



**GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN
ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN.**

Daniela Tuberquia Villa

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Asesores

Juan José Rodríguez, Especialista (Esp) en Gerencia de proyectos

Nelson de Jesús Londoño Ospina, Doctor (PhD) en Robótica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	Tuberquia Villa [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] D. Tuberqia villa, “Guía de diseño electromecánico básico en una subestación eléctrica de alta tensión”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Céspedes.

Decano/director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Noe Alejandro Mesa Quintero

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Le dedico el resultado de este trabajo a mi familia, principalmente a mis padres por el profundo apoyo emocional, económico e intelectual durante toda mi vida y mi carrera profesional.

Agradecimientos

Agradezco a cada uno de los profesores de la Universidad de Antioquia que compartieron sus conocimientos y destrezas para mi formación como profesional. A mi asesor Nelson Londoño por colaborarme, apoyarme e instruirme, tanto en la carrera como en el periodo de práctica. También agradezco a la empresa INGEMA S.A por haberme abierto las puertas y darme la oportunidad de crecer como profesional y como persona. Por último y no menos importante, agradezco a mi familia por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida en cada uno de mis sueños.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN	11
II. OBJETIVOS	12
A. Objetivo general	12
B. Objetivos específicos	12
III. MARCO TEÓRICO	13
Sobretensiones.....	13
Sobretensión temporal	13
Sobretensiones de maniobra	14
Sobretensiones atmosféricas	14
Descargador de sobretensión (DPS).....	14
Coordinación de aislamiento	16
Transformadores de corriente (CT).....	16
Transformadores de tensión (TP).....	17
V. METODOLOGÍA	18
Revisión de la normativa.....	18
Cálculo de descargadores de sobretensión	18
Cálculo de coordinación de aislamiento.....	19
Cálculo de distancias mínimas y de seguridad.....	19
Cálculo de cargabilidad de CT's y PT's.....	19
Caso de estudio.....	19
Simulación.....	19
V. RESULTADOS	19

Procedimiento de la memoria de selección de descargadores.....	19
Procedimiento de la memoria de coordinación de aislamiento.....	22
Procedimiento de la memoria de distancias de seguridad.....	26
Procedimiento de cargabilidad de CT's y PT's.....	28
Caso de estudio.....	32
Selección de descargadores.....	33
Coordinación de aislamiento.....	35
Distancias mínimas de seguridad.....	38
Cargabilidad de CT's y PT's.....	41
Simulación.....	45
Falla de fase a tierra	45
sobretensión de maniobra (recierre).....	46
VI. ANÁLISIS	48
REFERENCIAS	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características ambientales de la ubicación de la subestación eléctrica 138/22.9 kV.	32
Tabla 2. Tensión resumen de las tensiones calculadas.....	34
Tabla 3. Resultados de corriente y energía para DPS para los niveles de tensión de 138 kV y 22.9 kV.....	34
Tabla 4. Resultados de las sobretensiones representativas.	36
Tabla 5. Resultado de las sobretensiones de frente lento.....	36
Tabla 6. Resultado de coordinación de voltaje para cada sobretensión.....	37
Tabla 7. Coordinación de voltajes de frente rápido.	37
Tabla 8. Resultado de los voltajes a frecuencia industrial, impulso de maniobra e impulso atmosférico.....	37
Tabla 9. Distancias mínimas.	38
Tabla 10. Distancias de calculadas.....	40
Tabla 11. Características de los CT's.....	41
Tabla 12. Características de los PT's	42

LISTA DE FIGURAS

Fig 1. Descargador de sobretensión.	15
Fig 2. Transformador de corriente.....	16
Fig 3. Transformador de tensión.	17
Fig 4. Gráfico de la memoria de selección de descargadores.	20
Fig 5. Gráfico de la memoria de coordinación de aislamiento.....	23
Fig 6. Rango del 2% para sobretensiones de frente a la entrada de la línea debido a su energización y re-energización.	24
Fig 7. Relación entre los valores del 2% de las sobretensiones de frente lento fase-fase y fase-tierra.	24
Fig 8. Selección de factores Kcd.....	25
Fig 9. Gráfico de la memoria de distancias de seguridad.....	26
Fig 10. Cargabilidad de los transformadores de corriente.	29
Fig 11. Cargabilidad de los transformadores de tensión.	31

Fig 12. Tabla de Tensión máxima de los equipos, Rango I de la norma IEC 60071-1.....	33
Fig 13. Disposición física en 3D.	39
Fig 14. Disposición física en 2D.	39
Fig 15. Niveles de conexión.....	40
Fig 16. Diagrama unifilar de la subestación 138/22.9 kV.....	42
Fig 17. Zoom del Diagrama unifilar en la barra de 138 kV.....	43
Fig 18. Zoom del diagrama unifilar entre la barra de 138 y 22.9kV.....	44
Fig 19. Zoom del diagrama unifilar en la barra de 22.9 kV.....	44
Fig 20. Resultado de fase a tierra en la barra de 138 kV.....	45
Fig 21. Zoom de la sobretensión de falla a tierra en la barra de 138 kV.	46
Fig 22. Resultado de la sobretensión de maniobra.....	46
Fig 23. Zoom del resultado de la sobretensión de maniobra.....	47

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

CT	Transformador de corriente
PT	Transformador de tensión
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
AIS	Aislamiento de Aire Convencional
Khz	Kilo Hertz
μs	Microsegundo
SF6	Hexafluoruro de azufre
DPS	Descargador de sobretensiones
UNE-EN	Comité Técnico de Normalización de la Asociación Española
A	Amperios
VA	Voltio-Amperios
V	Voltios
A.C	Corriente alterna
BIL	Nivel soportado para impulso tipo rayo
Upl	Nivel de protección impulso tipo rayo de un pararrayo
Ups	Nivel de protección de impulso de maniobra
CFO	Voltaje crítico de flameo
m	Metro
Vr	Tensión de saturación
Ik max	Corriente máxima simétrica
ATP	Alternative Transient Program

RESUMEN

INGEMA S.A es una empresa de ingeniería y desarrollo de proyectos de infraestructura eléctrica, la cual se enfoca en el diseño, suministro, construcción, montaje y puesta en servicio de subestaciones eléctricas de alta y extra alta tensión.

La línea de la empresa en la que se desarrolla este proyecto de prácticas es la ingeniería básica primaria electromecánica de una subestación eléctrica de alta tensión, enfocada en las principales memorias de cálculos para realizar el diseño de dicha instalación. En este proyecto se da a conocer el paso a paso de las memoria de cálculos de la ingeniería básica primaria electromecánica como: la selección de descargadores, coordinación de aislamiento, distancias de seguridad y por último la memoria de cargabilidad de transformadores de corriente y transformadores de tensión, estas memorias se realizan con el objetivo de obtener la disposición física y el diagrama unifilar de la subestación, los cuales son fundamentales para el desarrollo de la construcción y compra de equipos.

Lo anterior se realiza de manera progresiva, empezando por tareas de baja complejidad que van aumentando a medida que se adquiere conocimiento, con el fin de realizar la ingeniería básica del proyecto en la empresa.

Palabras clave —Ingeniería, Electromecánico, Subestación eléctrica,

ABSTRACT

INGEMA S.A is an engineering and infrastructure development company that focuses on the design, supply, construction, assembly, and commissioning of high and extra-high voltage electrical substations.

The company's line of business in which this internship project is developed is the primary electromechanical basic engineering of a high voltage electrical substation, focusing on the main calculation reports to carry out the design of said installation. This project presents the step-by-step process of the primary electromechanical basic engineering calculation reports such as: the selection of surge arresters, insulation coordination, safety distances, and finally, the loadability report of current transformers and voltage transformers. These reports are made with the objective of obtaining the physical layout and the one-line diagram of the substation, which are essential for the development of construction and equipment procurement.

The above is carried out progressively, starting with low complexity tasks that increase as knowledge is acquired, in order to carry out the basic engineering of the project in the company.

***Keywords* —Engineering, Electromechanical, Electrical substation.**

I. INTRODUCCIÓN

La guía se fundamenta en el dimensionamiento de la ingeniería básica electromecánica de una subestación eléctrica definiendo parámetros como descargadores de sobretensiones, coordinación de aislamiento, distancias mínimas y de seguridad, cargabilidad de transformadores de corriente (CT's) y transformadores de tensión (PT's).

Un punto muy importante en esta guía son las simulaciones ya que permiten producir situaciones, que se pueden presentar en la instalación eléctrica, como sobretensiones de maniobra y descargas atmosféricas, con el fin de estudiar su comportamiento, analizando el impacto de los posibles cambios o para comparar diferencias entre los cálculos teóricos y los cálculos con resultados de una simulación. Los softwares de simulación son una herramienta de gran ayuda en la ingeniería ya que se puede hacer experimentos sin necesidad que sean a escala real.

Para realiza los cálculos y simulaciones de los parámetros mencionados anteriormente, se debe tener en cuenta las normas internacionales (IEEE, IEC, ANSI), resoluciones y reglamentos vigentes; con el propósito de construir, de manera técnica, un buen diseño de ingeniería básica con base en estos reglamentos y así, garantizar un servicio confiable, eficaz y seguro tanto para las personas que realicen trabajos dentro de la subestación como también para el usuario final.

Durante el desarrollo de este proyecto, se tomará como ejemplo para el cálculo de los parámetros del diseño básico de electromecánicos, una subestación eléctrica de 138/ 22,9 kV que contara con una potencia de 90 MVA y es aislada al aire (AIS).

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Diseñar una guía metodológica de ingeniería electromecánica básica, mediante la normativa internacional vigente con el fin de dar a conocer las técnicas utilizadas en Ingema S.A.

B. Objetivos específicos

Revisar las normas internacionales que se deben tener en cuenta para el diseño electromecánico básico de una subestación eléctrica AIS.

Determinar y describir los pasos a seguir para el cálculo del dimensionamiento de una subestación eléctrica de alta tensión de forma clara y sencilla.

Desarrollar un informe detallado donde se evidencie un diseño electromecánico básico de una subestación 138/22.9 kV.

III. MARCO TEÓRICO

Sobretensiones

Las sobretensiones en las subestaciones eléctricas son perturbaciones en el sistema de potencia, lo cual origina aumentos de voltaje de corta duración, estos eventos son bastantes frecuentes y pueden poner en peligro tanto los equipos como el personal de la subestación, el usuario final y el servicio de energía. Una sobretensión es definida como el valor de la tensión (puede ser entre fases o entre fase y tierra), donde el valor de cresta es superior al valor pico de la tensión máxima nominal de un sistema [1],[2]. Estos eventos se clasifican según el origen:

- Origen externo, hace referencia a sobretensiones como son las descargas atmosféricas.
- Origen interno, hace referencia a sobretensiones como cortocircuito u operaciones de maniobra que se realicen en la subestación.

Otra clasificación que se tiene en las sobretensiones depende de la forma de onda que se genera y se presentan a continuación:

Sobretensión temporal

Esta sobretensión es ligeramente amortiguada, tiene larga duración y la frecuencia en la que se presenta la sobretensión es igual o próxima a la frecuencia de operación del sistema. Los orígenes de las sobretensiones temporales son [2]:

- **Efecto ferranti (energización de líneas):** Esta sobretensión se presenta cuando se tiene una línea de longitud bastante larga y la carga es pequeña o no se tiene una carga conectada a la línea, esto se debe a la capacitancia que tiene [1].
- **Cambio en la carga:** Ocurre cuando repentinamente se desconecta parcialmente o complemente la carga del sistema, estas sobretensiones pueden durar varios segundos [1].
- **Ferroresonancia:** Se crea por elementos no lineales, usualmente se presenta en los sistemas de alta tensión y es muy escaso que se encuentre en los sistemas de distribución [1].

Sobretensiones de maniobra

Son sobretensiones transitorias y se caracteriza por ser de duración corta, el rango de frecuencia se encuentra entre 2 y 10 kHz y es fuertemente amortiguada. Estas sobretensiones tienen la siguiente división:

- **sobretensiones de frente lento:** Tiene un tiempo de cresta comprendido entre $2 \mu s$ y $500 \mu s$. Se caracteriza por ser unidireccional y se origina por operaciones de conexión o desconexión de equipos o por fallas en el sistema [3].
- **Sobretensiones de frente rápido:** Esta sobretensión tiene una duración de frente entre un rango de 0.1 hasta $20 \mu s$ y la duración de cola de hasta $300 \mu s$ [3].
- **Sobretensiones de frente muy rápido:** Es una sobretensión que se presenta en subestaciones por operación de seccionadores o fallas dentro de subestaciones de aislamiento de gas, conocida como GIS, esto se debe a la ruptura del gas hexafluoruro de azufre (SF₆), con una duración de frente de $0.1 \mu s$ y con oscilaciones de frecuencia entre un rango desde 30 kHz hasta 100 kHz [3].

Sobretensiones atmosféricas

Este tipo de sobretensión se caracteriza por ser de corta duración y tiene una amplitud que puede llegar a ser mucho más grande que la tensión pico del sistema. Se puede presentar en las siguientes situaciones:

- Cuando la descarga atmosférica cae sobre un cable de tierra o un poste, en este caso la corriente del rayo termina extendiéndose a tierra.
- Cuando la descarga atmosférica cae sobre una fase o en la cercanía de la línea, también conocida como sobretensión inducida, en este tipo se produce una falla si la tensión supera la rigidez dieléctrica del aislamiento [3].

Descargador de sobretensión (DPS).

El equipo diseñado para soportar sobretensiones es el descargador de sobretensión también conocidos como DPS, el objetivo de este elemento es limitar la amplitud de cada sobretensión que se presente en el sistema y dirigir la corriente de dicho evento a través de componentes específicos de protección. Algunas de las normas técnicas que rigen a los DPS son: IEC 60099-4 [4] y IEC 60099-5 [3].



Fig 1. Descargador de sobretensión.

Para obtener una protección eficiente y segura en las subestaciones eléctricas, los descargadores de sobretensiones deben de cumplir con dos requisitos:

- El DPS debe brindar suficiente protección eléctrica.
- Debe permanecer térmicamente estable, ya que de lo contrario este dispositivo puede destruirse [5].

Algunas definiciones que se deben tener en claras en los descargadores de sobretensiones son:

- **Voltaje de operación continua U_c :** Es el valor máximo de la tensión de línea a tierra entre los terminales del pararrayo que se puede aplicar de forma continua; este debe estar por encima del límite superior de voltaje [6].
- **Voltaje nominal U_r :** Es la tensión eficaz máxima que se le aplica a un pararrayo en un tiempo de 10 segundos después de haber sido sometido a una descarga eléctrica de corriente según se define en la norma UNE-EN 60099-4 [7].
- **Nivel de protección tipo rayo U_{pl} :** Se define como la tensión residual máxima a la corriente nominal de descarga, aplicada a la protección de equipos contra sobretensiones de frente rápido.
- **Nivel de protección de impulso de maniobra U_{ps} :** Es la tensión residual máxima a la corriente de impulso de maniobra, se aplica a la protección de equipos contra sobretensiones de frente lento [7].

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

Coordinación de aislamiento

El objetivo principal de la coordinación de aislamiento es determinar el nivel de aislamiento suficiente y necesario de los equipos, con el fin de garantizar que el nivel de tensión del aislamiento sea mayor que la tensión que se pueda presentar si resulta una sobretensión en el sistema de potencia y así obtener una rigidez dieléctrica homogénea a las tensiones de operación, además se debe tener en cuentas las condiciones ambientales y la ubicación de la instalación.

Al realizar el estudio de coordinación de aislamiento se debe definir dos conceptos, el primero es aislamiento interno y el segundo aislamiento externo.

- Aislamiento externo, se refiere a lugares que están expuestas al medio ambiente, por lo tanto, se ven afectados por la altura sobre el nivel de mar, la humedad y la contaminación. Este tipo aislamiento se considera autorrecuperable, es decir, que después que se presenta una descarga disruptiva este vuelve a recuperar sus propiedades aislantes.
- Aislamiento interno, este aislamiento al no estar en contacto con el medio ambiente no será afectado por descargas atmosféricas y tampoco por las condiciones del medio ambiente. Este tipo aislamiento se considera no autorrecuperable, es decir, que después que se presenta una descarga disruptiva este no vuelve a recuperar sus propiedades aislantes[8].

Transformadores de corriente (CT)



Fig 2. Transformador de corriente.

Dispositivo de monitoreo que puede ser tipo inductivo, capacitivo u óptico, que proporciona una señal de corriente del sistema a un punto determinado, esta señal se utiliza para medida o para

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

protección [10] . Estos transformadores reducen grandes corrientes de alta tensión a baja tensión, pueden llegar a corriente de 1 A o 5 A para poder ser llevados a un amperímetro de baja tensión. Para la selección de los equipos se tiene en cuenta las especificaciones de la norma IEC 60044-1 [11].

Valores normalizados para los transformadores de corrientes se observan a continuación:

- **Valores de la corriente en el primario:** La norma IEC 60044-1 [11] da una serie de valores de corriente para el primario y estos valores son los siguientes: 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 y 75A o múltiplos o submúltiplos decimales de estos. Pero si se trabaja con la norma ANSI los valores son los siguientes: 10, 15, 25, 40, 50, 75, 100, 200, 300, 400, 800, 1600, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000 y 12000A.
- **Valores normalizados de la corriente en el secundario:** Según la norma IEC se tiene valores de 1A o 5A y para norma ANSI 5A.
- **Burden nominal:** Es la potencia que se puede conectar en el transformador sin alterar la precisión de este equipo. Los valores normalizados son: 2.5, 5.0, 10,15 y 30VA.
- **Clase:** Es la precisión o error que introducen los transformadores al medir una variable eléctrica. De acuerdo con la norma empleada se cuenta con las siguientes clases de precisión:
 - Para transformadores de corriente de medida según la IEC se tiene valores de 0.1, 0.2S,0.2, 0.5, 0.5S,1,3, y 5%.
 - Para transformadores de corriente de protección según la IEC se tiene valores de 5P y 10P correspondientes a 5% y 10% para la corriente límite de precisión [11].

Transformadores de tensión (TP).



Fig 3. Transformador de tensión.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

Las medidas en los sistemas superiores a los 600V no se realizan directamente en la red, para estos son utilizados equipos denominados transformadores de tensión. Para la selección de los transformadores de tensión se deben tener en cuenta las descritas en la norma IEC 60186 [12]. Además, se debe tener en cuenta la necesidad de utilización de potencia, su precisión, los esquemas de control y protección como también los costos del transformador [13].

Valores normalizados de la norma para los transformadores de tensión se observan a continuación:

- **Tensión primaria asignada:** Según la norma IEC 60186 [12] la corriente del primario será la tensión nominal del sistema dividida por raíz de tres.
- **Tensión secundaria asignada:** Esta tensión se selecciona de acuerdo del país donde se encuentre ubicado el transformador.
- **Clase:** Es la precisión o error que introducen los transformadores al medir una variable eléctrica. De acuerdo con la norma empleada se cuenta con las siguientes clases de precisión:
 - Para transformadores de tensión de medida según la IEC se tiene valores de 0.1, 0.2, 0.5, 1,3, y 5%, con la norma ANSI se tiene valores de 0.3, 0.6 y 1.2 %.
 - Para transformadores de tensión de protección según la IEC se tiene valores de 3 y 6%.

V. METODOLOGÍA

Revisión de la normativa

Para cada una de las actividades de las memorias de cálculo, se realiza una búsqueda y lectura de la normativa internacional en las cuales se basa el diseño de la ingeniería básica electromecánica primaria, con el objetivo de conocer y entender los procedimientos a realizar en un diseño de una subestación eléctrica.

Cálculo de descargadores de sobretensión

Se ilustra por medio de un mapa conceptual y se explica los pasos a seguir para calcular las características mínimas que debe tener los descargadores de sobretensiones en la subestación eléctrica, haciendo uso de la normativa internacional vigente.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

Cálculo de coordinación de aislamiento.

Se ilustra los pasos que se deben seguir con el fin de seleccionar los niveles normalizados que los equipos deben soportar durante la prestación de servicio considerando las sobretensiones representativas.

Cálculo de distancias mínimas y de seguridad

Se explica los pasos a seguir que debe tener las distancias a partir de los niveles de aislamiento que se tiene en la subestación eléctrica, con el fin de obtener la disposición física de la instalación.

Cálculo de cargabilidad de CT's y PT's

El último estudio que se realiza, pero no menos importante, consiste en realizar el cálculo de las cargas de los transformadores de tensión y corriente con el fin de seleccionar un valor adecuado de capacidad y así obtener el diagrama unifilar de la subestación.

Caso de estudio

En esta actividad se muestra los resultados generales de la ingeniería básica de una subestación eléctrica.

Simulación

Se hará una simulación de algunas sobretensiones que se pueden presentar en la subestación.

V. RESULTADOS

Procedimiento de la memoria de selección de descargadores

El objetivo de una memoria de selección de descargadores es calcular valores de corriente, voltaje y energía mínimos, los cuales se deben garantizar en los descargadores de sobretensiones, con el fin de brindar una protección adecuada en la subestación. Para realizar la memoria de selección de descargadores se debe tener los siguientes datos: el nivel de tensión nominal, el nivel soportado para impulso tipo rayo (BIL); por último y no menos importante, se debe tener claro que conexión a tierra se tiene, es decir, si el sistema es sólidamente aterrizado o si el sistema es aislado.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIONIÓN

Como se muestra en la figura 4. el primer paso en la selección de descargadores es el cálculo de las tensiones, en este paso se calcula la tensión máxima del sistema y se busca la tensión máxima de los equipos con el fin de calcular la tensión continua y la tensión asignada para, luego obtener de un catálogo de descargadores de sobretensiones, el nivel de protección del impulso rayo y el nivel de protección del impulso de conmutación. A continuación, se describe los pasos para calcular las tensiones mencionadas anteriormente:

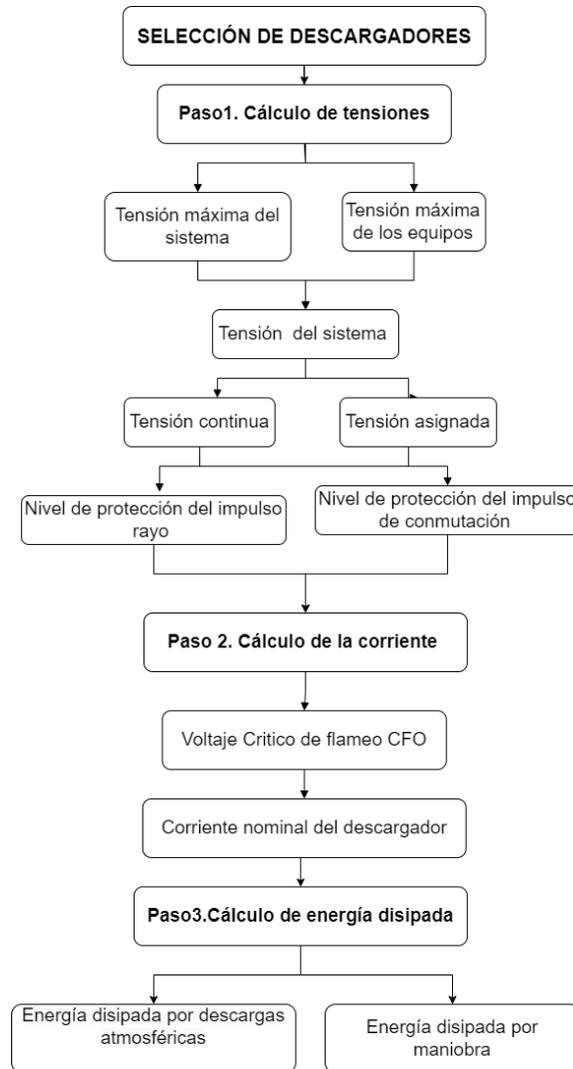


Fig 4. Gráfico de la memoria de selección de descargadores.

- La tensión máxima del sistema es el producto entre el factor de aumento máximo permisible en el sistema, el cual puede ser de 1.05 o 1.1, y la tensión nominal de la subestación.
- La tensión máxima de los equipos se obtiene de la norma IEC 60071-1 en las tablas 2 y 3, depende del valor de la tensión nominal [8].

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

- Conociendo los valores de la tensión máxima del sistema y de los equipos, se toma el mayor valores de las tensión mencionadas anteriormente y se define como tensión máxima del sistema la cual se utiliza en los siguientes pasos.
- Luego se calcula la tensión continua del sistema, se debe tener claro el tipo de sistema de tierra en la instalación, ya que para sistemas aislados la tensión continua es igual o mayor a la tensión máxima del sistema, mientras que para sistema sólidamente aterrizados es 1.25 veces igual o mayor que la tensión fase máxima del sistema.
- La tensión asignada se divide en dos y se toma el máximo valor de las dos tensiones asignadas que se describen a continuación:
 - La primera tensión asignada para sistemas aislados es 1.25 veces mayor o igual que la tensión línea máxima del sistema y para sistemas sólidamente aterrizados será $1.25 \cdot 1.05$ veces mayor o igual que la tensión fase del sistema.
 - La segunda tensión asignada es el cociente entre el valor de la sobretensión temporal (TOV) y factor de fuerza (Tr), el valor Tr corresponde a 1.075 para un tiempo de 10s según la IEC 60099-4 [7].
- Luego se busca en un catálogo de descargadores de sobretensiones, un dispositivo que cumpla con las tensiones calculadas y dependiendo de la elección del equipo se busca el nivel de protección del impulso de conmutación (Ups) y el nivel de protección de impulso rayo (Upl).

Como se muestra en la figura 4. el segundo paso de la selección de descargadores es la corriente nominal de descargador, se asume que el descargador se encuentra en un extremo de la línea abierta. En este paso se calcula el voltaje critico de flameo (CFO) para posteriormente calcular la corriente nominal del descargador.

- Para calcular el CFO se asume una desviación estándar entre 2% al 3% y el CFO será el cociente entre el BIL y la diferencia entre 1 y 1.28 veces la desviación estándar tomada.
- Luego se calcula la tensión de entrada que es 1.5 veces el CFO calculado.
- Por último, se calcula la corriente nominal el cual es dos veces la tensión de entrada menos la Upl sobre la impedancia de la línea.

El tercer paso, en la selección de descargadores, es el cálculo de la energía disipada en el descargador en presencia de descargas atmosféricas o de maniobras, este paso será clave para

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

determinar si el descargador seleccionado es el adecuado y así asegurar una buena protección a la subestación. En este paso se usan las tensiones calculadas durante toda la memoria de cálculo como son la U_{pl} y U_{ps} , también se usa la impedancia de línea. Cuando se tiene los valores de la energía disipada se compara este valor con la energía del descargador seleccionado y la condición para declarar que la selección de descargadores es la adecuada: es que la energía calculada sea menor a la energía del descargador seleccionado.

Procedimiento de la memoria de coordinación de aislamiento

El propósito de la coordinación de aislamiento es seleccionar el nivel de aislamiento normalizado para los equipos que se tienen en la subestación y así determinar las distancias mínimas en aire entre fases y entre fase y tierra que se deben cumplir para garantizar seguridad en la subestación eléctrica. Para realizar esta memoria se debe tener los parámetros de los descargadores de sobretensiones y conocer las características ambientales del lugar de la instalación. Esta memoria se divide en tres partes como se muestra en la figura 5:

Como se muestra en la figura 5 el primer paso en la memoria de coordinación de aislamiento es calcular los voltajes de las sobretensiones temporales, de frente lento y de frente rápido, cuando se obtiene estas sobretensiones se multiplican los voltajes de las sobretensiones por el factor de coordinación. A continuación, se describe el desarrollo del cálculo de las sobretensiones:

- En las sobretensiones temporales se tiene dos sobretensiones, las sobretensiones de falla a tierra y las sobretensiones de rechazo de carga, las cuales se describen a continuación:
 - De acuerdo con la norma IEC 60099-5 el voltaje de fase de la sobretensión de falla a tierra se define como 1.4 veces la tensión de fase del sistema [2].
- Para rechazo de carga se tiene voltajes de sobretensión tanto en fase como en línea, y se define como 1.2 veces la tensión de fase del sistema y 1.2 veces la tensión de línea del sistema respectivamente.

Se debe tomar un valor de voltaje de sobretensión de fase y otro valor de voltaje de sobretensión de línea para sobretensiones temporales y se toma de la siguiente manera:

- Para la sobretensión de fase se toma el máximo valor que se obtuvo entre la sobretensión de fase de falla a tierra y de rechazo de carga.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSION

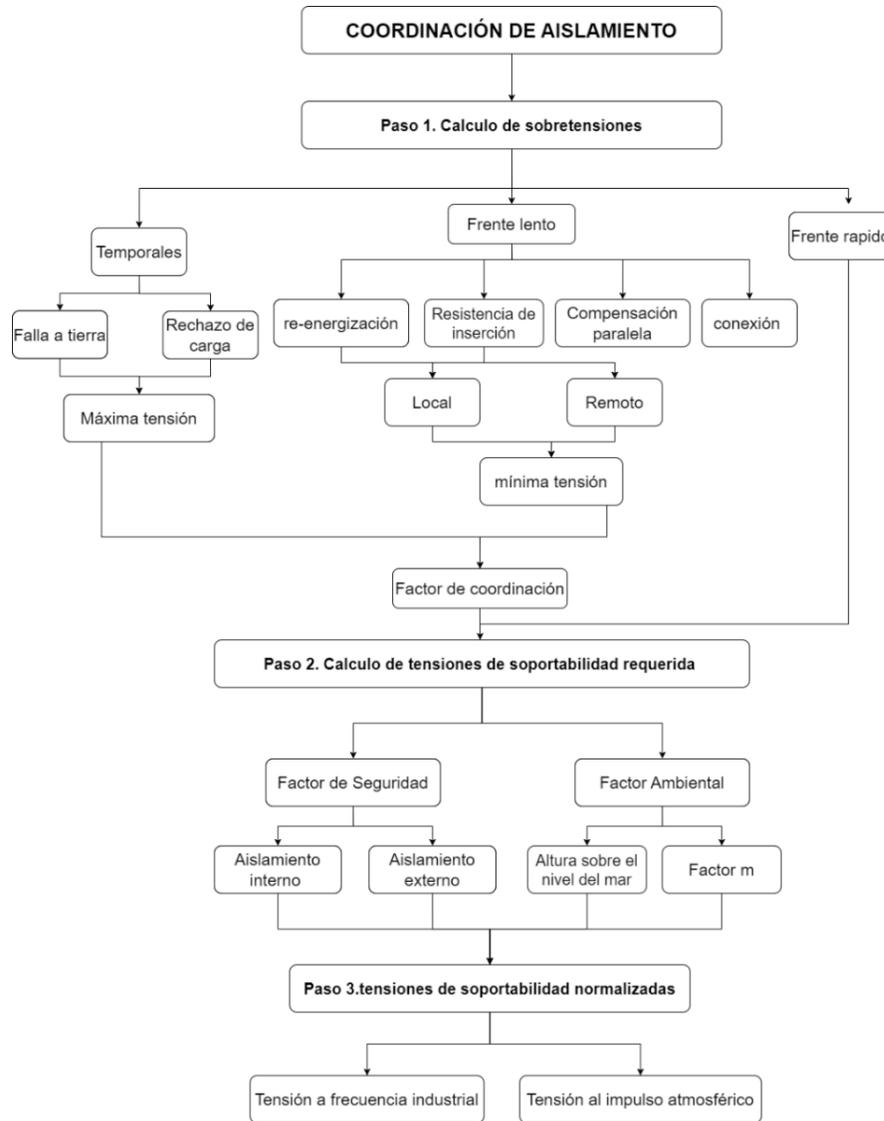


Fig 5. Gráfico de la memoria de coordinación de aislamiento.

- Para la sobretensión de línea se toma el valor de la sobretensión de línea calculada de rechazo de carga.
- La segunda sobretensión calculada es la sobretensión de frente lento, la cual se puede originar en fallas a tierra, o en la energización o re-energización de las líneas. Se tiene sobretensiones de frente lento remoto y local tanto de fase como de línea.
 - Para obtener las sobretensiones de frente lento de fase se utiliza la figura 6 en la cual se evalúa las condiciones de operación de re-energización, la resistencia de pre-inserción, la

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

alimentación y la compensación paralela, dependiendo de la configuración que se tenga en la instalación se formará un camino y así, se obtiene un valor de truncamiento de fase con probabilidad del 2%. En esta sobretensión se calcula sobretensión de frente lento local y remoto, para las sobretensiones local se toma el valor máximo obtenido en el camino de la figura 6 y para la sobretensión remota se toma el valor medio del valor que da el camino. Las sobretensiones generadas en el extremo local resultan ser menores a las sobretensiones generadas en el extremo remoto.

- Para obtener la sobretensión de frente lento de línea, se hace uso de la figura 7 en la cual dependiendo el valor encontrado en el paso anterior se encuentra el factor de sobretensión de frente lento de línea.

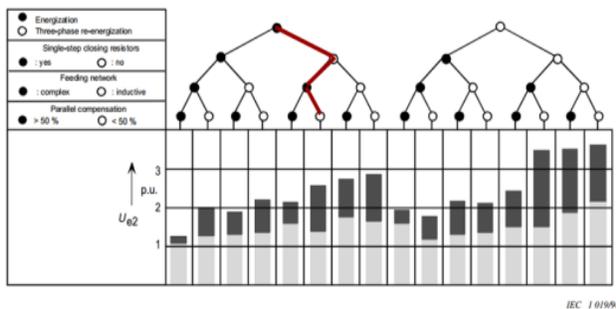


Fig 6. Rango del 2% para sobretensiones de frente a la entrada de la línea debido a su energización y re-energización.

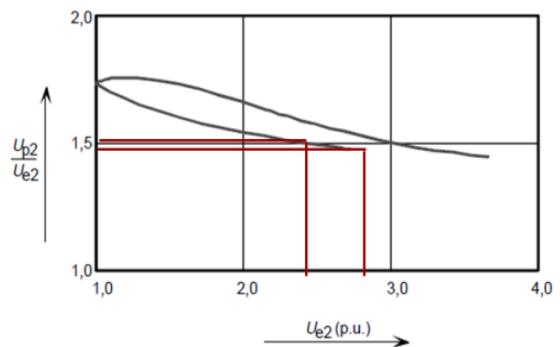


Fig 7. Relación entre los valores del 2% de las sobretensiones de frente lento fase-fase y fase-tierra.

El resultado de las sobretensiones de frente lento será cuatro, dos para fase (uno remoto y uno local) y dos para línea (una remoto y uno local), y para obtener estas cuatro sobretensiones se usa el siguiente criterio:

- Para las sobretensiones de frente lento de fase será el valor mínimo entre el nivel de protección del impulso de conmutación (U_{ps}) y el valor de truncamiento de frente lento de fase calculado.
- Para las sobretensiones de frente lento de línea será el valor mínimo entre dos veces el nivel de protección del impulso de conmutación (U_{ps}) y el valor de sobretensión de frente lento de línea calculado.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

- Cuando se obtiene los valores de tensiones de sobretensiones temporales y de frente lento, se procede a multiplicar cada una de las sobretensiones calculadas por el factor de coordinación que se puede ser estadístico o determinístico.
 - Para las sobretensiones temporales el factor será de uno ya que se considera que, la tensión de soportabilidad de coordinación es igual a la sobretensión representativas temporal.
 - Las sobretensiones de frente lento se obtienen mediante el uso de la figura 8 y las tensiones de coordinación resultante se obtiene multiplicando el factor por las tensiones de frente lento obtenidas anteriormente.

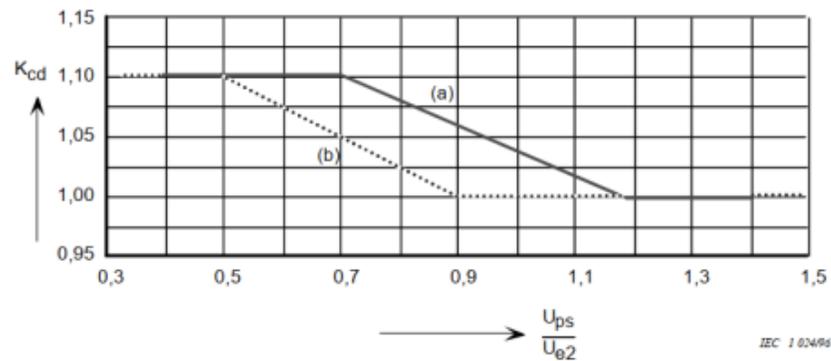


Fig 8. Selección de factores K_{cd} .

- El último cálculo de sobretensiones es la sobretensión de frente rápido y se necesita los parámetros como: el nivel de protección al impulso tipo rayo, número de líneas conectadas, separación equivalente interno y externo, la longitud del vano, la tasa de fallas. En esta sobretensión se encuentra dos valores de tensión, los cuales corresponden al aislamiento interno y al aislamiento externo.

Como se muestra en la figura 5, el segundo paso de esta memoria de cálculo son las tensiones de soportabilidad requeridas, se define como la multiplicación entre los factores de seguridad o de corrección ambiental y los valores de las sobretensiones calculados anteriormente.

- El factor de seguridad se define como 1.05 para aislamiento interno y 1.1 para aislamiento externo y se aplica para todas las sobretensiones calculadas.
- El factor de corrección ambiental se toma como base la altura sobre el nivel del mar y el factor m . Este factor solo se aplica al aislamiento externo.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

El último paso de esta memoria son las tensiones de soportabilidad normalizadas, para el nivel de tensión uno, el nivel de aislamiento es especificado por dos tensiones de soportabilidad: la tensión a frecuencia industrial y la tensión al impulso atmosférico. En la tabla 2 de la norma IEC 60071-2 [14] se menciona los factores de conversión que deben aplicarse a las tensiones de soportabilidad a impulsos de frente lento para convertirla en tensiones a frecuencia industrial o a impulso atmosférico, una vez se determine los factores de conversión se procede a calcular para cada tipo de sobretensión.

Por último, se hace una tabla resumen en el cual se muestra las tensiones a frecuencia industrial, impulso de maniobra y al impulso atmosférico, con el fin de observar los mayores valores de sobretensiones obtenidas. Con los resultados obtenidos en esta memoria se procede a obtener las distancias de mínimas de seguridad, las cuales se obtiene de la tabla A.1 de la norma IEC 60071-2 [14].

Procedimiento de la memoria de distancias de seguridad

El objetivo de la memoria de distancias de seguridad es calcular la separación que deben mantenerse en el aire entre partes energizadas de diferentes equipos y entre estas y tierra, así como en equipos donde es necesario realizar algún tipo de mantenimiento. También se consideran las distancias entre los equipos energizados y los cerramientos de las subestaciones. En la figura 9 se muestra las distancias que se calculan en esta memoria.

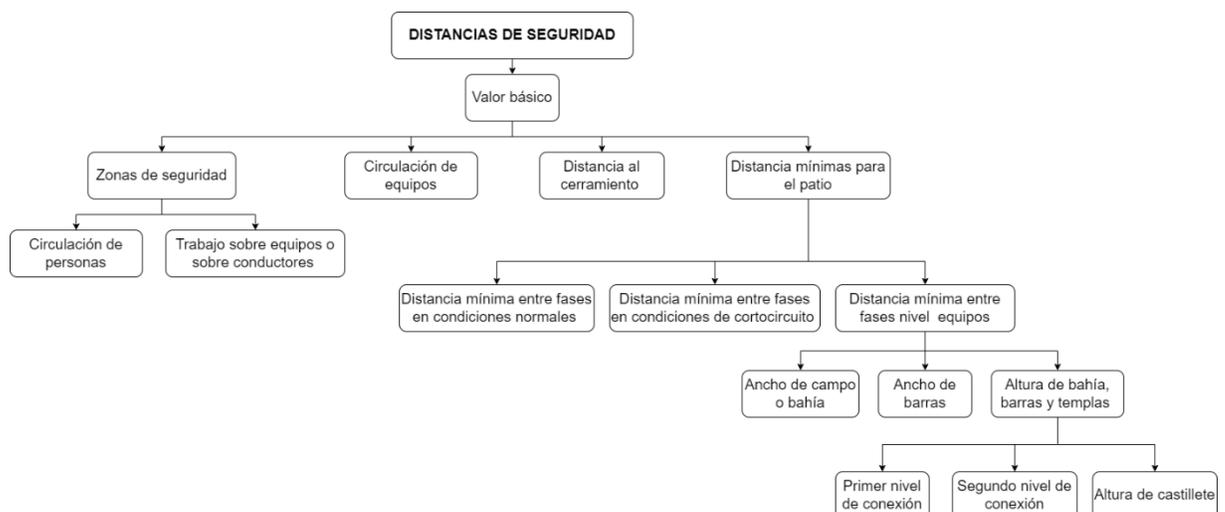


Fig 9. Gráfico de la memoria de distancias de seguridad.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

Los parámetros necesarios para el cálculo de las distancias de seguridad son los resultados de la memoria de coordinación de aislamiento y se selecciona con base en los niveles de aislamiento de la subestación establecidos por las normas IEC 60071-1 [8] e IEC 60071-2 [14]. A continuación, se describe los pasos en una memoria de distancias de seguridad como muestra la figura 9 :

- Se empieza calculando el valor básico, el cual está definido por las distancias mínimas de seguridad: fase-fase, fase-tierra, punta-estructura, conductor-estructura (o conductor-conductor); más un factor de seguridad del 10%.
- Luego se calcula las zonas de seguridad, se obtiene adicionando el valor básico calculado, un valor promedio de la altura del personal que realiza el mantenimiento en la subestación. En este paso se calcula la circulación de personas y la distancia de trabajo sobre equipos o sobre conductores y se calcula de la siguiente manera:
 - Para el cálculo de circulación de personas se considera la suma entre el nivel básico y la altura promedio de los operadores, se considera 2.25m de altura promedio del operador, teniendo en cuenta la altura de un hombre parado en el piso con los brazos levantados según la norma IEC 61936-1 [22].
 - Para el cálculo de la distancia de trabajo sobre equipos o sobre conductores, esta distancia comprende el valor básico más un valor que será determinado por la posición del operador. El factor que se le adiciona al valor básico será: Para la distancia horizontal será de 1.75m, que corresponde a las dimensiones promedio de un operador con los brazos extendidos, y para distancias verticalmente será de 1.25 que corresponde al operador ubicado sobre un equipo con los brazos extendidos verticalmente.
- Para la circulación de vehículos corresponde a la zona de seguridad delimitada por el perfil de un vehículo (altura máxima 4.5 m y ancho máximo de 2.6 m) mas 1 m de ancho para permitir imprevistos en la conducción más el valor básico.
- La distancia de cerramiento, son los cercos en malla que son instalados como barreras para el personal no autorizado, este valor es determinado dependiendo del reglamento de cada país y del valor de tensión nominal de la subestación.
- Las distancias mínimas para el patio se dividen en dos partes en: las distancias mínimas entre fases en condiciones normales y en condiciones de cortocircuito se describen a continuación:
 - Las distancias mínimas entre fases en condiciones normales están determinadas por el desplazamiento de los conductores debido a la acción del viento y está dada por suma entre

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

- la distancia mínima entre fase y dos veces la flecha máxima y el seno del ángulo que se forma.
- Las distancias mínimas entre fases en condiciones de cortocircuito se ha considerado un desplazamiento máximo de 40° del conductor respecto a la vertical y asumiendo una elongación de un 20% del mismo debido a los efectos de cortocircuito.
 - La última distancia de calcula es la distancia de patio, en la cual se obtiene el ancho de campo o bahía, el ancho de las barras y las alturas de bahía, barras y templas.
 - El ancho de campo o bahía se determina como la distancia de separación entre los ejes de las columnas el pórtico de entrada de las líneas.
 - El ancho de barras está determinado por la separación entre las fases de las barras.
 - La altura de los pórticos de bahía está determinada principalmente por el tipo de conductor que se utiliza, así como también por el número de niveles de conexión que requiere la configuración de la subestación. El primer nivel de conexión corresponde al nivel de conexión entre equipos y se determina por el valor básico y la zona de seguridad. El segundo nivel de conexión corresponde al nivel de la barra principal y se calcula como la suma del valor del primer nivel, el valor básico, la distancia de mantenimiento y la flecha del vano.

Procedimiento de cargabilidad de CT's y PT's

El objetivo de la memoria de cargabilidad de transformadore de corriente (CT's) y de transformadores de tensión (PT's) es verificar las condiciones de operación de los equipos con el fin de que estos transformadores estén dentro del rango de operación de la capacidad en VA para la subestación.

En la figura 7 se puede observar el procedimiento de la cargabilidad en los transformadores de corriente. Pará calcular la cargabilidad de los transformadores de corriente se debe realizar los siguientes pasos:

- El primer paso será la corriente del primario la cual se selecciona de tal forma que el valor de la corriente nominal a plena carga este comprendida entre el 80% y el 120% de la corriente a carga máxima. También se debe establecer la corriente del secundario, el burden y la clase.
- Se procede a hacer la evaluación de la cargabilidad de los núcleos de medida, en este paso se debe hacer una serie de cálculos de las cargas de los equipos y conexiones que se tiene, a continuación, se describe:

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

- El primer componente es la carga de los instrumentos de medida, control y protección, este valor se encuentra en las especificaciones técnicas de los instrumentos.
- Otro cálculo que se debe realizar en este paso es estimar las pérdidas que se producen en las terminales, de acuerdo con la norma IEC 60947-1 [21], la caída de tensión en las terminales es de 3.2 mV y se considera un total de 3 borneras en el recorrido del circuito de corriente.
- Otro factor que interesa en este paso es la carga debido a los cables de conexión y se define como el producto de la corriente que circula por el cable al cuadrado, la resistencia y la longitud del cable.

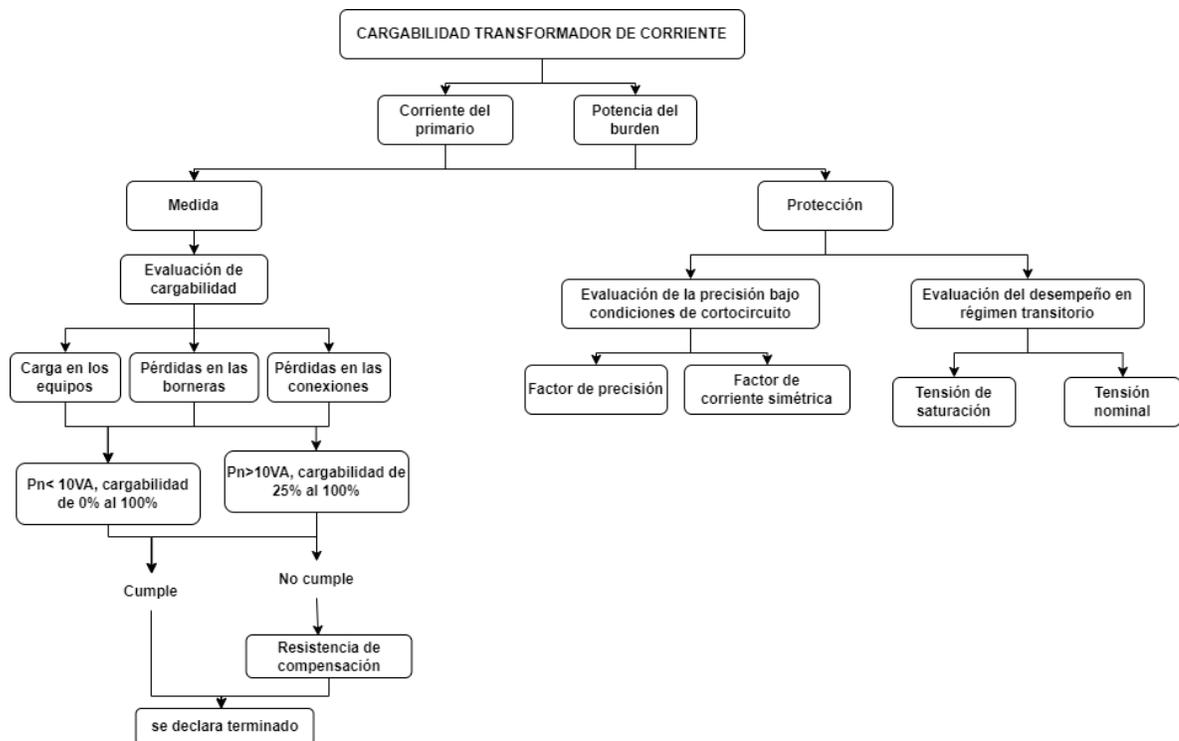


Fig 10. Cargabilidad de los transformadores de corriente.

Luego sumando todos los consumos descritos anteriormente se procede a calcular el porcentaje entre los consumos calculados y la potencia nominal del burden del CT estudiado. Se debe cumplir una de las dos condiciones para declarar que este punto ya ha terminado y estas condiciones se explican a continuación:

1. Cuando la potencia del burden es menor al 10VA, la cargabilidad del CT debe estar entre el 0% al 100%.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

2. Cuando la potencia del burden es mayor al 10VA, la cargabilidad del CT debe estar entre el 25% al 100%.

Pero si no se cumple una de las condiciones mencionadas anteriormente, se procede a calcular el valor de una resistencia de compensación, el procedimiento para calcular la resistencia de compensación es la siguiente: Se debe calcular primero la potencia requerida a compensar, el cual se define como la resta entre el 0.25 de la potencia del burden y la suma de los consumos de los equipos de medida, luego con esa potencia calculada se divide por el cuadrado de la corriente del secundario para así obtener la resistencia de compensación. Con esta resistencia de compensación se garantiza la cargabilidad deseada.

- Otro punto importante en la cargabilidad en los CT's es la evaluación de la precisión del equipo bajo condiciones de cortocircuito, en este paso se debe comprobar que el factor de precisión sea mayor o igual al factor de corriente simétrica de cortocircuito asignada.
 - Se define como factor de precisión a la multiplicación entre el factor límite de precisión (este factor especifica cuantas veces la corriente nominal se empieza a presentar en saturación) y la suma de la potencia nominal más la potencia asociada a la resistencia interna, el termino descrito anteriormente se divide sobre la suma de la potencia total y la potencia asociada a la resistencia interna.
 - El factor de corriente simétrica es la división entre la corriente de cortocircuito y la corriente del primario del CT.
- El último paso en los CT es la evaluación del desempeño en régimen transitorio. De acuerdo con la norma IEC 61869-2 [18], se debe evaluar el desempeño del transformador de corriente cuando está sometido a una corriente de falla varias veces la corriente nominal. Se considera que el desempeño del CT es satisfactorio si la máxima corriente de falla simétrica multiplicada por la carga del secundario total es menor que la relación entre la tensión de saturación V_r y el factor $i_p(b)/I_k \text{ max}$.
 - De acuerdo con la norma IEC 60909-0 [17], la relación entre la corriente de corto circuito inicial simétrica I_k y la corriente de corto circuito pico (dinámica) i_p es la multiplicación de 1.15, un factor k y la raíz de dos veces la corriente del cortocircuito.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

- El factor k que se habla en el punto anterior depende de la relación $\frac{R}{X}$ del circuito y se define como la suma entre 1.023 y 0.98 de la exponencial de la relación $\frac{R}{X}$.
- Para calcular la tensión nominal se debe conocer la corriente secundaria, la potencia nominal del transformador de corriente, la resistencia interna y el factor límite de precisión.
- La corriente de saturación se debe tener la corriente del secundario, la resistencia de carga en CT, la resistencia interna y el factor de corriente simétrica asignada.

Para calcular la cargabilidad de los transformadores de tensión se debe realizar los siguientes pasos que se muestran en la figura 11 y se describen a continuación:

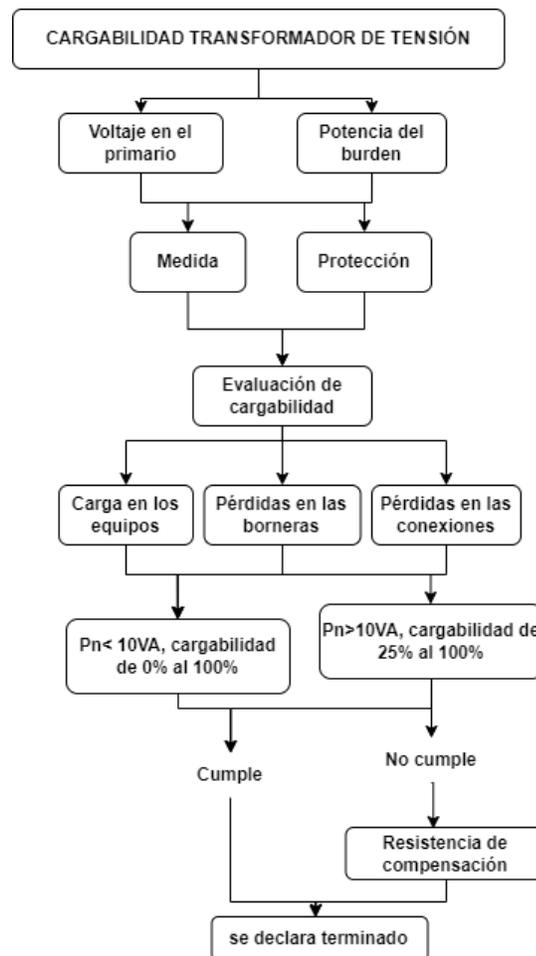


Fig 11. Cargabilidad de los transformadores de tensión.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

- El primer paso será la tensión del primario del TP, esta será la tensión de fase nominal del sistema, también se define la tensión del secundario del transformador que será de $110/\sqrt{3}$ V; de igual forma se selecciona la potencia del burden y la precisión.
- Se procede a hacer la evaluación de la cargabilidad de los núcleos de medida de igual manera que se hizo en los transformadores de corriente, sumando la potencia individual consumida por cada uno de los instrumentos de medida, control y relés de protección conectados, también se debe tener en cuenta la potencia consumida en las conexiones.
- Para el cálculo en los núcleos de protección de los PT's se hace el mismo procedimiento que en la evaluación de la cargabilidad de los núcleos de medida.

Caso de estudio

La subestación eléctrica a la que se le realiza la ingeniería básica primaria electromecánica es una subestación elevadora barra sencilla, la cual cuenta con dos bahías de línea y una bahía de transformación. El objetivo de realizar esta subestación es aumentar el voltaje que se genera de una planta solar a 22.9 kV para luego pasar por la subestación y salir a dos líneas de 138 kV. El sistema de puesta a tierra que se tiene en la subestación es sólidamente aterrizado y las características ambientales del lugar de la subestación se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características ambientales de la ubicación de la subestación eléctrica 138/22.9 kV.

Descripción	Unidad	Valor
Altura sobre el nivel del mar	msnm	1170
Temperatura Mínima	°C	9,8
Temperatura Media anual, °C	°C	18,15
Temperatura Máxima	°C	26,5
Humedad Promedio mensual	%	80
Humedad Máxima promedio mensual	%	87.39
Nivel ceráuneo	Día/año	40
Nivel de contaminación ambiental	-	Muy pesado
Intensidad de radiación solar	kWh/m2/día	6.55
Zona de amenaza sísmica	-	Alta

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

Selección de descargadores

Para realizar esta memoria se hace uso de la siguiente normativa: IEC 60099-5 del 2018 [3], IEC 60099-4 del 2014 [4], IEC 60071-2 del 2008 [14], IEC 60815-2 del 2008 [15], IEC 60815-3 [16]. Para la selección de descargador se toma de la tabla 2 de la norma IEC 60071-1 la tensión máxima de los equipos que para el nivel de 138 kV es de 145 kV y para el nivel de 22.9 kV de 24 kV, la tensión máxima de los equipos se toma de acuerdo de la tensión nominal del sistema y debe ser un valor por encima de la tensión nominal. La tensión máxima de los equipos dará el valor del BIL y BSL, como se muestra en la figura 12, el cual se comprueba en coordinación de aislamiento si es el adecuado.

Tension la plus élevée pour le matériel (U_m) kV (valeur efficace)	Tension de tenue assignée normalisée de courte durée à fréquence Industrielle kV (valeur efficace)	Tension de tenue assignée normalisée au choc de foudre kV (valeur crête)
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
17,5 *	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52 *	95	250
72,5	140	325
100 *	(150)	(380)
	185	450
123	(185)	(450)
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170*	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1 050

NOTE Si les valeurs entre parenthèses sont considérées comme insuffisantes pour

Fig 12. Tabla de Tensión máxima de los equipos, Rango I de la norma IEC 60071-1

Las tensiones calculas que se deben tener en cuenta en esta memoria se puede observar en la Tabla 2.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

Tabla 2. Tensión resumen de las tensiones calculadas.

Descripción	Nivel 138 kV	Nivel 22,9 kV
U_{system} [kV]	144,9	24,045
U_c [kV]	87,90	14,58
U_{R1} [kV]	109,88	18,22
U_{R2} [kV]	109,03	18,08
U_R	109,88	18,22
U_R <i>normalizada</i>	120	21

Con los resultados obtenidos en la tabla. se procede a buscar en el catálogo de ABB un descargador de sobretensiones que cumpla con los valores mínimos que debe tener el dispositivo. Para el nivel de tensión de 138 kV se toma un descargador de óxido de zinc de referencia TEXLIM Q-C. Para el nivel de tensión de 22.9 kV se toma el descargador del catálogo de ABB de óxido de zinc de referencia PEXLIM R-Y.

Cuando se ha seleccionado el descargador se busca para cada nivel de tensión el nivel de protección del impulso rayo y el nivel de protección del impulso de conmutación, estos valores se seleccionan dependiendo de la tensión máxima de equipos, la tensión asignada y la tensión continua que se calcularon anteriormente. Para el nivel de tensión de 138 el nivel de protección de impulso rayo corresponde al valor 282 kV y el nivel de protección del impulso de conmutación corresponde al valor de 237 kV. Para el nivel de tensión de 22.9 kV el nivel de protección de impulso rayo corresponde al valor 54.4 kV y el nivel de protección del impulso de conmutación corresponde al valor de 44.9 kV.

Después de haber seleccionado el descargador y encontrado las tensiones U_{pl} y U_{ps} se procede a calcular la corriente del descargador. Como se puede observar en la Tabla 3 la corriente que se calcula es menor que la corriente que puede soportar el DPS entonces se puede seguir con el cálculo de la energía disipada.

Tabla 3. Resultados de corriente y energía para DPS para los niveles de tensión de 138 kV y 22.9 kV.

Descripción	Para 138 kV	Para 22.9 kV
CORRIENTE		

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

Calculada [kA]	9.338	1.746
Del DPS seleccionado [kA]	10	10
ENERGÍA		
Energía acumulada por sobretensión tipo rayo	520.59	17.52
Energía acumulada por sobretensión tipo maniobra	253.19	7.09
Clasificación de energía térmica por sobretensión tipo rayo	4.34	0.88
Clasificación de energía térmica por sobretensión tipo maniobra	2.11	0.36

En la Tabla 3 se puede observar el resultado de la energía acumulada tanto para sobretensiones tipo rayo y tipo maniobra, en este paso se debe comparar la energía calculada con la energía que puede soportar el DPS seleccionado. Para el nivel de 138 kV la energía que puede soportar el descargador seleccionado es de 8 kJ/kV y el máximo valor de energía calculado es de 4.34 kJ/kV. Para el nivel de 22.9 kV la energía que puede soportar el descargador seleccionado es de 5 kJ/kV y el máximo valor de energía calculado es de 0.88 kV. Como la energía calculada de ambos descargadores de sobretensiones es menor a la energía que soporta de los dispositivos seleccionados entonces se puede concluir que se ha terminado la memoria.

Coordinación de aislamiento

Para realizar la memoria de coordinación de aislamiento se hace uso de la siguiente normativa: IEC 60071-1 del 2018. [8], IEC 60071-2 del 2008 [14], IEC 60099-5 del 2018 [3]. Para realizar esta memoria se debe tener los datos de los descargadores de sobretensiones que se calcularon anteriormente para poder obtener los voltajes de cada una de las sobretensiones. Primero se calcula las sobretensiones temporales tanto como falla a tierra como de rechazo de carga y luego se procede a calcular las sobretensiones de frente lento.

Para este caso las tensiones de sobretensiones de falla a tierra y rechazo de carga se muestra en la Tabla 4. Como se explica en la metodología de coordinación de aislamiento el valor de la sobretensión fase-tierra que se toma es el máximo valor entre las sobretensiones por falla a tierra y rechazo de carga de fase- tierra; para el caso del valor de la sobretensión fase-fase se toma el valor de rechazo de carga de fase-fase.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

Tabla 4. Resultados de las sobretensiones representativas.

Definición	Unidad	138 kV	22,9 kV
Sobretensión representativa fase-tierra por falla a tierra	kV r.m.s.	117,20	19,40
Sobretensión representativa fase-tierra por rechazo de carga	kV r.m.s.	100,46	16,63
Sobretensión representativa fase-fase por rechazo de carga	kV r.m.s.	174,00	28,80
RESULTADO DE LA SOBRETENSION REPRESENTATIVA			
Definición	Unidad	138 kV	22,9 kV
Sobretensión representativa fase-tierra temporal	kV r.m.s.	117,20	19,40
Sobretensión representativa fase-fase temporal	kV r.m.s.	174,00	28,80

Para obtener el valor del truncamiento de fase-tierra se hace uso de la figura 6 para esta subestación las condiciones de operación son: re-energización, resistencia de reinserción, una red de alimentación compleja y ninguna compensación en paralelo, se obtiene el valor de la sobretensión de frente lento remoto y local. Para obtener el valor del truncamiento de fase-fase hace uso de la figura 7 y del parámetro encontrado en la sobretensión anterior. Para obtener el valor de la sobretensión de frente lento como se explica en la metodología se debe tomar el valor mínimo comparado con Ups que se obtuvo en la selección de descargadores, este valores se ven reflejados en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultado de las sobretensiones de frente lento.

Definición	Unidad	138 kV	22.9 kV
Sobretensión de frente lento fase-tierra, extremo remoto	kV pico	237	44.90
Sobretensión de frente lento fase-tierra, extremo local	kV pico	237	44.90
Sobretensión de frente lento fase-fase, extremo remoto	kV pico	474	89.80
Sobretensión de frente lento fase-fase, extremo local	kV pico	474	80.63

Como ya se tiene las sobretensiones representativas se procede aplicar el factor de coordinación, para las sobretensiones temporales se multiplica por uno mientras que para las sobretensiones de frente lento se hace uso de la figura 8 y el resultado de esta sobretensiones son los que muestran en la Tabla 6.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

Tabla 6. Resultado de coordinación de voltaje para cada sobretensión.

Definición	Unidad	Valor	Valor
Coordinación de voltajes de resistencia de equipos fase tierra	kV r.m.s.	117.20	19.40
Coordinación de voltajes de resistencia de equipos fase fase	kV r.m.s.	174,00	28,80
Coordinación de voltajes de resistencia de equipos fase-tierra remoto	kV r.m.s.	260.70	48.53
Coordinación de voltajes de resistencia de equipos fase-fase remoto	kV r.m.s.	474	89.80
Coordinación de voltaje de resistencia de equipos fase-tierra local	kV r.m.s.	253.94	46.96
Coordinación de voltaje de resistencia de equipos fase-fase local	kV r.m.s.	474.00	80.68

Solo falta el resultado de las sobretensiones de frente rápido, se hará las siguientes suposiciones: la tasa de fallas aceptable por el equipo para ambos niveles de tensión es de 0.0025 fallas/año, y la tasa de fallas por año del primer kilómetros será de 0.01 fallas/año/km. Se tiene la coordinación de frente rápido.

Tabla 7. Coordinación de voltajes de frente rápido.

Descripción	Unidad	138 kV	22.9 kV
Coordinación de voltajes de resistencia de equipos (aislamiento interno)	kV r.m.s.	482	64.4
Coordinación de voltajes de resistencia de equipos (aislamiento externo)	kV r.m.s.	482	64.40

Como ya se tiene todos los valores de coordinación el siguiente paso es calcular las tensiones requeridas, en este paso se hace uso de los factores de seguridad y de corrección por altura. Y por último se realiza las tensiones de soportabilidad normalizadas, con el objetivo de buscar el nivel de aislamiento especificado por las tensiones de soportabilidad a tensión a frecuencia industrial y la tensión al impulso, el resultado de esta se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultado de los voltajes a frecuencia industrial, impulso de maniobra e impulso atmosférico.

		Aislamiento externo				Aislamiento interno	
		Equipos entrada de línea		Otros equipos			
*kV r.m.s para frecuencia industrial	*kV Pico para impulsos de maniobra y rayo	Urw(s)	Urw(c)	Urw(s)	Urw(c)	Urw(s)	Urw(c)
Frecuencia industrial	Fase-tierra	132,22	206,30	132,22	195,82	134,78	146,01
	Fase-fase	196,30	370,71	196,30	370,71	200,10	272,55
Impulso de maniobra	Fase-tierra	323,34		307,80		292,03	

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

	Fase-fase	574,53		574,53		545,10	
Impulso atmosférico	Fase-tierra	584,23	356,93	584,23	338,98	554,30	321,23
	Fase-fase	584,23	639,93	584,23	639,93	554,30	599,61

El resultado que se obtiene en esa memoria y lo establecido en la norma IEC 60071-2 las distancias mínimas que se deben tener en la subestación y estas distancias se registran en la Tabla 9.

Tabla 9. Distancias mínimas.

Localización		LIWL [kv pico]	Distancia mínima [mm]	LIWL [kv pico]	Distancia mínima [mm]
		138 kv		22,9 kv	
Equipo a la entrada de la línea	Fase- fase	650	1300	145	270
	Fase- Tierra				
	Punta-Estructura Conductor- estructura	650	1300	145	270
Otros equipos	Fase-fase	650	1300	145	270
	Fase-Tierra				
	Punta- Estructura Conductor- estructura	650	1300	145	270

Distancias mínimas de seguridad

Para esta memoria se hace uso de la norma IEC 61936-1 del 2010 [9] y del libro de HMV titulado Subestaciones eléctricas de alta y extra alta tensión [6]. Con los valores calculados de descargadores y coordinación de aislamiento se puede realizar la disposición física de la subestación y así verificar las distancias mínimas y de seguridad, se debe aclarar que las distancias calculadas deben ser menores a la distancias con las que se diseña.

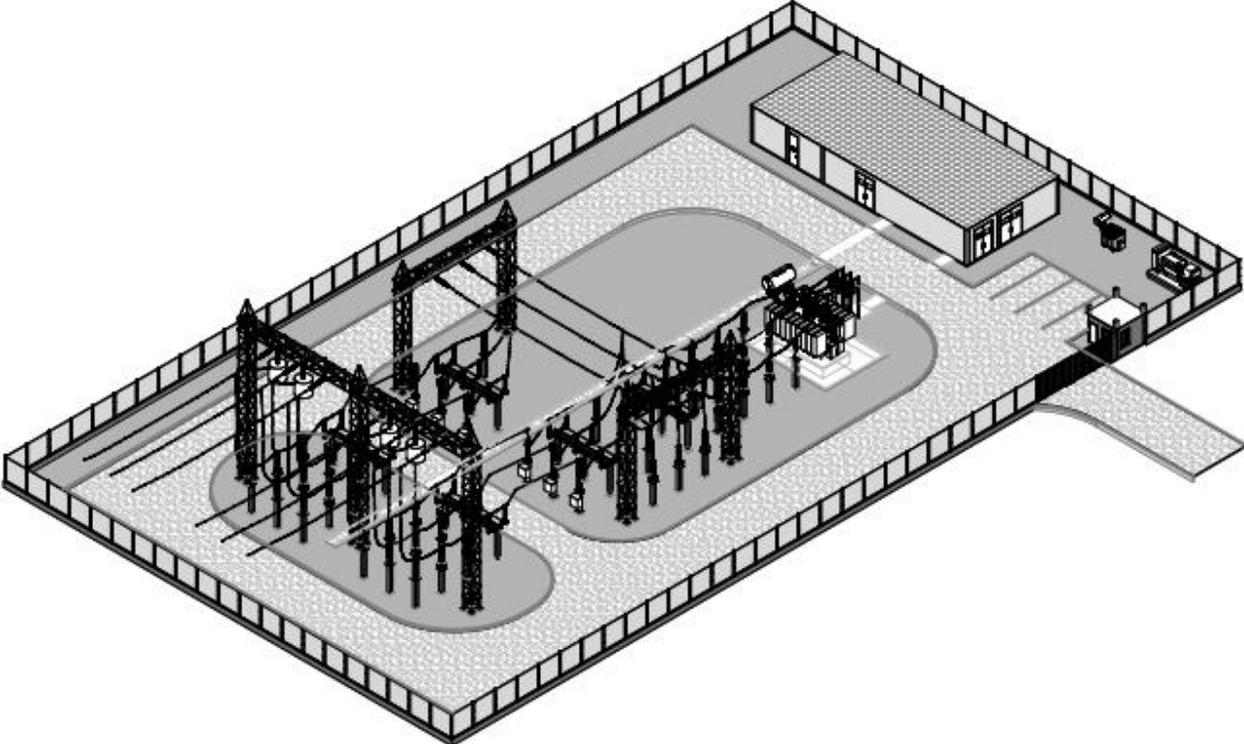


Fig 13. Disposición física en 3D.

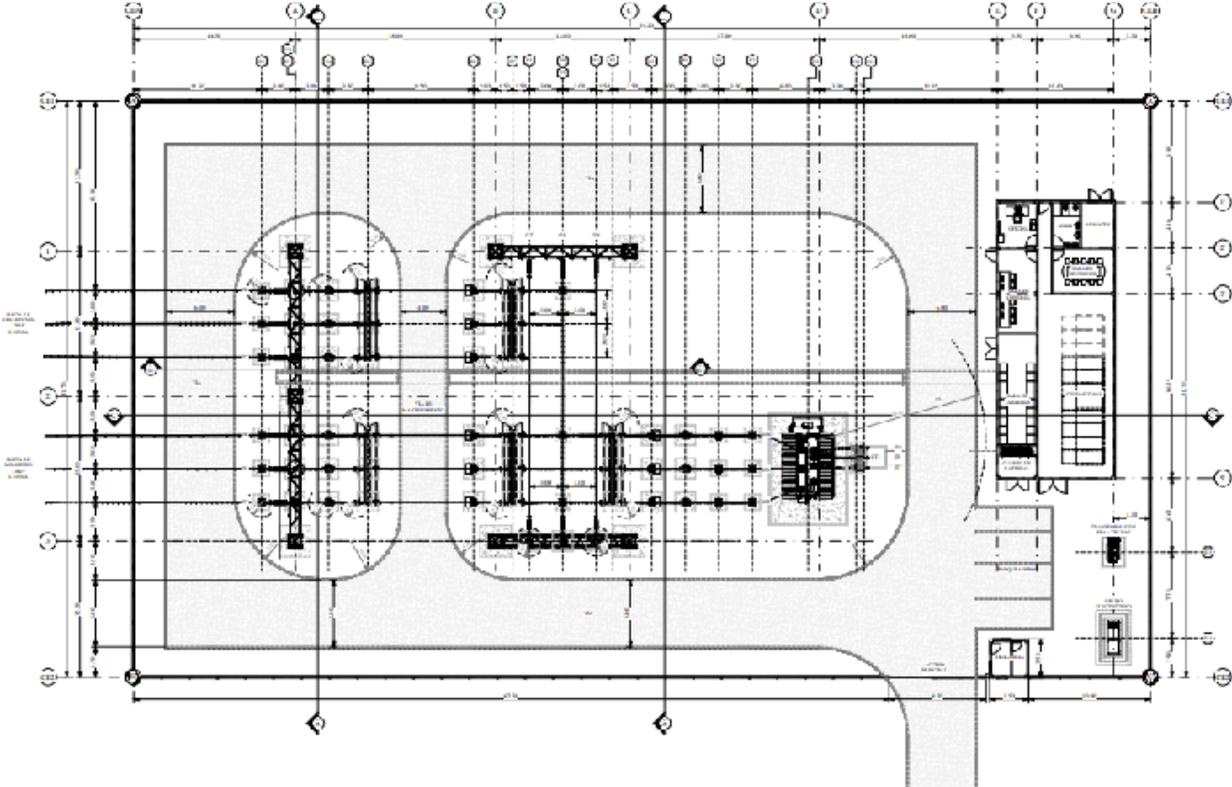


Fig 14. Disposición física en 2D.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

Las distancias calculadas se ven en Tabla 10

Tabla 10. Distancias de calculadas.

Descripción		Valores de distancias
		138 kV
Distancia fase-fase mínima		1300
Distancia fase-tierra mínima		1300
Valor básico (VB)		1430
Circulación de vehículos (vía principal de acceso)		6930
Circulación de vehículos (vías secundarias)		4930
Distancia al cerramiento		4200
Distancia fase-fase	Condiciones normales	1688
	Condiciones de corto circuito	2457
Ancho de bahía		8600
Distancia de seguridad Primer nivel de conexión		3680
Distancia de seguridad Segundo nivel de conexión		7610
Largo de bahía de transformación		14500
Largo de bahía de línea		22500

Ahora se muestra las distancias de seguridad tanto para primer, segundo y tercer nivel de conexión como también el valor del valor básico. En la Fig 15 el primer nivel esta señalado por las siglas PNC, el segundo nivel esta señalado por las siglas SNC y el tercer nivel esta señalado como TNC.

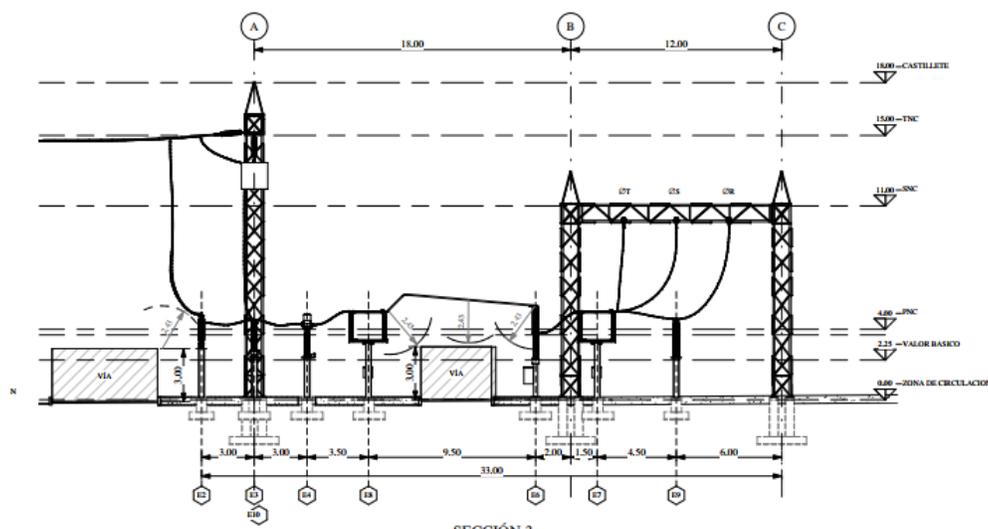


Fig 15. Niveles de conexión.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

Cargabilidad de CT's y PT's

Para la memoria de cargabilidad se hace uso de la siguiente normativa: IEC 60909-0 del 2016 [17], IEC 61869-2 del 2012 [18], IEC 61869-4 del 2013 [19], IEC 61869-5 del 2011 [20], IEC 60947-7-1 del 2009 [21], IEC 61869-1 del 2007 [22]. Para realizar esta memoria de cálculo el cliente da algunas especificaciones de los equipos, estas especificaciones son: La corriente en el secundario de los transformadores de corriente debe ser de 1 A y el burden de los transformadores debe ser de 10 VA. Para realizar esta memoria es necesaria la corriente de corto circuito y la corriente nominal.

Para el nivel de tensión de 22.9 kV la corriente nominal es de 355.48 A y la corriente de corto es de 10 kA, la longitud crítica se considera de 96 m. Para el nivel de tensión de 138 kV la corriente nominal es de 188,2 A y la corriente de corto es de 14 kA, para este nivel de tensión la longitud crítica se considera de 24 m.

Los CT's que se consideran para este proyecto son los siguientes, Tabla 11:

Tabla 11. Características de los CT's.

Transformador de corriente	Núcleo	Clase de precisión	Factor límite de precisión	Burden [VA]	Relación [A]
CT de 138 kV	N1	0,2	-	10	400-200:1
	N2	5P	20	10	400-200:1
	N3	5P	20	10	400-200:1
	N4	5P	20	10	400-200:1
Bahía de Transformador 138/ 22,9 kV	N1	0,2	-	10	400-200:1
	N2	5P	20	10	400-200:1
	N3	5P	20	10	400-200:1
	N4	5P	20	10	400-200:1
CT's de 22.9 kV	N1	0.2	-	10	600:1
	N2	5P	20	10	600:1
	N3	5P	20	10	600:1
	N4	5P	20	15	600:1

Para los PT's se tiene, Tabla 12:

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSION

Tabla 12. Características de los PT's

Transformador de Tensión	Núcleo	Clase de precisión	Burden [VA]	Relación [V]
Pt's de 138 kV	N1	0,2	10	$138k/\sqrt{3} : 110/\sqrt{3}$
	N2	3P	10	$138k/\sqrt{3} : 110/\sqrt{3}$
PT's de 22.9kV	N1	0,2	10	$22,9k/\sqrt{3} : 110/\sqrt{3}$
	N2	3P	10	$22,9k/\sqrt{3} : 110/\sqrt{3}$

El objetivo de las memorias anteriores es realizar el diagrama unifilar de la subestación, el cual se muestra en la figura 16.

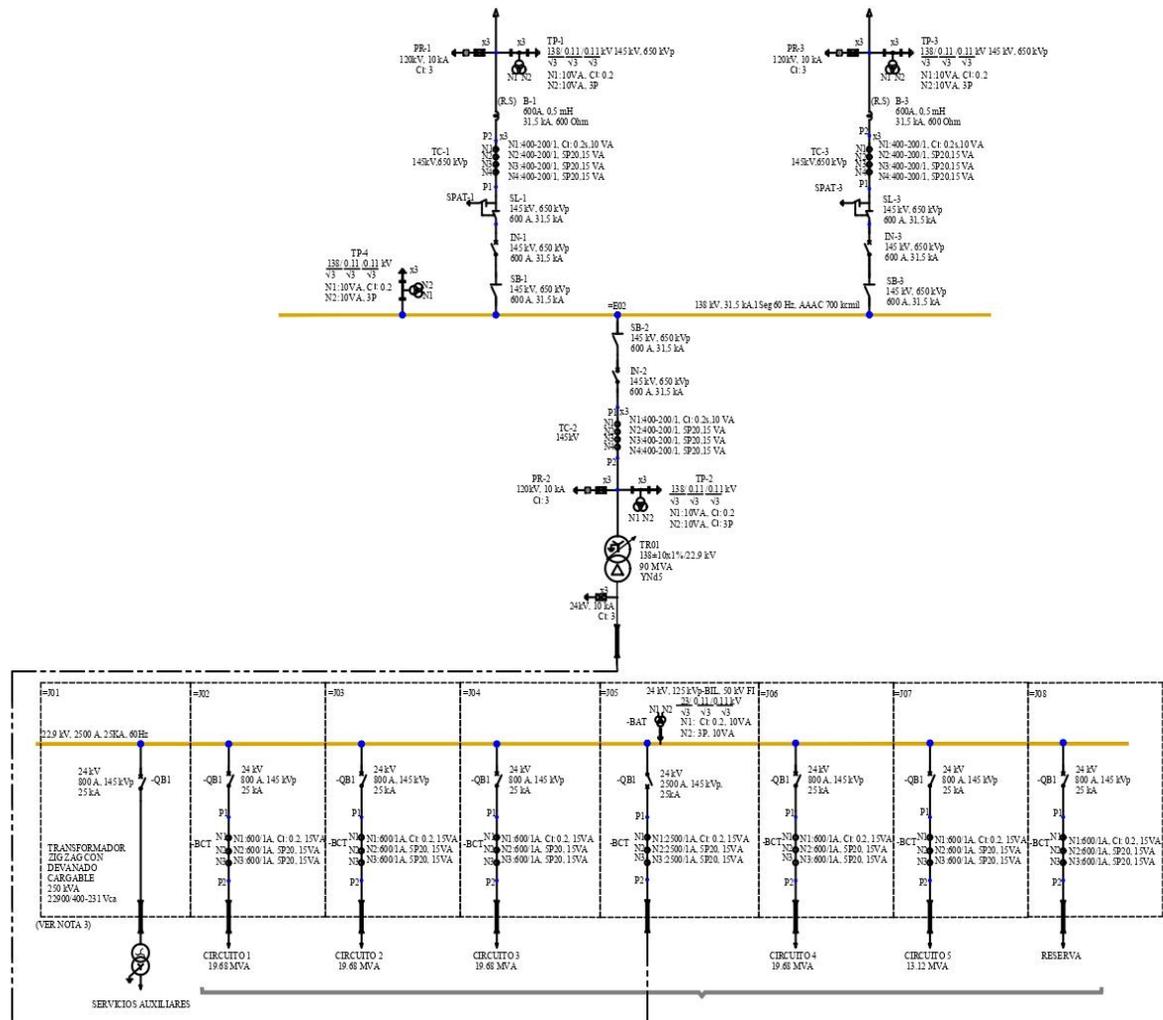


Fig 16. Diagrama unifilar de la subestación 138/22.9 kV.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

Se hará un zoom para poder observar cada uno de los elementos que se tienen en el diagrama unifilar de la subestación.

En la figura 17 se ilustran las dos líneas de 138 kV que tienen cada una un descargador de sobretensiones, un transformados de tensión; luego se encuentra la trampa de onda, después, el transformador de corriente, el cual tiene 4 núcleos, después, el seccionador con cuchilla de puesta a tierra, luego el interruptor de potencia y, por último, se encuentra el seccionador.

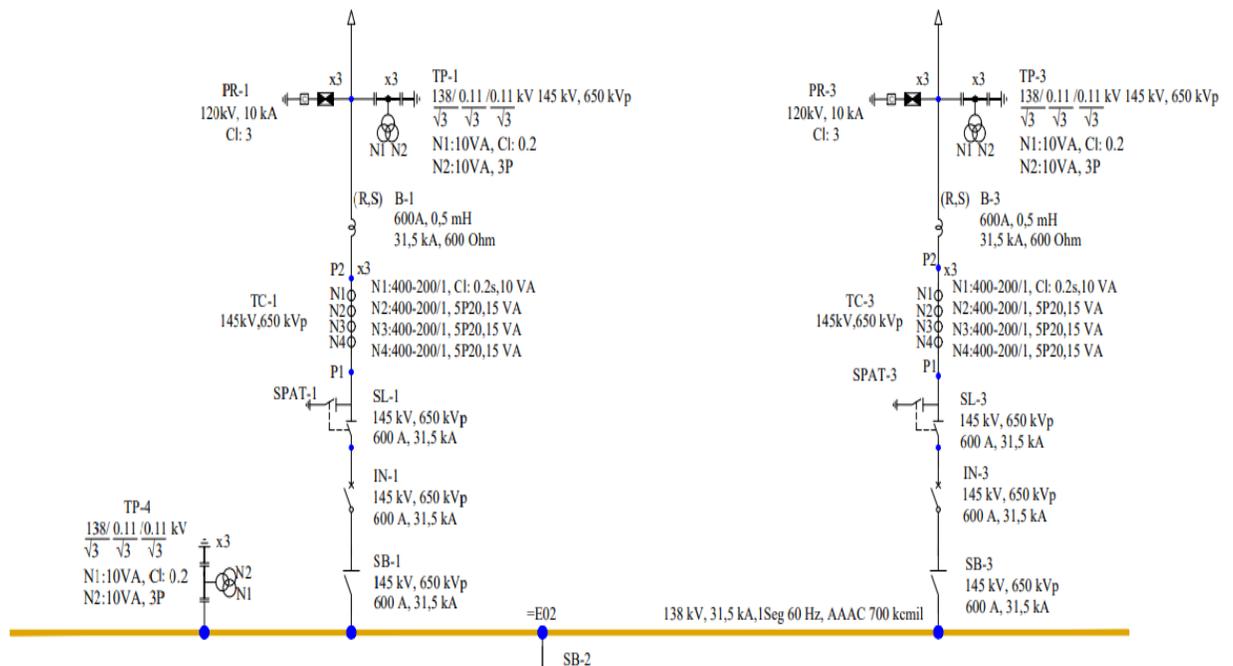


Fig 17.Zoom del Diagrama unifilar en la barra de 138 kV.

Entre la barra de 138 kV y 22.9 kV se encuentra el seccionador, el interruptor y el transformador de corriente; después, el DPS y el transformador de tensión ambos conectados a tierra; después, el transformador de potencia el cual tiene una potencia de 90 MVA, una conexión YNd 5 y una relación de transformación de 138/ 22.9 kV. En el lado de media tensión, se tiene un DPS de 24 kV, por último, se tiene un cablea aislado que llega hasta la barra de 22.9 kV.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

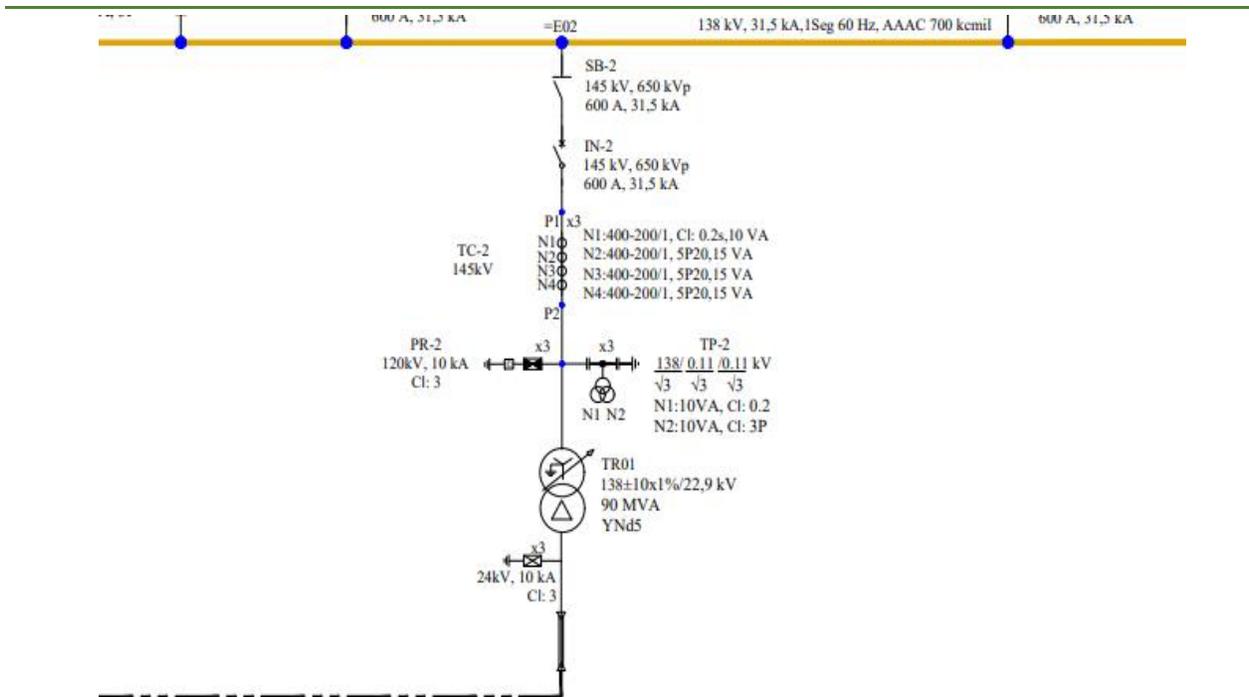


Fig 18. Zoom del diagrama unifilar entre la barra de 138 y 22.9kV.

En la barra de 22.9 kV se tiene 7 derivaciones de las cuales una es para el transformador de servicios auxiliares, 5 para las celdas que vienen del parque solar y cada una de estas tiene una potencia de 19.68 MVA, y la última derivación se tiene como reserva. Cada derivación tiene un interruptor de potencia y las derivaciones de las celdas tienen un transformador de corriente.

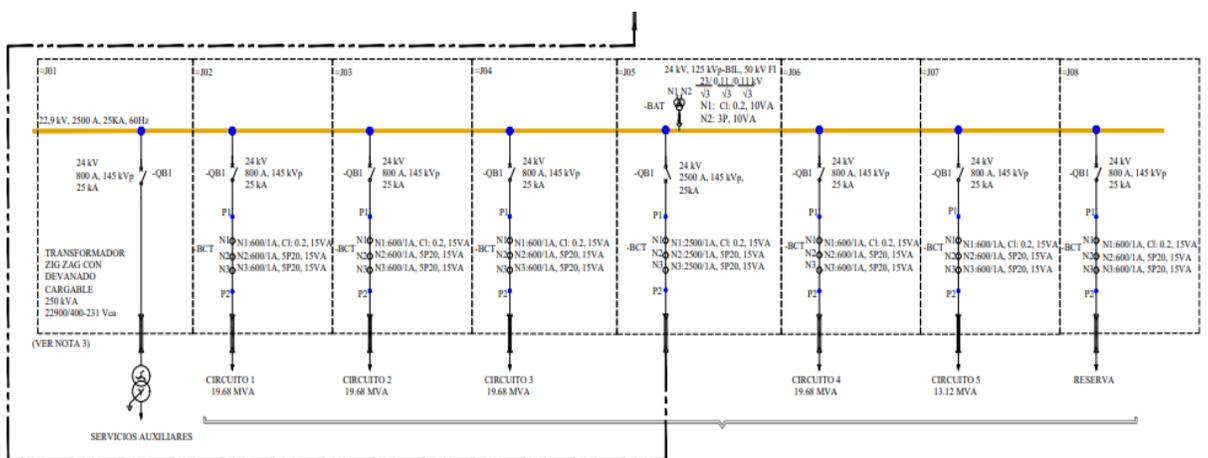


Fig 19. Zoom del diagrama unifilar en la barra de 22.9 kV.

Simulación

Falla de fase a tierra

En la figura 20 se puede observar el resultado de la simulación cuando se tiene una falla en la fase A en la barra de 138 kV, esta falla se hace sin resistencia de falla. Este evento ocurre a los 0.1 segundo y el voltaje se encuentra ilustrado en por unidad (p.u.).

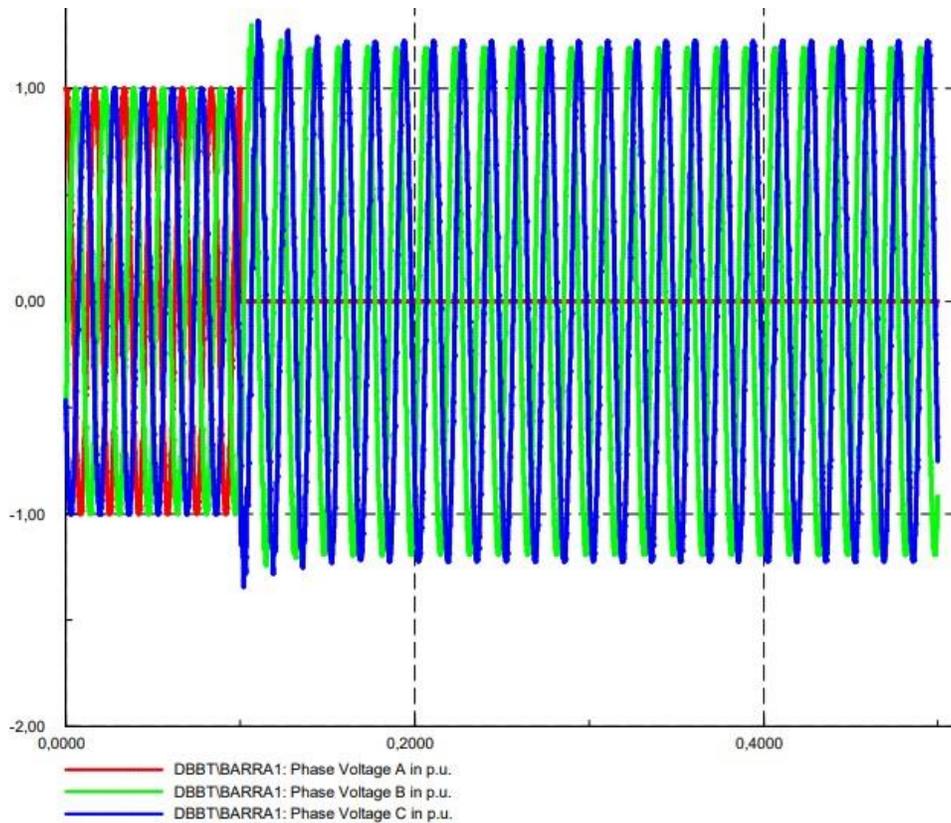


Fig 20. Resultado de fase a tierra en la barra de 138 kV.

Haciendo un zoom a esta gráfica se puede observar que el sistema antes de 0.1 segundo tiene un voltaje de 0.993 p.u. y cuando ocurre una falla el sistema presenta una sobretensión de 1.345 p.u.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSION

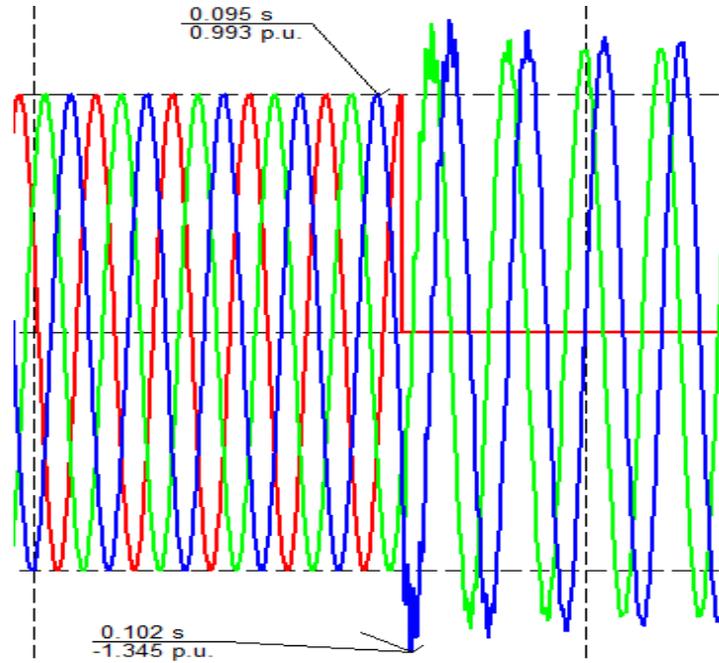


Fig 21. Zoom de la sobretensión de falla a tierra en la barra de 138 kV.

sobretensión de maniobra (recierre)

En la figura 22 se puede observar la respuesta del sistema cuando se hace una maniobra de cierre, como se observa la sobretensión por maniobra alcanza un sobrepico de 2 p.u, pasado un ciclo de onda la tensión de fase llega a estado estable.

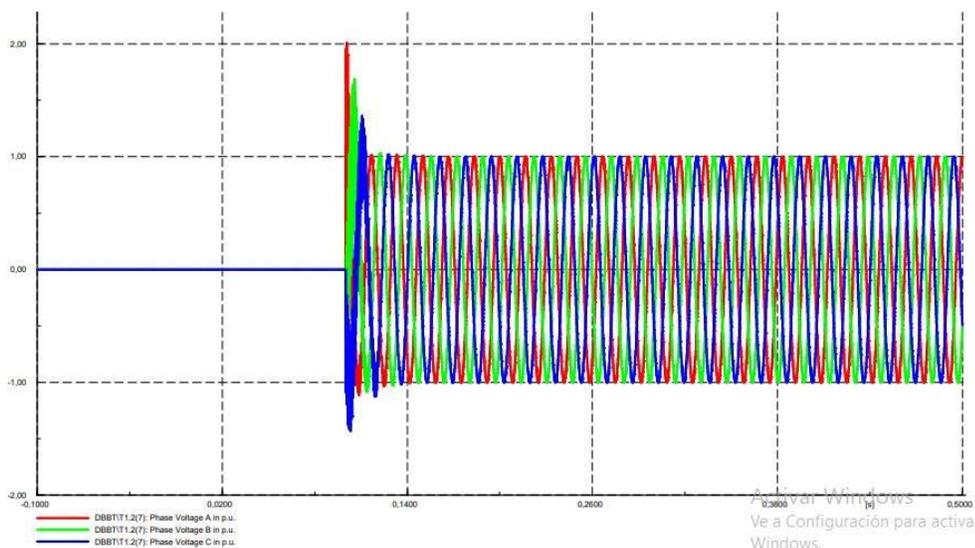


Fig 22. Resultado de la sobretensión de maniobra.

En la figura 23, se hace un zoom para detallar la sobretensión

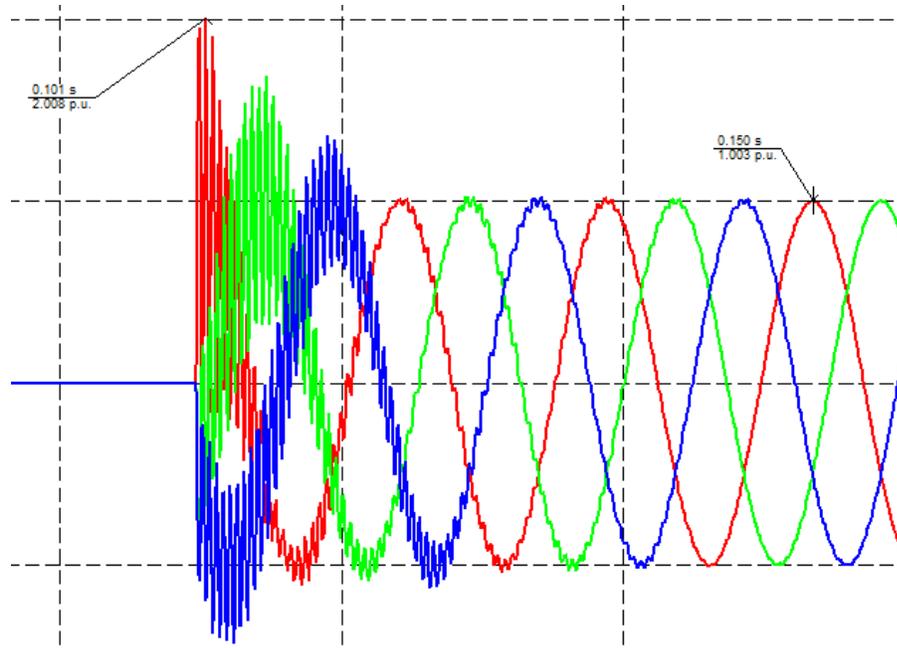


Fig 23. Zoom del resultado de la sobretensión de maniobra.

VI. ANÁLISIS

Es importante, para una organización, tener la información actualizada para así agilizar los procesos de cada memoria de cálculo, pues esto trae beneficios tanto de tiempo como económicos para esta. Al tener cada una de las memoria de cálculo organizadas, actualizadas y con la información clara y concisa hará que los procesos en la organización sean ágiles y así se puede evitar errores en la ejecución y la redacción de las memorias de cálculos de la ingeniería electromecánica básica de una subestación.

Por otro parte, se encontró que una manera más fácil de recordar los pasos de una memoria de cálculo es por medio gráfico, debido a que se hace más dinámico y ameno de leer-y se presenta de forma óptima y resumida.

Al realizar el caso de estudio, se logra aterrizar los conceptos que se explican en cada una de las memorias de cálculo, para así comprender el diagrama unifilar de las subestación y obtener la disposición física de la instalación. Estos dos planos son fundamentales para las ingeniería de detalle es que la continuación de la ingeniería básica.

Por último, el objetivo de la simulación es hacer una comparación entre los valores que la normativa IEC presenta con los valores que se pueden obtener de una simulación, en este caso se usa el programa Power factory y se puede observas las siguientes similitudes en los valores encontrados:

- De los valores obtenidos entre la tabla 4 y la figura 20, se puede observar que el factor que multiplica la sobretensión calculada es de 1.4 y el resultado de la simulación da un valor de 1.35, es decir que este factor que da la norma IEC 60099-5 es muy parecido al factor obtenido en la simulación que se realizó, por lo tanto, esta sobretensión tanto calculada como simulada es muy parecida.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

- Ahora analizando el valor obtenido en la sobretensión de maniobra se puede observar en la figura 22 es que, esta sobretensión llega hasta 2.008 p. u es decir que el valor de la tensión es de 236 kV y la tensión que se obtuvo en la tabla es de 237 kV.

El diseño de electromecánico básico de una subestación eléctrica se debe hacer con gran cuidado ya que son los primeros documentos que se realizan en el diseño de una subestación y por lo tanto es la base para la realización de los diseños posteriores.

VII. CONCLUSIONES

Durante las practicas académicas se realizó un proceso evolutivo, ya que desde el primer momento en la empresa se realizó una búsqueda de la normativa internacional, para así obtener la información actualizada, entender y aplicar los pasos correspondientes para cada uno de los cálculos de la ingeniería básica electromecánica de una subestación eléctrica. En este intervalo se evidencio la gran importancia de conocer la normativa, puesto que los diseños que se realizan deben garantizar un servicio confiable, eficaz y seguro; por lo tanto, esta actividad se convierte obligatoria en cada una de las facetas del diseño.

En este periodo de prácticas académicas, se logra comprender un conjunto de conocimiento adquiridos durante la carrera y al aplicarlos a la ingeniería de una subestación eléctrica hacen obtener una visión más amplia de los conceptos estudiado y aprendidos en este proceso académico.

La ingeniería electromecánica básica es fundamental en el desarrollo de un proyecto de ingeniería, ya que será la base para comenzar con la ingeniería de detalles y la ejecución del proyecto; por lo anterior es de gran importancia realizar correctamente esta etapa del proyecto, de lo contrario, el tiempo de ejecución del proyecto será afectado. Al apoyar la realización de la ingeniería básica de una subestación eléctrica se aprende diversos aspectos que antes de la realización de esta práctica no se tenía conocimiento, algunos de estos aspectos son los siguientes:

- La ingeniería eléctrica debe ir acompañada de la ingeniería civil, la ingeniería de telecomunicaciones y muchas más ingenierías para así lograr la planeación, el desarrollo y la ejecución del proyecto.
- Los proyectos, aunque tenga similitud se debe ejecutar de diferentes manera pues cada subestación tiene exigencias diferentes; por lo tanto, antes de realizar la ingeniería se debe tener claro las exigencias del cliente, las condiciones ambientales y las normativa vigente del país donde se planea la subestación.
- El conocimiento, la experiencia técnica y la comunicación asertiva es de gran importancia para lograr obtener un buen diseño.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

REFERENCIAS

- [1] Mier Mier, G.V. (2010). Determinación de sobrevoltajes temporales y en maniobra en e anillo de 230 kV del SIN [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. [En línea]. Disponible en:
- [2] Martínez Mendonza, J. (2011). Evaluación de riesgos de sobretensiones en subestaciones eléctricas. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. [En línea]. Disponible en: <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/8184/1/TESIS.pdf>
- [3] Norma Internacional. (2000). Descargador de sobretensión. Recomendación de selección y aplicación (IEC 60099-5).
- [4] Norma Internacional. (2001). Pararrayos. Descargadores de sobretensiones de óxido metálicos sin espacios para sistemas de c.a. (IEC 60099-4)
- [5] K. Steinfeld, R. Gohler and A. Largaespada Fredersdorff, "Rating and design of metal-oxide surge arresters for high voltage AC systems," *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, Kunming, China, 2002, pp. 1416-1421 vol.3, doi: 10.1109/ICPST.2002.1067763.
- [6] Ramírez, C. (2003). Subestaciones de alta y extra alta tensión (2a ed.). HMV.
- [7] Comité Técnico de Normalización de la Asociación Española. (2016). Pararrayos. Parte 4: Pararrayos de óxido metálico sin explosores para sistemas de corriente alterna. (UNE-EN60099-4). UNE-EN.
- [8] Norma internacional. (2011). Coordinación de aislamiento -Parte 1: Definiciones, principios y reglas. (IEC 60071-1)
- [9] Norma Internacional. (2014). Instalaciones de potencias superior a 1 kV a.c-Parte 1: Reglas comunes. (IEC 61936-1).
- [10] Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. (2008). Guía para el Diseño de Barras en Subestaciones Aisladas en Aire (IEEE 605).
- [11] Comisión Electrotécnica Internacional. (2002). Transformadores de medida. Parte 1: transformadores de corriente (IEC 60044-1).
- [12] Comisión Electrotécnica Internacional. (1987). Transformador de tensión (IEC 60186).
- [13] K. A. Coronado, "Elementos de diseño de subestaciones de alta y extra alta tensión", Tesis de pre grado, Universidad Tecnológica De Bolívar, Cartagena, 2008.

GUÍA DE DISEÑO ELECTROMÉCANICO BÁSICO EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN

- [14] Comisión Electrotécnica Internacional. (2008). Coordinación de aislamiento. Parte 2: Directrices de aplicación (IEC 60071-2).
- [15] Comisión Electrotécnica Internacional. (2008). Aplicación y dimensionamiento de aisladores de alta tensión destinado para uso en condiciones contaminadas. Parte 2: Aisladores de cerámica y vidrio para sistemas A.C (IEC 60815-2).
- [16] Comisión Electrotécnica Internacional. (2013). Aplicación y dimensionamiento de aisladores de alta tensión destinado para uso en condiciones contaminadas. Parte 3: Aisladores poliméricos para sistemas A.C (IEC 60815-3).
- [17] Comisión Electrotécnica Internacional. (2016). Corrientes de corto circuito en sistemas trifásicos A.C. Parte 0: Calculo de corrientes (IEC 60909-0).
- [18] Comisión Electrotécnica Internacional. (2012). Transformadores de instrumentación. Parte 2:Requerimientos adicionales para transformadores de corriente (IEC 61869-2).
- [19] Comisión Electrotécnica Internacional. (2013). Transformadores de instrumentación. Parte 4: Requerimientos adicionales para transformadores combinados (IEC 61869-4).
- [20] Comisión Electrotécnica Internacional. (2011). Transformadores de instrumentación. Parte 5: Requerimientos adicionales para transformadores de tensión capacitivo (IEC 61869-5).
- [21] Comisión Electrotécnica Internacional. (2002). Dispositivos de maniobra y control de baja tensión. Parte 7-1: equipos auxiliares –Bloques de terminales para conductores de cobre (IEC 60947-7-1 del 2009).
- [22] Comisión Electrotécnica Internacional. (2007). Transformador de instrumentación. Parte1: Requerimientos generales (IEC 61869-1).