

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE AMPACIDAD DE LOS CONDUCTORES DE REDES SUBTERRÁNEAS DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIO VOLTAJE EN SUBESTACIONES DE LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

GRACE ANDREA LEMA CUAYAL

grace.lema@epn.edu.ec

DIRECTOR: MIGUEL ÁNGEL LUCIO CASTRO, MSc. -Ing.

miguel.lucio@epn.edu.ec

CODIRECTOR: FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI, Dr.-Ing.

fabian.perez@epn.edu.ec

Quito, enero 2022

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Grace Andrea Lema Cuayal, bajo nuestra supervisión.

MIGUEL ÁNGEL LUCIO CASTRO, MSc. Ing.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI, Dr. Ing.
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Grace Andrea Lema Cuayal, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Grace Andrea Lema Cuayal

DEDICATORIA

A mi señor por obsequiarme este hermoso regalo que es la vida.

A la memoria de mi bisabuelo Segundo Moposita que nunca dejó de creer en mí.

A mis padres Julia Cuayal y Juan Lema que son mi fuerza y motor para dar lo mejor de mí cada día, por su amor, cariño, comprensión y enseñanzas que han hecho de mí la mujer que soy.

A mi muy amada familia, por motivarme a ser cada día mejor,

Jimmy, Arturo, Blady, Dorlley, Angel, Mario, Antonio, Jesús, William, Gabino, Carmen, Mariana, Julio, Santos, Stalin, Felipe, Mishell, Erika

A mis muy amadas tías

Miryam, Carmen, Orten con mucho cariño.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi director MSc. Miguel Lucio por guiarme con paciencia, perseverancia y dedicación en la realización y culminación del presente trabajo de titulación, gracias cordiales.

Al Dr. Fabián Pérez por su predisposición y apoyo para la finalización del presente documento.

A MSc. Ricardo Dávila, a los Ing. William Mendoza, Oscar Proaño y Marco Sosa un agradecimiento infinito por todos los conocimientos y la ayuda desinteresada que me brindaron para poder culminar con éxito este trabajo de titulación.

A Empresa Eléctrica Quito por abrirme sus puertas y acogerme dentro de sus instalaciones; a todo el personal de la institución por compartir la información necesaria, conocimientos adicionales, experiencias y enseñanzas que aportan y enriquecen mi vida profesional, con agradecimiento especial al Ing. Zea y su grupo de trabajo asignados a la distribución de líneas subterráneas de la zona centro-norte.

Al MSc. Mauricio Soria por su paciencia, guía y ayuda en el proceso de obtención de la licencia de CYMCAP.

A Geraldhy Altamirano por ser alguien a quien considero un pilar importante en mi desarrollo como persona.

Un especial agradecimiento a los compañeros profesores, amigos, instructores, jefes y a todos aquellos que me acompañaron a lo largo de esta hermosa etapa, quedándome aun todavía mucho por aprender. Muchas gracias por todo: Jorge, Diego, Lorena, Blady, Marcelo, Danny, Karen, Cristian, Adrián, Pancho, Silvy, Santiago, Andrés, Paúl, Kathy, Stalin, Kevin, Alexis, Anita, muchas gracias de verdad.

Gracias Marcelo por jalarme las orejas de vez en cuando para no rendirme y recordarme que soy más importante que mis problemas.

Finalmente, agradezco a la Escuela Politécnica Nacional y a la carrera de Ingeniería Eléctrica por la formación recibida.

¡Gracias de todo corazón!

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 TERMINOLOGÍA Y ABREVIATURAS	2
1.1.1 TERMINOLOGÍA.....	2
1.1.2 ABREVIATURAS.....	3
1.2 OBJETIVOS.....	6
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.3 ALCANCE.....	6
1.4 MARCO TEÓRICO	7
1.4.1 CONDUCTORES ELÉCTRICOS.....	7
1.4.1.1 Características de los cables subterráneos de medio voltaje comúnmente utilizados.....	7
1.4.1.2 Partes del cable subterráneo de medio voltaje	9
1.4.1.3 Tipos de cables eléctricos para MV. subterráneos.....	12
1.4.2 BANCO DE DUCTOS.....	13
1.4.3 POZOS.....	13
1.4.4 SOFTWARE DE SIMULACIÓN CYMCAP.....	14
1.4.4.1 Características de CYMCAP	14
1.4.4.2 Limitantes de CYMCAP	15
1.4.4.3 Requerimientos del sistema para la instalación de CYMCAP ...	15
1.4.5 DATOS DE ENTRADA REQUERIDOS	16
1.4.5.1 Modelamiento del cable	16
1.4.5.2 Modelamiento del BD standard.....	19

1.4.5.3 Creación de un estudio	21
1.4.6 RESULTADOS EN CYMCAP	26
1.4.7 PARÁMETROS DE VARIACIÓN DE AMPACIDAD.....	27
1.4.7.1 Resistividad térmica (RHO).....	27
1.4.7.2 Factor de carga (<i>fc</i>).....	27
1.4.7.3 Bonding.....	28
1.4.7.4 Temperatura ambiente.....	30
1.4.7.5 Porcentaje de relleno	30
1.5 MODELADO MATEMÁTICO	30
1.5.1 MODELADO MATEMÁTICO SEGÚN NEHER-MCGRATH.....	30
1.5.2 MODELADO MATEMÁTICO SEGÚN IEC 60287.....	32
1.5.2.1 Resistencia continua	33
1.5.2.2 Efecto proximidad	33
1.5.2.3 Efecto piel	34
1.5.2.4 Resistencia en corriente alterna del conductor	35
1.5.2.5 Pérdidas dieléctricas	35
1.5.2.6 Pérdidas en la pantalla del cable	36
1.5.2.7 Resistencias térmicas	37
1.5.2.8 Determinación del efecto del suelo	38
2. METODOLOGÍA	43
2.1 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	43
2.1.1 FASES DE LA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	43
2.2 ANÁLISIS DE NORMATIVA Y REGLAMENTO	44
2.2.1 COMPILACIÓN DE LAS NORMATIVAS	45
2.2.1.1 National Electric Code (NEC).....	45
2.2.1.2 Especificaciones Técnicas de los Materiales para Sistemas de Distribución Eléctrica de Redes Subterráneas	49
2.2.1.3 Norma IEC 60502-2	49
2.3 RECOLECCIÓN DE DATOS PARA SIMULACIÓN DE BD	50
2.3.1 SIMULACIÓN DE CABLES DE MEDIA TENSIÓN.....	50
2.3.1.1 Características del conductor de las S/E 58, S/E 29.....	51
2.3.2 DATOS DEL BD DE LAS S/E's	52
2.3.2.1 Subestación El Quinche (S/E 58).....	52

2.3.2.2	Subestación Nueva Cumbayá (29)	54
2.3.2.3	Subestación Escuela Sucre (S/E 06)	56
2.4	MODELO COMPUTACIONAL Y VERIFICACIÓN & VALIDACIÓN DE MODELO DE BD EN CYMCAP	57
2.4.1	Modelo computacional, verificación & validación de modelo S/E 58	57
2.4.2	Modelo Computacional, verificación & validación de modelo Pozo 1 S/E 29	58
2.4.3	Modelo computacional, verificación & validación de modelo del Pozo 2 S/E 29.....	58
2.4.4	Modelo computacional, verificación & validación de modelo S/E 06	59
3.	RESULTADOS.....	61
3.1	DEFINICIÓN DE ESCENARIOS & ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE BD61	
3.1.1	CASOS DE ESTUDIO.....	69
3.1.1.1	Caso 1 - Ampacidad vs. Resistividad térmica	69
3.1.1.2	Caso 2 - Ampacidad vs. Factor de Carga	78
3.1.1.3	Caso 3 - Ampacidad vs. Altura.....	91
3.1.1.4	Caso 4 - Ampacidad vs. Temperatura.....	103
3.1.2	CASOS ATÍPICOS DE CONFIGURACIONES DE BANCOS DE DUCTOS.....	115
3.1.2.1	Subestación Río Coca (S/E 16)	115
3.1.2.2	Subestación Belisario Quevedo (S/E 11)	119
3.1.2.3	Subestación San Roque (S/E 07)	121
3.1.2.4	Subestación Pérez Guerrero (S/E 53).....	122
3.1.2.5	Subestación Eugenio Espejo (S/E 59)	123
3.1.2.6	Subestación Miraflores (09)	125
3.1.2.7	Subestación Diez Vieja (S/E 10)	125
3.2	GUÍA DE PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BANCOS DE DUCTOS SUBTERRÁNEOS EN MEDIO VOLTAJE EN BASE AL ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE AMPACIDAD DEL ESTADO ESTABLE	126
3.2.1	PASOS PARA EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN O MANTENIMIENTO DE BD.....	126
3.2.2	REQUISITOS PARA NUEVOS BD.....	130
3.2.3	TABLA DE AMPACIDADES EN BD DE CONCRETO.....	132

3.2.3.1 S/E 58	132
3.2.3.2 S/E 29	132
3.2.3.3 S/E 06	133
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	134
4.1 CONCLUSIONES	134
4.2 RECOMENDACIONES.....	134
4.3 TRABAJOS FUTUROS.....	135
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136
ANEXOS	138
ANEXO A	138
ANEXO B	138
ANEXO C	138
ANEXO D. DATOS DE CORRIENTE SUBESTACIÓN EL QUINCHE	138
ANEXO E. DATOS DE CORRIENTE SUBESTACIÓN NUEVA CUMBAYÁ ..	138
ANEXO F. DATOS DE CORRIENTE SUBESTACIÓN ESCUELA SUCRE ...	138
ANEXO G. RESULTADOS DEL MÓDULO DE CYMCAAP “ESTUDIOS PARAMÉTRICOS” S/E EL QUINCHE (58).....	138
ANEXO H. RESULTADOS DEL MÓDULO DE CYMCAAP “ESTUDIOS PARAMÉTRICOS” S/E NUEVA CUMBAYÁ POZO 1 (29)	138
ANEXO I. RESULTADOS DEL MÓDULO DE CYMCAAP “ESTUDIOS PARAMÉTRICOS S/E NUEVA CUMBAYÁ POZO 2 (29)	138
ANEXO J. RESULTADOS DEL MÓDULO DE CYMCAAP “ESTUDIOS PARAMÉTRICOS” S/E ESCUELA SUCRE (06)	138

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad aportar al análisis de redes subterráneas de medio voltaje desde 6.3 [kV] a 25 [kV]. Los parámetros de evaluación se basan en la normativa del Código Nacional Eléctrico y en la norma IEC 60287-3-1. A partir de ello, se elaboró una guía para el diseño de bancos de ductos subterráneos de medio voltaje con base en el estudio de variación de la capacidad máxima de corriente del cable en estado estable (ampacidad), a partir del levantamiento, la simulación, el análisis y los resultados de la información en el sitio de las subestaciones en concesión de la Empresa Eléctrica de Quito (Quinche - S/E El Quinche, Cumbayá – S/E Nueva Cumbayá and Quito - S/E Escuela Sucre). Los resultados obtenidos posibilitan la realización de un estudio que servirá para la toma de decisiones en futuros diseños de construcciones. Esta guía puede ser de ayuda para personal de construcciones, encargados de actualización geográfica de las redes eléctricas, diseñadores, contratistas o cualquier persona que diseñe o instale bancos de ductos subterráneos de medio voltaje.

PALABRAS CLAVE: Ampacidad, Banco de Ductos, Red Subterránea, CYMCAP, Media Tensión.

ABSTRACT

The evaluation of the parameters RHO, f_c , L and T, are based on the regulations of the National Electrical Code and on the IEC 60287-3-1 standard. The result of this work is the development of a guide for the design of banks of medium voltage underground ducts based on the analysis of variation in ampacity in steady state, from the data collection, simulation, analysis, and results of the information on the site of the substations under concession of the “Empresa Eléctrica Quito” (Quinche - SUB El Quinche, Cumbayá - SUB Nueva Cumbayá and Quito - SUB Escuela Sucre). The results will allow a study to be carried out that will serve for decision-making in future construction designs. This guide can be used by electrical construction workpeople, power grid geo-update managers, designers, contractors, or anyone who designs or installs medium-voltage underground duct banks.

KEYWORDS: Ampacity, Duct Bank, Underground Circuit, CYMCAP, Medium Voltage Underground Power Cables.

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas de distribución deben analizar los parámetros que suscitan cambios en la capacidad máxima de corriente del cable en estado estable, también llamada ampacidad [1] de redes subterráneas de medio voltaje, para satisfacer la demanda del usuario. El desarrollo de este estudio sobre la determinación de los parámetros de ampacidad de los conductores de distribución de medio voltaje está orientado a los problemas de calentamiento del cable a usarse en los niveles de 6.3 kV a 25 kV.

Es de mencionar que los sistemas aéreos están a la vista, por lo que es fácil detectar y solucionar problemas de diseño e instalación. Los problemas subterráneos, sin embargo, están fuera de la vista y de la mente, al menos hasta que los cables comiencen a fallar.

Aunque las empresas de servicios públicos diseñan sus circuitos subterráneos para una vida útil de 30 años, las instalaciones inadecuadas a menudo pueden provocar fallas prematuras en el campo. Un breve ejemplo de ello es que en la subestación Río Coca se presentó sobrecalentamiento de los cables 4/0 AWG, cambiaron los cables a 750 MCM y fue necesario rehacer el banco de ducto a túnel, al ser la configuración actualmente utilizada.

Ahora bien, el proyecto de titulación considera como primer punto el levantamiento de las normativas para el diseño y la construcción de bancos de ductos subterráneos tanto a nivel nacional como internacional, a fin de configurar los parámetros necesarios para la generación de casos de estudio de acuerdo con la capacidad máxima de corriente permitida por el cable en estado estable, sin sobrepasar los límites de temperatura ni afectar las características físicas ni eléctricas de este.

Cabe aclarar que los datos son obtenidos de las zonas Quinche, Cumbayá y Quito, por considerarse áreas representativas de la Empresa Eléctrica Quito; estas zonas fueron elegidas debido a la ubicación, el tipo de clima, el índice hídrico (húmedo, seco, subhúmedo), la variación estacional de humedad (exceso o déficit hídrico), el régimen térmico (cálido, semifrío, templado, frío), la temperatura ambiente y el número de alimentadores primarios de medio voltaje.

Con los datos obtenidos se busca realizar un modelamiento en el software de simulación CYMCAP. Además, se estudian las variaciones de ampacidad al cambiar la ubicación de los cables dentro del banco de ductos que operan a diferentes factores de carga.

El proyecto de titulación se limita a bancos de ductos en estado estable con materiales uniformes de concreto, PVC en concreto o metálicos; cables de medio voltaje (desde 6.3 [kV] hasta 25 [kV]) ubicados en ternas o individualmente dentro del banco de ductos.

Por otro lado, no se analiza el estado transitorio de los cables, el efecto producido por el neutro en los alimentadores primarios o los cables que no sean de medio voltaje, tampoco se toman en cuenta bancos de ductos directamente enterrados en galerías ni multi-bancos.

Con base en la simulación de distintos escenarios de los bancos seleccionados se redacta una guía que servirá para el diseño y la construcción de bancos de ductos de medio voltaje. Se espera obtener resultados de ampacidad concluyentes que den una pauta a la capacidad de conducción que tiene cada alimentador de las subestaciones seleccionadas.

Actualmente, los análisis para el diseño de ductos se limitan a la parte civil, pero no se enfocan en la máxima capacidad de corriente de los alimentadores de medio voltaje de las subestaciones, de modo que en este proyecto se desarrolla una guía de procedimientos para el diseño y la construcción de bancos de ductos subterráneos de medio voltaje que pueda ser utilizado tanto por personal de construcciones, encargados de actualización geográfica de las redes eléctricas, diseñadores, contratistas o cualquier persona que diseñe o instale bancos de ductos subterráneos de medio voltaje; por ende, esto no solamente servirá para la zona de los valles sino también para la parte urbana de Quito.

1.1 TERMINOLOGÍA Y ABREVIATURAS

1.1.1 TERMINOLOGÍA

Algunos conceptos clave utilizados en este proyecto de titulación son los siguientes [2]:

Altura. Profundidad del suelo o distancia del suelo, se refiere a la distancia de separación entre el suelo y la primera fila del banco de ductos subterráneo.

Resistividad térmica. Es la capacidad del material a oponerse al paso de calor, y su unidad de medida es [$^{\circ}C \cdot m/W$].

Alimentador primario. Son tres cables conductores que salen de la subestación de distribución para alimentar al resto de los transformadores de la red de distribución; también es llamado primario.

Cable/Conductor. Cable o conductor es el conjunto constituido por uno o varios hilos, generalmente de cobre o aluminio, envueltos en una o más capas de aislamiento, y que es

utilizado para conducir electricidad; se utiliza la palabra cable o conductor para referirse a una de las fases del alimentador primario.

Ampacidad. Es la corriente máxima que puede transportar un conductor en estado estable sin sobrepasar los límites de temperatura ni afectar las características físicas ni eléctricas del cable.

Corriente máxima. Corriente seteadada en el transformador de corriente como máxima en la subestación.

Ducto. Conducto o canal empleado para transportar energía eléctrica mediante 1 o más cables eléctricos.

Ampacidad nominal. Ampacidad en amperios del *National Electric Code*, según el calibre de los conductores del alimentador primario trifásico, dentro de un banco de un ducto.

Pozo de revisión eléctrico. También llamados pozos, son las estructuras diseñadas para permitir el acceso a la disposición del banco de ductos.

Banco de ductos. Canalización eléctrica que consta de, al menos, uno o más ductos que unen a uno o más puntos en común de la red.

Nivel de aislamiento del cable. Se refiere a la tensión nominal del cable, de acuerdo con los datos del fabricante.

Empalme. Unión de uno o más cables.

Punto de conexión aéreo-subterráneo. Estructura en la cual se produce la transición de aéreo a subterráneo.

Native soil. Es la resistividad térmica del suelo circundante; este término es utilizado en el software de simulación CYMCAP.

1.1.2 ABREVIATURAS

Las siglas utilizadas en el presente documento se exponen a continuación [2]:

MV. Medio Voltaje.

BD. Banco de ductos subterráneo.

S/E. Subestación eléctrica de una central de distribución.

AP. Alimentador primario.

RHO. Resistividad térmica.

R. Resistividad térmica del BD en PVC en concreto.

NEC. *National Electric Code.*

fc. Factor de carga.

S/E 58. Subestación El Quinche.

S/E 29. Subestación Nueva Cumbayá.

S/E 06. Subestación Escuela Sucre.

S/E 16. Subestación Río Coca.

S/E 11. Subestación Belisario Quevedo.

S/E 07. Subestación San Roque.

S/E 53: Subestación Pérez Guerrero.

S/E 59. Subestación Eugenio Espejo.

S/E 09. Subestación Miraflores

S/E 10. Subestación Diez Vieja

MCM, AWG. Medida del calibre del conductor, circular mil y American Wire Gauge, respectivamente.

EEQ. Empresa Eléctrica Quito.

Dmax. Demanda máxima.

Dm. Demanda media.

kV. Kilovoltios.

Cu. Cobre.

Al. Aluminio.

CYMCAP. *Cable Ampacity Calculation* (software).

MERNNR. Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, anteriormente llamado Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.

L. Altura

T. Temperatura

I_{amp} . Ampacidad

$I_{m\acute{a}x}$. Corriente máxima

P. Pozo

TC. Transformador de corriente

$fc2a2d$. Factor de carga 2 horas antes de demanda máxima y 2 horas después.

gcd . Factor de carga diario.

ARCGIS: Sistema de información geográfica el cual ofrece la posibilidad de visualizar la distribución de las redes eléctricas o diferentes datos dentro de plataformas corporativas siendo usuarios consultores y dentro de la cual el personal autorizado puede ingresar, eliminar o modificar información.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la ampacidad de los conductores en el rango de voltaje de 6.3 kV hasta 25 kV en subestaciones de zonas representativas de la Empresa Eléctrica Quito, considerando el efecto de la disposición constructiva de los bancos de ductos y el efecto térmico del suelo.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar los datos en sitios de las zonas representativas de las subestaciones de la Empresa Eléctrica Quito.
- Simular los bancos de ductos con la información generada en el levantamiento de datos en sitio utilizando el software de CYMCAP.
- Elaborar una guía de procedimiento para el diseño y la construcción de bancos de ductos subterráneos de medio voltaje, con base en el análisis de variación de ampacidad en estado estable.

1.3 ALCANCE

Para compensar la demanda del usuario, las empresas de distribución necesitan analizar los parámetros que provocan cambios en la ampacidad [1] de redes subterráneas de medio voltaje. Así pues, el desarrollo de este estudio sobre la determinación de los parámetros de ampacidad de los conductores de redes subterráneas de distribución de medio voltaje está orientado a los problemas de calentamiento del conductor de medio voltaje en el rango de 6.3 kV a 25 kV.

El proyecto de titulación considera como primer punto el levantamiento de las normativas para el diseño y la construcción de bancos de ductos subterráneos tanto nacional como internacional, con el propósito de configurar los parámetros para los casos de estudio.

Es preciso señalar que los datos son obtenidos de las zonas Quinche, Cumbayá y Quito, por considerarse áreas representativas de la Empresa Eléctrica Quito; estas zonas se eligieron con base en la ubicación, el tipo de clima, el índice hídrico (húmedo, seco, subhúmedo), la variación estacional de humedad (exceso o déficit hídrico), el régimen térmico (cálido, semifrío, templado, frío), la temperatura ambiente y el número de

alimentadores primarios de medio voltaje. Con los datos obtenidos se realiza un modelamiento en el software de simulación CYMCAP. Se simulan las variaciones de ampacidad al cambiar la ubicación de los cables dentro del banco de ductos a diferentes factores de carga.

El proyecto de titulación se limita a bancos de ductos en estado estable con materiales uniformes de concreto, PVC en concreto o metálicos; cables de medio voltaje (desde 6.3 kV hasta 25 kV) ubicados en ternas o individualmente dentro del banco de ductos. Entre tanto, no se analizan el estado transitorio de los cables, el efecto producido por el neutro en los alimentadores primarios o cables que no sean de medio voltaje tampoco se tomará en cuenta bancos de ductos directamente enterrados, ni galerías, ni multibancos.

Por último, en concordancia con la simulación de distintos escenarios de los bancos de ductos seleccionados, se redacta una guía que servirá para el diseño y la construcción de bancos de ductos de medio voltaje.

1.4 MARCO TEÓRICO

En este apartado se presenta la definición de los principales tipos de conductores utilizados, sus elementos y características, factores que afectan la capacidad máxima de corriente que puede transportar un cable en estado estable, software y las configuraciones de ductos que se simulan en CYMCAP.

1.4.1 CONDUCTORES ELÉCTRICOS

Los materiales conductores de corriente son aquellos que ofrecen poca resistencia al paso de esta, los más conocidos son los conductores metálicos como oro, plata, cobre, aluminio o aleaciones. Actualmente, tanto el oro como la plata poseen precios elevados, razón por la cual las empresas de distribución de energía eléctrica prefieren la utilización de conductores de cobre [3], aluminio o aleaciones [4].

1.4.1.1 Características de los cables subterráneos de medio voltaje comúnmente utilizados

En esta sección se detallan las características y diferencias de los principales conductores metálicos utilizados en los sistemas de distribución de medio voltaje, que son los cables de Cu y los de Al. Seguidamente, en la Tabla 1.1. se detallan las principales propiedades de cada material, tales como conductividad térmica, resistencia a la tracción, capacidad de expansión, peso, precio, entre otras.

Tabla 1.1. Características principales de los materiales de Cu y Al [5]

Propiedades principales	Material	
	Cobre	Aluminio
Conductividad térmica	Alta	El aluminio tiene solo el 60 % de la conductividad del cobre.
Resistencia a la tracción	Resistente	Menor resistencia a la tracción.
Capacidad de expansión	Alta	Menor capacidad de expansión.
Peso	Más pesado	30 % menos del peso del conductor de cobre. Un cable pelado de aluminio pesa la mitad que uno de cobre con la misma resistencia eléctrica.
Precio	Caro	Su precio por unidad de peso es menor en una tercera parte.
Otras	Susceptible a robos	Mayor área en la sección transversal para soportar la misma cantidad de corriente que el cobre.

A continuación, en Tabla 1.2. , se muestra la resistividad y el peso específico del cobre y del aluminio, según la norma IEC 60287-3-1 [6].

Tabla 1.2. Características eléctricas

Características	Material			
	Cobre	Simbología	Aluminio	Simbología
Resistividad a 20 °C [$\Omega \cdot mm^2/m$]	0.01724	ρ_C	0.0282	ρ_A
Peso específico a 20 °C [g/cm ³]	8.89	P_A	2.72	P_C

Para una sección transversal de Al (S_A) y una sección transversal de Cu (S_C) con la misma resistencia eléctrica, la relación entre ambas es la ecuación (1.1):

$$\frac{S_A}{S_C} = \frac{\rho_A}{\rho_C} = \frac{2,82}{1,72} = 1.64 \quad (1.1)$$

ρ_A y ρ_C se definen en la Tabla 1.2.

El Resultado de la relación de sección transversal de aluminio y cobre es la ecuación (1.2) [6]:

$$S_A = 1.64 * S_C \quad (1.2)$$

Los valores de ρ tanto para el aluminio como para el cobre son los establecidos en la norma IEC 60287-3-1 [6], de manera que el conductor de aluminio debe superar en 64 % el tamaño del conductor de cobre para mantener la misma resistencia eléctrica. El peso de un cable desnudo de aluminio con la misma resistencia eléctrica que la del cobre es aproximadamente la mitad, esta relación se muestra en la ecuación (1.3).

$$\begin{aligned}Rp &= 1.64 * \frac{P_A}{P_C} \\Rp &= 1.64 * \frac{2.72}{8.89} \\Rp &\approx 0.5\end{aligned}\tag{1.3}$$

Donde:

Rp es la relación del peso del cable desnudo.

El significado y los valores de P_A y P_C se encuentran en la Tabla 1.2. Cabe mencionar que la principal preocupación para la utilización de materiales de cobre es el robo que puede sufrir este material, debido a que esto es común en el área de concesión de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ), sugiriendo un cambio a cables de aluminio para nuevos diseños.

1.4.1.2 Partes del cable subterráneo de medio voltaje

A continuación, se muestran las seis capas que componen a los cables subterráneos de medio voltaje en la Figura 1.1.

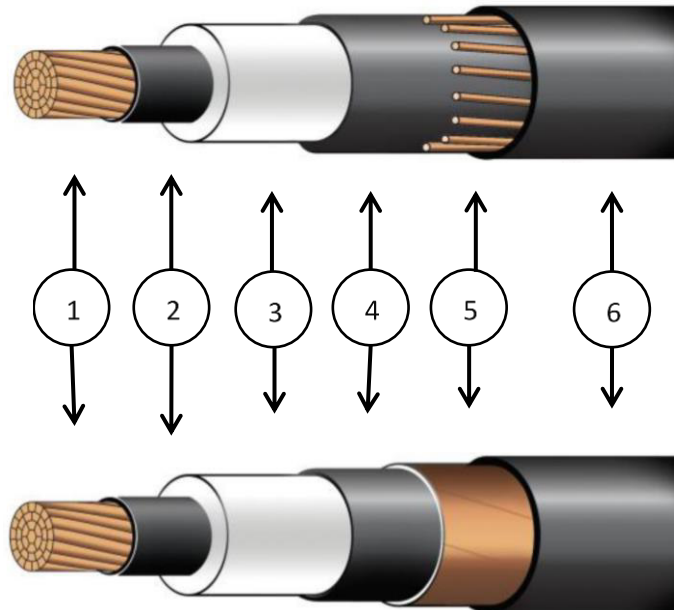


Figura 1.1. Tipos de aislamientos

Es necesario resaltar que estas capas cumplen con las especificaciones técnicas del MERNNR [7].

1. Núcleo conductor:

El elemento principal de un cable es el núcleo conductor, pues en el circula la corriente eléctrica, como se mencionó en el numeral anterior, los materiales más utilizados son aluminio o cobre. Este es el material conductor o de transporte para la energía eléctrica que alimentará a las cargas. El núcleo del cable puede ser compactado o concéntrico, como se muestra en la Figura 1.2:

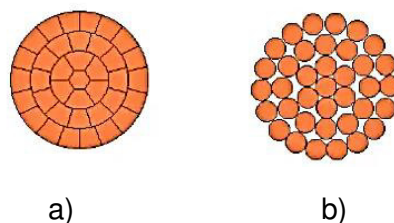


Figura 1.2. a) Núcleo conductor de cable compacto (por diámetro de conductor). b) Núcleo conductor de cable concéntrico (por número de hilos) [8]

Ahora bien, debido a la capacidad de conducción y las características mecánicas de los cables de medio voltaje se utilizan núcleos conductores formados por varios hilos [8], en el caso de un calibre de 4/0 AWG, el MERNNR [7] indica que el número de hilos debe ser de 19, mientras que para calibres superiores de 37.

2. Semiconductor interno:

Es la primera capa de aislamiento, su material es semiconductor y termoestable. El propósito de esta capa es evitar fallas o roturas en el aislamiento, además de impedir el contacto directo con el núcleo conductor.

3. Aislamiento XLPE o EPR:

El material recomendado para cables de medio voltaje, según las normas ecuatorianas, puede ser de aislamiento de XLPE, que es polietileno reticulado; o puede ser un aislamiento de EPR, es decir, etileno propileno con aislamiento de caucho.

Asimismo, la temperatura máxima en condiciones de funcionamiento normal para estos tipos de aislamientos es de 90 °C y bajo condiciones de emergencia soporta 130 °C. En caso de superar estas temperaturas la vida útil del cable puede verse afectada [7].

4. Semiconductor externo:

El campo eléctrico tiende a concentrarse en el punto que sea más cercano a tierra. Para distribuirlo de manera uniforme se encierra con un aislante llamado semiconductor externo.

5. Pantalla metálica:

La pantalla metálica sirve para evitar las fallas a tierra por cortocircuito, y puede estar conformada por hebras de cobre o por cinta, como se muestra en la Figura 1.2 Esta pantalla es la encargada de lo siguiente:

- Contener dentro del cable al campo eléctrico.
- Conducción de corrientes de cortocircuito.
- Impedir radio-interferencias.
- Alrededor del cable es la encargada de crear una referencia a tierra.

6. Chaqueta:

Este elemento exterior se encarga de soportar las condiciones del entorno, por lo que estará expuesto a agentes químicos, ambientales y mecánicos; esto permite que el

conductor mantenga su vida útil. Los materiales más comunes para la chaqueta son polietileno (PE) y policloruro de vinilo (PVC) [3, 8].

1.4.1.3 Tipos de cables eléctricos para MV. subterráneos

Según el número de conductores, pueden ser unipolares o multipolares.

1.4.1.3.1 *Monopolar o unipolar*

El conductor se muestra en la

Figura 1.3. y se puede observar que consta de siete capas adicionales al núcleo conductor. Dentro de las subestaciones, generalmente, es el encargado de la transferencia de energía eléctrica de una fase de un alimentador primario.

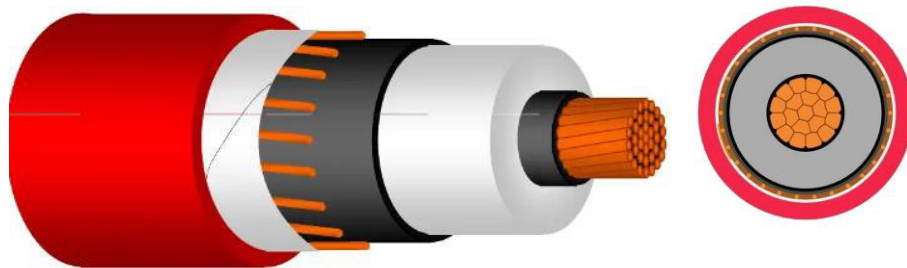


Figura 1.3. Conductor unipolar [9]

1.4.1.3.2 *Tripolar*

Como puede evidenciarse en la

Figura 1.4., consta de tres núcleos conductores que comparten sus capas de aislamiento. Cada conductor puede encargarse del paso de corriente de una fase del alimentador primario, de forma que un solo cable tripolar puede enviar las cargas de cada fase de un determinado alimentador primario dentro de una subestación.

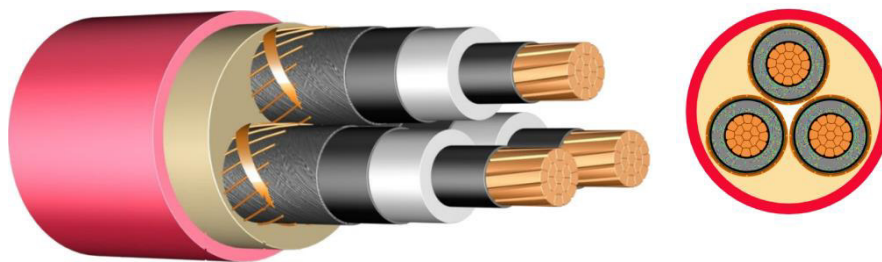


Figura 1.4. Conductor tripolar [9]

Adicional a esto, la estructura del identificador nemotécnico comienza con el primer campo en el que, para el caso de redes subterráneas, se simbolizan con EU; el segundo campo depende del nivel de voltaje S, T, V para 6.3 kV, 13.8 kV o 22kV, respectivamente; en el tercer campo se encuentran el número de fases; el cuarto campo corresponde a la disposición B en el caso de bancos de ductos y P para pozos; finalmente, las características técnicas o función del elemento se encuentran en el quinto campo.

En caso de no aplicar dentro de los identificadores del ANEXO A se colocará un 0. Tanto los bancos de ductos como los pozos son homologados en el catálogo digital de Redes de distribución de Energía Eléctrica [10].

1.4.2 BANCO DE DUCTOS

El diámetro de los ductos puede ser de 50 mm, 110 mm o 160 mm. Puede ubicarse en aceras o en calzadas, y consta de una hasta cuatro filas y dos o hasta cuatro columnas representadas así:

Fila x Columna

Por ejemplo, estructura para redes subterráneas, banco de ductos, configuración cuatro filas por dos columnas de 160 mm en calzada: EU0-0B4x2C2.

1.4.3 POZOS

Las dimensiones interiores del pozo: largo (l), ancho (a) y profundidad (p) en metros, varían de acuerdo con lo establecido en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Tipos de pozos [10]

Tipo	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)
Tipo A	0.60	0.60	0.75
Tipo B	0.90	0.90	0.90
Tipo C	1.20	1.20	1.20
Tipo D	1.60	1.20	1.50
Tipo E	2.50	2.00	2.00

En caso de dimensiones diferentes a las de la Tabla 1.3. se las nombrara X, Y o Z, según el rango:

X: $l \leq 0.4; a \leq 0.4; p < 0.6$

Y: $0.4 < l \leq 0.8; 0.4 < a \leq 0.8; p \leq 1.0$

Z: $l > 0.8; a > 0.8; p > 1.0$

Ejemplo: estructura para redes subterráneas, pozos, dimensiones 1,60 x 1,20 x 1,50: EU0-0PD

1.4.4 SOFTWARE DE SIMULACIÓN CYMCAP

CYMCAP o *Cable Ampacity Calculations* es un software creado para realizar cálculos de la intensidad máxima admisible. Permite el modelamiento de cables por encima de los 5 [kV] [11].

1.4.4.1 Características de CYMCAP

Permite modelar las instalaciones eléctricas para determinar la máxima capacidad de corriente que el cable puede soportar sin deteriorar la vida útil del mismo. Se utilizan los procesos iterativos que se basan en los métodos de las normas IEC 287 y el método Neher McGrath.

Es de mencionar que el paquete original fue desarrollado en Canadá por CYME Internacional junto con la Universidad McMaster e Hydro One. Genera resultados en informes tabulares y gráficos; igualmente, permite el diseño de cables unipolares,

tripolares, además de visualizarlos de forma gráfica y detallada, y pueden ser modificados y añadidos a la base de datos del programa.

De igual modo, posee un almacenamiento de datos en las bibliotecas de aplicaciones CYMCAP. Como ejemplo de estas bibliotecas se hallan: bibliotecas de estudios, de cables, de bancos de ductos. Posee varios tipos de cable dentro de una instalación, los cables pueden ser modelados en ductos enterrados, directamente enterrados, en bancos de ductos.

1.4.4.2 Limitantes de CYMCAP

- No es un software libre.
- Los módulos adicionales requieren de la compra de estos.
- Solo se puede colocar una fase por ducto o tres fases por ducto.
- Aunque el software permite modelar varios cables por fase, esta configuración debe ser igual para todas las fases del alimentador primario simulado.
- El BD es simulado como isoterma, es decir que se considerará la misma temperatura dentro de todo el sistema.
- En caso de ocurrir un error se debe reiniciar el programa, por lo que se debe guardar a menudo.
- Lenguaje de la interfaz solamente en francés o en inglés.

1.4.4.3 Requerimientos del sistema para la instalación de CYMCAP

Se recomienda instalar la versión 2.0 de Microsoft .NET framework.

1.4.4.3.1 Hardware

Requiere un computador con sistema operativo Microsoft Windows 7, 8 o 8.1 o Microsoft Server 2008 [12]. Los siguientes son los requerimientos mínimos:

- Computador i5.
- Mínimo 2 GB de RAM.
- Espacio de disco duro de al menos 1GB.

1.4.4.3.2 Módulos adicionales en CYMCAP

El módulo básico de CYMCAP permite realizar estudios en estado estable de los bancos de ductos de la biblioteca. No obstante, en caso de requerir análisis especializados puede ser necesaria la adquisición de uno varios de los módulos extra. En la Tabla 1.4. se muestra las principales funcionalidades de 2 de las adiciones que ofrece CYMCAP.

Tabla 1.4. Principales módulos accesorios de CYMCAP [11]

Nombre	Función
CYMCAP Bancos de Ductos Múltiple	Permite la simulación de 2 o más bancos de ductos en un mismo caso de estudio.
CYMCAP Estudios Paramétricos	Permite graficar la variación de la ampacidad de cada alimentador versus valores de entrada tales como factor de carga, temperatura o altura de entierro

1.4.5 DATOS DE ENTRADA REQUERIDOS

1.4.5.1 Modelamiento del cable

Para realizar una o varias simulaciones en CYMCAP se comienza seleccionando el botón “New”, o en caso de continuar la edición de un estudio anterior se debe dar clic en “Open file” de la

Figura 1.5. se abre la ventana en la que se puede crear un nuevo estudio, introduciendo de la biblioteca los bancos de ductos a utilizar junto con los alimentadores primarios, se puede utilizar las plantillas ya existentes o modelar según el caso [11].

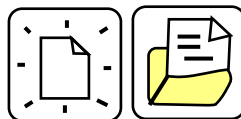


Figura 1.5. Selección de nuevo estudio en CYMCAP [1]

De tal manera, se comienza seleccionando la pestaña cable, dentro de esta ventana se selecciona el botón “New” y se ingresa la información que permitirá identificar al cable, como la ID, el título y, opcionalmente, comentarios y clic en “ok”. La Figura 1.6. muestra en orden los primeros pasos a seguir para la generación de un nuevo cable.

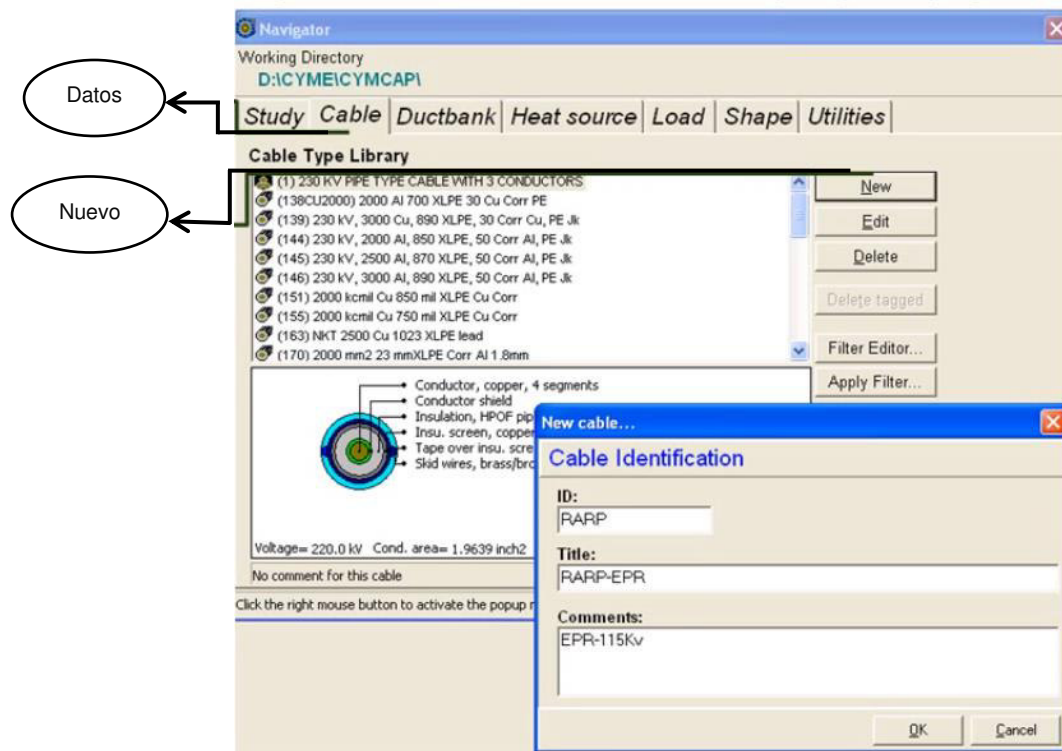


Figura 1.6. Ventana de navegación [11]

Ahora bien, se recomienda utilizar títulos relacionados al calibre de conductor para facilitar la ubicación de estos al realizar o modificar un estudio. En la Figura 1.7. se evidencian los primeros pasos para la creación de un cable, los cuales son:

1. Seleccionar el cable unipolar o tripolar.
2. Seleccionar el tipo de cable.
3. Especificar el voltaje fase-fase.
4. Especificar el área del conductor.

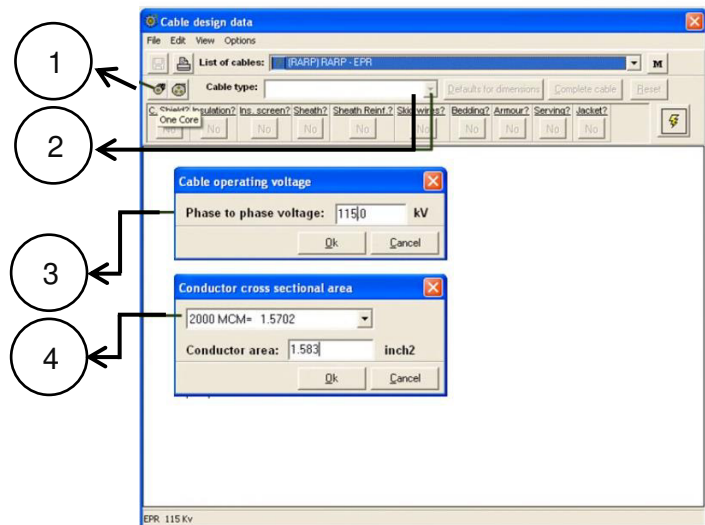


Figura 1.7. Datos de diseño del cable [11]

En la ventana para el diseño del cable de la Figura 1.8. se debe dar clic en el enlace del conductor y se especifica el material, el tipo de construcción, el número de hilos y el diámetro del conductor.

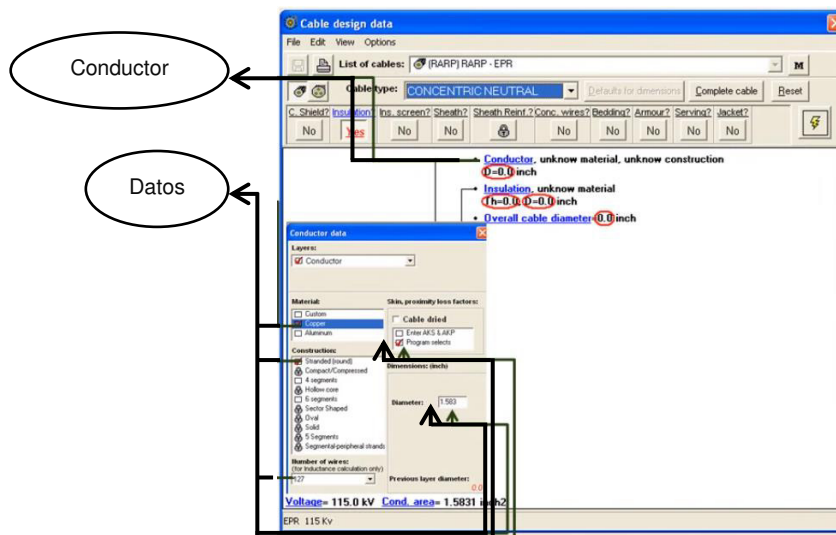


Figura 1.8. Datos de diseño del cable, datos de la capa conductor [11]

A continuación, en la barra de la Figura 1.9. se seleccionan las capas de aislamiento que rodearán al cable.

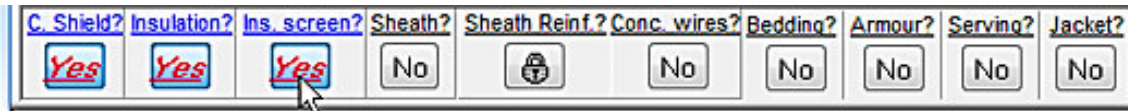


Figura 1.9. Selección de capas [11]

Luego, se debe dar clic en el enlace de cada capa (c), se ingresan los datos necesarios en cada una de las partes (d). La Figura 1.10. muestra los datos requeridos para la chaqueta siendo estos el material, el grosor o el diámetro.

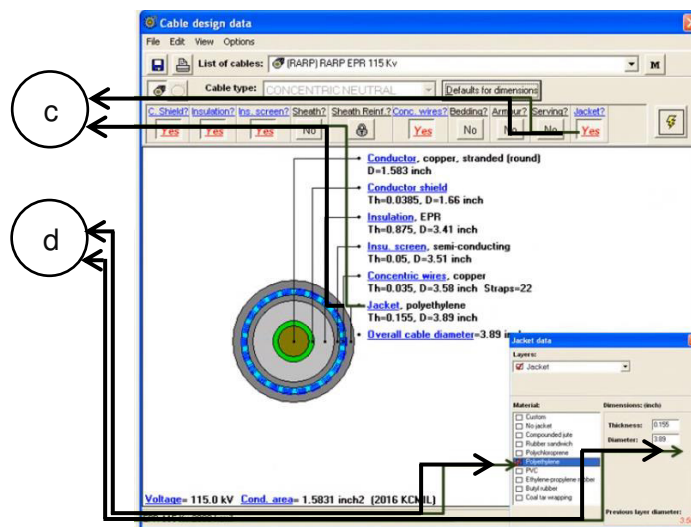


Figura 1.10. Datos de chaqueta [11]

1.4.5.2 Modelamiento del BD standard

- Se comienza seleccionando la pestaña BD, en la librería se elige la configuración que se asemeje a la que se va a crear (Lib).
- Clic en el botón "New" y en la ventana de confirmación, clic en "Yes", tal como se presenta en la Figura 1.11.
- Se sugiere nombrar al BD por el número de filas y columnas junto con el número de subestación.

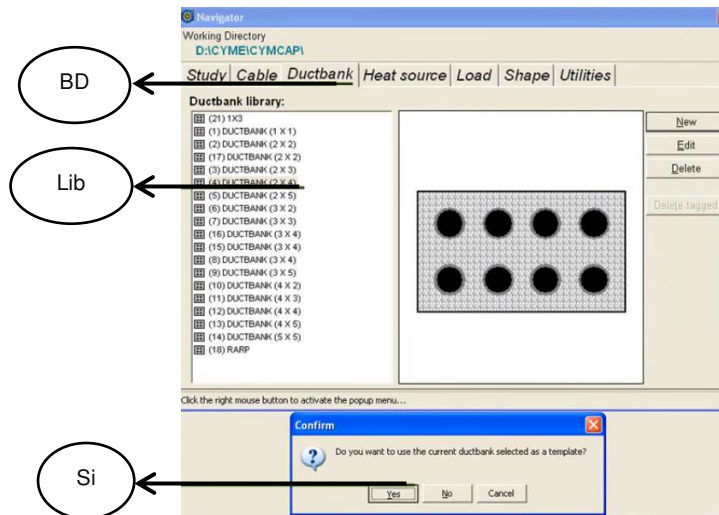


Figura 1.11. Ventana de navegación, creación de BD [11]

En la Figura 1.12. se encuentra la interfaz para la creación de un BD en la que se presiona la tecla F5 para abrir el menú de configuración del BD. Seguidamente, se deben ingresar las dimensiones del BD y, por último, guardar el diseño.

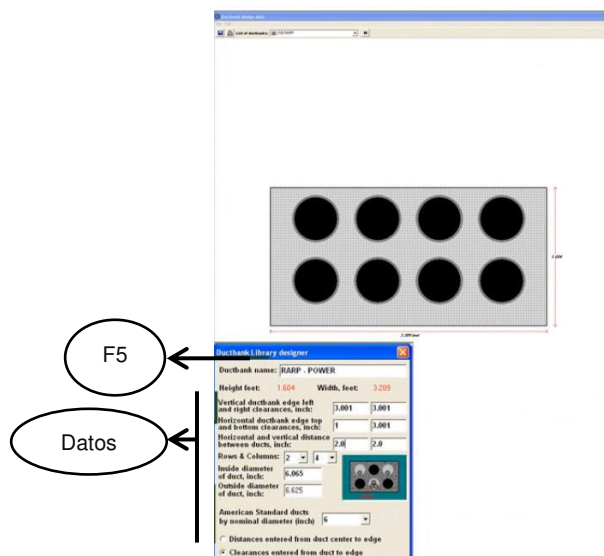


Figura 1.12. Diseño de BD

Cabe señalar que se pueden crear más bancos de ductos repitiendo los pasos anteriores.

1.4.5.3 Creación de un estudio

Cada vez que se cree un nuevo estudio se tendrá la opción de utilizar las plantillas de estudio de la librería o crear uno nuevo.

- a) Si se usa una de las plantillas, se solicitará que etiquete ese nuevo estudio con un ID y título de estudio únicos solamente.
- b) Si se crea un estudio nuevo, se le pedirá que ingrese una breve descripción de su ejecución. La Figura 1.13. muestra el orden de creación para un nuevo estudio:
 - Se selecciona la pestaña estudio y clic en el botón “nuevo estudio”.
 - Se ingresa la información para identificar el estudio.
- c) Se selecciona la opción de solución; estas pueden ser en estado estable con lo siguiente:
 - Carga equilibrada
 - Carga desequilibrada
 - Temperatura.

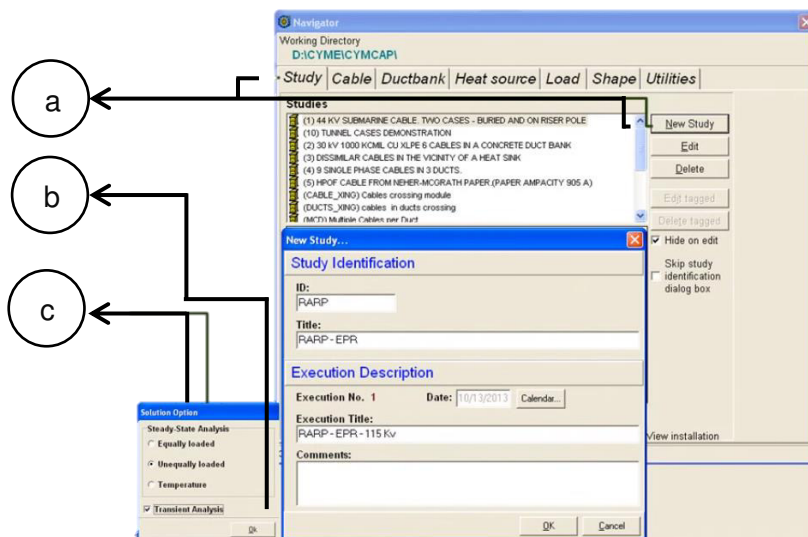


Figura 1.13. Nuevo estudio [11]

En la Tabla 1.5. se listan los principales elementos para etiquetar un nuevo estudio junto con su función.

Tabla 1.5. Información requerida para la creación de un nuevo estudio [11]

ID	Es el ID de estudio único. Consiste en una cadena alfanumérica, de 10 caracteres de longitud. CYMCAP lo utiliza para fines de administración de datos.
Title	Este es el título del estudio, sirve para enumerarlos. Es una cadena alfanumérica con una longitud de 60 caracteres.
Execution Title	El título de ejecución es una cadena alfanumérica de 60 caracteres de longitud. Las diferentes ejecuciones deben tener diferentes títulos para una mejor identificación de cada caso a ejecutar.
Comments	Ingresar aquí cualquier información importante adicional que deba recordarse en una ejecución en particular.
Date	La fecha está sincronizada al reloj de la computadora, el usuario puede especificar la fecha de la ejecución con el calendario que proporciona CYMCAP.

Ahora, se debe seleccionar la opción BD estándar; a continuación, puede seleccionar la opción si para crear un BD no estándar o clic en no para utilizar uno de la librería. En la Figura 1.14. se observa las opciones y ventanas mencionadas.

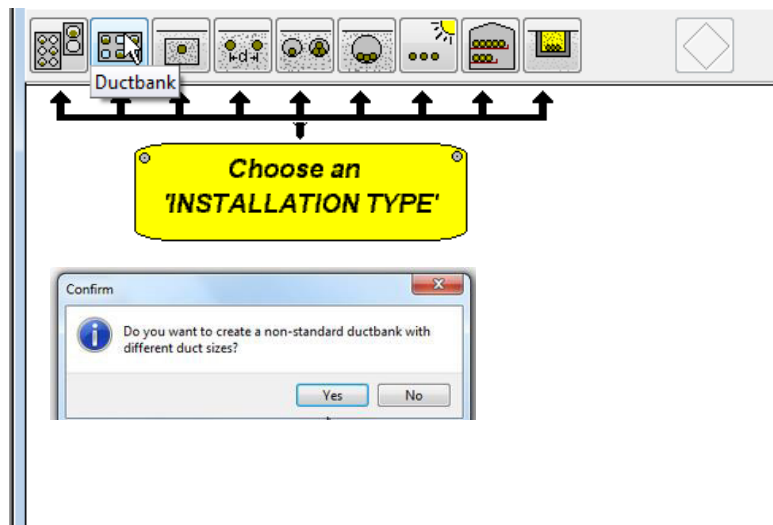


Figura 1.14. Tipo de instalación [11]

A continuación, se visualiza la interfaz de la Figura 1.15., a la derecha se encuentra la vista preliminar del BD. Los pasos para seguir son los siguientes:

- Seleccionar el BD de la librería
- Definir la ubicación del BD en el eje, ingresar la distancia de profundidad del ducto. Esto puede ser medido desde lo siguiente:
 - El nivel de la superficie

- El centro del BD
- La parte inferior
- Clic en aplicar

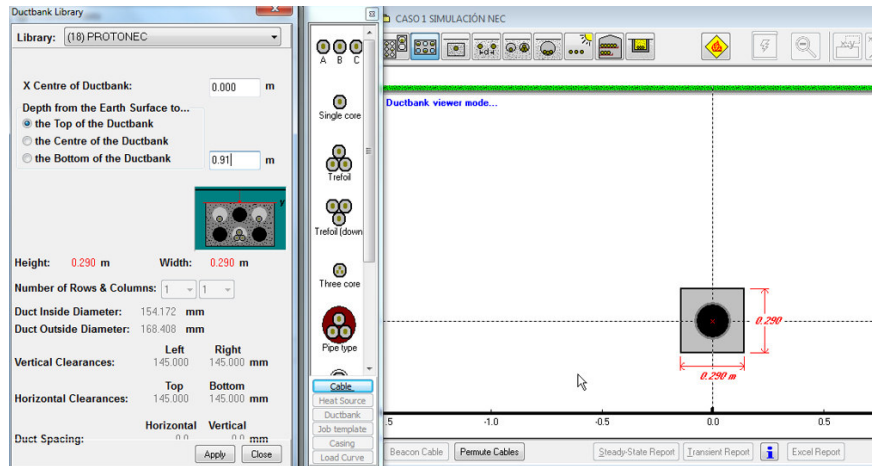


Figura 1.15. Librería de bancos de ductos [11]

Enseguida, se especifican los datos de entrada del estudio, tales como temperatura ambiente, resistividad térmica y datos del ducto, como posición, material del ducto y resistividad térmica del concreto.

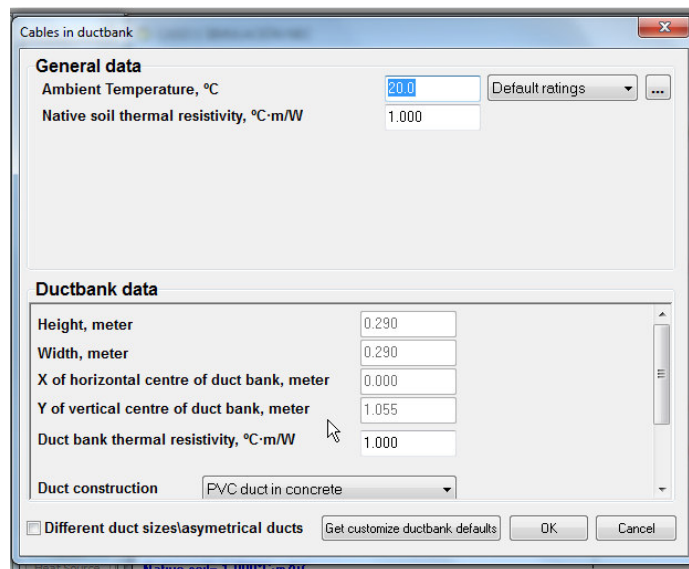


Figura 1.16. Cables en bancos de ductos [11]

Se selecciona el número de cables y su configuración, junto con el factor de potencia, la temperatura del conductor y el factor de carga.

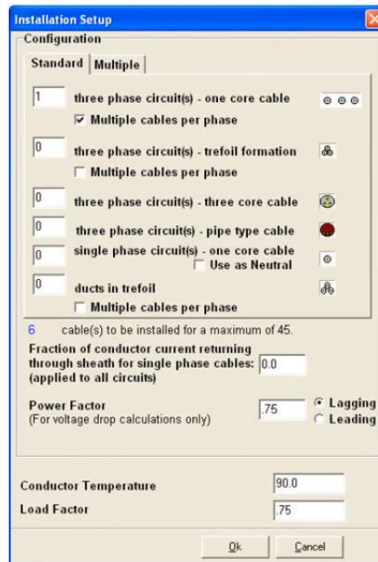


Figura 1.17. Configuración de instalación [11]

Luego, se debe dar clic en ok, y a continuación se edita el cable. Otra opción para abrir la ventana mostrada en la Figura 1.17. es ir a la barra de ejecución y seleccionar el ícono de la Figura 1.18.

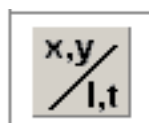


Figura 1.18. Ícono de instalación de datos [11]

Esto permitirá seleccionar el calibre del conductor; cuando la ventana de la librería del cable se abra se especificará: el tipo de cable, la temperatura del conductor y el factor de carga de la o las fases del alimentador primario.

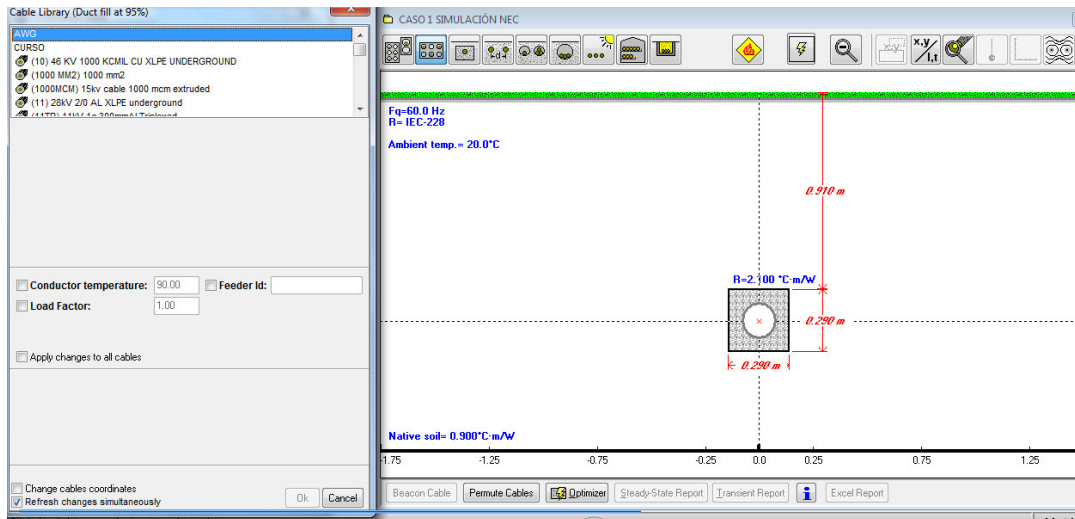


Figura 1.19. Librería del cable [11]

Doble clic en el cable que se desea instalar, se selecciona el ícono de instalación específica de la Figura 1.20:



Figura 1.20. Ícono de instalación específica del cable [11]

Entre tanto, en la Figura 1.21. consta la información de unión de “bonding”.

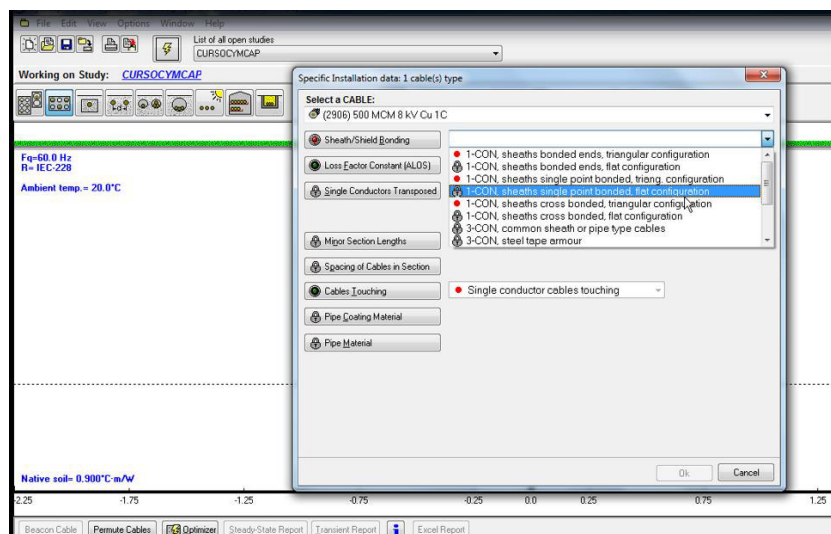


Figura 1.21. Instalación específica del cable [11]

1.4.6 RESULTADOS EN CYMCAP

Al dar clic en el ícono “Solver” la simulación arrojará los resultados como en la Figura 1.22.

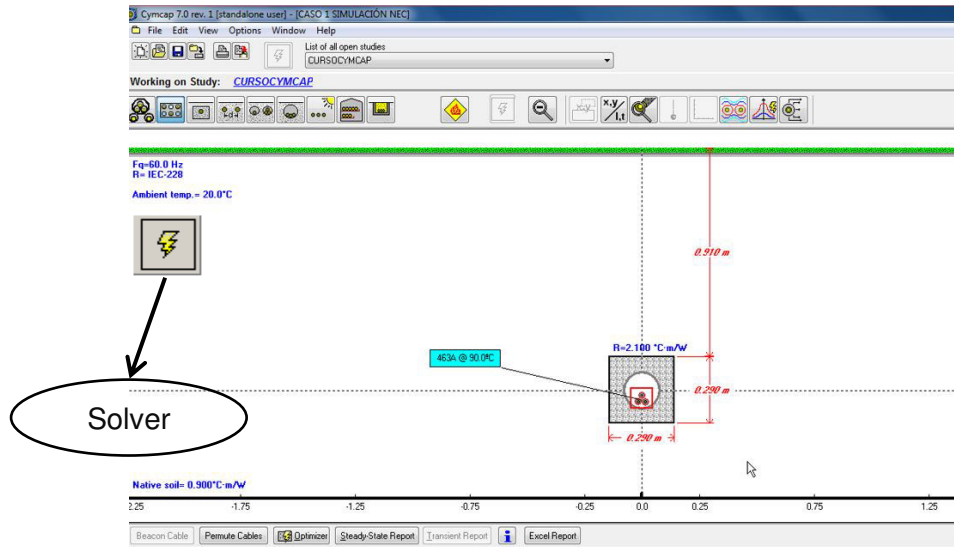


Figura 1.22. Instalación específica del cable [11]

Se debe dar clic en Excel report para crear un reporte en estado estable, como se indica en la Figura 1.23.

CYME		Results Summary	
CYMCAP 7.0 rev. 1			
Study:	ZANJA 3 ORD 022		
Execution:	CASO 2		
Date:	29/06/2020		
Frequency:	60.0 Hz		
Conductor Resistances:	IEC-228		
Induced currents in metallic layers as a fraction of conductor current (applied to all single phase circuits) : 0			
Installation Type: Duct Bank			
Parameter		Unit	
Ambient Soil Temperature at Installation Depth		°C	
Thermal Resistivity of Native Soil		°C·m/W	
Duct Bank Width		m	
Duct Bank Height		m	
Duct Bank X Center		m	

Figura 1.23. Tabla de resultados [11]

Resulta preciso mencionar que CYMCAP permite la variación de parámetros, tales como la resistividad térmica, el factor de carga, la temperatura ambiente y el porcentaje de relleno del ducto; adicional a esto, se explican las configuraciones disponibles de “bonding” para el conductor.

1.4.7 PARÁMETROS DE VARIACIÓN DE AMPACIDAD

1.4.7.1 Resistividad térmica (RHO)

La resistividad térmica (RHO) está definida en la normativa del NEC [1]. CYMCAP permite ingresar la resistividad térmica del suelo para el cálculo de ampacidad a una temperatura máxima del conductor. Los valores típicos de resistividades térmicas del suelo varían comúnmente entre 0.8 a 1.3 [$^{\circ}C \cdot m/W$] [11]; además, se pueden encontrar valores tan bajos como 0.4 [$^{\circ}C \cdot m/W$] en suelos pantanosos o demasiado húmedos o tan altos como 4 [$^{\circ}C \cdot m/W$], por ejemplo, en desiertos con suelos fuertemente compactos [6].

En el caso de bancos de ductos de concreto CYMCAP sugiere utilizar valores dentro del rango de 0.5 a 0.8 [$^{\circ}C \cdot m/W$]. La versión básica de CYMCAP no puede manejar más de dos materiales diferentes de suelos circundantes que rodeen al cable, CYMCAP utiliza la nomenclatura R para referirse a la resistividad térmica del concreto y Native Soil para referirse al suelo circundante al BD (en tal caso se utiliza la misma resistividad térmica para ambos casos).

1.4.7.2 Factor de carga (f_c)

CYMCAP permite modificar el factor de carga de cada alimentador primario del BD subterráneo. En el caso de los cables tripolares todas las fases se deben simular bajo el factor de carga seleccionado, a partir de la demanda media (D_m) dividida para la demanda máxima (D_{max}). El factor de carga es el siguiente [13]:

$$f_c = \frac{D_m}{D_{max}}; 0 < f_c \leq 1 \quad (1.4)$$

Un ejemplo de la variación de f_c , que se presenta en la Figura 1.24.

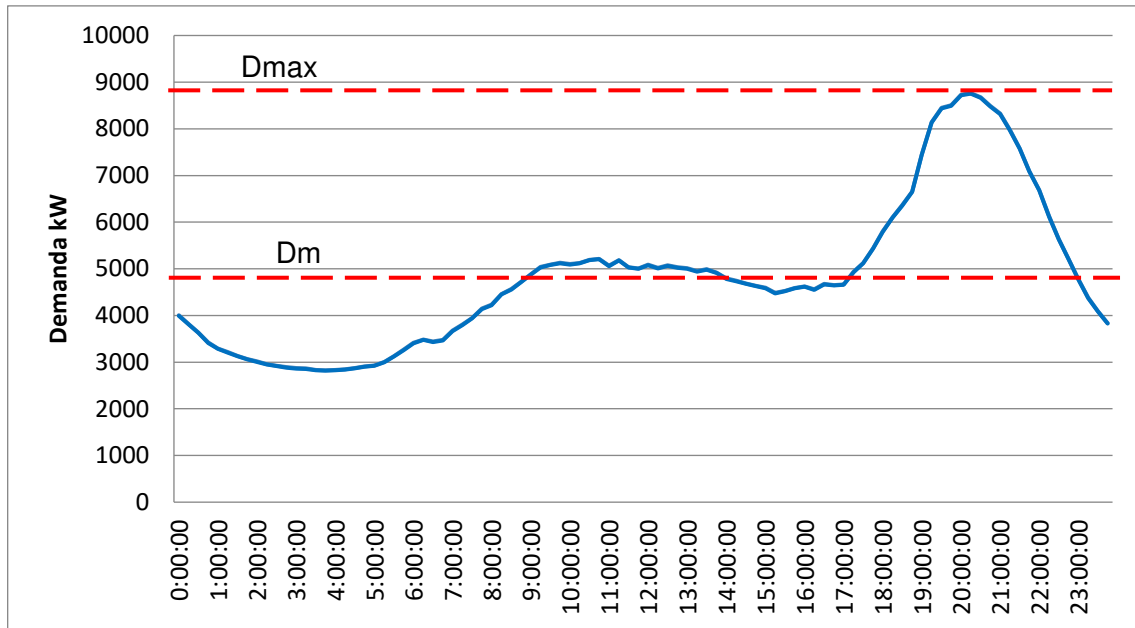


Figura 1.24. Ejemplo de curva de factor de carga diaria

1.4.7.3 Bonding

Uno de los datos a ingresar antes de ejecutar una simulación en CYMCAP es el tipo de configuración del “bonding”. Este, en el caso de cables unipolares, se refiere al vínculo o la unión eléctrica entre las pantallas metálicas de cada una de las fases del alimentador primario de la subestación (Capa 5 de la Figura 1.2). La sola conexión entre elementos no ofrece protección alguna, por lo que debe estar conectado a tierra. Esta unión se realiza para acercar el potencial eléctrico del cable a cero, minimizando el riesgo de electrocución.

La pantalla metálica del conductor puede estar conectada a tierra de diferentes formas:

- Single Point Bonding
- Two-point Bonding
- Cross bonding

Las características principales de cada unión se exponen a continuación:

1.4.7.3.1 Single Point Bonding

En el *single point bonding* de la Figura 1.25., los voltajes permanentes surgen generalmente en el extremo abierto, los cuales pueden ser preocupantes, particularmente para la seguridad del personal. Esta configuración no produce corrientes circulantes, pero

sí voltaje inducido. El *single point bonding* es económico, razón por la cual es el más utilizado dentro de las empresas eléctricas de distribución.

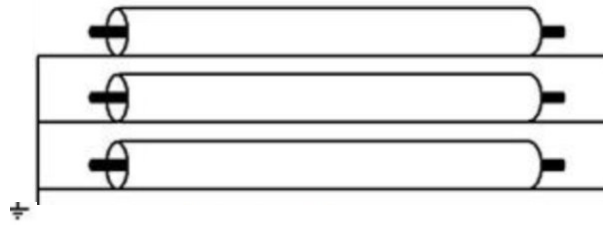


Figura 1.25. Unión en un punto (*single point bonding*) [2]

1.4.7.3.2 Two-point Bonding

La Figura 1.26. muestra cuando las pantallas metálicas del cable están unidas y conectadas a tierra en ambos extremos se producen pérdidas debidas a las corrientes circulantes en las capas del conductor, lo que puede disminuir considerablemente la ampacidad permitida del cable a causa de las pérdidas por corrientes circulantes. El *two-point bonding* no genera voltajes inducidos.

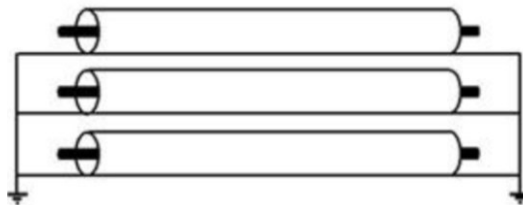


Figura 1.26. Unión en dos puntos (Two-point Bonding) [11]

1.4.7.3.3 Cross bonding

Las pérdidas de corriente parásita (se supone capas cilíndricas continuas) están presentes en el *cross bonding*. La unión de la Figura 1.27. no produce corrientes circulantes ni voltajes inducidos, de forma que reduce pérdidas. La desventaja de este es ser la unión más costosa de implementar y esto la convierte en la menos utilizada.

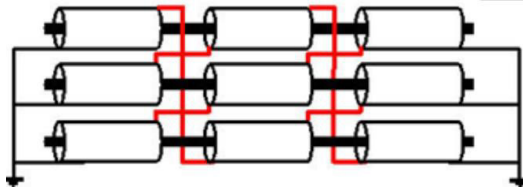


Figura 1.27. Unión cruzada (Cross bonding) [11]

1.4.7.4 Temperatura ambiente

El manual de CYMCAP menciona que la temperatura ambiente y los valores de resistividad del suelo deben reflejar la condición real de la instalación y no necesariamente responder a la condición de prueba del fabricante. Asimismo, se necesita la temperatura ambiente del cable enterrado, esta es la temperatura ambiente del suelo a profundidad de enterramiento del cable [11]. La temperatura ambiente que la NEC toma como base es 20 °C [1].

1.4.7.5 Porcentaje de relleno

La norma IEEE 525 establece que el área total de los cables conductores dentro del ducto no debe superar el 40 % de relleno de este. CYMCAP permite ingresar este limitante en la pestaña *duct fill* [14].

1.5 MODELADO MATEMÁTICO

1.5.1 MODELADO MATEMÁTICO SEGÚN NEHER-MCGRATH

En 1957, J. H. Neher y M. H. McGrath crearon un método para el cálculo de la transferencia de calor y la capacidad máxima de transferencia de corriente, sin alterar las condiciones físicas ni eléctricas de los cables subterráneos ni sobrepasar la temperatura máxima del mismo. En el paper titulado “The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems” [15] se cita la siguiente ecuación básica para el cálculo de la ampacidad del cable:

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc} \cdot (1 + Y_c) \cdot (R_{ac}')}} \quad (1.5)$$

Donde:

I = Ampacidad [kA]

T_c =Temperatura del conductor [$^{\circ}C$]

T_a =Temperatura de tierra [$^{\circ}C$]

ΔT_d =Aumento de temperatura del conductor debido a pérdidas dieléctricas [$^{\circ}C$]

R_{dc} = Resistencia del conductor en dc [$\mu\Omega_{thermal}/m$]

Y_c = Incremento de pérdidas por el efecto piel y el efecto proximidad

R_{ac}' =Resistencia térmica entre el conductor y el ambiente [$\Omega_{thermal} \cdot m$]

Sin embargo, esta única ecuación enmascara la gran complejidad en estos procedimientos; hay decenas de ecuaciones complicadas involucradas en el desarrollo de los términos de esta ecuación y los requeridos para los cálculos de temperatura (el documento define más de 80 variables y contiene más de 70 fórmulas, excluyendo los apéndices). Para resolver ampacidades o temperaturas únicas en cada posición de cable, se debe desarrollar un conjunto múltiple de ecuaciones para tener en cuenta el calentamiento por interferencia desde cada posición del sistema y una técnica de solución matricial para ecuaciones simultáneas utilizadas.

Analogía térmica eléctrica

El cable subterráneo en funcionamiento transfiere el calor generado al ambiente o suelo circundante. El calor que es transferido por el cable a sus alrededores es cuantificado por el modelamiento térmico que partiendo de la ley de ohm:

$$\Delta V = I \cdot R_{AC} \quad (1.6)$$

Cabe resaltar que se puede usar una relación análoga para describir la conducción térmica, donde el calor fluye a través de una resistencia térmica, produciendo un descenso (o aumento) de temperatura, de acuerdo con lo siguiente:

$$\Delta t = W \cdot R_{Thermal} \quad (1.7)$$

Dónde:

ΔV : Diferencia de potencial en el circuito eléctrico entre el voltaje V1 y V2 (V)

I : Corriente que fluye dentro del conductor (A)

R_{AC} : Resistencia eléctrica (Ω)

Δt : es la diferencia de temperatura entre la temperatura del conductor y la temperatura ambiente en el circuito térmico del sistema del cable. ($^{\circ}\text{C}$)

W : Son las pérdidas de calor en las partes metálicas del conductor. (W/m)

R_{Thermal} : Resistencia térmica ($^{\circ}\text{C m/W}$)

Este concepto básico se amplía para modelar calor de un cable enterrado a través de varios cables y suelos nativos. La norma internacional IEC 60287 se basa en el modelo de Neher y McGrath, y proporciona un enfoque en función de la construcción del cable para cálculo de la ampacidad [15].

1.5.2 MODELADO MATEMÁTICO SEGÚN IEC 60287

Utilizando la analogía térmica y eléctrica, se puede obtener el circuito térmico equivalente de un cable de alimentación aislado dividiendo los objetos físicos en capas de materiales, representados como resistencias térmicas. Al pasar corriente por el conductor funciona como una fuente de calor:

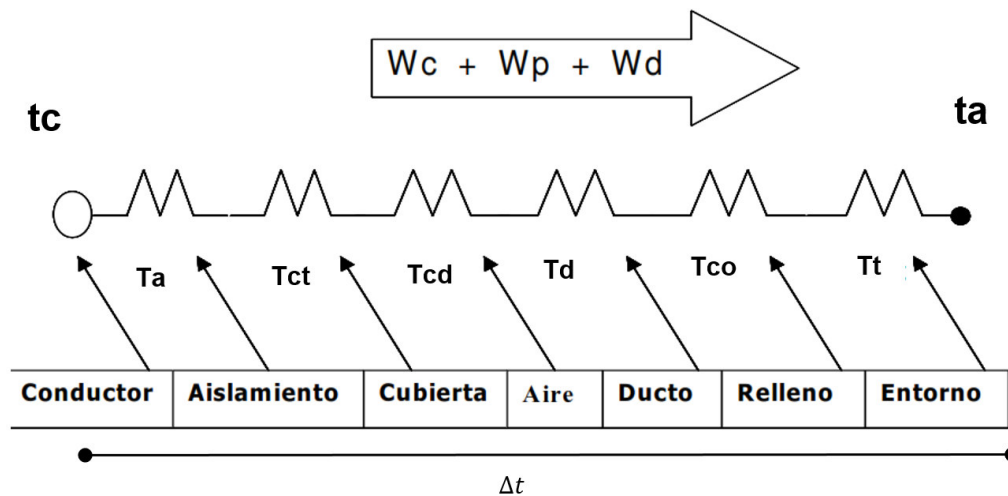


Figura 1.28. Representación de circuito térmico de cable subterráneo en estado estable [16]

Donde:

t_a : Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

t_c : Temperatura del conductor ($^{\circ}\text{C}$)

W_c : Pérdida de calentamiento del conductor (W)

W_p : Pérdidas generadas por la pantalla (W)

W_d : Pérdidas dieléctricas (W)

T_a : Resistencia térmica de aislamiento

T_{ct} : Resistencia térmica existente entre la pantalla y la cubierta

T_{cd} : Resistencia térmica de la cubierta o chaqueta

T_d : Resistencia térmica al ducto

T_{co} : Resistencia térmica del relleno

T_t : Resistencia térmica del entorno.

En ese orden de ideas, la información relevante para poder obtener la ampacidad del conductor es la siguiente.

1.5.2.1 Resistencia continua

La resistencia continua R_{dc} de un conductor se calcula mediante la ecuación ((1.8):

$$R_{dc} = \frac{\rho_{20}}{S} [1 + \alpha_{20} \cdot (t - 20)] \quad (1.8)$$

Donde:

ρ_{20} : Resistividad térmica del conductor a 20 °C. Para el conductor de cobre es:
 $1.7241 \times 10^{-8} [\text{°C} \cdot m/W]$

S : Área transversal del conductor (mm^2)

α_{20} : es el coeficiente de variación de la temperatura a 20 °C. Para el conductor de cobre es: 3.93×10^{-3}

t : Temperatura del conductor (°C)

1.5.2.2 Efecto proximidad

El efecto de proximidad es un fenómeno que ocurre cuando dos conductores llevan corriente alterna en la misma dirección y cerca uno del otro. En este escenario, la densidad de corriente en los lados remotos es mayor que en los lados conductores adyacentes entre sí, como se observa en los dos conductores de la Figura 1.29, lo cual provoca un aumento en la resistencia.



Figura 1.29. Efecto proximidad en los conductores cercanos [17]

Por otra parte, el aumento en R_{dc} se calcula mediante y_p en donde k_p es el factor de efecto proximidad basado en la construcción del conductor.

$$X_p^2 = \frac{8\pi f k_p \cdot 10^{-7}}{R_{dc}} \quad (1.9)$$

$$y_p = \left(\frac{X_p^4}{192 + 0.8 \cdot X_p^4} \right) \cdot \left(\frac{D_c}{d_f} \right)^2 \left(0.312 \cdot \left(\frac{D_c}{d_f} \right)^2 + \frac{1.18}{\left(\frac{X_p^4}{192 + 0.8 \cdot X_p^4} \right)^2 + 0.27} \right) \quad (1.10)$$

Siendo:

y_p : Factor de efecto proximidad

k_p : factor de efecto proximidad basado en la construcción del conductor

R_{dc} : Resistencia continua del conductor (Ω/m)

D_c : Diámetro del conductor

d_f : Distancia desde el centro del conductor hasta el centro del otro (m)

f : Frecuencia eléctrica (60 Hz)

1.5.2.3 Efecto piel

La corriente alterna tiende a fluir sobre la superficie del conductor, lo que hace que la densidad de corriente en la superficie sea mayor que en el centro del conductor.

R_{ac} incrementa en función de y_s , según las siguientes ecuaciones, siendo k_s el factor de efecto piel basado en la construcción del conductor [18].

$$X_s^2 = \frac{8\pi f k_s \cdot 10^{-7}}{R_{dc}} \quad (1.11)$$

$$y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8 \cdot X_s^4} \quad (1.12)$$

Donde:

y_s : Factor de efecto piel

k_s : El factor de efecto piel basado en la construcción del conductor

Los valores de k_p y k_s dependen del tipo del conductor, en este caso para un conductor concéntrico ambos son 1.

1.5.2.4 Resistencia en corriente alterna del conductor

La resistencia alterna es mayor que la resistencia continua debido a los dos efectos mencionados. El cálculo de esta se realiza en función de R_{dc} , de acuerdo con la ecuación (1.13).

$$R_{ac} = R_{dc}(1 + y_s + y_p) \quad (1.13)$$

1.5.2.5 Pérdidas dieléctricas

Las pérdidas producidas por el material de aislamiento se modelan en función de las pérdidas dieléctricas (W_d). La capacitancia del material aislante está dada por lo siguiente:

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} \cdot 10^{-9} \quad (1.14)$$

$$W_d = 2\pi f \cdot C \cdot V^2 \cdot \tan(\vartheta) \quad (1.15)$$

Donde:

C : capacitancia de la capa aislante (F/m)

V : voltaje fase aplicado (V)

ϑ : ángulo de pérdidas de la capa aislante

ε : constante dieléctrica

D_i : diámetro externo del aislamiento (mm)

d_c : diámetro del conductor (mm)

$\tan(\delta)$: factor de disipación

Tabla 1.6. Valores típicos del material de aislamiento [6]

Material de aislamiento	ϵ		$\tan(\delta)$	
	Rango	Valor típico	Rango	Valor típico
XLPE	2.1-2.3	2.3	0.0001-0.0003	0.0001
EPR	2.5-4.0	3	0.002-0.08	0.0035

1.5.2.6 Pérdidas en la pantalla del cable

Resistencia de la pantalla:

$$R_S = \frac{\rho_{20} \cdot 10^6}{\pi d t_s} [1 + \alpha_{20} \cdot (t - 20)] \quad (1.16)$$

$$X_1 = 4\pi f \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left[2 \cdot \sqrt[3]{2} \left(\frac{s}{d} \right) \right] \quad (1.17)$$

R_S : pérdidas en la pantalla del cable

ρ_{20} : resistividad térmica del conductor a 20 °C. Para el conductor de cobre es: $1.7241 \times 10^{-8} [^{\circ}C \cdot m/W]$

α_{20} : es el coeficiente de variación de la temperatura a 20 °C. Para el conductor de cobre es: 3.93×10^{-3}

t : temperatura del conductor (°C)

d : diámetro del conductor incluyendo la pantalla (m)

t_s : espesor de la pantalla (m)

X_1 : ancho del BD (m)

f : frecuencia (Hz)

s : distancia desde el centro del conductor hasta el centro del otro (m)

1.5.2.6.1 Pérdidas en la pantalla por corrientes circulantes

$$\lambda_1' = \frac{R_S}{R_{ac}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_S}{X_1}} \quad (1.18)$$

λ_1' : pérdidas en pantalla por corrientes circulantes

1.5.2.6.2 Pérdidas en la pantalla por corrientes inducidas

$$\lambda_1'' = \frac{R_S}{R_{ac}} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)}{12 \cdot 10^{-12}} \right] \quad (1.19)$$

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \quad (1.20)$$

λ_1' : pérdidas en la pantalla por corrientes circulantes

λ_1'' : pérdidas de pantalla por corrientes inducidas

$g_s, \lambda_0, \Delta_1, \Delta_2, \beta_1$: coeficientes utilizados para el cálculo de las pérdidas

t_s : espesor de la pantalla (m)

λ_1 : pérdidas en pantalla.

1.5.2.7 Resistencias térmicas

Resistencia térmica del aislamiento T_1 :

$$T_1 = \frac{\rho_{th1}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (1.21)$$

Resistencia térmica De la chaqueta T_2 :

$$T_2 = \frac{\rho_{th2}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_4}{r_3} \right) \quad (1.22)$$

ρ_{th1} : resistividad térmica del aislamiento [$^{\circ}C \cdot m/W$]

ρ_{th2} : resistividad térmica de la chaqueta [$^{\circ}C \cdot m/W$]

r_1 : radio del conductor [mm]

r_2 : radio del aislamiento [mm]

r_3 : radio de la pantalla metálica [mm]

r_4 : radio de la chaqueta [mm].

1.5.2.8 Determinación del efecto del suelo

Otro tema importante es la influencia del suelo en el aumento de temperatura del cable. La respuesta del aumento de temperatura depende de la combinación de resistencias térmicas formadas por las partes constituyentes del propio cable y su entorno [19].

Cabe señalar que los primeros aportes en el cálculo de la resistencia térmica externa los desarrolló Poritsky, mediante una fórmula para determinar la distribución del potencial de dos cilindros conductores infinitamente largos con radios iguales [20]. Goldenberg partió de estas ecuaciones para calcular la resistencia térmica externa, con el supuesto de que la superposición es aplicable [21].

El enfoque analítico del modelado matemático presentado en esta tesis asume que (i) la superposición es aplicable; (ii) la superficie del suelo es isotérmica; (iii) el conductor central es el más caliente. Esto debido a que la superposición se aplica para calcular la resistencia térmica externa de cables agrupados que pueden ser difíciles de manejar; es más fácil comenzar por determinar la resistencia térmica de un solo cable enterrado aislado, como el que se evidencia en la Figura 1.30.

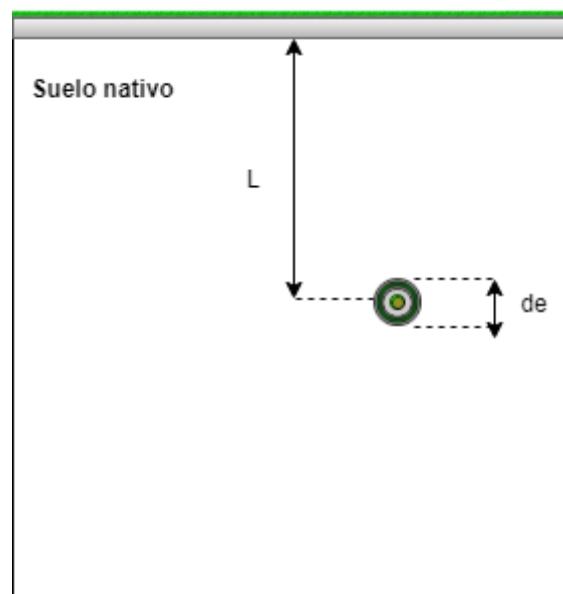


Figura 1.30. Configuración plana de un solo cable enterrado [17]

La resistencia térmica externa para un solo cable enterrado se obtiene así [21]:

$$T_3 = \frac{\rho_s}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) \quad (1.23)$$

Donde:

$$u = \frac{2L}{d_e} \quad (1.24)$$

El aumento de temperatura debido al efecto del suelo del cable en un punto pth, en cualquier momento, es la suma de los aumentos de temperatura causados por las fuentes de calor 1 y su imagen 1' en las Figura 1.31. y Figura 1.32., se determina utilizando el método siguiente:

$$T_3 = \frac{\rho_s}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \cdot F \right) \quad (1.25)$$

R_{th} : resistencia externa del suelo

ρ_s : resistividad térmica del suelo [$^{\circ}C \cdot m/W$]

F : factor de calentamiento mutuo.

L : distancia de entierro desde la superficie del suelo al centro del cable [mm]

d_e : diámetro externo del cable [mm]

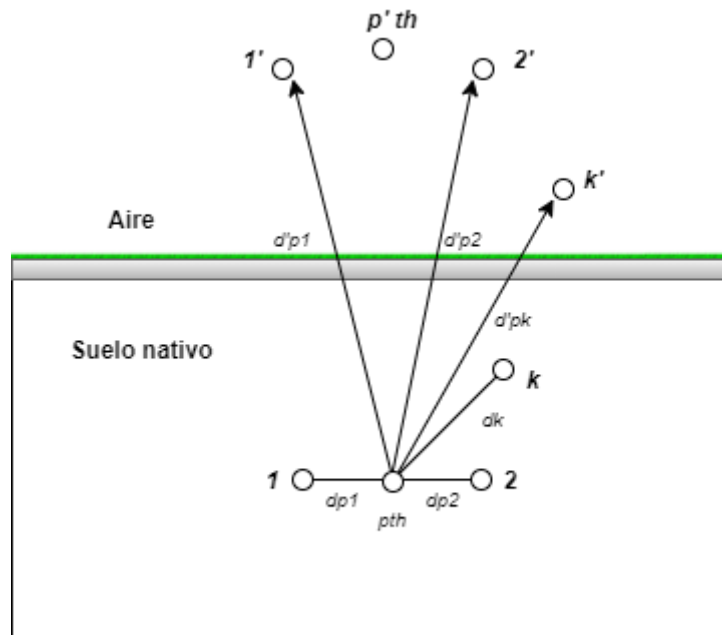


Figura 1.31. Resistencia térmica del suelo en cables enterrados [17]

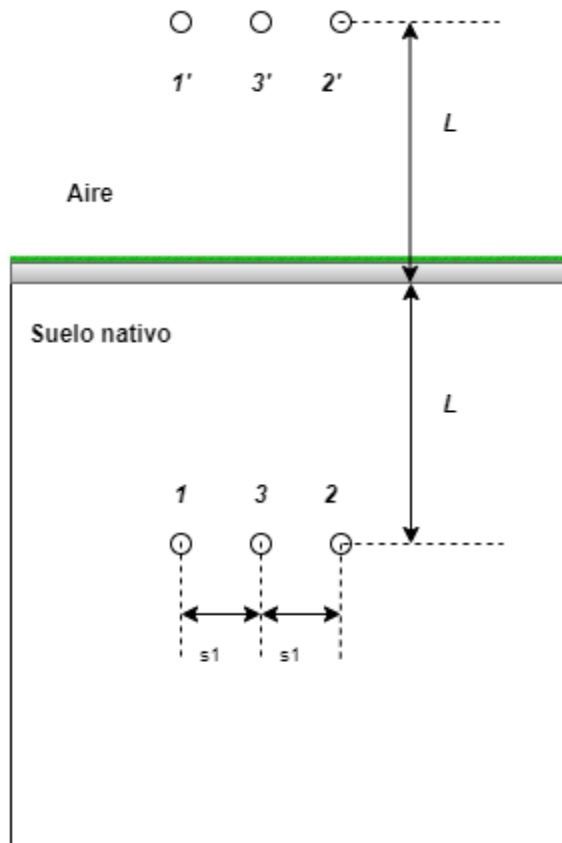


Figura 1.32. Configuración plana de tres solo cables enterrados [17]

Siendo el factor de calentamiento mutuo de los cables:

$$F = \left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}}\right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}}\right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}}\right) \dots \left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}}\right) \quad (1.26)$$

Donde:

d'_{p1} : distancia entre la imagen del primer cable y el segundo.

d_{p1} : distancia entre el primer y segundo cable.

Mientras tanto, para una configuración plana como la de la Figura 1.32. se tiene:

$$d_{p1} = d_{p2} = s_1 \quad (1.27)$$

$$d'_{p1} = d'_{p2} = \sqrt{s_1^2 + (2L)^2} \quad (1.28)$$

s_1 : distancia horizontal entre los cables de la Figura 1.32.

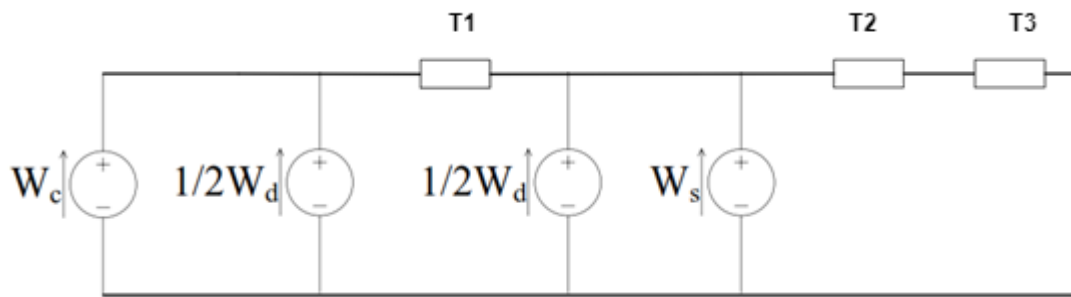


Figura 1.33. Representación del circuito térmico en estado estable

$$W_c = R_{ac} \cdot I^2 \quad (1.29)$$

$$W_s = \lambda_1 \cdot W_c \quad (1.30)$$

W_c : pérdidas de calentamiento del conductor (W/m)

W_s : pérdidas de joule en la pantalla metálica (W/m)

I : corriente alterna (A)

λ_1 : factor de pérdidas de la pantalla metálica y se define como la relación entre las pérdidas de la pantalla metálica del cable y las pérdidas del conductor.

Ahora, con base en las fórmulas anteriores, según la IEC 60-287 [6], se reordena la ampacidad para calcularla de este modo:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \cdot \left[\frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3) \right]}{R_{ac} \cdot T_1 + R_{ac} \cdot (1 + \lambda_1) \cdot (T_2 + T_3)}} \quad (1.31)$$

Δt es igual a:

$$\Delta\theta = \left(W_c + \frac{1}{2} W_d \right) T_1 + (W_c + W_d + W_s)(T_2 + T_3) \quad (1.32)$$

Donde:

n : número de conductores

El método de Neher-McGrath [3] para calcular la ampacidad es la base del algoritmo de la norma IEC 60-287, cuyo flujograma se muestra en la Figura 1.34.

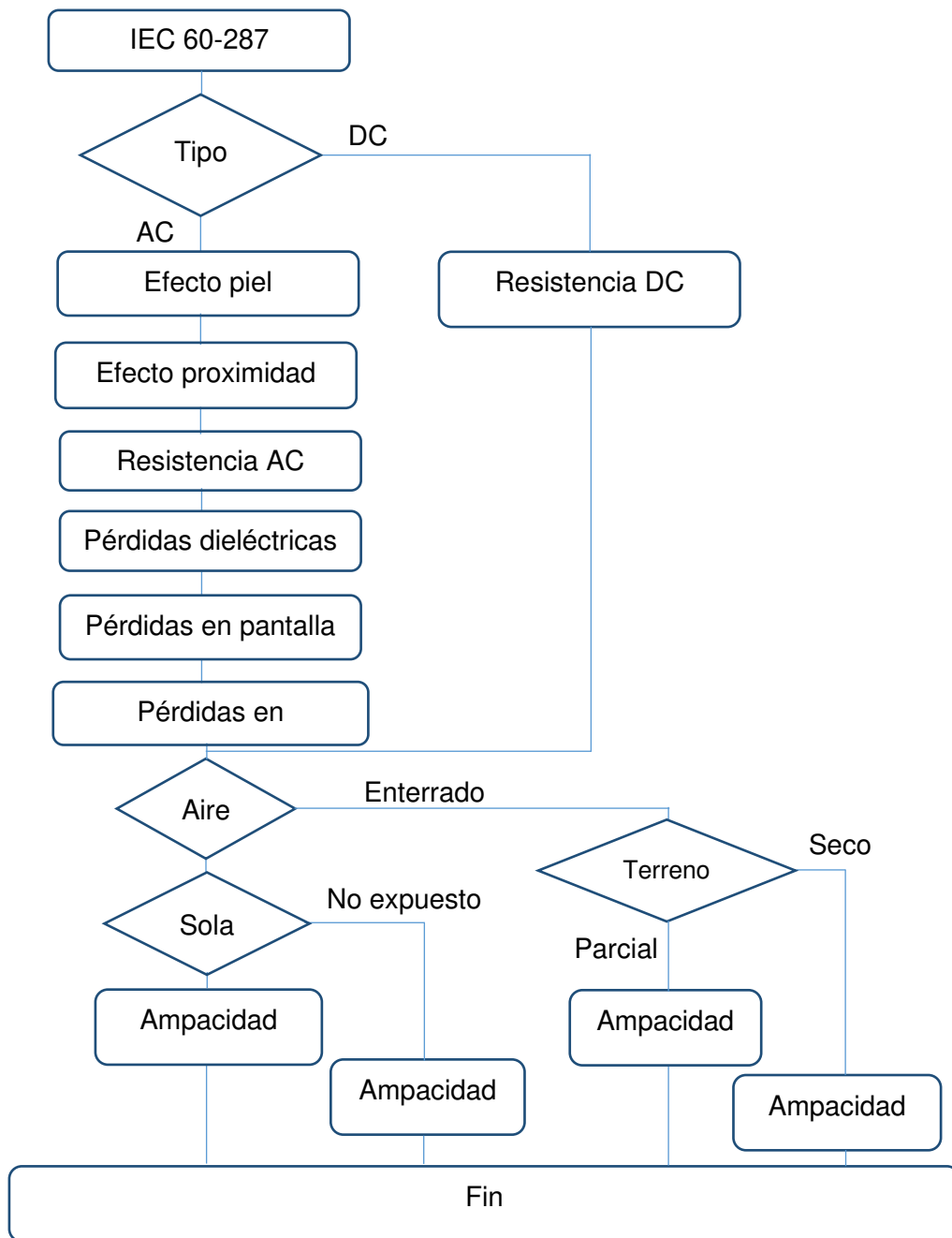


Figura 1.34. Algoritmo de cálculo de norma IEC 60287 [22]

Como puede verse, la Figura 1.34. muestra el algoritmo utilizado en ductos pertenecientes a la norma del NEC [1] explicada más adelante y a los BD de las subestaciones seleccionadas.

2. METODOLOGÍA

Este capítulo parte de la explicación de la metodología utilizada, los pasos a seguir, la información recolectada y el diseño de la simulación de los casos evaluados, en base a los cuales se definen los escenarios de prueba.

2.1 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para el desarrollo de este proyecto se hizo uso de la metodología de simulación, la cual complementa el desarrollo de la guía de procedimientos para el diseño y la construcción de bancos de ductos subterráneos de medio voltaje, en concordancia con el estudio de variación de la capacidad máxima de corriente del cable en estado estable.

En la Figura 2.1. se observan los pasos a seguir para la obtención de esta, con el proceso fragmentado en siete pasos: formulación del problema, modelo conceptual, recolección de datos, modelo computacional, verificación del modelo, validación del modelo, definición de escenarios y análisis de sensibilidad y, finalmente, documentación.

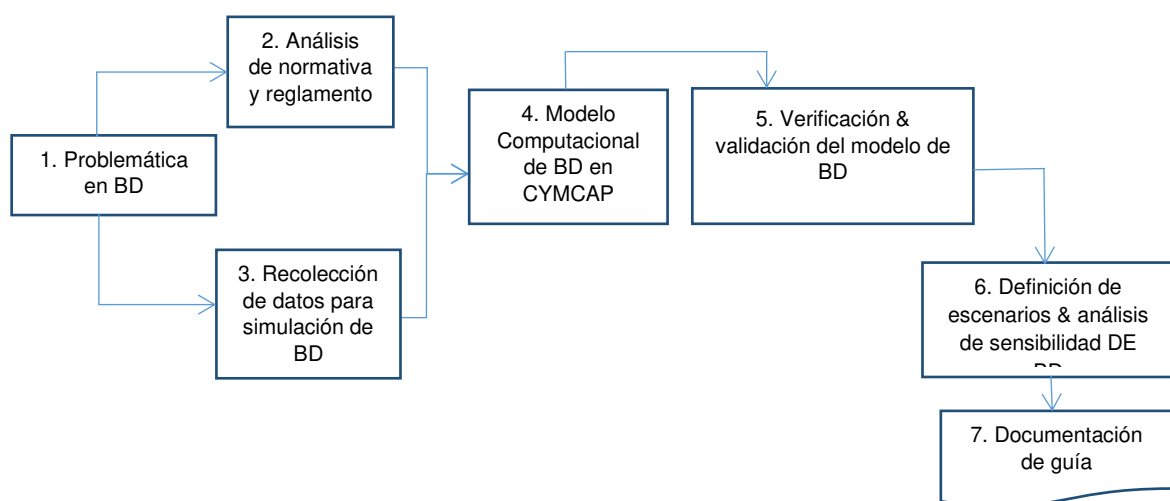


Figura 2.1. Fases del ciclo de vida de la metodología de simulación [2]

2.1.1 FASES DE LA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

1. Problemática en BD: esta fase se detalla en la introducción, menciona la falta de información o documentos enfocados en la capacidad del cable en bancos de ductos subterráneos de medio voltaje, lo que permitió definir y expresar los objetivos a lograr. Los BD de las S/E de la EEQ no son los establecidos en el NEC y la poca información con

respecto a la capacidad máxima de corriente con configuraciones en sitio puede producir procesos repetitivos innecesarios.

2. Análisis de normativa y reglamento: en esta fase se revisó junto a la teoría, las principales normas tanto nacionales como internacionales, junto con el manual de usuario de CYMCAP para elaborar el diseño del formato de la toma de datos y proceder al punto 3. La información utilizada se encuentra en las secciones 1.4 y 2.2.

3. Recolección de datos para simulación de BD: se recolectó la información de los bancos de ductos de las subestaciones El Quinche, Nueva Cumbayá y Escuela Sucre en base al punto 2.

4. Modelo computacional de BD en CYMCAP: se procede a la simulación de los bancos de ductos mencionados en la fase anterior en CYMCAP.

5. Verificación y validación del modelo de BD: en esta fase se verifica que la simulación sea lo más cercana a lo encontrado en sitio, y que esté dentro de los parámetros permitidos por CYMCAP. Esta fue realizada en conjunto con la fase de diseño del modelo computacional.

6. Definición de escenarios y análisis de sensibilidad: se lleva a cabo el cambio de ampacidad, según sus variaciones de temperatura, factor de carga, resistividad térmica, entre otras, utilizando el módulo de estudios paramétricos de CYMCAP para cada BD de alimentadores primarios de cada subestación; esto se presenta en el Capítulo 2.4.1.

7. Documentación de guía: la guía de procedimiento para el diseño y la construcción de bancos de ductos subterráneos de medio voltaje, de acuerdo con el análisis de variación de ampacidad en estado estable, se resume en el Capítulo 2.4.1.

A continuación, se muestra la normativa del modelo conceptual, los datos recolectados, el modelo simulado y el estudio paramétrico de las Subestaciones: El Quinche (S/E 58), Nueva Cumbayá (S/E 29) y Escuela Sucre (S/E 06); correspondientes a los pasos 2, 3, 4 y 5 de la metodología de simulación.

2.2 ANÁLISIS DE NORMATIVA Y REGLAMENTO

El presente proyecto toma como punto referencial las dos normativas principales para el diseño de bancos de ductos subterráneos, que son internacionalmente *National Electrical Code* de Estados Unidos y las Especificaciones Técnicas de los Materiales para Sistemas

de Distribución Eléctrica de Redes subterráneas del Ministerio de electricidad de Energía Renovable [1, 3, 7].

2.2.1 COMPILACIÓN DE LAS NORMATIVAS

A continuación, se lista la información relevante de cada norma para el estudio del presente proyecto.

2.2.1.1 National Electric Code (NEC)

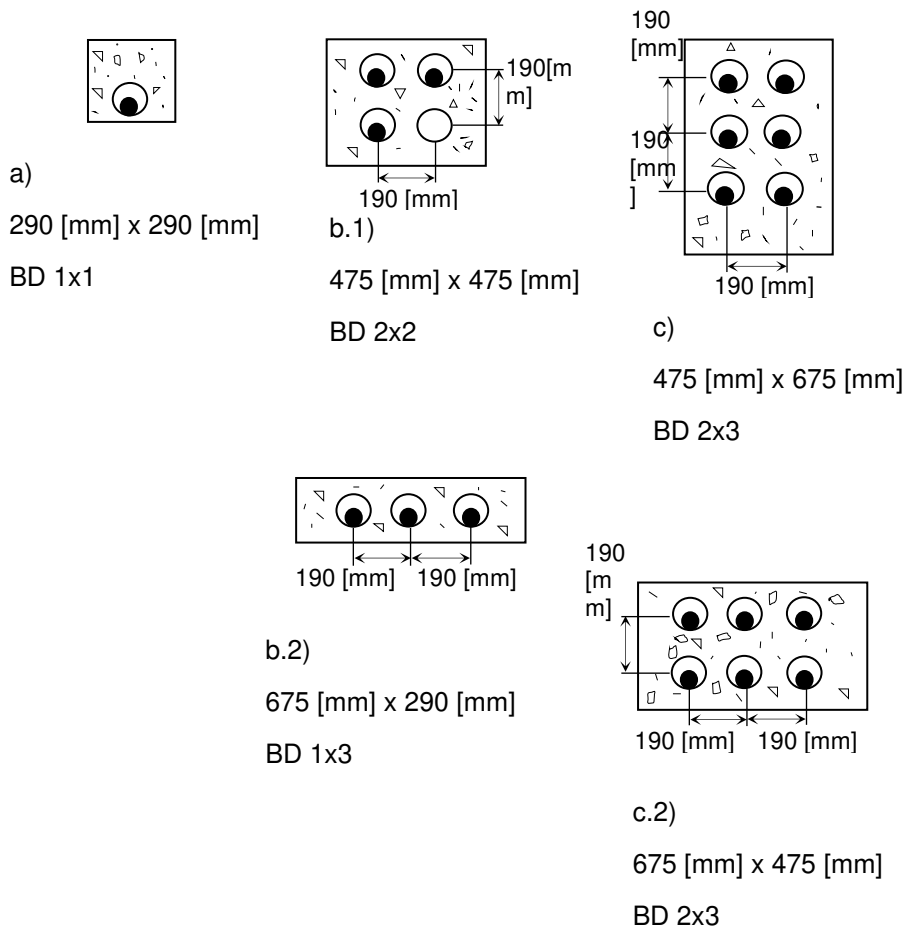
Esta normativa define la ampacidad como la corriente máxima, en amperios, que un conductor puede transportar continuamente bajo las condiciones de uso, sin exceder la temperatura promedio. Igualmente, a la resistividad térmica (RHO) como la propiedad que tienen los materiales adyacentes (en este caso el suelo) de oponerse al flujo de calor, se designa RHO y se expresa en grados centígrados por metro sobre watt [$^{\circ}C \cdot m/W$].

Las configuraciones de bancos de ductos son limitadas, partiendo de un BD con un solo ducto hasta un BD con seis ductos, como se muestra en la Figura 2.2. En esta sección de la normativa se encuentra una nota que dice lo siguiente:

La profundidad de entierro (L) mínima arriba de los ductos eléctricos o cables debe ser acorde con el NEC. La máxima profundidad de los bancos de ductos de PVC debe ser 750 [mm] y en cables directamente enterrados debe ser 900 [mm]. Parte de la tabla del NEC nombrada se encuentra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Requerimientos mínimos de distancia de entierro del BD [1]

Voltaje del Circuito	Condiciones Generales:	
	Cables directamente enterrados	Conductos de PVC
Sobre 1000 [V] hasta 22 [kV]	750 [mm]	450 [mm]
Sobre 22 [kV] hasta 40 [kV]	900 [mm]	600 [mm]
Sobre 40 [kV]	1000 [mm]	750 [mm]



Leyenda




-  Banco de ductos (concreto o tierra)
-  Ducto
-  Cable o cables

Figura 2.2. Dimensiones de la instalación del cable usados en la tabla 310.60 (C)(77) a la tabla 310.60(C)(86) [1]

Como nota general, se permitirán profundidades menores a las descritas en la Tabla 2.1. , en caso de que los cables y conductores se encuentren cercanos a puntos de conexión aéreo-subterráneo. Además, se debe recordar que se definió la altura como la distancia más corta en milímetros medida entre un punto en la superficie de la cubierta y un punto en la parte superior del primer ducto del banco.

Cabe anotar que las dimensiones del cable de instalación de la Figura 2.2. son utilizadas en la Tabla 2.2. y la Tabla 2.3 para especificar las ampacidades de tres conductores aislados de cobre o aluminio respectivamente, en ductos eléctricos subterráneos (tres conductores por ducto), basados en lo siguiente:

Temperatura ambiente: 20 °C

factor de carga: 100 %

RHO: 0.9 [°C · m/W]

Temperatura máxima de operación del conductor de 90 °C.

Dependiendo del calibre del conductor, número de AP, nivel de voltaje el NEC aplica una ampacidad para cada alimentador dentro del BD.

Tabla 2.2. Ampacidad para alimentadores unipolares de Cobre (tres conductores por ducto) para voltajes de 5001 – 35000 [V] bajo las condiciones de diseño de NEC [1]

Tamaño del conductor (AWG o MCM)	Ampacidad	
	1 AP (Figura 2.2.) a)	
4/0	295	
250	325	
350	390	
500	465	
750	565	
1000	640	
3 AP (Figura 2.2.) b)		
4/0	240	
250	260	
350	310	
500	370	
750	440	
1000	495	
6 AP (Figura 2.2.) c)		
4/0	190	
250	210	
350	245	
500	290	
750	350	
1000	390	

Tabla 2.3. Ampacidad para alimentadores unipolares de Aluminio (tres conductores por ducto) para voltajes de 5001 – 35000 [V] bajo las condiciones de diseño de NEC

Tamaño del conductor (AWG o MCM)	Ampacidad
	1 AP (Figura 2.2.) a)
4/0	230
250	250
350	305
500	370
750	455
1000	525
3 AP (Figura 2.2.) b)	
4/0	185
250	200
350	245
500	290
750	355
1000	405
6 AP (Figura 2.2.) c)	
4/0	150
250	165
350	195
500	230
750	280
1000	320

En el caso de variar algún parámetro del BD, la Tabla 2.2. y la Tabla 2.3 no aplican. La información de aplicación para el cálculo de ampacidad en la que la NEC muestra los valores típicos de resistividad térmica para distintos materiales siendo estas expresadas en [$^{\circ}C \cdot m/W$] es:

Suelo promedio (90 % de USA) = 0,9

Concreto: 0,55

Tierra húmeda: 0,6

Aislamiento de papel: 5,5

Polietileno: 4,5

P.V.C: 6,5

Caucho: 5

Suelo seco: 1,2

Es necesario indicar que la información mencionada se encuentra en el ANEXO B.

2.2.1.2 Especificaciones Técnicas de los Materiales para Sistemas de Distribución Eléctrica de Redes Subterráneas

El Ministerio de Energía y Recursos No Renovables en el Catálogo Digital de Redes de distribución de energía eléctrica en las últimas páginas del documento de especificaciones técnicas establece las particularidades del cable unipolar, tanto de cobre como de aluminio de 25 [kV] y 15 [kV] [7].

Estas especificaciones permiten el modelado del cable y son mostradas en el ANEXO C. Adicional a las tablas de dicho anexo, el MERNNR asevera que el número de hilos del conductor 4/0 AWG es de 19 y, a partir del calibre 250 MCM el número de hilos es 37.

2.2.1.3 Norma IEC 60502-2

Las pruebas en cables de 1 a 30 [kV], según la norma IEC 60502-2, deben realizarse en temperaturas ambiente de 20 °C (± 15). La frecuencia de la onda sinusoidal de corriente alterna debe estar en el rango de 49 a 61 Hz.

De igual modo, dentro de esta norma existen varios tipos de pruebas realizadas al cable, las cuales se realizan para garantizar el cumplimiento de las especificaciones requeridas. Las pruebas se dividen así:

- Medición de la resistencia eléctrica de los conductores
- Pruebas de agrietamientos parciales
- Pruebas de voltaje.

En ese orden de ideas, dentro de las pruebas de voltaje se encuentra la prueba de voltaje de larga duración, en la cual se realiza un corte al cable con una longitud superior a 5m; luego se le aplica un voltaje en AC durante 4 horas a temperatura ambiente a cada conductor y pantalla metálica del mismo. La tensión de prueba debe ser cuatro veces el voltaje nominal. Esta prueba generalmente es realizada por el fabricante del cable [23].

El punto 2.3 se enfoca en los datos necesarios para realizar la simulación de I_{amp} en CYMCAP, comenzando por los cables de MV y los datos de los BD's de cada S/E.

2.3 RECOLECCIÓN DE DATOS PARA SIMULACIÓN DE BD

Se utiliza la abreviatura de 1.1.2 para referirse a las subestaciones. Las especificaciones particulares de cable de Cu unipolar Aislado para Medio Voltaje del MERNNR del ANEXO C [7] fueron utilizadas para la simulación del cable.

2.3.1 SIMULACIÓN DE CABLES DE MEDIA TENSIÓN

Se realizó la simulación de los cables de tres subestaciones dentro del área de concesión de la Empresa Eléctrica Quito. Las subestaciones seleccionadas son: Escuela Sucre (S/E 06), Nueva Cumbayá (S/E 29) y El Quinche (S/E 58). El número adyacente a ellas es asignado a cada subestación para mantener un orden en los cables conductores que salen de cada una de las subestaciones, por lo que en el caso de los alimentadores de la Escuela Sucre, por ejemplo, para hacer referencia al alimentador A de la subestación se nombrará como 06-A.

Los conductores fueron simulados en consonancia con las normativas del punto 2.2.1, utilizando las capas del cable mostradas en el punto 1.4.1.2 y siguiendo los pasos del punto 1.4.5.1. El corte transversal de este se expone en la Figura 2.3; la numeración de estas capas es la misma que en la Figura 1.1.

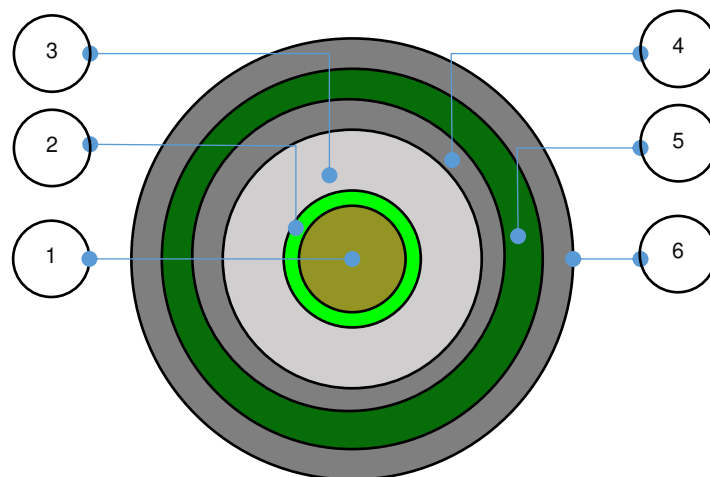


Figura 2.3. Capas del conductor

Los nombres de cada capa en español y en CYMCAP son:

1. Núcleo conductor: Conductor
2. Semiconductor interno: Conductor Shield
3. Aislamiento XLPE o EPR: Insulation
4. Semiconductor externo: Insulation screen
5. Pantalla metálica: Sheath
6. Chaqueta: Jacket

Adicionalmente, el programa requiere ingresar el voltaje fase - fase de operación del conductor junto con el área de este. Las capas conductoras son las mismas para todos los alimentadores de las subestaciones seleccionadas, pero el calibre del conductor es distinto, por lo que a continuación se muestran los datos encontrados:

2.3.1.1 Características del conductor de las S/E 58, S/E 29

El BD de la S/E 58 consta de tres cables conductores de 500 MCM y uno de 250 MCM; la S/E 29 consta de 2 pozos con 2 AP de 250 MCM respectivamente. Todos los conductores de estas S/E's son de 22.8 [kV] en el Voltaje fase-fase. En la Tabla 2.4 se muestran las dimensiones de las capas del conductor de 250 MCM.

Tabla 2.4. Dimensiones de Capas de cable 250 MCM Cu de S/E 58, S/E 29 [7]

Capa	Diámetro [mm]	Otras
Núcleo conductor	14.17	Cu, comprimido
Semiconductor interno	14.99	Th=0.41 [mm]
Aislamiento XLPE	28.19	Th=6.6 [mm]
Semiconductor externo	30.23	Th=1.02 [mm]
Cinta de pantalla metálica	32.51	Cu, Th=1.14 [mm]
Chaqueta	38.09	PVC, Th=2.79 [mm]
Área transversal del conductor		126.677 [mm ²]

Por otro lado, la S/E 06 funciona con un voltaje de operación (Voltaje fase-fase) de 6.3 [kV], las dimensiones de las capas del cable de 500 MCM se especifican en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Dimensiones de Capas del cable 500 MCM Cu de S/E 58, S/E 06 [7]

Capa	Diámetro [mm]	Otras
Núcleo conductor	20.04	Cu, comprimido
Semiconductor interno	20.86	Th=0.41 [mm]
Aislamiento XLPE	34.06	Th=6.6 [mm]
Semiconductor externo	34.76	Th=0.35 [mm]
Cinta de pantalla metálica	34.88	Cu, Th=0.06 [mm]
Chaqueta	40.46	PVC, Th=2.79 [mm]
Área transversal del conductor		253.354 [mm ²]

En base a las características antes mencionadas se modela el cable

2.3.2 DATOS DEL BD DE LAS S/E's

Luego de nombrar las características para el modelamiento de los cables, se procedió a realizar el levantamiento de datos en las subestaciones, empezando con el equipo de la zona centro. Esto aporta los siguientes resultados:

2.3.2.1 Subestación El Quinche (S/E 58)

La información encontrada en el levantamiento de información de las salidas de los alimentadores de la subestación fue: un pozo de revisión de la Figura 2.4. , en el que constan cuatro alimentadores primarios, tres de los cuales son calibre 500 MCM, y el alimentador B es de 250 MCM.



Figura 2.4. Pozo 1 S/E 58

2.3.2.1.1 Recolección de datos S/E 58

El resumen de la toma de datos del BD de la S/E 58 se encuentra, a continuación, en la Tabla 2.7.

Tabla 2.6. Datos de BD de S/E 58

Hora de medición	Diámetro de ducto	Material ducto	Voltaje de alimentación por parte del transformador: 22.8 [kV]	
12:10 pm	$\phi = 6''$	PVC en concreto		
Primario	Calibre cable	Material cable	Nivel de aislamiento en el cable	Temperatura °C en el cable
58 A	500 MCM	Cu	25 [kV]	20.7 °C
58 B	250 MCM	Cu	25 [kV]	
58 C	500 MCM	Cu	25 [kV]	
58 D	500 MCM	Cu	25 [kV]	

El diámetro del ducto es 6 pulgadas y se simboliza con la letra ϕ . Las dimensiones de los cables de 250 MCM y 500MCM se encuentran en 2.3.1.1

Ahora, la Figura 2.5. consta de dos partes: a) la fotografía fue tomada dentro del pozo de la subestación, se realizaron mediciones mostradas en la parte b), tales como la distancia desde la superficie hasta la primera fila del BD, esta distancia es llamada profundidad de entierro; se midió la separación vertical y horizontal de cada ducto dentro del BD y el ancho y largo de este.

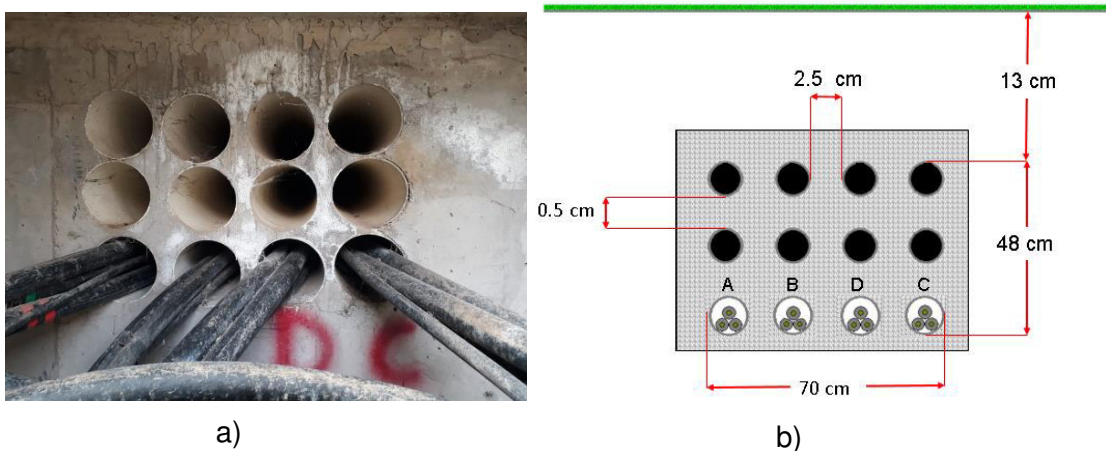


Figura 2.5. Dimensiones de BD S/E 58

Debajo del BD se encontraron las letras A, B, D y C, correspondientes al nombre de cada alimentador primario de la subestación.

2.3.2.2 Subestación Nueva Cumbayá (29)

El transformador de la subestación es de 22.8 [kV], de modo que la distancia mínima de entierro es de 600 [mm]. Esta subestación cuenta con dos pozos de revisión, cada uno con dos alimentadores primarios.

2.3.2.2.1 Recolección de datos Pozo 1 S/E 29

Los datos recolectados en el pozo 1 se muestran en la Tabla 2.7. , y la medición se realizó a las 11:00 a. m.

Tabla 2.7. Datos de BD 1 en pozo 1 de subestación Nueva Cumbayá

Hora de medición	Diámetro de ducto	Material ducto	Nivel de aislamiento en el cable	Temperatura °C en el cable
11:00 a. m.	$\phi = 4''$	PVC en concreto		
Primario	Calibre cable	Material cable	25 [kV]	27.3 °C
29 B	250 MCM	Cu		
29 C	250 MCM	Cu		

Los alimentadores primarios se encuentran en la esquina inferior del BD, como se muestra en la Figura 2.6. , la parte a) es la fotografía del BD encontrado, y la b) es las medidas del BD. El análisis no contempla los conductores de baja tensión; por tanto, la Figura 2.6. b) muestra solo las tres fases del alimentador B y C.

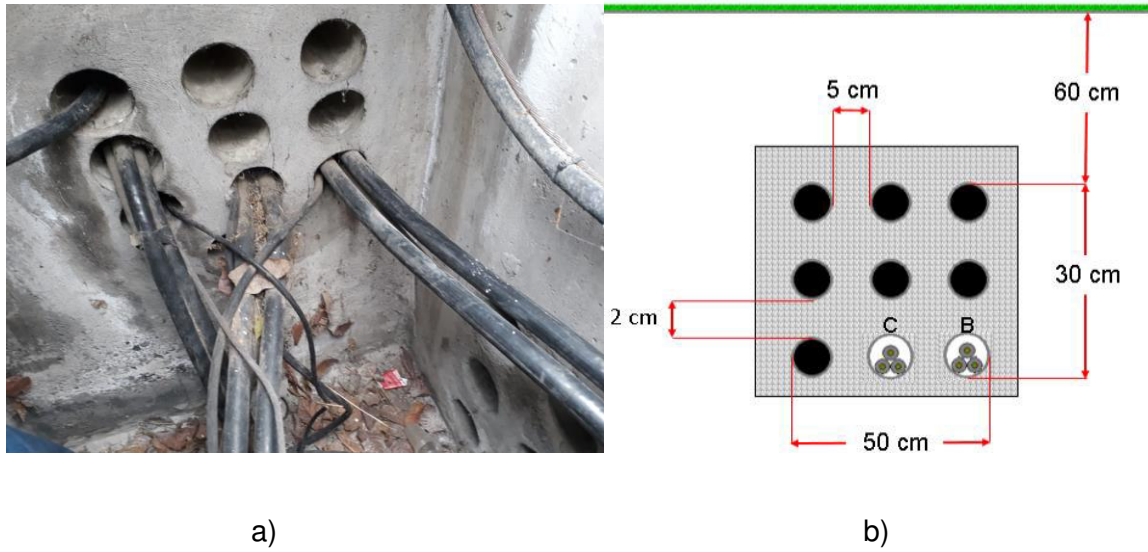


Figura 2.6. Dimensiones de BD 1 en Pozo 1 de S/E 29

Cabe destacar que la medición de esta subestación fue realizada el 25 de julio del 2019 a las 10:51 a. m. Los alimentadores B y C son de medio voltaje, los cables restantes son de bajo voltaje, así que no se consideraron para el análisis.

2.3.2.2.2 *Recolección de datos del Pozo 2 S/E 29*

El pozo 2 se encuentra a 2.8 metros de distancia del pozo 1 y dentro de la subestación es el punto más cercano entre alimentadores primarios. Los datos recolectados más adelante fueron los siguientes:

Tabla 2.8. Datos de BD en pozo 2 de subestación Nueva Cumbayá.

Hora de medición	Diámetro de ducto	Material ducto	Nivel de aislamiento en el cable
9:30 a. m.	$\phi = 4''$	PVC en concreto	
Primario	Calibre cable	Material cable	
29 A	250 MCM	Cu	25 [kV]
29 D	250 MCM	Cu	25 [kV]

En la Figura 2.7. se procedió a un etiquetado temporal de los cables, no se simuló los neutros de cada fase.

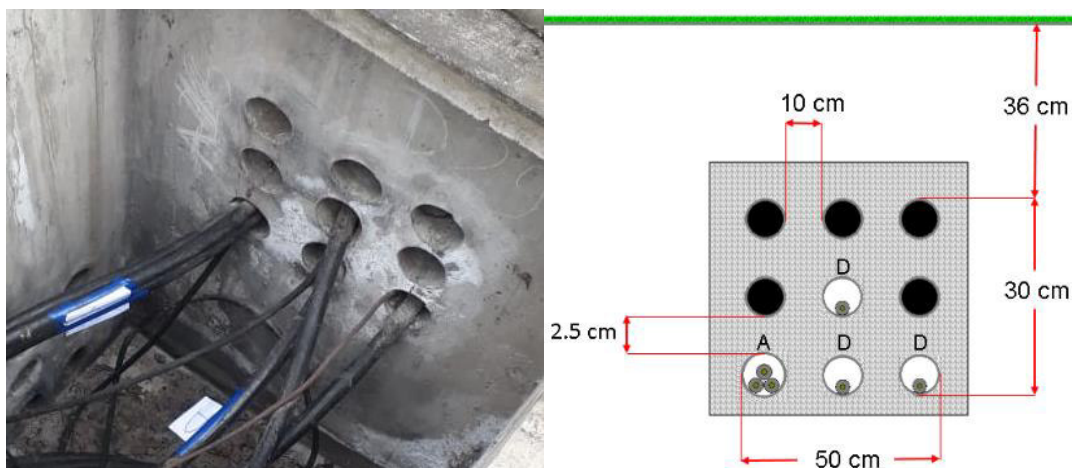


Figura 2.7. Dimensiones de BD 1 en pozo 2 de la S/E 29

2.3.2.3 Subestación Escuela Sucre (S/E 06)

La subestación consta de seis alimentadores de 500 MCM de Cu con voltaje de operación 6.3 [kV]; adicionalmente, uno de los alimentadores suministra al servicio de transporte público Trole-bus, al momento de la medición en estos cables la corriente fue cero y no se encontraron datos de esta. Se considera solo los alimentadores de la Tabla 2.10.

2.3.2.3.1 Recolección de datos S/E 06

La temperatura del cable a las 10:42 a. m. del 12 de julio de 2019 fue 25 °C, al igual que las subestaciones anteriores, los datos recolectados fueron:

Tabla 2.9. Datos de BD de S/E 06

Hora de medición	Diámetro de ducto	Material ducto	Nivel de aislamiento en el cable	Temperatura °C en el cable
Primario	Calibre cable	Material cable		
10:42 a. m.	$\phi = 6''$	PVC EN CONCRETO	25 [kV]	25 °C
6A	500 MCM	Cu		
6B	500 MCM	Cu		
6C	500 MCM	Cu		
6G	500 MCM	Cu		
6Z	500 MCM	Cu		

El levantamiento de datos de la Tabla 2.9. en esta subestación fue rápido, lo cual se facilitó gracias a la previa identificación de cada terna dentro del BD con placas delgadas metálicas de identificación. Se recomienda comprar cinta metálica para la etiquetadora 3-M para la identificación del resto de alimentadores en otras subestaciones ya existentes o nuevas, el precio actual de la cinta de 55 [m] en España es de \$8, lastimosamente no se encontró un distribuidor en Ecuador.

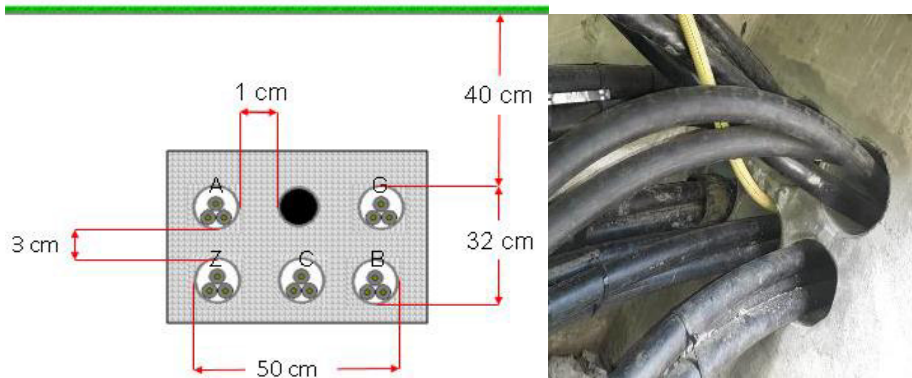


Figura 2.8. Dimensiones de BD de S/E 06

2.4 MODELO COMPUTACIONAL Y VERIFICACIÓN & VALIDACIÓN DE MODELO DE BD EN CYMCAP

2.4.1 MODELO COMPUTACIONAL, VERIFICACIÓN & VALIDACIÓN DE MODELO S/E 58

La profundidad mínima de entierro permitida por CYMCAP es 0.21m y no la distancia real de 0.13 m. La simulación realizada se observa, seguidamente, en la Figura 2.5.

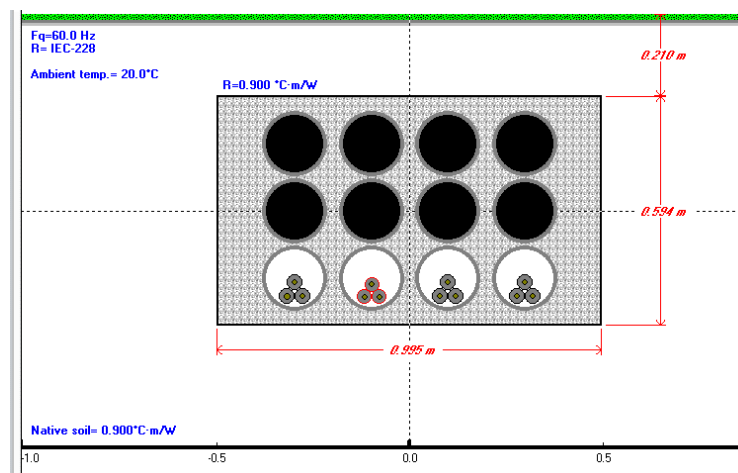


Figura 2.9. Simulación subestación El Quinche (S/E 58)

La frecuencia preestablecida en CYMCAP para las simulaciones es 60 Hz. Los tamaños de los cables conductores de CYMCAP son estandarizados por la norma IEC-228 [3].

2.4.2 MODELO COMPUTACIONAL, VERIFICACIÓN & VALIDACIÓN DE MODELO POZO 1 S/E 29

En este punto, se procedió a simular el pozo 1 del BD de S/E 29, con base en los datos recolectados, como se muestra en la Figura 2.10.

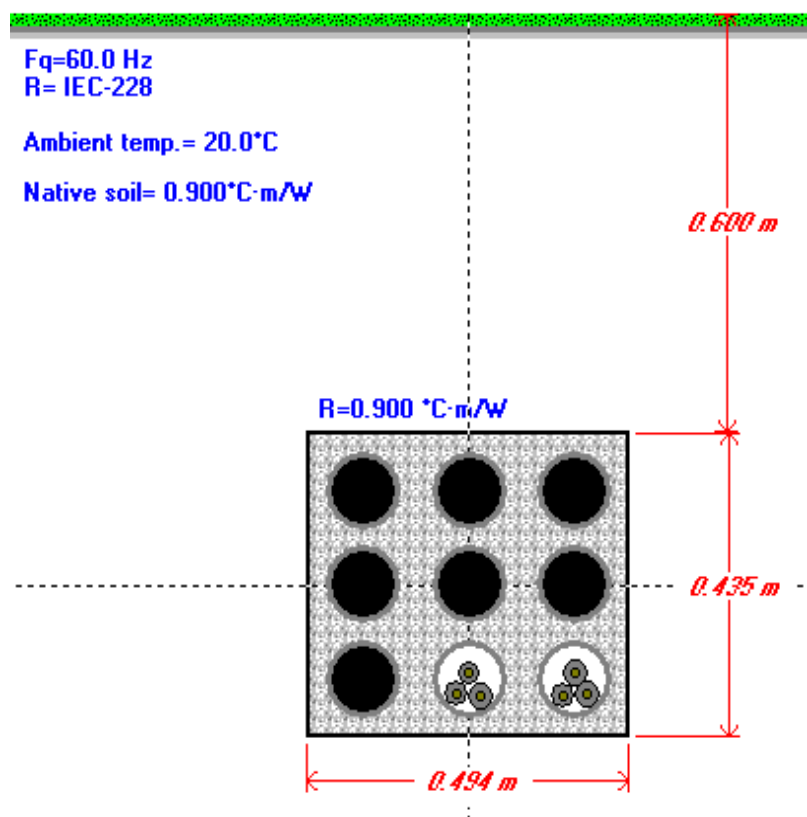


Figura 2.10. Simulación Pozo 1 S/E 29

2.4.3 MODELO COMPUTACIONAL, VERIFICACIÓN & VALIDACIÓN DE MODELO DEL POZO 2 S/E 29

La profundidad de entierro mínima arriba de los ductos eléctricos es también llamada la distancia de entierro mínima requerida de entierro. Según la NEC, es de 450 [mm] para conductos de PVC y como máximo de 750 [mm]. El BD simulado sale de la terminación

inicial de la subestación, por ende, la NEC acepta una distancia de entierro inferior, como la que se muestra en la Figura 2.11.

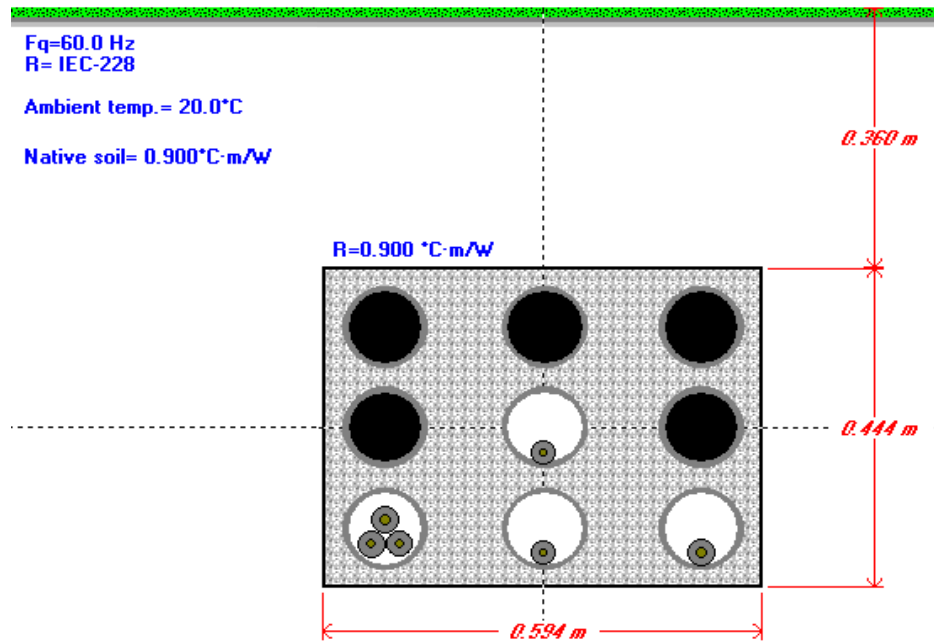


Figura 2.11. Simulación de BD pozo 2 de la subestación Nueva Cumbayá

Cabe anotar que CYMCAP se limita a ejecutar un análisis de alimentadores primarios sin considerar los neutros; en este caso, se simula lo encontrado en el sitio, por lo que el alimentador A se encuentra en un único ducto inferior y el alimentador D está distribuido una fase por ducto.

2.4.4 MODELO COMPUTACIONAL, VERIFICACIÓN & VALIDACIÓN DE MODELO S/E 06

El modelamiento de la subestación Escuela Sucre se realizó de acuerdo con a la Figura 2.12, exceptuando el alimentador del trole.

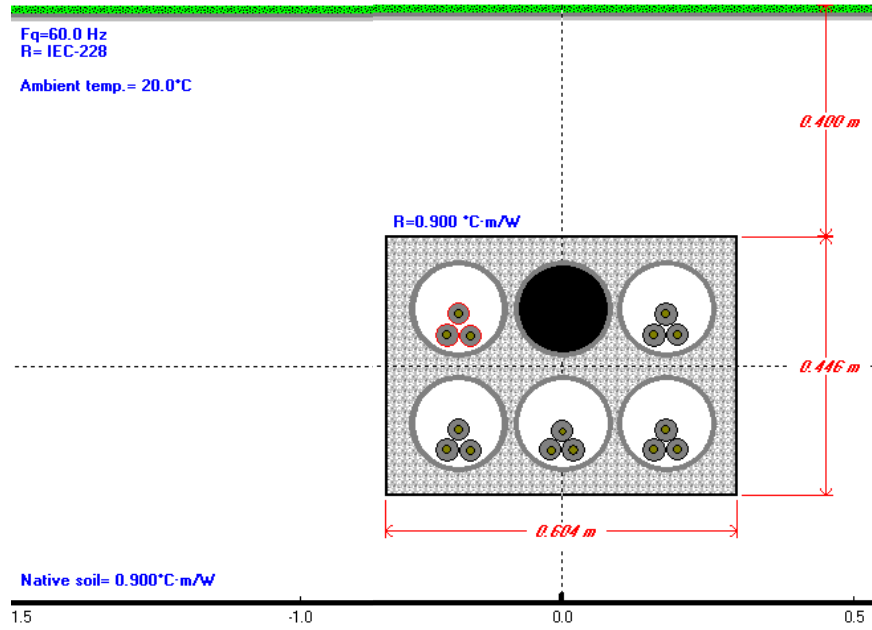


Figura 2.12. Simulación de BD de la S/E 06

El BD y sus alrededores es de concreto, razón por la cual se simula con esta RHO, tanto para "Native soil" como para "R"; siendo estos la resistividad térmica del suelo y la resistividad térmica del BD.

3. RESULTADOS

El presente capítulo se centra en los resultados encontrados al variar los parámetros de ampacidad versus resistividad térmica, factor de carga, altura y temperatura; esto corresponde a la sexta etapa de la Figura 2.1.

Así pues, se utilizaron datos de corriente y de potencia mostrados desde el ANEXO D al ANEXO F, para elegir los rangos de valores tanto en factor de carga como de demanda máxima. Las tablas generadas de los escenarios elegidos se encuentran desde el ANEXO G al ANEXO J. Los resultados de simulación para las tres subestaciones analizadas se muestran a continuación.

3.1 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS & ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE BD

Los escenarios seleccionados para la simulación en CYMCAP con el módulo “estudio paramétrico” se basan en la normativa del punto 2.2.1, los datos simulados en los puntos 2.3 y 2.4.

Los datos establecidos por el NEC son:

RHO: 0.9 [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}/\text{W}$]

f_c : 100 %

T: 20 $^{\circ}\text{C}$

Partiendo del escenario anteriormente descrito, junto con “Single Point Bonding” encontrado en las S/E’s la ampacidad (I_{amp}) en cada AP es:

Tabla 3.1. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58

AP	MCM	I_{amp} EN MERNNR [A] (ANEXO C)	I_{amp} SEGÚN NEC [A]		I_{amp} SIMULADA EN CYMCAP [A]	$I_{m\acute{a}x}$ EN TC [A]	$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA [A] (ANEXO D)
			3 AP (Figura 2.2.) b)	6 AP (Figura 2.2.) c)			
58A	500	465	370	290	418.8	400	140.87
58B	250	325	260	210	253.8		81.6
58C	500	465	370	290	417.3		189.98
58D	500	465	370	290	376.6		3.57

Los datos del MERNNR sirven para un solo BD de 1 AP con 3 fases por lo que la I_{amp} simulada con los parámetros del NEC descritos al inicio de 3.1 con 4AP es menor y distinta en cada uno debido al AP de 250 MCM. El NEC no dispone de una ampacidad simulada con 4 AP por lo que en la Tabla 3.1 se encuentran 3 AP y 6 AP; la corriente máxima en el TC es dada por la S/E mientras que la I_{amp} simulada permite observar el comportamiento del cable y la ampacidad permitida por el mismo; $I_{máx}$ medida se encuentra en el ANEXO D en contraste con el ANEXO C la diferencia en amperios es la siguiente:

Tabla 3.2. Diferencia de I_{amp} y $I_{máx}$ en S/E 58 vs. I_{amp} MERNNR

A P	MCM	I_{amp} MERNNR VS. I_{amp} NEC				I_{amp} MERN NR VS. I_{amp} SIMULADA EN CYMCAP		I_{amp} MERN NR VS. $I_{máx}$ EN TC		I_{amp} MERNNR VS. $I_{máx}$ MEDIDA	
		3 AP (Figura 2.2.) b)		6 AP (Figura 2.2.) c)		[A]	%	[A]	%	[A]	%
		[A]	%	[A]	%						
5 8 A	500	95	20.43	175	37.63	46.2	9.93	65	13.97	324.13	69.71
5 8 B	250	65	20	115	35.38	71.2	21.91	-75	-23.07	243.4	74.89
5 8 C	500	95	20.43	175	37.63	47.7	10.26	65	13.97	275.02	59.14
5 8 D	500	95	20.43	175	37.63	88.4	19.01	65	13.97	461.43	99.23

La capacidad de corriente máxima estimada según el MERNNR difiere a la configuración del NEC de 3, 6 AP's en 20% y aproximadamente 37% respectivamente; la simulación en CYMCAP aporta una variación inferior a los 90 [A] siendo la ampacidad simulada del AP 58B 21.91 % inferior a la del MERNNR. La corriente máxima en TC (400 [A]) es constante y en caso de ser necesario puede ser superior, según el MERNNR los AP's A, C y D soportan 465 [A] por lo que pueden funcionar normalmente a 400 [A] permitiendo un

aumento en la corriente de 13.97 % sin sufrir daños en el cable, pero el AP 58B no debe superar los 325 [A] por lo que no se debe cargarlo a corrientes superiores.

La corriente máxima medida en 2018 es inferior a la estimada en el MERNNR en más de 240 [A], por lo que según la Tabla 3.2 BD estaría sobredimensionado (ver ANEXO D).

A continuación, en la Tabla 3.3. se compara la ampacidad (I_{amp}) simulada con respecto a los valores de la Tabla 3.1.

Tabla 3.3. Comparativa de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 58 vs. I_{amp} simulada en CYMCAP

A P	MCM	I_{amp} EN MERNNR VS I_{amp} SIMULADA		I_{amp} EN NEC VS I_{amp} SIMULADA [A]				$I_{m\acute{a}x}$ EN TC VS I_{amp} SIMULADA		$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA VS I_{amp} SIMULADA	
				3 AP (Figura 2.2.) b)		6 AP (Figura 2.2.) c)					
		[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%
5 8 A	500	-46.2	-11.03	48.8	11.65	128.8	30.75	18.8	4.49	277.93	66.36
5 8 B	250	-71.2	-28.05	-6.2	-2.44	43.8	17.26	-146.2	-57.6	172.2	67.85
5 8 C	500	-47.7	-11.43	47.3	11.33	127.3	30.51	17.3	4.15	227.32	54.47
5 8 D	500	-88.4	-23.47	6.6	1.75	86.6	22.99	-23.4	-6.21	373.03	99.05

La ampacidad del ANEXO C son superiores a las simuladas, la capacidad de corriente máxima simulada en CYMCAP es inferior a la del MERNNR por lo que al compararlas nuevamente se observa que la simulación es inferior hasta 88.4 [A]. La ampacidad esperada en 58B para una configuración de 3 AP's es mayor en 6.2 [A] y superior en 48.8 [A] en 58 A. Al igual que en la tabla anterior según el NEC para 6 AP's es inferior a la simulada, pero en este caso en menor porcentaje para A, C, D; en el caso de 58B es menor con 43.8 [A]. Los conductores A y C soportan la corriente máxima del TC sin sobrepasar los límites de temperatura ni afectar las características físicas ni eléctricas del cable, según la Tabla 3.3, pero esto no sucede en el caso de 58B y 58D

En base al ANEXO D ninguno de los AP supera las corrientes máximas.

Se repite el procedimiento anterior desde la Tabla 3.4 hasta la Tabla 3.6 para la S/E 29 y para la S/E 06.

Tabla 3.4. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1

AP	M C M	I_{amp} SEGÚN MERNNR [A]	I_{amp} SEGÚN NEC [A]		I_{amp} SIMULA DA EN CYMCAP [A]	$I_{m\acute{a}x}$ EN TC [A]	$I_{m\acute{a}x}$ ME DIDA [A]
			1 AP (Figura 2.2.) a)	3 AP (Figura 2.2.) b)			
29B	2 5 0	325	325	260	288.9	400	68.09
29C							222.73

NEC no cuenta con una configuración para 2 AP por lo que la I_{amp} simulada difiere de lo esperado; simulado y de sus $I_{m\acute{a}x}$. Al comparar los valores de la Tabla 3.4 con I_{amp} del MERNNR se obtiene:

Tabla 3.5. Diferencia de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 29, P1 vs. I_{amp} MERNNR

AP	M C M	I_{amp} MERNNR VS. I_{amp} NEC				I_{amp} MERNNR R VS. I_{amp} SIMULADA EN CYMCAP		I_{amp} MERNNR VS. $I_{m\acute{a}x}$ EN TC		I_{amp} MERNNR VS. $I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	
		1 AP (Figura 2.2.) a)		3 AP (Figura 2.2.) b)		[A]	%	[A]	%	[A]	%
		[A]	%	[A]	%						
29B	2 5 0	0	0	65	20	36.1	11.11	-75	-23.08	256.91	79.05
29C		102.27	31.47								

El ANEXO C se basa en NEC con configuración de 1 AP esta I_{amp} es superior por 65 [A] comparado con la configuración de 3 AP, pero difiere en 36.1 [A] respecto a la simulada, según la Tabla 3.5 cada fase del AP no debe superar los 325 [A] por lo que no se debe cargar el cable a la $I_{m\acute{a}x}$ del TC. 29B y 29 C constan de configuraciones, dimensiones iguales y 3 fases por ducto por lo que el resultado es el mismo para 29 B y 29C. la $I_{m\acute{a}x}$

medida (ver ANEXO E) es diferente para cada AP, en el caso de 29 B este se sobredimensionado con 79.05 % comparándolo con MERNNR.

Al comparar I_{amp} simulada con I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de la Tabla 3.4 la ampacidad simulada es inferior a los valores negativos observados.

Tabla 3.6. Comparativa de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 29, P1 vs. I_{amp} simulada en CYMCAP

AP	M C M	I_{amp} EN MERNNR VS I_{amp} SIMULADA		I_{amp} EN NEC VS I_{amp} SIMULADA				$I_{m\acute{a}x}$ EN TC VS I_{amp} SIMULADA		$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA VS I_{amp} SIMULADA	
				1 AP (Figura 2.2.) a)		3 AP (Figura 2.2.) b)					
		[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%
29B	2 5 0	-36.1	-12.5	-36.1	-12.5	28.9	10	-111.1	-38.46	220.81	76.4
29C										66.17	22.9

La Tabla 3.6 evidencia que la I_{amp} simulada es superior a la I_{amp} con 3 AP en un 10 % y similar a la tabla anterior muestra un sobredimensionamiento de 76.4% en el AP 29B pero solo de 66.17 [A] para 29C. No cargar el cable con una corriente superior a 388 [A]

La Tabla 3.7 duplica los MCM del P1, pero en la ampacidad simulada 29D logra I_{amp} superiores debido a que cada fase del AP se ubica en un ducto (ver Figura 2.7).

Tabla 3.7. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2

AP	M C M	I_{amp} SEGÚN MERNNR [A]	I_{amp} SEGÚN NEC [A]		I_{amp} SIMULADA EN CYMCAP [A]	$I_{m\acute{a}x}$ EN TC [A]	$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA [A]
			1 AP (Figura 2.2.) a)	3 AP (Figura 2.2.) b)			
29A	2 5 0	325	325	260	293.6	400	147.66
29D					361.6		172.15

Los valores son similares a los de la Tabla 3.6 hasta la I_{amp} en donde 29 A tolera 4.7 [A] adicionales en comparación con la Tabla 3.4 y 29D es superior en 72.7 [A]; las $I_{m\acute{a}x}$ del ANEXO E para los AP 29 A y 29 D son similares.

La Tabla 3.8 expone resultados similares a la Tabla 3.5 excepto en la I_{amp} simulada en donde 29 A es inferior a la I_{amp} de MERNNR en 31.4 [A] y 29D es superior a la I_{amp} de MERNNR en 36.6 [A].

Tabla 3.8. Diferencia de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 29, P2 vs. I_{amp} MERNNR

AP	M C M	I_{amp} MERNNR VS. I_{amp} NEC				I_{amp} MERNNR VS. I_{amp} SIMULADA EN CYMCAP		I_{amp} MERNNR VS. $I_{m\acute{a}x}$ EN TC		I_{amp} MERNNR VS. $I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	
		1 AP (Figura 2.2.) a)		3 AP (Figura 2.2.) b)		[A]	%	[A]	%	[A]	%
		[A]	%	[A]	%						
29A	2 5 0	0	0	65	20	31.4	9.66	-75	-23.08	177.34	54.57
29D						-36.6	-11.26	-75	-23.08	152.85	47.03

La $I_{m\acute{a}x}$ medida excede en 54.57% y 47.03% a la I_{amp} de MERNNR de los AP 29 A y 29 D respectivamente, según la Tabla 3.8 el AP tolera la corriente máxima medida y la I_{amp} simulada en 29D, pero no debe cargarse a más de 325 [A]

Tabla 3.9. Comparativa de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 29, P2 vs. I_{amp} simulada en CYMCAP

AP	M C M	I_{amp} EN MERNNR VS I_{amp} SIMULADA		I_{amp} EN NEC VS I_{amp} SIMULADA				$I_{m\acute{a}x}$ EN TC VS I_{amp} SIMULADA		$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA VS I_{amp} SIMULADA	
		I_{amp} EN MERNNR VS I_{amp} SIMULADA		1 AP (Figura 2.2.) a)		3 AP (Figura 2.2.) b)		[A]	%	[A]	%
		[A]	%	[A]	%	[A]	%				
29A	2 5 0	-31.4	-10.69	-31.4	-10.7	33.6	11.44	-106.4	-36.24	145.94	49.71
29D		36.6	10.121	36.6	10.12	101.6	28.1	-38.4	-10.62	189.45	52.39

La I_{amp} simulada en CYMCAP es inferior a la del MERNNR (NEC, 1 AP) y a la $I_{m\acute{a}x}$ del TC por lo que el cable no debe superar los 293.6 [A] para 29 A y 361.6 [A] para 29D; sufre una variación de 11.44 y 28.1 respectivamente al asumir ampacidades de NEC con 3AP. Nuevamente la corriente medida es inferior; cabe recalcar que en este caso ambos AP superan los 100 [A]. Según la tabla el cable no sufrirá ningún daño con la carga medida. A pesar de ser 2AP el hecho de ubicaciones diferentes dentro del BD hace que la comparativa

con respecto a los datos se dificulta, por el contrario, en el P1 solo la $I_{m\acute{a}x}$ medida se analiza para cada AP.

La S/E 06 presenta un comportamiento similar al P1 de la S/E 29 pero en este caso con 5 AP.

Tabla 3.10. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06

AP	M C M	I_{amp} MERNNR [A]	I_{amp} SEGÚN NEC [A]		I_{amp} SIMULADA EN CYMCAP [A]	$I_{m\acute{a}x}$ EN TC [A]	$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA [A]
			3 AP (Figura 2.2.) b)	6 AP (Figura 2.2.) c)			
6A	5 0 0	465	370	290	356.9	600	50.4
6B							70.56
6C							48.96
6G							23.04
6Z							15.84

La Tabla 3.10 coteja I_{amp} de las normativas junto con la simulada que a diferencia de las tablas anteriores es inferior en 108.1 [A]; ninguna excede a $I_{m\acute{a}x}$ del TC. $I_{m\acute{a}x}$ medida se encuentra en el ANEXO F.

Se confronta variaciones inferiores al 37.63% en la Tabla 3.11 pero al compararlos con $I_{m\acute{a}x}$ medida estas variaciones superan el 80%.

Tabla 3.11. Diferencia de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 06 vs. I_{amp} MERNNR

AP	M C M	I_{amp} MERNNR VS. I_{amp} NEC				I_{amp} MERNNR VS. I_{amp} SIMULADA EN CYMCAP		I_{amp} MERNNR VS. $I_{m\acute{a}x}$ EN TC		I_{amp} MERNNR VS. $I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	
		3 AP (Figura 2.2.) b)		6 AP (Figura 2.2.) c)		[A]	%	[A]	%	[A]	%
		[A]	%	[A]	%						
6A	5 0 0	95	20.43	175	37.63	108.1	23.25	-135	-29.03	414.60	89.16
6B										394.44	84.83
6C										416.04	89.47
6G										441.96	95.05
6Z										449.16	96.59

El BD se sobredimensionó según la Tabla 3.11, la S/E 06 se ubica en el centro histórico por lo que según los datos y comparaciones el diseño de S/E funcionará perfectamente, aunque aumente la carga, el cable no sufrirá daños a menos que supere los 465 [A].

Tabla 3.12. Comparativa de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 06 vs. I_{amp} simulada en CYMCAP

A P	M C M	I_{amp} EN MERNNR VS SIMULADA		I_{amp} EN NEC VS I_{amp} simulada				$I_{m\acute{a}x}$ EN TC VS I_{amp} SIMULADA		$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA VS I_{amp} SIMULADA		
				3 AP (Figura 2.2.) b)		6 AP (Figura 2.2.) c)						
		[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	
6 A	5 0 0	-	108.1	-30.29	-13.10	-3.67	66.9	18.74	-243.1	-68.11	306.5	85.88
6 B											286.34	80.23
6 C											307.94	86.28
6 G											333.86	93.54
6 Z											341.06	95.56

I_{amp} simulada es menor al MERNNR en un 30.29% y a la configuración de 3 AP en 3.67%, no supera la I_{amp} de 6 AP por 18.74%. $I_{m\acute{a}x}$ del TC es mayor por 243.1 [A]. El cable funcionará de forma idónea hasta 356.9 [A] caso contrario puede sufrir daños por calentamiento. $I_{m\acute{a}x}$ medida es inferior desde 286.34 [A].

De las Tabla 3.1 hasta la Tabla 3.12 Se concluye que I_{amp} simulada ofrece resultados conservadores respecto al MERNNR con 108.1 [A] de diferencia en la S/E 06. Las configuraciones de los BD's son distintos a los de la Figura 2.7. (NEC) por lo que I_{amp} simulada es seleccionada como referencia.

Se simulan los siguientes casos de estudio para observar el cambio en la ampacidad variando un solo parámetro (RHO, f_c , altura o T) cada vez.

3.1.1 CASOS DE ESTUDIO

La corriente máxima de las S/E's en las gráficas es la seteada en el TC (transformador de corriente) de cada una, la ampacidad nominal es seleccionada en base a los datos de capacidad de corriente del ANEXO C (ver punto 2.2.1.2).

Los resultados de ampacidad al variar RHO dentro del BD de las S/E's fueron los siguientes:

3.1.1.1 Caso 1 - Ampacidad vs. Resistividad térmica

No se encontraron valores medidos de la resistividad térmica en el sitio. Los BD's encontrados al recolectar los datos fue de concreto, por lo que se utiliza el rango de resistividad térmica de $0.8 [^{\circ}C \cdot m/W]$ hasta la condición de suelo seco de $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$.

La Tabla 3.13 resume los resultados del ANEXO G cuando RHO varía.

Tabla 3.13. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 a diferentes RHO

A P	M C M	$I_{amp} 0.8 [^{\circ}C \cdot m/W]$	$I_{amp} 0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ (simulada con datos de NEC)	$I_{amp} 1 [^{\circ}C \cdot m/W]$	$I_{amp} 1.1 [^{\circ}C \cdot m/W]$	$I_{amp} 1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$	$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	$I_{m\acute{a}x}$ M EDIDA
		[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
5 8 A	5 0 0	433	418.8	406.1	394.5	384	400	140.87
5 8 B	2 5 0	265	253.8	244.1	235.1	226.9		81.6
5 8 C	5 0 0	431	417.3	404.5	393	382.4		189.98
5 8 D	5 0 0	393	376.6	361.7	348.2	335.8		3.57

TC de la S/E 58 permite una corriente máxima de 400 [A], según los datos de $I_{m\acute{a}x}$ medida estos no superan los 200 [A]. En el ANEXO D la máxima corriente es 189.98 [A] para el AP

58 C; partiendo de la resistividad más baja en la Tabla 3.13 se observa que a medida que RHO aumenta I_{amp} disminuye. $I_{máx}$ medida es menor a las I_{amp} simuladas.

I_{amp} simulada en CYMCAP es cotejado en la Tabla 3.14 con los datos de la Tabla 3.13 para obtener la diferencia entre I_{amp} con datos establecidos según NEC.

Tabla 3.14. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{máx}$ de S/E 58 a diferentes RHO vs. I_{amp} simulada a 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]

A P	M C M	I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 0.8 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1.1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{máx}$ EN TC		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{máx}$ MEDIDA	
		[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%
58A	500	-14.2	-3.39	12.7	3.03	24.3	5.80	34.8	8.31	18.8	4.49	277.9 3	66.36
58B	520	-11.2	-4.41	9.7	3.82	18.7	7.37	26.9	10.6	-146.2	-57.6	172.2	67.85
58C	500	-13.7	-3.28	12.8	3.07	24.3	5.82	34.9	8.36	17.3	4.15	227.3 2	54.47
58D	500	-16.4	-4.35	14.9	3.96	28.4	7.54	40.8	10.83	-23.4	-6.21	373.0 3	99.05

La Tabla 3.14 indica la variación de I_{amp} de los AP's con 0.8 [$^{\circ}C \cdot m/W$]son superiores a la I_{amp} con datos de NEC, siendo en 16.4 [A] en el caso de 58D. La diferencia en amperios entre 1.2 y 0.9 no supera los 40.8 [A] en el AP 58 D pero supera en 129.2 [A] a la ampacidad en MERNNR (465 [A]).

RHO 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] es el peor escenario de la Tabla 3.13 al compararla se extraen los siguientes datos:

Tabla 3.15. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 a diferentes RHO vs. I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$]

A P	M C M	I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 0.8 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1.1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{m\acute{a}x}$ EN TC		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	
		[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%
5 8 A	5 0	-49	-12.76	-34.8	-9.06	-22.1	-5.76	-10.5	-2.73	-16	-4.17	243.1 3	63.3 2
5 8 B	5 0	-38.1	-16.79	-26.9	-11.86	-17.2	-7.58	-8.2	-3.61	-173.1	- 76.29	145.3 0	64.0 4
5 8 C	5 0	-48.6	-12.71	-34.9	-9.13	-22.1	-5.78	-10.6	-2.77	-17.6	-4.60	192.4 2	50.3 2
5 8 D	5 0	-57.2	-17.03	-40.8	-12.15	-25.9	-7.71	-12.4	-3.69	-64.2	- 19.12	332.2 3	98.9 4

Los valores de la Tabla 3.15 son especialmente negativos porque Rho 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] es inferior a las I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de la Tabla 3.13, según esta tabla el conductor no debe cargarse con más de 226 [A] en el AP 58 B, 335.8 [A] en 58D, 382.4 en 58C y 384 en 58 A; demostrando que a causa de la cercanía de B y C el AP 58D disminuye su ampacidad. Se puede adicionar carga a los AP con 243.13, 145.3, 192.42 o 332.23 [A] respectivamente.

Al comparar las $I_{m\acute{a}x}$ de las Tabla 3.14 y Tabla 3.15 se observa que la diferencia entre I_{amp} a 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] comparada con $I_{m\acute{a}x}$ en TC asciende al 76.29% en 58B mientras que al compararla con 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] es de 57.6%. $I_{m\acute{a}x}$ medida está dentro de las I_{amp} simuladas. 58B sufrirá daños en caso de superar los 226.9 [A] y 58D podrá llegar a un máximo de 335.8 [A]. El AP 58D está sobredimensionado según la Tabla 3.15.

La Tabla 3.16 corresponde a la S/E 29, pozo 1; en ella se adjunta las $I_{m\acute{a}x}$ tanto la limitada por el transformador como las corrientes máximas medidas adjuntas en el ANEXO E.

Tabla 3.16. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 a diferentes RHO

A P	M C M	I_{amp} 0.8 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	I_{amp} 1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	I_{amp} 1.1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	$I_{m\acute{a}x}$ MEDID A
		[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
2 9 B	2 5 0	299	288.9	280	271.9	264.5	400	68.09
								29 C

El ANEXO C (MERNNR) muestra una ampacidad de 325 [A] mientras las I_{amp} a diferente RHO son inferiores siendo 264.5 [A] con 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] el peor escenario de la Tabla 3.16. En base a lo simulado los AP's no deben cargarse a 400 [A] porque esto afectaría las características del cable.

La Tabla 3.17 muestra que al aumentar RHO la ampacidad disminuye, la diferencia entre la I_{amp} a 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] y I_{amp} a 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] es de 24.4 [A].

Tabla 3.17. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 a diferentes RHO vs. I_{amp} simulada a 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]

A P	M C M	I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 0.8 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1.1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{m\acute{a}x}$ EN TC		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	
		[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%
2 9 B	2 5 0	-10.1	-3.5	8.9	3.08	17	5.88	24.4	8.45	-111.1	-38.46	220.81	76.4 3
												29 C	66.17

La Tabla 3.18 expone un comportamiento similar al de la S/E 58, siendo I_{amp} a 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] baja en comparación a RHO inferiores.

Tabla 3.18. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 a diferentes RHO vs. I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$]

AP	MCM	I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 0.8 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1.1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{m\acute{a}x}$ EN TC		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	
		[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%
29B	250	-34.5	-	-24.4	-9.22	-15.5	-5.86	-7.4	-2.8	-	-51.23	196.4	74.26
	290		13.04							135.5		41.77	15.79

El cable no debe cargarse a m\acute{a}s de 264.5 [A].

Comparando la ampacidad de la Tabla 3.16. I_{amp} de la Tabla 3.19 es superior en 4 y 70 [A] para los AP 29 A y 29D respectivamente.

Tabla 3.19. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 a diferentes RHO

AP	MCM	I_{amp} 0.8 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	I_{amp} 1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	I_{amp} 1.1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA
		[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
29A	250	303	293.6	284.9	276.8	269.4	40	147.66
29D	290	373	361.6	350.9	341.1	332.1	0	172.15

Al igual que en P1, I_{amp} en P2 disminuye al aumentar RHO. I_{amp} seg\unum n MERNNR es 325 [A]; 29 A no supera este valor, aunque es similar a la ampacidad simulada en P1, 29D supera a los 325 [A] esperados con 48 [A] pero cuando RHO es 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] la diferencia es de 7.1 [A].

I_{amp} simulada a 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] en la Tabla 3.20 presenta variaciones similares a las de la Tabla 3.17 (299 [A]) sin embargo superiores por aproximadamente 70 [A] en 29 D y por 4 [A] para 29 A.

Tabla 3.20. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 a diferentes RHO vs. I_{amp} simulada a 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]

AP	MCM	I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 0.8 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1.1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{m\acute{a}x}$ EN TC		I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	
		[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%
29A	250	-9.4	-3.2	8.7	2.96	16.8	5.72	24.2	8.24	-106.4	-36.24	145.94	49.71
29D	290	-11.4	-3.15	10.7	2.96	20.5	5.67	29.5	8.16	38.4	-10.62	189.45	52.39

La corriente máxima que puede soportar 29 A es 293.6 [A] y para 29 D es 361.6 [A] según la Tabla 3.20, la variación con RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] no supera el 8.24%.

La Tabla 3.21 muestra variaciones hasta el 12.47% con respecto a un cambio en RHO a 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$].

Tabla 3.21. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 a diferentes RHO vs. I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$]

AP	MCM	I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 0.8 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 1.1 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{m\acute{a}x}$ EN TC		I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	
		[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%
29A	250	-33.6	-12.47	-24.2	-8.98	-15.5	-5.75	-7.4	-2.75	-	-48.48	121.74	45.19
29D	290	-40.9	-12.32	-29.5	-8.88	-18.8	-5.66	-9	-2.71	-67.9	-20.45	159.95	48.16

$I_{m\acute{a}x}$ del TC supera por 130.6 [A] a la ampacidad con 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] en 29 A y en 67.9 [A] a 29 D por lo que según la Tabla 3.21 no se debe cargar 29 A con más de 269.4 [A] y 332.1 [A] a 29 D.

Los 5AP de la Tabla 3.22 deberían soportar 465 [A] según MERNNR (ver ANEXO C) pero la mayor I_{amp} alcanzada es 372 [A] siempre y cuando RHO sea $0.8 [^{\circ}C \cdot m/W]$.

Tabla 3.22. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 a diferentes RHO

AP	M C M	$I_{amp} 0.8 [^{\circ}C \cdot m/W]$	$I_{amp} 0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$	$I_{amp} 1 [^{\circ}C \cdot m/W]$	$I_{amp} 1.1 [^{\circ}C \cdot m/W]$	$I_{amp} 1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$	$I_{m\acute{a}x} EN TC$	$I_{m\acute{a}x} MEDIDA$
		[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
6A	5 0 0	372	356.9	343.3	331.2	320.3	600	50.4
6B								70.56
6C								48.96
6G								23.04
6Z								15.84

Similar a los casos anteriores el aumento de RHO implica una disminuci3n en I_{amp} , los AP no deben transportar 600 [A] o sufrir3n da3os. La corriente m3xima medida es inferior a los simulados y a $I_{m\acute{a}x}$ en TC.

El porcentaje de variaci3n de ampacidad cuando RHO cambia es similar al obtenido en las anteriores S/E's, en la Tabla 3.23 se visualizan los valores pertinentes.

Tabla 3.23. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 a diferentes RHO vs. I_{amp} simulada a $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$

A P	M C M	$I_{amp} 0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ VS. $I_{amp} 0.8 [^{\circ}C \cdot m/W]$		$I_{amp} 0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ VS. $I_{amp} 1 [^{\circ}C \cdot m/W]$		$I_{amp} 0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ VS. $I_{amp} 1.1 [^{\circ}C \cdot m/W]$		$I_{amp} 0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ VS. $I_{amp} 1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$		$I_{amp} 0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ VS. $I_{m\acute{a}x} EN TC$		$I_{amp} 0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ VS. $I_{m\acute{a}x} MEDIDA$	
		[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%
6A	5 0 0	-15.1	-4.23	13.6	3.81	25.7	7.2	36.6	10.25	243.1	-68.11	306.5	85.88
6B												286.34	80.23
6C												307.94	86.28
6G												333.86	93.54
6Z												341.06	95.56

Dada la configuración de la S/E 06 las I_{amp} simuladas son las mismas para todos los AP.

La Tabla 3.24 muestra la variación de ampacidad e $I_{m\acute{a}x}$ con respecto a $I_{amp} 1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$.

Tabla 3.24. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 a diferentes RHO vs. $I_{amp} 1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$

A P	M C M	COMPARATI VA DE I_{amp} 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. I_{amp} 0.8 [$^{\circ}C \cdot m/W$]		COMPARA TIVA DE $I_{amp} 1.2$ [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{amp} 0.9$ [$^{\circ}C \cdot m/W$]		COMPARA TIVA DE $I_{amp} 1.2$ [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{amp} 1$ [$^{\circ}C \cdot m/W$]		COMPAR ATIVA DE $I_{amp} 1.2$ [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{amp} 1.1$ [$^{\circ}C \cdot m/W$]		COMPARATI VA DE $I_{amp} 1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ VS. $I_{m\acute{a}x}$ EN TC		COMPARATIV A DE $I_{amp} 1.2$ [$^{\circ}C \cdot m/W$] VS. $I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	
		[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%
6 A	5 0 0											269.9	84.26
6 B												249.74	77.97
6 C		-51.7	-16.14	-36.6	-11.43	-23	-7.18	-10.9	-3.4	-279.7	-87.32	271.34	84.71
6 G												297.26	92.81
6 Z												304.46	95.05

Los AP no deben superar los 320.3 [A], $I_{m\acute{a}x}$ es inferior a esta I_{amp} . La ampacidad más baja ocurre al simular los AP con RHO 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$].

La Figura 3.1 muestra una variación con respecto a RHO para cada AP, debido al AP 58B el AP 58 D obtiene una ampacidad menor que los AP de los extremos (58 A y 58C). Mientras que a pesar de ser 5 AP en la S/E 06 se genera un valor de ampacidad para todos los AP's conforme RHO varía (ver Figura 3.2). Una resistividad térmica de 0.5 [$^{\circ}C \cdot m/W$] permite aumentar I_{amp} pero en caso de ser 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] esta disminuye por ejemplo hasta 111.7 [A] en la S/E Sucre (432 [A]-320.3 [A]).

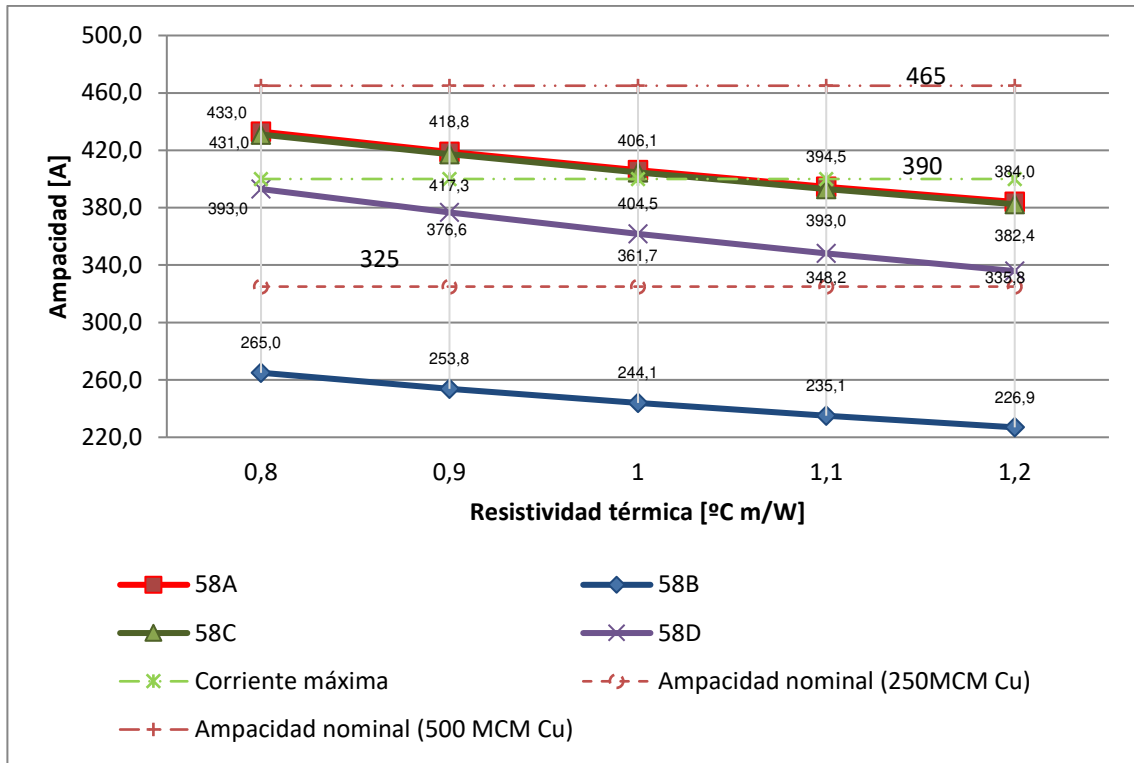


Figura 3.1. Datos de simulación S/E 58. Variación de Ampacidad vs. Resistividad térmica

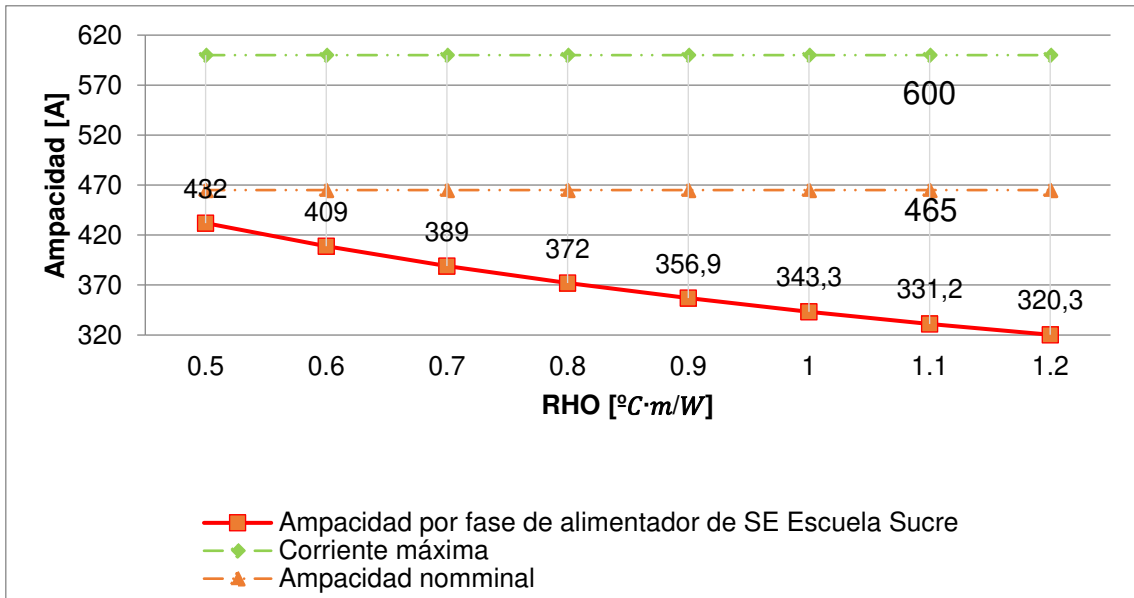


Figura 3.2. Datos de simulación S/E 06. Variación de Ampacidad vs. Resistividad térmica

3.1.1.2 Caso 2 - Ampacidad vs. Factor de Carga

NEC establece el peor escenario en cuanto al valor del factor de carga (f_c), según esta norma cada AP funciona con demanda máxima en cada momento, lo encontrado en las S/E's muestra que existen diferencias entre f_c de cada AP. El factor de carga diario (fcd) en cada AP de cada S/E sirve de base para simular la variación de ampacidad con respecto al factor de carga máximo. Adicional a esto se toma como referencia el tiempo de la prueba de voltaje de larga duración de la norma IEC60502-2 del punto 2.2.1.3 por 4 horas partiendo dos horas antes de la demanda máxima hasta dos horas después de la misma; este factor de carga se simboliza con f_{c2a2d} .

El factor de carga dentro de la S/E 58 es similar para cada AP, en la Tabla 3.25 se encuentra el máximo medido y I_{amp} simulada.

Tabla 3.25. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 a diferentes f_c

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
fcd		0.72	0.61	0.73	0.78
I_{amp} fcd	[A]	482.8	305.7	475.5	448.5
I_{amp} NOMINAL	[A]	465	325	465	465
f _{c2a2d}		0.88	0.83	0.89	0.94
I_{amp} f _{c2a2d}	[A]	444	273.7	438.3	402.2
I_{amp} f _c 100%	[A]	418.8	253.8	417.3	376.6
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400	400	400	400
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	140.87	81.6	189.98	3.57

Partiendo de los datos de la Tabla 3.25 se compara la variación en amperios entre I_{amp} simulada en CYMCAP con los datos establecidos por el NEC, esto se encuentra en la Tabla 3.26.

Tabla 3.26. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 a diferentes fc vs. I_{amp} simulada con fc 100%

AP		58 A	58B	58C	58D
MCM		500	250	500	500
fcd		0.72	0.61	0.73	0.78
I_{amp} fcd	[A]	-64	-51.9	-58.2	-71.9
	%	-15.28	-20.45	-13.95	-19.09
I_{amp} NOMINAL	[A]	-46.2	-71.2	-47.7	-88.4
	%	-11.03	-28.05	-11.43	-23.47
fc2a2d		0.88	0.83	0.89	0.94
I_{amp} fc2a2d	[A]	-25.2	-19.9	-21	-25.6
	%	-6.02	-7.84	-5.03	-6.8
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	18.8	-146.2	17.3	-23.4
	%	4.49	-57.6	4.15	-6.21
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	277.93	172.2	227.32	373.03
	%	66.36	67.85	54.47	99.05

fcd es superior a I_{amp} simulada, lo cual es superior a I_{amp} nominal (según MERNNR). $fc2a2d$ obtiene una variación inferior a 7.84%. 58 A y 58C superan $I_{m\acute{a}x}$ en TC. $I_{m\acute{a}x}$ medida está por debajo de la simulada.

I_{amp} con RHO 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] es inferior a I_{amp} de NEC en aproximadamente 10% en el Caso 1 (ver punto 3.1.1.1) por lo que en la Tabla 3.27 se encuentran los valores de ampacidad simulada con RHO 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] junto a I_{amp} según NEC, $I_{m\acute{a}x}$ en TC y medida.

Tabla 3.27. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 con 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] a diferentes fc

AP		58A	58B	58C	58D
MCM		500	250	500	500
fcd		0.72	0.61	0.73	0.78
I_{amp} con fcd [A]		450.1	280.7	441.8	409.2
I_{amp} con fc 100% y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	418.8	253.8	417.3	376.6
fc2a2d		0.88	0.83	0.89	0.94
I_{amp} con fc2a2d	[A]	409.6	247.2	403.5	361.3
I_{amp} EN CYMCAP CON fc 100%	[A]	384	226.9	382.4	335.8
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400	400	400	400
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	140.87	81.6	189.98	3.57

La variación de f_c junto con RHO provoca I_{amp} inferiores a las de la Tabla 3.25, en la Tabla 3.28 se compara la diferencia entre I_{amp} simulada al 100% vs. Los datos de la tabla más atrás.

Tabla 3.28. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes f_c vs. I_{amp} simulada con f_c 100%

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} NOMINAL	[A]	-81	-98.1	-82.6	-129.2
	%	-21.09	-43.23	-21.6	-38.48
fcd		0.72	0.61	0.73	0.78
I_{amp} fcd	[A]	-66.1	-53.8	-59.4	-73.4
	%	-17.21	-23.71	-15.53	-21.86
I_{amp} con f_c 100% y RHO $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$	[A]	-34.8	-26.9	-34.9	-40.8
	%	-9.06	-11.86	-9.13	-12.15
fc2a2d		0.88	0.83	0.89	0.94
I_{amp} con fc2a2d	[A]	-25.6	-20.3	-21.1	-25.5
	%	-6.67	-8.95	-5.52	-7.59
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-16	-173.1	-17.6	-64.2
	%	-4.17	-76.29	-4.6	-19.12
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	243.13	145.3	192.42	332.23
	%	63.32	64.04	50.32	98.94

Las I_{amp} de la Tabla 3.28 son superiores a la comparativa (I_{amp} simulada al 100%). En este caso ningún AP supera los 400 [A]. La variación de I_{amp} nominal asciende a 43.23% para AP 58B.

La Tabla 3.29 advierte la comparativa entre f_c según establece NEC vs. los datos de la Tabla 3.27. Adicional a esto los valores de la siguiente tabla son inferiores a I_{amp} según MERNNR.

Tabla 3.29. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes f_c vs. I_{amp} simulada con $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ con f_c 100%

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} SEGÚN MERNNR	[A]	-46.2	-71.2	-47.2	-88.4
	%	-12.03	-31.38	-12.47	-26.33
Fcd		0.72	0.61	0.73	0.78
I_{amp} CON fcd	[A]	-31.3	-26.9	-24.5	-32.6
	%	-7.47	-10.6	-5.87	-8.66
fc2a2d		0.88	0.83	0.89	0.94
I_{amp} CON fc2a2d	[A]	9.2	6.6	13.8	15.3
	%	2.2	2.35	3.12	3.74
I_{amp} fc 100%	[A]	34.8	26.9	34.9	40.8
	%	8.31	10.6	8.36	10.83
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	18.8	-146.2	17.3	-23.4
	%	4.49	-57.6	4.15	-6.21
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	277.93	172.2	227.32	373.03
	%	66.36	67.85	54.47	99.05

Las corrientes máximas medidas son menores a los simulados.

La Tabla 3.30 muestra las mismas ampacidades para los AP B y C, esto debido a la configuración de estos.

Tabla 3.30. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 a diferentes f_c

AP		29B	29C
MCM		250	
fcd		0.67	0.74
I_{amp} con fcd	[A]	327.8	
I_{amp} NOMINAL	[A]	325	
fc2a2d		0.9	
I_{amp} con fc2a2d	[A]	301.8	
I_{amp} fc 100%	[A]	288.9	
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	68.09	222.73

I_{amp} fcd es superior por 2.8 [A] a la ampacidad nominal.

La Tabla 3.31 revela una diferencia de 66.17 [A] entre $I_{m\acute{a}x}$ medida y I_{amp} a plena carga y RHO de 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$].

Tabla 3.31. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 a diferentes fc vs. I_{amp} simulada con fc 100%

AP		29B	29C
MCM		250	
fcd		0.67	0.74
I_{amp} con fcd	[A]	-38.9	
	%	-13.46	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-36.1	
	%	-12.5	
fc2a2d		0.9	
I_{amp} con fc2a2d	[A]	-12.9	
	%	-4.47	
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-111.1	
	%	-38.46	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	220.81	66.17
	%	76.43	22.9

Al simular los datos de la Tabla 3.30 con resistividad térmica 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] se obtiene I_{amp} menores, lo cual se expone en la Tabla 3.32.

Tabla 3.32. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 con 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] a diferentes fc

AP		29B	29C
MCM		250	
fcd		0.67	0.74
I_{amp} con fcd[A]		305.8	
I_{amp} con fc 100% y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	288.9	
fc2a2d		0.9	
I_{amp} con fc2a2d	[A]	277.9	
I_{amp} EN CYMCAP CON fc 100%	[A]	264.5	
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA		68.09	222.73

La Tabla 3.33 es la diferencia entre I_{amp} al 100% y RHO 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] y la información de la Tabla 3.32.

Tabla 3.33. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 con 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] a diferentes fc vs. I_{amp} simulada con fc 100%

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-60.5	
	%	-22.87	
fcd		0.67	0.74
I_{amp} con fcd	[A]	-41.3	
	%	-15.61	
I_{amp} con fc 100% y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	-24.4	
	%	-9.22	
fc2a2d		0.9	
I_{amp} con fc2a2d	[A]	-13.4	
	%	-5.07	
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-135.5	
	%	-51.23	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	196.41	41.77
	%	74.26	15.79

La corriente máxima que pueden superar los AP es 264.5 [A], $I_{m\acute{a}x}$ con 222.73 [A] está cercana a esta ampacidad con 41.77 [A].

288.9 [A] es comparado con los datos de la Tabla 3.32 estas variaciones se encuentran en la Tabla 3.34.

Tabla 3.34. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes f_c vs. I_{amp} simulada con $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ con f_c 100%

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-36.1	
	%	-13.65	
fcd		0.67	0.74
I_{amp} con fcd	[A]	-16.9	
	%	-5.85	
fc2a2d		0.9	
I_{amp} con fc2a2d	[A]	11	
	%	3.81	
I_{amp} fc 100%	[A]	24.4	
	%	8.45	
$I_{m\acute{a}x}$ en TC	[A]	-111.1	
	%	-38.46	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	220.81	66.17
	%	76.43	22.9

La Tabla 3.35 es similar a las anteriores para P2 de la S/E 29.

Tabla 3.35. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 a diferentes f_c

AP		29 A	29 D
MCM		250	
fcd		0.83	0.72
I_{amp} con fcd	[A]	321	403.3
I_{amp} NOMINAL	[A]	325	
fc2a2d		0.95	0.93
I_{amp} con fc2a2d	[A]	300.8	372.1
I_{amp} fc 100%	[A]	293.6	361.6
$I_{m\acute{a}x}$ en TC	[A]	400	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	147.66	172.15

f_c en A es mayor que en 29D, aunque las corrientes medidas es A son ligeramente inferiores a D.

La Tabla 3.36 es la diferencia entre I_{amp} al 100% menos los datos de la Tabla 3.35.

Tabla 3.36. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 a diferentes f_c vs. I_{amp} simulada con f_c 100%

AP		29 A	29 D
MCM		250	
fcd		0.83	0.72
I_{amp} con fcd	[A]	-27.4	-41.7
	%	-9.33	-11.53
I_{amp} NOMINAL	[A]	-31.4	36.6
	%	-10.69	10.12
fc2a2d		0.95	0.93
I_{amp} con fc2a2d	[A]	-7.2	-10.5
	%	-2.45	-2.9
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-106.4	-38.4
	%	-36.24	-10.62
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	145.94	189.45
	%	49.71	52.39

29 A, puede transportar un máximo de 293.6 [A] mientras 29 D, 361.6 [A].

La Tabla 3.37 es similar a la Tabla 3.35 pero con RHO superior.

Tabla 3.37. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 con 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] a diferentes f_c

AP		29 A	29 D
MCM		250	
fcd		0.83	0.72
I_{amp} con fcd[A]		298.08	376.89
I_{amp} con fc 100% y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	293.6	361.6
fc2a2d		0.95	0.93
I_{amp} con fc2a2d	[A]	276.76	343.19
I_{amp} EN CYMCAP con fc 100%	[A]	269.39	332.06
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	147.66	172.15

La comparación de f_c al 100% con los datos de la Tabla 3.37 obtiene las variaciones de la Tabla 3.38. I_{amp} disminuye al aumentar el f_c .

Tabla 3.38. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes f_c vs. I_{amp} simulada con f_c 100%

AP		29 A	29 D
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-55.61	7.06
	%	-20.64	2.13
fcd		0.83	0.72
I_{amp} con fcd	[A]	-28.69	-44.83
	%	-10.65	-13.5
I_{amp} con f_c 100% y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	-24.21	-29.54
	%	-8.99	-8.9
fc2a2d		0.95	0.93
I_{amp} con fc2a2d	[A]	-7.37	-11.13
	%	-2.74	-3.35
$I_{m\acute{a}x}$ en TC	[A]	-130.61	-67.94
	%	-48.48	-20.46
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	121.73	159.91
	%	45.19	48.16

I_{amp} en 29 A es 269.39 [A] y para C 332.06 [A], en caso de superar estos valores los AP sufrirán daños. Incluso I_{amp} con f_{cd} en la Tabla 3.37 es inferior a la esperada según MERNNR (I_{amp} nominal), siendo esta 305.8 [A].

La Tabla 3.39 compara las variaciones entre I_{amp} a plena carga y $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ vs. I_{amp} con una resistividad mayor.

Tabla 3.39. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes f_c vs. I_{amp} simulada con $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ con f_c 100%

AP		29 A	29 D
MCM		250	250
fcd		0.83	0.72
I_{amp} con fcd	[A]	-4.48	-15.29
	%	-1.53	-4.23
fc2a2d		0.95	0.93
I_{amp} con fc2a2d	[A]	16.84	18.41
	%	5.74	5.09
I_{amp} fc 100%	[A]	24.21	29.54
	%	8.25	8.17
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-106.4	-38.4
	%	-36.24	-10.62
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	145.94	189.45
	%	49.71	52.39
I_{amp} NOMINAL	[A]	-31.4	36.6
	%	36.6	11.02

Los porcentajes de variaci3n no superan los 8.25% en 29 A con I_{amp} a 100% de f_c . Los AP a $fc2a2d$ varían aproximadamente un 5%.

El P1 de S/E 29 permite visualizar I_{amp} para ambos AP mientras que en el P2 cada una es diferente. La corriente medida del ANEXO E est3 dentro de la ampacidad esperada.

A continuaci3n, en la Tabla 3.40 se simulan distintas I_{amp} siguiendo los datos establecidos en NEC y variando 3nicamente f_c . En ANEXO J se encuentra a detalle esta informaci3n.

Tabla 3.40. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 a diferentes f_c

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
fcd		0.73	0.68	0.58	0.62	0.3
I_{amp} con fcd		464.7				
I_{amp} NOMINAL	[A]	465				
fc2a2d		0.93	0.87	0.95	0.95	0.6
I_{amp} con fc2a2d	[A]	387.9				
I_{amp} fc 100%	[A]	356.9				
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	600				
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	50.4	70.56	48.96	23.04	15.84

A diferencia de las S/E's anteriores esta consta de 5 AP. I_{amp} con fc es superior en 107.8 [A]. La Tabla 3.41 sintetiza estos resultados.

Tabla 3.41. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 a diferentes fc vs. I_{amp} simulada con fc 100%

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
fcd		0.73	0.68	0.58	0.62	0.3
I_{amp} con fcd	[A]	-107.8				
	%	-30.2				
I_{amp} NOMINAL	[A]	-108.1				
	%	-30.29				
fc2a2d		0.93	0.87	0.95	0.95	0.6
I_{amp} con fc2a2d	[A]	-31				
	%	-8.69				
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-243.1				
	%	-68.11				
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	306.5	286.34	307.94	333.86	341.06
	%	85.88	80.23	86.28	93.54	95.56

I_{amp} es la misma para todos los AP de esta S/E, al igual que en las tablas anteriores I_{amp} disminuye al aumentar fc .

En la Tabla 3.42 se encuentra I_{amp} con RHO 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$].

Tabla 3.42. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes fc

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
fcd		0.73	0.68	0.58	0.62	0.3
I_{amp} con fcd[A]		428.89				
I_{amp} con fc 100% y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	356.9				
fc2a2d		0.93	0.87	0.95	0.95	0.6
I_{amp} con fc2a2d	[A]	350.55				
I_{amp} EN CYMCAP con fc 100%	[A]	320.29				
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	600				
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	50.4	70.56	48.96	23.04	15.84

La diferencia entre 320.29 [A] y los datos de la Tabla 3.42 se encuentran en la Tabla 3.43.

Tabla 3.43. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes fc vs. I_{amp} simulada con fc 100%

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} NOMINAL	[A]	-144.71				
	%	-45.18				
fcd		0.73	0.68	0.58	0.62	0.3
I_{amp} con fcd	[A]	-108.6				
	%	-33.91				
I_{amp} con fc 100% y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	-36.61				
	%	-11.43				
fc2a2d		0.93	0.87	0.95	0.95	0.6
I_{amp} con fc2a2d	[A]	-30.26				
	%	-9.45				
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-279.71				
	%	-87.33				
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	269.89	249.73	271.33	297.25	304.45
	%	84.26	77.97	84.71	92.81	95.05

$I_{m\acute{a}x}$ medida (ver ANEXO F) está dentro de los valores simulados. I_{amp} nominal (465 [A]) es superior en 45.18 % a I_{amp} al 100%.

La Tabla 3.44 es la diferencia de 356.9 [A] menos los datos de la Tabla 3.42.

Tabla 3.44. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes fc vs. I_{amp} simulada con $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ con fc 100%

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} NOMINAL	[A]	-108.1				
	%	-33.75				
fcd		0.73	0.68	0.58	0.62	0.3
I_{amp} CON fcd	[A]	-71.99				
	%	-20.17				
fc2a2d		0.93	0.87	0.95	0.95	0.6
I_{amp} CON fc2a2d	[A]	6.35				
	%	1.78				
I_{amp} fc 100%	[A]	36.61				
	%	10.26				
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-243.1				
	%	-68.11				
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	306.5	286.34	307.94	333.86	341.06
	%	85.88	80.23	86.28	93.54	95.56

I_{amp} fc2a2d difiere de I_{amp} a $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ en 1.78%.

La ampacidad disminuye cuando el factor de carga aumenta, el cambio de esta varía dependiendo de cada alimentador en cada S/E. La mayor ampacidad se obtiene con el factor de carga diario.

Según las simulaciones el factor de carga bajo puede provocar un aumento en la ampacidad de más de 107.8 [A] en la S/E 06 (ver Figura 3.3), debido a que 06 Z posee un fc de 0.3. Utilizar el factor de carga diario para un AP es un escenario optimista por lo que NEC recomienda utilizar el peor escenario; esto es con el 100 % del factor de carga. Se partió de la hipótesis de utilizar un valor intermedio a ambos principalmente en casos como los de la S/E 06 en las que uno o varios alimentadores difieren en fc , la variación con respecto a la ampacidad nominal de la Tabla 3.44 (465 [A]-320.29 [A]) es de 144.71 [A].

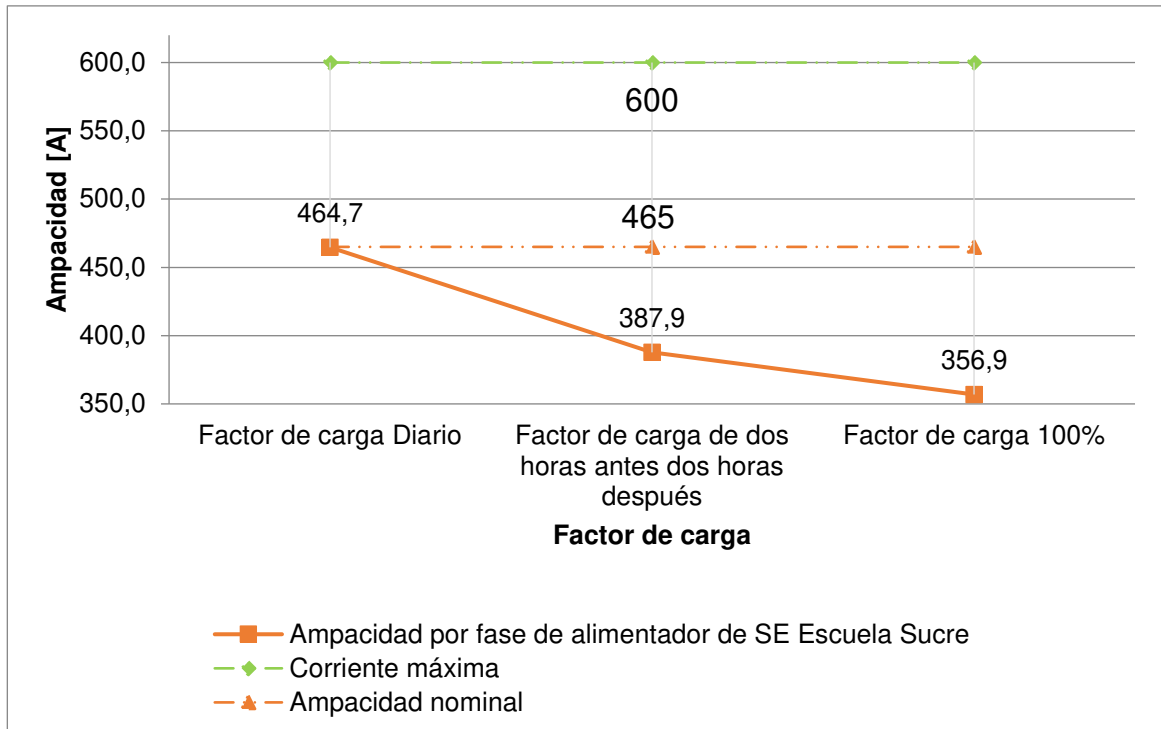


Figura 3.3. Datos de simulación S/E 06. Variación de Ampacidad vs. Factor de carga DIARIO

3.1.1.3 Caso 3 - Ampacidad vs. Altura

La altura (L) no es un parámetro variable en las S/E's 58, 29 y 06 pero se seleccionó este caso de estudio para visualizar los cambios en la ampacidad cuando L tiene su mínima distancia; según la Tabla 2.1 esta es 600 [mm] para BD en PVC de 22.8 [kV] y 450 [mm] para BD en PVC de 6.3 [kV]. L máxima para ductos de PVC es 750 [mm].

La Tabla 3.45 presenta las I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de la S/E 58 en donde 210 [mm] es L mínima permitida en CYMCAP y con la que se simuló I_{amp} al inicio de 693.1.1.

Tabla 3.45. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 a diferentes L

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} NOMINAL	[A]	465	325	465	465
I_{amp} L: 210 mm	[A]	418.8	253.8	417.3	376.6
I_{amp} CON 600 mm	[A]	390	235.1	388.6	348.9
I_{amp} CON 750 mm	[A]	382.65	230.4	381.3	342
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400			
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	140.87	81.6	190	3.57

En el ANEXO G se encuentra a detalle I_{amp} a diferentes alturas simuladas

La diferencia entre I_{amp} a L: [210 mm] menos los datos de la Tabla 3.45 se encuentra en la Tabla 3.46.

Tabla 3.46. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 a diferentes L vs. L: 210 mm

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} NOMINAL	[A]	-46.2	-71.2	-47.7	-88.4
	%	-11.03	-28.05	-11.4	-23.5
I_{amp} CON 600 mm	[A]	28.8	18.7	28.7	27.7
	%	6.88	7.37	6.88	7.36
I_{amp} CON 750 mm	[A]	36.15	23.4	36.05	34.6
	%	8.63	9.22	8.64	9.19
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	18.8	-146.2	17.3	-23.4
	%	4.489	-57.6	4.146	-6.21
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	277.93	172.2	227.3	373
	%	66.363	67.85	54.47	99.05

El aumento de RHO, al igual que en los casos anteriores provoca una disminuci3n en I_{amp} . Debido a 58B cada I_{amp} dentro del BD es diferente. La Tabla 3.47 resume las I_{amp} .

Tabla 3.47. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 con 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] a diferentes L

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} NOMINAL	[A]	465	325	465	465
I_{amp} CON L: 210 mm y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	418.8	253.8	417.3	376.6
I_{amp} CON 210 mm	[A]	385	227.6	383.4	336.9
I_{amp} CON 600 mm	[A]	355.4	208.6	353.9	308.6
I_{amp} CON 750 mm	[A]	348.1	204.1	346.6	301.9

RHO en 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] hace que I_{amp} disminuya, en la Tabla 3.48 se obtiene 42.79% de variaci3n con I_{amp} nominal. I_{amp} no debe cargarse a m\acute{a}s de 227.6 en 58 B; ning\un AP supera los 400 [A].

Tabla 3.48. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes L vs. L: 210 mm

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} NOMINAL	[A]	-80	-97.4	-81.6	-128
	%	-20.78	-42.79	-21.3	-38
I_{amp} CON L: 210 mm y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	-33.8	-26.2	-33.9	-39.7
	%	-8.77	-11.51	-8.84	-11.8
I_{amp} CON 600 mm	[A]	29.6	19	29.5	28.3
	%	7.6883	8.348	7.694	8.4
I_{amp} CON 750 mm	[A]	36.9	23.5	36.8	35
	%	9.58	10.33	9.598	10.39
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-15	-172.4	-16.6	-63.1
	%	-3.89	-75.75	-4.33	-18.7
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	244.13	146	193.4	333.3
	%	63.41	64.15	50.45	98.94

La Tabla 3.49 muestra una variaci3n de I_{amp} en 58 D de 10.54% inferior a I_{amp} con 210 mm y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$].

Tabla 3.49. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes L vs. I_{amp} L: 210 mm con RHO:0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} NOMINAL	[A]	-46.2	-71.2	-47.7	-88.4
	%	-11.03	-28.05	-11.43	-23.47
I_{amp} CON 210 mm	[A]	33.8	26.2	33.9	39.7
	%	8.07	10.32	8.12	10.54
I_{amp} CON 600 mm	[A]	63.4	45.2	63.4	68
	%	15.14	17.81	15.19	18.06
I_{amp} CON 750 mm	[A]	70.7	49.7	70.7	74.7
	%	16.88	19.58	16.94	19.84

El P1 de la S/E 29 se encuentra a 600 [mm] del suelo por lo que esta ampacidad es la misma que la mínima permitida según NEC en la Tabla 3.50 se resume las simulaciones a diferentes L del ANEXO H.

Tabla 3.50. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 a diferentes L

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	325	
I_{amp} CON 600 mm	[A]	288.9	
I_{amp} CON 750 mm	[A]	284.9	
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	68.09	222.7

Se observa que en la Tabla 3.51 I_{amp} nominal es superior por 36.1 [A]

Tabla 3.51. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 a diferentes L vs. L: 600 mm

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-36.1	
	%	-12.50	
I_{amp} CON 750 mm	[A]	4	
	%	1.38	
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-111.1	
	%	-38.46	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	220.81	66.17
	%	76.43	22.90

$I_{m\acute{a}x}$ medida se encuentra dentro de las ampacidades simuladas, 29 B puede aumentar 220.81 [A] y 29 C puede aumentar 66.17 [A].

La Tabla 3.52 señala una disminución en I_{amp} cuando RHO aumenta junto con I_{amp} nominal (según MERNNR).

Tabla 3.52. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes L

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	325	
I_{amp} CON L: 600 mm y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	288.9	
I_{amp} CON 600 mm	[A]	264.5	
I_{amp} CON 750 mm	[A]	260.4	

I_{amp} nominal es superior en 60.5 [A] a la ampacidad simulada con L 600 mm las variaciones presentadas en la Tabla 3.53 muestran un porcentaje de 51.23 respecto a $I_{m\acute{a}x}$ en TC mientras que con RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$] no supera el 38.46%

Tabla 3.53. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes L vs. L: 600 mm

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-60.5	
	%	-22.87	
I_{amp} CON L: 600 mm y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	-24.4	
	%	-9.22	
I_{amp} CON 750 mm	[A]	4.1	
	%	1.55	
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-135.5	
	%	-51.23	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	196.41	41.77
	%	74.26	15.79

La Tabla 3.54 indica variaciones de ampacidad bajos al comparar I_{amp} con L 600 [mm] y a RHO: 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$].

Tabla 3.54. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes L vs. I_{amp} L: 600 mm con $RHO:0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-36.1	
	%	-12.50	
I_{amp} CON 600 mm	[A]	24.4	
	%	8.45	
I_{amp} CON 750 mm	[A]	28.5	
	%	9.87	

En la Tabla 3.55 se encuentran las ampacidades con L del P2 (360 [mm]) de la S/E junto con I_{amp} a mínima y máxima altura.

Tabla 3.55. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 a diferentes L

AP		29 A	29 D
MCM		250	250
I_{amp} NOMINAL	[A]	325	325
I_{amp} L: 360 mm	[A]	293.6	361.6
I_{amp} CON 600 mm	[A]	283.8	349.7
I_{amp} CON 750 mm	[A]	279.15	344.1
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	147.66	172.2

Se simuló I_{amp} en el ANEXO I desde 360 [mm] hasta 750 [mm]

La Tabla 3.56 muestra las variaciones con I_{amp} L: 360 [mm].

Tabla 3.56. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 a diferentes L vs.

I_{amp} L: 360 mm

AP		29 A	29 D
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-31.4	36.6
	%	-10.69	10.12
I_{amp} CON 600 mm	[A]	9.8	11.9
	%	3.34	3.29
I_{amp} CON 750 mm	[A]	14.45	17.5
	%	4.92	4.84
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-106.4	-38.4
	%	-36.24	-10.62
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	145.94	189.45
	%	49.71	52.39

I_{amp} a 750 [mm] no supera el 4.92 % de variaci3n, pero I_{amp} nominal es superior a las simuladas.

La Tabla 3.57 indica I_{amp} inferiores a los de la Tabla 3.55.

Tabla 3.57. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 con 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] a diferentes L

AP		29 A	29 D
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	325	
I_{amp} CON L: 360 mm y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	293.6	361.6
I_{amp} CON 360 mm	[A]	269.39	332.1
I_{amp} CON 600 mm	[A]	259.18	319.78
I_{amp} CON 750 mm	[A]	254.5	314.1

La Tabla 3.58 es la variaci3n de I_{amp} con L 360 [mm] con los datos de la Tabla 3.57

Tabla 3.58. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes L vs. I_{amp} L: 360 mm

AP		29 A	29 D
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-55.61	7.1
	%	-20.64	2.14
I_{amp} CON L: 360 mm y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	-24.21	-29.5
	%	-8.99	-8.88
I_{amp} CON 600 mm	[A]	10.21	12.32
	%	3.79	3.71
I_{amp} CON 750 mm	[A]	14.89	18
	%	5.53	5.42
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-130.61	-67.9
	%	-48.48	-20.45
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	121.73	159.95
	%	45.19	48.16

$I_{m\acute{a}x}$ medida se encuentra dentro de los valores simulados por lo que 29 A puede aumentar 121.73 [A] en su carga y 29 D dispone de 159.95 [A] adicionales.

La Tabla 3.59 ejemplifica que el aumento de RHO con L produce una variaci3n del 13.32% en 29 A siendo 293.6 [A] lo simulado inicialmente y llegando a los 254.5 [A] cuando L es 750 [mm]

Tabla 3.59. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes L vs. I_{amp} L: 360 mm con RHO:0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]

AP		29 A	29 D
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-31.4	36.6
	%	-10.69	10.12
I_{amp} CON L: 360 mm	[A]	24.21	29.5
	%	8.25	8.16
I_{amp} CON 600 mm	[A]	34.42	41.82
	%	11.72	11.57
I_{amp} CON 750 mm	[A]	39.1	47.5
	%	13.32	13.14

El BD de S/E 06 se encuentra a 400 [mm] por lo que se simuló I_{amp} desde esta L hasta el máximo permitido de 750 [mm] (ver ANEXO J). La Tabla 3.60 muestra las I_{amp} bajo estas condiciones y con el mínimo permitido de 450 [mm].

Tabla 3.60. Valores de I_{amp} y $I_{máx}$ de S/E 06 a diferentes L

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} NOMINAL	[A]	465				
I_{amp} CON 400 mm	[A]	356.9				
I_{amp} CON 450 mm	[A]	352.6				
I_{amp} CON 750 mm	[A]	332.7				
$I_{máx}$ EN TC	[A]	600				
$I_{máx}$ MEDIDA	[A]	50.4	70.56	48.96	23.04	15.84

La Tabla 3.61 señala una diferencia de 108.1 [A] respecto a I_{amp} con 400 [mm] y no supera el 6.78% al aumenta L a 750 [mm].

Tabla 3.61. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{máx}$ de S/E 06 a diferentes L vs. L: 400 mm

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} NOMINAL	[A]	-108.1				
	%	-30.29				
I_{amp} CON 450 mm	[A]	4.3				
	%	1.20				
I_{amp} CON 750 mm	[A]	24.2				
	%	6.78				
$I_{máx}$ EN TC	[A]	-243.1				
	%	-68.11				
$I_{máx}$ MEDIDA	[A]	306.5	286.34	307.94	333.86	341.06
	%	85.88	80.23	86.28	93.54	95.56

I_{amp} con Rho 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] de la Tabla 3.62 es inferior a la ampacidad con RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$].

Tabla 3.62. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 con 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] a diferentes L

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} NOMINAL	[A]	465				
I_{amp} CON L: 400 mm y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	356.9				
I_{amp} CON 400 mm	[A]	320.29				
I_{amp} CON 450 mm	[A]	316.1				
I_{amp} CON 750 mm	[A]	296.7				

La Tabla 3.63 es la diferencia entre 320.29 [A] y los datos de la Tabla 3.62.

Tabla 3.63. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 con 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] a diferentes L vs. L: 400 mm

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} NOMINAL	[A]	-144.71				
	%	-45.18				
I_{amp} CON L: 400 mm y RHO 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	-36.61				
	%	-11.43				
I_{amp} CON 450 mm	[A]	4.19				
	%	1.308				
I_{amp} CON 750 mm	[A]	23.59				
	%	7.37				
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-279.71				
	%	-87.33				
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	269.89	249.73	271.33	297.25	304.45
	%	84.26	77.97	84.71	92.81	95.05

En este caso I_{amp} nominal es superior a la simulada en 144.71 [A] a diferencia de los 108.1 de I_{amp} con $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$. La menor ampacidad ocurre cuando L es 750 [mm]. Cada AP puede soportar más de 200 [A] de los medidos en el ANEXO F ($I_{m\acute{a}x}$ medida)

La Tabla 3.64 coteja I_{amp} a 400 [mm] y RHO $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ con I_{amp} a diferentes alturas y RHO: $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$.

Tabla 3.64. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a diferentes L vs. L: 400 mm con RHO: $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} CON L: 400 mm	[A]	36.61				
	%	10.26				
I_{amp} CON 450 mm	[A]	40.8				
	%	11.43				
I_{amp} CON 750 mm	[A]	60.2				
	%	16.87				

El aumento en L y RHO del BD provoca una disminución máxima de 144.71 [A] entre la capacidad de corriente máxima según el MERNNR vs. I_{amp} con L de la S/E 06 (ver Tabla 3.63 y Figura 3.4) y aunque aparentemente una menor altura aumenta la ampacidad del BD se debe seguir las normas del NEC, especialmente en zonas pobladas y transitadas o lejanas al punto de conexión aéreo-subterráneo (Ver Tabla 2.1.); en caso de encontrarse en zonas diferentes a las descritas en el NEC se recomienda que L mínima sea 210 [mm], caso contrario no podrá ser simulada en CYMCAP.

La Figura 3.5 muestra I_{amp} diferentes para cada AP. Cuando L es 0.2 [mm]; 58 A y 58C pueden conducir 400 [A] sin necesidad de que esto afecte al cable, el AP 58 B no debe sobrepasar 254.5 [A] y 58 D los 377.7 [A].

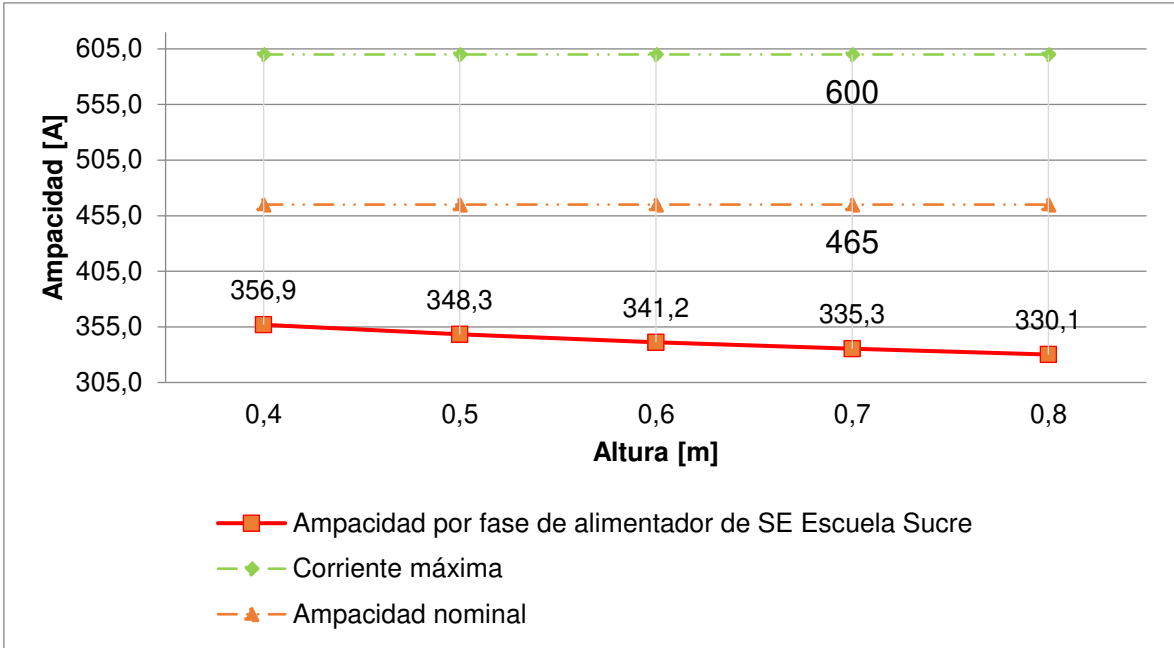


Figura 3.4. Datos de simulación S/E 06. Variación de Ampacidad vs. Altura

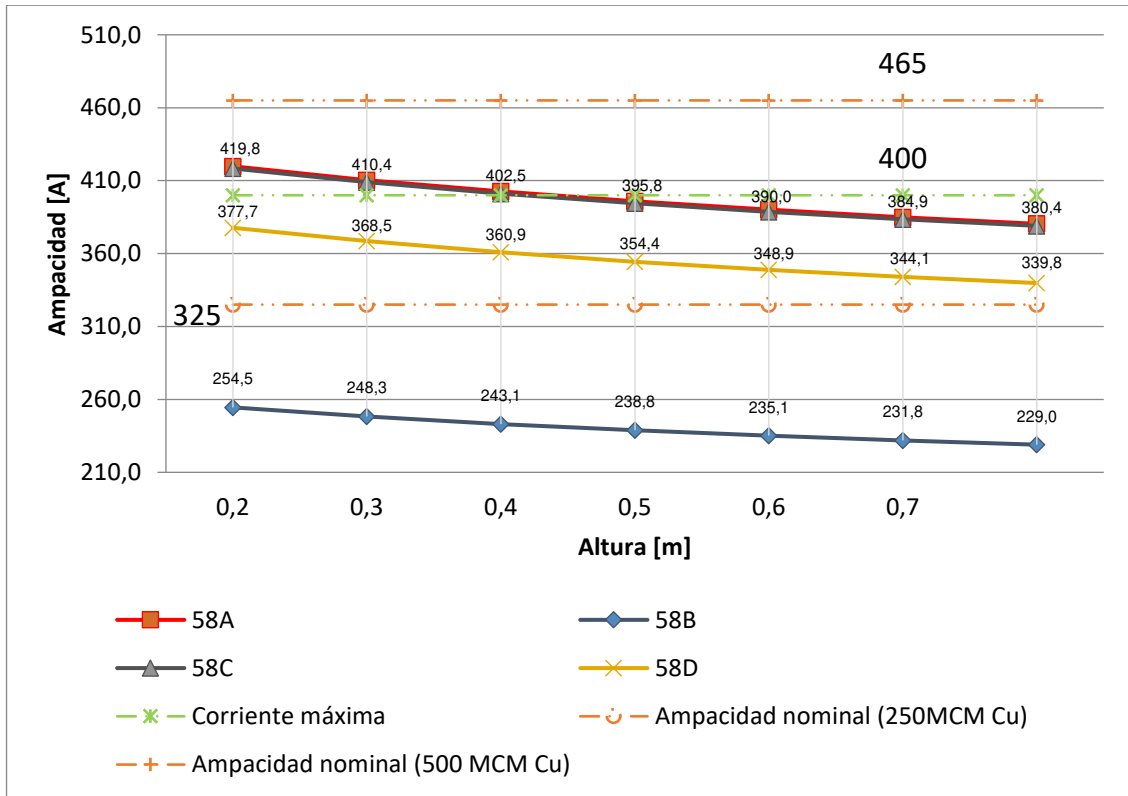


Figura 3.5. Datos de simulación S/E 58. Variación de Ampacidad vs. Altura

3.1.1.4 Caso 4 - Ampacidad vs. Temperatura

Al realizar las variaciones de temperatura en cada S/E se observa que la ampacidad disminuye aproximadamente 2 [A] por cada grado elevado.

De acuerdo con el INHAMI [24], la temperatura ambiente del Quinche varía en rangos desde 10 °C hasta 24 °C. Cumbayá tiene un rango de temperatura superior al de Quito, por lo que el rango de simulación es de 11 °C a 25 °C y dentro de Quito para la S/E 06 varía de 7 a 21 °C. En el pozo 2 de la S/E 29, el AP 29D supera I_{amp} esperada según NEC [1] debido a la colocación de un cable por ducto (ver Figura 2.7).

La Tabla 3.65 muestra I_{amp} a T mínima, máxima y a 20 °C.

Tabla 3.65. Valores de I_{amp} y $I_{máx}$ en S/E 58 a diferentes T

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} NOMINAL	[A]	465	325	465	465
I_{amp} CON 10 °C	[A]	447.2	271.33	445.6	402.71
I_{amp} CON 20 °C	[A]	418.8	253.8	417.3	376.6
I_{amp} CON 24 °C	[A]	406.8	246.47	405.4	365.67
$I_{máx}$ EN TC	[A]	400	400	400	400
$I_{máx}$ MEDIDA	[A]	140.87	81.6	189.98	3.57

La Tabla 3.66 coteja I_{amp} nominal (según MERNNR), T mínima y máxima junto con $I_{máx}$ medida y de TC con I_{amp} simulada en CYMCAP con los datos establecidos en NEC.

Tabla 3.66. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{máx}$ en S/E 58 a diferentes T vs. I_{amp} con T: 20 °C

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} NOMINAL	[A]	-46.2	-71.2	-47.7	-88.4
	[%]	-11.03	-28.05	-11.431	-23.47
I_{amp} CON 10 °C	[A]	-28.4	-17.53	-28.3	-26.11
	[%]	-6.78	-6.91	-6.78	-6.93
I_{amp} CON 24 °C	[A]	12	7.33	11.9	10.93
	[%]	2.87	2.89	2.85	2.9
$I_{máx}$ EN TC	[A]	18.8	-146.2	17.3	-23.4
	[%]	4.49	-57.6	4.15	-6.21
$I_{máx}$ MEDIDA	[A]	277.93	172.2	227.32	373.03
	[%]	66.36	67.85	54.47	99.05

A continuación, en la Tabla 3.67 se presenta la variación de corriente máxima con respecto a la temperatura cuando la resistividad térmica es $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$

Tabla 3.67. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 a diferentes T con RHO: $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$

AP		58A	58B	58C	58D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} nominal	[A]	465	325	465	465
I_{amp} CON $20^{\circ}C$ y $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$	[A]	418.8	253.8	417.3	376.6
I_{amp} CON $10^{\circ}C$	[A]	410.3	242.7	408.6	359.2
I_{amp} CON $20^{\circ}C$	[A]	384	226.9	382.4	335.8
I_{amp} CON $24^{\circ}C$	[A]	372.9	220.3	371.4	326

I_{amp} disminuye cuando T y RHO aumenta.

Los porcentajes de variación de I_{amp} la Tabla 3.68 son superiores a los de la Tabla 3.66 pero el valor de ampacidad disminuye por lo que % de $I_{m\acute{a}x}$ medida es inferior en aproximadamente 3% para 58 A, 58B y 58 C. 58D se encuentra sobredimensionado.

Tabla 3.68. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 58 a diferentes T con RHO: $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ vs. I_{amp} con T: $20^{\circ}C$

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} NOMINAL	[A]	-81	-98.1	-82.6	-129.2
	[%]	-21.09	-43.23	-21.60	-38.48
I_{amp} CON $20^{\circ}C$ y $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$	[A]	-34.8	-26.9	-34.9	-40.8
	[%]	-9.06	-11.86	-9.13	-12.15
I_{amp} CON $10^{\circ}C$	[A]	-26.3	-15.8	-26.2	-23.4
	[%]	-6.85	-6.96	-6.85	-6.97
I_{amp} CON $24^{\circ}C$	[A]	11.1	6.6	11	9.8
	[%]	2.89	2.91	2.88	2.92
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-16	-173.1	-17.6	-64.2
	[%]	-4.17	-76.29	-4.60	-19.12
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	243.13	145.3	192.42	332.23
	[%]	63.32	64.04	50.32	98.94

La Tabla 3.69 compara I_{amp} simulada con los datos establecidos en NEC vs. I_{amp} de la Tabla 3.67. con T: 24 °C 58 D es 326 [A] lo cual difiere en 50.6 [A] a I_{amp} 376.6 [A]

Tabla 3.69. Comparativa de valores de I_{amp} de S/E 58 a diferentes T con RHO: 1.2 [°C · m/W] vs. I_{amp} con T: 20 °C vs. I_{amp} con T: 20 °C y RHO: 0.9 [°C · m/W]

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} CON 10 °C	[A]	8.5	11.1	8.7	17.4
	[%]	2.03	4.37	2.08	4.62
I_{amp} CON 20 °C	[A]	34.8	26.9	34.9	40.8
	[%]	8.31	10.60	8.36	10.83
I_{amp} CON 24 °C	[A]	45.9	33.5	45.9	50.6
	[%]	10.96	13.20	11.00	13.44

La Tabla 3.70 contiene I_{amp} tanto de B como de C en las principales variaciones de T.

Tabla 3.70. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 29, P1 a diferentes T

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	325	
I_{amp} CON 11 °C	[A]	306.8	
I_{amp} CON 20 °C	[A]	288.9	
I_{amp} CON 25 °C	[A]	278.5	
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400	400
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	68.09	222.73

Las variaciones de I_{amp} de la Tabla 3.71 son mostradas tanto en [A] como en %.

Tabla 3.71. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 29, P1 a diferentes T vs. I_{amp} con T: 20 °C

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-36.1	
	[%]	-12.49	
I_{amp} CON 10 °C	[A]	-17.9	
	[%]	-6.19	
I_{amp} CON 24 °C	[A]	10.4	
	[%]	3.59	
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-111.1	
	[%]	-38.46	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	220.81	66.17
	[%]	76.43	22.9

La variaci3n de I_{amp} con 24 °C no supera los 10.4 [A]

La Tabla 3.72 coteja la disminuci3n de I_{amp} cuando RHO y T aumentan, siendo el peor escenario 25 °C.

Tabla 3.72. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 a diferentes T con RHO: 1.2 [°C · m/W]

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} nominal	[A]	325	
I_{amp} CON 20 °C y 0.9 [°C · m/W]	[A]	288.9	
I_{amp} CON 11 °C	[A]	281.1	
I_{amp} CON 20 °C	[A]	264.5	
I_{amp} CON 25 °C	[A]	255	

La Tabla 3.73 muestra que el porcentaje de diferencia entre 264.5 y I_{amp} a T m3nima y T m3xima es similar al simulado con RHO: 0.9 [°C · m/W]

Tabla 3.73. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P1 a diferentes T con RHO: 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] vs. I_{amp} con T: 20 $^{\circ}C$

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-60.5	
	[%]	-22.87	
I_{amp} CON 20 $^{\circ}C$ y 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	-24.4	
	[%]	-9.22	
I_{amp} CON 10 $^{\circ}C$	[A]	-16.6	
	[%]	-6.28	
I_{amp} CON 24 $^{\circ}C$	[A]	9.5	
	[%]	3.59	
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-135.5	
	[%]	-51.23	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	196.41	41.77
	[%]	74.26	15.79

29B permitirá 196.41 [A] adicionales, mientras que 29C solo 41.77 [A].

La Tabla 3.74 en el peor escenario de 24 $^{\circ}C$ coteja una variación de 11.73% respecto a I_{amp} simulada con datos de NEC.

Tabla 3.74. Comparativa de valores de I_{amp} de S/E 29, P1 a diferentes T con RHO: 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] vs. I_{amp} con T: 20 $^{\circ}C$ vs. I_{amp} con T: 20 $^{\circ}C$ y RHO: 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} CON 10 $^{\circ}C$	[A]	7.8	
	[%]	2.70	
I_{amp} CON 20 $^{\circ}C$	[A]	24.4	
	[%]	8.45	
I_{amp} CON 24 $^{\circ}C$	[A]	33.9	
	[%]	11.73	

En la Tabla 3.75 se observa diferente I_{amp} para A como para D, para mayor detalle ver ANEXO I.

Tabla 3.75. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 29, P2 a diferentes T

AP		29 A	29 D
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	325	
I_{amp} CON 11 °C	[A]	311.6	383.8
I_{amp} CON 20 °C	[A]	293.6	361.6
I_{amp} CON 25 °C	[A]	283.1	348.6
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400	400
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	147.66	172.15

Los AP no soportan una corriente de 400 [A], $I_{m\acute{a}x}$ se encuentra dentro de los datos simulados.

La Tabla 3.76 coteja I_{amp} mínima y máxima de la S/E 29, P2, dentro de la cuál el porcentaje de variación es 6.14% y 3.6% respectivamente.

Tabla 3.76. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 29, P2 a diferentes T vs. I_{amp} con T: 20 °C

AP		29 A	29 D
MCM		250	
I_{amp} NOMINAL	[A]	-31.4	36.6
	[%]	-10.69	10.12
I_{amp} CON 10 °C	[A]	-18	-22.2
	[%]	-6.13	-6.14
I_{amp} CON 24 °C	[A]	10.5	13
	[%]	3.58	3.60
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-106.4	-38.4
	[%]	-36.24	-10.62
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	145.94	189.45
	[%]	49.71	52.39

La Tabla 3.77 muestra ampacidades inferiores a la Tabla 3.75.

Tabla 3.77. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 a diferentes T con RHO: 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$]

AP		29 A	29 D
MCM		250	250
I_{amp} nominal	[A]	325	325
I_{amp} CON 20 $^{\circ}C$ y 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	293.6	361.6
I_{amp} CON 11 $^{\circ}C$	[A]	286.03	352.66
I_{amp} CON 20 $^{\circ}C$	[A]	269.4	332.1
I_{amp} CON 25 $^{\circ}C$	[A]	259.65	320.02

I_{amp} con 25 $^{\circ}C$ es el peor escenario de la tabla anterior.

La Tabla 3.78 contiene variaciones de I_{amp} inferiores a las de la Tabla 3.75. El % a T mínima y a T máxima es prácticamente el mismo.

Tabla 3.78. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 29, P2 a diferentes T con RHO: 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] vs. I_{amp} con T: 20 $^{\circ}C$

AP		29 A	29 D
MCM		250	250
I_{amp} NOMINAL	[A]	-55.6	7.1
	[%]	-20.64	2.14
I_{amp} CON 20 $^{\circ}C$ y 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	-24.2	-29.5
	[%]	-8.98	-8.88
I_{amp} CON 10 $^{\circ}C$	[A]	-16.63	-20.56
	[%]	-6.17	-6.19
I_{amp} CON 24 $^{\circ}C$	[A]	9.75	12.08
	[%]	3.62	3.64
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-130.6	-67.9
	[%]	-48.48	-20.45
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	121.74	159.95
	[%]	45.19	48.16

La Tabla 3.79 no supera el 11.56% de variación respecto a I_{amp} .

Tabla 3.79. Comparativa de valores de I_{amp} de S/E 29, P2 a diferentes T con RHO: 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] vs. I_{amp} con T: 20 $^{\circ}C$ vs. I_{amp} con T: 20 $^{\circ}C$ y RHO: 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]

AP		29 A	29 D
MCM		250	250
I_{amp} CON 10 $^{\circ}C$	[A]	7.57	8.94
	[%]	2.58	2.47
I_{amp} CON 20 $^{\circ}C$	[A]	24.2	29.5
	[%]	8.24	8.16
I_{amp} CON 24 $^{\circ}C$	[A]	33.95	41.58
	[%]	11.56	11.50

La Tabla 3.80 resume la simulación a diferente T del ANEXO J, la temperatura mínima en esta S/E es 7 $^{\circ}C$ mientras que la máxima 21 $^{\circ}C$.

Tabla 3.80. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 06 a diferentes T

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} NOMINAL	[A]	465				
I_{amp} CON 7 $^{\circ}C$	[A]	388.8				
I_{amp} CON 20 $^{\circ}C$	[A]	356.9				
I_{amp} CON 21 $^{\circ}C$	[A]	354.3				
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	600	600	600	600	600
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	50.4	70.56	48.96	23.04	15.84

La Tabla 3.81 muestra las variaciones en % y [A] dentro de la S/E 06, debido a la disposición del BD son iguales para cada AP.

Tabla 3.81. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ en S/E 06 a diferentes T vs. I_{amp} con T: 20 °C

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} NOMINAL	[A]	-108.1				
	[%]	-30.29				
I_{amp} CON 10 °C	[A]	-31.9				
	[%]	-8.94				
I_{amp} CON 24 °C	[A]	2.6				
	[%]	0.73				
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-243.1				
	[%]	-68.11				
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	306.5	286.34	307.94	333.86	341.06
	[%]	85.88	80.23	86.28	93.54	95.56

La Tabla 3.82 sigue los resultados esperados siendo menor I_{amp} al aumentar RHO a 1.2 [°C · m/W]

Tabla 3.82. Valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 a diferentes T con RHO: 1.2 [°C · m/W]

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} nominal	[A]	465				
I_{amp} CON 20 °C y 0.9 [°C · m/W]	[A]	356.9				
I_{amp} CON 7 °C	[A]	349.08				
I_{amp} CON 20 °C	[A]	320.29				
I_{amp} CON 21 °C	[A]	317.98				

La Tabla 3.83 muestra que cada AP puede soportar más de 240 [A] de la $I_{m\acute{a}x}$ encontrada (ver ANEXO F)

Tabla 3.83. Comparativa de valores de I_{amp} y $I_{m\acute{a}x}$ de S/E 06 a diferentes T con RHO: 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] vs. I_{amp} con T: 20 $^{\circ}C$

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} NOMINAL	[A]	-144.71				
	[%]	-45.18				
I_{amp} CON 20 $^{\circ}C$ y 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	-36.61				
	[%]	-11.43				
I_{amp} CON 10 $^{\circ}C$	[A]	-28.79				
	[%]	-8.99				
I_{amp} CON 24 $^{\circ}C$	[A]	2.31				
	[%]	0.72				
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	-279.71				
	[%]	-87.33				
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	269.89	249.73	271.33	297.25	304.45
	[%]	84.26	77.97	84.71	92.81	95.05

La Tabla 3.84 contiene como peor escenario I_{amp} con T: 24 $^{\circ}C$ siendo esta variación de 38.92 [A]

Tabla 3.84. Comparativa de valores de I_{amp} de S/E 06 a diferentes T con RHO: 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$] vs. I_{amp} con T: 20 $^{\circ}C$ vs. I_{amp} con T: 20 $^{\circ}C$ y RHO: 0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$]

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} CON 10 $^{\circ}C$	[A]	7.82				
	[%]	2.19				
I_{amp} CON 20 $^{\circ}C$	[A]	36.61				
	[%]	10.26				
I_{amp} CON 24 $^{\circ}C$	[A]	38.92				
	[%]	10.91				

Se observa que debido al AP 58 B, la variación de I_{amp} es distinta para cada cable, mientras que en la S/E 06 a pesar de constar de 5 AP la ampacidad es la misma.

Los cables del pozo 1 de la S/E 29 con las condiciones definidas al inicio de 3.1 posee una ampacidad estimada menor a la esperada según el MERNNR debería ser 325 [A] (ver ANEXO C), pero al dirigirse al NEC en la misma Tabla 2.2., con un BD de dos filas por dos

columnas y dos alimentadores se observa que la ampacidad estimada es de 260 [A]. La ampacidad en la subestación según la simulación es de 278.5 [A] en 25 °C. El alimentador C transporta un máximo de 222 [A] y el alimentador B 68 [A], en consonancia con los datos de corrientes del ANEXO E. A continuación, se muestran las Figuras: Figura 3.6, Figura 3.7 y Figura 3.8 como ejemplo de la variación de ampacidad a diferentes temperaturas:

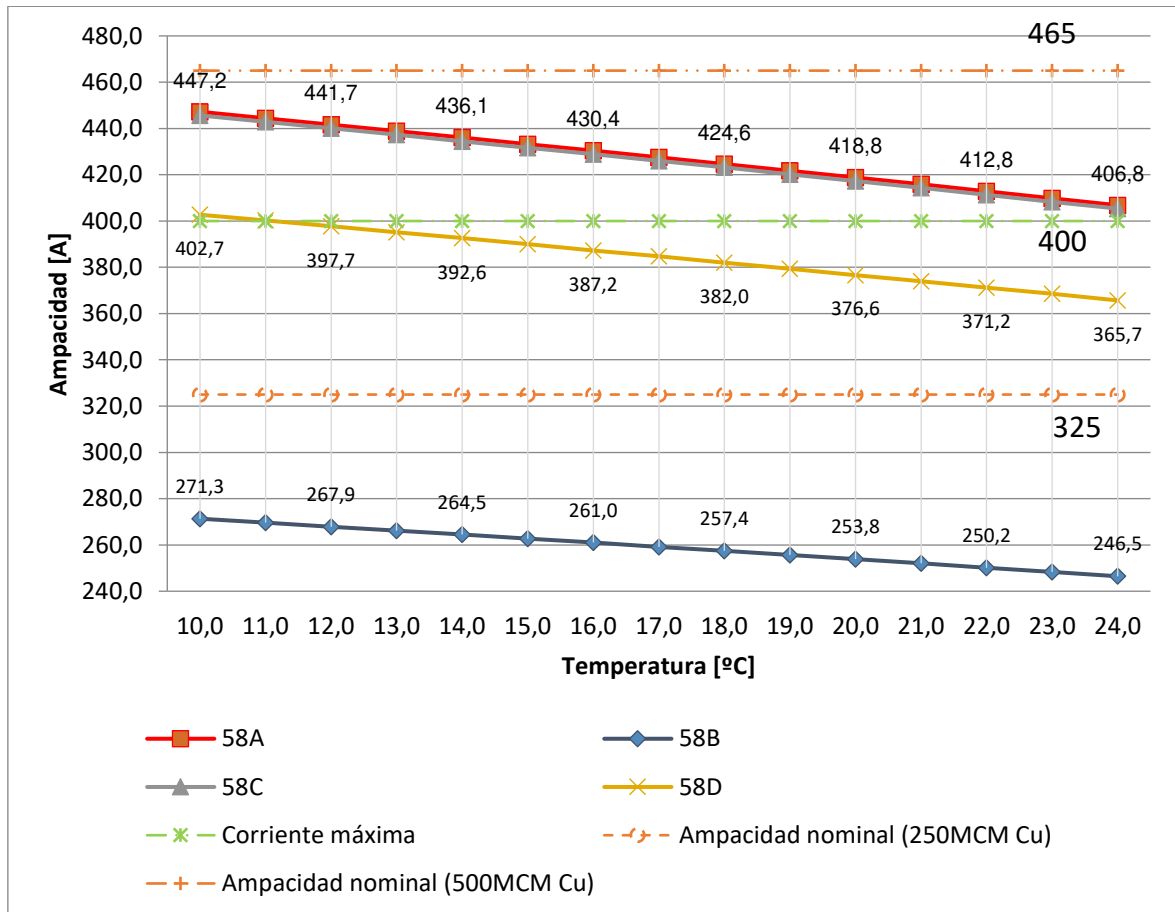


Figura 3.6. Datos de simulación S/E 58. Variación de Ampacidad vs. Temperatura

Cada uno de los conductores tiene una variación de ampacidad diferente (ver Figura 2.9), lo cual se debe a que el alimentador B es de 250 MCM y genera una transferencia de calor distinta a la de los alimentadores de 500 MCM. Los alimentadores A y C al encontrarse en las esquinas de los bancos de ductos tienen una ampacidad similar que supera los 400 [A], el alimentador D es afectado por la transferencia de calor entre B y C disminuyendo su ampacidad por debajo de los 400 [A]. La ampacidad simulada está dentro de los rangos permitidos del transformador de corriente (TC). El alimentador B no debe ser sobrecargado.

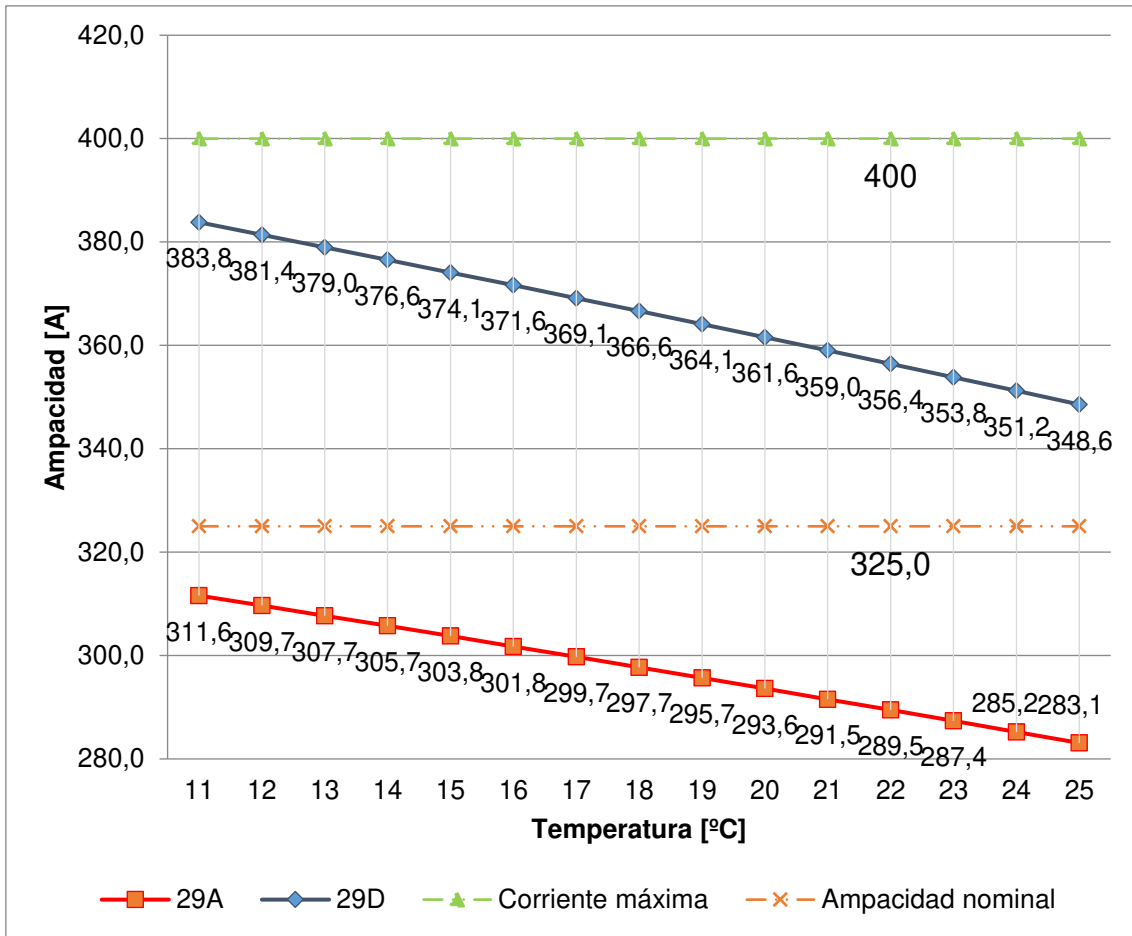


Figura 3.7. Datos de simulación S/E 29. Pozo 2. Variación de Ampacidad vs. Temperatura

En la Figura 3.7, el valor de corriente máxima es de 400 [A] y el esperado, según el MERNNR, es 325 [A]. Los datos simulados de ampacidad de 29 D son superiores a 29 A en aproximadamente 70 [A]. La disposición individual de 29 D (ver Figura 2.11), en la que cada fase del alimentador ocupa un BD le permite ampliar el rango de ampacidad sobre los 348 [A], mientras la ampacidad del alimentador 29 A llega a un máximo de 311 [A]. Los rangos de ampacidad están dentro de los valores esperados.

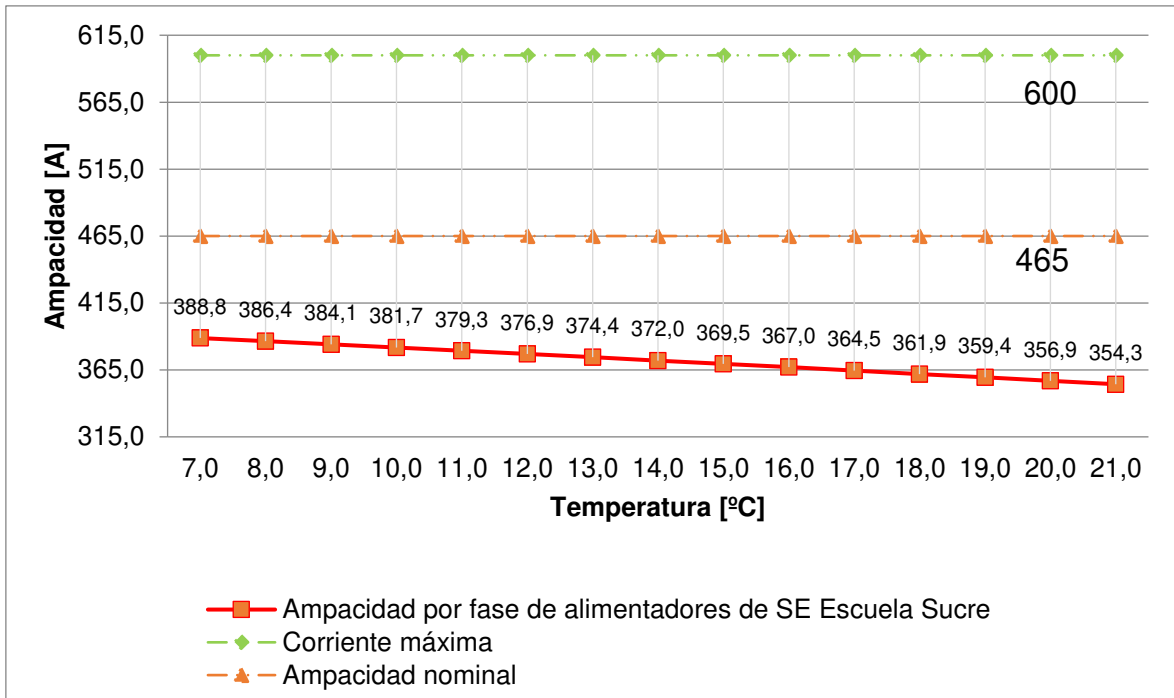


Figura 3.8. Datos de simulación S/E 06. Variación de Ampacidad vs. Temperatura

La corriente máxima permitida por el transformador de corriente en la S/E 06 es de 600 [A], según las especificaciones del MERNNR es de 465 [A] (ver ANEXO C), pero el valor obtenido varía entre 388.8 [A] hasta 354.3 [A]; la S/E posee 5 AP. (ver Figura 2.12).

Las configuraciones de AP encontradas en cada S/E son diferentes a las de la Figura 2.2, por lo que los datos del ANEXO C discrepan de los simulados. La Tabla 2.2 puede servir de guía si se evalúa hasta 6 AP. Dentro de una configuración similar a la Figura 2.2.

Adicional a lo anterior, se encontraron subestaciones que no cumplían las condiciones de diseño para ser simuladas por CYMCAP, de manera que a continuación se muestran las configuraciones a evitar dentro de un BD:

3.1.2 CASOS ATÍPICOS DE CONFIGURACIONES DE BANCOS DE DUCTOS

Los siguientes bancos de ductos no fueron simulados en CYMCAP, por no cumplir con los requerimientos mínimos de un BD disponible en el módulo básico de CYMCAP.

3.1.2.1 Subestación Río Coca (S/E 16)

La S/E 16 es parte de la introducción del presente proyecto, la Figura 3.9. fue tomada en junio del 2018 y corresponde a un BD de concreto de 4" con siete alimentadores de 4/0 AWG, en donde el primer ducto de la primera fila de izquierda a derecha está ocupado por dos cables correspondientes al alimentador E.

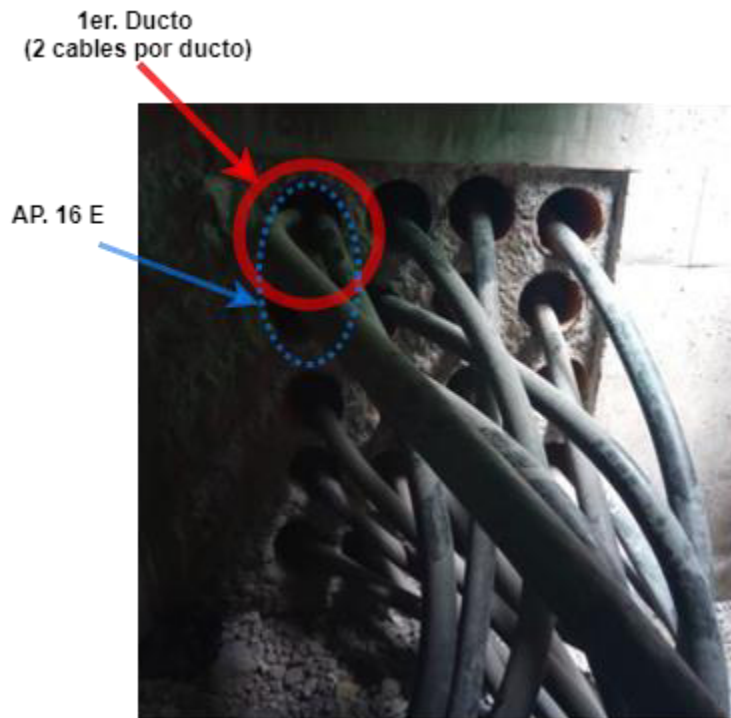


Figura 3.9. BD S/E 16. Año 2018 [25]

En este caso se observa que debido al crecimiento de la carga se comienza a desordenar la ubicación de los AP.

Se realizó la simulación en CYMCAP con una RHO de $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ a $23 ^{\circ}C$ y los resultados fueron los siguientes:

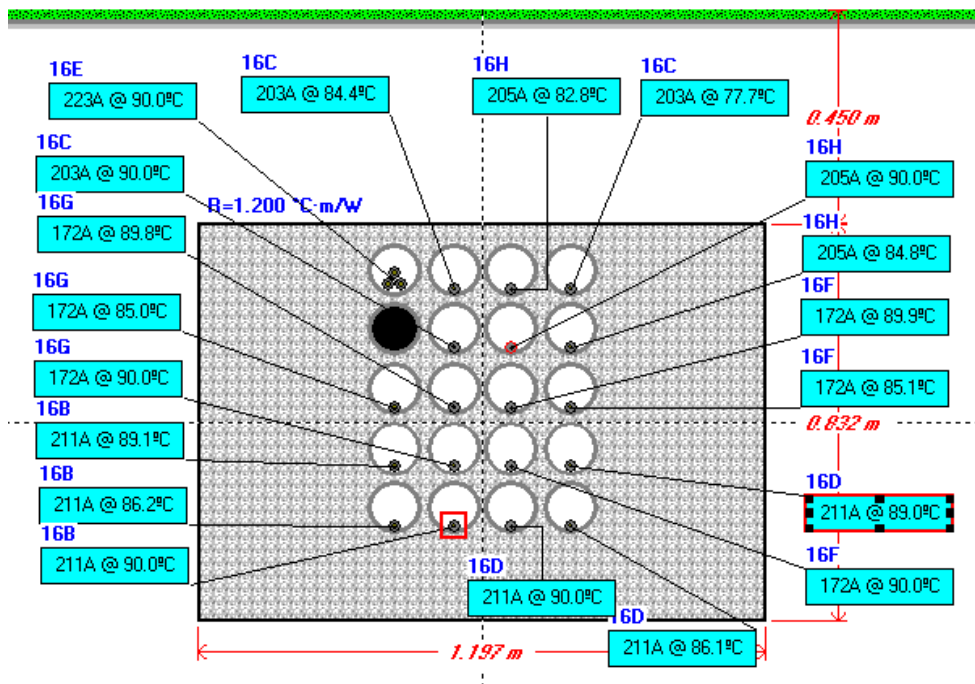


Figura 3.10. Ampacidad simulada de S/E 16 con 4/0 AWG. Año 2018

La simulación corresponde a la ampacidad máxima del BD con siete alimentadores primarios, pero la disposición del alimentador E no corresponde a la realidad, porque en CYMCAP no es posible colocar dos fases del alimentador primario en el primer ducto y una en el inferior. A pesar de esta diferencia, se observa que la ampacidad máxima es 223 [A] en el alimentador E y la mínima es de 172 [A] para G y F.

Las corrientes transportadas por los alimentadores fueron superiores, por lo que se presentaron problemas con la temperatura. En este mes se informa sobre temperaturas elevadas en el alimentador H la carga en ese instante fue de 370 [A]. En julio del mismo año se aumenta la configuración de los alimentadores primarios a 750 MCM con la misma configuración de la Figura 3.10. Al realizar la simulación las tres fases del alimentador E no caben en el primer ducto.

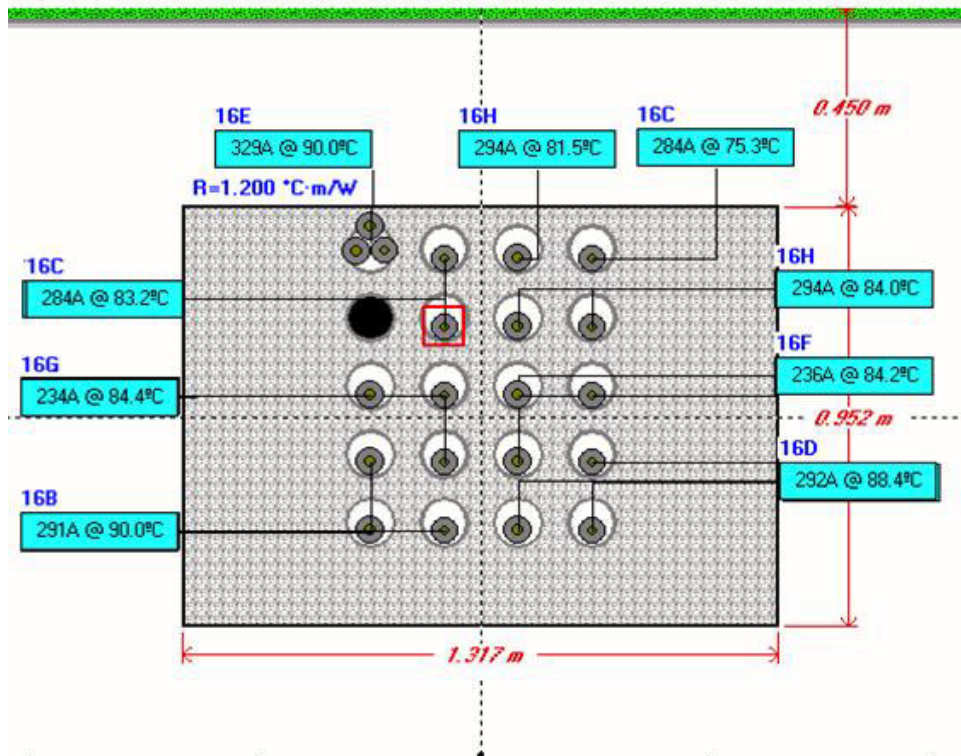


Figura 3.11. Ampacidad simulada de S/E 16 con 750 MCM. Año 2018

En septiembre se realizó transferencia de carga entre los alimentadores F y H con 190 [A] y 150 [A] en las cargas promedio, respectivamente, y se hizo una transferencia desde el primario E al primario G para obtener cargas promedio de 285 [A] y 215 [A], respectivamente. Los problemas de temperatura continuaron en el alimentador E, debido a la disposición en sitio no se pudo simular este problema en CYMCAP. Se opta por añadir ventilación y ubicar los alimentadores en bandejas, como se observa en la Figura 3.12.

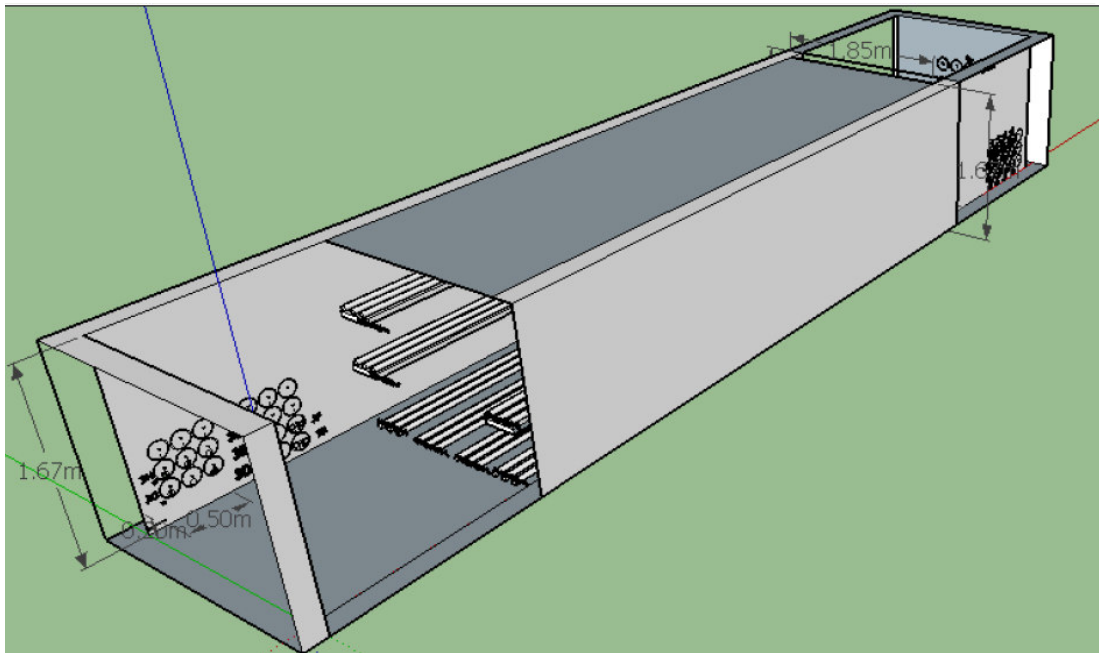


Figura 3.12. Disposición actual de alimentadores de S/E 16 en bandeja [25]

En la actualidad, los alimentadores de la S/E puede transportar más de 600 [A], pero estas pruebas fueron realizadas directamente en la subestación de la EEQ. CYMCAP no dispone de un módulo de simulación de las condiciones actuales de la S/E 16.

3.1.2.2 Subestación Belisario Quevedo (S/E 11)

Las fases de esta subestación tienen diferente calibre y nivel de aislamiento:

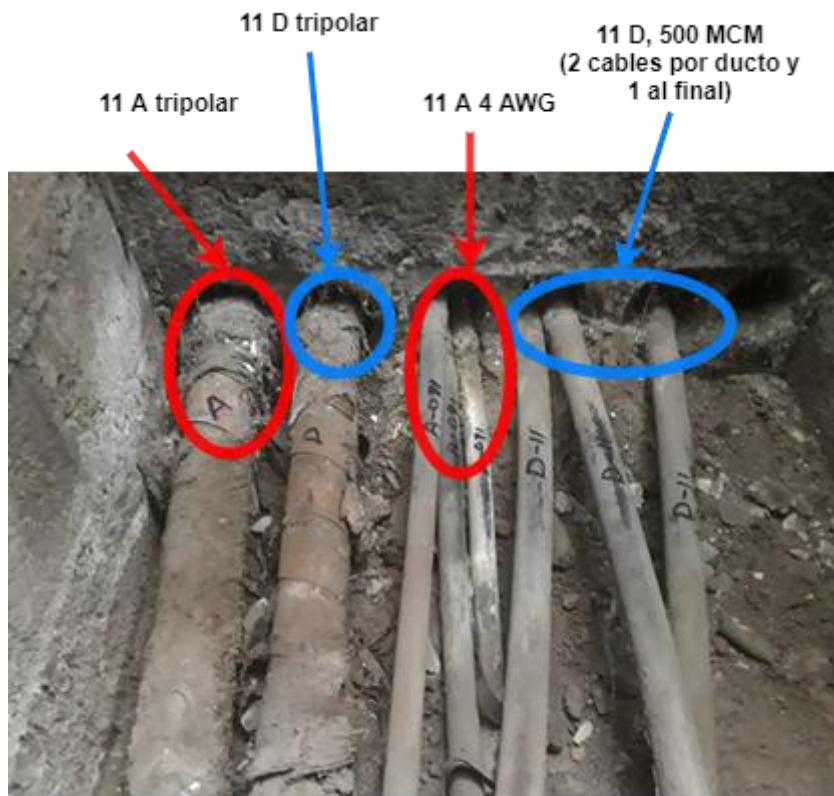


Figura 3.13. BD S/E 11

Como puede verse, la corriente del alimentador A tiene dos cables por fase y está dividido en 1 cable tripolar de 4AWG en la posición 1 y en la posición 3 cables unipolares de 3/0 AWG. El alimentador tripolar D es de 4 AWG en la posición 2 y de 3 cables unipolares de 500 MCM con 2 en el ducto 4 y 1 en el ducto 5.

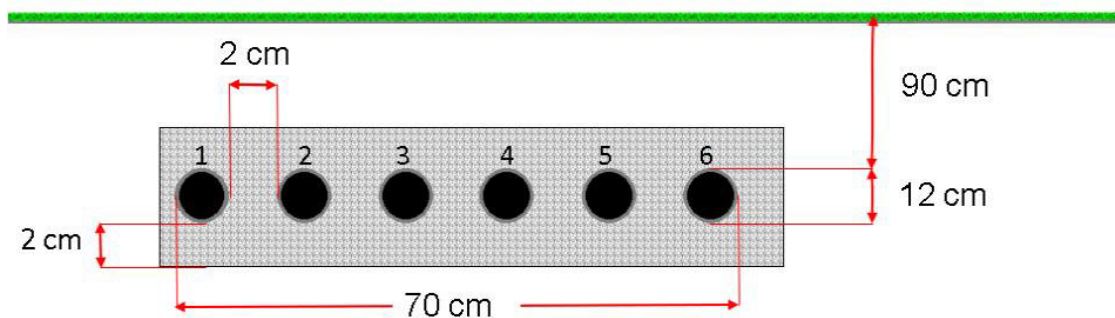


Figura 3.14. Dimensiones del BD de S/E 11

Esta disposición no se puede replicar en CYMCAP, de modo que impide realizar un análisis en cuanto a la ampacidad soportada; por lo anterior, esta configuración no se debe emular.

3.1.2.3 Subestación San Roque (S/E 07)

En esta subestación, uno de los ductos está completamente lleno con 3 AP, por tanto, no se pudo simular en CYMCAP y no cumple con el porcentaje de relleno del 40 %.



Figura 3.15. BD S/E 07

En la Figura 3.16. se encuentra la distribución de los cables de la Subestación San Roque junto con sus dimensiones.

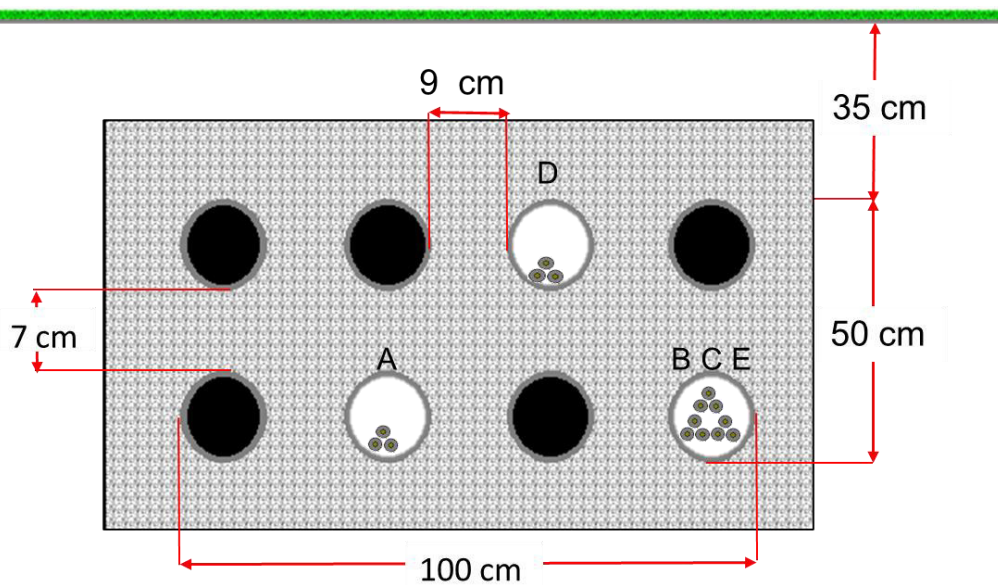


Figura 3.16. Dimensiones del BD y disposición de los cables de S/E 07

El BD es de dos filas por cuatro columnas y 7.5" de diámetro por ducto. El alimentador B, C y D ocupan más del 40 % del porcentaje de relleno; adicional a esto, CYMCAP no permite que tres alimentadores ocupen un solo ducto, por lo cual esta S/E no se pudo simular.

3.1.2.4 Subestación Pérez Guerrero (S/E 53)

Esta subestación consta de cuatro alimentadores primarios unipolares y un cable tripolar para la alimentación del trole; la corriente en este último es cero, así que no se lo consideró para la Figura 3.17 El material de los cables es cobre. El calibre del conductor F es 400 MCM, E tiene 500 MCM, D posee dos cables por fase y B dos cables unipolares de 700 MCM y dos cables de 4/0 AWG para una de las fases.

Cabe señalar que CYMCAP no permite realizar la configuración del alimentador B, en el caso del alimentador D lo simulará como dos cables, una sola fase por ducto, asumiendo siempre cargas balanceadas para cada alimentador.



Figura 3.17. BD S/E 53

Seguidamente, la Figura 3.18. muestra las dimensiones medidas en sitio y la distribución de los cables.

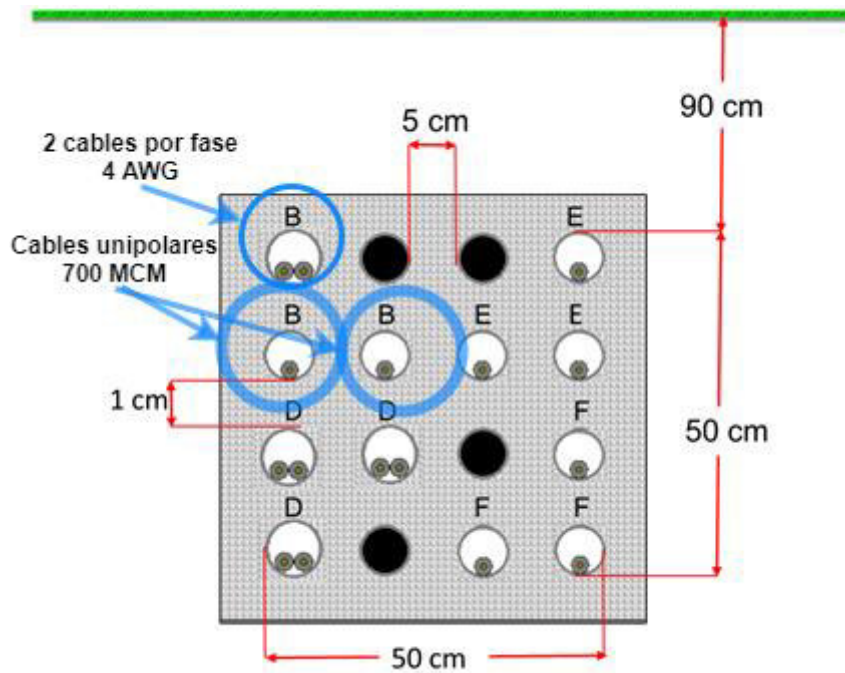


Figura 3.18. Dimensiones del BD y disposición de los cables de S/E 53

De tal forma, se concluye que la configuración del alimentador B limita las posibilidades de diseño en CYMCAP y no permite obtener valores de la ampacidad dentro de este BD.

3.1.2.5 Subestación Eugenio Espejo (S/E 59)

La tercera columna del BD consta de dos cables del alimentador E, lo que crea desbalances entre las fases e impide la simulación en CYMCAP para obtener valores de ampacidad, de acuerdo con la configuración de las Figura 3.19. .



Figura 3.19. BD S/E 59 Vista superior

Es preciso indicar que el calibre de los alimentadores es 250 MCM y su material es cobre.



Figura 3.20. BD S/E 59

Ahora bien, lo más cercano a esta S/E que se pudo simular es la Figura 3.21.

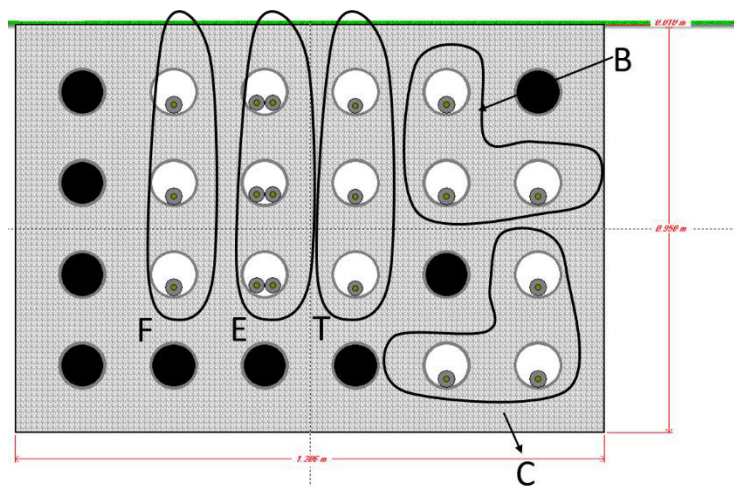


Figura 3.21. Simulación en CYMCAP S/E 59. Año 2018

Sin embargo, la distribución no es la misma, esto significa que los resultados de ampacidad no serán concluyentes.

3.1.2.6 Subestación Miraflores (09)

El BD de la S/E 09 consta de dos materiales de PVC (arriba corrugado y abajo liso); adicional a esto, uno de los alimentadores está directamente enterrado y en la parte superior los cables de telecomunicaciones demoraron la toma de datos.



Figura 3.22. BD S/E 09

La configuración multi-bancos es un módulo adicional de CYMCAP y no consta en el alcance del presente proyecto de titulación. Igualmente, se concluye que las configuraciones en multi-bancos deben evitarse.

3.1.2.7 Subestación Diez Vieja (S/E 10)

La S/E consta de cinco alimentadores de cobre el alimentador A es de 500 MCM, B y D son de 400 MCM, E es un cable tripolar de 2/0 AWG y C consta de dos cables tripolares de 2/0 AWG.

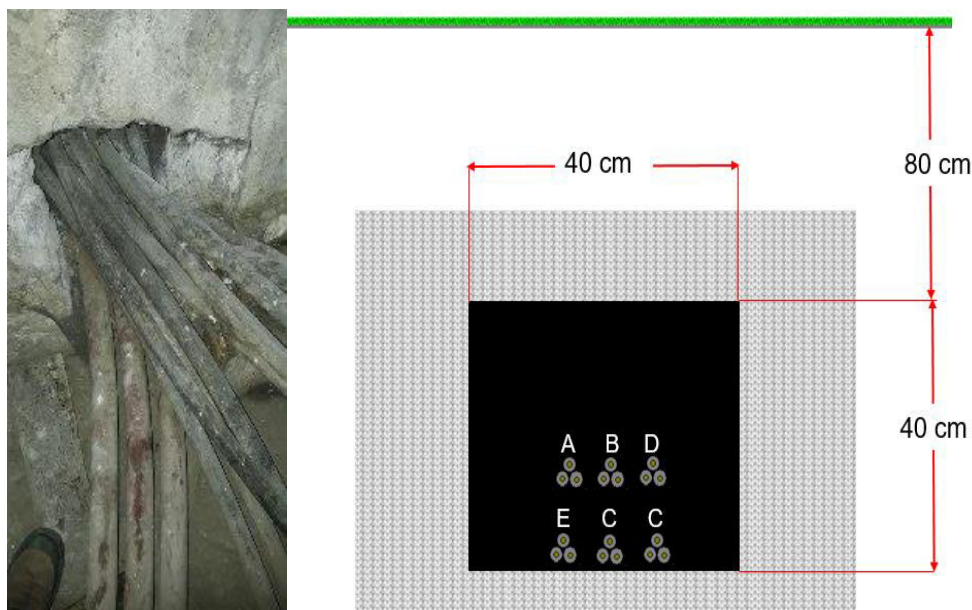


Figura 3.23. BD S/E 10

Es de resaltar que CYMCAP no permite realizar la configuración de la Figura 3.23 Finalmente se presenta la guía de procedimientos.

3.2 GUÍA DE PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BANCOS DE DUCTOS SUBTERRÁNEOS EN MEDIO VOLTAJE EN BASE AL ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE AMPACIDAD DEL ESTADO ESTABLE

La siguiente propuesta de guía de procedimientos para el diseño y construcción de BD's subterráneos en MV pretende ser un aporte a las normas actuales enfocándose en la variación de ampacidad en los BD's.

3.2.1 PASOS PARA EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN O MANTENIMIENTO DE BD

- Revisar la disposición de la S/E en ARCGIS

En caso de trabajadores de EEQ o contratistas, solicitar información directamente a la empresa.

Los links disponibles en línea y los pasos para consultar la información son:

Desde el computador:

- Ingresar a: [26]
Desde celular:
- Descargar la app “ArcGIS Explorer”



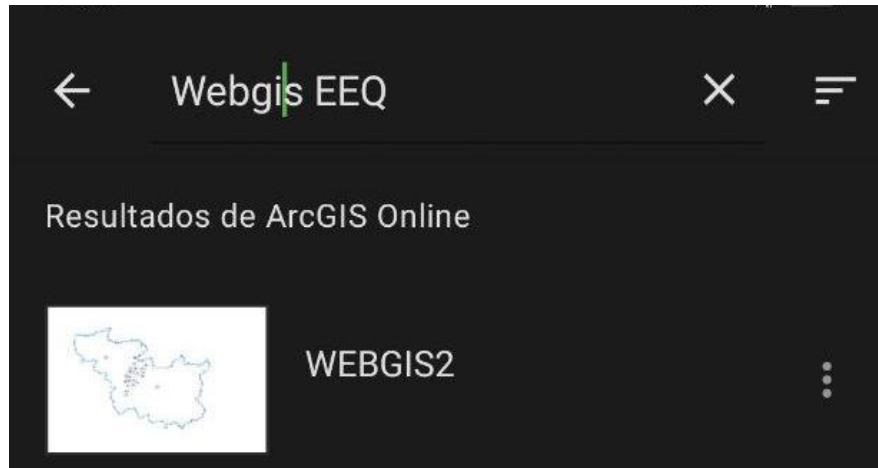
Figura 3.24. APP ArcGIS

- Activar la ubicación del dispositivo, Continuar sin iniciar sesión



Figura 3.25. Página de inicio APP ArcGIS

- Escribir Webgis EEQ en el buscador



○

Figura 3.26. Buscador APP ArcGIS

- Seleccionar WEBGIS2

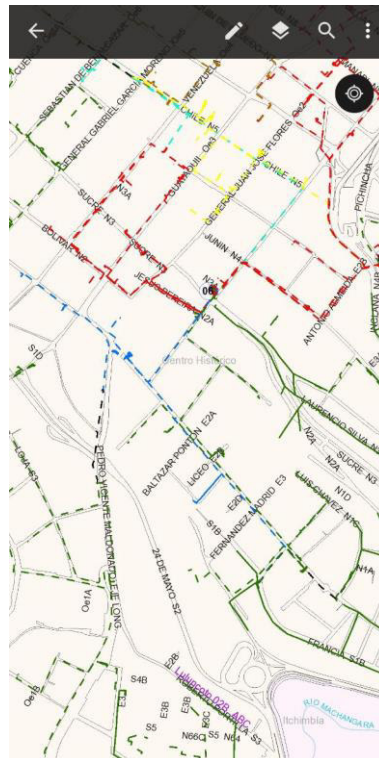


Figura 3.27. Pantalla de navegación APP ArcGIS

- Visita a S/E

En caso de toma de datos de BD en S/E:

- Ingresar a la cabina para visualizar la conexión de protecciones con los AP
- Identificar la primera salida de los AP desde la cabina

- Si se desconoce la ubicación de algún AP: Identificar los AP desde la línea aérea de entrada
- Abrir las tapas de las cajas para clasificar los ductos o zanjas existentes en el mismo.
- Toma de datos según Figura 3.28 y fotografiar BD.
- Medición de RHO
- Repetir el proceso para las cajas y ductos de la primera salida de la subestación.

Estos pasos deben hacerse en todas las S/E pertenecientes a la empresa una sola vez.

En caso de mantenimiento, ampliación o construcción de nuevos BD's seguir las siguientes consideraciones.

- Consideraciones generales

La Tabla 2.2 en el caso de AP de Cu y la Tabla 2.3 en el caso de AP de Al es la primera referencia para aproximar la capacidad de corriente máxima (I_{amp}) de cada AP siempre y cuando la configuración sea similar a la figura 2.2, el número de AP sea 1, 3 o 6, sean de 3 fases y cumpla con los niveles de voltaje y distribución de los conductores descritos en 2.2.1.1. En caso de configuraciones, diseños o implementaciones nuevas se recomienda seguir la norma NEC acorde a la corriente máxima deseada.

Los BD's con más de 6 AP deben ser simulados en CYMCAP (Ver punto 1.4.5) y mantener la distribución de la figura 2.2 (En el punto 2.2.1.1).

La ampacidad simulada varía según los parámetros de entrada principalmente si los AP son de diferentes MCM; esto dificulta el análisis, porque para cada AP se tendrá una ampacidad diferente. De la misma manera, la simulación de CYMCAP es aproximada, pues asume cargas balanceadas; en la realidad cada fase del AP puede presentar distinta ampacidad dependiente del desbalance de carga. Por lo anterior, el factor de carga de las fases del AP fue considerado el mismo.

Este desbalance no es analizado en el presente proyecto. Cabe mencionar que, mayormente, la ampacidad simulada es menor a la ampacidad nominal, debido a que las condiciones de esta son diferentes a las encontradas en el sitio. Se recomienda simular una subestación a una temperatura ambiente de 20 °C, porque la diferencia entre usar la temperatura máxima por ejemplo 25 °C difiere del resultado en aproximadamente 10 [A].

3.2.2 REQUISITOS PARA NUEVOS BD

Los diseños pueden ser diferentes a los establecidos en el NEC, pero en caso de requerirlo, se debe cumplir con:

- El calibre de los alimentadores primarios debe ser el mismo para todos los cables dentro del BD.
- El material elegido de todos los cables conductores debe ser de cobre o de aluminio. No ambos.
- El tamaño de los ductos debe ser el mismo dentro del BD.
- El BD debe estar dentro de la siguiente configuración:

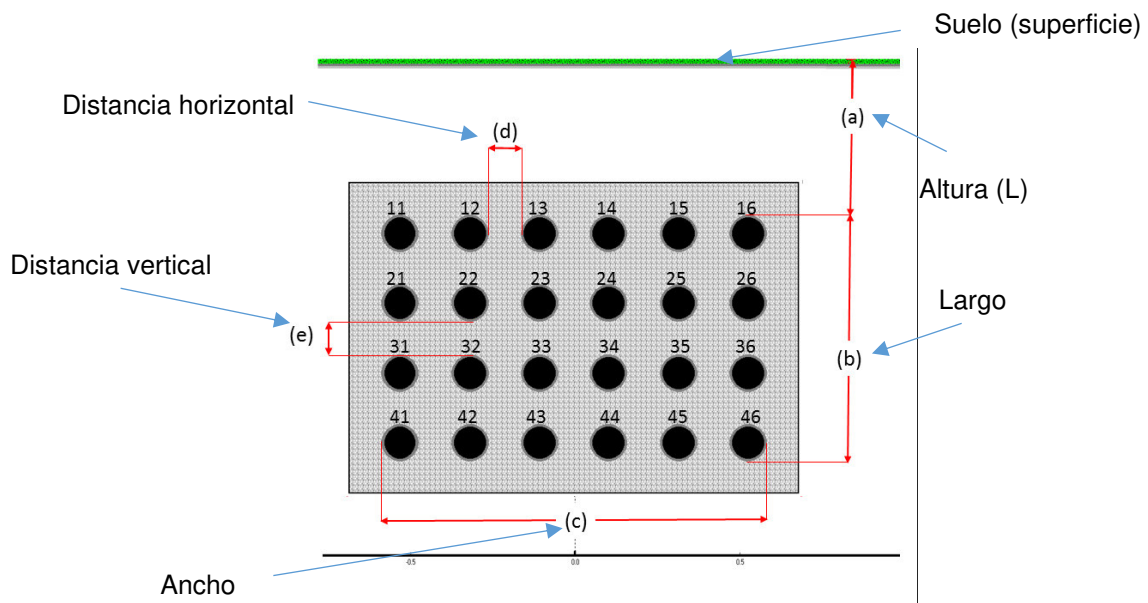


Figura 3.28. BD n filas por m columnas

- Ahora bien, se debe seguir la Tabla 2.1. para la altura (a) mínima, en caso de distribuciones en condiciones distintas a las descritas en la tabla dirigirse a la NEC y revisar información relacionada, caso contrario L queda a discreción del diseñador. Siempre que sea posible seguir las normas de la NEC.

- Los ductos necesitan una distancia (d y e) mínima entre sí de al menos 0.5 cm se sugiere un distanciamiento mayor a este; CYMCAP no permite simular ductos adyacentes con 0 cm en e o d.
- La distancia de separación horizontal entre ductos (d) debe ser la misma para todas las columnas.
- La distancia de separación vertical entre ductos (e) debe ser la misma para todas las filas.
- El arreglo de ductos sigue la numeración de una matriz de n filas por m columnas, tal como se muestra en la Figura 3.28.
- El cable debe cumplir los requisitos mínimos descritos por el MERNNR [7] en el ANEXO C y ser similar a la Figura 2.2.
- La ubicación del cable o los cables solamente puede ser en ternas o en configuración plana, es decir, un cable por ducto.
- El ducto no debe estar relleno en más del 40 % por los cables conductores.
- CYMCAP no permite el análisis de cargas desbalanceadas ni la colocación de dos o más fases de distintos alimentadores primarios.
- No se recomienda realizar diseños o instalaciones de multi-bancos, es decir, dos o más bancos de ductos con configuraciones diferentes en el número de filas y columnas, ni utilizar distintos materiales.
- La capacidad máxima de transferencia de corriente en los cables conductores debe ser simulada antes de ser ubicada en el sitio.
- Para la instalación a detalle de la obra civil y los materiales utilizados revisar la normativa en EEQ y MERNNR [3, 7, 10].
- Los tubos de los ductos no utilizados quedarán debidamente sellados en sus extremos, para evitar la entrada de roedores, siendo aconsejable asimismo su sellado a la entrada de las cajas de revisión.

Adicional a lo anterior no se debe repetir los casos atípicos del punto 3.1.2., las tapas de los pozos deben quedar herméticamente selladas y en caso de filtraciones de agua corregir esto.

3.2.3 TABLA DE AMPACIDADES EN BD DE CONCRETO

Debido a la falta de datos en cuanto a RHO las ampacidades para BD de concreto serán $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ en lugares húmedos y $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ en caso de suelos secos.

Ver 2.3.1 para las dimensiones del cable y 2.3.2 para los datos y modelo de BD de las S/E's.

3.2.3.1 S/E 58

Tabla 3.85. Capacidad de corriente máxima en S/E 58

AP		58 A	58 B	58 C	58 D
MCM		500	250	500	500
I_{amp} conservador com $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$	[A]	418.8	253.8	417.3	376.6
I_{amp} CON $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$	[A]	384	226.9	382.4	335.8
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400	400	400	400
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	140.87	81.6	189.98	3.57

3.2.3.2 S/E 29

3.2.3.2.1 S/E 29 P1

Tabla 3.86. Capacidad de corriente máxima en S/E 29, P1

AP		29B	29C
MCM		250	
I_{amp} conservador ($0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$)	[A]	288.9	
I_{amp} CON $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$	[A]	264.5	
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	68.09	222.73

3.2.3.2.2 S/E 29 P2

Tabla 3.87. Capacidad de corriente máxima en S/E 29, P2

AP		29 A	29 D
MCM		250	
I_{amp} conservador ($0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$)	[A]	293.6	361.6
I_{amp} con $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$	[A]	269.4	332.1
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	400	
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	147.66	172.15

3.2.3.3 S/E 06

Tabla 3.88. Capacidad de corriente máxima en S/E 06, P1

AP		6A	6B	6C	6G	6Z
MCM		500				
I_{amp} conservador (0.9 [$^{\circ}C \cdot m/W$])	[A]	356.9				
I_{amp} CON 1.2 [$^{\circ}C \cdot m/W$]	[A]	320.3				
$I_{m\acute{a}x}$ EN TC	[A]	600				
$I_{m\acute{a}x}$ MEDIDA	[A]	50.4	70.56	48.96	23.04	15.84

Estas tablas son válidas siempre y cuando los BD sean de concreto.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

El levantamiento de datos en la S/E 06 se facilitó gracias a la previa identificación de cada terna dentro del BD con placas delgadas metálicas de identificación además de esto no se encontraron datos de RHO en ninguna de las S/E's provocando que el desconocimiento de la resistividad térmica del material del BD que rodea el cable limita los resultados de las simulaciones ya que el cambio provocado entre $0.5 [^{\circ}C \cdot m/W]$ y $1.2 [^{\circ}C \cdot m/W]$ puede llegar a ser superior a los 100 [A].

El modelamiento de bancos de ductos se expande mientras más módulos de CYMCAP sean obtenidos, pero cada módulo adicional genera un costo extra, de manera que los nuevos ductos deben basarse en la forma standard de n filas por m columnas, a una distancia vertical (a) y horizontal (b), como muestra la Figura 2.2. de la NEC y la Figura 3.28 de la guía.

El aumento del número de alimentadores primarios, dentro de un BD, provoca el uso de un cable de calibre mayor para permitir el paso de la ampacidad nominal o estimada en el NEC. En la guía se asume una resistividad térmica de $0.9 [^{\circ}C \cdot m/W]$ para dar un margen de seguridad al $0.7 [^{\circ}C \cdot m/W]$ recomendado por el NEC como resistividad térmica del concreto; todas las mediciones se realizaron en bancos de ductos de PVC en concreto. Según los estudios realizados por CYMCAP, se puede encontrar resistividades para el concreto desde $0.5 [^{\circ}C \cdot m/W]$.

4.2 RECOMENDACIONES

La resistividad térmica del suelo es un parámetro necesario para el diseño o construcción de bancos de ductos subterráneos por lo que se recomienda que la Empresa Eléctrica Quito solicite este parámetro antes de energizar el sistema para su correcta simulación y aplicación.

Debido al desconocimiento de la resistividad térmica del material circundante al cable dentro del BD se sugiere utilizar las de NEC, en el caso de BD de PVC en concreto se utilizarán la Tabla 2.2. y la Tabla 2.3, como primera aproximación al valor de ampacidad por cable.

Se debería medir la resistividad térmica del material que rodea al cable dentro del BD de las subestaciones de EEQ y hacer un análisis o estudio de las variaciones de esta a lo largo del año, para no asumir supuestos utilizados en las normas NEC e IEC 60287-3-1.

Para identificar los límites de las protecciones de cada alimentador de cada subestación, se debería utilizar el módulo de CYMCAP “*Short-Circuit Cable Rating*” y, de esta forma, generar más información del cable en la subestación.

Se recomienda comprar cinta metálica para la etiquetadora 3-M para la identificación del resto de alimentadores en otras subestaciones ya existentes o nuevas, el precio actual de la cinta de 55 [m] en España es de \$8, lastimosamente no se encontró un distribuidor en Ecuador.

Por último, se debe manejar una misma configuración para la ubicación de los cables, es decir que, si un alimentador está ubicado en formación triangular, trébol o terna, el resto de los alimentadores también y si el BD es de concreto, todos los alimentadores estarán en un BD de concreto.

4.3 TRABAJOS FUTUROS

- Para poder obtener más información respecto a las subestaciones con ductos, en configuraciones triangulares o enterrados directamente en suelo o terrenos de las subestaciones, se debe utilizar un BD no estándar en CYMCAP.
- Se pueden etiquetar los cables subterráneos de los bancos de ductos de las subestaciones, de manera similar a las etiquetas utilizadas en la subestación Sucre (06).
- También se sugiere realizar una simulación del BD luego de diseñarlo y utilizar como distancias mínimas de separación entre ductos las mostradas en la Figura 2.2. de la NEC.
- Para terminar, se recomienda hacer un análisis de resultados económicos para determinar el tipo de material del conductor a utilizar y el costo/beneficio de la infraestructura civil necesaria.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] National Fire Protection Association [NFPA], National Electrical Code 2017 Edition, Quincy, Massachusetts: NFPA, 2017.
- [2] A. Carrasco, Montaje de redes eléctricas subterráneas de alta tensión, Antequera, Málaga: IC Editorial, 2012.
- [3] Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables [MERNNR], Manual de construcción del sistema de distribución eléctrica de redes subterráneas. Sección 2, Ecuador: MERNNR, 2019.
- [4] Empresa Eléctrica Quito [EEQ], «Normas para Sistemas de Distribución Parte A,» de *Guía para Diseño de Redes para Distribución*, Quito, EEQ, 2021, pp. 1-166.
- [5] H. A. Salazar, «Análisis técnico económico de cables subterráneos en cobre y aluminio [proyecto de grado],» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2003.
- [6] International Electrotechnical Commission [IEC], «EC 60287-3-1:2017 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 3-1: Operating conditions - Site reference conditions, International Standard, 2.0.,» IEC, Londres, 2017.
- [7] Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables [MERNNR], Especificaciones Técnicas de los Materiales para Sistemas de Distribución Eléctrica de Redes Subterráneas, Ecuador: MERNNR, 2019.
- [8] C. A. Pinto, «Cálculo de la Ampacidad en Redes Subterráneas, Análisis y Simulación usando Matlab [proyecto de grado],» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2014.
- [9] D. Gómez, «Análisis de contingencias eléctricas en centros comerciales [tesis de grado],» Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., 2010.
- [10] Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables [MERNNR], Marco Teórico para la Homologación de las Unidades de Propiedad y Unidades de Construcción del Sistema de Distribución Eléctrica de Redes Subterráneas, Sección 1, Ecuador: MERNNR, 2019.
- [11] CYME International T&D, Reference Manual and Users Guide of CYMCAP, Canadá: CYME.
- [12] Tradurep Representaciones, Catálogo CYME 2020, Guayaquil: Tradurep, 2019.
- [13] S. Ramírez, «Redes de Distribución de Energía,» Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2009.
- [14] Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], «IEEE 525-2016 - IEEE Guide for the Design and Installation of Cable Systems in Substations,» IEEE, New Jersey, 2016.

- [15] J. H. Neher y M. H. McGrath, «The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems,» *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 76, nº 3, pp. 752-764, 1957.
- [16] F. De León, «Major factors affecting cable ampacity,» IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES, Montreal, 2006.
- [17] T. Wang, «Thermal Performance of 69 kV Underground Cables [thesis],» Arizona State University, Tempe, Arizona, 2013.
- [18] G. E. Mejía Chaparro y G. E. Cubillos Rodríguez, «Análisis y evaluación a herramienta computacional aplicada al cálculo para la selección de cableado eléctrico subterráneo,» Universidad de La Salle, Bogotá, D. C., 2011.
- [19] G. J. Anders, «Rating of Electric Power Cables: Ampacity Computations for Transmission, Distribution, and Industrial Applications, 1a ed.,» McGraw-Hill Professional, New York, 1997.
- [20] H. Poritsky, «The field due to two equally charged parallel conducting cylinders,» *Journal of Mathematics and Physics*, vol. 11, nº 1-4, pp. 213-217, 1931.
- [21] H. Goldenberg, «External thermal resistance of two buried cables. Restricted application of superposition,» ERA Report 5201, Electrical Research Association Technology, Leatherhead, 1961.
- [22] R. Jaramillo, «Determinación de capacidad de conducción en líneas subterráneas: Estudio de sensibilidad paramétrica,» Determinación de capacidad de conducción en líneas subterráneas: Estudio de sensibilidad paramétrica, 2018.
- [23] International Electrotechnical Commission [IEC], «IEC 60502-2:2014. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV),» IEC, Ginebra, 2014.
- [24] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], «Red de Estaciones Automáticas Hidrometeorológicas. Condiciones Actuales del Tiempo para las últimas 24 horas», 2020. [En línea]. Available: <http://186.42.174.236/InamhiEmas/>. [Último acceso: 20 noviembre 2020].
- [25] Empresa Eléctrica Quito [EEQ], Pozos Eléctricos de la Subestación Río Coca, Quito: EEQ.
- [26] Esri «ARCGIS Online/ Web GIS Mapping Software for everyone », 2022. [En línea]. Available: <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?url=https%3A%2F%2Fgeoportal.eeq.com.ec%2Farcgis%2Frest%2Fservices%2FWEBGIS%2FWebgisElectrico%2FMapServer&source=sd> [Último acceso: 01 enero 2022].

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO B

ANEXO C

**ANEXO D. DATOS DE CORRIENTE SUBESTACIÓN EL
QUINCHE**

**ANEXO E. DATOS DE CORRIENTE SUBESTACIÓN
NUEVA CUMBAYÁ**

**ANEXO F. DATOS DE CORRIENTE SUBESTACIÓN
ESCUELA SUCRE**

**ANEXO G. RESULTADOS DEL MÓDULO DE CYMCAP
“ESTUDIOS PARAMÉTRICOS” S/E EL QUINCHE (58)**

**ANEXO H. RESULTADOS DEL MÓDULO DE CYMCAP
“ESTUDIOS PARAMÉTRICOS” S/E NUEVA CUMBAYÁ
POZO 1 (29)**

**ANEXO I. RESULTADOS DEL MÓDULO DE CYMCAP
“ESTUDIOS PARAMÉTRICOS S/E NUEVA CUMBAYÁ
POZO 2 (29)**

**ANEXO J. RESULTADOS DEL MÓDULO DE CYMCAP
“ESTUDIOS PARAMÉTRICOS” S/E ESCUELA SUCRE
(06)**