

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

Diego Ortiz Villalba, Washington Freire Llerena, Jorge Abraham Lara Sánchez

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga, Ecuador

RESUMEN: El problema de Protección de los Sistemas Eléctricos de Distribución ha venido adquiriendo cada vez mayor importancia ante el crecimiento acelerado de las redes eléctricas y la exigencia de un suministro de energía a los consumidores con una calidad de servicio cada vez mayor, a nivel de distribución con un interés especial en la selección, aplicación y coordinación.

Al existir una herramienta de fácil manejo y accesibilidad, que cumpla el mismo objetivo que los demás programas. El proyecto consiste en desarrollar un programa sobre una Hoja de Cálculo, donde permitirá al usuario interactuar en un ambiente amigable y comprensible con conocimientos de Coordinación de Protecciones Eléctricas bajo las Normas IEEE y IEC, que permita calcular las corrientes de cortocircuitos, validada con el software CYMDIST y CYMTCC, con los errores obtenidos menores al 5%, lo que nos muestra que es una herramienta confiable.

Palabras clave: Sistemas Eléctricos de Distribución, Protecciones eléctricas, Cortocircuitos, Hoja de cálculo, criterios de coordinación.

ABSTRACT: The Problem of Protection of Electrical Distribution Systems has acquired increasing importance with the rapid growth of electricity networks and the need for a power supply consumers with quality increasing service level distribution with a special interest in the selection, implementation and coordination.

As there is a user-friendly tool and accessibility that meets the same objective as the other programs. The project is to develop a program on a spreadsheet, which allow the user to interact in a friendly and understandable environment with knowledge the Coordination of Electrical Protection under the IEEE and IEC standards, allowing calculation of short circuit currents, validated software CYMDIST and CYMTCC, the errors obtained with less than 5%, which shows that it is a reliable tool.

Keywords: Electrical Distribution Systems, Electrical protection, shorts, Spreadsheet, coordination criteria.

I. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las averías en los sistemas eléctricos aéreos de distribución son temporales. Es decir, ocurren y luego que se desconecta el circuito, desaparecen. Muchas son las causas, una rama de un árbol que se conecta a un circuito y se quema, un animal que hizo contacto y se quema y cae, las descargas atmosféricas hacen rupturas superficiales de los aislamientos y luego que se desconecta la energía, se desaparece la falla.

Este tipo de averías que son la gran mayoría no deben provocar desconexiones permanentes de la energía eléctrica en el circuito. Se debe permitir que la avería sea temporal y por tanto no provocar desconexiones permanentes. [1]

Cuando la avería es permanente es cuando único la protección debe actuar y quedarse abierto el circuito. Una vez que esto suceda, solo la brigada de operadores y técnicos debe ir a normalizar el circuito, la protección no debe hacerlo por su cuenta.

Si ya es necesario desconectar de forma permanente una zona del circuito que está averiada, esta zona debe ser solo la zona averiada, es decir, debe ser la menor porción del circuito posible, para que se vean afectados el menor número de consumidores.

Estas reglas o leyes provocan que en las redes de distribución se empleen numerosos dispositivos de protección. Algunos para hacer conexiones permanentes y otros para hacer conexiones temporales del circuito [2]

II. METODOLOGÍA

La propuesta tiene como objetivo fundamental el diseño e implementación de una hoja de cálculo para efectuar la coordinación de protecciones eléctricas en medio voltaje, para realizar la coordinación de protecciones, se necesita conocer las corrientes de cortocircuito para saber

seleccionar los equipos adecuados para despejar la falla.

Calculo de corrientes de cortocircuito:

Para el cálculo de corrientes de cortocircuitos en sistemas distribución de tipología radial, se basa en la norma ANSI, donde se deben conocer las componentes de secuencia positiva, negativa y cero, tanto para la subestación y los tramos que constituyen el alimentador.

Los datos de impedancia de secuencia en la subestación es necesario conocer los datos de impedancia aguas arriba de la misma, o pedir este dato a la empresa de transmisión.

Para el cálculo de las impedancias de secuencia para los tramos [3], en la Figura 01 se detallan los aspectos considerados:

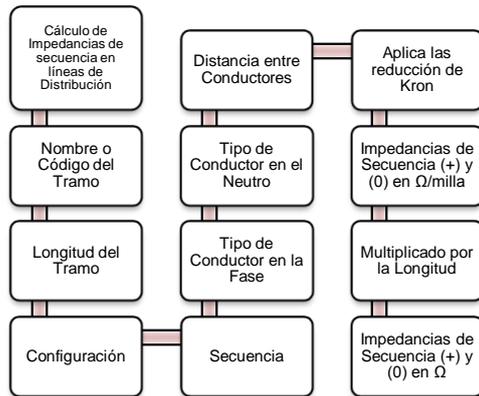


Figura 01: Aspectos considerados para el cálculo de impedancia de secuencia de tramo

Una vez conocido las impedancias de secuencia hasta el nodo en donde se quiere conocer las corrientes de falla, aplicamos la ecuación (1) para una falla trifásica, ecuación (2) para una falla bifásica a tierra, ecuación (3) para la una falla bifásica y las ecuaciones (4) y 5) para la falla monofásica a tierra. [4]

$$I_{LLL} = K_{\text{máx}} \cdot \frac{V}{Z_1 + Z_F} \quad (1)$$

$$I_{LLT} = K_{\text{máx}} \cdot V \cdot Y_2 \quad (2)$$

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

$$I_{LT_{\text{máx}}} = K_{\text{máx}} \cdot \frac{V}{2Z_1 + Z_0} \quad (4)$$

$$I_{LT_{\text{min}}} = 3K_{\text{min}} \cdot \frac{V}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F} \quad (5)$$

Dónde:

V= Voltaje nominal de pre falla línea a neutro.

Z1= Impedancia de secuencia positiva

Z0= Impedancia de secuencia cero

ZF= Impedancia propia de la falla

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

Kmáx y Kmin. = factor de seguridad

Coordinación de protecciones eléctricas:

Para el diseño de la hoja de cálculo para poder realizar aplicar los diferentes criterios para conseguir una adecuada coordinación entre los dispositivos de protección, es necesario modelar cada uno de los elementos que están presentes en un alimentador de distribución eléctrica como es. Transformadores, curva de daño térmico de cables, fusibles, reconectores y fusibles.

Para los transformadores se empleó la curvas de daño térmico según la norma ANSI/IEEE C57.12.00-1980 [5] y curva Inrush de magnetización que es representada como una curva lineal segmentada que atraviesa 5 puntos: (100s; 200%), (10s; 300%), (1s; 600%), (0.1s; 1200%) y (0.01s; 2500%). [6]

Los fusibles son de la marca LUSHFSEER, con los datos de las curvas tiempo – corriente que son proporcionadas por el fabricante.

Los reconectores son hidráulicos monofásicos y trifásico de la marca COOPER con las curvas características de los que fueron cargados en este proyecto [4]; en los Reconectores Electrónicos cargan curvas según sea esta ANSI, IEC o las del fabricante que para este proyecto es el modelo de ABB PC2000. [8]

Los Relés de Sobrecorriente posee la capacidad de cargar relés de sobrecorriente según sea su tipo: 51 (Temporizado) o 50 (Instantáneo), según las normas sean IEC, ANSI/IEEE o TIPO CO, seleccionando el tipo constructivo ya sean: Electromecánico, estático, digital y numérico. [9]

Para la curva de la capacidad térmica de los cables, cumple los requerimientos de la norma IEEE 242-1986 ("Buff Book), para conductores ACSR, ACAR, AAAC, Cobre desnudo y otros, considerando el tipo de aislamiento y el tipo de material. [5]

Todos estos elementos descritos, se van a una hoja logarítmica como se ve en la figura 02.

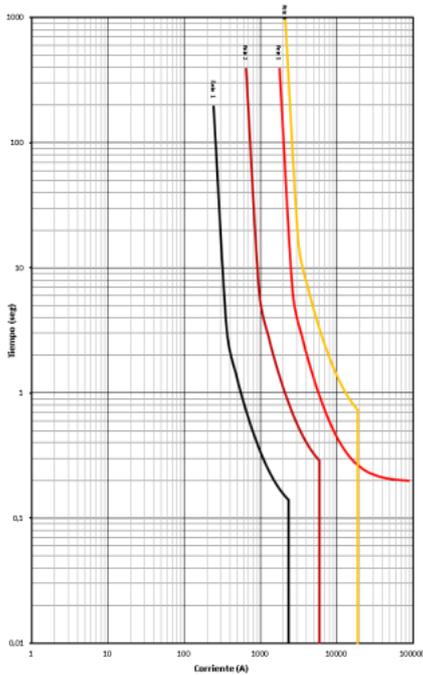


Figura 02: Hoja de cálculo, zona de grafica logarítmica.

III. CASOS DE ESTUDIO

A. Corriente de Cortocircuitos

Para la validación del procedimiento general para el cálculo de fallos en sistemas de Distribución en medio voltaje, se tomó los datos de "IEEE 13 Node Test Feeder" [10], que se observa en la figura 03.

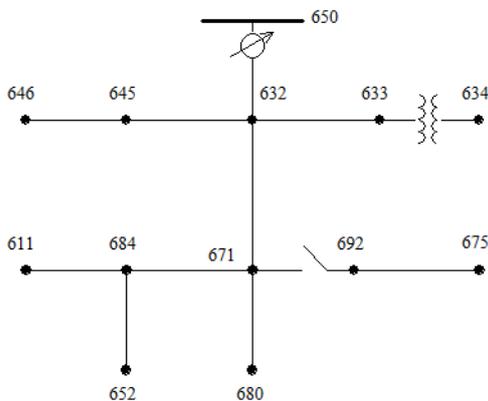


Figura 03: IEEE 13 Node Test Feeder

El cálculo de las corrientes de cortocircuito, en los nodos de las líneas aéreas se ve en la tabla 01.

Tabla 01: Corrientes de cortocircuito en la hoja de cálculo.

Nodo	CALCULADO			
	LLL(A)	LLT(A)	LL(A)	LT(A)
S650	174397,01	174393,17	151032,24	174397,01
N632	9667,82	8668,86	8372,58	5689,54
N633	7185,86	6375,78	6223,14	4355,86
N646	5429,23	4737,20	4701,85	3489,79
N684	4353,93	3865,40	3770,61	2589,67
N680	3998,25	3578,54	3462,59	2320,54

Las mismas que se va a comparar con datos proporcionados por el programa CYMDIST de la empresa Cooper que se encuentran en la tabla 02.

Tabla 02: Corrientes de cortocircuito en el programa CYMDIST

Nodo	CYMDIST			
	LLL(A)	LLT(A)	LL(A)	LT(A)
S650	172156	172153	149092	172147
N632	9579	8590	8296	5628
N633	7118	6394	6164	4309
N646	5378	4959	4658	3453
N684	4316	3861	3737	2560
N680	3963	3547	3432	2294

B. Coordinación de protecciones eléctricas en medio voltaje.

Para demostrar la veracidad del correcto diseño y la adecuada implementación, se realizó una serie de coordinaciones entre diferentes dispositivos de protección, aplicando los criterios de coordinación [7], tomando el tiempo de intersección de dichos dispositivos, con la corriente de falla que debe despejar, y comparando los resultados que se obtiene para estas mismas coordinaciones en el programa CYMTCC.

Para una coordinación entre fusibles del diagrama unifilar que se muestra la figura 04, la coordinación que se pueden realizar entre un fusible tipo T y un fusibles tipo K para una corriente de 1500 A.

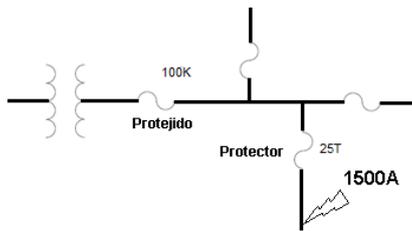


Figura 04 Diagrama unifilar para coordinación entre fusibles

Los fusibles usados son de la marca LUFSSHER y los tiempos obtenidos en el software comercial se observan en la tabla 03.

Tabla 03 Porcentaje de error en una coordinación fusible-fusible

Dispositivo	CYMTCC (Seg)	Hoja de cálculo (Seg)	% error
2-FUSE TIPO 25T (máx.)	0,0483	0,048	0,62
1-FUSE TIPO 100K(min)	0,1029	0,105	2,04

Para la coordinación reconectador-fusible en lado de la carga con un reconectador D, DV de la marca COOPER; con una bobina de puesta de trabajo de 100 A y un fusible 30T de la marca LUFSSHER.

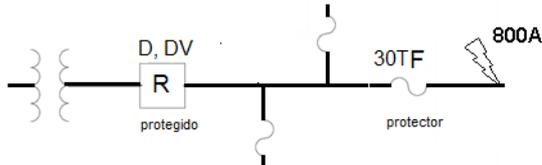


Figura 05 Reconectador monofásico tipo D, DV y un fusible 30T en lado de la carga

A la curva rápida del reconectador se lo multiplico por un factor K de 1,25 [4], y los datos obtenidos para la comparación se muestra en la tabla 3.20.

Tabla 04 Porcentaje de error para una coordinación reconectador-fusible en lado de la carga

Dispositivo	CYMTCC (Seg)	Hoja de cálculo (Seg)	% error
1-RECLOSER D,DV (Fast)	0,0516	0,0515	0,19
1-RECLOSER D,DV (Fast Coord)	0,0645	0,06473	- 0,36
2-FUSE TIPO T(min)	0,1029	0,105	-2,04

Para la coordinación reconectador-fusible en lado de la fuente de la figura 06, es un reconectador W, con una bobina de puesta de trabajo de 140 A.

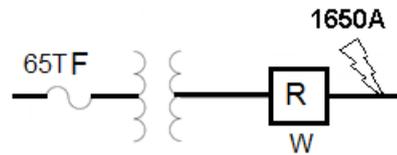


Figura 06 Diagrama unifilar para el estudio de coordinación entre un fusible de expulsión en el primario y un restaurador en el secundario.

A la curva rápida del reconectador se la multiplico por un factor K de 1.70 [7], los tiempos de intersección entre el reconectador y la corriente de falla de 1650 A, se muestra en la tabla 05.

Tabla 05 Porcentaje de error para una coordinación reconectador-fusible en lado de la fuente

Dispositivo	CYMTCC (Seg)	Hoja de cálculo (Seg)	% error
2-RECLOSER W (Phase Slow)	0,5191	0,5	3,68
2-RECLOSER W (Phase Slow Coord)	0,8824	0,85	3,67

En una coordinación fusible – transformador, de la figura 07, se encuentra un transformador de 500kVA con 4% de impedancia con un voltaje de 13,8 kV en el lado de alta y un fusible 25T de la marca LUFSSHER, para una corriente de cortocircuito del transformador de 522 A, los datos de tiempo de la curva de Inrush del transformador y de los fusibles se muestra en la tabla 06.

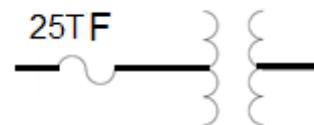


Figura 07 Diagrama unifilar para el estudio de protección de un transformador.

Tabla 06 Porcentaje de error para una coordinación fusible-transformador

Dispositivo	CYMTCC (Seg)	Hoja de cálculo (Seg)	% error
2-FUSE TIPO T (min)	0,1413	0,145	-2,62
2-FUSE TIPO T (max)	0,2894	0,29	-0,21
1-TRANSFORMER (Damage)	2,0074	2,00	0,37

De la figura 08, en un relé de sobrecorriente de la norma IEC LT, tiene una relación de TC's de 300 a 5, con un TAP del temporizado de 5 y un TIME DIAL de 0,05 [11].

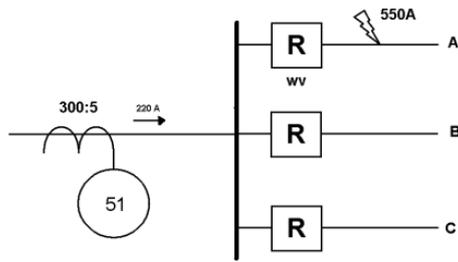


Figura 08 Diagrama unifilar relé de sobrecorriente-reconectador

El reconectador es de tipo WV, con una bobina de puesta de trabajo de 100 A.

Para una corriente de falla de 550 A aguas abajo del reconectador se tiene los resultados de tiempo como se muestra la tabla 07.

Tabla 07 Porcentaje de error para una coordinación relé de sobrecorriente-reconectador.

Dispositivo	CYMTCC (Seg)	Hoja de cálculo (Seg)	% error
2-RECLOSER WV (Phase Fast)	0,0623	0,06	3,69
2-RECLOSER WV (Phase Slow)	1,3416	1,34	0,12
1-RELAY IEC LT	7,2065	7,2	0,09

La coordinación entre relés de sobrecorriente, para la figura 09, tiene 4 relés de sobrecorriente VERY INVERSE de la norma ANSI/IEEE, con los datos del resumen de la tabla 08 [12].

Tabla 08 Resumen de los ajustes de los relés de sobrecorriente

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

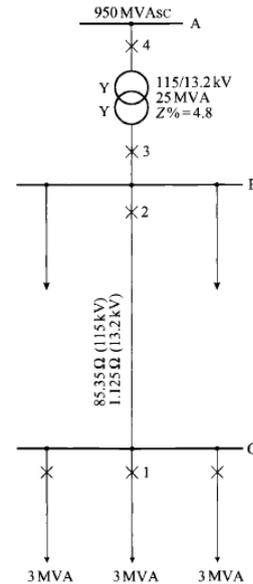


Figura 09 Diagrama esquemático de coordinación entre relés de sobrecorriente.

Con las corrientes de la unidad instantánea de cada relé y según el TAP calculado, se construye la tabla 09, calculando el porcentaje de error entre los tiempos de intersección entre la corriente de falla en cada punto y el relé de sobrecorriente instalado.

Tabla 09 Porcentaje de error para una coordinación entre relés de sobrecorriente.

Dispositivo	Corriente (A)	Cymtcc (Seg)	Hoja de cálculo (Seg)	% error
1.RELÉ ANSI/IEEE VI	2340	0,1399	0,14	-0,07
2.RELÉ ANSI/IEEE VI		0,8318	0,835	-0,38
2.RELÉ ANSI/IEEE VI	5920	0,2895	0,289	0,17
3.RELÉ ANSI/IEEE VI		0,958	0,93	2,92
3.RELÉ ANSI/IEEE VI	14714,8	0,3107	0,31	0,23
4.RELÉ ANSI/IEEE VI		0,8957	0,89	0,64
3.RELÉ ANSI/IEEE VI	18818,2	0,2657	0,26	2,15
4.RELÉ ANSI/IEEE VI		0,7368	0,736	0,11

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al realizar la comparación entre las corrientes de cortocircuito obtenidas y calculando el porcentaje de error, se obtuvo un error mínimo de menos 0,11%, como máximo de 4,47% y un valor promedio total de menos 0,72% en los nodos seleccionados como nuestra la tabla 09.

Tabla 09 Porcentaje de error la validación de las corrientes de cortocircuito

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

Con los errores obtenidos en la tabla 08, se concluye que la hoja de cálculo de cortocircuitos en un sistema de distribución es una herramienta que se puede utilizar en otro tipo de circuito eléctrico en medio voltaje.

De la validación de la coordinación de protecciones eléctricas entre el tiempo de intersección de la corriente y los dispositivos de protección, los porcentajes de error máximo y mínimo entre la hoja de cálculo de coordinación de protecciones y el software CYMTCC, se muestran en la tabla 10.

Tabla 10 Porcentaje de error la validación de coordinación de protecciones eléctricas.

Tipo de coordinación	%	%	Promedio
	Error máximo	Error mínimo	
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

Con el porcentaje de error promedio total de 1,39%, los valores máximos y mínimos son menores al 5%, la hoja de cálculo para coordinación de protecciones eléctrica en medio voltaje es una herramienta validada donde se puede hacer estudios de protecciones eléctricas en medio voltaje.

V. CONCLUSIONES

- Al implementar el circuito de la "IEEE 13 Node Test Feeder", en la hoja de cálculo de corrientes de cortocircuito y en el software CYMDIST, el porcentaje de error entre las corrientes de falla es: error mínimo -0,11% y máximo 4,47%, con lo que se concluye que el diseño y la implementación de la hoja de cálculo puede usarla para otro tipo de configuraciones de alimentadores radiales.
- Para 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.
- 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 un error máximo de 4,95% y un error mínimo de 0,09%, lo que lleva a la conclusión que el modelado de equipos de protección eléctrica en distribución como la curva de daño térmico e Inrush de los transformadores, capacidad térmica de los conductores, fusibles, reconectadores y relé de sobrecorriente son confiables.

VI. REFERENCIAS

- [1] Samuel Ramírez Castaño, *Protección de Sistemas Eléctricos*, Primera Edición. ed., Universidad Nacional de Colombia Manizales, Ed. Manizales, Colombia.
- [2] Orlys Ernesto Torres Breffe, *Protecciones Eléctricas de las Redes de Distribución*.
- [3] William H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*. New Mexico, United States: CRC Press, 2001.
- [4] CYME 5.04, *Análisis básicos de CYMDIST - Guía del Usuario*.
- [5] American National Standards Institute, *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial PowerSystems*. United

States, 2001.

- [6] CYMTCC. Transformador. Manual.
- [7] Systems, COOPER Power, *Electrical Distribution System Protection*. United States, 2005.
- [8] ABB. PCD2000 Power Control Device IB38-737-3. Manual.
- [9] "SOFTWARE MODEL FOR INVERSE TIME OVERCURRENT RELAYS INCORPORATING IEC AND IEEE STANDARD CURVES," in *Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering*, Canada, 2002, pp. 37-41.
- [10] William H Kersting, "Radial Distribution Test Feeders," , 2000, pp. 908-912.
- [11] Corporación "CENACE", Protección de sistemas eléctricos de potencia y automatismos , 2001..
- [12] Juan Gers, *Protection of Electricity Distribution Networks*, segunda ed., The Institution of Electrical Engineers, Ed. London, United Kingdom, 2004.



medio voltaje.

Jorge Lara Ingeniero en electromecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", Áreas de interés, Sistemas eléctricos de distribución, protecciones eléctricas, Planificación de sistemas eléctricos en