

Transformador

Nº: [] Id: Vacío

Voltaje Primario: [] [kV]

Impedancia: [] [%]

Potencia Nominal: [] [kVA]

Conexión: []

Tipo: []

Conexión:

- Delta-Delta
- Delta-Y, sin conexión a tierra
- Delta-Y, conexión directa a tierra
- Delta-Y, puesto a tierra con resist.
- Y-Delta
- Y-Y, sin conexión a tierra
- Y-Y, conexión directa a tierra
- Y-Y, puesto a tierra con resistencia
- Y-Y, puesto a tierra
- Monofásico LL
- Monofásico L-T

Curva de Corriente circulant:

- Frecuente
- Infrecuente

Agregar:

Curva Daño Térmico Curva Inrush-Frío

Borrar:

Trafo Nº1 Trafo Nº4

Trafo Nº2 Trafo Nº5

Trafo Nº3

Regresar

"Transformador"

Corriente de Cortocircuito

Número: 1

Icc Máximo (A)

[] Cargar Borrar Icc Máx.

I n (A)

[] Cargar Borrar In

Regresar Borrar Todo

"Corriente de Cortocircuito"

Tiempo(seg)

Número: 1

tiempo (seg)

[] Cargar Borrar

Regresar Borrar Todo

" Tiempos (seg)"



METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Coordinación de protecciones

The screenshot shows the 'Reconector' window with the following settings:

- Voltaje de Operación: 13,8 [kV]
- Numero: 1, Id: Vacío
- Protección: Fase
- Tipo de Control: (empty dropdown)
- Tipo: (empty dropdown)
- Fase** and **Tierra** sections, each with 'Rápida' and 'Lenta' checkboxes checked and associated dropdown menus.
- Bobina: 0
- Buttons: Dibujar, Regresar

"Reconector Hidráulico"

The screenshot shows the 'Reconector Electrónico' window with the following settings:

- Número: 1, Protección: Fase
- Voltaje de Operación: 13,8 [kV], Id: Vacío
- Fase** section: 'Rápida' checked, 'Lenta' checked, with associated dropdowns and TD values of 0.
- Tierra** section: 'Rápida' checked, 'Lenta' checked, with associated dropdowns and TD values of 0.
- Bobina: 0
- Buttons: Dibujar, Regresar

"Reconector Electrónico"

METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Coordinación de protecciones

Rele de Sobrecorriente

Voltaje de Operación: 13,8 (KV)

Nº: [] Rele de: Fase []

Primario: [] Secundario: [] Nombre: []
 RTC's: 300 / 5 Vacio
 SIE: []
 RTC's AUX: 1 / 1 Vacio

Norma
 IEC
 ANSI/IEEE
 TYPE CO

Tipo
 Electromecánico
 Estático
 Digital
 Numérico

Const.
 A: [0] B: [0] K: [0] P: [0]

Datos
 Error básico de tiempo %: [5]
 Tiempo de sobredisparo (s): [0,02]
 Margen de seguridad (s): [0,03]
 Margen de tiempo total (s): [0,3]

ANSI/IEEE

51 (Temporizado) **50 (Instantaneo)**

I n (A): [1] Icc (A): [0]
 Factor de Sobrecarga: [1,50] Factor: [1,25]

Tap Calculado: [] Tap(INST) Calculado: []
 Rango Disponible: [] Rango Disponible: []
 TAP: [] TAP(INST): []

I(A) 51: [1] I(A) 50: [0]

"Relé de sobrecorriente"

Curva de capacidad térmica de cables

ACSR ACAR AAAC Cobre Otros

Material: Aluminio Cobre

Voltaje de Operacion: 13,8 [kV]

Aislamiento: To: [90] Tf: [250]

TIPO: Otros
 Calibre: []
 Codigo: []
 Seccion: []
 Diametro: []

Nº: [] Id: Vacio

Material Factor Factor T Resist. Ratio En Aire
 0,0125 228 1

Borrar Conductores:

Calibre:
 ACSR:
 COBRE:
 AAAC:
 ACAR:
 Otros: []

Aislamiento: Bare Aluminium []

"Curva de capacidad térmica de cables"

METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Coordinación de protecciones

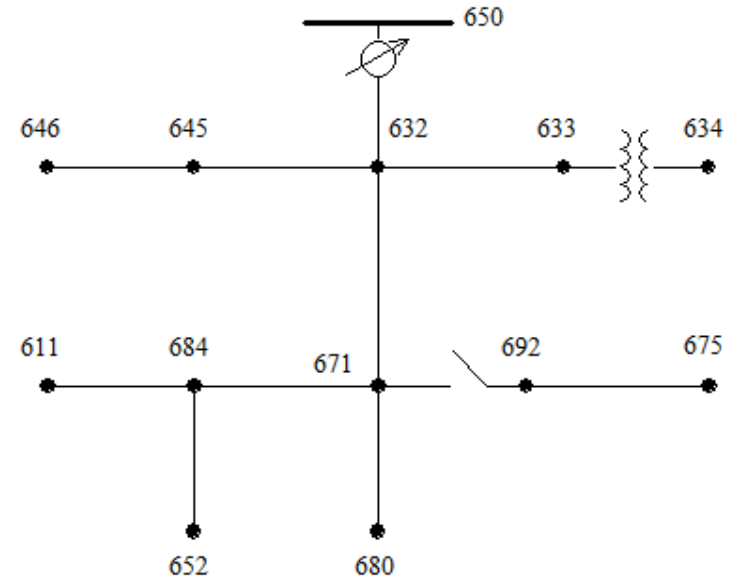


CASO DE ESTUDIO

cortocircuitos

IEEE 13 Node Test Feeder

Para la validación del procedimiento general para el cálculo de fallos en sistemas de Distribución en medio voltaje se va a calcular la I_{cc} en los nodos de las líneas aéreas, las mismas que se va a comparar con datos proporcionados por el programa CYMDIST de la empresa Cooper.



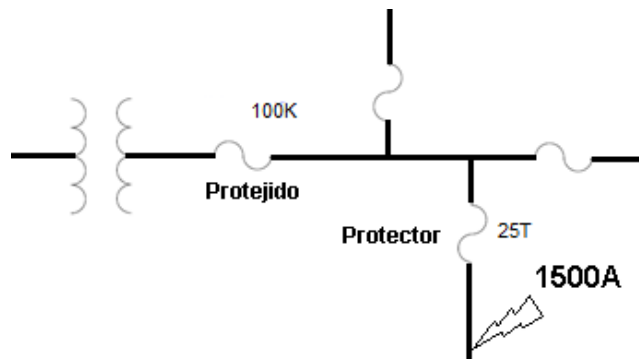
Nodo	CALCULADO				CYMDIST			
	LLL(A)	LLT(A)	LL(A)	LT(A)	LLL(A)	LLT(A)	LL(A)	LT(A)
S650	174397,01	174393,17	151032,24	174397,01	172156	172153	149092	172147
N632	9667,82	8668,86	8372,58	5689,54	9579	8590	8296	5628
N633	7185,86	6375,78	6223,14	4355,86	7118	6394	6164	4309
N646	5429,23	4737,20	4701,85	3489,79	5378	4959	4658	3453
N684	4353,93	3865,40	3770,61	2589,67	4316	3861	3737	2560
N680	3998,25	3578,54	3462,59	2320,54	3963	3547	3432	2294



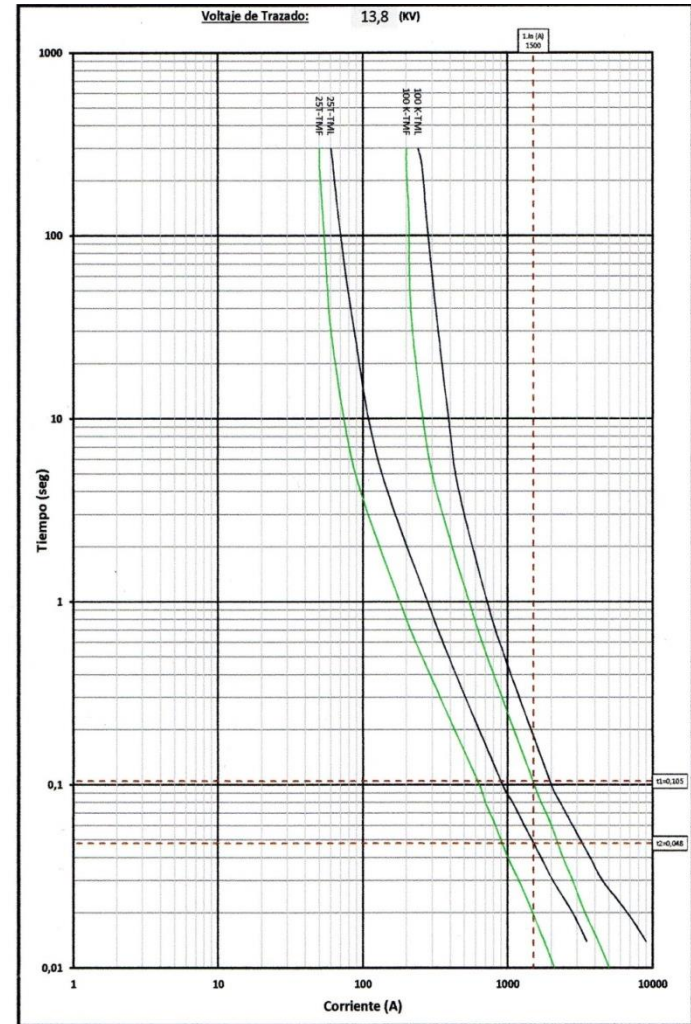
CASO DE ESTUDIO

Protecciones eléctricas

Coordinación fusible - fusible



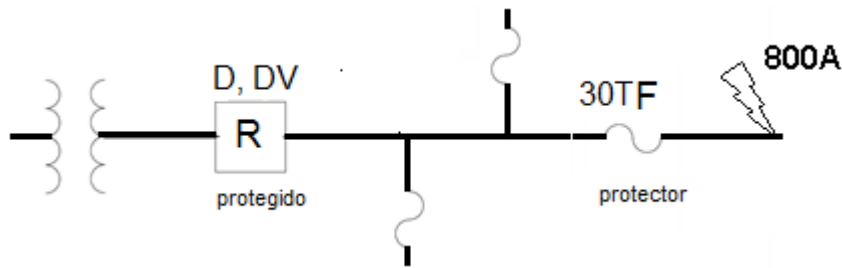
Dispositivo	Hoja de cálculo (Seg)
2-FUSE TIPO 25T (máx.)	0,048
1-FUSE TIPO 100K(min)	0,105



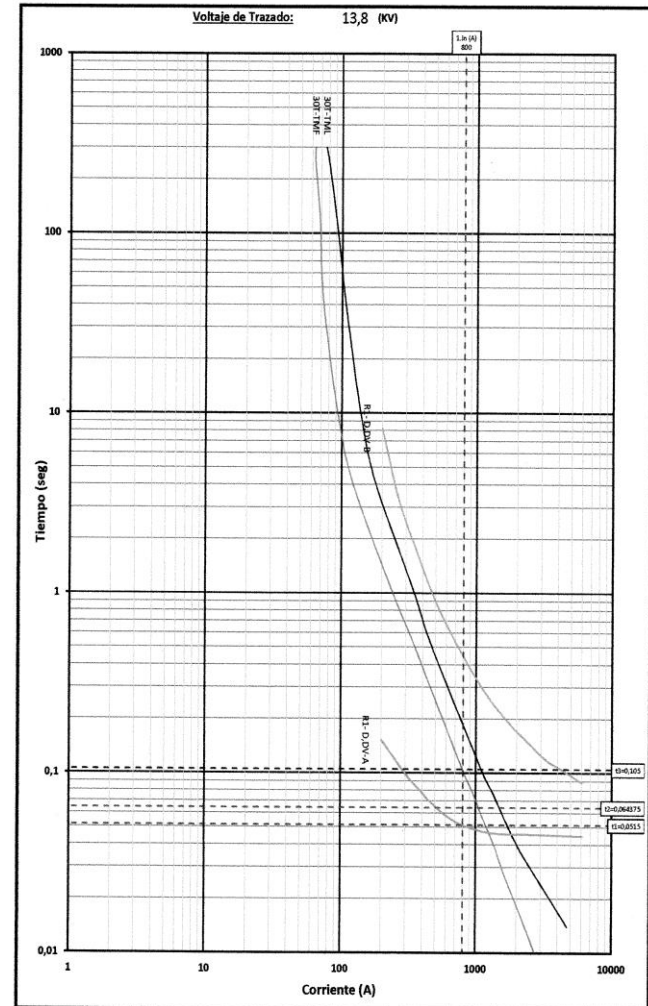
CASO DE ESTUDIO

Protecciones eléctricas

Coordinación Reconectador-fusible en lado de la carga



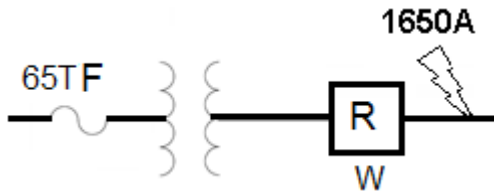
Dispositivo	Hoja de cálculo (Seg)
1-RECLOSER_H1 D,DV(Fast)	0,0515
1-RECLOSER_H1 D,DV(Fast Coord)	0,06473
2-FUSE TIPO T(min)	0,105



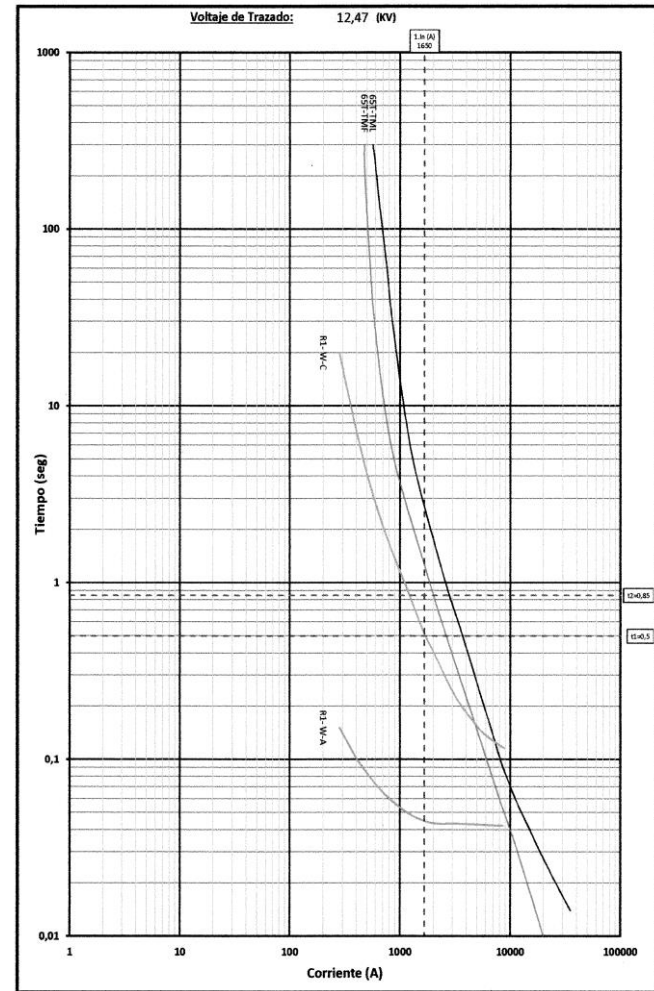
CASO DE ESTUDIO

Protecciones eléctricas

Coordinación Reconectador-fusible en lado de la fuente.



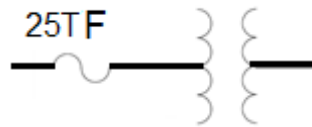
Dispositivo	Hoja de cálculo (Seg)
2-RECLOSER_H3 W,SERIES,300/600:5 (Phase Slow)	0,5
2-RECLOSER_H3 W,SERIES,300/600:5 (Phase Slow Coord)	0,85



CASO DE ESTUDIO

Protecciones eléctricas

Coordinación fusible - transformador.

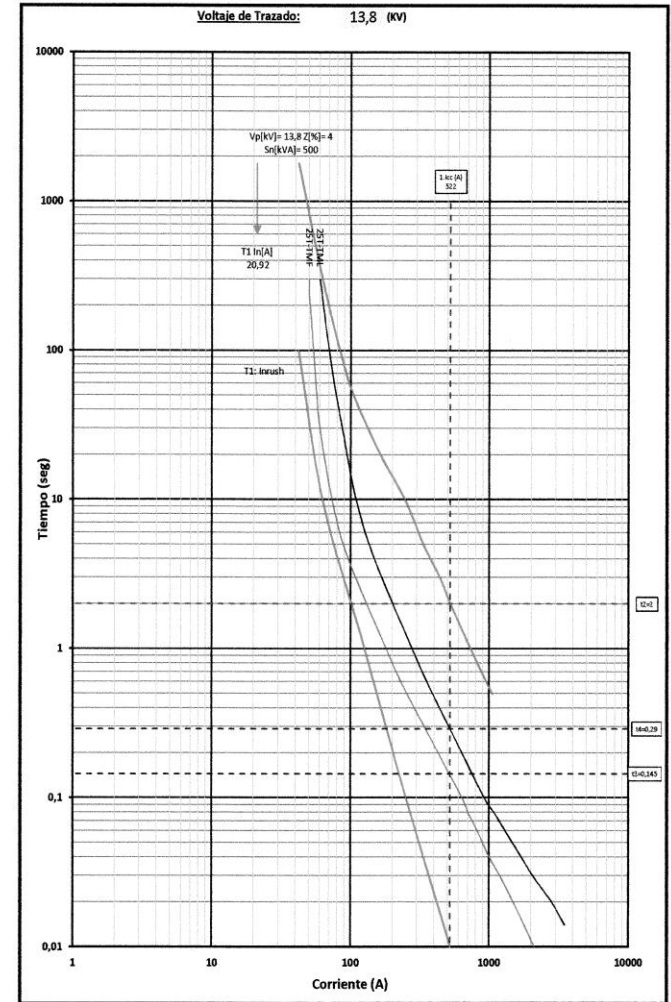


Curva de "Inrush" de un transformador de 500kVA

La corriente del cortocircuito es de 522 A

Tiempo (seg)	Corriente (A)
100	41,82
10	62,76
1	125,52
0,1	251,03
0,01	522,97

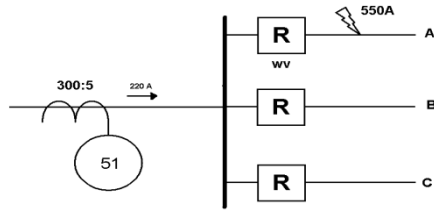
Dispositivo	Tiempo (Seg)
25T(min)	0,145
25T(max)	0,29
Transformador (curva de daño)	2



CASO DE ESTUDIO

Protecciones eléctricas

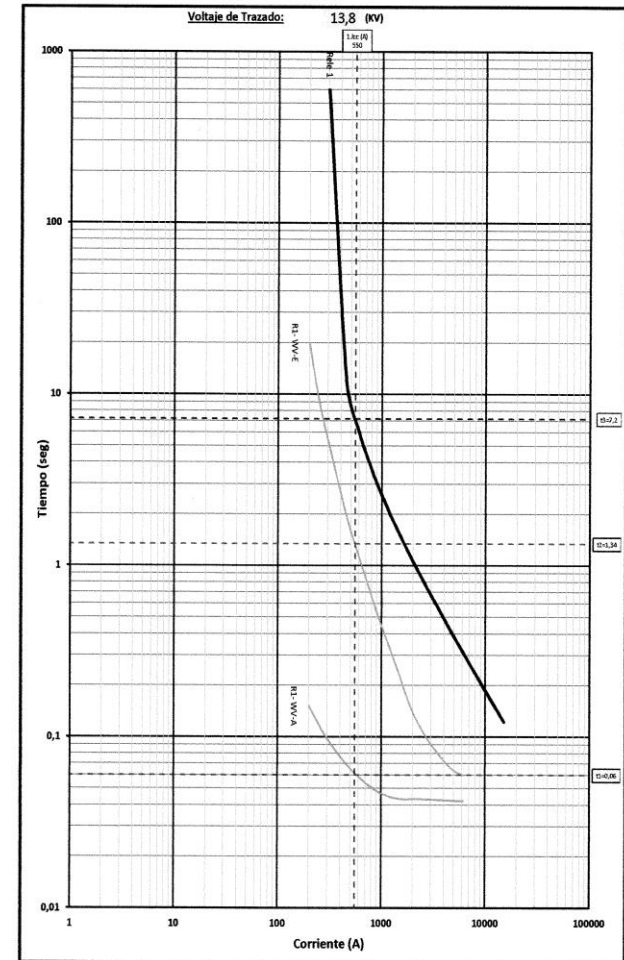
Coordinación relé de sobrecorriente – reconectador



Nº	Id	Fase		
		Curva Rápida	Curva Lenta	Bobina
R1	Vacío	A	E	100

Nº	TC	TAP (51)	TIPO	Clase	Construcción
Relé 1	300	5	IEC	Long Time Inverse	Digital

Dispositivo	Hoja de cálculo (Seg)
2-Reconectador WV (curva rápida)	0,06
2-Reconectador WV (curva lenta)	1,34
1-Relé de sobrecorriente IEC LT	7,2



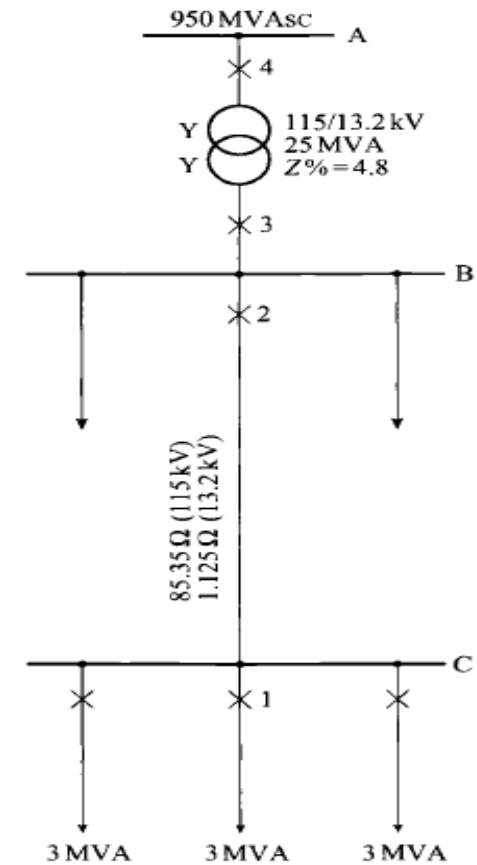
CASO DE ESTUDIO

Protecciones eléctricas

Coordinación entre relés de sobrecorriente

Relé numero	I_{nom} (A)	I_{cc} (A)	RTC
1	131,2	4640	300/5
2	393,6	14714,8	800/5
3	1093,5	14714,8	1100/5
4	125,3	4769,8	300/5

Relé asociado al interruptor	Pick-up (A)	Time dial	$I_{sec.}(A)$ Instantáneo	$I_{prim.}(A)$ Instantáneo
1	4	1	39	2340
2	4	2	37	5920
3	8	2	-	-
4	4	5	36	18818

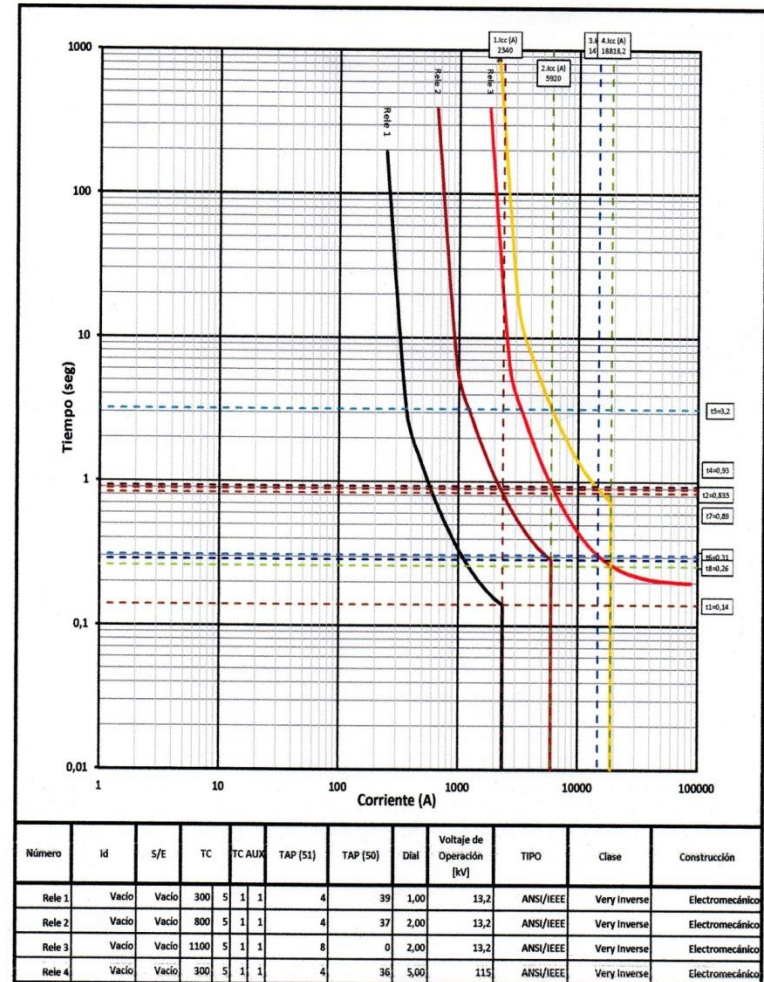


CASO DE ESTUDIO

Protecciones eléctricas

Coordinación entre relés de sobrecorriente

Dispositivo	Corriente (A)	Hoja de calculo (Seg)
1.Relé ANSI/IEEE VI	2340	0,14
2.Relé ANSI/IEEE VI		0,835
2.Relé ANSI/IEEE VI	5920	0,289
3.Relé ANSI/IEEE VI		0,93
3.Relé ANSI/IEEE VI	14714,8	0,31
4.Relé ANSI/IEEE VI		0,89
3.Relé ANSI/IEEE VI	18818,2	0,26
4.Relé ANSI/IEEE VI		0,736



RESULTADOS

Cortocircuitos

Nodo	ERROR %				
	LLL	LLT	LL	LT	Promedio
Sub650	-1,3	-1,3	-1,3	-1,31	-1,30
N632	-0,93	-0,92	-0,92	-1,09	-0,97
N633	-0,95	0,28	-0,96	-1,09	-0,68
N646	-0,95	4,47	-0,94	-1,07	0,38
N684	-0,88	-0,11	-0,9	-1,16	-0,76
N680	-0,89	-0,89	-0,89	-1,16	-0,96
			Promedio Total		-0,72

Error	%
Máximo	4,47
Mínimo	0,72
Promedio	-0,72



RESULTADOS

Protecciones eléctricas

Tipo de coordinación	% Error máximo	% Error mínimo	Promedio
Coordinación fusible - fusible	2,04	0,62	1,33
Coordinación Reconectador-fusible en lado de la carga.	2,04	0,19	1,12
Coordinación Reconectador-fusible en lado de la fuente.	3,68	3,67	3,68
Coordinación fusible - transformador.	-2,62	0,37	-1,13
Coordinación relé de sobrecorriente – reconectador	3,69	0,09	1,89
Coordinación entre relés de sobrecorriente	2,92	-0,07	1,43
	Promedio total		1,39

Error	%
Máximo	3,69
Mínimo	0,19
Promedio	1,39



CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño e implementación de una hoja de cálculo para efectuar la coordinación de protecciones eléctricas en medio voltaje, cuya interfaz es amigable con el usuario.
- Se desarrolló una metodología general para el cálculo de cortocircuitos en sistemas de distribución con topología radial, modelando las líneas aéreas según el tipo de estructura.
- Al implementar el circuito de la “IEEE 13 Node Test Feeder”, en la hoja de cálculo para obtener las corrientes de cortocircuito y en el software CYMDIST, al calcular el porcentaje de error entre las corrientes de falla, se obtuvo un mínimo error de menos 0,11% y como máximo de error de 4,47%, con lo que se concluye que el diseño y la implementación de la hoja de cálculo se puede usar para otro tipo de configuraciones de alimentadores radiales.

CONCLUSIONES

- Se generó una base de datos para los equipos de protección eléctrica en distribución para fusibles y reconectores según las curvas de tiempo-corriente de los fabricantes.
- Las curvas de transformadores, relés de sobrecorriente y la capacidad térmica de conductores se usaron los modelos matemáticos expresado en las normas ANSI/IEEE y IEC.
- La hoja de cálculo para coordinación de protecciones eléctricas en medio voltaje, integra muchas de las características de otras aplicaciones existentes en el mercado.
- Al aplicar los criterios de coordinación y encontrar los datos de intersección de tiempo entre la corriente de falla con los dispositivos de protección de ejemplos propuestos por este proyecto en la hoja de cálculo para coordinación de protecciones en medio voltaje y el software CYMTCC, se obtuvo los errores como máximos 4,95% y mínimo de 0,09%,.

TRABAJOS FUTUROS

- Desarrollar un software para el cálculo de pérdidas en los conductores para líneas de distribución en medio voltaje.
- Desarrollar un proyecto de tesis para el cálculo de corrientes de cortocuitos según las normas IEEE y IEC.
- Desarrollar un programa implementado en Matlab para el análisis de flujos de potencia en redes de distribución.

