

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Carrera de Electricidad

DETERMINACIÓN DE LOS kVA-m. EN EL CÁLCULO DE CAÍDAS DE VOLTAJE EN REDES SECUNDARIAS DE DISTRIBUCIÓN SOTERRADAS PARA EL CONDUCTOR DE ALUMINIO TTU AISLADO DE LA EMPRESA ELÉCTRICA EMELNORTE.

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico.

Autor:

Tarquino Enríquez De La Torre

Director:

Ing. Segundo Hernán Pérez Cruz MSc.

Asesor:

Ing. Ramiro Mauricio Vásquez Villaruel MSc.

Ibarra, 2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004301972		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Enríquez De La Torre Tarquino		
DIRECCIÓN:	La Esperanza – San Roque – Antonio Ante		
EMAIL:	tenriquezd@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	06900266	TELÉFONO MÓVIL:	0967065476

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DETERMINACIÓN DE LOS kVA – m. EN EL CÁLCULO DE CAÍDAS DE VOLTAJE EN REDES SECUNDARIAS DE DISTRIBUCIÓN SOTERRADAS PARA EL CONDUCTOR DE ALUMINIO TTU AISLADO DE LA EMPRESA ELÉCTRICA EMELNORTE.
AUTOR (ES):	Enríquez De La Torre Tarquino
FECHA: DD/MM/AAAA	10/05/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Segundo Hernán Pérez Cruz MSc

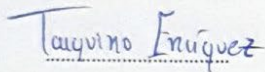
2. CONSTANCIAS

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los diez días del mes de mayo de 2023

EL AUTOR:

A handwritten signature in blue ink that reads "Tarquino Enríquez". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal dotted line.

Tarquino Enríquez

ACEPTACION DEL DIRECTOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO

Ing. Segundo Hernán Pérez Cruz MSc.

Certifico que después de haber examinado el trabajo de investigación desarrollado por el señor: Enríquez de la Torre Tarquino, el estudiante ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo titulado "DETERMINACIÓN DE LOS kVA – m. EN EL CÁLCULO DE CAÍDAS DE VOLTAJE EN REDES SECUNDARIAS DE DISTRIBUCIÓN SOTERRADAS PARA EL CONDUCTOR DE ALUMINIO TTU AISLADO DE LA EMPRESA ELÉCTRICA EMELNORTE", para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobando su impresión y empastado.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "S. H. P. C. MSc.", is written over a diagonal line.

Ing. Segundo Hernán Pérez Cruz MSc.
Director del trabajo de grado.

Dedicatoria

Con la culminación y aprobación del presente documento, se ha logrado alcanzar un objetivo notable dentro de mi vida personal, por ello, es importante reconocer el esfuerzo de las personas que siempre me brindaron su apoyo y aliento en todo momento, personas con quienes hemos afrontado situaciones adversas y hemos logrado superar cada uno de esos difíciles momentos; el presente trabajo está dedicado a cada persona que conforma mi apacible hogar, a mi madre, a mi padre, hermanos, hermanas y a mi risueño sobrino. Espero estén presentes en cumplimiento de muchos de mis proyectos y objetivos futuros, a lo largo de mi modesta vida.

“La vida debe fundamentarse en la búsqueda de la inmaculada verdad, lo demás se adiciona de manera espontánea”.

Tarquino Enríquez

Agradecimientos

Agradezco todos los esfuerzos realizados al Ing. Segundo Hernán Pérez Cruz MSc., docente de la Carrera de Electricidad, quien también fue mi tutor designado, por estar pendiente en cada etapa de desarrollo del presente trabajo de grado, ya que, gracias al apoyo brindado se ha realizado con éxito la finalización del documento. Espero que, cada uno de sus valiosos aportes como persona, se vean reflejados en su vida, en forma de prosperidad y abundancia, para su persona y sus seres queridos.

La formación de un ciudadano competente, hábil en su campo de estudio y que sea de provecho para la sociedad, en parte depende de la calidad de cada uno de los docentes de una institución académica, por lo que, es pertinente extender un agradecimiento a cada uno de los docentes que conforman la Carrera de Electricidad de la Universidad Técnica del Norte, por ser el destello que guía a las mentes futuras, mediante cada una de sus lecciones impartidas en clase con el objetivo de formar profesionales de excelencia.

Índice de contenido

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	I
2. CONSTANCIAS.....	II
ACEPTACION DEL DIRECTOR	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Índice de contenido.....	VI
Índice de figuras.....	X
Índice de tablas.....	XIII
Resumen.....	XV
Abstract.....	XVI
A1. Introducción.....	XVII
A2. Planteamiento del problema.....	XVIII
A3. Formulación del problema	XVIII
A4. Justificación.....	XIX
A5. Alcance	XX
A6. Objetivo General.....	XXI
A7. Objetivos Especificos	XXI
Capítulo 1.....	1
Sistemas eléctricos de distribución secundarios y su construcción subterránea.....	1
1.1. Redes eléctricas de distribución en bajo voltaje y su modelo teórico	1
1.1.1. Consideraciones en el modelo del sistema de distribución subterránea de bajo voltaje.....	2
1.1.2. Estructuras típicas de las redes eléctricas de distribución subterránea en bajo voltaje	3
1.1.3. Nivel de voltaje característico en redes de distribución subterráneas de bajo voltaje	5
1.1.4. La caída de voltaje permisible en redes eléctricas de distribución secundarias definida por la empresa eléctrica EMELNORTE	6

1.1.5.	Conceptos breves, útiles para el desarrollo de la metodología de determinación de caídas de voltaje en redes radiales secundarias.....	6
1.2.	El cable de aluminio TTU aislado en redes eléctricas soterradas de distribución de bajo voltaje	7
1.2.1.	Características del cable de aluminio TTU para redes de distribución subterránea de bajo voltaje	8
1.2.2.	Aislamiento del cable de aluminio TTU	9
1.2.3.	Material que constituye el aislamiento interno y la chaqueta del cable eléctrico	10
1.3.	Construcción de redes subterráneas de distribución eléctrica de bajo voltaje	12
1.3.1.	Canalización de los cables eléctricos de distribución de bajo voltaje	13
1.3.2.	Construcción de redes de distribución secundarias que discurren en bancos de ductos	13
1.3.3.	Construcción de redes eléctricas de distribución secundarias directamente enterradas.....	15
Capítulo 2.....		19
El momento eléctrico del cable de aluminio TTU aislado para redes de distribución soterradas de bajo voltaje.....		19
2.1.	Descripción rápida del área de concesión de EMELNORTE	19
2.2.	Metodología	19
2.3.	Ecuaciones características del cable de aluminio TTU aislado para cuantificar su impedancia	21
2.3.1.	La resistencia eléctrica del cable subterráneo en sistemas de distribución secundarias de bajo voltaje.....	21
2.3.2.	Temperatura de operación y el efecto sobre la resistencia del cable eléctrico..	23
2.3.3.	Observaciones sobre la resistencia eléctrica en corriente alterna	24
2.3.4.	La inductancia y reactancia inductiva del cable eléctrico	26
2.4.	Momento eléctrico del cable de aluminio TTU para redes eléctricas de distribución subterráneas de bajo voltaje.....	33
2.4.1.	La regulación de voltaje y el momento eléctrico del cable de distribución secundario de bajo voltaje.....	37

2.4.2.	El momento eléctrico en diferentes configuraciones de circuitos de distribución secundarios	38
2.5.	El programa de simulación de redes eléctricas de distribución CYME	45
2.5.1.	Modelado y análisis de redes de distribución de bajo voltaje.....	45
2.5.2.	Dimensionamiento de cables de bajo voltaje.....	48
Capítulo 3.....		50
El software CYME y el método aproximado para el cálculo de caídas de voltaje en redes eléctricas de distribución subterráneas de bajo voltaje		50
3.1.	Metodología para la determinación de las caídas de voltaje, vigente en la empresa eléctrica EMELNORTE	50
3.1.1.	Caídas de voltaje mediante el método del modelo serie en el cual es conocido el consumo de los usuarios	51
3.1.2.	Caída de voltaje mediante el método del modelo serie propuesto por EMELNORTE, en el cual se considera la zonificación de estratos.....	58
3.2.	Simulación de las caídas de voltaje en redes eléctricas subterráneas de bajo voltaje con CYME.....	61
3.2.1.	Modelamiento en el programa CYME de las dos redes de prueba aplicada en los estudios eléctricos de EMELNORTE	62
3.2.2.	Modelamiento en el programa CYME de varias redes eléctricas subterráneas de distribución de bajo voltaje.....	63
3.3.	Comparación de las caídas de voltaje obtenidas mediante el uso de los kVA-m. del cable de aluminio TTU y la simulación realizada en el software CYME.....	65
3.3.1.	El error entre los voltajes al final del tramo con mayor caída de voltaje, obtenidos mediante la simulación y la metodología aplicada en EMELNORTE, conocido el consumo de los usuarios.....	66
3.3.2.	El error entre los voltajes al final del tramo con mayor caída de voltaje obtenidos mediante la simulación y la metodología aplicada en EMELNORTE, en el cual se considera la zonificación de estratos	67
3.3.3.	Observaciones sobre la precisión entre los valores calculados y simulados.....	74
Conclusiones.....		78
Recomendaciones		78
Referencias		79

Anexo A: Datos iniciales para calcular los kVA-m. del cable de aluminio TTU.....	83
Anexo B: Valores de los kVA-m. del cable de aluminio TTU por configuración (monofásico y trifásico) y por arreglo.	84
Anexo C: Demanda máxima diversificada (sin tener en cuenta el aporte de las cocinas de inducción).....	92
Anexo D: Capturas de las hojas de cálculo de Excel de los diferentes circuitos usados en el presente trabajo.	93
Anexo E: Breve tutorial acerca de la simulación de caídas de voltaje en el software CYME.	98
Anexo F: Ecuaciones de ajuste del cable de aluminio TTU aislado (como evidencia).....	107
Anexo G: Porcentajes obtenidos por simulación y la hoja de trabajo en Excel (el método aproximado), por estrato (completo).	108
Anexo H: Caídas de voltaje entre la simulación y la hoja de trabajo en Excel (el método aproximado), en una longitud de 500 metros a carga constante (complementario).....	111

Índice de figuras

Figura 1. Esquema general del transporte de energía eléctrica.....	2
Figura 2. Principales estructuras de construcción de redes eléctricas de distribución.....	4
Figura 3. Red radial subterránea sin amarres.....	4
Figura 4. El cable de aluminio TTU (Aislamiento Termoplástico (o termoestable), chaqueta Termoplástica Subterránea del inglés (TTU).	9
Figura 5. Polímeros más usados en la fabricación de aislamientos de cables eléctricos.	10
Figura 6. Consideraciones en la construcción de bancos de ductos.	14
Figura 7. Vista de la construcción final de un banco de ductos 2x2.....	14
Figura 8. Consideraciones en la construcción de pozos de revisión.	15
Figura 9. Vista de la construcción final de un pozo de revisión.....	15
Figura 10. Muestra de la cinta para señalar la existencia de cables eléctricos.....	17
Figura 11. Construcción final de un circuito de distribución directamente enterrado.	17
Figura 12. Diagrama de bloques en el cual se visualiza la metodología aplicada en el cómputo de caídas de voltaje en redes secundarias de distribución.	20
Figura 13. Variación de la resistencia con la temperatura.....	24
Figura 14. a) Área efectiva en CD; b) Área efectiva a 60 Hz y c) Área efectiva a 1k Hz.....	25
Figura 15. Visualización del efecto de proximidad entre conductores eléctricos.....	26
Figura 16. Voltaje inducido creado por un campo magnético cambiante.....	28
Figura 17. Conductor cilíndrico recto de prueba.....	29
Figura 18. Campo magnético interno y externo debido al flujo de la corriente en el conductor.	30
Figura 19. Disposición horizontal de cables eléctricos.	32
Figura 20. Agrupación de cables eléctricos.	32
Figura 21. Trazos para obtener el RMG de un conductor de 7 hilos.	32
Figura 22. Factores k para cables formado por varios hilos.....	33
Figura 23. Modelo de una línea corta que transporta energía eléctrica.....	34
Figura 24. Diagrama vectorial que describe la caída de voltaje en el modelo de línea corta.	34
Figura 25. Parte del diagrama vectorial que determina la caída de voltaje en los extremos del cable de distribución.	35
Figura 26. Modelo que describe la regulación de voltaje en el cable de distribución.....	37
Figura 27. Modelo de un circuito monofásico de distribución en bajo voltaje.....	39
Figura 28, Circuito monofásico equivalente al circuito monofásico a dos hilos.	40
Figura 29. Modelo de un circuito monofásico de dos niveles de voltaje de distribución secundaria.....	41

Figura 30. Circuito monofásico equivalente al circuito monofásico a tres hilos.....	42
Figura 31. Modelo de un circuito trifásico de distribución en bajo voltaje.....	43
Figura 32. Circuito monofásico equivalente al circuito trifásico a cuatro hilos.....	44
Figura 33. Logotipo del programa de análisis de redes eléctricas (CYME).....	45
Figura 34. Sistema monofásico a tres hilos en el software CYME.....	47
Figura 35. Modelo de distribución en bajo voltaje.....	48
Figura 36. Modulo para la configuración de cables eléctricos.....	49
Figura 37. Red de prueba en el cual se conoce el consumo por cada usuario.....	51
Figura 38. Encabezado de la hoja de cálculo en el programa Excel.....	54
Figura 39. Rama de la red de distribución secundaria de prueba.....	54
Figura 40. Columna de "Datos" de la hoja de cálculo de Excel.....	55
Figura 41. Columna de "Carga/Usuario" y "Luminarias" de la hoja de cálculo de Excel.....	55
Figura 42. Columna de "Circuito" de la hoja de cálculo de Excel.....	56
Figura 43. Columna de "Conductor" de la hoja de cálculo del programa de Excel.....	56
Figura 44. Columna de "Computo" de la hoja de cálculo del programa Excel.....	57
Figura 45. Tabla de cálculo de la caída de voltaje completa en el programa de Excel.....	57
Figura 46. Circuito de prueba en el cual se considera la zonificación de estratos.....	58
Figura 47. Rama parcial del circuito de prueba de la red secundaria de distribución secundaria.....	60
Figura 48. Columnas de "Datos" y "Carga/Usuario" de la hoja de cálculo en el programa de Excel.....	61
Figura 49. Circuito de prueba en el cual se considera la zonificación de estratos.....	61
Figura 50. Circuito de prueba el cual se conoce el consumo de los usuarios.....	62
Figura 51. Resultado de la construcción del circuito para la simulación en el programa CYME.....	62
Figura 52. Circuito adicional 1, para su modelamiento y posterior cálculo de las caídas de voltaje.....	63
Figura 53. Circuito adicional 1, modelado en el programa CYME.....	63
Figura 54. Circuito adicional 2, para su modelamiento y posterior cálculo de las caídas de voltaje.....	64
Figura 55. Circuito adicional 2, modelado en el programa CYME.....	64
Figura 56. Circuito adicional 3, para su modelamiento y posterior cálculo de las caídas de voltaje.....	65
Figura 57. Circuito adicional 3, modelado en el programa CYME.....	65
Figura 58. Caída de voltaje trifásico a carga constante.....	74
Figura 59. Caída de voltaje trifásico a carga constante.....	75
Figura 60. Caída de voltaje trifásico a carga constante.....	75

Figura 61. Caída de voltaje monofásico a carga constante.....	76
Figura 62. Caída de voltaje monofásico a carga constante.....	76
Figura 63. Caída de voltaje monofásico a carga constante.....	77
Figura 64. Configuración inicial de CYME para análisis de redes eléctricas de bajo voltaje.	98
Figura 65. Configuración de la “Red” eléctrica en CYME.....	99
Figura 66. Configuración de la “Fuente” eléctrica en CYME.....	99
Figura 67. Configuración del “Equivalente” de la red eléctrica en CYME.....	100
Figura 68. Configuración del “Equipo” de la red eléctrica en CYME.....	100
Figura 69. Configuración del cable en la pestaña "General".....	101
Figura 70. Configuración de la “Construcción del cable”.....	102
Figura 71. Configuración del cable eléctrico TTU.....	102
Figura 72. Construcción de la red eléctrica en CYME.....	103
Figura 73. Configuración del tipo de red y características de instalación.....	104
Figura 74. Configuración de la carga conectada a la red eléctrica.....	104
Figura 75. Ubicación de datos característicos de la carga.....	105
Figura 76. Trabajo finalizado del modelamiento de la red eléctrica en CYME.....	105
Figura 77. Porcentajes y valores de las caídas de voltaje en el circuito de prueba en el software CYME.....	106

Índice de tablas

Tabla 1. Niveles de voltaje definidos por el ARCERNNR.....	5
Tabla 2: Clasificación de las diferentes aleaciones de aluminio.	8
Tabla 3. Aislamiento del cable de aluminio TTU.....	11
Tabla 4. Requerimientos para el conductor de aleación de aluminio serie 8000.....	12
Tabla 5. Valores de incremento por uso de cocinas de inducción.	52
Tabla 6: Potencias de demanda por número de referencia.....	53
Tabla 7: Estratos de consumo por categoría de pertenencia.	59
Tabla 8. Tabla de comparación de los valores obtenidos por simulación y calculados mediante el método aproximado, circuito con consumos conocidos.	66
Tabla 9. Errores entre la simulación y el método aproximado, circuito con consumos conocidos (Trifásico).....	66
Tabla 10. Errores entre la simulación y el método aproximado, circuito con consumos conocidos (Monofásico).....	67
Tabla 11. Tabla de comparación de los valores obtenidos por simulación y calculados mediante el método aproximado, circuito por zonificación de estratos (Trifásico).	67
Tabla 12. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos circuito por zonificación de estratos, (Trifásico).	68
Tabla 13. Tabla de comparación de los valores obtenidos por simulación y calculados mediante el método aproximado, circuito por zonificación de estratos (Monofásico).....	68
Tabla 14. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos circuito por zonificación de estratos, (Monofásico).	69
Tabla 15. Tabla de comparación de los valores obtenidos por simulación y calculados mediante el método aproximado, circuitos adicionales 1, 2 y 3 (Trifásico).....	69
Tabla 16. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos, circuito adicional 1 por zonificación de estratos, (Trifásico).....	70
Tabla 17. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos, circuito adicional 2 por zonificación de estratos, (Trifásico).....	70
Tabla 18. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos, circuito adicional 3 por zonificación de estratos, (Trifásico).....	71
Tabla 19. Tabla de comparación de los valores obtenidos por simulación y calculados mediante el método aproximado, circuitos adicionales 1, 2 y 3 (Monofásico).....	71
Tabla 20. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos, circuito adicional 1 por zonificación de estratos, (Monofásico).....	72
Tabla 21. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos, circuito adicional 2 por zonificación de estratos, (Monofásico).....	72

Tabla 22. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos, circuito adicional 3 por zonificación de estratos, (Monofásico).....	73
Tabla 23. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato A (Trifásico).	108
Tabla 24. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato A (Monofásico)....	108
Tabla 25. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato B (Trifásico).	108
Tabla 26. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato B (Monofásico)....	109
Tabla 27. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato C (Trifásico).	109
Tabla 28. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato C (Monofásico). ...	109
Tabla 29. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato D (Trifásico).	110
Tabla 30. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato D (Monofásico). ...	110
Tabla 31. Errores entre la simulación y la el método aproximado, estrato E (Trifásico).....	110
Tabla 32. Errores entre la simulación y la el método aproximado, estrato E (Monofásico).	111

Resumen

Las empresas que administran el suministro de la energía eléctrica, al momento de realizar o aceptar un proyecto de una nueva electrificación o repotenciación, requieren de documentos en los cuales se halle información fiable y verificable acerca de los cálculos eléctricos necesarios para garantizar la calidad del servicio eléctrico. Un parámetro de relevancia y que consta en las metodologías propuestas por EMELNORTE, es la caída de voltaje máxima admisible en los conductores eléctricos, para calcular las caídas de voltaje de acuerdo con el computo propuesto por la empresa es imperante conocer los kVA-m. tanto de los tramos entre los segmentos que describen las cargas de demanda que se concentran en los postes de hormigón o los pozos de revisión y los kVA-m. del cable eléctrico a usarse en el proyecto eléctrico. Los valores de los kVA-m. de diferentes cables disponibles en el mercado se encuentran en su mayoría ya calculados, sin embargo, el cable de aluminio tipo TTU asilado es uno de los cuales aún no se conocen sus cantidades de kVA-m., este valor es importante para ejecutar proyectos eléctricos en ambientes subterráneos o aéreos, por ello se ha propuesto determinar el cálculo de este valor. Para hallar los kVA-m. del cable eléctrico en cualquiera de sus calibres se ha desarrollado la ecuación del momento eléctrico en base al modelo serie de las líneas de transmisión que es equivalente al modelo de las redes eléctricas de distribución subterráneas o aéreas de bajo voltaje. Para validar los kVA-m. calculados, se emplea esta cantidad en el cómputo de caídas de voltaje por tramo y acumulado de varios circuitos eléctricos secundarios y se comparan con las caídas de voltaje simuladas en el software CYME. Al determinar los valores de las caídas de voltaje en el software y con la metodología empleada en EMELNORTE, la exactitud entre ambos métodos es aceptable ya que los errores no superan el valor de 1 voltio en longitudes no mayores a 500 metros con carga media – alta en redes trifásicas y monofásicas en cualquier estrato que cuentan con el calibre # 1/0 en su presentación monopolar, el cual es recomendable para proyectos eléctricos. Por ello se asevera que los kVA-m. calculados tienen una buena exactitud.

Palabras claves: Subterráneo, CYME, distribución, momento eléctrico, caídas de voltaje.

Abstract

When carrying out or accepting a new electrification or repowering project, the companies that manage the electricity supply require documents containing reliable and verifiable information on the electrical calculations necessary to guarantee the quality of the electricity service. A relevant parameter that is included in the methodologies proposed by EMELNORTE is the maximum admissible voltage drop in the electrical conductors, to calculate the voltage drops according to the calculation proposed by the company, it is imperative to know the kVA-m. of the sections between the segments describing the demand loads concentrated on the concrete poles and the kVA-m. of the electrical cable to be used in the electrical project. The kVA-m. values of different cables available on the market are mostly already calculated, however, the insulated TTU type aluminum cable is one of the cables whose kVA-m. values are not yet known, this value is important for the execution of electrical projects in underground or overhead environments, therefore it has been proposed to determine the calculation of this value. To find the electric moment equation of the power cable in any of its gauges has been developed based on the series model of transmission lines, which is equivalent to the model of underground or overhead low-voltage distribution networks. To validate the calculated kVA-m., this quantity is used in the computation of voltage drops per span and cumulative voltage drops of several secondary electrical circuits and compared with the voltage drops simulated in the CYME software. When determining the values of voltage drops in the software and with the methodology used in EMELNORTE, the accuracy between both methods is acceptable since the errors do not exceed approximately the value of 1 volt in lengths not greater than 500 meters with medium-high load in three-phase and single-phase networks in any stratum that has the # 1/0 gauge in its single-pole presentation, which is recommended for electrical projects. Therefore, the calculated kVA-m. are said to have good accuracy.

Key words: Underground, CYME, distribution, electric moment, voltage drops.

A1. Introducción

La ciencia ha desarrollado importantes avances en la elaboración de materiales eléctricos, esto con el objetivo de mejorar el transporte de energía en los sistemas eléctricos, por lo cual las empresas que administran el servicio de energía eléctrica realizan esfuerzos para optimizar la técnica y el aspecto económico, para proveer la energía eléctrica hacia la ciudadanía. Se han desarrollado varias mejoras en el sistema eléctrico, una de ellas es la implementación de alternativas para la distribución de la energía eléctrica mediante conductores cada vez más sofisticados que tienen propósitos puntuales para alargar la vida útil del conductor y que el coste de implementación, mantenimiento y servicio sean óptimos hacia la empresa y la ciudadanía, por ello conocer acerca del panorama global resulta ser importante para incrementar las opciones de implementación de redes eléctricas de distribución.

En la actualidad, el consumo de energía eléctrica es imprescindible para el funcionamiento de los equipos eléctricos, electrónicos y de iluminación en los diferentes lugares que lo requieren, por lo que las empresas distribuidoras de energía, en un esfuerzo por mejorar el nivel de calidad del servicio están buscando nuevas alternativas para mejorar la confiabilidad del sistema de distribución eléctrica, (Díaz, 2015).

Con respecto al sistema de distribución soterrado en bajo voltaje se conoce lo siguiente:

El uso de redes subterráneas de distribución de electricidad está aumentando en todo el mundo debido a diversas ventajas, como una mayor seguridad para la población, una mayor protección contra los elementos de la naturaleza y beneficios estéticos para la ciudad. Por otro lado, su instalación requiere una mayor inversión inicial y es más difícil acceder a dicha red para su mantenimiento, (Garcez & de Almeida, 2014).

El uso de la distribución subterránea de energía ha crecido significativamente en los últimos años como resultado del aumento de la demanda de energía eléctrica y la amplia expansión de las áreas metropolitanas altamente pobladas, (Chatzipanagiotou, Chatziathanasiou, De Mey, & Więcek, 2017).

Los conductores subterráneos se utilizan principalmente en distancias cortas, en áreas donde las líneas aéreas son inexistentes o imposibles de usar, así como para aplicaciones técnicas específicas. El cableado subterráneo es cada vez más atractivo para su uso principalmente por razones ambientales y estéticas, (Ochoa et al., 2018).

El desarrollo del presente trabajo de grado tiene el fin de usarse para la implementación del cable de aluminio TTU aislado para proyectos eléctricos en redes de distribución soterrados en bajo voltaje para que EMELNORTE adicione una alternativa más para la distribución de electricidad en bajo voltaje, ya que una de las partes más esenciales de una red de distribución de energía eléctrica son los conductores que transportan la electricidad hacia los hogares de los abonados.

A2. Planteamiento del problema

Para la selección del conductor eléctrico es necesario realizar el cálculo de la sección transversal de los cables en las líneas o redes de bajo voltaje en corriente alterna, este proceso consiste en determinar el calibre del conductor que tome en cuenta el calentamiento del conductor, su caída de voltaje, el efecto pelicular (efecto piel) y la proximidad entre conductores, por lo que se deben tomar estas consideraciones para evitar una mala elección del cable y garantizar la calidad de la energía eléctrica.

El calibre del conductor; en parte, depende de la caída de voltaje admisible en la línea; en el Ecuador la Agencia de Control y Regulación de Energía y Recursos Naturales no Renovables ARCERNNR, establece los rangos de voltaje admisibles en los diferentes niveles de voltaje que deben cumplir las empresas eléctricas de distribución.

En los últimos años, se han incluido en la construcción de proyectos eléctricos subterráneos, el uso del conductor de aluminio TTU aislado, por lo que se requiere, como parte de la metodología de cálculo de la caída de voltaje de este tipo de conductores, determinar los kVA-m. de este tipo de conductores dependiendo de las diferentes configuraciones de construcción de redes en bajo voltaje.

A3. Formulación del problema

¿Cuáles son los parámetros que influyen en la determinación de los kVA-m., en el cálculo de caídas de voltaje en redes secundarias de distribución soterradas para el conductor de aluminio TTU aislado dispuesto por EMELNORTE?

A4. Justificación

EMELNORTE, es una empresa que brinda el servicio público de energía eléctrica a la población dentro de su área de concesión, que comprende: los cantones de Pedro Moncayo y Cayambe en la provincia de Pichincha, las provincias de Imbabura y Carchi, cantón Sucumbíos en la provincia del mismo nombre y los sectores de Alto Tambo y Durango en la provincia de Esmeraldas, (Antonio, 2018).

El área de prestación del servicio de la Empresa Eléctrica Regional del Norte S.A. es de 11.862,10 km²; donde el 36 % de esta superficie corresponde a la provincia de Imbabura, el 32 % a la provincia de Carchi, el 20 % a la provincia de Sucumbíos y el 12 % restante a la provincia de Pichincha, (Manzoni, 2019).

EMELNORTE suministra el servicio eléctrico hacia una importante área en el norte del país, por ello la institución es responsable de distribuir la energía eléctrica a cada uno de los sectores en condiciones óptimas atendiendo a los requerimientos necesarios en estas áreas; las zonas que comprenden el dominio de la empresa eléctrica son las ciudades como Ibarra, Otavalo, Cotacachi, entre otras ciudades; que presentan un crecimiento estructural urbano, las redes aéreas de distribución empiezan a presentar inconvenientes como la acumulación de redes eléctricas en los centros de las ciudades que a más de afectar a la estética visual de la ciudad presentan un inminente peligro para la ciudadanía ya que se encuentra a la intemperie con un aparente contacto directo con el entorno civil.

Una alternativa que la empresa eléctrica posee para lograr distribuir la energía eléctrica en bajo voltaje hacia estos sectores, es el sistema soterrado, esto implica transportar la electricidad mediante conductores aislados que se encuentran enterrados bajo tierra, esta alternativa es más costosa de implementar, además de, que presentan dificultades en el momento de realizar el mantenimiento y reparación de fallas, sin embargo, como se menciona en la siguiente investigación, “Los sistemas de distribución subterránea se caracterizan por su alta confiabilidad y generalmente se aplican en grandes áreas urbanas así como también en proyectos domiciliarios” (Filomena, Resener, Salim, & Bretas, 2009); esta premisa resalta el sistema soterrado en zonas urbanas o en conjuntos residenciales.

El sistema soterrado que actualmente se emplea por parte de la empresa eléctrica contienen conductores de cobre aislado y se diseña mediante un método secuencial usando datos de relevancia como los kVA-m. que se encuentran disponibles en un software específico, por otra parte, como se tiene conocimiento el conductor de cobre es más costoso para la ciudadanía, además de, que ocasionalmente suele ser vandalizado para su posterior hurto.

Otra opción que recientemente dispone la empresa eléctrica para transportar la energía eléctrica son los conductores de aluminio TTU aislado que favorablemente reducen varios de los inconvenientes de los conductores de cobre aislado; sin embargo, una parte clave para su dimensionamiento es conocer los kVA-m. que caracterizan a los diferentes calibres del mismo material, esta cantidad es importante para dimensionar las redes de distribución de bajo voltaje, la cual no se encuentra disponible para la empresa eléctrica, por ello es sustancial realizar la determinación de los kVA-m. y con ello adicionar una alternativa más económica con respecto al sistema soterrado que usa conductores de cobre aislado.

A5. Alcance

Por medio de una descripción de los sistemas eléctricos de distribución de bajo voltaje subterráneos, se definen las características y parámetros necesarios para determinar los kVA-m en el cálculo de caídas de voltaje en redes secundarias de distribución soterradas para el conductor de aluminio TTU aislado en los calibres #6 hasta el #4/0.

El modelo matemático del momento eléctrico del cable se basa en la regulación de voltaje en redes de bajo voltaje, el cual involucra parámetros eléctricos como: impedancia de la línea, longitud del conductor, nivel del voltaje, ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente, además de la caracterización de la línea, el circuito de distribución se considera que alimenta una carga concentrada y con todo ello se elabora una ecuación con el propósito de calcular los kVA-m. en diferentes calibres del conductor unipolar de aluminio TTU aislado, en base al tipo de configuración de la red de tipo radial de distribución de bajo voltaje subterráneo.

Para validar los resultados se realizará una comparación de los cálculos de las caídas de voltaje obtenidos por el modelo matemático y la simulación de una red arbitraria de distribución secundaria subterránea en el software CYME.

Las herramientas y datos necesarios para desarrollar la determinación de los kVA-m. en el conductor de aluminio TTU aislado, serán adquiridos por medio del departamento de estudios eléctricos de EMELNORTE, ubicado en la ciudad de Ibarra, ubicado en la siguiente dirección: Juan Manuel Grijalva 654 entre Simón Bolívar y José Joaquín de Olmedo. Los resultados permitirán realizar proyectos eléctricos que requieran la implementación de una red eléctrica soterrada en bajo voltaje.

A6. Objetivo General

Determinar los kVA-m. para el conductor de aluminio TTU aislado en redes secundarias de distribución soterradas, a través de la caracterización del momento eléctrico en diferentes configuraciones de bajo voltaje de tipo radial, para el cálculo de las caídas de voltaje mediante la metodología empleada por EMELNORTE.

A7. Objetivos Específicos

- Describir los parámetros que caracterizan al modelo del sistema eléctrico de distribución subterráneo de bajo voltaje de tipo radial.
- Determinar la ecuación para el cálculo del momento eléctrico del conductor de aluminio TTU aislado, en los típicos sistemas eléctricos de distribución subterráneos de bajo voltaje.
- Simular las máximas caídas de voltaje de varias redes secundarias de distribución subterráneas, a través de un software específico y comparar con los valores calculados mediante la metodología aplicada por EMELNORTE, el cual depende de los valores de los kVA-m. del conductor de aluminio TTU aislado.

Capítulo 1

Sistemas eléctricos de distribución secundarios y su construcción subterránea

Los sistemas energéticos se encuentran constituidos por generadores eléctricos, etapas de transformación, líneas de transmisión, líneas de subtransmisión y las redes o circuitos de distribución (primarias y secundarias), el contenido que se ha desarrollado hace énfasis en el último peldaño de todo el sistema energético, el cual comprende de la red de distribución eléctrica, siendo aún más específico en los circuitos secundarios subterráneos de bajo voltaje y los elementos principales que los constituyen en cuanto a su construcción con el fin de discernir y seleccionar la información funcional que aporten parámetros que influyen en el transporte de la energía en las redes eléctricas de distribución subterráneas de bajo voltaje.

1.1. Redes eléctricas de distribución en bajo voltaje y su modelo teórico

Es importante conocer los conceptos esenciales que comprende el sistema eléctrico de distribución aéreo, ya que, de la precisión de este tipo de red eléctrica es posible la descripción de una red de distribución secundaria subterránea, puesto que varios textos técnicos adaptan el modelo de un sistema de distribución aéreo hacia el modelo subterráneo, teniendo en cuenta sus particularidades; para comenzar se ha dispuesto una breve descripción de un sistema eléctrico de distribución con la finalidad obtener una directriz en la construcción de las especificaciones de las redes eléctricas de distribución subterráneas de bajo voltaje, la definición se expresa de la siguiente manera:

La distribución de energía es la parte de la infraestructura de suministro de energía que toma la electricidad de los circuitos de transmisión de alto voltaje especialmente interconectados y la entrega a los clientes. Las líneas de distribución primaria son circuitos de "medio voltaje", normalmente de 600V a 35kV. En una subestación de distribución, un transformador de subestación toma el voltaje del nivel de transmisión entrante (35 a 230 kV) y la reduce a varios circuitos de distribución primaria, saliendo de la subestación.

Cerca de cada usuario final, un transformador de distribución toma el voltaje primario de distribución y la reduce a un circuito secundario de menor voltaje (normalmente 120/240 V; también se utilizan otros voltajes de funcionamiento). Desde el transformador de distribución, los circuitos secundarios de distribución se conectan

al usuario final, donde la conexión se realiza en la entrada de servicio. La Figura 1 muestra una visión general de la infraestructura de generación y suministro de energía y el lugar que ocupa la distribución (Short, 2014, p. 1).

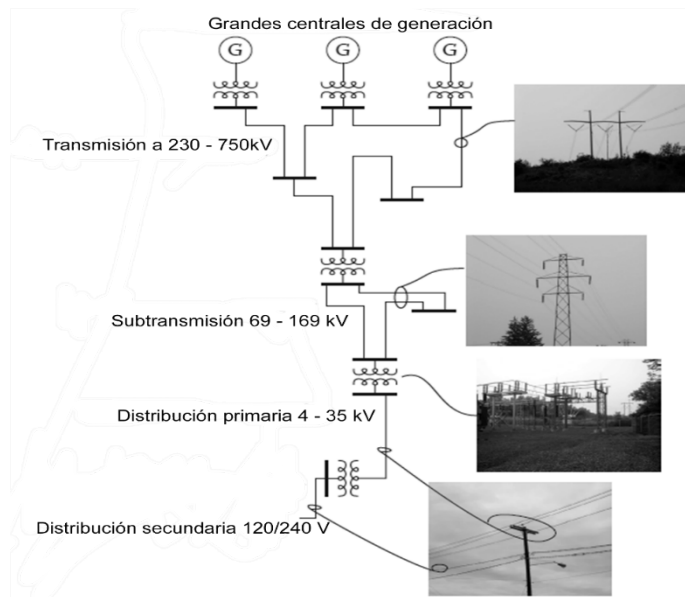


Figura 1. Esquema general del transporte de energía eléctrica

Fuente: (Short, 2014, p. 2).

En base a la descripción anterior se establece que es imperativo generar un modelo que este conformado con los rasgos distintivos descritos en la descripción previa, que contenga características propias de la zona de estudio, además, con la información adquirida a lo largo del desarrollo del presente documento se ha complementado la información que se considera necesaria.

1.1.1. Consideraciones en el modelo del sistema de distribución subterránea de bajo voltaje

Los modelos de redes de transporte de la energía eléctrica se clasifican de acuerdo con diferentes criterios, entre los cuales se selecciona el nivel de voltaje, área de construcción y longitud de tramos que describen los conductores, estos criterios son suficientes para definir un modelo teórico que contenga características esenciales para construir un modelo aproximado para el estudio de las redes de distribución subterráneas de bajo voltaje.

El modelo teórico usual de las líneas o redes de transporte de la energía eléctrica se considera como un circuito en operación de estado estacionario sinusoidal, lo que significa

que luego de haber transcurrido un tiempo lo suficientemente considerable el sistema está en operación o funcionamiento en el cual todas las señales que influyen el sistema se han estabilizado, por tanto, permanecen a un valor constante (Expósito, 2002, pág. 69). Por lo cual, es posible solo considerar variables eléctricas, a las cuales se les aplica el método fasorial en valores eficaces de resolución de circuitos eléctricos.

Para empezar con la elaboración del modelo de la red de distribución se toma como referencia las líneas de transmisión, puesto que, mediante puntualizaciones el modelo se adapta fácilmente al funcionamiento de una red subterránea de distribución de bajo voltaje, inicialmente atendiendo a su longitud y parámetros de influencia eléctrica se clasifican en líneas cortas, líneas medias y líneas largas, las líneas cortas tienen las siguientes precisiones:

Líneas cortas: En las líneas cortas se desprecia la capacitancia y se toma en cuenta solamente la resistencia y la inductancia en serie en forma concentrada (Rodríguez, 2005, págs. 5 - 6). En cuanto a su longitud generalmente las líneas cortas no superan los 50 km en circuitos aéreos y son inferiores a los 2 km en redes subterráneas (Simón y otros, 2008, pág. 61).

Debido a su longitud el modelo que mejor se ajusta a un sistema eléctrico de distribución subterráneo de bajo voltaje es la línea corta ya que cualquier red de bajo voltaje subterráneo no supera los 2 km entre cada centro de transformación, por ello se abarca el estudio alrededor del modelo matemático de una red de longitud corta o modelo serie.

1.1.2. Estructuras típicas de las redes eléctricas de distribución subterránea en bajo voltaje

Las redes de distribución se caracterizan por el ambiente de instalación y por su topología de construcción o estructura, Figura 2. Además, en lo que respecta al tipo de ambiente los circuitos primarios y secundarios pueden ser de instalación aérea, subterránea y mixta. En cuanto a la topología de construcción las redes eléctricas de distribución difieren en los circuitos primarios y secundarios, por tanto, los circuitos de distribución tienen las siguientes estructuras.

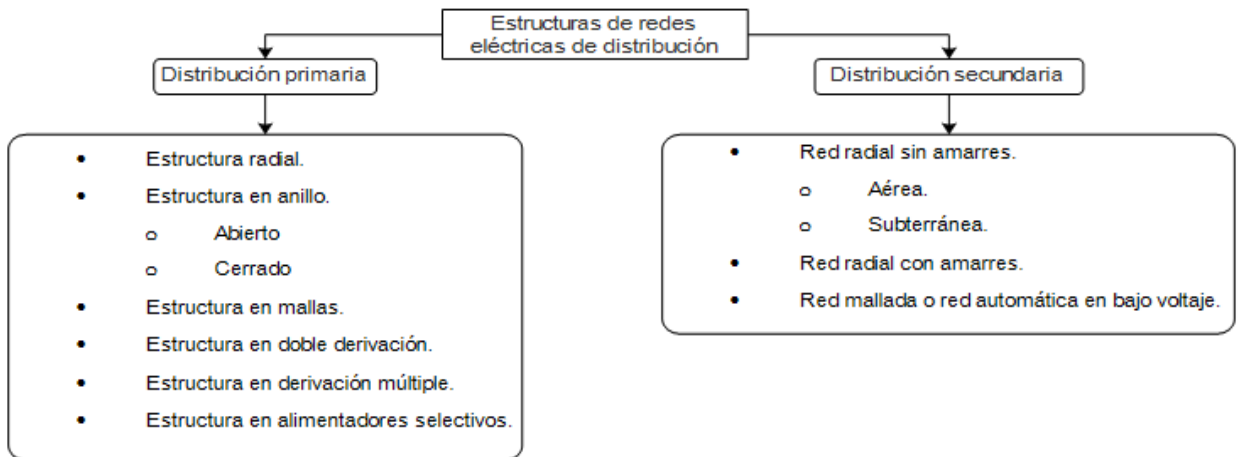


Figura 2. Principales estructuras de construcción de redes eléctricas de distribución.

Fuente: (Lara, 1990, págs. 23 - 39).

Las redes subterráneas de bajo voltaje generalmente son radiales sin amarres, este tipo de red tiene las siguientes consideraciones:

En este tipo de red, parten en diferentes direcciones por medio de cables de sección apropiada de acuerdo con la carga que alimentarán, desde el lugar donde se encuentra instalado el transformador constituyendo los alimentadores secundarios.

El cable de bajo voltaje se protege a la salida de los transformadores por medio de fusibles y se instala directamente enterrado, acometiendo a los servicios haciendo empalmes en "T" sobre él. La Figura 3 representa una red radial de bajo voltaje sin amarres; esta estructura por lo general se presenta en redes subterráneas residenciales (Lara, 1990, págs. 39 - 40).

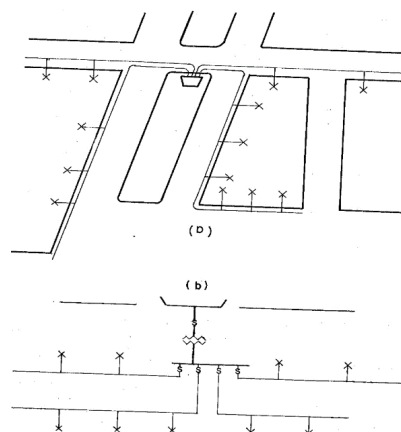


Figura 3. Red radial subterránea sin amarres.

Fuente: (Lara, 1990, pág. 40)

En el lugar en el cual se ha desarrollado el estudio no existen estructuras diferentes a la red de distribución radial sin amarres, debido principalmente a que otro tipo de instalación, la implementación requiere una fuerte cantidad de inversión económica inicial, además de que la densidad de carga no lo requiere. Por ello el modelo seleccionado es la red radial subterránea sin amarres, manteniendo como alternativa el sistema de distribución subterráneo con amarres.

1.1.3. Nivel de voltaje característico en redes de distribución subterráneas de bajo voltaje

En secuencia con los criterios del modelamiento se asevera que en el sistema eléctrico de transmisión y distribución se identifican niveles de voltaje que se clasifican de acuerdo a normativas que emiten los entes reguladores en cada país, el estado ecuatoriano mediante regulaciones emitidas por la AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ENERGIA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES (ARCERNNR), establece niveles de voltaje que cada área de tratamiento de la energía eléctrica maneja en su operación, estos valores se encuentran normados de la siguiente manera (Regulación Nro ARCERNNR -002/20, 2020, 13 de noviembre de 2020, pág. 6).

Tabla 1. Niveles de voltaje definidos por el ARCERNNR.

Bajo voltaje	voltaje menor o igual a 0,6 kV
Medio voltaje	voltaje mayor a 0,6 y menor o igual a 40 kV
Alto voltaje grupo 1	voltaje mayor a 40 y menor o igual a 138 kV
Alto voltaje grupo 2	voltaje mayor a 138 kV.

Fuente: (Regulación Nro. ARCERNNR -002/20, 2020, 13 de noviembre de 2020, pág. 6).

El nivel de bajo voltaje que el usuario recibe desde la acometida hacia los aparatos o equipos eléctricos del hogar se definen de acuerdo con el número de hilos salientes en el transformador de alimentación secundaria y la acometida desde la red secundaria de distribución Tabla 1, en el desarrollo del apartado del modelo matemático del momento eléctrico del presente documento se ha detallado los valores más usuales.

1.1.4. La caída de voltaje permisible en redes eléctricas de distribución secundarias definida por la empresa eléctrica EMELNORTE

La energía eléctrica en cada etapa del proceso de transporte de la electricidad debe cumplir con estándares de calidad para garantizar el funcionamiento óptimo de los diferentes equipos o artefactos que el consumidor final utilice en sus actividades cotidianas, por ello se establecen varios parámetros para cuantificar la calidad de energía que la empresa eléctrica o ente regulador debe controlar. La empresa eléctrica ha propuesto un límite permisible de caída de voltaje tanto en redes de distribución primaria como en circuitos secundarios, en redes secundarias se identifican dos límites de caídas de voltaje, que se encuentran clasificados por la zona de electrificación.

El límite máximo admisible para redes secundarias de distribución para zonas urbanas será de 3.5% (Ruíz, 2021, pág. 8).

El límite máximo admisible para redes secundarias de distribución para zonas rurales será de 5% (Ruíz, 2021, pág. 8).

1.1.5. Conceptos breves, útiles para el desarrollo de la metodología de determinación de caídas de voltaje en redes radiales secundarias

Usuario: de acuerdo con la REGULACION No. ARCERNNR – 002/20, es la persona natural o jurídica que se beneficia con la prestación del servicio público de energía eléctrica, bien como propietario del inmueble en donde este se presta, o como receptor directo del servicio, en proyectos de estudios eléctricos o nuevas electrificaciones es la cantidad que cuantifica el número de usuarios en total, que están involucrados en el estudio eléctrico.

Usuarios parciales por punto de carga (CONSUM.): son los usuarios que divergen desde un punto en común o punto de carga, se observa de manera real como el lugar donde se ubica el poste de hormigón o el pozo de revisión en redes subterráneas de bajo voltaje.

Configuración de la red: es la parte que comprende los hilos o cables del sistema eléctrico de distribución en bajo voltaje que puede distribuirse de forma aérea o subterránea, existen más de siete configuraciones de distribución secundaria, sin embargo, en el área de concesión de la empresa eléctrica se aplican dos configuraciones, la configuración monofásica a tres hilos y la configuración trifásica en estrella aterrada a cuatro hilos.

Demanda máxima diversificada (DMD): Máximo de la suma de las demandas impuestas por un grupo de cargas durante un periodo determinado. Debe incluir intervalo de demanda, periodo y unidades, se determina de acuerdo con los estudios de estratificación y su relación con el número de abonados que están concentrados en un punto en común, se cuantifica en [kW].

Factor de potencia (FP): en estudios en los cuales las cargas se consideran como fijas y concentradas se define como la relación de la potencia activa (P) y la potencia aparente (S), al usarse en cálculos de circuitos polifásicos en el que el voltaje y la corriente son senoidales y balanceados, el circuito se analiza por fase.

Demanda de diseño (DD): es la potencia total del proyecto de electrificación o de repotenciación, dado en kW o kVA.

Factor de caída de voltaje (FDV): es la potencia de demanda por punto de carga concentrada, o también, es el valor que caracteriza la potencia de conducción del cable o conductor eléctrico, ambos se encuentran dados en kVA-m.

Caída de voltaje (%): Es el valor que cuantifica la diferencia de voltaje, medida desde el centro de transformación hasta una carga determinada, la cual se ubica en una distancia considerable. se expresa en voltios [V] o comúnmente en porcentaje.

1.2. El cable de aluminio TTU aislado en redes eléctricas soterradas de distribución de bajo voltaje

La parte del cable eléctrico orientada a conducir la electricidad son los hilos o conductores del cable los cuales están formados por un material que permite transportar la energía eléctrica minimizando las pérdidas internas, generalmente estos materiales son conformados por elementos metálicos como: la plata, el oro, el acero, cobre, aluminio, entre otros. El aluminio es el material predilecto para la manufactura de conductores de energía eléctrica debido principalmente por razones económicas, ya que generalmente las redes de distribución secundarias comprenden distancias que fácilmente pueden superar varios metros e inclusive algunos kilómetros, los cuales están determinados por el tamaño del proyecto eléctrico ejecutado.

1.2.1. Características del cable de aluminio TTU para redes de distribución subterránea de bajo voltaje

El cable de aluminio TTU es un conductor aislado se encuentra compuesto por varios hilos o conductores eléctricos y dos capas poliméricas de aislamiento concéntricas a un núcleo en común, su objetivo es conducir la energía (corriente y voltaje) para servir a una carga. Este conductor central puede estar compuesto por un solo elemento (sólido) o por múltiples elementos (trenzado), sobre la base de una progresión geométrica de 6, 12, 18, etc., de hilos individuales para cada capa (Thue, 2012, pág. 40).

El aluminio del cual está compuesto el conductor eléctrico se clasifica de acuerdo con los procesos fisicoquímicos empleados en el momento de la fabricación de los cables eléctricos, estos procesos de manufactura le otorgan al conductor características como conductividad eléctrica, pureza, dureza, flexibilidad, tenacidad y resistencia mecánica, a rasgos generales las cualidades de relevancia para caracterizar al conductor de aluminio son las aleaciones (AA) y el temple o proceso térmico (calentamiento y enfriamiento del material).

Para identificar el tipo de aluminio y las aleaciones de aluminio se enumeran según el elemento principal de aleación, y se designan con números de cuatro dígitos Tabla 2. El primer dígito del número designa el elemento principal de aleación, y los tres dígitos restantes representan modificaciones de la aleación básica, de acuerdo con su registro en la Asociación del Aluminio. La lista de aleaciones basada en este método es la siguiente:

Tabla 2: Clasificación de las diferentes aleaciones de aluminio.

Elemento principal de aleación	Numero de 4 dígitos
(Mínimo de aluminio puro 99%)	1 X X X
Cobre	2 X X X
Manganeso	3 X X X
Silicio	4 X X X
Magnesio	5 X X X
Magnesio y silicio	6 X X X
Zinc	7 X X X
Otros elementos	8 X X X

Fuente: (Patrick, 1989, pág. 5).

La aleación usada en los cables TTU son aquellos que pertenecen a la serie 8XXX. Las aleaciones de aluminio de la serie 8000 tienen índices de fluencia muy similares a los del alambre de cobre para la construcción, lo que se traduce en un rendimiento similar. La serie 8000 tiene una mayor relación resistencia (eléctrica)-peso que un cable de cobre de igual ampacidad.

Otra manera para caracterizar los tipos de conductores de aleación de aluminio serie 8000 son las clases o utilización, las cuales son:

- Clase A: Para conductores que se cubrirán con materiales resistentes al clima.
- Clase B: Para conductores a ser aislados con varios materiales como caucho, papel, tela barnizada, etc., y para los conductores indicados en Clase A donde es requerido una mayor flexibilidad.
- Clase C y D: son normalmente empleados como conductores para cables en que es necesaria mayor flexibilidad de la que pueda obtenerse en las clases anteriores (American Society for Testing and Materials, 2011, pág. 1).

1.2.2. Aislamiento del cable de aluminio TTU

El cable de aluminio TTU tiene dos capas de protección que lo diferencian de los distintos cables habituales (THW, THWN, THHWLS, entre otros), la primera capa se impregna directamente entre los conductores, al cual le se denomina polímeros termoestables o termoplásticos, la segunda capa (o chaqueta) que rodea al conductor impregnado de cualquier de los polímeros mencionados se denomina termoplástico, Figura 4, otra función usual que cumple la segunda capa es deslizarse a lo largo del conductor a voluntad del operador; es importante describir estos polímeros, para identificar las distintas características que adopte los diferentes cables que se han seleccionado en los diseños de redes soterradas.

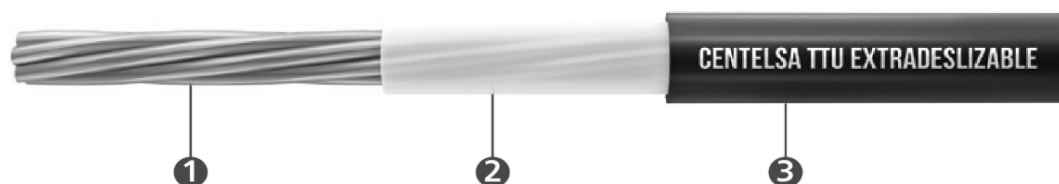


Figura 4. El cable de aluminio TTU (Aislamiento Termoplástico (o termoestable), chaqueta Termoplástica Subterránea del inglés (TTU).

Fuente: (Centelsa , 2021, pág. 2).

Donde:

- 1) Conductor de cobre o aluminio cableado.
- 2) Aislamiento de polietileno [PE] o polietileno reticulado [XLPE] resistente a la abrasión, al calor y a la humedad.
- 3) Cubierta exterior en PVC extra deslizable, retardante a la llama, resistente a la abrasión, al calor y a la humedad.

Las propiedades físicas que poseen estos polímeros se describen brevemente como:

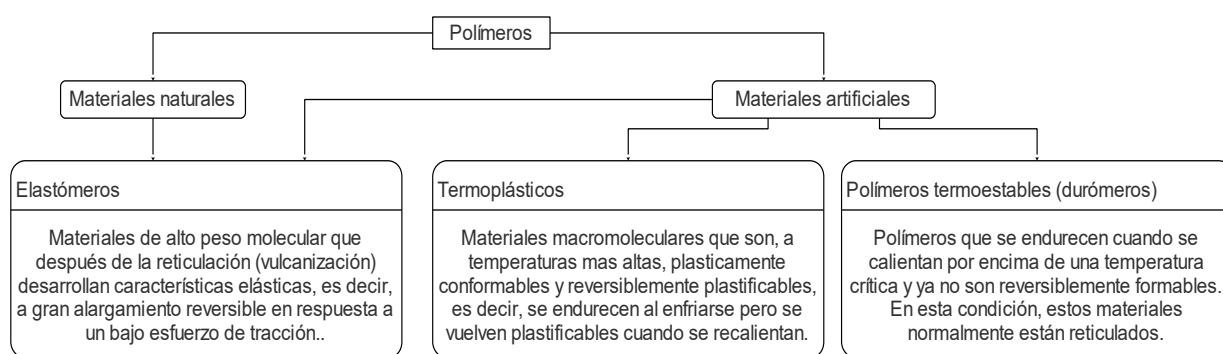


Figura 5. Polímeros más usados en la fabricación de aislamientos de cables eléctricos.

Fuente: (Heinhold, 1990, pág. 15).

1.2.3. Material que constituye el aislamiento interno y la chaqueta del cable eléctrico

El material aislante es una parte importante para el conductor eléctrico, ya que este material aísla el conductor del ambiente aéreo o subterráneo, en el ambiente aéreo protege al conductor de agentes corrosivos u oxidantes, además de la radiación emitida por el sol, en ambientes subterráneos aísla al conductor de sales disueltas en la composición natural en el interior del suelo, así como de cualquier tipo de líquidos que puedan entrar en contacto con el conductor.

- Aislamiento de la chaqueta del cable TTU

Cloruro de polivinilo: El material de partida, el cloruro de vinilo se produce hoy en día principalmente por cloración del etileno. Puede convertirse en cloruro de polivinilo mediante el método de emulsión (E-PVC), suspensión (S-PVC) o polimerización en masa (M-PVC) (Heinhold, 1990, pág. 18). El PVC y aditivos como plastificantes, cargas minerales, antioxidantes, pigmentos de recubrimiento, etc. se preparan en un proceso de mezcla y

gelificación, bajo calor, para producir el compuesto de trabajo. El compuesto, generalmente en forma granular, se presiona sobre el conductor como aislamiento, o sobre el núcleo como cubierta, por medio de extrusoras.

- Aislamiento interno del cable TTU

Polietileno: El polietileno es un hidrocarburo macromolecular con una estructura similar a la de las parafinas (en general alcanos). Este material, con sus excelentes propiedades dieléctricas, se utiliza como material aislante en la ingeniería de cables de potencia tanto en forma no reticulada (PE termoplástico) como reticulada (XLPE) (Heinhold, 1990, p. 19).

Polietileno reticulado: Las moléculas de cadena lineal del polietileno se tejen mediante el entrecruzamiento en una red tridimensional. Se obtiene así del termoplástico un material que a temperaturas superiores al punto de fusión de la cristalita presenta propiedades elastoméricas (Heinhold, 1990, pág. 20). De este modo se mejoran la estabilidad dimensional al calor y las propiedades mecánicas. Como resultado, se pueden permitir temperaturas del conductor de hasta 90 °C en funcionamiento normal y de hasta 250 °C en condiciones de cortocircuito (Heinhold, 1990, pág. 20).

Los materiales antes descritos son los más usados por diferentes distribuidores de conductores y cables eléctricos, sin embargo, la gama de productos termoplásticos o termoestables es variada y su descripción conlleva un caso de estudio aún más minucioso, por ello se presenta la siguiente tabla en la cual se aprecia los nombres de materiales adicionales que se describen en los catálogos de los diferentes proveedores.

Tabla 3. Aislamiento del cable de aluminio TTU.

Materiales de aislamiento (Cables de aluminio TTU)	
Aislamiento del conductor	Cubierta exterior o chaqueta
<p>- <i>Cualquier material termoplástico y termoestable.</i></p> <p><i>Cloruro de polivinilo (PVC)</i></p> <p><i>Propil etileno (PE)</i></p> <p><i>Etileno acetato de vinilo (EVA)</i></p> <p><i>Acrilato de etileno:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Etileno etil acrilato (EEE)</i> • <i>Etileno butil acrilato (ABE)</i> <p><i>Entre otros.</i></p>	<p>- <i>Cualquier material termoplástico, se puntualiza que, en la chaqueta se excluye el uso de los polímeros termoestables como:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Resina epóxica</i> • <i>Resina de poliuretano</i> • <i>Entre otros</i>

Fuente: Autor.

Al usar los polímeros artificiales como aislantes de conductores eléctricos se tiene como objetivo hacer que el cable adquiera las propiedades propuestas por normativas nacionales o internacionales, las propiedades mínimas para el material de aislamiento son:

- Sea retardante a la llama.
- Sea resistente a los rayos solares e intemperie.
- Apto para enterrado directo.
- Soporte el voltaje máximo de operación designada.
- Resistente a la abrasión.
- Resistente al aplastamiento.
- Resistente a los impactos.

El Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) mediante la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) NTE INEN 2547, dispone de las características que los conductores eléctricos deben cumplir para instalarse en sistemas eléctricos de distribución en bajo voltaje, ver Tabla 4; existe la flexibilidad de elección de acuerdo con la empresa de servicio eléctrico para seleccionar el cable con variaciones en las características normadas, pero se debe cumplir que el cambio de las propiedades no deben ser significativas.

Tabla 4. Requerimientos para el conductor de aleación de aluminio serie 8000.

Aplicaciones	Propiedades eléctricas y mecánicas
<ul style="list-style-type: none"> • Cables de construcción • Cables subterráneos para el servicio eléctrico. • Cables de servicio eléctrico. • Cables trenzados. • Blindajes, entre otros. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistividad: $0.02845 \frac{\Omega \cdot (mm)^2}{m}$. • Conductividad: 61.60 %. • Temple: Tipo H1X o H2X. • Resistencia a la tracción. <ul style="list-style-type: none"> ○ Min: 103 <i>Mpa</i>. ○ Max: 152 <i>Mpa</i>.

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización , 2011, págs. 1-3)

1.3. Construcción de redes subterráneas de distribución eléctrica de bajo voltaje

Luego de haber definido al sistema de distribución subterráneo de bajo voltaje y su elemento principal, el cable de aluminio TTU; es necesario conocer el tipo de construcción soterrado. Este tipo de redes se originan en un centro de transformación, del que parten las redes subterráneas de bajo voltaje para su distribución y consumo. Son subterráneas por

razones especialmente de seguridad y estética, extendiéndose radialmente o mallado por el interior de las ciudades bajo aceras o carreteras.

1.3.1. Canalización de los cables eléctricos de distribución de bajo voltaje

El cable de distribución subterránea se canaliza de las siguientes formas:

- Conductores aislados directamente enterrados bajo zanjas;
- Conductores aislados en canalización entubada enterrados bajo zanjas;
- Conductores aislados en galerías;
- Conductores aislados en atarjeas o canales revisables;
- Conductores aislados en bandejas, soportes, palomillas o, directamente, sujetos a la pared.

En el área de concesión de la empresa eléctrica EMELNORTE existen solamente dos tipos de construcción de instalaciones eléctricas de distribución de bajo voltaje subterráneo, las más comunes son conductores aislados directamente enterrados bajo zanjas y conductores aislados en canalización entubada enterrados bajo zanjas, por lo cual se ha descrito estos dos tipos de instalación.

En el catálogo digital que pertenece a Subsecretaría de Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica del estado ecuatoriano, se publicó información detallada que contienen las instrucciones para la construcción de redes de distribución de energía eléctrica, en el apartado de redes subterráneas de bajo voltaje, referente al conductor eléctrico, establece que: para red secundaria subterránea se utilizan cables con conductor de cobre, aislamiento de 2.000 V con polietileno (PE) y chaqueta de policloruro de vinilo (PVC) resistente a la humedad (Comité de Homologación de Redes Subterráneas, 2011, pág. 56).

1.3.2. Construcción de redes de distribución secundarias que discurren en bancos de ductos

En la construcción de redes eléctricas subterráneas de bajo voltaje se ha identificado dos estructuras principales relacionados con las redes eléctricas de distribución, los bancos de ductos (Figura 6) y pozos de revisión (Figura 8).

Para la construcción de los bancos de ductos y pozos en cuanto a sus elementos se considera principalmente lo siguiente.

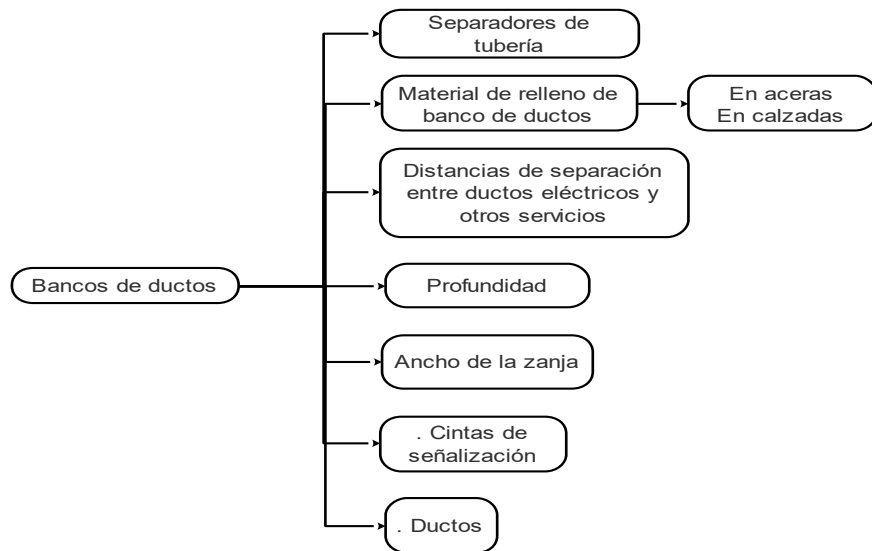


Figura 6. Consideraciones en la construcción de bancos de ductos.

Fuente: (Comité de Homologación de Redes Subterráneas, 2011, págs. 1 - 6).

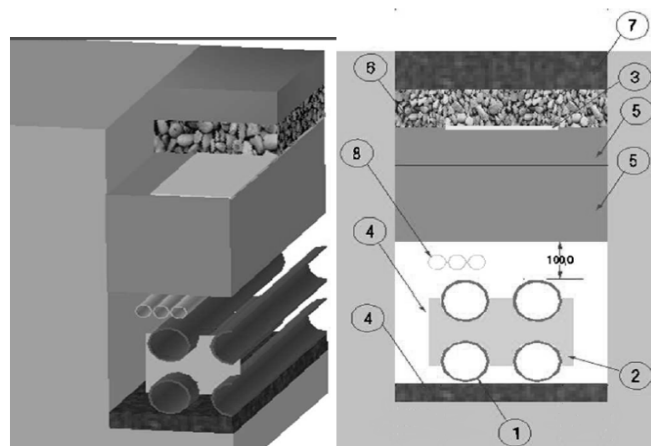


Figura 7. Vista de la construcción final de un banco de ductos 2x2.

Fuente: (Comité de Homologación de Redes Subterráneas, 2011, pág. 8).

Donde:

- 1) Tubo PVC pared estructurada interior lisa y exterior corrugado.
- 2) Separador de tubería PVC 2 Filas x 2 columnas.
- 3) Cinta de señalización.
- 4) Arena.
- 5) Material de relleno.
- 6) Ripio.
- 7) Hormigón.
- 8) Tubo de polietileno Triducto.

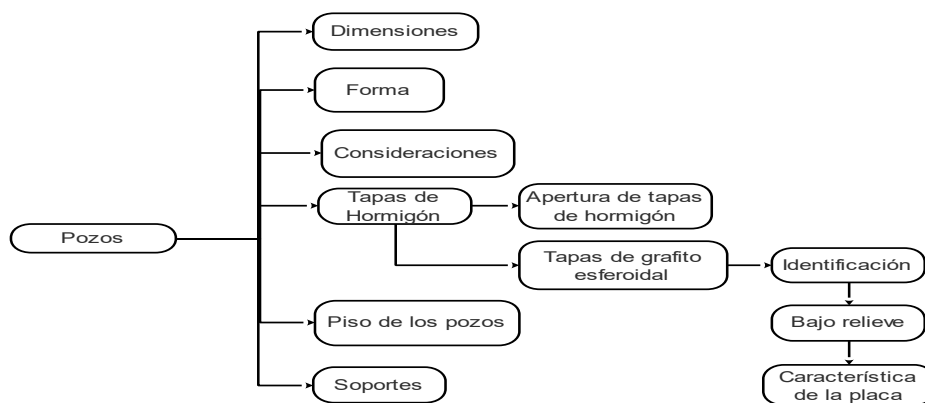


Figura 8. Consideraciones en la construcción de pozos de revisión.

Fuente: (Comité de Homologación de Redes Subterráneas, 2011, págs. 7 - 13).

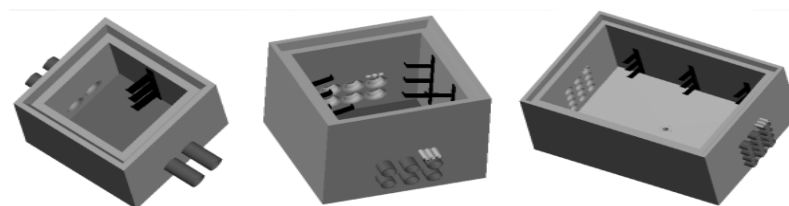


Figura 9. Vista de la construcción final de un pozo de revisión.

Fuente: (Comité de Homologación de Redes Subterráneas, 2011, pág. 8)

Las especificaciones técnicas y medidas para la construcción de la canalización por ductos de PVC de conductores eléctricos aislados (Figura 7) y pozos de revisión (Figura 9) se encuentran detallados en la página web de la Subsecretaría de Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica, en las 6 secciones referentes a redes subterráneas, se recomienda al lector visitar el catálogo digital antes de realizar la construcción de este tipo de instalación.

1.3.3. Construcción de redes eléctricas de distribución secundarias directamente enterradas

Referente a los conductores aislados directamente enterrado bajo zanja, en las normas técnicas ecuatorianas de construcción y la normativa de la Empresa Eléctrica Regional Norte que rigen las construcciones de redes eléctricas subterráneas no figuran normas para instalaciones de cables eléctricos de aluminio directamente enterrados en ningún rango de voltaje (bajo, medio, alto - grupo 1 y 2), sin embargo la normativa ecuatoriana existente en general comparte similitudes con el REGLAMENTO

ELECTROTÉCNICO PARA BAJA TENSIÓN E ITC (Instrucciones Técnicas Complementarias) de España, en lo que respecta la construcción de zanjas para la canalización de cables eléctricos de bajo voltaje, debido a ello se citan selectas instrucciones u observaciones que junto a la información existente en las UNIDADES DE PROPIEDAD se complementan para documentar la construcción de las instalaciones de redes subterráneas de distribución de bajo voltaje, haciendo énfasis en que la información dispuesta en el presente documento puede diferir en algunos criterios en comparación de la fuente original o entorno de ejecución del trabajo.

Las directrices que emite el Reglamento electrotécnico para bajo voltaje con respecto a la construcción de zanjas para canalizar cables eléctricos de bajo voltaje describen que, para la sección mínima del conductor neutro, habrá que distinguir dos casos:

- Para línea monofásica. La sección del neutro será igual a la de los conductores de fase.
- Para línea trifásica más neutro. La sección del neutro será, como mínimo, 6 mm^2 en cobre y 16 mm^2 en aluminio, no obstante, debido a la posible presencia de armónicos en la red, se recomienda no reducir la sección del neutro.

De acuerdo con la ITC-BT-07, este tipo de canalizaciones discurrirán, en general, por terrenos de dominio público y, preferentemente, bajo las aceras. Su trazado será lo más rectilíneo posible y paralelo a referencias fijas como líneas de fachada y bordillos (González y otros, 2013, pág. 137).

En cuanto a las características técnicas la construcción de zanjas consta de las siguientes medidas:

Las zanjas tendrán una profundidad, hasta la parte superior del cable más próximo a la superficie, no menor de 0,6 m en acera y de 0,8 m en calzada. Cuando existan impedimentos que no permitan lograr las mencionadas profundidades, estas podrán reducirse, pero habrán de disponerse las protecciones mecánicas necesarias.

El lecho de la zanja será liso y estará libre de aristas vivas, cantos, piedras, etc. En él se dispondrá una capa de arena de un espesor mínimo de 0,05 m sobre la que se colocará el cable, por encima del cable irá otra capa de arena o tierra cribada de unos 0,10 m de espesor. Ambas capas cubrirán la anchura total de la zanja, la cual será suficiente para mantener 0,05 m entre los cables y las paredes laterales.

Por encima de la arena todos los cables deberán tener una protección mecánica como, por ejemplo, losetas de hormigón, placas protectoras de plástico, ladrillos o

rasillas colocadas transversalmente. Se colocará, también, una cinta de señalización que advierta de la existencia del cable eléctrico de bajo voltaje, su distancia mínima al suelo será de 0,1 m y a la parte superior del cable de 0,25 m.



Figura 10. Muestra de la cinta para señalizar la existencia de cables eléctricos.

Fuente: (Comité de Homologación de Redes Subterráneas, 2011, pág. 5).

Se admitirá la colocación de placas con la doble misión de protección mecánica y de señalización.

Sobre la protección mecánica se tenderá una capa de tierra procedente de la excavación de unos 0,25 m según se muestra en la Figura 11. Esta tierra será compactada y se procurará que esté libre de piedras o cascotes. Finalmente, se colocará una capa de tierra vegetal o un firme de hormigón (sobre este se repondría el pavimento del mismo tipo que existía antes de la apertura) (González y otros, 2013, pág. 137).

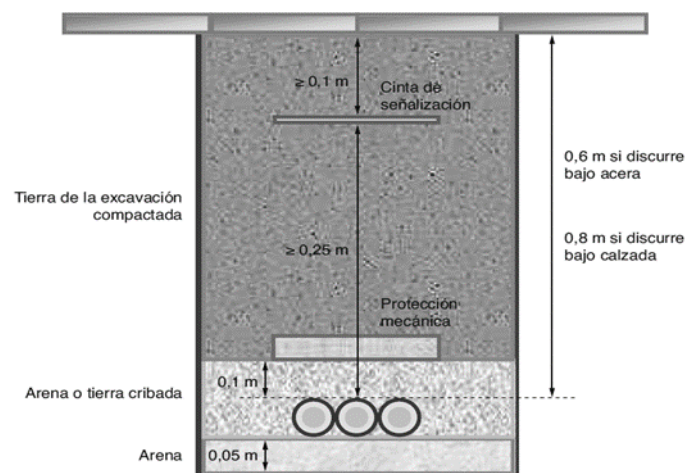


Figura 11. Construcción final de un circuito de distribución directamente enterrado.

Fuente: (González y otros, 2013, pág. 138).

La Figura 11, muestra el trabajo final de una construcción de una red directamente enterrado, la figura describe la construcción en aceras y calzada con bajo índice de recurrencia de vehículos, se precisa esta información, ya que, existe varias especificaciones de construcción de acuerdo al espacio público (calzada con alta recurrencia de vehículos, vías de trenes, paralelismos con diferentes servicios como agua potable, gas, ductos de aguas servidas, entre otros) en el cual se extiende la red subterránea de distribución, la información se encuentra detallada en el Reglamento electrotécnico para bajo voltaje, desde las pagina 68 hasta la pagina 72.

A partir de la descripción precedente, se define al sistema secundario de distribución subterráneo de bajo voltaje como un circuito de transmisión de longitud corta que opera en estado estable sinusoidal, con niveles de voltaje que no superan los 600 V, la caída de voltaje no debe superar el rango del 5% en el cable eléctrico, desde el valor nominal de operación, los cables eléctricos que conforman la red de distribución son de aluminio aislado con tecnología tipo TTU, además conducen la energía eléctrica a una temperatura de operación de 90° C, típicamente los circuitos secundarios se dispersan en el espacio de proyección de forma radial enterrado directamente o en ductos de PVC, el circuito de distribución es idealmente balanceado y con un arreglo geométrico simétrico.

Capítulo 2

El momento eléctrico del cable de aluminio TTU aislado para redes de distribución soterradas de bajo voltaje

La descripción desarrollada en el primer capítulo permitió describir el sistema eléctrico subterráneo de distribución de bajo voltaje, con ello se procede a desarrollar el modelo matemático que permite determinar los kVA-m. del cable de aluminio TTU aislado para distintos calibres, aplicado a las diferentes configuraciones del circuito secundario, tomando en cuenta los valores eléctricos que influyen en el cable eléctrico, los cuales también se han establecido previamente.

2.1. Descripción rápida del área de concesión de EMELNORTE

El área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Norte (EMELNORTE), comprende la zona norte del Ecuador, precisamente las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha y sectores significativos de las provincias de Esmeraldas y Sucumbíos. EMELNORTE cuenta con 16 sucursales y su matriz principal se ubica en la ciudad de Ibarra en las calles Juan Manuel Grijalva 654 entre Simón Bolívar y José Joaquín de Olmedo.

El área de prestación del servicio es aproximadamente de $11.862,10 \text{ km}^2$; donde el 36 % de esta superficie corresponde a la provincia de Imbabura, el 32 % a la provincia de Carchi, el 20 % a la provincia de Sucumbíos y el 12 % restante a la provincia de Pichincha (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR), 2021, pág. 96).

En cuanto al tema de estudio, las redes eléctricas de distribución secundarias la empresa cuenta con un total de 7.107,72 km de redes secundarias de las cuales, 5.714,20 km son aéreas, 1.158,98 km son preensambladas, y 234,54 km son subterráneas (Ruíz, 2021, pág. 4).

2.2. Metodología

El desarrollo del presente trabajo de grado tiene como objetivo determinar los kVA-m. de los diferentes calibres del cable de aluminio TTU para calcular las caídas de voltaje en redes subterráneas de bajo voltaje, se ha utilizado el software de simulación CYME para

realizar una comparativa entre los resultados calculados por la metodología aplicada por el departamento de estudios eléctricos de EMELNORTE.

El procedimiento para desarrollar globalmente con lo propuesto en el presente documento se resume de manera general en el siguiente diagrama de bloques.

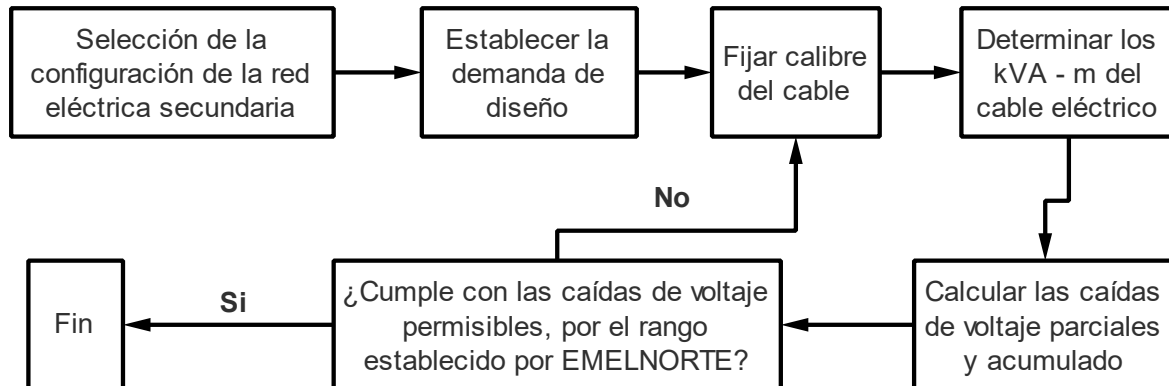


Figura 12. Diagrama de bloques en el cual se visualiza la metodología aplicada en el cómputo de caídas de voltaje en redes secundarias de distribución.

Fuente: Autor.

Existen varios métodos usados para calcular las caídas de voltaje en redes eléctricas de distribución secundarias, un método en particular usado en el diseño de sistemas eléctricos de distribución en general, es usual utilizar los kVA-m. de los cables eléctricos con el propósito de evitar usar en los cálculos el valor de la corriente que transporta los conductores eléctricos, ya que como se conoce la carga es la responsable de caracterizar el valor de la corriente eléctrica, una vez que se ha condicionado la potencia de dimensionamiento en los proyectos de electrificación.

Se conoce además que la carga en los sistemas de distribución se concentran en un punto en común, los postes de hormigón o pozos de revisión, lugar donde se realizan las acometidas hacia el abonado, debido a esta concentración de carga por referencia, se divide la red de distribución por tramos en los cuales se calculan las caídas de voltaje parciales y mediante una suma de las caídas de voltaje parciales se obtiene el valor máximo de caída de voltaje de todo el sistema, es útil conocer este valor ya que permite diseñar el sistema eléctrico secundario sin que rebase el límite de caída de voltaje máxima permisible.

2.3. Ecuaciones características del cable de aluminio TTU aislado para cuantificar su impedancia

En el mecanismo del transporte de la energía eléctrica desde un punto A hacia un punto B, un parámetro relevante al momento de realizar el diseño de distribución son las pérdidas de energía que experimenta el material que realiza la función de conducir la electricidad, que en consecuencia se trata del cable eléctrico, este elemento presenta la propiedad física inherente de oposición al flujo de la energía eléctrica, al fenómeno dispuesto anteriormente se conoce también como impedancia eléctrica.

2.3.1. La resistencia eléctrica del cable subterráneo en sistemas de distribución secundarias de bajo voltaje

La ecuación con la cual es posible expresar la cuantificación de la resistencia eléctrica se denomina ley de Ohm (1) para circuitos eléctricos, sin embargo, esta ecuación debe ajustarse con el propósito de emplearse en las redes eléctricas de distribución subterráneas de bajo voltaje.

$$R_{CD} = \frac{V}{I} \quad [\Omega] \quad (1)$$

Además, se conoce que la expresión que define al voltaje precisando parámetros como la longitud y la influencia del campo eléctrico en el cual el material conductor se encuentra inmerso; el voltaje puede expresarse como la ecuación (2):

$$V_{A-B} = \Delta V = - \int_A^B E \cdot dl \quad [V] \quad (2)$$

De igual manera la corriente eléctrica que circula a través de un material conductor se formula matemáticamente como:

$$I = J * S \quad [A] \quad (3)$$

Se conoce además que J , es la densidad de corriente de conducción eléctrica:

$$J = \sigma * E \quad \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad (4)$$

Reemplazando (4) en (3) se obtiene la siguiente expresión:

$$I = \sigma * E * S \quad [A] \quad (5)$$

Al reducir la expresión (2), el resultado es la siguiente ecuación:

$$V_{B-A} = \int_B^A E \cdot dl = E * \int_B^A dl = E * L \quad [V] \quad (6)$$

Se conoce también que el inverso de la conductividad (σ) es la resistividad representada por la letra griega rho (ρ), al reemplazar las ecuaciones (5) y (6) en la ecuación (1), la resistencia se reescribe como la expresión (7), se resalta que el presente resultado se encuentra descrito en redes eléctricas en las cuales circula corriente continua:

$$R_{CD} = \frac{V}{I} = \frac{E * L}{\sigma * E * S} = \frac{1}{\sigma} * \frac{L}{S} = \rho * \frac{L}{S} \quad [\Omega] \quad (7)$$

Donde:

E : Campo eléctrico que experimenta el cable eléctrico $[\frac{N}{C}]$.

σ : conductividad eléctrica propia del material del cable eléctrico $[\frac{1}{\Omega * m}]$.

ρ : resistividad eléctrica, es el inverso de la conductividad $[\Omega * m]$.

S : sección o área efectiva de conducción eléctrica $[m^2]$.

L : longitud total del cable eléctrico $[m]$.

Para profundizar la deducción y entender de manera clara el tema referente al concepto y cálculo de la resistencia eléctrica de un conductor eléctrico se sugiere revisar el capítulo 5 del libro “Elementos de electromagnetismo” del autor Matthew Sadiku, en los apartados de “Corrientes de conducción” y “Conductores”.

La ecuación (7), permite entrever los requerimientos de selección del material a implementar en la red de distribución, tales como:

- El tipo de metal que se va a utilizar. Su valor de resistencia, su coeficiente de temperatura, su resistividad térmica y sus propiedades mecánicas, como maleabilidad, ductilidad, tracción, alargamiento y resistencia a la atmósfera corrosiva, influyen en los parámetros de transmisión.
- Tiene que ser lo suficientemente flexible como para soportar repetidos enrollamientos y desenrollamientos. La unión durante la instalación debe ser más fácil, y también debe haber mucho material disponible con un valor de mercado razonable para que sea económicamente viable.

Otro factor de relevancia en el cálculo de la resistencia característica del conductor, es el incremento debido al trenzado del conductor, este efecto se produce debido a que los cables eléctricos esta conformados por hilos conductores, que al establecer una longitud de estudio no corresponde a una medida precisa, ya que, si al conductor eléctrico se dispone lo más recto posible su longitud incrementa y con ello también su resistencia, para cuantificar este efecto se estima adicionalmente un 2% del valor de la resistencia R_{CD} (Grainger & Stevenson, 2002, pág. 134).

2.3.2. Temperatura de operación y el efecto sobre la resistencia del cable eléctrico

La temperatura de operación se ha definido en un valor diferente para el cable eléctrico, como un valor que es superior a los $20^{\circ}C$, debido a ello es necesario describir lo que sucede al variar la temperatura. En varios textos académicos se establece que la resistencia eléctrica incrementa linealmente al aumentar la temperatura como se aprecia en la Figura 13.

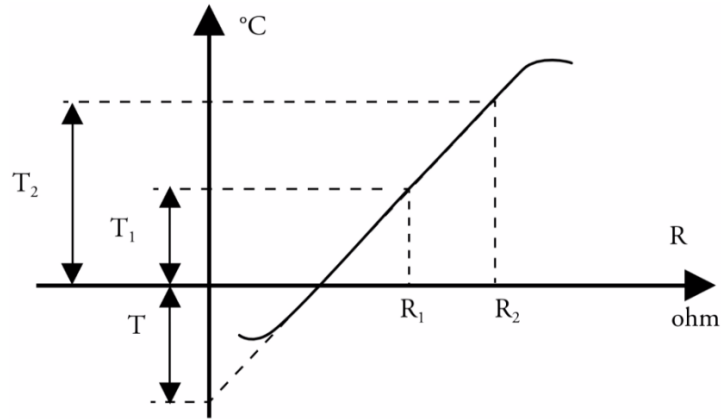


Figura 13. Variación de la resistencia con la temperatura.

Fuente: (Conдумex cables, 2009, pág. 27).

La ecuación (7) se modifica para cuantificar este efecto de la siguiente manera:

$$R_{DC}' = R_{DC} * [1 + \alpha * (T_2 - T_1)] \quad [\Omega] \quad (8)$$

Donde:

α : se denomina coeficiente de corrección por temperatura con un valor de 0,004386 en $1/^\circ C$.

T_2 : temperatura definida por las condiciones de operación del cable eléctrico.

T_1 : temperatura de operación definida por la constante ρ en $20^\circ C$.

2.3.3. Observaciones sobre la resistencia eléctrica en corriente alterna

Para definir a la resistencia en corriente alterna se especifica la siguiente ecuación (9), la cual detalla los efectos que alteran el comportamiento del conductor de manera interna y externa (Short, 2014, págs. 158 - 159).

$$R_{CA} = R_{CD}' * (1 + \gamma_{cs} + \gamma_{cp}) \quad [\Omega] \quad (9)$$

Donde:

γ_{cs} : factor debido al efecto piel.

γ_{cp} : factor debido al efecto de proximidad.

El factor del efecto piel se debe a que la energía se genera, transporta y distribuye en corriente alterna, esto implica que tanto la corriente y el voltaje varían con respecto al tiempo, su comportamiento se modela mediante una función senoidal, generando alrededor del conductor un campo magnético variable debido al flujo de corriente alterna, que produce un voltaje opuesto al sentido original de circulación de energía eléctrica, lo cual hace que los electrones en la parte central del conductor se dispersen hacia los bordes del conductor, resultando en una sección efectiva de conducción menor, por lo cual la resistencia en corriente alterna incrementa considerablemente, esta consecuencia es muy notoria al aumentar la frecuencia de la energía transportada, a este fenómeno se lo denomina efecto superficial o efecto pelicular (Figura 14). La ecuación (10) permite cuantificar su efecto.

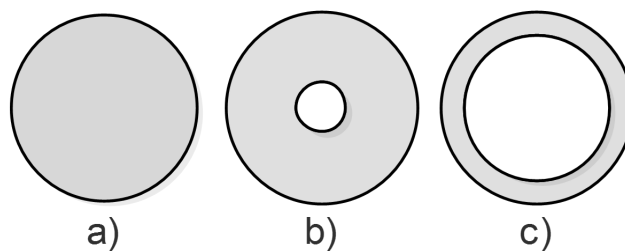


Figura 14. a) Área efectiva en CD; b) Área efectiva a 60 Hz y c) Área efectiva a 1k Hz.

Fuente: Autor.

$$\gamma_{cs} = \frac{x_p^4}{192 + 0.8 * x_p^4} \quad (10)$$

A 60 hercios, el fenómeno es insignificante en los tamaños de conductores de cobre de #2 AWG y menores y en los tamaños de aluminio de #1/0 AWG y menores. A medida que aumenta el tamaño del conductor, este efecto se vuelve más significativo.

El factor debido al efecto de proximidad se presenta cuando un conductor está cerca de otro conductor que transporta corriente, los campos magnéticos del conductor adyacente obligan a la corriente a fluir en las partes del conductor más distantes del conductor adyacente (con ambos conductores transportando corriente en la misma dirección Figura 15). Este efecto de campo magnético aumenta la resistencia efectiva de corriente alterna. El factor de efecto de proximidad se calcula aproximadamente con la ecuación (11).

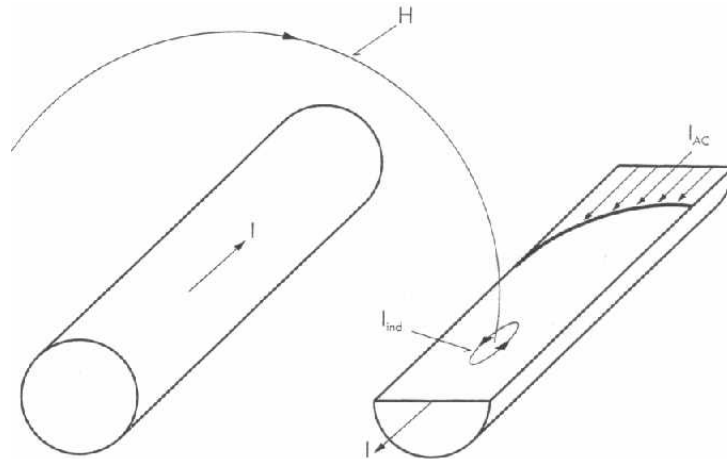


Figura 15. Visualización del efecto de proximidad entre conductores eléctricos.

Fuente: (Universidad Nacional de la Plata, 2007).

$$\gamma_{cp} = a * y^2 * \left(0.312 * y^2 + \frac{1.18}{a + 0.27} \right) \quad (11)$$

Donde:

$$a = \frac{x_p^4}{192 + 0.8 * x_p^4} ; y = \frac{d_c}{s}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{8 * \pi * f * (1 * 10^{-4}) * k_p}{R_{CD}'}}$$

d_c : diámetro del conductor.

S: distancia entre conductores medido desde el centro de los conductores.

k_p : Constante de efecto de proximidad igual a 1 para los conductores típicos de los cables extruidos; puede ser menor que 1 para los cables de papel secados e impregnados y, especialmente, para los de con conductores segmentados redondos.

En las frecuencias de potencia, se ignora el efecto de proximidad, si la separación es superior a 10 veces el diámetro del conductor (el efecto es inferior al 1%).

2.3.4. La inductancia y reactancia inductiva del cable eléctrico

Al considerar un circuito que transporta corriente alterna aparecen dos nuevos conceptos de oposición al flujo de la energía, estos fenómenos son la reactancia inductiva, la cual es la propiedad de obstrucción parcial a la variación de la corriente y la reactancia capacitiva la cual se idea como la oposición al cambio del voltaje en las redes eléctricas y

que sirven para modelar los sistemas eléctricos de transmisión o redes de distribución primarias y secundarias. Con anterioridad se estableció que el modelo de la red eléctrica de distribución corresponde a un circuito de corta longitud, por ello se desprecia la reactancia capacitiva y se procede a definir la reactancia inductiva.

La reactancia inductiva se cuantifica mediante la siguiente ecuación.

$$X_L = \omega * L = 2\pi * f * L \quad [\Omega] \quad (12)$$

Donde:

X_L : Reactancia inductiva.

ω : Frecuencia angular en rad/seg .

f : Numero de ciclos u oscilaciones que suceden en una unidad de tiempo en $[Hz]$.

L : Coeficiente de autoinducción (inductancia) en $[H/m]$.

De los parámetros que componen la ecuación de la reactancia inductiva, la frecuencia angular es la única cantidad que es constante ya que la frecuencia se encuentra definida en 60 Hz., por ello la inductancia es el factor el cual hace posible otorgar un valor característico al cable eléctrico, por ello es importante cuantificar este valor, para describir el efecto de inducción se requiere de los siguientes conceptos.

- Ley de Faraday – Lenz, concepto el cual menciona que, la variación del campo magnético a través de un circuito cerrado genera un voltaje que se opone al flujo convencional del campo magnético.
- Ley de Ampere, en síntesis, se enuncia de la siguiente manera, el flujo de una corriente a través de un hilo conductor genera un campo magnético concéntrico, el cual depende del valor de la intensidad de corriente.

La ley de Faraday menciona que un flujo magnético variable en el tiempo, el cual atraviesa un circuito cerrado con un área predeterminada, formado por un material conductor sin portadores de energía, de “N” espiras, produce un bucle concéntrico con el campo eléctrico tangente en cada punto del circuito, Figura 16.

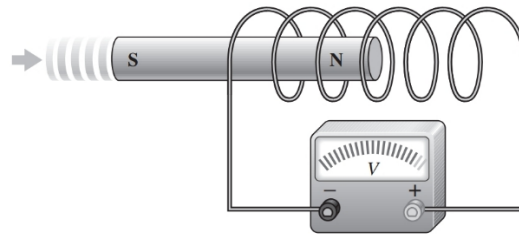


Figura 16. Voltaje inducido creado por un campo magnético cambiante.

Fuente: (Floyd, 2007, pág. 530).

$$F_{em} = N \frac{d\phi_m}{dt} \quad [V] \quad (13)$$

Esta observación propuesta por Michael Faraday y de manera paralela por el físico Joseph Henry no describe plenamente el fenómeno físico, por ello, tiempo después esta expresión fue complementada por el físico Heinrich Lenz, formulando la ecuación denominada como “Ley de Faraday – Lenz”, partiendo de la ecuación (13), la contribución de Lenz recabe en, describir que el flujo variable del campo magnético a través de un circuito cerrado induce una corriente eléctrica en el circuito y esta corriente produce su propio campo magnético que se opone al campo magnético el cual la origino.

$$F_{em} = -N * \frac{d\phi_m}{dt} \quad (14)$$

Esta expresión es relevante ya que, si se considera que el flujo magnético implica la existencia de una corriente eléctrica inducida; se puede definir al campo magnético como una función de la corriente a la vez que, esta corriente inducida es una función que depende del tiempo $\phi_m(I(t))$ (Simón y otros, 2008, pág. 27), por lo que al aplicar la regla de la cadena de la derivada y luego asumiendo valores netos para el flujo y para la corriente eléctrica, la ecuación (14) se reescribe como:

$$F_{em} = -N * \left(\frac{d\phi_m}{dI}\right) * \left(\frac{dI}{dt}\right) = \left(\frac{\phi_m}{I}\right) * \left(\frac{I}{t}\right) \quad (15)$$

La constante de proporcionalidad entre el flujo magnético concatenado y la corriente que lo crea se define como coeficiente de inducción o también es generalmente denominado como inductancia.

$$L_o = \frac{\Phi_m}{I} \quad [H] \quad (16)$$

Para caracterizar a los cables eléctricos con la inductancia se realiza un estudio enfocado en un solo conductor y mediante su resultado se ajusta el efecto inductivo a distintos arreglos de cables, para ello se selecciona un tramo del material de estudio que de acuerdo con varios autores de libros académicos encargados de instruir el fenómeno del electromagnetismo en español, coinciden en, que el tramo sea de un metro de longitud y de geometría cilíndrica para que se asemeje a la figura de un cable eléctrico como se aprecia en la Figura 17.

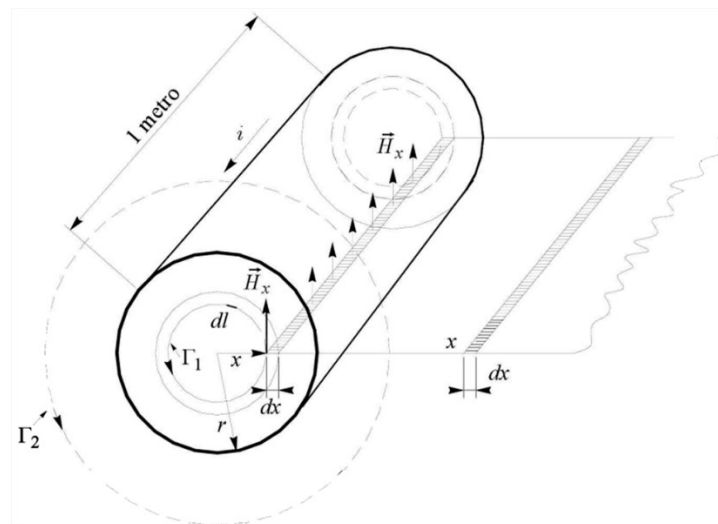


Figura 17. Conductor cilíndrico recto de prueba.

Fuente: (Barrero, 2004, pág. 85).

Para explicar el efecto inductivo se emplea la ley de Ampere, el cual relaciona la corriente que fluye a través de un hilo conductor y el campo magnético generado por esta corriente por ello se definen dos secciones de estudio (Figura 18) por los cuales existe el flujo magnético que aportan de manera significativa al valor de la inductancia y es importante hallar las expresiones para cuantificarlas, por ello la ecuación (16) se redefine para detallar el flujo neto como:

$$L_{Neto} = L_{interno} + L_{externo} \quad (17)$$

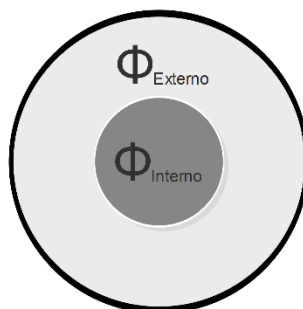


Figura 18. Campo magnético interno y externo debido al flujo de la corriente en el conductor.

Fuente: Autor.

Conocida la geometría de análisis, además de, despreciar el efecto piel y asumiendo una densidad de corriente constante en toda el área transversal (premisa que es válida ya que la frecuencia de operación del sistema eléctrico de distribución en el país es de 60 Hz), por lo cual la ecuación que permite hallar la inductancia interna de un hilo conductor sólido a través del camino Γ_1 (Figura 17) es:

$$L_{interno} = \frac{\mu_o}{8\pi} \quad (18)$$

Para hallar la inductancia externa se sigue el razonamiento anterior por lo que ahora se selecciona el camino Γ_2 (Figura 17), la ecuación (17) se ajusta obteniendo la siguiente ecuación.

$$L_{externo} = \frac{\mu_o}{2\pi} * \ln \frac{d}{r} \quad (19)$$

Mediante las ecuaciones (17), (18) y (19), la inductancia total o autoinductancia del conductor eléctrico se escribe como:

$$L_{Neto} = L_{interno} + L_{externo}$$

$$L_{Neto} = \left(\frac{\mu_o}{8\pi}\right) + \left(\frac{\mu_o}{2\pi} * \ln \frac{d}{r}\right) = \frac{\mu_o}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r}\right)$$

$$L_{Neto} = \frac{\mu_o}{2\pi} * \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r}\right) \quad (20)$$

Donde:

d : distancia entre dos puntos que describe la frontera del radio del conductor eléctrico y un punto externo arbitrario al conductor.

r : radio que describe el conductor eléctrico.

μ_o : permeabilidad magnética con un valor de $4 * \pi * 10^{-7} \text{ H/m}$.

La ecuación (20) suele tener diferentes representaciones, por practicidad se toma la simplificación de la expresión anterior, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Si } \frac{1}{4} = \ln e^{\frac{1}{4}};$$

$$L_{Neto} = \frac{\mu_o}{2\pi} * \left(\ln e^{\frac{1}{4}} + \ln \frac{d}{r}\right) = \frac{4 * \pi * 10^{-7}}{2\pi} * \ln \left(e^{\frac{1}{4}} * \frac{d}{r}\right)$$

$$L_{Neto} = 2 * 10^{-7} * \ln \left(\frac{d}{e^{-\frac{1}{4}} * r}\right)$$

$$\text{Si } e^{-\frac{1}{4}} = k;$$

$$L_{Neto} = 2 * 10^{-7} * \ln \left(\frac{d}{k * r}\right) \quad [H/m] \quad (21)$$

La ecuación (21) se aplica a cables eléctricos formados por varios hilos realizando las siguientes precisiones.

La variable d , de la ecuación (21), se redefine como la Distancia Media Geométrica (DMG), la cual se calcula como la distancia media equivalente entre la disposición de los conductores portadores de energía (Grisby, 2012, pág. 254), en redes subterráneas pueden colocarse de forma horizontal (Figura 19) y, además, como agrupaciones que dependen del número de fases (Figura 20).

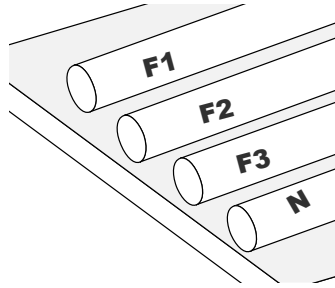


Figura 19. Disposición horizontal de cables eléctricos.

Fuente: Autor.

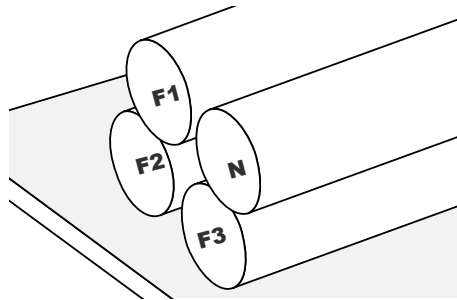


Figura 20. Agrupación de cables eléctricos.

Fuente: Autor.

De igual manera la variable r , de la ecuación (21), se adapta a conductores de múltiples hilos, como el Radio Medio Geométrico (RMG), el cual se define como la distancia media equivalente entre los hilos que conforman un solo cable eléctrico (Figura 21), el valor de la constante k depende del número de hilos existentes en el cable eléctrico. El producto de $k * r$ (Short, 2014, pág. 46), resulta en el valor del RMG del cable eléctrico. La ecuación (21), se reescribe como (22).

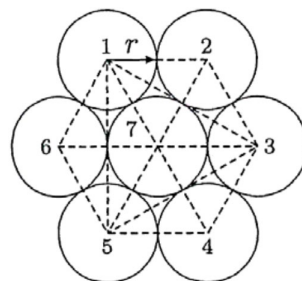


Figura 21. Trazos para obtener el RMG de un conductor de 7 hilos.

Fuente: (Universidad de Alcalá, 2019).

Numero de hilos	Factor k
1	0,7788
3	0,6778
7	0,7256
19	0,7577
37	0,7678
61	0,7722

Figura 22. Factores k para cables formado por varios hilos.

Fuente: (Short, 2014, pág. 46).

$$L_{Neto} = 2 * 10^{-7} * \ln\left(\frac{DMG}{RMG}\right) \quad [H/m] \quad (22)$$

Con todo lo dispuesto anteriormente, la impedancia del cable de aluminio tipo TTU se define como un numero complejo representado por la letra Z mayúscula, el cual comprende de una parte real (R_{CA}) y una parte imaginaria (X_L), como se aprecia en la ecuación (23), se diferencia de los demás conductores eléctricos debido a las precisiones descritas anteriormente.

$$Z_{cable} = R_{CA} + jX_L \quad [\Omega] \quad (23)$$

2.4. Momento eléctrico del cable de aluminio TTU para redes eléctricas de distribución subterráneas de bajo voltaje

De acuerdo con lo establecido en el capítulo previo, los circuitos subterráneos de distribución secundaria se consideran como redes cortas (Figura 23), ya que no superan los 2 km, de extensión en redes de bajo voltaje, entre centros de transformación, por ello el circuito se modela mediante el siguiente esquema y se procede a deducir la caída de voltaje en el cable aislado a través del correspondiente diagrama vectorial (Figura 24).

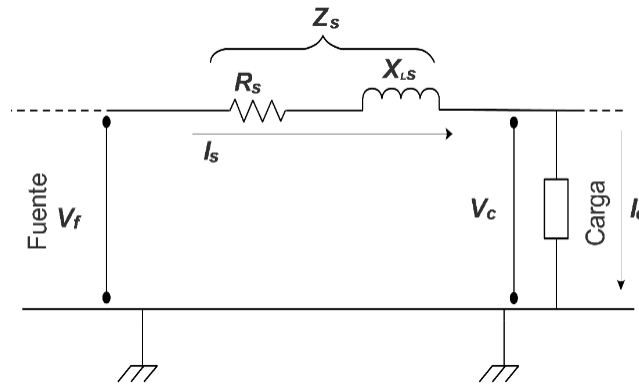


Figura 23. Modelo de una línea corta que transporta energía eléctrica.

Fuente: (Pérez, 1998).

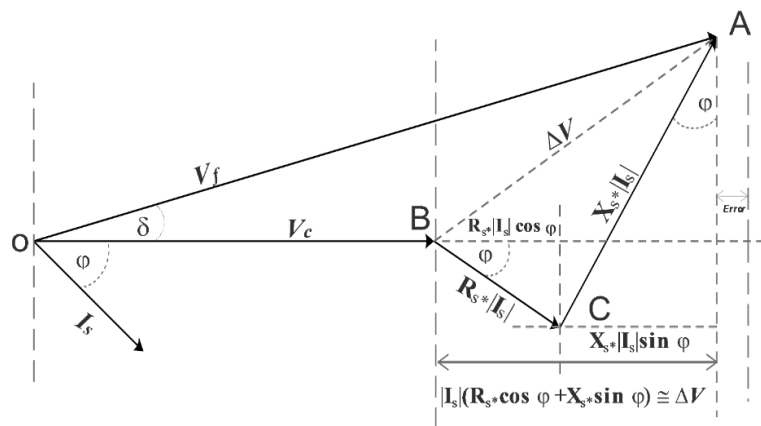


Figura 24. Diagrama vectorial que describe la caída de voltaje en el modelo de línea corta.

Fuente: (Pérez, 1998).

Para hallar la caída de voltaje en la línea de distribución en las condiciones propuestas, se deduce del diagrama fasorial (Figura 25), el segmento de interés es el que describe \overline{BA} , este segmento traza un triángulo rectángulo con \overline{BA} como su hipotenusa.

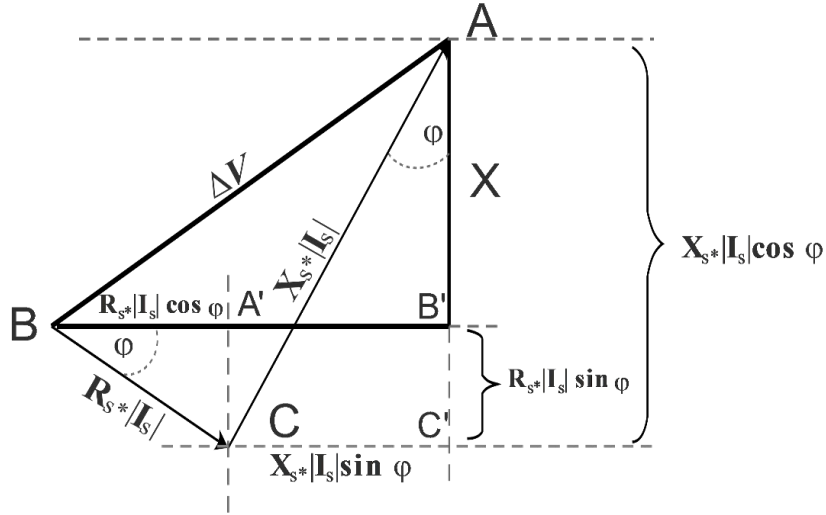


Figura 25. Parte del diagrama vectorial que determina la caída de voltaje en los extremos del cable de distribución.

Fuente: (Pérez, 1998).

$$(\Delta V)^2 = (R_S |I_S| * \cos \varphi + X_S |I_S| * \sin \varphi)^2 + (X_S |I_S| * \cos \varphi - R_S |I_S| * \sin \varphi)^2$$

$$\Delta V = \sqrt{(R_S |I_S| * \cos \varphi + X_S |I_S| * \sin \varphi)^2 + (X_S |I_S| * \cos \varphi - R_S |I_S| * \sin \varphi)^2}$$

$$\Delta V = \sqrt{(|I_S|)^2 * (R_S * \cos \varphi + X_S * \sin \varphi)^2 + (|I_S|)^2 * (X_S * \cos \varphi - R_S * \sin \varphi)^2}$$

$$\Delta V = \sqrt{(|I_S|)^2 * (R_S * \cos \varphi + X_S * \sin \varphi)^2 + (|I_S|)^2 * (X_S * \cos \varphi - R_S * \sin \varphi)^2}$$

$$\Delta V = \sqrt{(|I_S|)^2 * [(R_S * \cos \varphi + X_S * \sin \varphi)^2 + (X_S * \cos \varphi - R_S * \sin \varphi)^2]}$$

$$\Delta V = |I_S| * \sqrt{(R_S * \cos \varphi + X_S * \sin \varphi)^2 + (X_S * \cos \varphi - R_S * \sin \varphi)^2}$$

Si se considera que $R_S = L * \gamma_{eq}$ y $X_S = L * \chi_{eq}$

$$Z = \sqrt{(L * \gamma_{eq} * \cos \varphi + L * \chi_{eq} * \sin \varphi)^2 + (L * \chi_{eq} * \cos \varphi - L * \gamma_{eq} * \sin \varphi)^2}$$

$$Z = \sqrt{(L)^2 * (\gamma_{eq} * \cos \varphi + \chi_{eq} * \sin \varphi)^2 + (L)^2 * (\chi_{eq} * \cos \varphi - \gamma_{eq} * \sin \varphi)^2}$$

$$Z = \sqrt{(L)^2 * (\gamma_{eq} * \cos \varphi + \chi_{eq} * \sin \varphi)^2 + (L)^2 * (\chi_{eq} * \cos \varphi - \gamma_{eq} * \sin \varphi)^2}$$

$$Z = \sqrt{(L)^2 * [(\gamma_{eq} * \cos \varphi + \chi_{eq} * \sin \varphi)^2 + (\chi_{eq} * \cos \varphi - \gamma_{eq} * \sin \varphi)^2]}$$

$$Z = L * \sqrt{(\gamma_{eq} * \cos \varphi + \chi_{eq} * \sin \varphi)^2 + (\chi_{eq} * \cos \varphi - \gamma_{eq} * \sin \varphi)^2}$$

Desarrollando los términos internos de la raíz.

$$A = (\gamma_{eq} * \cos \varphi + \chi_{eq} * \sin \varphi)^2 = \gamma_{eq}^2 * \cos^2 \varphi + 2 * \gamma_{eq} * \cos \varphi * \chi_{eq} * \sin \varphi + \chi_{eq}^2 * \sin^2 \varphi$$

$$B = (\chi_{eq} * \cos \varphi - \gamma_{eq} * \sin \varphi)^2 = \chi_{eq}^2 * \cos^2 \varphi - 2 * \chi_{eq} * \cos \varphi * \gamma_{eq} * \sin \varphi + \gamma_{eq}^2 * \sin^2 \varphi$$

$$A + B = \gamma_{eq}^2 * \cos^2 \varphi + \chi_{eq}^2 * \sin^2 \varphi + \chi_{eq}^2 * \cos^2 \varphi + \gamma_{eq}^2 * \sin^2 \varphi$$

$$A + B = \gamma_{eq}^2 * (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) + \chi_{eq}^2 * (\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi)$$

De la identidad $\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi = 1$.

$$A + B = \gamma_{eq}^2 + \chi_{eq}^2$$

$$Z = L * \sqrt{\gamma_{eq}^2 + \chi_{eq}^2}$$

$$Z = L * Z_k$$

$$\Delta V = |V_f| - |V_c| = |I_S| * L * Z_k \quad [V] \quad (24)$$

Donde:

$|V_f|$: Voltaje suministrado por la fuente, dado en V_{f-f} o V_{f-n} , expresado en [V].

$|V_c|$: Voltaje que cae en la carga, dado en V_{f-f} o V_{f-n} , expresado en [V].

$|I_S|$: corriente que circula en el cable y la carga, es igual en ambos elementos ya que se estudian como un modelo concentrado, dado en [A].

$\sqrt{(R_S * \cos \varphi + X_S * \sin \varphi)^2 + (X_S * \cos \varphi - R_S * \sin \varphi)^2}$: Impedancia aproximada del cable (Z) en [Ω].

$\sqrt{(\gamma_{eq} * \cos \varphi + X_S * \sin \varphi)^2 + (\chi_{eq} * \cos \varphi - R_S * \sin \varphi)^2}$: Impedancia estándar del cable eléctrico ($Z_{Est.}$).

Z_k : Impedancia característica del cable energizado en una configuración monofásica en función de parámetros por unidad de longitud [Ω/m].

2.4.1. La regulación de voltaje y el momento eléctrico del cable de distribución secundario de bajo voltaje

Si a la ecuación (24), en el miembro izquierdo, se divide por el voltaje que cae en la carga y tomando su porcentaje, la expresión se denomina **regulación de voltaje de la línea**.

$$Reg(\%) = \frac{|V_f| - |V_c|}{|V_c|} * 100\% \quad (25)$$

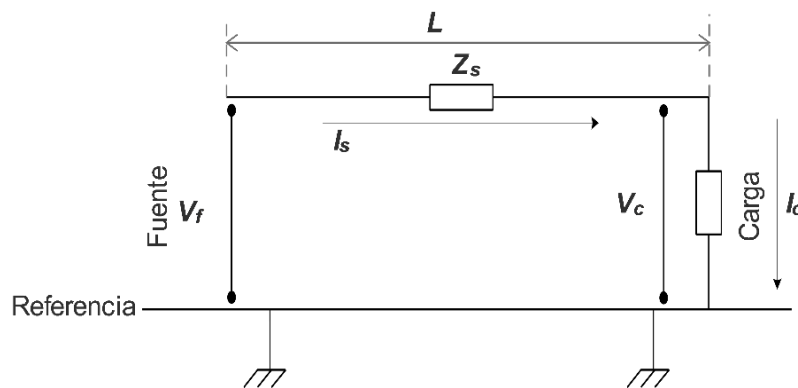


Figura 26. Modelo que describe la regulación de voltaje en el cable de distribución.

Fuente: (Pérez, 1998).

En la ecuación (24), las cantidades del voltaje y de corriente se encuentran expresados en sus denominaciones estándares, voltios [V] y amperios [A], para asociar estas cantidades en los valores nominales que se expresan en la placa del transformador [kVA] es necesario realizar los siguientes ajustes.

Para expresar los voltios [V] de la ecuación (24), en kilo voltios [kV] se realiza lo siguiente.

$$V_f - V_c = |I_s| * L * Z_k * \left([V] * \left(\frac{1[kV]}{1000 [V]} \right) \right)$$

$$V_f - V_c = \frac{|I_s| * L * Z_k}{1000} \quad [kV] \quad (26)$$

La expresión anterior por consecuencia implica que tanto V_f y V_c están expresados en [kV]. Al reemplazar la ecuación (26) en (25), la regulación se reescribe como:

$$Reg(\%) = \frac{|I_s| * L * Z_k}{1000 * |V_c|} * 100\%$$

Si se considera que $|I_s| = |I_c|$, donde S_c se expresa en [kVA] e I_c en [A].

$$|S_c| = |V_c| * |I_s|$$

$$|I_s| = \frac{|S_c|}{|V_c|}$$

$$Reg(\%) = \left(\frac{|S_c|}{|V_c|} \right) \frac{L * Z_k}{1000 * |V_c|} * 100\%$$

$$Reg(\%) = \frac{|S_c| * L}{\frac{10 * (|V_c|)^2}{Z_k}} * 1\%$$

$$|S_k| * L = \frac{10 * (|V_c|)^2}{Z_k} \quad [kVA - m] \quad (27)$$

Donde:

$|V_c|$: considerado como el voltaje de fase V_{f-n} , medidos en [kV].

Z_k : Impedancia característica del conductor de fase definidos por los requerimientos de uso, en este caso están medidos en [Ω/m].

La ecuación (27), es denominada como **“Momento eléctrico característico del conductor”**.

2.4.2. El momento eléctrico en diferentes configuraciones de circuitos de distribución secundarios

Los circuitos polifásicos se pueden representar en su equivalente monofásico, asumiendo un sistema ideal en el cual, las fuentes, cargas e impedancias de cada conductor eléctrico se encuentran balanceados, si se realizan cálculos en el circuito equivalente monofásico, estos valores son válidos para cada uno de los conductores que conforman el sistema eléctrico de distribución.

i) Configuración monofásica a dos hilos

El circuito más sencillo y antiguo, consiste en dos conductores entre los que se mantiene un voltaje relativamente constante, con la carga conectada entre los dos conductores (Figura 27). En casi todos los casos, un conductor está conectado a tierra. La puesta a tierra de uno de los conductores, normalmente llamado neutro, es básicamente una medida de seguridad. Para calcular la caída de voltaje en los circuitos, hay que tener en cuenta tanto la resistencia como la reactancia de los dos conductores.

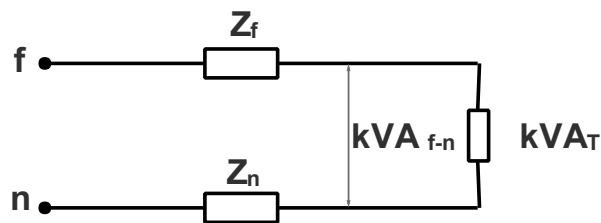


Figura 27. Modelo de un circuito monofásico de distribución en bajo voltaje.

Fuente: (Pérez, 1998).

Se conoce también como el sistema de una fase dos conductores, neutro corrido, en este sistema se identifican dos casos.

Caso a)

Sin puestas a tierra, o con una sola puesta a tierra en el lado de la fuente. Para obtener el circuito monofásico equivalente se establece la impedancia equivalente de la siguiente manera.

$$Z = L * \left((\gamma_f + \gamma_n) + j * (\chi_f + \chi_n) \right) \quad [\Omega/m]$$

Donde:

γ_f y γ_n : componentes de la resistencia de fase y neutro, dado en $[\Omega/m]$.

χ_f y χ_n : reactancia inductiva del cable de fase y neutro, dado en $[\Omega/m]$.

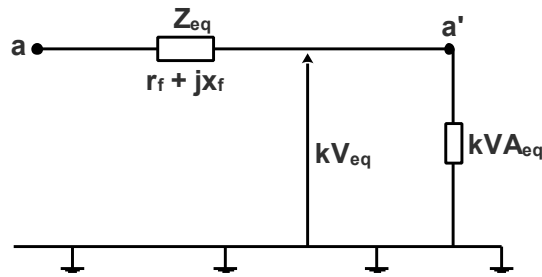


Figura 28, Circuito monofásico equivalente al circuito monofásico a dos hilos.

Fuente: (Pérez, 1998).

Si se considera que, $kVA_{eq} = kVA_T$ y $kV_{eq} = kV_{f-n}$, la ecuación del momento eléctrico se describe como:

$$|S_k| * L = \frac{10 * (|V_{f-n}|)^2}{\sqrt{(\gamma_f + \gamma_n)^2 + (\chi_f + \chi_n)^2}} \quad (28)$$

Si el conductor de fase es igual al conductor del neutro ($\gamma_f = \gamma_n$), el momento eléctrico se reescribe como:

$$|S_k| * L = \frac{10 * (|V_{f-n}|)^2}{2 * \left(\sqrt{\gamma_{eq}^2 + \chi_{eq}^2} \right)}$$

$$|S_k| * L = \frac{10 * (|V_{f-n}|)^2}{2 * Z_k} \quad [kVA - m] \quad (29)$$

Caso b)

Si el neutro es puesto a tierra en la carga y además en múltiples sitios de su recorrido, la impedancia Z_{eq} es la impedancia del conductor de fase más la impedancia equivalente del camino del retorno (paralelo entre neutro y tierra – equivalente de Carson), que dependerá del número y tipo de puestas a tierra y de la resistividad del suelo.

En condiciones normales la resistividad del suelo $\rho = 100 \Omega * m$ y aproximadamente con tres puestas a tierra por km , se ha determinado que solamente entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{3}$ de la corriente de la carga, circula por el conductor del neutro; por lo que aproximadamente el momento eléctrico para esta configuración se evalúa por:

$$|S_k| * L = \frac{10 * (|V_{f-n}|)^2}{1,4 * (Z_k)} \quad [kVA - m] \quad (30)$$

Las expresiones anteriores son válidas aun cuando el conductor neutro es de sección menor al de la fase (típicamente 50% de sección de fase).

ii) Configuración monofásica a tres hilos

Básicamente, el sistema de tres hilos es una combinación de dos sistemas de dos hilos, con un solo hilo que sirve de neutro común a la combinación de los sistemas de dos hilos. En un momento dado, si uno de los conductores energizados está a V_{f-n} voltios (por ejemplo 120 V) "por encima" del neutro, el otro conductor energizado también estará a V_{f-n} voltios (120 V) "por debajo" del neutro, y el voltaje entre los dos conductores vivos (o exteriores) exterior será de $2V_{f-n}$ o V_{f-f} (240 V).

Si la carga está equilibrada entre los dos sistemas (bifilares), el conductor neutro común no lleva corriente y el sistema actúa como un sistema de dos hilos con el doble de voltaje que un solo sistema fase – neutro. Para un sistema equilibrado, la pérdida de potencia y la caída de voltaje se determinan de la misma manera que para un circuito de dos hilos formado por los conductores energizados; el neutro se desprecia.

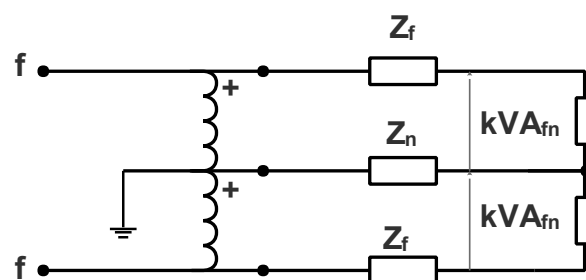


Figura 29. Modelo de un circuito monofásico de dos niveles de voltaje de distribución secundaria.

Fuente: Autor.

Es el circuito típico para alimentar cargas monofásicas en redes secundarias con dos niveles de voltaje (240/120 V).

Si la carga es equilibrada, o, es conectada al nivel de voltaje total (240 V), la corriente en el conductor central (neutro) es cero, por lo cual, el circuito en esas condiciones se puede modelar por:

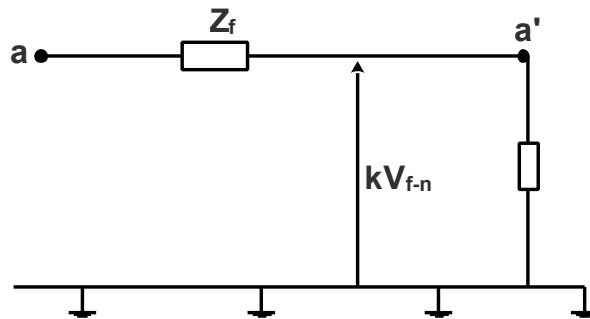


Figura 30. Circuito monofásico equivalente al circuito monofásico a tres hilos.

Fuente: (Pérez, 1998).

Donde la potencia en la carga es $S = \frac{kVA_T}{2}$, la ecuación de momento eléctrico se establece como:

$$|S_k| * L = \frac{20 * (|V_{f-n}|)^2}{Z_k} \quad [kVA - m] \quad (31)$$

iii) Sistema trifásico a cuatro hilos

El sistema trifásico de cuatro hilos es quizás el más utilizado. Equivale a tres sistemas monofásicos de dos hilos alimentados por el mismo generador. El voltaje de cada fase está desfasado 120° con respecto a las tensiones de las otras dos fases, pero un conductor se utiliza como conductor común para todo el sistema.

La caída de voltaje en cada fase se ve afectada por la distorsión de las relaciones de fase debido a la caída de voltaje causada por la corriente en el conductor neutro. Sin embargo, esto no es así cuando el conductor neutro está conectado a tierra tanto en el extremo emisor como en el receptor, en cuyo caso la caída del voltaje es teóricamente nula,

al retornar la corriente por tierra. La caída de voltaje puede obtenerse vectorialmente aplicando la caída de voltaje de cada fase a su impedancia, teniendo en cuenta solo los conductores energizados.

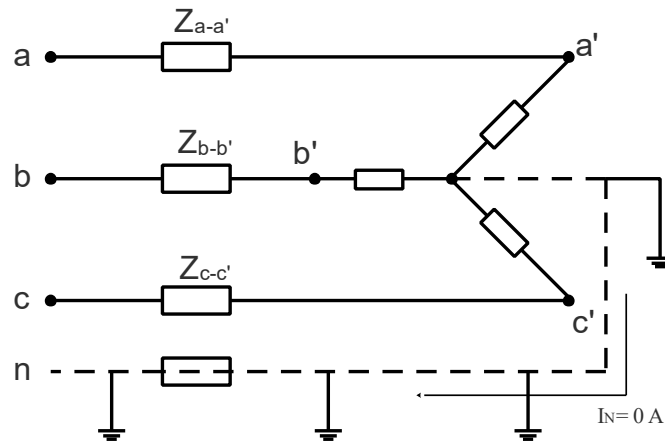


Figura 31. Modelo de un circuito trifásico de distribución en bajo voltaje.

Fuente: (Pérez, 1998).

El circuito equivalente al esquema de tres fases cuatro conductores con neutro corrido con o sin puestas a tierra, por cuanto, teóricamente por el neutro y tierra no circulara corriente alguna. Aun en el caso de pequeños desbalances (< 3%), la aproximación en el cálculo sería aceptable.

El modelo es válido para los sistemas:

- Trifásico a tres conductores con la carga conectada en delta.
- Trifásico a cuatro conductores con la carga conectada en estrella.
- Trifásico a cuatro conductores con múltiples puestas a tierra.

La impedancia equivalente del circuito monofásico se define como:

$$Z = \sqrt{\gamma_{eq}^2 + \chi_{eq}^2} * L \quad [\Omega/m]$$

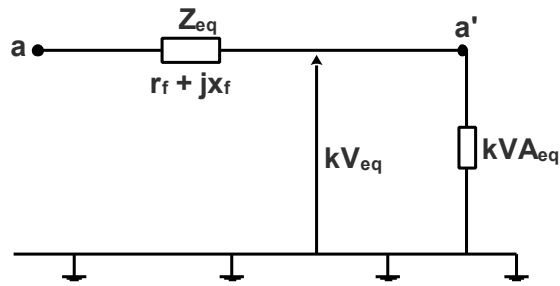


Figura 32. Circuito monofásico equivalente al circuito trifásico a cuatro hilos.

Fuente: (Pérez, 1998).

Si la potencia en la carga es $S = \frac{kVA_T}{3}$ y $kV_{eq} = kV_{f-n}$, la ecuación de momento eléctrico se establece como:

$$|S_k| * L = \frac{30 * (|V_{f-n}|)^2}{Z_k} \quad [kVA - m] \quad (32)$$

La ecuación del momento eléctrico se puede generalizar para los diferentes sistemas polifásicos, condicionando los parámetros de la impedancia de la línea, la cual se si se define en un sistema de distribución equilibrado la impedancia no sufre cambios en su cuantificación, por tanto, la ecuación del momento eléctrico se describe como la ecuación (33).

$$|S_k| * L = \frac{10 * N * (|V_{f-n}|)^2}{Z_k} \quad [kVA - m] \quad (33)$$

Donde N es el número de conductores que se encuentran energizados, las cuales, también se denominan fases del sistema de distribución, descartando los conductores que cumplen con la función de neutro.

Se ha calculado los kVA-m. del conductor de aluminio TTU aislado para los tres sistemas de distribución más usuales empleando las consideraciones que caracterizan al cable de aluminio TTU, además de, extraer ciertos parámetros iniciales tomados del fabricante CENTELSA, estos valores se encuentran tabulados en el Anexo A y B.

2.5. El programa de simulación de redes eléctricas de distribución CYME

El programa CYME ofrece varias funcionalidades de modelización que permiten modelizar en detalle cualquier red de distribución, transmisión o industrial. Permite crear redes equilibradas o desequilibradas, redes secundarias, subestaciones, redes de distribución de bajo voltaje, sistemas de corriente continua y redes malladas. Estas redes pueden ser radiales o malladas y pueden representarse esquemática o geográficamente. Para una representación aún más realista de la red, las funcionalidades de modelización se apoyan en amplias bibliotecas de equipos estándar del sector y controles actualizables por el usuario (Power Business Worldwide (by EATON), 2020).

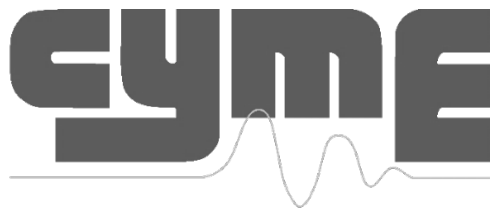


Figura 33. Logotipo del programa de análisis de redes eléctricas (CYME).

Fuente: (Power Business Worldwide (by EATON), 2020).

El programa ofrece una amplia gama de análisis que permiten realizar distintas simulaciones. El software ofrece análisis básicos como flujo de potencia, cortocircuito, distribución de cargas, colocación de condensadores, balance o equilibrado de cargas y arranque de motores.

2.5.1. Modelado y análisis de redes de distribución de bajo voltaje

En la práctica, la modelización del sistema de distribución se detiene en el lado de alto voltaje del transformador de distribución. Sin embargo, con la interconexión de los sistemas eléctricos, los ingenieros intentan estudiar el sistema de distribución en su conjunto, lo que exige modelizar el sistema de distribución secundario.

El módulo de modelización y análisis de redes de distribución de bajo voltaje de CYME permite modelizar y simular detalladamente cualquier circuito alimentado por un transformador de distribución.

Con la mayoría de las empresas de servicios públicos interesadas en mejorar la eficiencia energética de sus sistemas de distribución y en evaluar el impacto de los recursos energéticos distribuidos, se ha vuelto imperativo obtener un modelo de red más completo. El módulo de Modelización y Análisis de Redes de Distribución BT de CYME ayuda a modelizar los sistemas de distribución BT en sus diagramas unifilares actuales (Power Business Worldwide (by EATON), 2020).

El análisis de su red es ahora más completo sin añadir complejidad.

La modelización detallada de los sistemas de distribución de bajo voltaje es ahora posible gracias a las siguientes funciones:

- Opciones de transformadores monofásicos y trifásicos con tomas centrales
- Los cables de acometida: triplex y cuádruplex
- Variedad de cables eléctricos
- Modelo de carga concentrada de bajo voltaje conectada a la toma central
- Opciones de fuentes y medidores conectados a la toma central
- Varios generadores, motores, condensadores y reactancias shunt monofásicos con tomas centrales

El sistema eléctrico de distribución secundario puede desarrollarse y visualizarse en una ventana independiente. Se obtiene más información sin complicar aún más la vista del sistema de distribución. Las funciones de elaboración de informes permiten mostrar la información y los resultados pertinentes.

El módulo proporciona una representación completa y precisa del sistema de distribución. Con el software CYME obtendrá un cálculo de manera precisa las pérdidas en las redes de media y bajo voltaje y la detección de equipos sobrecargados para ayudarle a planificar y mejorar el sistema de cara al futuro (Power Business Worldwide (by EATON), 2020).

- **Transformador con toma central**

El modelo del transformador monofásico y trifásico con toma al centro puede conectarse a la mitad o a todo el voltaje secundario.

Con este modelo de transformador con toma central, las cargas concentradas que representan a cada cliente individual podrán conectarse a la toma central, como en la realidad.

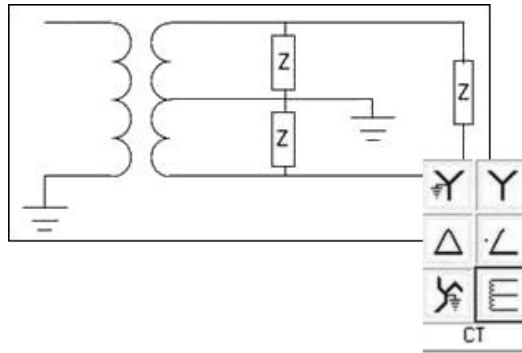


Figura 34. Sistema monofásico a tres hilos en el software CYME.

Fuente: (*Power Business Worldwide (by EATON), 2020*).

- **Ventana del sistema de distribución de bajo voltaje**

Para el sistema de distribución de bajo voltaje se efectúa en una ventana distinta o en la misma ventana que los alimentadores.

Las opciones de visualización permiten al usuario distinguir el sistema de distribución secundario del primario y ver donde se superponen (es decir, donde utilizan los mismos postes).

El sistema de distribución secundario puede cargarse uno a uno o junto con el sistema de distribución primario. Aunque sólo se cargue el sistema de distribución primario o secundario, el equivalente de red para la parte la cual no se halla cargada se calcula con precisión y se tiene en cuenta en las simulaciones. Se facilitan los estudios de pérdidas del sistema, la cargabilidad de los equipos y los escenarios de contingencia (*Power Business Worldwide (by EATON), 2020*).

Todos los análisis pertinentes de CYME (flujo de carga, cortocircuito, distribución de carga, etc.) que puedan realizarse en una red de distribución de medio voltaje deberán realizarse en la red de distribución de bajo voltaje con la misma precisión.

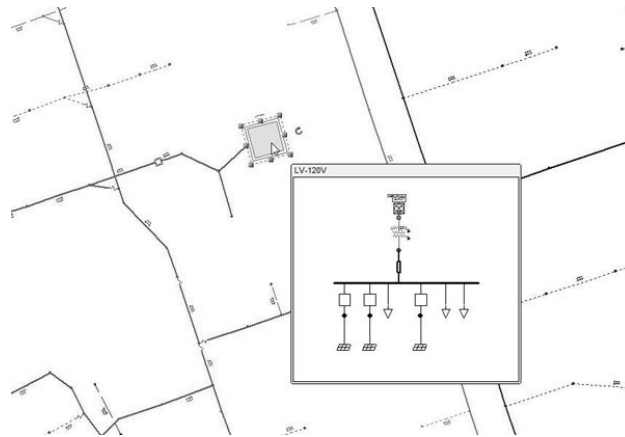


Figura 35. Modelo de distribución en bajo voltaje.

Fuente: (*Power Business Worldwide (by EATON), 2020*).

2.5.2. Dimensionamiento de cables de bajo voltaje

Los cables de bajo voltaje se utilizan ampliamente en instalaciones industriales y públicas donde se requieren tensiones de CA de 1 kV o inferiores. Poder seleccionar el cable adecuado según criterios claros es clave para garantizar la seguridad de la instalación y el funcionamiento fiable del cable durante su vida útil prevista (*Power Business Worldwide (by EATON), 2020*).

El módulo de selección de cables de bajo voltaje de CYME ayuda a los ingenieros eléctricos a realizar selecciones durante la instalación de diseño y a simular diversas condiciones de funcionamiento y cargas de cables.

- **Características del programa**

Los cables de bajo voltaje son cables con un voltaje nominal igual o inferior a 1kV. El cable de bajo voltaje está dimensionado para cubrir las instalaciones de cable no reforzado más comunes en sistemas de servicio, domésticos, comerciales e industriales. No es adecuado para su uso en alimentadores de distribución primaria.

Las distintas instalaciones requieren distintos materiales y diseños de cable. El módulo de selección de cables de bajo voltaje de CYME calcula el tamaño del cable para una ubicación concreta de la red basándose en cualquiera de los siguientes criterios:

- Norma IEC 60364© 5-52: Instalaciones eléctricas de bajo voltaje – Parte 5-52: Selección y montaje de equipos eléctricos – Sistemas de cableado.
- Metodología NEC: Código Eléctrico Nacional NFPA-70-2011©.

Específicamente, el módulo maneja sistemas trifásicos o monofásicos que son radiales y equilibrados. Los materiales conductores soportados por los cálculos son de cobre o aluminio, mientras que los tipos de aislamiento o cable son según las normas.

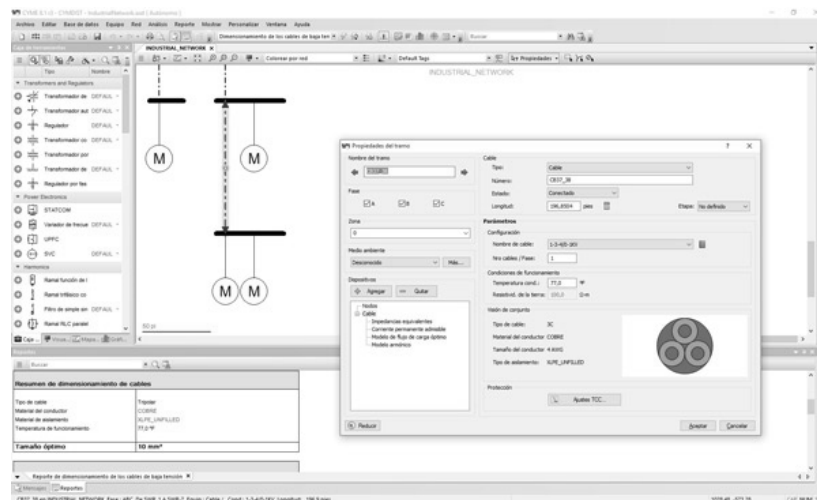


Figura 36. Módulo para la configuración de cables eléctricos.

Fuente: (Power Business Worldwide (by EATON), 2020).

- **Amplia biblioteca de cables**

Un factor clave en el dimensionamiento de los cables es el tipo de cable. El programa CYME incluye una completa biblioteca de cables con una amplia gama de cables de bajo voltaje de diferentes fabricantes. Incluye cables unipolares, tripolares y tripolares con conductores de tierra, así como datos nominales y de fabricación de todos los cables que pueden utilizarse en los cálculos (Power Business Worldwide (by EATON), 2020).

Capítulo 3

El software CYME y el método aproximado para el cálculo de caídas de voltaje en redes eléctricas de distribución subterráneas de bajo voltaje

Los valores de los $kVA - m$ calculados con las ecuaciones correspondientes para cada de los sistemas eléctricos secundarios tienen el objetivo de usarse en el cálculo de las caídas de voltaje en proyectos de electrificación o repotenciación, para realizar este computo, varios softwares emplean flujos de potencia, lo que implica procesos complicados, si se desea realizar su cuantificación manual, una buena aproximación es el modelo serie de las redes eléctricas subterráneas o aéreas de distribución de bajo voltaje en el cual es importante conocer el valor de los $kVA - m$, tanto de las cargas definidas como concentradas y del conductor que se emplea, con los valores de los $kVA - m$ ya calculados, se realiza el cálculo de las caídas de voltaje tanto manualmente mediante el método aproximado y usando el programa de simulación de redes eléctricas CYME 9.0 Rev 04.

3.1. Metodología para la determinación de las caídas de voltaje, vigente en la empresa eléctrica EMELNORTE

El cálculo de las caídas de voltaje que emplea EMELNORTE es determinado mediante el modelo en serie de redes de transmisión cortas, tanto para sistemas eléctricos de distribución subterráneos como aéreos, para familiarizarse con el método se desarrolla el computo de las caídas de voltaje en dos redes de prueba, el departamento de estudios eléctricos establece dos metodologías, la primera de ellas se caracteriza por que en su esquema ya se conocen el consumo de los usuarios y la segunda se distingue en conocer la zonificación de estratos, en los siguientes apartados se detalla de manera general el funcionamiento de ambas metodologías.

3.1.1. Caídas de voltaje mediante el método del modelo serie en el cual es conocido el consumo de los usuarios

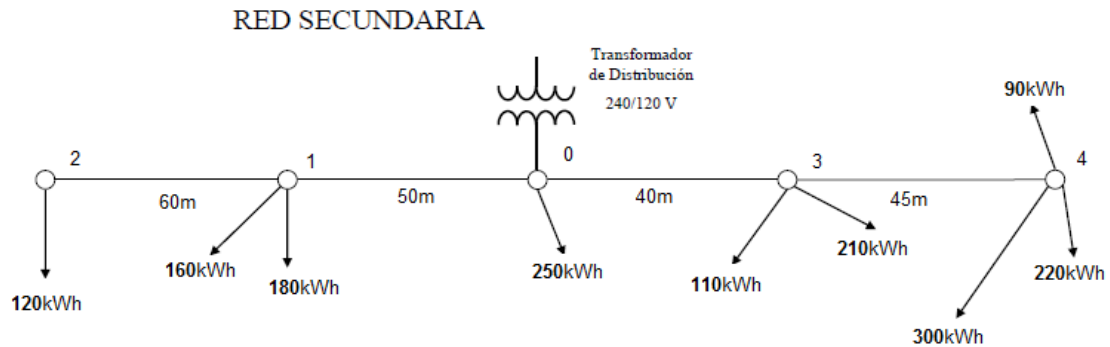


Figura 37. Red de prueba en el cual se conoce el consumo por cada usuario.

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

Para desarrollar esta metodología se procede a asumir y calcular los siguientes valores:

- Usuarios: 9 en total.
- Demanda de diseño (DD): valor definido en 19,66 kW, sin considerar el incremento por cocinas de inducción.
- FP: 0,95.
- DD real:

Se calcula considerando el 3,6% de perdidas adicional.

$$DD = 19,66 + (19,66 * 0,036) = 20,36776 \text{ [kW]}$$

- DMD total:

Cálculo de la demanda máxima diversificada con el factor de potencia de 0,95.

$$DMD_{Total} = \frac{DD}{FP} \text{ [kWh]}$$

$$DMD_{Total} = \frac{20,36776}{0,95} = 21,4397 \text{ [kWh]}$$

Se requiere hallar la máxima caída de voltaje en el sistema de análisis, para ello se procede a calcular las caídas de voltaje parciales o por tramo.

El método inicia con el cálculo global de las potencias de todas las cargas en el sistema, en primera instancia se ha tomado en cuenta que ningún usuario tiene la carga adicional de la cocina de inducción, por lo cual, para realizar un estudio más completo se añade el valor de las cocinas de inducción, estos valores se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Valores de incremento por uso de cocinas de inducción.

Consumo (kWh)	Incremento por uso de cocina de inducción (kWh).
0 – 150	100
151 – 250	150
251 – 500	200
> 500	0

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016)

$$\sum \text{Energía ind.} = (220 + 310 + 330 + 400 + 210 + 360 + 500 + 370 + 190) \quad [kWh]$$

$$\sum \text{Energía ind.} = 2890 \quad [kWh]$$

Con el valor total de la sumatoria de las energías de consumo del sistema se calcula el factor k.

$$k = \frac{DMD_{Total}}{\sum kWh}$$

$$k = \frac{DMD_{Total}}{\sum kWh}$$

$$k = \frac{21,4397}{2890} = 0,007419 \quad [kVA/kWh]$$

Con el factor k, se procede a determinar cada valor de la demanda individual en el instante de máxima demanda, empleando la siguiente ecuación.

$$D_{ind.} = k * Energia_{ind} \quad [kVA]$$

$$D_{ind.} = 0,007419 * 400 = 2,9676 \quad [kVA]$$

Se procede de la misma manera para cada punto de carga en cada referencia, el resultado se visualiza en la siguiente tabla.

Tabla 6: Potencias de demanda por número de referencia.

Pozo	Consumo	Energía/pozo	Demanda individual	Demanda por pozo
#	(kWh/mes/cliente)	(kWh)	kVA	kVA
0	400	400	2,97	2,97
1	310	640	2,30	4,75
	330		2,45	
2	220	220	1,63	1,63
3	210	570	1,56	4,23
	360		2,67	
4	500	1060	3,71	7,86
	370		2,74	
	190		1,41	
Total	2890	2890	21,44	21,44

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

En una hoja de cálculo del programa Excel se procede a segmentar el formato del proyecto de electrificación en apartados en los cuales se deben insertar los valores e información requerida para el cálculo de la caída de voltaje máxima del sistema.

El primer apartado consta del encabezado en el cual debe colocarse la información como:

- Tipo de instalación: Subterránea.
- Tipo de conductor: cable de aluminio tipo TTU.
- Tipo de usuario: C.
- Límite de caída de voltaje en el conductor: 3%.
- Elegir tipo de red: Trifásico en arreglo flat.
- Nivel de voltaje: 127/220 V.

- Numero de fases: 3.

El resultado luego de haber llenado la información debe apreciarse como la siguiente imagen.


				COMPUTO DE CAIDAS DE VOLTAJE CIRCUITOS SECUNDARIOS REDES CONVENCIONALES			
NOMBRE DEL PROYECTO:	ELECTRIFICACION "NOMBRE"			Fecha	18-dic.-22	HOJA:	HOJA 2 DE 3
				Tipo de Usuario	C	CENTRO DE TRANSFORMACION No.	
TIPO DE INSTALACIÓN:	SUBTERRANEA	VOLTAJE:	127/220	LIMITE DE CAIDA DE VOLTAJE:	3%		
CONDUCTOR: Preens. "P"; Desn. "D":	TTU	No. FASES:	3	Elgir tipo de Red	Trifásico 4H flat		

Figura 38. Encabezado de la hoja de cálculo en el programa Excel.

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

En la columna de datos que consta de tres sub – columnas numeradas del 1 al 3, se debe llenar de la siguiente manera.

En la columna 1, se coloca los tramos que describen cada punto de carga o referencia designando su numeración correspondiente.

En la columna 2, se ingresa la longitud en metros que existe entre cada punto de carga.

En la columna 3, se ingresa el número de usuarios acumulativos aguas abajo por cada tramo, sin tener en cuenta la carga en la referencia cero, por ejemplo, en el tramo (0 – 1), los usuarios aguas abajo son las flechas que significan cargas y cuantificadas son tres, en el siguiente tramo (1 – 2) solamente existe un solo usuario.

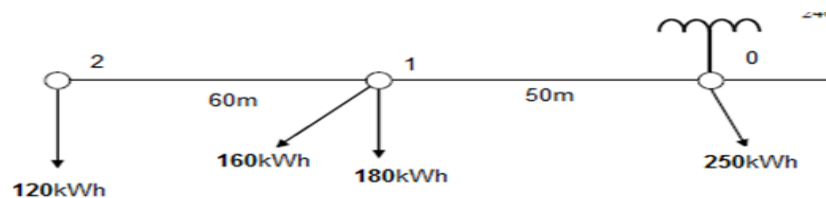


Figura 39. Rama de la red de distribución secundaria de prueba.

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

La información de la sección de datos debe estar llena como se aprecia en la imagen.

DATOS		
TRAMO		Nro.
DESIG.	L(m)	CONSUM.
1	2	3
0-1	50	3
1-2	60	1
0-3	40	5
3-4	45	3

Figura 40. Columna de "Datos" de la hoja de cálculo de Excel.

Fuente: (*Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016*).

En la sección de Carga/usuario que corresponde a la columna 4, se debe colocar las potencias de demanda acumulativas.

En la sección de Luminarias de la columna 5, se debe colocar las potencias de demanda que requieren las luminarias, su implementación es opcional ya que su aporte no altera el método de cálculo.

Carga/usuario	Luminarias
kVA/tramo	kVA/tramo
4	5
6,38	0,000
1,63	0,000
12,09	0,000
7,86	0,000

Figura 41. Columna de "Carga/Usuario" y "Luminarias" de la hoja de cálculo de Excel.

Fuente: (*Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016*).

En la sección de CIRCUITO que corresponde a la columna 6, se debe colocar la configuración de la red a implementar en el proyecto de electrificación o repotenciación.

CIRCUITO
FASE
Conf. de red
6
Trifásico 4H flat
Trifásico 4H flat
Trifásico 4H flat
Trifásico 4H flat

Figura 42. Columna de "Circuito" de la hoja de cálculo de Excel.

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

En la sección de CONDUCTOR, en la columna 7, se debe colocar el calibre del cable o conductor en AWG, mientras que en la columna 8, se debe colocar el FDV característico del cable o conductor, el cual debe estar expresado en $kVA - m$.

CONDUCTOR	
CALIBRE	FDV
AWG	kVA-m
7	8
# 6	175,5822917
# 6	175,5822917
# 6	175,5822917
# 6	175,5822917

Figura 43. Columna de "Conductor" de la hoja de cálculo del programa de Excel.

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

En la sección de COMPUTO, en la columna 9, se debe calcular los $kVA - m$, de cada tramo que corresponden a las potencias de demanda por unidad de longitud, en la columna 10, se calculan las caídas de voltaje parciales por tramo y finalmente en la columna 11, se calculan las caídas de voltaje acumulativas, en esta columna se debe prestar una especial atención ya que se debe identificar el valor máximo que exista en esta columna, la cual puede ubicarse al final de cualquier tramo.

COMPUTO		
CAIDA VOLTAJE (%)		
kVA-m	PARCIAL	ACUMULADO
9	10	11
318,9997013	1,8168	1,8168
97,92548971	0,5577	2,3745
483,6925704	2,7548	2,7548
353,8671105	2,0154	4,7702

Figura 44. Columna de "Computo" de la hoja de cálculo del programa Excel.

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

El resulta de finalizar con el llenado de la hoja de datos debe apreciarse como la siguiente imagen.

DATOS			Carga/usuario	Luminarias	CIRCUITO	CONDUCTOR		COMPUTO		
TRAMO		Nro.			FASE	CALIBRE	FDV	CAIDA VOLTAJE (%)		
DESIG.	L(m)	CONSUM.	kVA/tramo	kVA/tramo	Conf. de red	AWG	kVA-m	kVA-m	PARCIAL	ACUMULADO
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0-1	50	3	6,38	0,000	Trifásico 4H flat	# 6	175,5822917	318,9997013	1,8168	1,8168
1-2	60	1	1,63	0,000	Trifásico 4H flat	# 6	175,5822917	97,92548971	0,5577	2,3745
0-3	40	5	12,09	0,000	Trifásico 4H flat	# 6	175,5822917	483,6925704	2,7548	2,7548
3-4	45	3	7,86	0,000	Trifásico 4H flat	# 6	175,5822917	353,8671105	2,0154	4,7702

Figura 45. Tabla de cálculo de la caída de voltaje completa en el programa de Excel.

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

3.1.2. Caída de voltaje mediante el método del modelo serie propuesto por EMELNORTE, en el cual se considera la zonificación de estratos

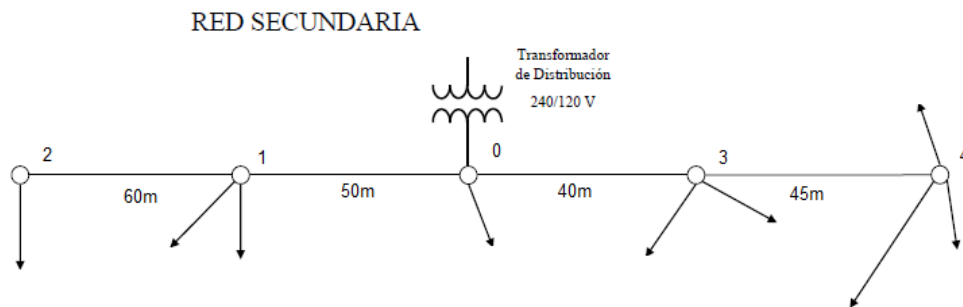


Figura 46. Circuito de prueba en el cual se considera la zonificación de estratos.

Fuente: (*Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016*).

Para desarrollar el sistema propuesto se procede a asumir y calcular los siguientes valores:

- Usuarios: 9 en total.
- Demanda máxima diversificada (DMD): valor definido en 12,72 kW de acuerdo con la tabla de estratificación, esta tabla se encuentra en el Anexo C, sin considerar el incremento por cocinas de inducción.
- FP: 0,95.
- DMD real:

Se calcula considerando el 3,6% de pérdidas adicionales.

$$DMD = 12,72 * (12,72 * 0,036) = 13,1747 \text{ [kW]}$$

- DMD en kVA:

Cálculo de la demanda máxima diversificada con el factor de potencia de 0,95.

$$DD_{Total} = \frac{DD}{FP} \text{ [kVA]}$$

$$DD_{Total} = \frac{13,1747}{0,95} = 13,8681 \text{ [kVA]}$$

La energía global de todas las cargas no conocidas se calcula de la siguiente manera.

$$\sum Energia Tot. = \# usuarios * Estratos de consumo. \quad [kWh]$$

$$\sum Energia Tot. = (9 * 250) \quad [kWh]$$

$$\sum Energia Tot. = 2250 \quad [kWh]$$

El valor de los estratos de consumo se obtiene de la siguiente tabla.

Tabla 7: Estratos de consumo por categoría de pertenencia.

Estratos de consumo	
Categoría por estrato de consumo	kWh/mes (sin considerar la influencia de las cocinas de inducción).
<i>E</i>	0 – 100
<i>D</i>	101 – 150
<i>C</i>	151 – 250
<i>B</i>	251 – 500
<i>A</i>	> 500

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

Con los valores obtenidos se calcula el factor k, de la misma manera que en el apartado anterior.

$$k = \frac{DMD_{Total}}{\sum kWh} \quad [kVA/kWh]$$

$$k = \frac{13,8681}{2250} = 0,006164 \quad [kVA/kWh]$$

Con el factor k, se procede a determinar cada valor de la demanda individual en el instante de máxima demanda, empleando la siguiente ecuación.

$$D_{ind.} = t * Energia_{ind} \quad [kVA]$$

$$D_{ind.} = t * (K * Estratos \ de \ consumo.) \quad [kVA]$$

Donde:

t : es el numero de usuarios por referencia o punto de carga.

De acuerdo con el diagrama del sistema eléctrico de distribución el primer tramo que comprende a la referencia cero y la referencia uno, el número de usuarios a nivel global es la suma de usuarios de todo el tramo de inicio a fin, omitiendo la carga que se encuentra en el transformador ya que en los cálculos su valor se reduce a cero.

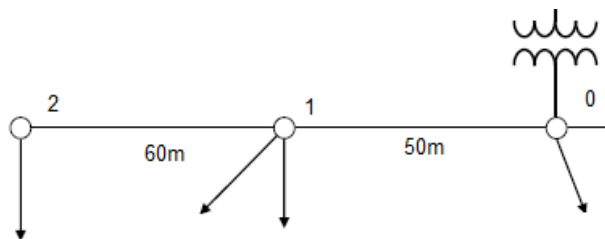


Figura 47. Rama parcial del circuito de prueba de la red secundaria de distribución secundaria.

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

$$D_{ind.} = 3 * (0,006164 * 250) \quad [kVA]$$

$$D_{ind.} = 4,6227 \quad [kVA]$$

Para los demás tramos se procede de manera similar variando el número de usuarios.

DATOS			Carga/usuario
TRAMO		Nro.	
DESIG.	L(m)	CONSUM.	kVA/tramo
1	2	3	4
0-1	50	3	4,6227
1-2	60	1	1,5409
0-3	40	5	7,7045
3-4	45	3	4,6227

Figura 48. Columnas de "Datos" y "Carga/Usuario" de la hoja de cálculo en el programa de Excel.

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

Los valores dentro de la hoja de datos se ingresan de igual forma que en la sección anterior, la hoja de Excel completa se visualiza de la siguiente manera.

DATOS			Carga/usuario	Luminarias	CIRCUITO	CONDUCTOR		COMPUTO		
TRAMO		Nro.			FASE	CALIBRE	FDV	CAIDA VOLTAJE (%)		
DESIG.	L(m)	CONSUM.	kVA/tramo	kVA/tramo	Conf. de red	AWG	kVA-m	kVA-m	PARCIAL	ACUMULADO
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0-1	50	3	4,6227	0,000	Monofásico 3H	# 6	109,754006	231,1347139	2,1059	2,1059
1-2	60	1	1,5409	0,000	Monofásico 3H	# 6	109,754006	92,45388556	0,8424	2,9483
0-3	40	5	7,7045	0,000	Monofásico 3H	# 6	109,754006	308,1796185	2,8079	2,8079
3-4	45	3	4,6227	0,000	Monofásico 3H	# 6	109,754006	208,0212425	1,8953	4,7033

Figura 49. Circuito de prueba en el cual se considera la zonificación de estratos.

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

3.2. Simulación de las caídas de voltaje en redes eléctricas subterráneas de bajo voltaje con CYME

EMELNORTE ha emitido un documento en el cual consta la metodología para el cálculo de caídas de voltaje en redes eléctricas de distribución secundarias en cualquier tipo de ambiente (aéreo y subterráneo), en el archivo figuran dos esquemas en el cual se realiza el cálculo de las caídas de voltaje, para apreciar el resultado se realizó el modelamiento y computo de ambos esquemas, los resultados de la simulación y el método propuesto por EMELNORTE se examinan en el siguiente apartado.

3.2.1. Modelamiento en el programa CYME de las dos redes de prueba aplicada en los estudios eléctricos de EMELNORTE

El desarrollo del modelamiento de los circuitos de distribución subterránea es extenso de explicar, debido a que se deben considerar los parámetros de manera individual, por ello se ha dispuesto del modelamiento de manera general en el Anexo E.

Se puntualiza que para modelar ambos circuitos basta con construir el esquema como se observa en la Figura 50, sin embargo, para tratar los circuitos en sus respectivas condiciones de operación ya sea trifásico cuatro hilos o monofásico a tres hilos se deben realizar su configuración correspondiente (Figura 51).

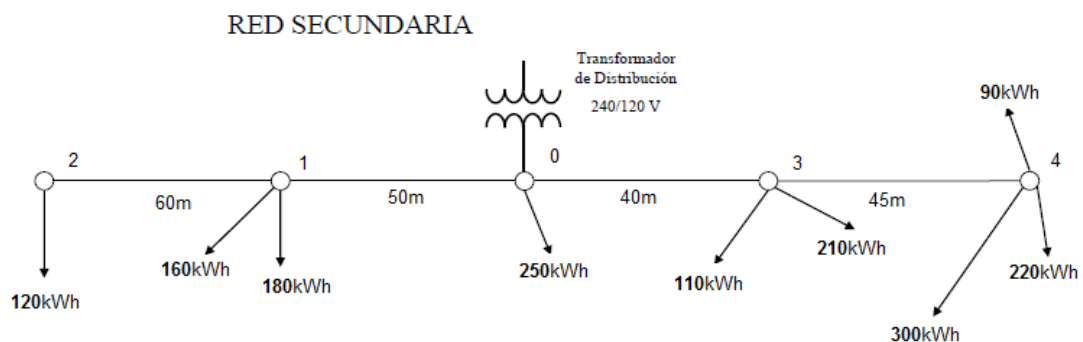


Figura 50. Circuito de prueba el cual se conoce el consumo de los usuarios.

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016).

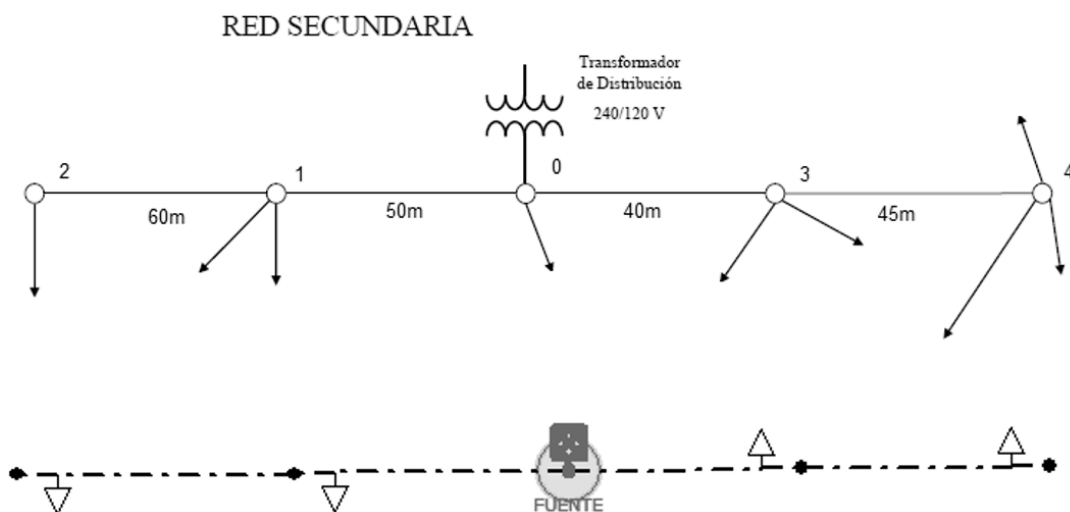


Figura 51. Resultado de la construcción del circuito para la simulación en el programa CYME.

Fuente: (Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE), 2016) y Autor.

3.2.2. Modelamiento en el programa CYME de varias redes eléctricas subterráneas de distribución de bajo voltaje

Para evidenciar la fiabilidad de los resultados obtenidos se ha optado por desarrollar y simular tres nuevos esquemas en diferentes condiciones de operación, para su modelamiento se deben seguir los pasos descritos en Anexo E, teniendo en cuenta su topología y la configuración de cada uno de sus parámetros.

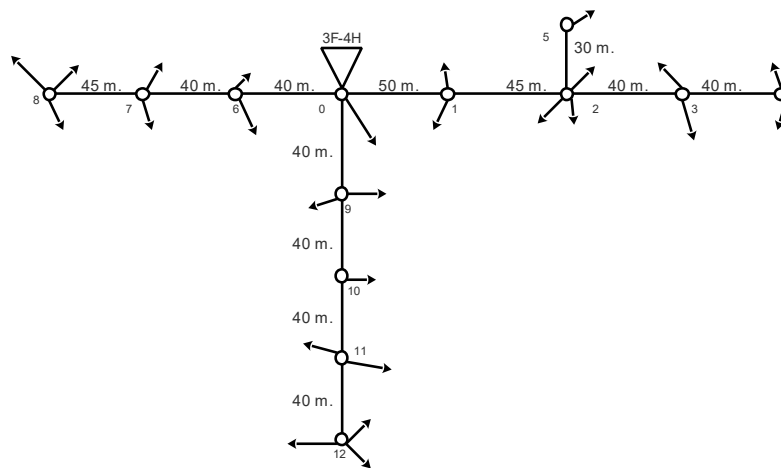


Figura 52. Circuito adicional 1, para su modelamiento y posterior cálculo de las caídas de voltaje.

Fuente: Autor.

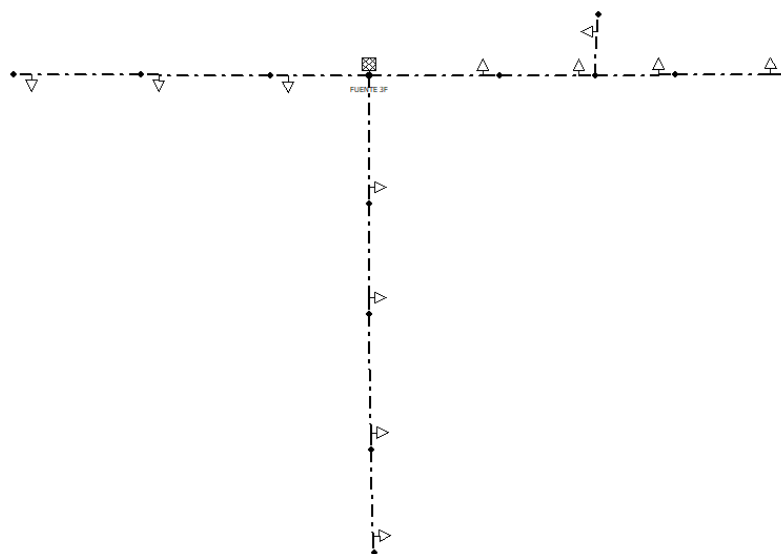


Figura 53. Circuito adicional 1, modelado en el programa CYME.

Fuente: Autor.

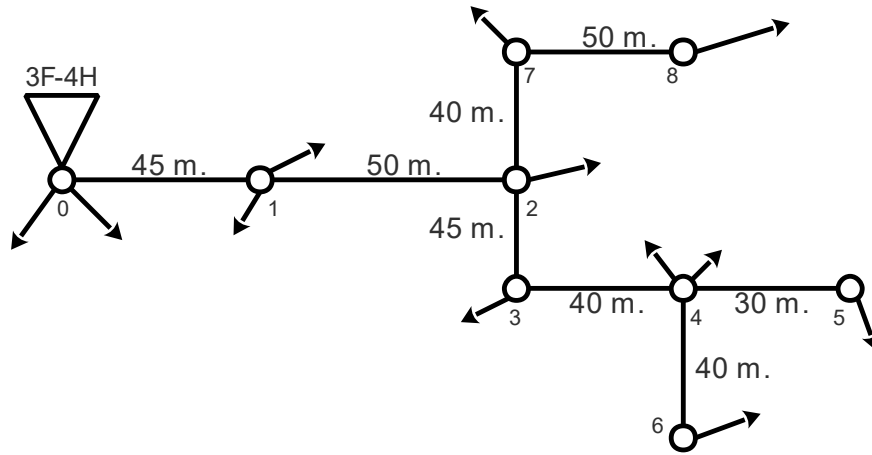


Figura 54. Circuito adicional 2, para su modelamiento y posterior cálculo de las caídas de voltaje.

Fuente: Autor.

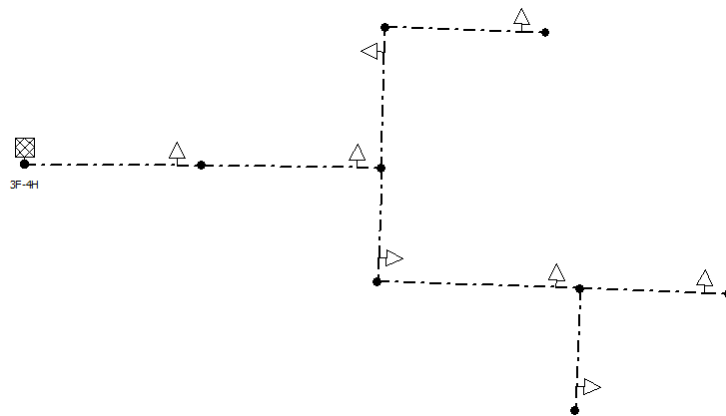


Figura 55. Circuito adicional 2, modelado en el programa CYME.

Fuente: Autor.

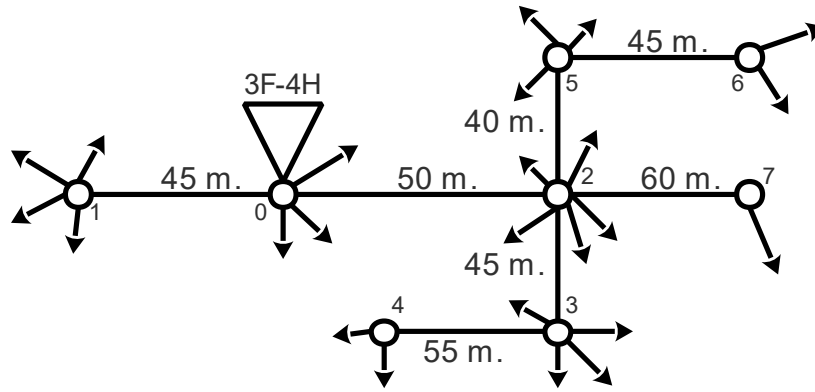


Figura 56. Circuito adicional 3, para su modelamiento y posterior cálculo de las caídas de voltaje.

Fuente: Autor.

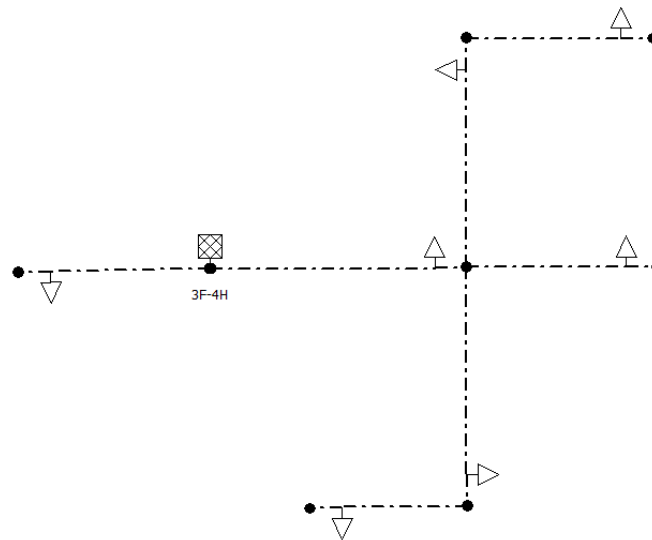


Figura 57. Circuito adicional 3, modelado en el programa CYME.

Fuente: Autor.

3.3. Comparación de las caídas de voltaje obtenidas mediante el uso de los $kVA \cdot m$ del cable de aluminio TTU y la simulación realizada en el software CYME

Para comparar los resultados obtenidos se realiza la tabulación de los valores obtenidos en las simulaciones y el método de cómputo de caídas de voltaje en la hoja de Excel (el método aproximado). La comparación de los resultados permite apreciar la precisión de ambos métodos y determinar si existe una buena exactitud y con ello valorar la determinación de los $kVA - m$ calculados.

3.3.1. El error entre los voltajes al final del tramo con mayor caída de voltaje, obtenidos mediante la simulación y la metodología aplicada en EMELNORTE, conocido el consumo de los usuarios

Con los cálculos de las caídas de voltajes ya determinadas por la simulación y el calculado con el método serie se ha tabulado los resultados con el objetivo de realizar una comparativa, lo cual se obtenido los siguientes valores en el circuito con los consumos conocidos.

Tabla 8. Tabla de comparación de los valores obtenidos por simulación y calculados mediante el método aproximado, circuito con consumos conocidos.

Calibre	Trifásico [%]		Monofásico [%]	
	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.
#6	5,0020	4,9432	8,6699	8,3025
#4	3,1116	3,1140	5,2838	5,1260
#2	1,9595	1,9663	3,2775	3,2980
#1/0	1,2514	1,2475	2,0653	2,0876
#2/0	0,9997	0,9982	1,6524	1,6669
#3/0	0,8039	0,8018	1,3289	1,3347
#4/0	0,6491	0,6479	1,0753	1,0735

Fuente: Autor.

De acuerdo con la Tabla 8, ningún calibre presenta una diferencia de más del 0,4%, el calibre con la mayor diferencia entre los porcentajes es el # 6 AWG que pertenece a la configuración trifásica.

Tabla 9. Errores entre la simulación y el método aproximado, circuito con consumos conocidos (Trifásico).

Tramo con la mayor caída de voltaje (conocido el consumo 3F-4H)						
Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	5,0020	4,9432	11,0044	10,8750	0,1294	1,1763
#4	3,1116	3,1140	6,8455	6,8507	0,0052	0,0758
#2	1,9595	1,9663	4,3109	4,3259	0,0150	0,3480
#1/0	1,2514	1,2475	2,7531	2,7446	0,0085	0,3092
#2/0	0,9997	0,9982	2,1993	2,1961	0,0033	0,1478
#3/0	0,8039	0,8018	1,7686	1,7640	0,0046	0,2613
#4/0	0,6491	0,6479	1,4280	1,4255	0,0026	0,1795

Fuente: Autor.

Mediante la Tabla 9 se establece que la diferencia de los voltajes no supera los 0,13 voltios en todos los calibres, el cable con mayor diferencia es el que pertenece al calibre #6 AWG.

Tabla 10. Errores entre la simulación y el método aproximado, circuito con consumos conocidos (Monofásico).

Tramo con la mayor caída de voltaje (conocido el consumo 1F-3H)						
Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	8,6699	8,3025	20,8078	19,9261	0,8817	4,2372
#4	5,2838	5,1260	12,6811	12,3025	0,3787	2,9860
#2	3,2775	3,2980	7,8660	7,9153	0,0493	0,6268
#1/0	2,0653	2,0876	4,9567	5,0102	0,0535	1,0787
#2/0	1,6524	1,6669	3,9658	4,0005	0,0347	0,8761
#3/0	1,3289	1,3347	3,1894	3,2032	0,0138	0,4329
#4/0	1,0753	1,0735	2,5807	2,5764	0,0043	0,1658

Fuente: Autor.

En base a la Tabla 10 la diferencia entre los resultados no es superior a 1 voltio en cualquier calibre, el cable con la mayor diferencia es el calibre # 6 AWG.

3.3.2. El error entre los voltajes al final del tramo con mayor caída de voltaje obtenidos mediante la simulación y la metodología aplicada en EMELNORTE, en el cual se considera la zonificación de estratos

Con los valores de las caídas de voltaje ya simulados y calculados se procede a comparar la exactitud de ambos métodos en circuitos trifásicos en distintos estratos.

Tabla 11. Tabla de comparación de los valores obtenidos por simulación y calculados mediante el método aproximado, circuito por zonificación de estratos (Trifásico).

Calibre	Estrato A [%]		Estrato B [%]		Estrato C [%]		Estrato D [%]		Estrato E [%]	
	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.
#6	11,1852	10,3904	5,7306	5,6263	3,0223	3,0465	1,9031	1,9385	1,3220	1,3540
#4	6,7777	6,5454	3,5565	3,5443	1,8955	1,9192	1,1985	1,2212	0,8343	0,8530
#2	4,2080	4,1331	2,2363	2,2380	1,1992	1,2119	0,7601	0,7711	0,5298	0,5386
#1/0	2,6560	2,6223	1,4217	1,4199	0,7652	0,7689	0,4858	0,4892	0,3741	0,3417
#2/0	2,1236	2,0982	1,1395	1,1362	0,6140	0,6152	0,3900	0,3915	0,3004	0,2734
#3/0	1,7042	1,6854	0,9162	0,9126	0,4941	0,4942	0,3140	0,3144	0,2419	0,2196
#4/0	1,3738	1,3619	0,7396	0,7375	0,3999	0,3993	0,2538	0,2541	0,1955	0,1775

Fuente: Autor.

En la Tabla 11 se observa que ningún resultado en cualquier estrato no supera el 0,8% de diferencia, además, se aprecia que el estrato con mayor diferencia, son los porcentajes del estrato A, precisamente en los calibres #6 y #4 AWG.

Tabla 12. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos circuito por zonificación de estratos, (Trifásico).

	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
A	#6	11,1852	10,3904	24,6074	22,8588	1,7486	7,1061
	#4/0	1,3738	1,3619	3,0224	2,9963	0,0261	0,8634
B	#6	5,7306	5,6263	12,6073	12,3778	0,2296	1,8209
	#4/0	0,7396	0,7375	1,6271	1,6224	0,0047	0,2876
C	#6	3,0223	3,0465	6,6491	6,7024	0,0533	0,8022
	#4/0	0,3999	0,3993	0,8798	0,8785	0,0012	0,1420
D	#6	1,9031	1,9385	4,1868	4,2648	0,0779	1,8615
	#4/0	0,2538	0,2541	0,5584	0,5590	0,0007	0,1167
E	#6	1,3220	1,3540	2,9084	2,9789	0,0705	2,4234
	#4/0	0,1955	0,1775	0,4301	0,3905	0,0396	9,2157

Fuente: Autor.

De acuerdo con la Tabla 12, la diferencia entre los voltajes al final del tramo con mayor caída de voltaje no supera los 1,75 voltios en los calibres más significativos, el calibre con el peor resultado es el #6 AWG del estrato A. Los resultados completos se pueden observar en el Anexo G.

Luego de observar los resultados entre la simulación y el cálculo de las caídas de voltaje en configuraciones trifásicas se procede a comparar los resultados en la configuración monofásica en los calibres más significativos.

Tabla 13. Tabla de comparación de los valores obtenidos por simulación y calculados mediante el método aproximado, circuito por zonificación de estratos (Monofásico).

Calibre	Estrato A [%]		Estrato B [%]		Estrato C [%]		Estrato D [%]		Estrato E [%]	
	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.
#6	15,2872	17,4517	9,9970	9,4499	5,1517	5,1170	3,2173	3,2559	2,2323	2,2742
#4	11,8675	10,7747	6,0591	5,8344	3,1882	3,1592	2,0061	2,0102	1,3971	1,4041
#2	7,1535	6,9324	3,7477	3,7538	1,9943	2,0326	1,2604	1,2934	0,8797	0,9034
#1/0	4,4450	4,3880	2,3597	2,3761	1,2637	1,2866	0,8007	0,8187	0,5596	0,5718
#2/0	3,5370	3,5037	1,8854	1,8972	1,0118	1,0273	0,6416	0,6537	0,4486	0,4566
#3/0	2,8349	2,8054	1,5157	1,5191	0,8146	0,8226	0,5169	0,5234	0,3615	0,3656
#4/0	2,2882	2,2565	1,2261	1,2219	0,6597	0,6616	0,4188	0,4210	0,2930	0,2941

Fuente: Autor.

Como se observa en la Tabla 13, la diferencia entre los porcentajes obtenidos no es superior al 2,2%, siendo el resultado con mayor diferencia el calibre #6 AWG que pertenece al estrato A.

Tabla 14. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos circuito por zonificación de estratos, (Monofásico).

	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
A	#6	15,2872	17,4517	36,6893	41,8840	5,1947	14,15865
	#4/0	2,2882	2,2565	5,4917	5,4156	0,0761	1,38541
B	#6	9,9970	9,4499	23,9928	22,6797	1,3131	5,47307
	#4/0	1,2261	1,2219	2,9426	2,9325	0,0102	0,34532
C	#6	5,1517	5,1170	12,3641	12,2808	0,0833	0,67396
	#4/0	0,6597	0,6616	1,5833	1,5879	0,0046	0,29183
D	#6	3,2173	3,2559	7,7215	7,8143	0,0928	1,20127
	#4/0	0,4188	0,4210	1,0051	1,0104	0,0053	0,52388
E	#6	2,2323	2,2742	5,3575	5,4582	0,1007	1,87889
	#4/0	0,2930	0,2941	0,7032	0,7057	0,0025	0,36159

Fuente: Autor.

Con los valores de voltajes expuestos en la Tabla 14, se determina que la diferencia no supera los 5,2 voltios, el calibre con la diferencia más significativa es el #6 AWG el cual pertenece al estrato A. Los demás resultados se visualizan en el Anexo G.

Ahora se procede a comparar los resultados de los circuitos adicionales 1, 2 y 3, en los estratos C, B y A respectivamente, los cuales presentan diferentes condiciones de funcionamiento.

Tabla 15. Tabla de comparación de los valores obtenidos por simulación y calculados mediante el método aproximado, circuitos adicionales 1, 2 y 3 (Trifásico).

Calibre	Estrato C [%]		Estrato B [%]		Estrato A [%]	
	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.
#6	7,4765	7,2430	17,9076	19,3418	23,9205	28,1405
#4	4,6158	4,5627	13,4226	12,1844	18,9531	17,7272
#2	2,8933	2,8812	8,1096	7,6939	12,2303	11,1939
#1/0	1,8362	1,8279	5,0471	4,8814	7,4773	7,1020
#2/0	1,4706	1,4626	4,0175	3,9059	5,9205	5,6827
#3/0	1,1818	1,1748	3,2379	3,1373	4,7168	4,5645
#4/0	0,9536	0,9494	2,5835	2,5353	3,7813	3,6886

Fuente: Autor.

En el circuito adicional 1, se aprecia que la diferencia entre los porcentajes en todos los calibres no supera el 0,25%, mientras que en el circuito adicional 2, se observa que la diferencia entre los porcentajes obtenidos no supera el 1,45% en cualquiera de los calibres, finalmente en el circuito adicional 3 la diferencia entre los porcentajes obtenidos no es superior al 4,1% en todos los calibres.

Tabla 16. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos, circuito adicional 1 por zonificación de estratos, (Trifásico).

C	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 3F-4H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	7,4765	7,2430	16,4483	15,9346	0,5137	3,1233	
#4	4,6158	4,5627	10,1548	10,0380	0,1167	1,1495	
#2	2,8933	2,8812	6,3653	6,3385	0,0267	0,4197	
#1/0	1,8362	1,8279	4,0396	4,0215	0,0182	0,4493	
#2/0	1,4706	1,4626	3,2353	3,2178	0,0175	0,5406	
#3/0	1,1818	1,1748	2,6000	2,5846	0,0153	0,5890	
#4/0	0,9536	0,9494	2,0979	2,0887	0,0093	0,4416	

Fuente: Autor.

En la Tabla 16, se aprecia que la diferencia no supera los 0,52 voltios en todos los calibres, la mayor diferencia se presenta en el calibre #6 AWG.

Tabla 17. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos, circuito adicional 2 por zonificación de estratos, (Trifásico).

B	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 3F-4H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	17,9076	19,3418	39,3967	42,5519	3,1552	8,0088	
#4	13,4226	12,1844	29,5297	26,8057	2,7240	9,2247	
#2	8,1096	7,6939	17,8411	16,9265	0,9146	5,1262	
#1/0	5,0471	4,8814	11,1036	10,7390	0,3646	3,2834	
#2/0	4,0175	3,9059	8,8385	8,5929	0,2456	2,7783	
#3/0	3,2379	3,1373	7,1234	6,9021	0,2213	3,1067	
#4/0	2,5835	2,5353	5,6837	5,5776	0,1061	1,8671	

Fuente: Autor.

De acuerdo con la Tabla 17, la diferencia no es mayor a los 3,2 voltios en cualquier calibre, se observa que el calibre con mayor diferencia es el #6 AWG.

Tabla 18. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos, circuito adicional 3 por zonificación de estratos, (Trifásico).

A	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 3F-4H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	23,9205	28,1405	52,6251	61,9090	9,2839	17,6416	
#4	18,9531	17,7272	41,6968	38,9998	2,6971	6,4683	
#2	12,2303	11,1939	26,9067	24,6265	2,2801	8,4742	
#1/0	7,4773	7,1020	16,4501	15,6243	0,8258	5,0198	
#2/0	5,9205	5,6827	13,0251	12,5019	0,5232	4,0167	
#3/0	4,7168	4,5645	10,3770	10,0419	0,3351	3,2291	
#4/0	3,7813	3,6886	8,3189	8,1149	0,2040	2,4523	

Fuente: Autor.

En la Tabla 18, la diferencia es notoria, en el circuito adicional 3 de estrato A, ya que el calibre # 6 presenta mayor diferencia con 8,9308 voltios, y los calibres # 4 y # 2 también presentan diferencias notorias no superiores a 3 voltios; la diferencia en el calibre #6, se debe a que el software CYME al detectar una caída de voltaje superior al 15%, de manera automática trata de compensar la caída de voltaje reduciendo el porcentaje desde un 0,2% hasta un valor que el software considere pertinente.

Ahora se procede a realizar la comparación de los porcentajes obtenidos en los circuitos adicionales 1,2 y 3, en la configuración monofásica (1F – 3H).

Tabla 19. Tabla de comparación de los valores obtenidos por simulación y calculados mediante el método aproximado, circuitos adicionales 1, 2 y 3 (Monofásico).

Calibre	Estrato C [%]		Estrato B [%]		Estrato A [%]	
	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.
#6	13,2170	12,1653	24,9851	31,2971	32,4990	47,2647
#4	7,9145	7,5109	18,1365	19,4447	24,6856	29,1815
#2	4,8660	4,8325	14,2133	12,6079	20,0663	18,7751
#1/0	3,0515	3,0588	8,5754	8,0603	13,1655	11,8842
#2/0	2,4375	2,4424	6,7742	6,4681	10,1196	9,4892
#3/0	1,9581	1,9556	5,3982	5,2023	8,0180	7,5979
#4/0	1,5831	1,5730	4,3392	4,1975	6,4132	6,1113

Fuente: Autor.

De acuerdo con la Tabla 19, el circuito adicional 1 que corresponde al estrato C la diferencia entre las caídas de voltaje es notoria y desfavorable en los calibres #6 y #4, puesto que la mayor diferencia es de 1,1026%. En el circuito adicional 2 que corresponde al

estrato B, las diferencias son elevadas en los calibres #1/0, #2, #4 y #6, la mayor diferencia entre ambos valores es de 6,3120%. En el circuito adicional 3, que corresponde al estrato A, solamente el calibre #4/0 guarda una exactitud aceptable, ya que, la diferencia es desfavorable en los demás calibres.

Tabla 20. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos, circuito adicional 1 por zonificación de estratos, (Monofásico).

C	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 1F-3H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto \pm [V]	Error relativo \pm %
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	13,2170	12,1653	31,7208	29,1968	2,5240	7,9570	
#4	7,9145	7,5109	18,9948	18,0262	0,9686	5,0991	
#2	4,8660	4,8325	11,6784	11,5979	0,0805	0,6890	
#1/0	3,0515	3,0588	7,3236	7,3412	0,0176	0,2403	
#2/0	2,4375	2,4424	5,8500	5,8618	0,0118	0,2009	
#3/0	1,9581	1,9556	4,6994	4,6935	0,0060	0,1274	
#4/0	1,5831	1,5730	3,7994	3,7751	0,0243	0,6395	

Fuente: Autor.

En el circuito del estrato C de la *Tabla 20*, en los calibres desde el #4/0 hasta el #2 las diferencias son descartables ya que las diferencias no superan los 0,22 voltios, en los demás calibres la diferencia debe ser discutida para ser validada como útil.

Tabla 21. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos, circuito adicional 2 por zonificación de estratos, (Monofásico).

B	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 1F-3H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto \pm [V]	Error relativo \pm %
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
6	24,9851	31,2971	59,9642	75,1131	15,1489	25,2632	
4	18,1365	19,4447	43,5276	46,6673	3,1397	7,2131	
2	14,2133	12,6079	34,1119	30,2589	3,8530	11,2952	
1/0	8,5754	8,0603	20,5810	19,3447	1,2363	6,0071	
2/0	6,7742	6,4681	16,2581	15,5235	0,7346	4,5181	
3/0	5,3982	5,2023	12,9557	12,4855	0,4702	3,6295	
4/0	4,3392	4,1975	10,4141	10,0740	0,3401	3,2655	

Fuente: Autor.

De acuerdo con la *Tabla 21*, solamente los calibres #2/0, #3/0 y #4/0, presentan diferencias aceptables ya que los valores no difieren en no más de 0,74 voltios, en los demás calibres las diferencias son evidentemente elevadas, por tanto, no debe entrar en discusión su utilidad.

Tabla 22. Errores entre la simulación y el método aproximado de los calibres más significativos, circuito adicional 3 por zonificación de estratos, (Monofásico).

A	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 1F-3H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto \pm [V]	Error relativo \pm %
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	32,4990	47,2647	77,9976	113,4354	35,4378	45,4344	
#4	24,6856	29,1815	59,2454	70,0356	10,7901	18,2126	
#2	20,0663	18,7751	48,1591	45,0603	3,0988	6,4345	
#1/0	13,1655	11,8842	31,5972	28,5220	3,0752	9,7324	
#2/0	10,1196	9,4892	24,2870	22,7741	1,5129	6,2294	
#3/0	8,0180	7,5979	19,2432	18,2350	1,0082	5,2392	
#4/0	6,4132	6,1113	15,3917	14,6672	0,7245	4,7070	

Fuente: Autor.

De la *Tabla 22*, el único calibre con la diferencia aceptable es el #4/0 ya que no supera los 0,74 voltios de variación entre los resultados, los demás calibres no entran en el margen de utilidad analítica, por tanto, son descartados.

Nota importante: para mejorar los resultados el departamento de estudios eléctricos de EMELNORTE emplea ecuaciones de ajuste, sin embargo, en el presente trabajo no es sustancialmente útil el uso de dichas ecuaciones, ya que, la empresa eléctrica ha adquirido el módulo de simulación de redes eléctricas de baja voltaje de CYME, haciendo que las ecuaciones sean prescindibles dentro del margen de análisis, por ello, al usar las ecuaciones de ajuste la mejora es mínima e incluso en algunos casos empeora la similitud entre ambos resultados, para sostener lo previamente mencionado se deja a consideración las ecuaciones de ajuste en el Anexo F.

3.3.3. Observaciones sobre la precisión entre los valores calculados y simulados

Se ha desarrollado la simulación y el cálculo de las caídas de voltaje en un circuito simple conectado a una sola carga con el fin de observar la diferencia entre los valores de las caídas de voltaje, se ha condicionado el circuito a una carga limite, puesto que, CYME en caídas elevadas afecta el resultado final, en la red trifásica la carga limite es 5 kVA, mientras que en la red monofásica la carga limite es 2 kVA. Con ello los resultados obtenidos son los siguientes.

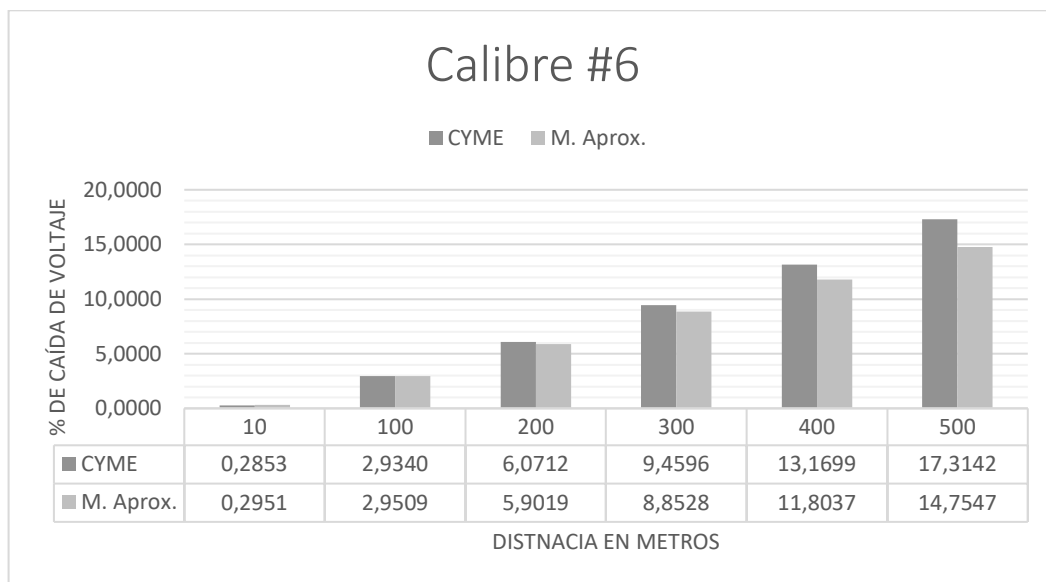


Figura 58. Caída de voltaje trifásico a carga constante.

Fuente: Autor.

De acuerdo con la Figura 58, existe una aceptable similitud de resultados, hasta 300 metros en el calibre #6 del cable de aluminio TTU asilado con carga constante.

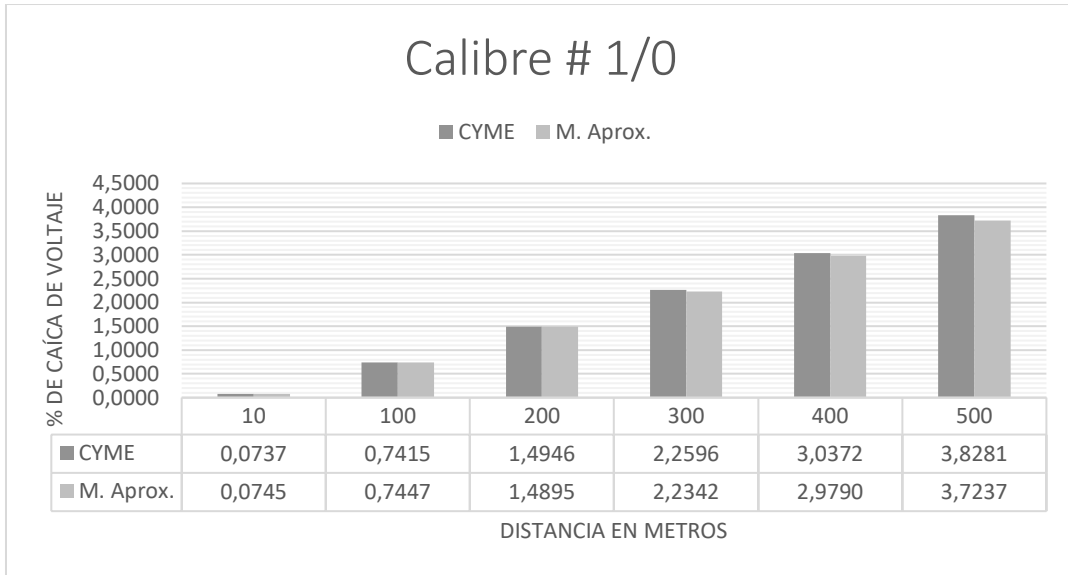


Figura 59. Caída de voltaje trifásico a carga constante.

Fuente: Autor.

Como se parecía en la Figura 59, la diferencia es aceptable en todo el trayecto de longitud de 500 metros en el calibre #1/0 del cable TTU aislado con carga constante.

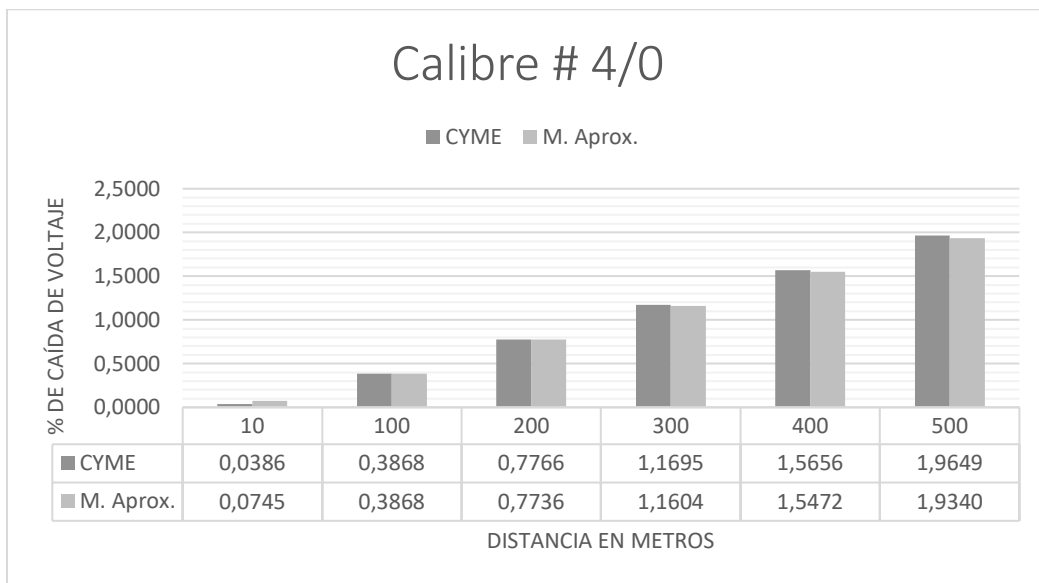


Figura 60. Caída de voltaje trifásico a carga constante.

Fuente: Autor.

Al observar la Figura 60, se aprecia que la diferencia entre ambos métodos es despreciable, en el calibre # 4/0 del cable de aluminio TTU aislado con carga constante.

Ahora se observa lo que ocurre al comparar la configuración monofásica en un tramo de 500 metros a carga constante.

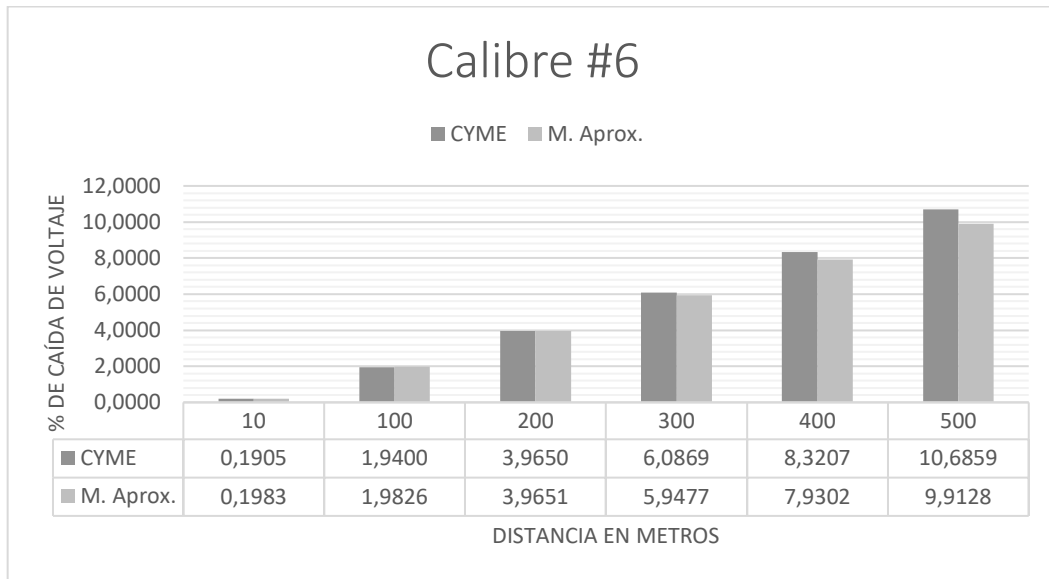


Figura 61. Caída de voltaje monofásico a carga constante.

Fuente: Autor.

De la Figura 61, se determina que la semejanza de los valores calculados por ambos métodos es aceptable hasta los 400 metros de longitud, en el calibre #6 del cable de aluminio TTU aislado con carga constante.

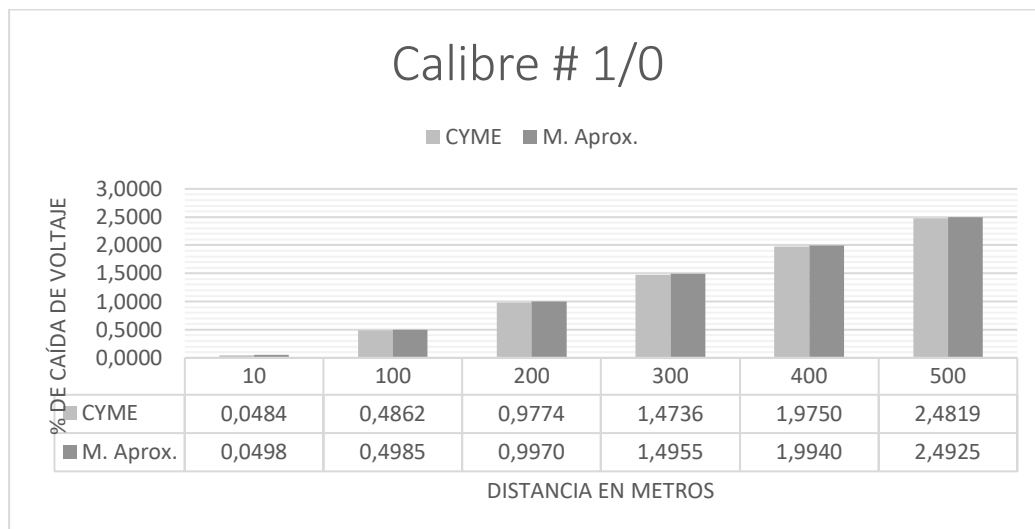


Figura 62. Caída de voltaje monofásico a carga constante.

Fuente: Autor.

De acuerdo con Figura 62, La diferencia es despreciable en toda la longitud de 500 metros en el calibre #1/0 del cable de aluminio TTU aislado con carga constante.

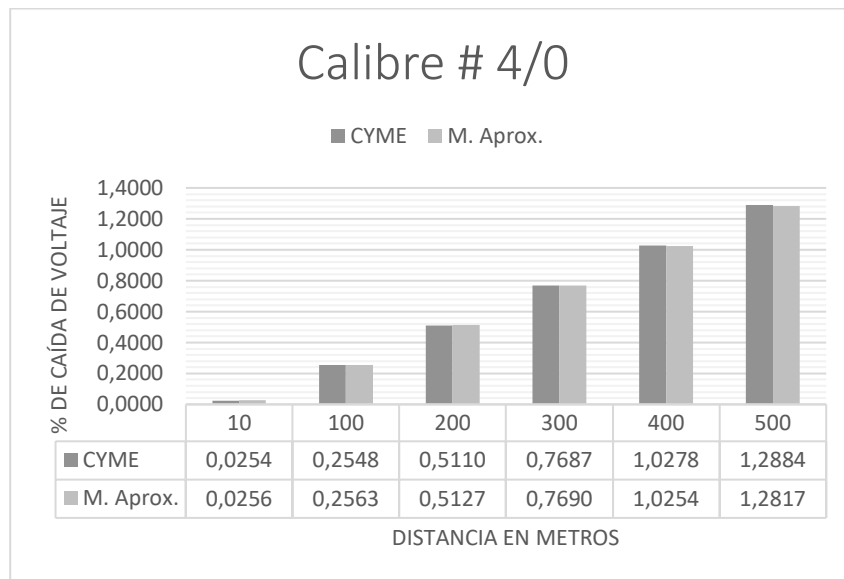


Figura 63. Caída de voltaje monofásico a carga constante.

Fuente: Autor.

En la Figura 63, se valora que, la diferencia de resultados entre ambos métodos es despreciable en toda la longitud de 500 metros en el cable de aluminio TTU aislado con carga constante. Los demás resultados se aprecian en el Anexo H.

Conclusiones

- La red eléctrica de distribución de bajo voltaje subterránea, corresponde al modelo de líneas de transmisión eléctrica, de longitud corta y es de tipo radial en ambiente de construcción subterráneo, puesto que las cargas de demanda se extienden en una sola dirección, con una sola fuente de alimentación ubicado estratégicamente en la red eléctrica de distribución secundaria, el parámetro característico que influye significativamente en la cuantificación de la caída de voltaje es la impedancia serie (resistencia – reactancia inductiva).
- La distancia máxima a la que puede transportarse una potencia específica, depende del valor del momento eléctrico, una vez definido voltaje nominal de la red eléctrica subterránea de distribución de bajo voltaje.
- La simulación y el cálculo para la determinación de caídas de voltaje presentan valores con buena exactitud en todos los calibres de análisis, si la caída de voltaje obtenida mediante el método aproximado no supera el 7%, con respecto al voltaje nominal en redes eléctricas subterráneas de distribución de bajo voltaje, tanto en circuitos monofásicos como trifásicos en longitudes no mayores a los 500 metros. En este rango se afirma que el cálculo de los $kVA - m$. característicos de cada calibre del cable de aluminio TTU aislado son correctos, independientemente del circuito que se encuentre en análisis.

Si la caída de voltaje obtenido mediante el método aproximado supera el 7%, del voltaje nominal, la diferencia entre ambos métodos se incrementa conforme aumenta la caída de voltaje en todos los calibres y configuraciones de redes subterráneas de bajo voltaje; sin embargo, debido a que EMELNORTE establece una caída de voltaje que no supera el 5%, las simulaciones y los cálculos no se verían afectados.

Recomendaciones

- CYME, fuera de su paquete de simulación de redes eléctricas ofrece al usuario el módulo de simulación de cables eléctricos llamado CYMCAP, se recomienda en lo posible emplear este módulo para determinar la impedancia del cable eléctrico de interés, con mayor exactitud, de esta manera mejorar los resultados de las caídas de voltaje en cualquier tipo de estrato o circuito eléctrico secundario de distribución.
- Para las altas caídas de voltajes obtenidas mediante el método aproximado se recomienda en primera instancia seleccionar el calibre mayor al usado en el análisis previo, si a pesar de, haber seleccionado el mayor calibre posible y el problema persiste, se recomienda incrementar el número de cables por fase, hasta

decrementar las altas caídas de voltaje; lo que conlleva a calcular los kVA-m. con haces de conductores.

- Si en algún momento, en un caso eventual el porcentaje de la caída de voltaje calculado mediante el método aproximado supera el 7%, se recomienda calcular la caída de voltaje utilizando únicamente las simulaciones a través del programa CYME, resultados que son tomados como valores patrón.

Referencias

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). (2019). *Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2019*. Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables.

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). (2021). *Atlas del sector eléctrico ecuatoriano 2021*. Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables.

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2020, 13 de noviembre de 2020). *Resolución Nro. ARCERNNR -017/2020*. <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/Regulacion-002-20.pdf>

American Society for Testing and Materials. (2011). *Standard Specification for Concentric-Lay-Stranded Conductors of 8000 Series Aluminum Alloy for Subsequent Covering or Insulation*. Annual Book of ASTM Standards.

Barrero, F. (2004). *Sistemas de energía eléctrica*. Paraninfo.

Centelsa . (2021). *Cables Centelsa TTU*. Viakable.

Chatzipanagiotou, P., Chatziathanasiou, V., Mey, G. D., & Więcek, B. (2017). Influence of soil humidity on the thermal impedance, time constant and structure function of underground cables: A laboratory experiment. Applied Thermal Engineering. . *Applied Thermal Engineering*, 113(No data), 1444-1451. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.117>

Comité de Homologación de Redes Subterráneas. (2011). *Manual de construcción del sistema de distribución eléctrica de redes subterráneas*. Ministerio de

Electricidad y Energías Renovables.

https://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=872

Comité de Homologación de Redes Subterráneas. (2011). *Manual de construcción del sistema de distribución eléctrica de redes subterráneas*. Catálogo Digital. https://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=873

Comité de Homologación de Redes Subterráneas. (2011). *Manual de las unidades de construcción*. Catálogo digital. https://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=875

Condux cables. (2009). *Manual técnico de instalaciones eléctricas en baja tensión*. Servicios condux SA.

Departamento de estudios eléctricos (EMELNORTE). (2016). *ADECUACION DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE EMELNORTE, DIMENSIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES Y MÉTODO DE CÁLCULO DE CAÍDAS DE VOLTAJE EN REDES SECUNDARIAS DE DISTRIBUCIÓN*. EMELNORTE.

Díaz, L. M. (2015). *Diseño de investigación de la factibilidad técnica y económica para la introducción de una red eléctrica de distribución compacta en El Parque Ecológico Ciudad Nueva, ubicado En La zona 2 de la ciudad de Guatemala*. UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.

Expósito, A. G. (2002). *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. Mc Graw Hill.

Filomena, A., Resener, M., Salim, R., & Bretas, A. (2009). Fault location for underground distribution feeders: An extended impedance-based formulation with capacitive current compensation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 31(9), 489 - 496. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2009.03.026>

Floyd, T. (2007). *Principios de circuitos eléctricos*. Pearson Education.

- Garcez, T., & Szufel, P. (2014). Multidimensional Risk Assessment of Manhole Events as a Decision Tool for Ranking the Vaults of an Underground Electricity Distribution System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(2), 624 - 632. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2273083>
- González, E., Pareja, M., & Terol, S. (2013). *Instalaciones de distribución*. Editex.
- Grainger, J., & Stevenson, W. (2002). *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw Hill.
- Grisby, L. L. (2012). *Electric Power GENERATION, TRANSMISION AND DISTRIBUTION*. CRC Press.
- Heinhold, L. (1990). *Power cables and their application*. Siemens Aktiengesellschaft.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización . (2011). *Alamabre de aleación de aluminio de la serie 8000 recocidos intermedios y suaves para usos eléctricos. Requisitos*. Norma Técnica Ecuatoriana.
- Lara, R. E. (1990). *Sistemas de distribución*. Limusa.
- Ocloń, P., Cisek, P., Rerak, M., Taler, D., Rao, R. V., Vallati, A., & Pilarczyk, M. (2018). Thermal performance optimization of the underground power cable system by using a modified Jaya algorithm. *International Journal of Thermal Sciences*, 123(No data), 162 - 180. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.09.015>
- Patrick, L. K. (1989). *Aluminum Electrical Conductor Handbook*. The aluminum association.
- Pérez, H. (1998). *Apuntes de redes eléctricas de distribución*. Sin registro.
- Power Business Worldwide (by EATON). (1 de Mayo de 2020). *Programa de análisis de redes eléctricas*. Dimensionamiento de cables de baja tensión: <https://www.cyme.com/es/software/cymelvcs/>
- Power Business Worldwide (by EATON). (1 de Mayo de 2020). *Programa de análisis de redes eléctricas CYME*. Modelado y análisis de redes de distribución de baja tensión: <https://www.cyme.com/es/software/cymelvdn/>

Power Business Worldwide (by EATON). (1 de Mayo de 2020). *Power Engineering Software (CYME)*. CYME International: <https://www.cyme.com/>

Rodriguez, M. (2005). *Análisis de sistemas de potencia*. Ediluz.

Rosales, A. (2019). *Informe Ejecutivo Rendición de Cuentas*. Empresa Electrica Regional Norte.

Ruíz, R. A. (2021). *Informe ejecutivo - Rendición de cuentas*. Empresa Eléctrica Regional Norte S.A.

Sadiku, M. (2002). *Elementos de electromagnetismo*. Oxford University Press.

Short, T. A. (2014). *Electric power distribution Handbook*. CRC Press (Taylor & Francis Group).

Simón, P., Garnacho, F., Moreno, J., & González, A. (2008). *Cálculo y diseño de líneas eléctricas de alta tensión*. Garceta.

Thue, W. (2012). *Electrical power cable engineering*. CRC Press by Taylor & Francis Group.

Universidad de Alcalá. (2019). *Líneas de transporte y distribución de energía eléctrica*. Universidad de Alcalá.

Universidad Nacional de la Plata. (20 de Abril de 2007). *Facultad de Ingeniería - UNLP*. Facultad de Ingeniería - UNLP:
<https://catedra.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/sispot/Libros%202007/libros/ie-temas/ie-04/ie-04cae.htm>

Anexo A: Datos iniciales para calcular los kVA-m. del cable de aluminio TTU.

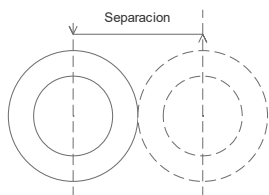
CABLE CENTELSA TTU AI 90°C 2kV XLPE/PVC EXTRADESIZABLE								
Datos Generales					Datos Eléctricos			Dato
Calibre	Área del Conductor Aproximado	Espesor de Aislamiento	Espesor de Cubierta	Diámetro Externo Aproximado	Peso Total Aproximado	Resistencia Eléctrica DC Aproximado a 20°C	Capacidad Máxima de Corriente¹	Capacidad Máxima de Corriente²
AWG/ kcmil	mm²	mm	mm	mm	kg/km	ohm/km	A	A
8	8,37	1,40	0,38	7,15	59	3,43	45	60
6	13,3	1,40	0,64	8,56	88	2,16	60	80
4	21,15	1,40	0,64	9,68	119	1,36	75	110
2	33,63	1,40	0,64	11,09	165	0,85	100	150
1/0	53,51	1,65	0,76	13,56	250	0,54	135	205
2/0	67,44	1,65	0,76	14,61	299	0,43	150	235
3/0	85,03	1,65	0,76	15,79	359	0,34	175	275
4/0	107,22	1,65	0,76	17,11	432	0,27	205	315

Parámetros para el cálculo de los kVA-m. para el cable de aluminio TTU aislado.

Parámetro.	Valor
Resistividad.	0,02845 $\left[\Omega * (mm)^2 / m \right]$
Temperatura (ambiente – referencial).	90 °C – 20 °C
Alpha (α).	$\frac{1}{228 \text{ °C}} = 0,004386 \text{ °C}^{-1}$
Constantes por número de hebras del cable (7H – 19H).	0,7256 – 0,7577

Anexo B: Valores de los kVA-m. del cable de aluminio TTU por configuración (monofásico y trifásico) y por arreglo.

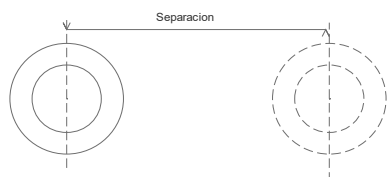
Configuración monofásica (1F – 2H) y arreglo horizontal sin separación.



Calibre	Area (mm ²)	Resistencia CD ET (Ω/m)	Resistencia CD ETM (Ω/m)	Factor de proximidad	Factor efecto piel	Resistencia CA (Ω/m)
6	13,30	0,00218188	0,00285176	1,49509E-05	1,4563E-05	0,0028518
4	21,15	0,00137206	0,00179330	4,71967E-05	3,68266E-05	0,0017935
2	33,63	0,00086289	0,00112781	0,000145139	9,31054E-05	0,0011281
1/0	53,51	0,00054231	0,00070881	0,000391431	0,00023569	0,0007093
2/0	67,44	0,00043029	0,00056240	0,000676107	0,000374333	0,0005630
3/0	85,03	0,00034128	0,00044606	0,001161605	0,000594964	0,0004468
4/0	107,22	0,00027065	0,00035374	0,001984875	0,00094575	0,0003548

Diametro max (mm)	Radio Aprox. (mm)	RMG eq Aprox (mm)	Inductancia (H/m)	Reactancia Inductiva (Ω/m)	Impedancia cable caract. (Ω/m)	kVA-m	Calibre
8,56	2,0576	1,4929600	0,000003493	0,00013167	0,0029	25,2200	6
9,6800	2,5947	1,8826844	0,000003275	0,00012345	0,0018	40,0512	4
11,0900	3,2718	2,3740276	0,000003083	0,00011622	0,0011	63,4891	2
13,5600	4,1271	3,1270860	0,000002934	0,00011061	0,0007	100,3028	1/0
14,6100	4,6332	3,5105982	0,000002852	0,00010751	0,0006	125,6181	2/0
15,7900	5,2025	3,9419258	0,000002775	0,00010463	0,0005	156,8872	3/0
17,1100	5,8420	4,4264978	0,000002704	0,00010194	0,0004	195,0503	4/0

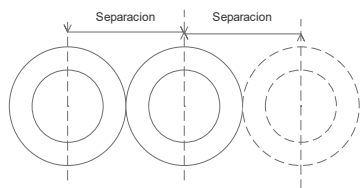
Configuración monofásica (1F – 2H) y arreglo horizontal con separación.



Calibre	Area (mm ²)	Resistencia CD ET (Ω/m)	Resistencia CD ETM (Ω/m)	Factor de proximidad	Factor de efecto piel	Resistencia CA
6	13,30	0,0021818797	0,0028517550	4,31299E-07	1,4563022E-05	0,0028518
4	21,15	0,0013720567	0,0017933022	1,73474E-06	3,6826566E-05	0,0017934
2	33,63	0,0008628903	0,0011278127	6,97543E-06	9,3105354E-05	0,0011279
1/0	53,51	0,0005423098	0,0007088085	2,81016E-05	2,3569007E-04	0,0007090
2/0	67,44	0,0004302936	0,0005624013	5,62507E-05	3,7433318E-04	0,0005626
3/0	85,03	0,0003412795	0,0004460584	0,000112704	5,9496425E-04	0,0004464
4/0	107,22	0,0002706491	0,0003537432	0,000225797	9,4574960E-04	0,0003542

DMG (mm)	Radio Aprox. (mm)	RMG eq aprox. (mm)	Inductancia (H/m)	Reactancia Inductiva (Ω/m)	Impedancia cable caract. (Ω/m)	kVA-m	Calibre
50,0000	2,0576	1,492959952	0,0000007023	0,000264743	0,0029	25,1391	6
50,0000	2,5947	1,882684398	0,0000006559	0,000247255	0,0018	39,7716	4
50,0000	3,2718	2,374027642	0,0000006095	0,000229771	0,0012	62,5493	2
50,0000	4,1271	3,127086008	0,0000005544	0,000208998	0,0007	97,4081	1/0
50,0000	4,6332	3,510598248	0,0000005312	0,000200276	0,0006	120,5575	2/0
50,0000	5,2025	3,941925757	0,0000005081	0,000191538	0,0005	148,2296	3/0
50,0000	5,8420	4,426497796	0,0000004849	0,000182797	0,0004	180,6548	4/0

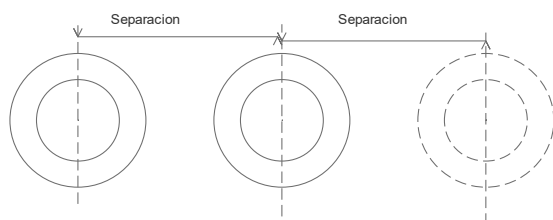
Configuración monofásica (1F – 3H) y arreglo horizontal sin separación.



Calibre	Area (mm ²)	Resistencia CD ET (Ω/m)	Resistencia CD ETM (Ω/m)	Factor de proximidad	Factor de efecto piel	Resistencia CA (Ω/m)
6	13,30	0,00218188	0,00285176	0,000014950915	1,456302E-05	0,002851839
4	21,15	0,00134515	0,00175814	0,000047196662	3,682657E-05	0,001758287
2	33,63	0,00086289	0,00112781	0,000145138634	9,310535E-05	0,001128081
1/0	53,51	0,00054231	0,00070881	0,000391430603	2,356901E-04	0,000709253
2/0	67,44	0,00043029	0,00056240	0,000676107143	3,743332E-04	0,000562992
3/0	85,03	0,00034128	0,00044606	0,001161604868	5,949642E-04	0,000446842
4/0	107,22	0,00027065	0,00035374	0,001984875364	9,457496E-04	0,000354780

Diametro max (mm)	Radio Aprox. (mm)	RMG Aprox (mm)	Inductancia (H/m)	Reactancia Inductiva (Ω/m)	Impedancia cable caract. (Ω/m)	kVA-m	Calibre
8,56	2,0576	1,4930	0,0000003493	0,00013167090	0,0029	100,8800	6
9,6800	2,5947	1,8827	0,0000003275	0,00012345428	0,0018	163,3935	4
11,0900	3,2718	2,3740	0,0000003083	0,00011622303	0,0011	253,9565	2
13,5600	4,1271	3,1271	0,0000002934	0,00011061091	0,0007	401,2113	1/0
14,6100	4,6332	3,5106	0,0000002852	0,00010751182	0,0006	502,4726	2/0
15,7900	5,2025	3,9419	0,0000002775	0,00010463068	0,0005	627,5489	3/0
17,1100	5,8420	4,4265	0,0000002704	0,00010194250	0,0004	780,2013	4/0

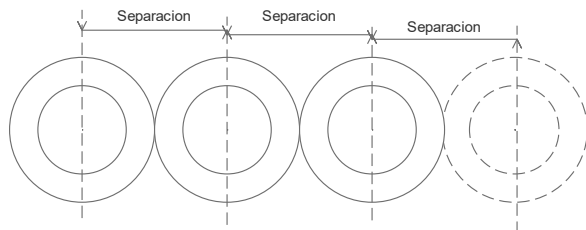
Configuración monofásica (1F – 3H) y arreglo horizontal con separación.



Calibre	Area (mm ²)	Resistencia CD ET (Ω/m)	Resistencia CD ETM (Ω/m)	Factor de proximidad	Factor efecto piel	Resistencia CA (Ω/m)
6	13,30	0,002181880	0,0028517550	4,31299E-07	1,45630E-05	0,0028518
4	21,15	0,001372057	0,0017933022	1,73474E-06	3,68266E-05	0,0017934
2	33,63	0,000862890	0,0011278127	6,97543E-06	9,31054E-05	0,0011279
1/0	53,51	0,000542310	0,0007088085	2,81016E-05	2,35690E-04	0,0007090
2/0	67,44	0,000430294	0,0005624013	5,62507E-05	3,74333E-04	0,0005626
3/0	85,03	0,000341280	0,0004460584	0,000112704	5,94964E-04	0,0004464
4/0	107,22	0,000270649	0,0003537432	0,000225797	9,45750E-04	0,0003542

Dmg eq (mm)	Radio Aprox. (mm)	RMG eq Aprox (mm)	Inductancia (H/m)	Reactancia Inductiva (Ω/m)	Impedancia cable caract. (Ω/m)	kVA-m	Calibre
50,0000	2,0576	1,4930	0,00000070225	0,0002647429	0,0029	100,5566	6
50,0000	2,5947	1,8827	0,00000065586	0,0002472552	0,0018	159,0865	4
50,0000	3,2718	2,3740	0,00000060949	0,0002297712	0,0012	250,1974	2
50,0000	4,1271	3,1271	0,00000055438	0,0002089980	0,0007	389,6325	1/0
50,0000	4,6332	3,5106	0,00000053125	0,0002002755	0,0006	482,2302	2/0
50,0000	5,2025	3,9419	0,00000050807	0,0001915382	0,0005	592,9182	3/0
50,0000	5,8420	4,4265	0,00000048488	0,0001827965	0,0004	722,6193	4/0

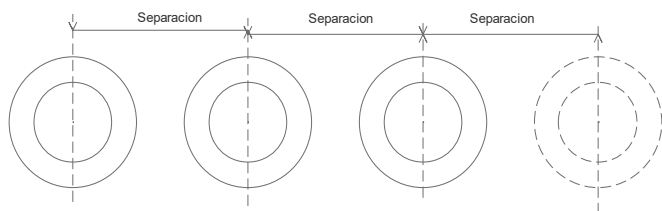
Configuración monofásica (3F – 4H) y arreglo horizontal sin separación.



Calibre	Area (mm ²)	Resistencia CD ET (Ω/m)	Resistencia CD ETM (Ω/m)	Factor de proximidad	Factor de efecto piel	Resistencia CA (Ω/m)
6	13,30	0,00218187970	0,00285175505	1,49509E-05	1,456302163E-05	0,002851839
4	21,15	0,00137205674	0,00179330223	4,71967E-05	3,682656574E-05	0,001793453
2	33,63	0,00086289028	0,00112781273	0,000145139	9,310535441E-05	0,001128081
1/0	53,51	0,00054230985	0,00070880849	0,000391431	2,356900668E-04	0,000709253
2/0	67,44	0,00043029359	0,00056240128	0,000676107	3,743331763E-04	0,000562992
3/0	85,03	0,00034127955	0,00044605836	0,001161605	5,949642482E-04	0,000446842
4/0	107,22	0,00027064913	0,00035374316	0,001984875	9,457496008E-04	0,000354780

Diametro max (mm)	Radio Aprox. (mm)	DMG eq Aprox (mm)	RMG eq Aprox (mm)	Inductancia (H/m)	Reactancia Inductiva (Ω/m)	Impedancia cable caract. (Ω/m)	kVA-m	Calibre
8,56	2,0576	10,7849	1,4930	0,0000003955	0,0001490916	0,0029	169,4381	6
9,6800	2,5947	12,1960	1,8827	0,0000003737	0,0001408750	0,0018	268,9695	4
11,0900	3,2718	13,9725	2,3740	0,0000003545	0,0001336437	0,0011	425,9531	2
13,5600	4,1271	17,0845	3,1271	0,0000003396	0,0001280316	0,0007	671,3738	1/0
14,6100	4,6332	18,4074	3,5106	0,0000003314	0,0001249325	0,0006	839,0510	2/0
15,7900	5,2025	19,8942	3,9419	0,0000003238	0,0001220514	0,0005	1044,6001	3/0
17,1100	5,8420	21,5572	4,4265	0,0000003166	0,0001193632	0,0004	1292,6601	4/0

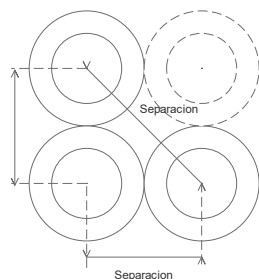
Configuración trifásica (3F – 4H) y arreglo horizontal con separación.



Calibre	Area (mm ²)	Resistencia CD ET (Ω/m)	Resistencia CD ETM (Ω/m)	Factor de proximidad	Factor de efecto piel	Resistencia CA (Ω/m)
6	13,30	0,002181880	0,002851755	1,49509E-05	1,4563E-05	0,0028518
4	21,15	0,001372057	0,001793302	4,71967E-05	3,68266E-05	0,0017935
2	33,63	0,000862890	0,001127813	0,000145139	9,31054E-05	0,0011281
1/0	53,51	0,000542310	0,000708808	0,000391431	0,00023569	0,0007093
2/0	67,44	0,000430294	0,000562401	0,000676107	0,000374333	0,0005630
3/0	85,03	0,000341280	0,000446058	0,001161605	0,000594964	0,0004468
4/0	107,22	0,000270649	0,000353743	0,001984875	0,00094575	0,0003548

Separación (mm)	Radio Aprox. (mm)	DMG eq Aprox (mm)	RMG eq Aprox (mm)	Inductancia (H/m)	Reactancia Inductiva (Ω/m)	Impedancia cable caract. (Ω/m)	kVA-m	Calibre
50,000	2,0576	62,9961	1,4930	0,00000074846	0,00028216363	0,0029	168,8450	6
50,000	2,5947	62,9961	1,8827	0,00000070207	0,00026467592	0,0018	266,9071	4
50,000	3,2718	62,9961	2,3740	0,00000065570	0,00024719188	0,0012	418,9906	2
50,000	4,1271	62,9961	3,1271	0,00000060059	0,00022641864	0,0007	649,9115	1/0
50,000	4,6332	62,9961	3,5106	0,00000057746	0,00021769621	0,0006	801,6196	2/0
50,000	5,2025	62,9961	3,9419	0,00000055428	0,00020895884	0,0005	980,9109	3/0
50,000	5,8420	62,9961	4,4265	0,00000053109	0,00020021722	0,0004	1187,7708	4/0

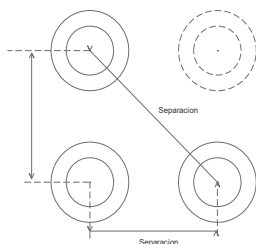
Configuración trifásica (3F – 4H) y arreglo en cuadratura sin separación.



Calibre	Area (mm ²)	Resistencia CD ET (Ω/m)	Resistencia CD ETM (Ω/m)	Factor de proximidad	Factor de efecto piel	Resistencia CA (Ω/m)
6	13,30	0,0021818797	0,0028517550	4,31299E-07	1,45630E-05	0,0028518
4	21,15	0,0013720567	0,0017933022	1,73474E-06	3,68266E-05	0,0017934
2	33,63	0,0008628903	0,0011278127	6,97543E-06	9,31054E-05	0,0011279
1/0	53,51	0,0005423098	0,0007088085	2,81016E-05	2,35690E-04	0,0007090
2/0	67,44	0,0004302936	0,0005624013	5,62507E-05	3,74333E-04	0,0005626
3/0	85,03	0,0003412795	0,0004460584	0,000112704	5,94964E-04	0,0004464
4/0	107,22	0,0002706491	0,0003537432	0,000225797	9,45750E-04	0,0003542

Diametro max (mm)	Radio Aprox. (mm)	DMG eq Aprox (mm)	RMG eq Aprox (mm)	Inductancia (H/m)	Reactancia Inductiva (Ω/m)	Impedancia cable caract. (Ω/m)	kVA-m	Calibre
8,56	2,0576	9,6083	1,4930	0,000000372373	0,00014038124	0,0029	169,4667	6
9,6800	2,5947	10,8654	1,8827	0,000000350578	0,00013216463	0,0018	269,0805	4
11,0900	3,2718	12,4481	2,3740	0,000000331396	0,00012493338	0,0011	426,3835	2
13,5600	4,1271	15,2206	3,1271	0,000000316509	0,00011932125	0,0007	673,0082	1/0
14,6100	4,6332	16,3992	3,5106	0,000000308289	0,00011622216	0,0006	842,2136	2/0
15,7900	5,2025	17,7237	3,9419	0,000000300646	0,00011334102	0,0005	1050,6607	3/0
17,1100	5,8420	19,2053	4,4265	0,000000293516	0,00011065284	0,0004	1304,0866	4/0

Configuración trifásica (3F – 4H) y arreglo en cuadratura con separación.



Calibre	Area (mm ²)	Resistencia CD ET (Ω/m)	Resistencia CD ETM (Ω/m)	Factor de proximidad	Factor de efecto piel	Resistencia CA (Ω/m)
6	13,30	0,00218187970	0,00285175505	4,31299E-07	1,45630E-05	0,0028518
4	21,15	0,00137205674	0,00179330223	1,73474E-06	3,68266E-05	0,0017934
2	33,63	0,00086289028	0,00112781273	6,97543E-06	9,31054E-05	0,0011279
1/0	53,51	0,00054230985	0,00070880849	2,81016E-05	2,35690E-04	0,0007090
2/0	67,44	0,00043029359	0,00056240128	5,62507E-05	3,74333E-04	0,0005626
3/0	85,03	0,00034127955	0,00044605836	0,000112704	5,94964E-04	0,0004464
4/0	107,22	0,00027064913	0,00035374316	0,000225797	9,45750E-04	0,0003542

Separación (mm)	Radio Aprox. (mm)	DMG eq Aprox (mm)	RMG eq Aprox (mm)	Inductancia (H/m)	Reactancia Inductiva (Ω/m)	Impedancia cable caract. (Ω/m)	kVA-m	Calibre
50,0000	2,0576	56,1231	1,4930	0,000000725357	0,000273453286	0,0029	168,8972	6
50,0000	2,5947	56,1231	1,8827	0,000000678970	0,000255965577	0,0018	267,1033	4
50,0000	3,2718	56,1231	2,3740	0,000000632592	0,000238481535	0,0012	419,7122	2
50,0000	4,1271	56,1231	2,9946	0,000000586147	0,000220972182	0,0007	651,5604	1/0
50,0000	4,6332	56,1231	3,3619	0,000000563010	0,000212249747	0,0006	804,6443	2/0
50,0000	5,2025	56,1231	3,7749	0,000000539833	0,000203512381	0,0005	986,3258	3/0
50,0000	5,8420	56,1231	4,2390	0,000000516645	0,000194770762	0,0004	1197,1581	4/0

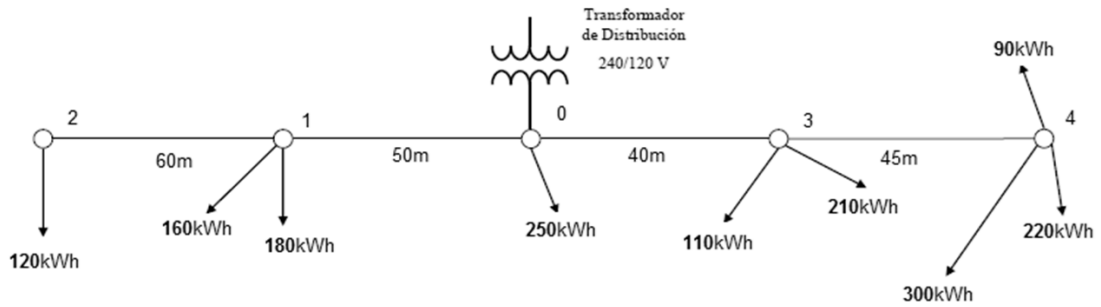
Anexo C: Demanda máxima diversificada (sin tener en cuenta el aporte de las cocinas de inducción).

No. ABONADO	TIPO					No. ABONADO	TIPO				
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
	DMD (kW)	DMD (kW)	DMD (kW)	DMD (kW)	DMD (kW)		DMD (kW)	DMD (kW)	DMD (kW)	DMD (kW)	DMD (kW)
1	13,82	7,48	4,05	2,58	1,80	26	90,72	49,12	26,60	16,93	11,82
2	17,96	9,73	5,27	3,35	2,34	27	93,42	50,58	27,39	17,43	12,17
3	22,80	12,34	6,68	4,25	2,97	28	96,11	52,04	28,18	17,93	12,53
4	27,63	14,96	8,10	5,16	3,60	29	98,81	53,50	28,97	18,43	12,88
5	29,78	16,13	8,73	5,56	3,88	30	101,50	54,96	29,76	18,94	13,23
6	33,53	18,15	9,83	6,26	4,37	31	104,19	56,42	30,55	19,44	13,58
7	36,99	20,03	10,84	6,90	4,82	32	106,88	57,88	31,34	19,94	13,93
8	40,25	21,79	11,80	7,51	5,25	33	109,57	59,33	32,13	20,44	14,28
9	43,37	23,49	12,72	8,09	5,65	34	112,26	60,79	32,92	20,94	14,63
10	46,39	25,12	13,60	8,66	6,05	35	114,95	62,24	33,70	21,45	14,98
11	49,34	26,72	14,47	9,21	6,43	36	117,64	63,70	34,49	21,95	15,33
12	52,23	28,28	15,32	9,75	6,81	37	120,32	65,15	35,28	22,45	15,68
13	55,09	29,83	16,15	10,28	7,18	38	123,01	66,61	36,07	22,95	16,03
14	57,91	31,36	16,98	10,80	7,55	39	125,69	68,06	36,85	23,45	16,38
15	60,70	32,87	17,80	11,32	7,91	40	128,38	69,51	37,64	23,95	16,73
16	63,48	34,37	18,61	11,84	8,27	41	131,06	70,97	38,43	24,45	17,08
17	66,24	35,87	19,42	12,36	8,63	42	133,74	72,42	39,21	24,95	17,43
18	68,99	37,35	20,23	12,87	8,99	43	136,42	73,87	40,00	25,45	17,78
19	71,72	38,84	21,03	13,38	9,35	44	139,11	75,32	40,79	25,95	18,13
20	74,45	40,32	21,83	13,89	9,70	45	141,79	76,78	41,57	26,45	18,48
21	77,18	41,79	22,63	14,40	10,06	46	144,47	78,23	42,36	26,95	18,83
22	79,89	43,26	23,43	14,91	10,41	47	147,15	79,68	43,15	27,45	19,18
23	82,60	44,73	24,22	15,41	10,76	48	149,83	81,13	43,93	27,95	19,53
24	85,31	46,20	25,01	15,92	11,12	49	152,51	82,58	44,72	28,45	19,88
25	88,02	47,66	25,81	16,42	11,47	50	155,20	84,04	45,50	28,95	20,22

**Anexo D: Capturas de las hojas de cálculo de Excel de los diferentes circuitos usados
en el presente trabajo.**

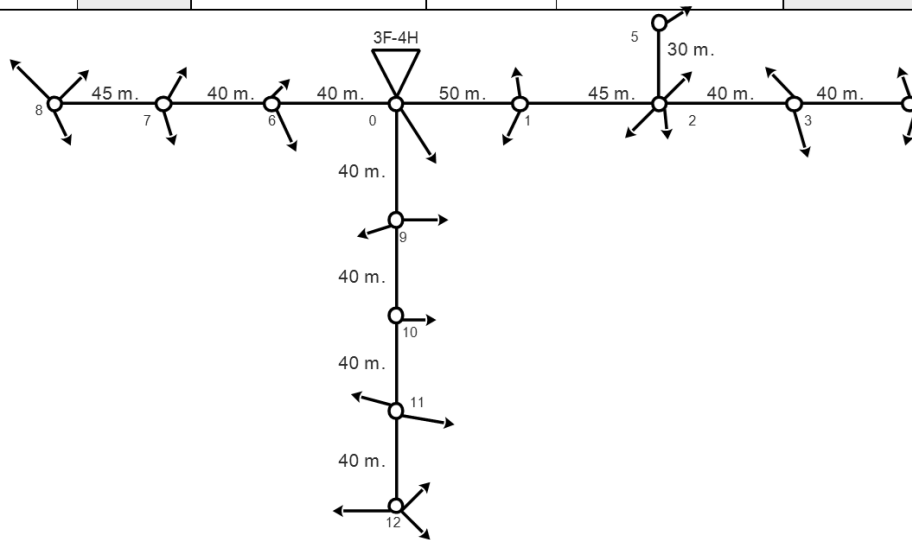
Emel Norte			COMPUTO DE CAIDAS DE VOLTAJE CIRCUITOS SECUNDARIOS REDES CONVENCIONALES							
NOMBRE DEL PROYECTO:	ELECTRIFICACION "NOMBRE"			Fecha	27-ene.-23	HOJA:				
				Tipo de Usuario	A <th colspan="2">CENTRO DE TRANSFORMACION No.</th> <td>CT2- 25kVA</td>	CENTRO DE TRANSFORMACION No.		CT2- 25kVA		
TIPO DE INSTALACIÓN:	SUBTERRANEA	VOLTAJE:	127/220	LIMITE DE CAIDA DE VOLTAJE:	3%					
CONDUCTOR: Preens. "P"; Desn. "D":	TTU	No. FASES:	3	Elegir tipo de Red	Trifásico 4H flat					
<p>RED SECUNDARIA</p>										
DATOS			Carga/usuario	Luminarias	CIRCUITO	CONDUCTOR		COMPUTO		
TRAMO		Nro.				FASE	CALIBRE	FDV	CAIDA VOLTAJE (%)	
DESIG.	L(m)	CONSUM.	kVA/tramo	kVA/tramo	Conf. de red	AWG	kVA-m	kVA-m	PARCIAL	ACUMULADO
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0-1	50	3	15,7659	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	788,2941	1,1742	1,1742
1-2	60	1	5,2553	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	315,3176	0,4697	1,6438
0-3	40	5	26,2765	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	1051,0588	1,5655	1,5655
3-4	45	3	15,7659	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	709,4647	1,0567	2,6223

NOMBRE DEL PROYECTO:	ELECTRIFICACION "NOMBRE"			Fecha	27-ene.-23	HOJA:	HOJA 2 DE 3
				Tipo de Usuario	C	CENTRO DE TRANSFORMACION No.	
TIPO DE INSTALACION:	SUBTERRANEA	VOLTAJE:	127/220	LIMITE DE CAIDA DE VOLTAJE:		3%	
CONDUCTOR: Preens. "P"; Desn. "D":	TTU	No. FASES:	3	Elegir tipo de Red		Trifásico 4H flat	

RED SECUNDARIA


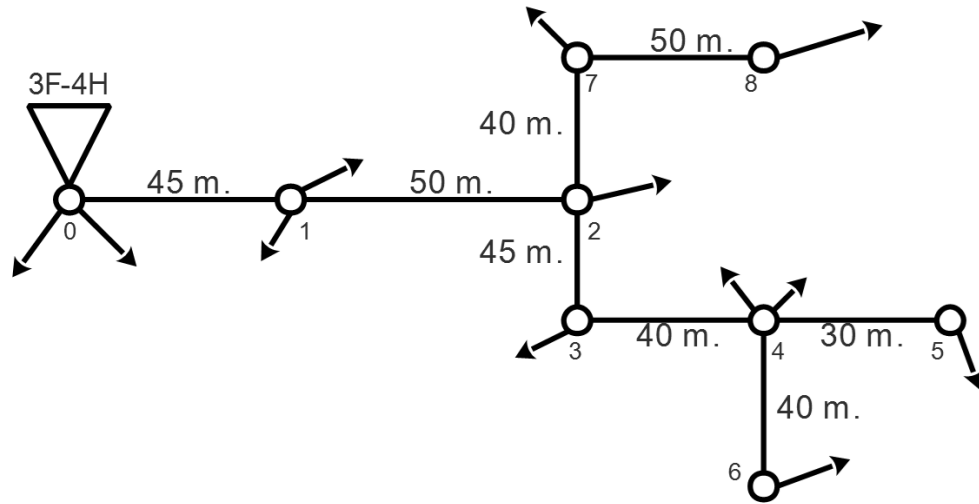
DATOS			Carga/usuario	Luminarias	CIRCUITO	CONDUCTOR		COMPUTO		
TRAMO		Nro.				FASE	CALIBRE	FDV	CAIDA VOLTAJE (%)	
DESIG.	L(m)	CONSUM.	kVA/tramo	kVA/tramo	Conf. de red	AWG	kVA-m	kVA-m	PARCIAL	ACUMULADO
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0-1	50	3	6,3800	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	318,9997	0,4751	0,4751
1-2	60	1	1,6321	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	97,9255	0,1459	0,6210
0-3	40	5	12,0923	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	483,6926	0,7205	0,7205
3-4	45	3	7,8637	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	353,8671	0,5271	1,2475

NOMBRE DEL PROYECTO:	ELECTRIFICACION "NOMBRE"			Fecha	27-ene.-23	HOJA:		
				Tipo de Usuario	C	CENTRO DE TRANSFORMACION No.		CT2- 50kVA
TIPO DE INSTALACION:	SUBTERRANEA	VOLTAJE:	127/220	LIMITE DE CAIDA DE VOLTAJE:		3%		
CONDUCTOR: Prens. "P"; Desn. "D":	TTU	No. FASES:	3	Elegir tipo de Red		Trifásico 4H flat		



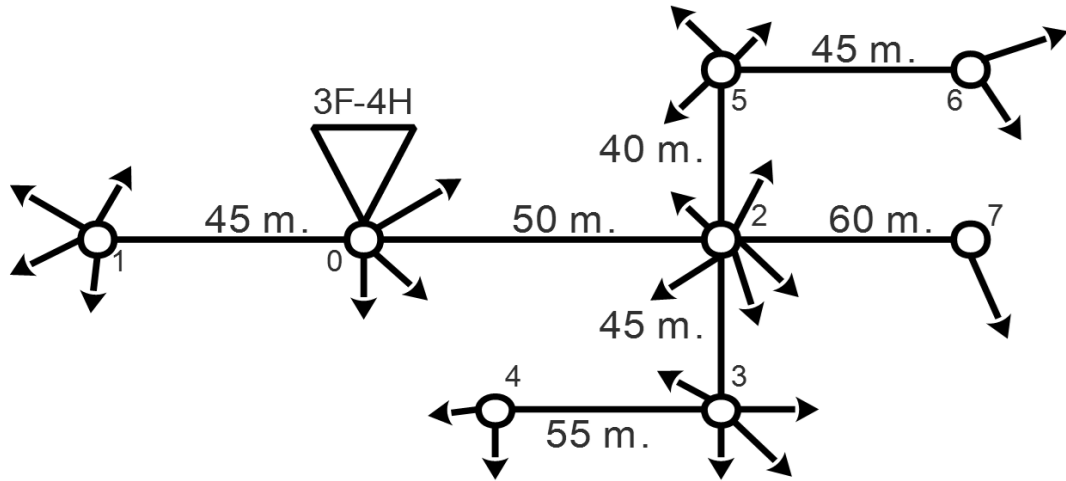
DATOS			Carga/usuario	Luminarias	CIRCUITO	CONDUCTOR		COMPUTO		
TRAMO		Nro.				FASE	CALIBRE	FDV	CAIDA VOLTAJE (%)	
DESIG.	L(m)	CONSUM.	kVA/tramo	kVA/tramo	Conf. de red	AWG	kVA-m	kVA-m	PARCIAL	ACUMULADO
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0 - 1	50	10	11,1567	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	557,8353	0,8309	0,8309
1 - 2	45	8	8,9254	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	401,6414	0,5982	1,4291
2 - 3	40	4	4,4627	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	178,5073	0,2659	1,6950
3 - 4	40	2	2,2313	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	89,2536	0,1329	1,8279
2 - 5	30	1	1,1157	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	33,4701	0,0499	1,4790
0 - 6	40	7	7,8097	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	312,3878	0,4653	0,4653
6 - 7	40	5	5,5784	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	223,1341	0,3324	0,7977
7 - 8	40	3	3,3470	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	150,6155	0,2243	1,0220
0 - 9	40	8	8,9254	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	357,0146	0,5318	0,5318
9 - 10	40	6	6,6940	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	267,7609	0,3988	0,9306
10 - 11	40	5	5,5784	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	223,1341	0,3324	1,2629
11 - 12	40	3	3,3470	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	133,8805	0,1994	1,4624

NOMBRE DEL PROYECTO:	ELECTRIFICACION "NOMBRE"			Fecha	27-ene.-23	HOJA:	
				Tipo de Usuario	B	CENTRO DE TRANSFORMACION No.	
TIPO DE INSTALACION:	SUBTERRANEA	VOLTAJE:	127/220	LIMITE DE CAIDA DE VOLTAJE:	3%		
CONDUCTOR: Prens. "P"; Des.n. "D":	TTU	No. FASES:	3	Elegir tipo de Red	Trifásico 4H flat		



DATOS			Carga/usuario	Luminarias	CIRCUITO	CONDUCTOR		COMPUTO		
TRAMO		Nro.				FASE	CALIBRE	FDV	CAIDA VOLTAJE (%)	
DESIG.	L(m)	CONSUM.	kVA/tramo	kVA/tramo	Conf. de red	AWG	kVA-m	kVA-m	PARCIAL	ACUMULADO
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0 - 1	45	10	25,7038	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	1156,6706	1,7228	1,7228
1 - 2	50	8	20,5630	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	1028,1516	1,5314	3,2543
2 - 3	45	5	12,8519	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	578,3353	0,8614	4,1157
3 - 4	40	4	10,2815	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	411,2606	0,6126	4,7282
4 - 5	30	1	2,5704	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	77,1114	0,1149	4,8431
4 - 6	40	1	2,5704	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	102,8152	0,1531	4,8814
2 - 7	40	2	5,1408	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	205,6303	0,3063	3,5605
7 - 8	50	1	2,5704	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	128,5190	0,1914	3,7520

NOMBRE DEL PROYECTO:	ELECTRIFICACION "NOMBRE"			Fecha	27-ene.-23	HOJA:	
				Tipo de Usuario	A	CENTRO DE TRANSFORMACION No.	
TIPO DE INSTALACION:	SUBTERRANEA	VOLTAJE:	127/220	LIMITE DE CAIDA DE VOLTAJE:	3%		
CONDUCTOR: Preens. "P"; Desn. "D":	TTU	No. FASES:	3	Eligir tipo de Red	Trifásico 4H flat		



DATOS			Carga/usuario	Luminarias	CIRCUITO	CONDUCTOR		COMPUTO		
TRAMO		Nro.				FASE	CALIBRE	FDV	CAIDA VOLTAJE (%)	
DESIG.	L(m)	CONSUM.	kVA/tramo	kVA/tramo	Conf. de red	AWG	kVA-m	kVA-m	PARCIAL	ACUMULADO
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0 - 1	45	4	15,5059	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	697,7658	1,0393	1,0393
0 - 2	50	17	65,9001	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	3295,0053	4,9079	4,9079
2 - 3	45	6	23,2589	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	1046,6487	1,5590	6,4668
2 - 4	55	2	7,7530	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	426,4124	0,6351	7,1020
2 - 5	40	5	19,3824	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	775,2954	1,1548	6,0626
5 - 6	45	2	7,7530	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	348,8829	0,5197	6,5823
2 - 7	60	1	3,8765	0,000	Trifásico 4H flat	# 1/0	671,3738	232,5886	0,3464	5,2543

Anexo E: Breve tutorial acerca de la simulación de caídas de voltaje en el software CYME.

Para modelar el sistema eléctrico de distribución subterráneo en bajo voltaje, se identifica los elementos que participan en la simulación, la fuente, el cable que conduce la energía eléctrica y la carga.

Al abrir el programa de simulación CYME, se despliega una ventana de trabajo en el cual se procede a crear un nuevo proyecto, se llena la información requerida y finalmente se aprecia el espacio de trabajo.

En el espacio de trabajo si se desea introducir los componentes para la simulación, en la pestaña “Mostrar”, se presiona sobre la opción “Barra de exploración” y se selecciona en la opción de “Caja de herramientas”, esta acción permite habilitar el acceso rápido hacia los componentes de simulación.

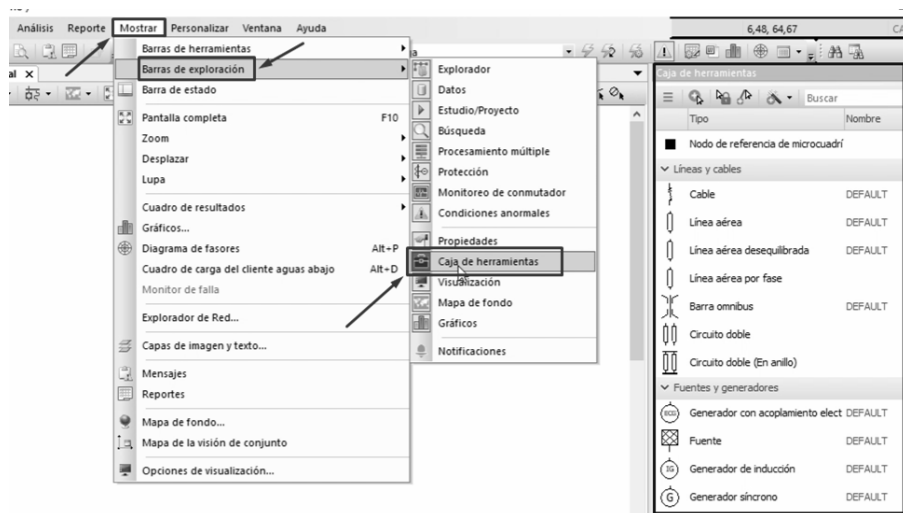


Figura 64. Configuración inicial de CYME para análisis de redes eléctricas de bajo voltaje.

Fuente: Autor.

Para introducir y configurar los elementos se debe realizar un clic sostenido sobre el componente deseado y se arrastra al espacio de trabajo, se procede a realizar la implementación de la fuente, al arrastrar el componente “Fuente” al espacio de trabajo se despliega una ventana de configuración, en esta ventana se deben ajustar los parámetros de “Red”, “Fuente” y “Equivalente”, en la pestaña de “Red” se presiona sobre el indicador de la opción de “Tipo de red” y se selecciona “Red de baja voltaje”.

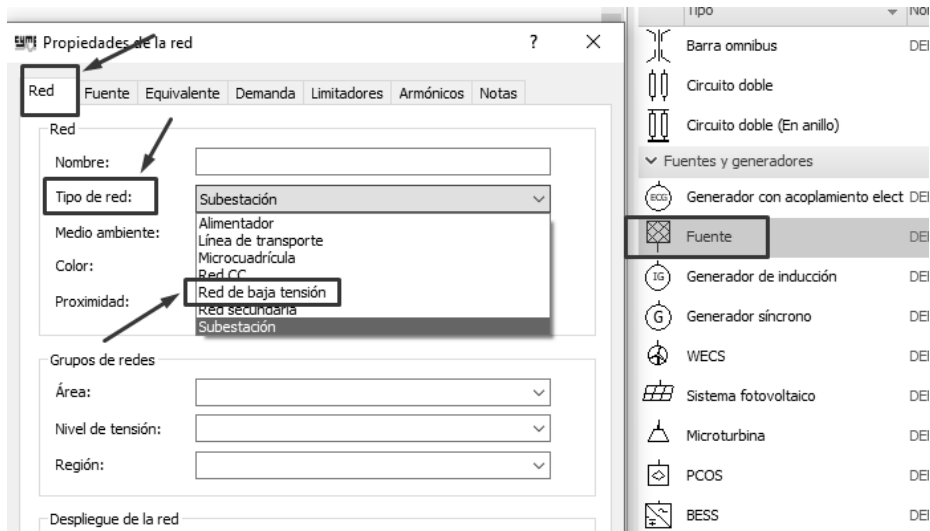


Figura 65. Configuración de la “Red” eléctrica en CYME.

Fuente: Autor.

En la pestaña de “Fuente” se configura la introducción de los parámetros de operación de la fuente, en la opción de “Tipo de fuente” se selecciona la alternativa de “Equivalente definido por el usuario”.

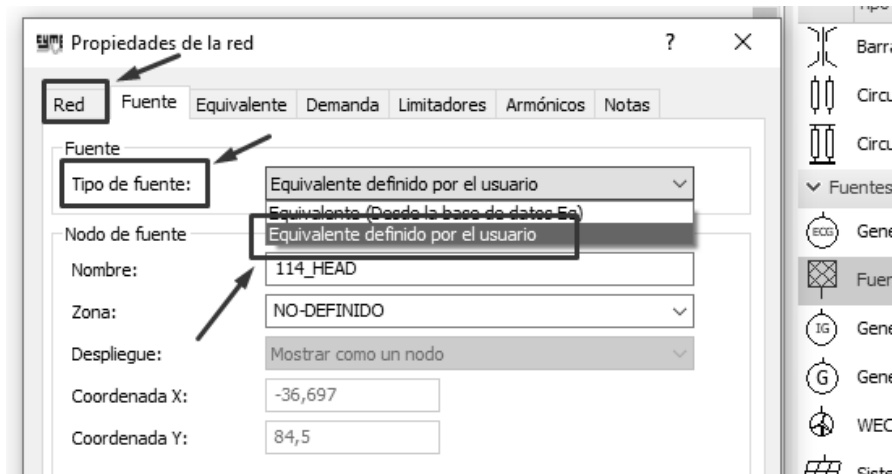


Figura 66. Configuración de la “Fuente” eléctrica en CYME.

Fuente: Autor.

Para configurar la pestaña “Equivalente”, en la opción de “Configuración” se selecciona la configuración de la red, la cual puede ser “YG” para redes de bajo voltaje trifásicos a cuatro hilos y la configuración “CT” para redes de bajo voltaje monofásicos a tres hilos, luego de seleccionar la configuración, en la opción de “Tensiones del equivalente de

fuente” en la alternativa de “Nominal” se coloca el voltaje nominal (línea – línea) definido en 220 V, y en la opción de “Servicio” se coloca los voltaje línea – línea de las fases A, B y C definido en un valor de 220 V, se recalca que el voltaje de servicio debe ser “Equilibrado”.

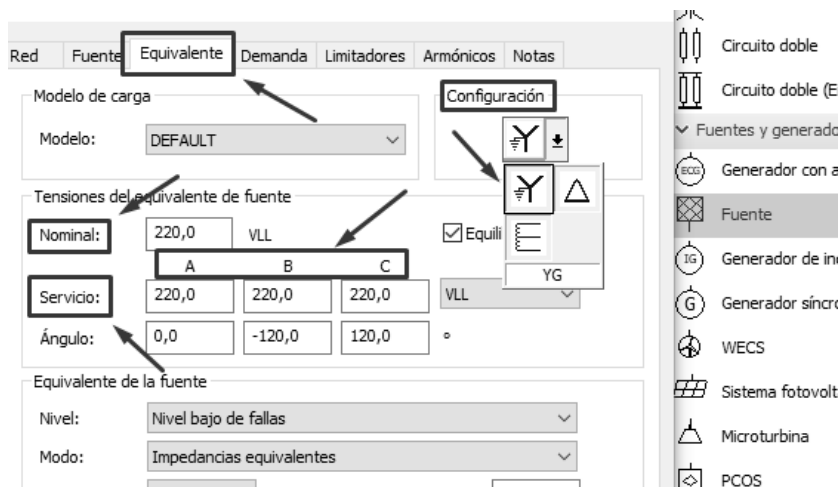


Figura 67. Configuración del “Equivalente” de la red eléctrica en CYME.

Fuente: Autor.

Para finalizar con la implementación de la fuente no se debe olvidar colocar el nombre a la fuente.

Al componente del cable eléctrico se accede al presionar sobre la pestaña de “Equipo” y seleccionando la opción de “Cable”, al tratarse de un nuevo cable, el cual tiene características singulares ya definidas anteriormente, se debe agregar el elemento presionando sobre el icono “+” o “Agregar al inventario”, luego se despliega una ventana en donde se debe colocar el nombre del nuevo cable eléctrico.

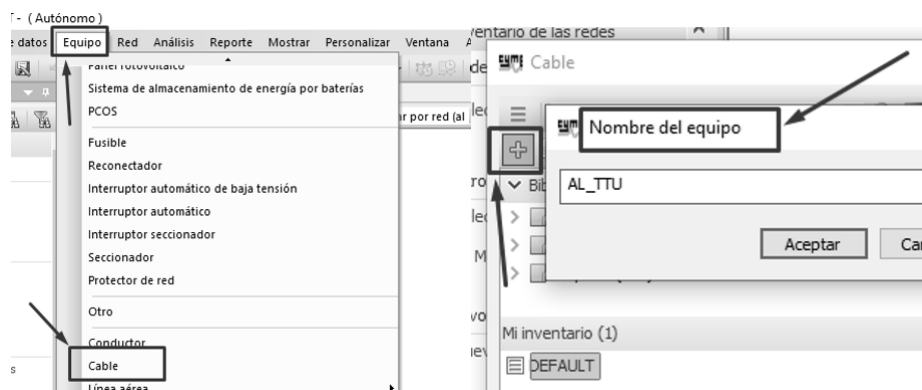


Figura 68. Configuración del “Equipo” de la red eléctrica en CYME.

Fuente: Autor.

En la pestaña “General” del cable se configuran las opciones de:

- Tipo: Unipolar.
- Material del conductor: ALUMINIO.
- Material de aislamiento: como mm^2 .
- Tamaño del conductor: No estándar.
- Pantallas metálicas: definido por el usuario.
- Material de aislamiento: PVC.

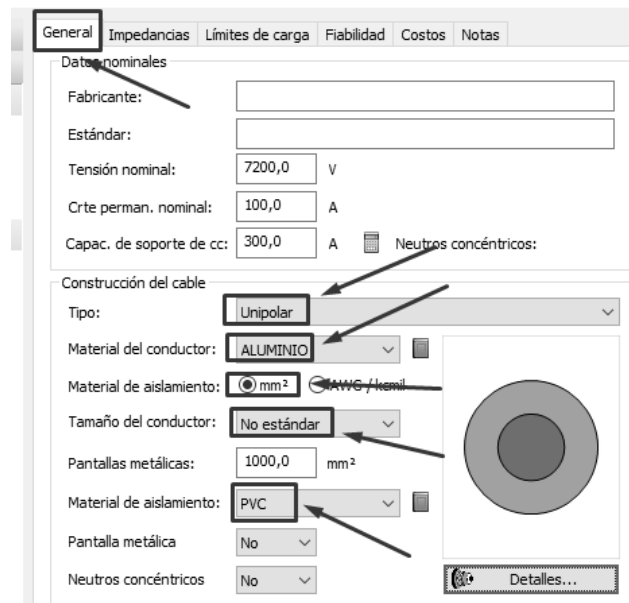


Figura 69. Configuración del cable en la pestaña "General".

Fuente: Autor.

Para ingresar los valores de medida y el número de hilos del cable eléctrico es necesario presionar sobre la pestaña de “Detalles”, en la ventana de “Construcción del cable”, en primera instancia se aprecia la “Visión de conjunto” con el cable ya definido anteriormente, luego dentro de la opción de “Detalles”, se ajusta el área transversal del cable eléctrico en mm^2 , el programa ajusta automáticamente las alternativas de “Numero de alambres”, “Diámetro” y “Diámetro externo” al presionar sobre el icono de “Estimar” o la calculadora. El “Espesor” debe colocarse manualmente.

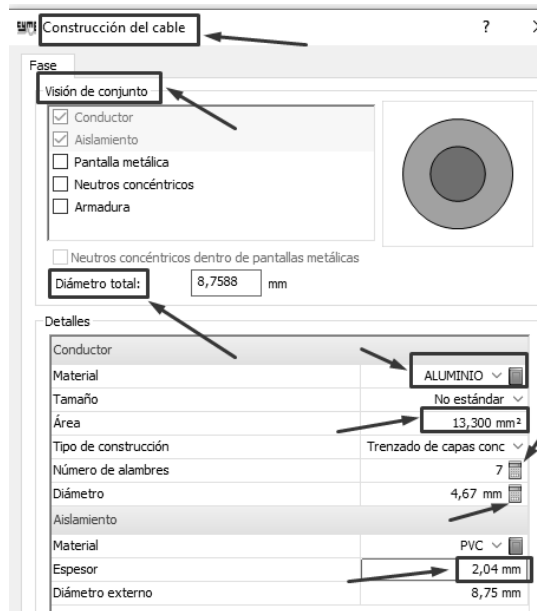


Figura 70. Configuración de la “Construcción del cable”.

Fuente: Autor.

En el software CYME es posible detallar las características de cualquier cable presionando en el icono ubicado en la parte izquierda del rotulo “ALUMINIO”, esta acción desplegara una ventana con varios tipos de materiales que componen las hebras de los cables eléctricos. Para agregar las características del cable TTU se presiona sobre el icono “+”, luego se coloca el nombre del cable, esto habilitara los recuadros de “Características del material”, lugar donde se coloca los valores descritos el Capítulo 1.

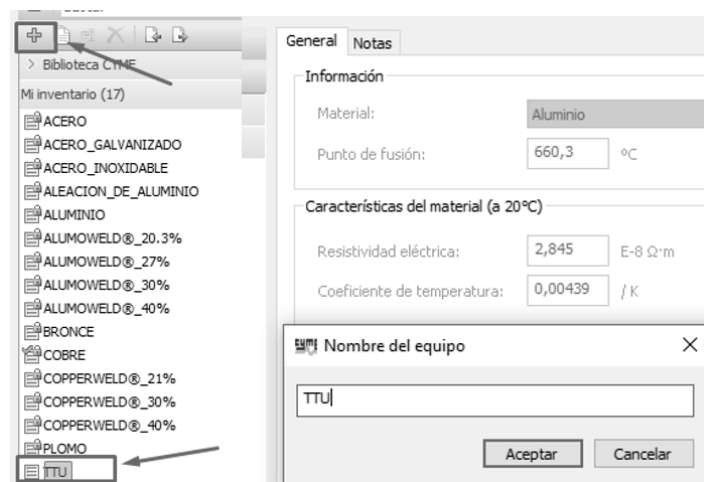


Figura 71. Configuración del cable eléctrico TTU.

Fuente: Autor.

La carga o potencia de demanda es posible implementarla de dos maneras que son equivalentes y no alteran los resultados, por ello se opta por insertarlos luego de colocar la fuente, el cable eléctrico y la configuración de la instalación subterránea.

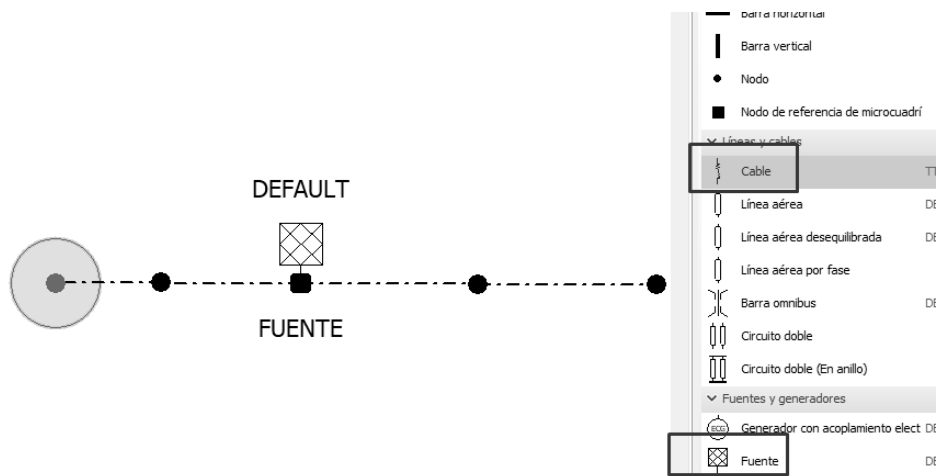


Figura 72. Construcción de la red eléctrica en CYME.

Fuente: Autor.

Para configurar los parámetros de instalación se ubica el cursor del ratón sobre la línea que simboliza el cable eléctrico lo cual despliega una ventana de configuración, por lo que se procede a ajustar los siguientes parámetros.

- Longitud: valor en metros definido por el usuario.
- Alto: profundidad de cables enterrados en metros.
- Configuración: Con contacto.
- Nro. Cables / Fase: 1.
- Nro. de neutros: 1.
- Neutro 1: se selecciona el cable igual al cable de fase.

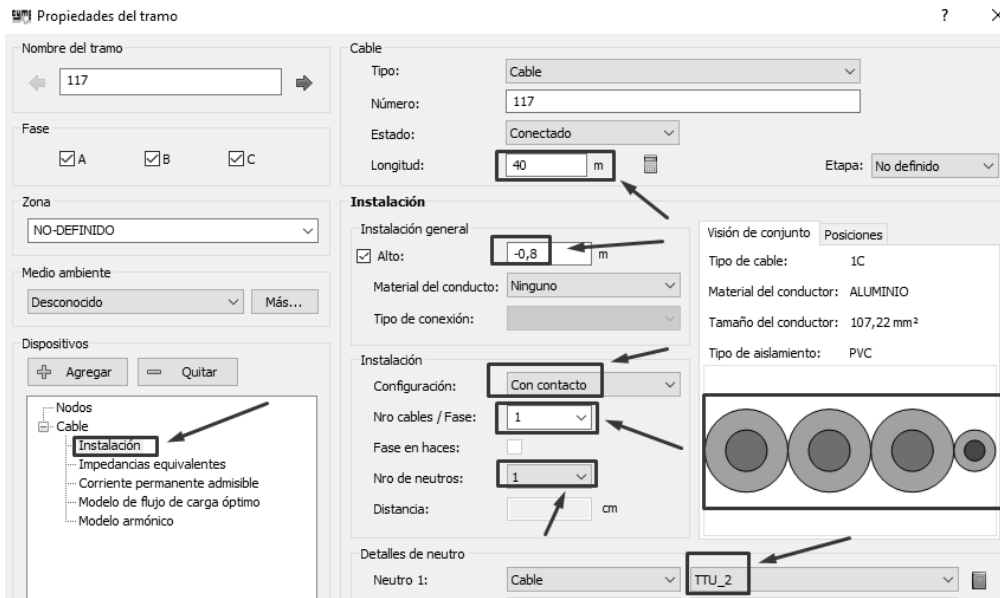


Figura 73. Configuración del tipo de red y características de instalación.

Fuente: Autor.

Finalmente, para agregar la carga o potencia de demanda se presiona sobre el recuadro de “Agregar” esto despliega un menú en el cual se selecciona el tipo de carga como “Carga concentrada” y se elige la opción de “Trifásico”.

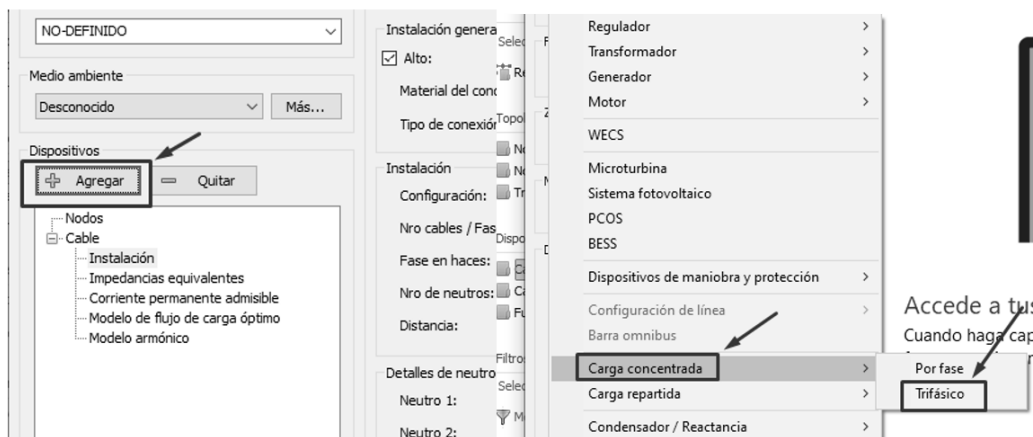


Figura 74. Configuración de la carga conectada a la red eléctrica.

Fuente: Autor.

La acción anterior despliega una nueva ventana de configuración orientada a caracterizar la carga, en la ventana se ajusta los siguientes parámetros.

- Ubicación: En el nodo de destino.

- Tipo de cliente: Residencial.
- Conexión: YG.
- Formato: *kVA* y FP.
 - Potencia aparente: valor definido por el usuario.
 - Factor de potencia: en 95% de acuerdo con los parámetros de diseño.

Figura 75. Ubicación de datos característicos de la carga.

Fuente: Autor.

Se debe seguir el proceso precedente para colocar las cargas en cada tramo, el circuito final debe asemejarse visualmente al diagrama usado para las simulaciones.

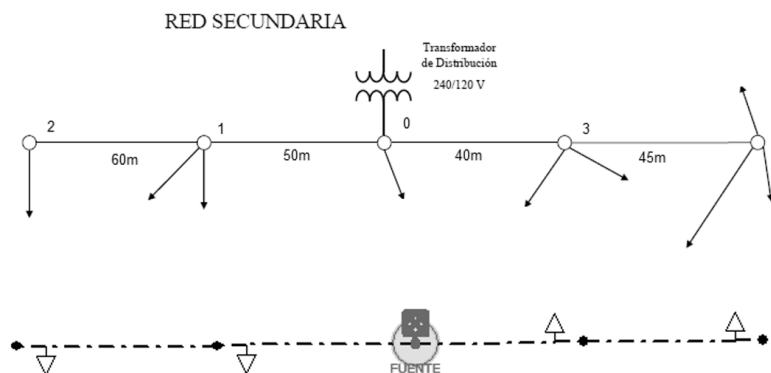


Figura 76. Trabajo finalizado del modelamiento de la red eléctrica en CYME.

Fuente: Autor.

Para simular y obtener las caídas de voltaje se debe ejecutar el paquete de “Flujo de cargas” y configurar el análisis en “Caída de voltaje equilibrada”, además se debe configurar las impedancias como “Definidas por el usuario”, de manera opcional se coloca la precisión en 0,001% con 255 iteraciones, la temperatura debe estar definida por las características del ambiente donde se realiza el estudio (90° C en el caso del ambiente subterráneo), los demás parámetros se configuran como “Como definido” y finalmente se presiona en “Ejecutar”.

Para visualizar el porcentaje de caída de voltaje se presiona “ALT” + “V”, esto despliega una ventana y se debe presionar sobre el tramo del circuito eléctrico donde se requiere conocer el porcentaje de la caída de voltaje.

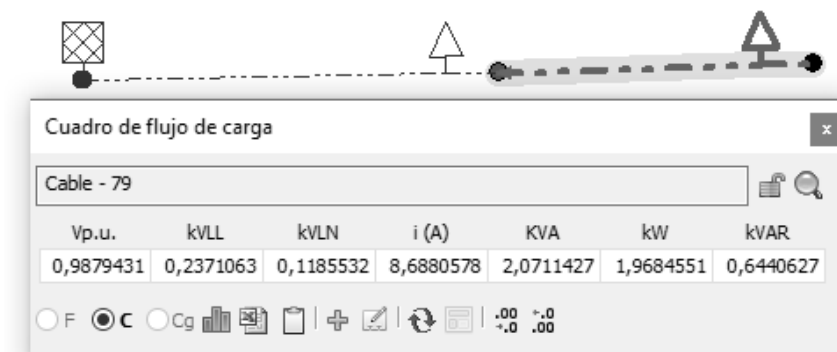


Figura 77. Porcentajes y valores de las caídas de voltaje en el circuito de prueba en el software CYME.

Fuente: Autor.

Anexo F: Ecuaciones de ajuste del cable de aluminio TTU aislado (como evidencia).

En circuitos trifásicos (3F – 4H).

Calibre	Ecuación de ajuste
# 6	$0,0000003 * N^2 + 0,0002 * N + 0,9661$
# 4	$0,0000001 * N^2 + 0,0002 * N + 0,9706$
# 2	$0,00000003 * N^2 + 0,0001 * N + 0,9787$
# 1/0	$0,00000002 * N^2 + 0,00007 * N + 0,9885$
# 2/0	$0,00000001 * N^2 + 0,00006 * N + 0,9928$
# 3/0	$0,000000008 * N^2 + 0,00005 * N + 0,9958$
# 4/0	$0,00000001 * N^2 + 0,00003 * N + 0,9967$

En circuitos monofásicos (1F – 3H).

Calibre	Ecuación de ajuste
# 6	$0,0000001 * N^2 + 0,0002 * N + 0,9593$
# 4	$0,00000004 * N^2 + 0,0001 * N + 0,9799$
# 2	$0,00000001 * N^2 + 0,00008 * N + 0,9635$
# 1/0	$0,000000006 * N^2 + 0,00005 * N + 0,9706$
# 2/0	$0,000000006 * N^2 + 0,00004 * N + 0,9764$
# 3/0	$-0,000000002 * N^2 + 0,00003 * N + 0,9830$
# 4/0	$0,000000001 * N^2 + 0,00003 * N + 0,9913$

Anexo G: Porcentajes obtenidos por simulación y la hoja de trabajo en Excel (el método aproximado), por estrato (completo).

Tabla 23. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato A (Trifásico).

A	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 3F-4H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	11,1852	10,3904	24,6074	22,8588	1,7486	7,10613	
#4	6,7777	6,5454	14,9109	14,4000	0,5110	3,42684	
#2	4,2080	4,1331	9,2576	9,0929	0,1647	1,77900	
#1/0	2,6560	2,6223	5,8432	5,7690	0,0742	1,26995	
#2/0	2,1236	2,0982	4,6719	4,6161	0,0558	1,19458	
#3/0	1,7042	1,6854	3,7492	3,7078	0,0415	1,10571	
#4/0	1,3738	1,3619	3,0224	2,9963	0,0261	0,86341	

Fuente: Autor.

Tabla 24. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato A (Monofásico).

A	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 1F-3H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	15,2872	17,4517	36,6893	41,8840	5,1947	14,15865	
#4	11,8675	10,7747	28,4820	25,8594	2,6226	9,20796	
#2	7,1535	6,9324	17,1684	16,6377	0,5307	3,09103	
#1/0	4,4450	4,3880	10,6680	10,5313	0,1367	1,28187	
#2/0	3,5370	3,5037	8,4888	8,4089	0,0799	0,94089	
#3/0	2,8349	2,8054	6,8038	6,7330	0,0708	1,04073	
#4/0	2,2882	2,2565	5,4917	5,4156	0,0761	1,38541	

Fuente: Autor.

Tabla 25. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato B (Trifásico).

B	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 3F-4H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	5,7306	5,6263	12,6073	12,3778	0,2296	1,82087	
#4	3,5565	3,5443	7,8243	7,7974	0,0269	0,34378	
#2	2,2363	2,2380	4,9199	4,9237	0,0038	0,07796	
#1/0	1,4217	1,4199	3,1277	3,1238	0,0039	0,12474	
#2/0	1,1395	1,1362	2,5069	2,4996	0,0073	0,29255	
#3/0	0,9162	0,9126	2,0156	2,0077	0,0079	0,39298	
#4/0	0,7396	0,7375	1,6271	1,6224	0,0047	0,28763	

Fuente: Autor.

Tabla 26. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato B (Monofásico).

B	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 1F-3H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	9,9970	9,4499	23,9928	22,6797	1,3131	5,47307	
#4	6,0591	5,8344	14,5418	14,0025	0,5393	3,70864	
#2	3,7477	3,7538	8,9945	9,0091	0,0146	0,16274	
#1/0	2,3597	2,3761	5,6633	5,7025	0,0393	0,69325	
#2/0	1,8854	1,8972	4,5250	4,5533	0,0284	0,62697	
#3/0	1,5157	1,5191	3,6377	3,6458	0,0081	0,22347	
#4/0	1,2261	1,2219	2,9426	2,9325	0,0102	0,34532	

Fuente: Autor.

Tabla 27. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato C (Trifásico).

C	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 3F-4H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	3,0223	3,0465	6,6491	6,7024	0,0533	0,8022	
#4	1,8955	1,9192	4,1701	4,2222	0,0521	1,2493	
#2	1,1992	1,2119	2,6382	2,6661	0,0279	1,0568	
#1/0	0,7652	0,7689	1,6834	1,6915	0,0081	0,4799	
#2/0	0,6140	0,6152	1,3508	1,3535	0,0027	0,1987	
#3/0	0,4941	0,4942	1,0870	1,0872	0,0001	0,0124	
#4/0	0,3999	0,3993	0,8798	0,8785	0,0012	0,1420	

Fuente: Autor.

Tabla 28. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato C (Monofásico).

C	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 1F-3H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	5,1517	5,1170	12,3641	12,2808	0,0833	0,6740	
#4	3,1882	3,1592	7,6517	7,5822	0,0695	0,9081	
#2	1,9943	2,0326	4,7863	4,8783	0,0920	1,9222	
#1/0	1,2637	1,2866	3,0329	3,0879	0,0550	1,8126	
#2/0	1,0118	1,0273	2,4283	2,4656	0,0373	1,5340	
#3/0	0,8146	0,8226	1,9550	1,9742	0,0191	0,9780	
#4/0	0,6597	0,6616	1,5833	1,5879	0,0046	0,2918	

Fuente: Autor.

Tabla 29. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato D (Trifásico).

D	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 3F-4H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	1,9031	1,9385	4,1868	4,2648	0,0779	1,86148	
#4	1,1985	1,2212	2,6367	2,6866	0,0499	1,89233	
#2	0,7601	0,7711	1,6722	1,6965	0,0242	1,44954	
#1/0	0,4858	0,4892	1,0688	1,0763	0,0076	0,70724	
#2/0	0,3900	0,3915	0,8580	0,8612	0,0032	0,37594	
#3/0	0,3140	0,3144	0,6908	0,6918	0,0010	0,13891	
#4/0	0,2538	0,2541	0,5584	0,5590	0,0007	0,11672	

Fuente: Autor.

Tabla 30. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato D (Monofásico).

D	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 1F-3H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	3,2173	3,2559	7,7215	7,8143	0,0928	1,20127	
#4	2,0061	2,0102	4,8146	4,8246	0,0099	0,20634	
#2	1,2604	1,2934	3,0250	3,1041	0,0791	2,61596	
#1/0	0,8007	0,8187	1,9217	1,9648	0,0431	2,24442	
#2/0	0,6416	0,6537	1,5398	1,5689	0,0290	1,88397	
#3/0	0,5169	0,5234	1,2406	1,2562	0,0156	1,25780	
#4/0	0,4188	0,4210	1,0051	1,0104	0,0053	0,52388	

Fuente: Autor.

Tabla 31. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato E (Trifásico).

E	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 3F-4H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
#6	1,3220	1,3540	2,9084	2,9789	0,0705	2,42344	
#4	0,8343	0,8530	1,8355	1,8766	0,0411	2,23899	
#2	0,5298	0,5386	1,1656	1,1850	0,0194	1,66422	
#1/0	0,3741	0,3417	0,8230	0,7518	0,0712	8,65396	
#2/0	0,3004	0,2734	0,6609	0,6016	0,0593	8,97650	
#3/0	0,2419	0,2196	0,5322	0,4832	0,0490	9,20626	
#4/0	0,1955	0,1775	0,4301	0,3905	0,0396	9,21571	

Fuente: Autor.

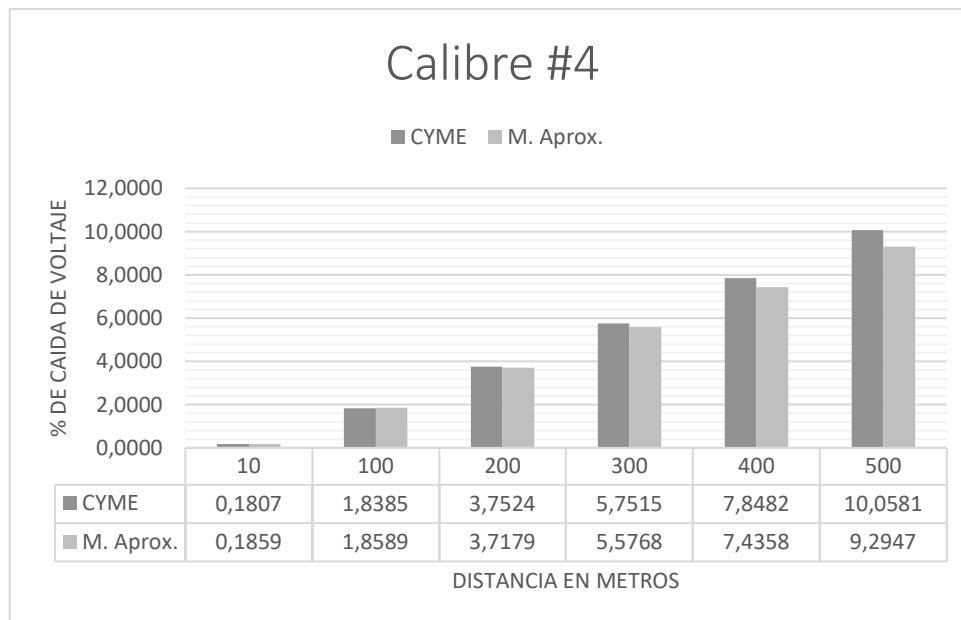
Tabla 32. Errores entre la simulación y el método aproximado, estrato E (Monofásico).

E	Tramo con la mayor caída de voltaje (Estratificación 1F-3H)						
	Calibres	%		V(L-L)		Error absoluto ± [V]	Error relativo ±%
		CYME	M. Aprox.	CYME	M. Aprox.		
	#6	2,2323	2,2742	5,3575	5,4582	0,1007	1,8789
	#4	1,3971	1,4041	3,3530	3,3699	0,0169	0,5031
	#2	0,8797	0,9034	2,1113	2,1682	0,0569	2,6947
	#1/0	0,5596	0,5718	1,3430	1,3724	0,0294	2,1859
	#2/0	0,4486	0,4566	1,0766	1,0958	0,0192	1,7818
	#3/0	0,3615	0,3656	0,8676	0,8774	0,0098	1,1314
	#4/0	0,2930	0,2941	0,7032	0,7057	0,0025	0,3616

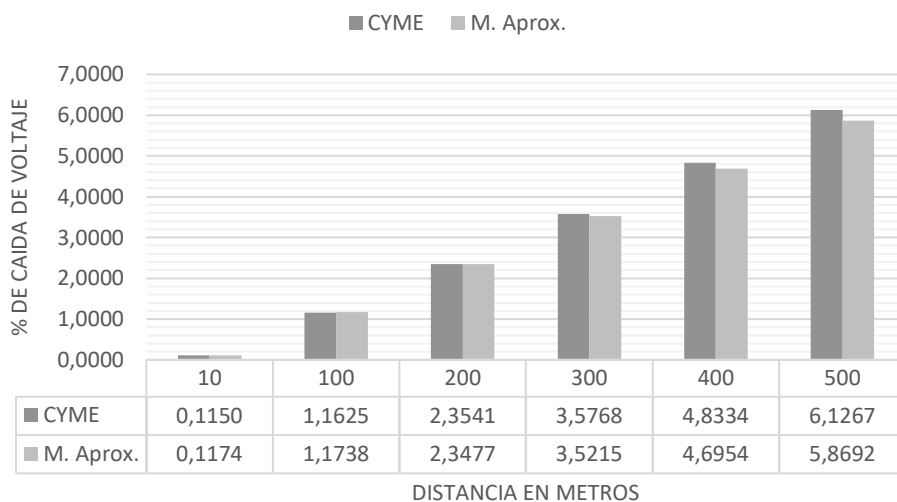
Fuente: Autor.

Anexo H: Caídas de voltaje entre la simulación y la hoja de trabajo en Excel (el método aproximado), en una longitud de 500 metros a carga constante (complementario).

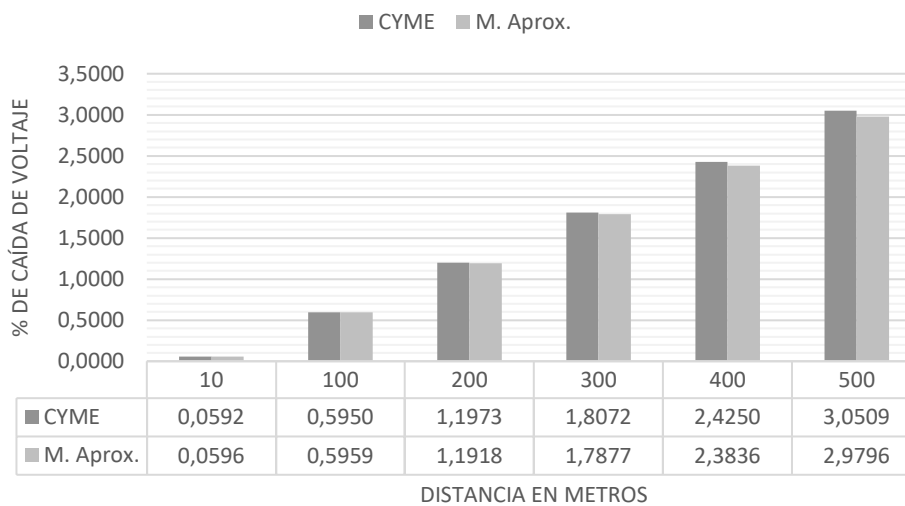
Configuración trifásica (3F – 4H).

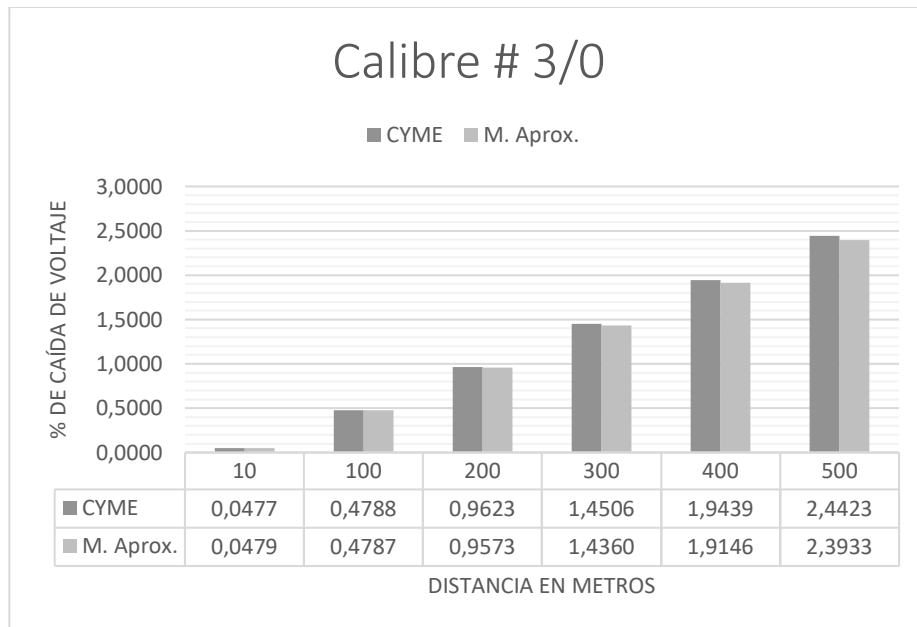


Calibre #2

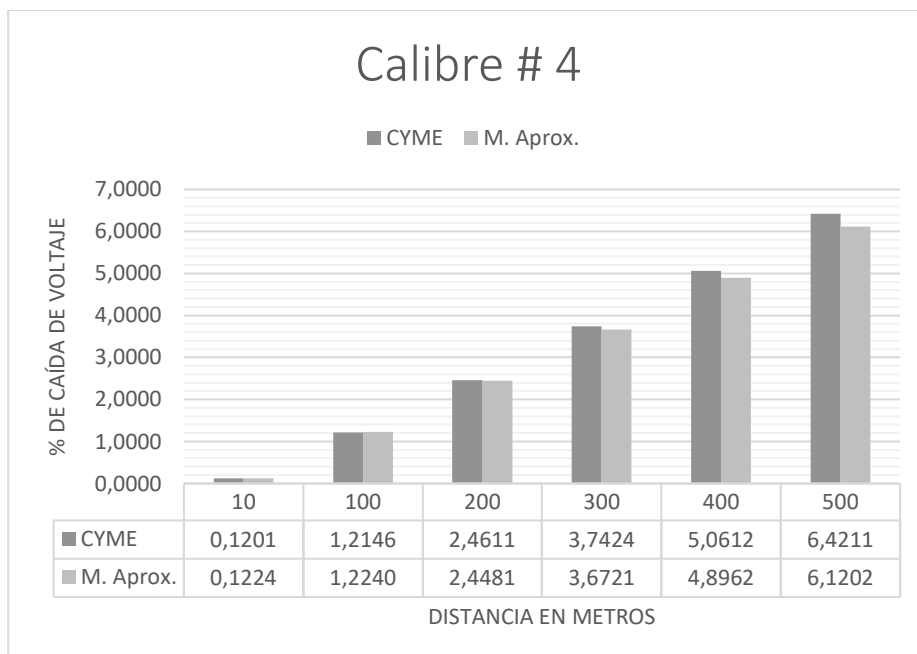


Calibre # 2/0

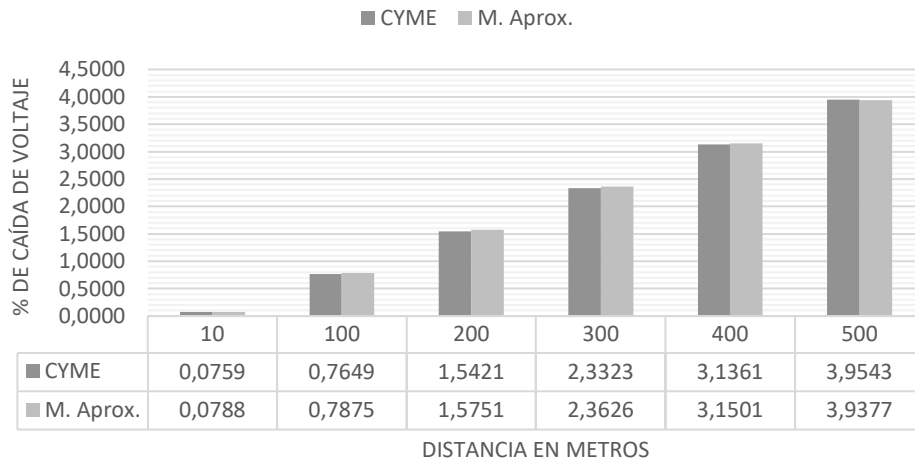




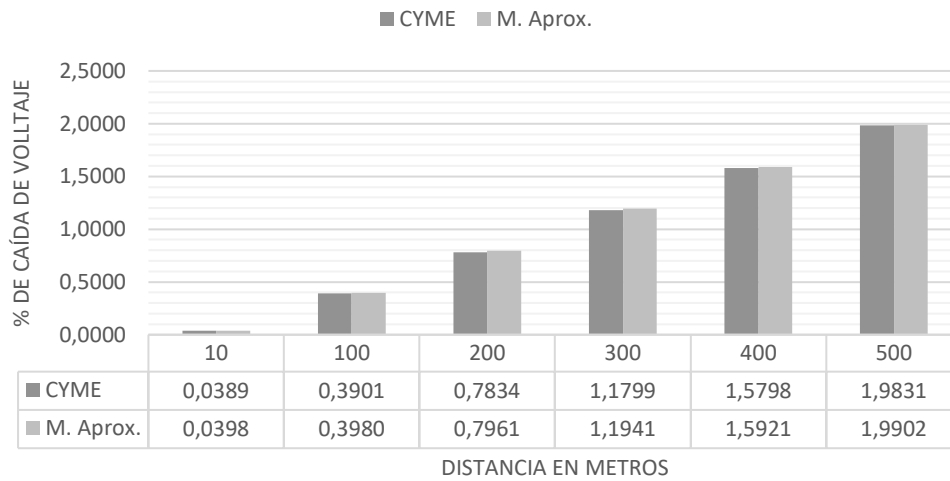
Configuración monofásica (1F – 3H).



Calibre # 2



Calibre # 2/0



Calibre # 3/0

■ CYME ■ M. Aprox.

