

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO

Licenciatura en Ingeniería Eléctrica.

DISEÑO, CÁLCULOS ELÉCTRICOS PARA LA INSTALACIÓN DE UN
TRANSFORMADOR TRIFÁSICO TIPO POSTE 13.2 KV 220/127 V PARA EL
PARAJE "CRUZTITLA"

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA

Trimestre lectivo: 22-I

Datos del presentador:

Ambrosio Primero Juan David

Matricula: 2182000891

Datos del asesor:

Dr. Rafael Escarela Pérez

Profesor titular C

Departamento de energía

DECLARATORIA

Yo, Juan David Ambrosio Primero, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Dr. Rafael Escarela Pérez, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Resumen

En el presente proyecto es una propuesta de solución a la alta demanda de carga eléctrica del paraje “Cruztitla” referido al transformador.

Se busca mediante cálculos eléctricos con normas oficiales y vigentes, dar solución a este problema, así también mediante el software de AUTOCAD proponer diseño final de la puesta del transformador.

Además, conforme a los cálculos a realizar se dará sugerencias de posibles compras para los dispositivos en caso de realizar la puesta del transformador, se seleccionarán dispositivos en existencia en México.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Antecedentes	7
1.2. Justificación	8
CAPITULO II. OBJETIVOS	9
2.1 Objetivo General	9
2.2 Objetivos Específicos	9
CAPITULO III. MARCO TEÓRICO.....	10
3.1. Transformadores.....	10
3.1.1. Tipos De Transformadores	10
3.1.2. Transformadores De Potencia.....	12
3.1.3. Transformadores Trifásicos.....	13
3.1.4. Conexiones De Transformadores Trifásicos	13
3.2. Materiales.....	17
3.2.1. Postes.....	17
3.2.2. Conductores.....	19
3.2.3. Cruquetas.....	19
3.2.4. Aisladores	20
3.2.6. Fusibles.....	21
3.2.7. Apartarrayos	23
3.3. Teoría De Cálculo Eléctrico Media Tensión.....	26
3.3.1. Cálculo De La Corriente Del Lado Primario.....	26
3.4. Diseño De Redes Aéreas De Baja Tensión.....	26
3.4.1. Teoría Cálculo Eléctrico	26
3.4.2. Factor De Demanda.....	27
3.4.3. Cálculo De La Corriente Del Lado Secundario	27
3.4.4. Caída De Tensión.....	28
3.4.5. Diseño De Centro De Transformación (Tipo Poste)	30
3.4.6. Puesta A Tierra.....	31
3.5. Sistema De Aislamiento De Transformadores De Potencia	35

3.5.1. Aislamiento Solido.	35
3.5.2. Aislamiento Líquido.....	35
3.5.3. Características Y Clasificación Del Aislamiento Líquido.....	36
3.5.4. Funciones Del Aislamiento Líquido	36
3.5.5. Factores Que Deterioran El Estado Del Aceite.	36
CAPITULO IV. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	38
4.1. Cálculos Eléctricos Para El Transformador.....	38
4.1.1. Cálculo De La Carga.....	38
4.1.2. Cálculo Del Centro De Transformación	39
4.1.3. Selección Del Transformador	40
4.1.4. Cálculo De Corriente Nominal Del Lado Secundario	41
4.1.5. Cálculo De Corriente Nominal Del Lado Primario	41
4.1.6. Cálculo De Corriente De Corto Circuito	41
4.1.7. Cálculo De Caída De Tensión	41
4.2. Selección Del Fusible.....	44
4.3. Puesta A Tierra.....	44
4.4. Selección Del Apartarrayos	45
4.5 Diseño Final.....	47
CAPITULO V. CONCLUSIONES	50
CAPITULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

El paraje “Cruztitla” se localiza al sur de la Ciudad de México, en la alcaldía Milpa Alta, en el pueblo de San Antonio Tecomitl. Actualmente no está considerado dentro del caso urbano por ello es que los servicios de energía eléctrica, agua y drenaje son muy difíciles de obtener. El paraje cuenta con 88 viviendas con un promedio de 5 personas por vivienda, dando así un promedio de 440 personas que habitan en el paraje.

El crecimiento del paraje “Cruztitla” ha desatado una alta demanda de energía eléctrica, desafortunadamente los recursos con los que cuenta el paraje y el bajo interés por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para darles una mejor calidad de servicio, generó un gran interés para así poder proponer una solución a su problema.

En el presente proyecto trata de resolver la problemática presentada en el paraje Cruztitla a causa de la alta demanda de energía eléctrica, además la justificación se describe cual es la problemática de una manera más detallada.

El PI será un beneficio para los usuarios del Paraje y con ello se busca una solución ante la situación en la que se encuentra. Lo más razonable es seleccionar el diseño de un transformador. Se busca que con este planteamiento brindar un mejor servicio de energía eléctrica de calidad y una reducción en las pérdidas de energía, logrando una mejor gestión en la comercialización de energía.

En los antecedentes se proporcionan datos de mucho interés, se proponen normas actualizadas y vigentes, mismas que tendrán gran impacto cuando se decida realizar la instalación.

1.1. Antecedentes

Desde el año 2012 el paraje “Cruztitla” comenzaron a presentarse las caídas de tensión, pero no eran tan frecuentes. Para el año 2016 el paraje ya tenía un ascenso grande de viviendas y en diciembre del 2021 el transformador tuvo un sobrecalentamiento y derramo aceite, actualmente en el año 2022 existen caídas de tensión con más frecuencia.

El transformador sigue en funcionamiento, pero no en las óptimas condiciones, debido a los bajos niveles de aceite y la demanda de potencia eléctrica es mayor a la potencia nominal del transformador.

Entre los habitantes del paraje se han implementado diferentes reglas para proteger al transformador de un sobrecalentamiento:

- Evitar el uso de focos incandescentes.
- Soldar solo si está autorizado y hacer pausas cada 30 minutos para no forzar al transformador (solo aplica para soldadoras de arco).
- Evitar soldar entre semana (solo aplica para soldadoras de arco).
- No encender todos los focos de las casas en la noche y tarde.

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) están formados por varios componentes, como las centrales de producción, los sistemas de transmisión y la distribución de energía eléctrica, siendo este último el sistema de interés porque el proyecto se basa en la distribución de energía eléctrica. [1]

El transformador es un dispositivo eléctrico que transfiere la energía eléctrica de un circuito a otro a través de la inducción electromagnética, elevando o reduciendo comúnmente los valores de tensión y corriente eléctrica a la misma frecuencia del sistema. Para este proyecto se necesitará un transformador para bajar la tensión de 13.2 kV a 220/127 V. [1]

La Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) de Nicaragua desarrolló un proyecto para la electrificación rural en la comunidad de “Tisey”, y que tenía como problemática principal hacer llegar la energía eléctrica hasta dicha comunidad. [2]

Para ello implementaron un diseño el cual tenía que cumplir con las normas eléctricas vigentes y que brindará buena seguridad al operar la red. El diseño aseguraba el cumplimiento total de las necesidades de la comunidad y, en consecuencia, mejorar la calidad del servicio de energía eléctrica [2]

Sus soluciones se enlistan en seguida:

- Planificar un estudio de campo para poder conectarse a la red eléctrica más cercana.
- Elaborar estudio de demanda de energía eléctrica.
- Elaborar planos eléctricos de la red cumpliendo así con las normas

1.2. Justificación

La alta demanda de energía eléctrica por los usuarios de dicho paraje sobre el transformador y la baja capacidad de potencia suministrada del transformador (75 kVA), me ha llevado a realizar un estudio donde se reflejen cálculos de la carga real demandada y con ello proponer una solución con un transformador que sea el necesario para así evitar las caídas de tensión.

El transformador ya ha tenido varios daños y en épocas de invierno es cuando más se presentan problemas de baja tensión.

Los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería eléctrica son una pieza clave para dar solución a este problema, porque a lo largo de la carrera de ingeniería eléctrica en la UAM Azcapotzalco cursé UEA's que serán de gran ayuda, un ejemplo es la UEA de "transformadores y máquinas síncronas", además de "instalaciones en baja tensión, técnicas de alta tensión, sistemas de potencia en estado estable y protecciones eléctricas".

El paraje se encuentra en una zona no urbanizada por lo cual es complicado que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) proporcione ayuda, en ocasiones anteriores los vecinos habían pedido una solución a CFE, pero CFE no quiso contribuir. Así que la solución que se plantea en este proyecto de integración es la más viable.

CAPITULO II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Realizar un proyecto eléctrico para solucionar la alimentación a la alta demanda de energía eléctrica del Paraje Cruztitla, y garantizar una tensión normalizada.

2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar datos de carga demandada por unidad de vivienda, reserva parademanda futura y total de potencia requerida en kVA.
- Calcular la carga que va a suministrar el transformador y realizar cálculos de corto circuito.
- Determinar el tipo de conductores, centros de carga, las protecciones del transformador y puesta a tierra.

CAPITULO III. MARCO TEÓRICO

3.1. Transformadores

Un transformador está formado por dos o más devanados unidos por un flujo mutuo. Cuando se conecta una fuente de tensión de CA al devanado primario, se produce un flujo de CA, cuyo tamaño viene dictado por la tensión primaria, la frecuencia de la tensión aplicada y el número de vueltas. El flujo variable se conectará al segundo devanado y creará una tensión a través de esta bobina, con el valor definido por el número de vueltas en el secundario, así como la amplitud y la frecuencia del flujo variable. Se puede conseguir casi cualquier tensión o relación de vueltas con una escala adecuada entre las bobinas primarias y secundarias. [3]

El hecho de que el flujo entre los dos devanados fluctúe con el tiempo es una de las características esenciales del funcionamiento de los transformadores. Esto ocurre cuando dos bobinas están unidas por aire, pero la refrigeración es más eficaz cuando se utiliza un núcleo de hierro u otro material ferromagnético. Los transformadores con núcleo de hierro son comunes para estos transformadores. Para disminuir las pérdidas debidas a las corrientes parásitas en el núcleo magnético, la mayoría de los transformadores utilizan un circuito magnético que consiste en una pila de placas finas. [3]

Los devanados de un transformador con núcleo de hierro se enrollan alrededor de dos polos rectangulares con núcleo de hierro; en el apantallamiento, los devanados se enrollan alrededor del poste central. Para los transformadores que funcionan a frecuencias inferiores a unos cientos de hertzios se suelen utilizar chapas de acero de silicio de 0,014 de espesor. El acero al silicio tiene baja resistencia al daño del hierro, la alta permeabilidad y densidad de flujo son ventajas del acero al silicio (1,0-1,5T). Las aleaciones ferromagnéticas se utilizan a veces en los núcleos de pequeños transformadores utilizados en circuitos de comunicación de baja potencia y frecuencia. [3]

3.1.1. Tipos De Transformadores

- Transformadores eléctricos elevadores.

Pueden elevar la tensión de salida en relación con la de entrada. El devanado secundario de estos transformadores tiene un mayor número de vueltas que el primario. [8]



Figura 1. Transformador elevador [8]

- Transformadores eléctricos reductores.

Los transformadores eléctricos con capacidad de reducción de tensión pueden reducir la tensión de salida con respecto a la de entrada. En estos transformadores, el devanado primario tiene más vueltas que el secundario. [8]

Cuando se conecta en sentido inverso, cualquier transformador elevador puede convertirse en reductor, y un transformador reductor puede convertirse en elevador. [8]



Figura 2. Transformador reductor [8]

- Autotransformadores

Se utilizan cuando hay que cambiar el valor de una tensión, pero sólo por una pequeña cantidad. La tensión entra en el devanado principal para salir por el secundario, pero entra por un punto en el centro de la única bobina existente.

Aunque la tensión de entrada (V_p) sólo pasa por un número determinado de espiras (N_p), la tensión de salida (V_s) debe pasar por todas ellas (N_s). [8]

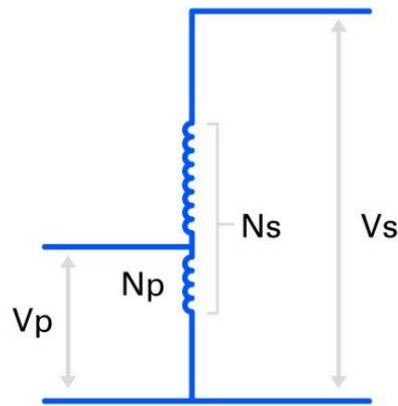


Figura 3. Autotransformador [8]

3.1.2. Transformadores De Potencia

Los transformadores de potencia tienen varias denominaciones según el lugar en el que se utilicen en el suministro eléctrico. Un transformador de potencia es un transformador que se acopla a la salida del generador y se utiliza para escalar la tensión hasta niveles de transmisión (más de 110 kV). Un transformador de subestación es un transformador situado al final de una línea de transmisión que baja la tensión de transmisión a distribución (de 2,3 a 34,5 kV). Por último, un transformador de distribución es un transformador que reduce la tensión de distribución a la tensión de distribución definitiva de la fuente de energía (110, 208, 220 V, etc.). [4]

Hay dos tipos de transformadores de potencia especiales para motores eléctricos y sistemas de potencia, además de los transformadores de potencia normales. El primero es un aparato destinado a detectar altas tensiones y producir una tensión secundaria sólo ligeramente proporcional a la primera. Un transformador de tensión es el nombre que recibe este tipo de transformador. Un transformador de potencia genera una tensión secundaria proporcional a la tensión de la fuente. Los transformadores de tensión se diferencian de los transformadores de potencia en que los transformadores de tensión sólo están pensados para manejar corrientes muy modestas. Un segundo tipo de transformador especial es el que está diseñado para suministrar una corriente secundaria sustancialmente inferior a la primaria. Los transformadores de corriente son el nombre de estos dispositivos. [4]

3.1.3. Transformadores Trifásicos

La corriente alterna trifásica se utiliza en casi todas las redes de generación y distribución de energía del mundo. Como los sistemas trifásicos son tan importantes en la vida moderna, es importante entender cómo se emplean los transformadores en ellos. [4]

Para los circuitos trifásicos, hay dos tipos de transformadores. Uno de ellos consiste en conectar simplemente tres transformadores monofásicos para generar un grupo trifásico. Otra alternativa es un transformador trifásico con tres grupos de devanados enrollados alrededor de un núcleo común. La construcción de estos dos tipos de transformadores se representa en la figura 4. [4]

Como resultado, el transformador trifásico es más pequeño, más ligero, menos costoso y algo más eficiente; pero, el empleo de tres transformadores monofásicos tiene la ventaja de permitir que cualquier unidad del banco sea sustituida por separado si se produce un defecto. [4]

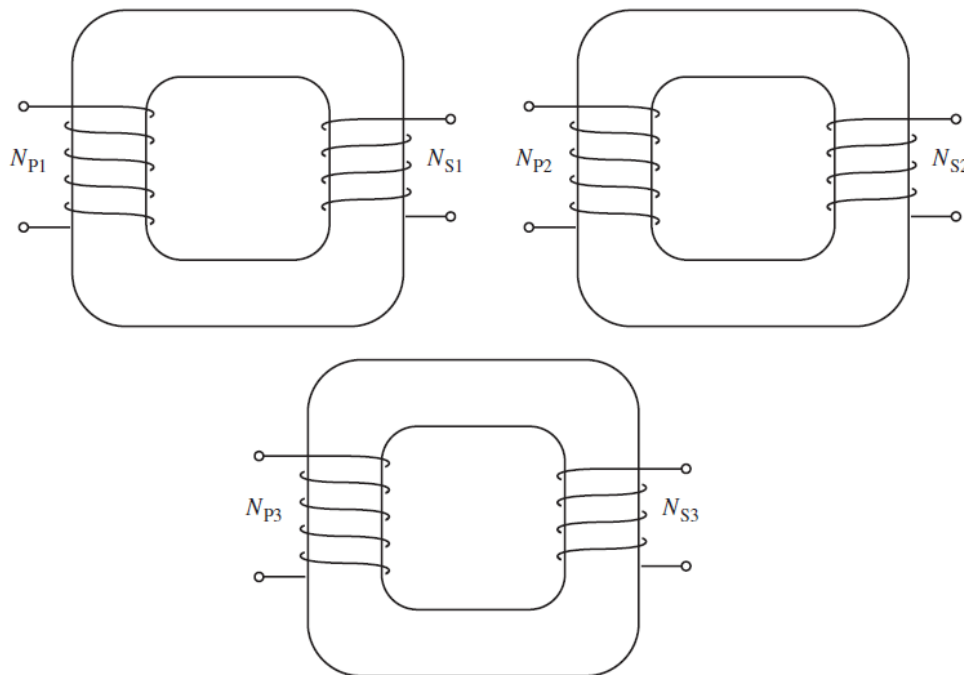


Figura 4. Banco trifásico de transformador compuesto por tres transformadores independientes. [4]

3.1.4. Conexiones De Transformadores Trifásicos

Tres transformadores componen un transformador trifásico, que puede utilizarse individualmente o en un solo núcleo. Las salidas del primario y del secundario de

cualquier transformador trifásico pueden unirse en ye (Y) o en delta (Δ). En un banco de transformadores trifásicos, esto nos da un total de cuatro conexiones posibles: [4]

1. Ye-ye (Y-Y).
2. Ye-delta (Y- Δ).
3. Delta-ye (Δ -Y).
4. Delta-delta (Δ - Δ).

3.1.4.1. Conexión Ye-Ye

La corriente de línea para las conexiones Y-Y es la misma que pasa por cada bobina del transformador. En cambio, la tensión que atraviesa una bobina del devanado es un 58% inferior a la tensión global: [10]

$$U_L = \sqrt{3} * U_{devanado} \quad (1)$$

Ventajas

La conexión Y-Y permite utilizar el neutro en los devanados de alta y baja tensión, así como conectar el neutro del primario del transformador con el neutro de la fuente de alimentación. [10]

Desventajas

A menos que haya una conexión muy fuerte (de baja impedancia) entre el primario y la fuente de alimentación, debe evitarse la conexión Y-Y. Cuando la carga está desequilibrada, las transiciones de fase se vuelven muy desequilibradas si no se proporciona el neutro. Las armónicas de terceros tienen su propio conjunto de problemas. [10]

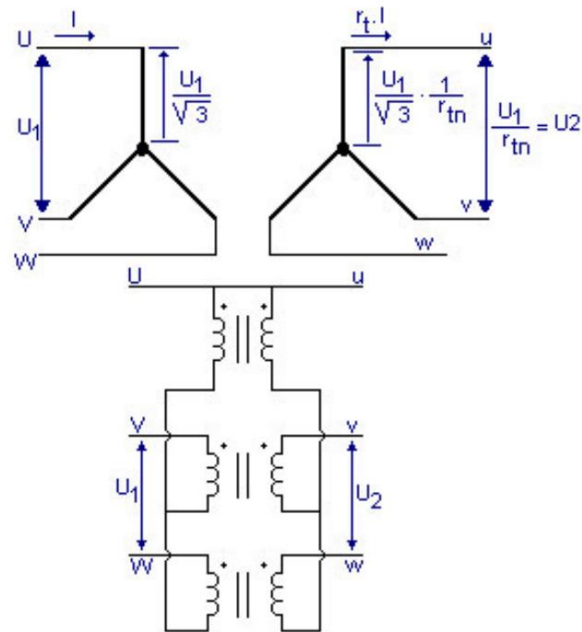


Figura 5. Diagramas de conexión y de cableado de un transformador trifásico: conexión Y-Y [10]

3.1.4.2. Conexión Ye-Delta

Dado que, la relación de transformación debida a las espiras, se utiliza el valor 3 para reducir la tensión secundaria, se emplea la conexión en Y para reducir la tensión. Esta conexión se utiliza en subestaciones reductoras de alta tensión, así como en subestaciones de reparto y distribución, debido a la adición de este factor de reducción. [10]

Ventajas

Los armónicos de tensión no causan ningún problema. En presencia de cargas desequilibradas, su rendimiento es admirable. [10]

Desventajas

Cuando se conectan dos conjuntos de transformadores en paralelo, la conexión en Y provoca un desplazamiento de fase de 30 grados entre las tensiones primaria y secundaria, lo que puede ser problemático. [10]

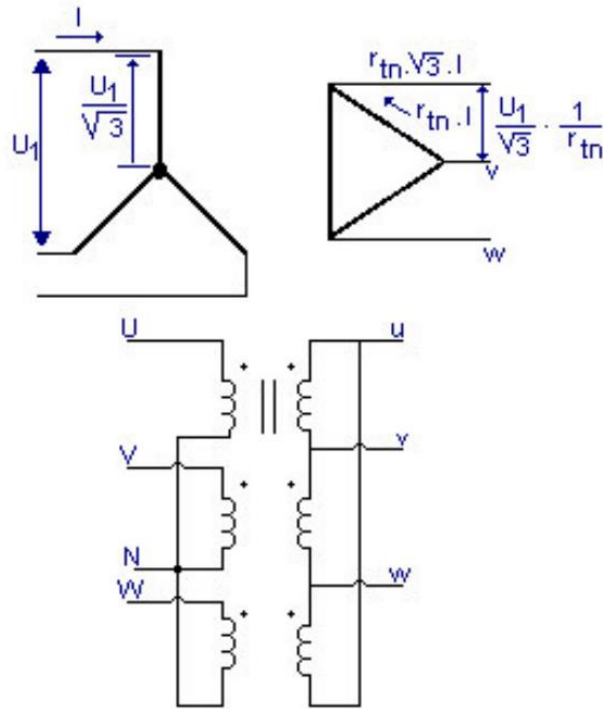


Figura 6. Conexión Y- Δ [10]

3.1.4.3. Conexión Delta-Ye

Dado que, además de la relación de transformación inducida por las espiras, entra el factor 3 y multiplica la resistencia a la tracción del secundario, se utiliza la conexión Δ -Y para aumentar la tensión. [10]

Esta conexión se utiliza ampliamente como transformador elevador en aplicaciones de alta tensión. En este caso, la alta tensión está en el lado de la estrella, lo que permite que el punto neutro esté en tierra. [10]

En este diseño, la estrella suele instalarse en el lado de baja tensión de los transformadores de distribución. Esto permite alimentar vehículos trifásicos y monofásicos (entre fase y neutro). [10]

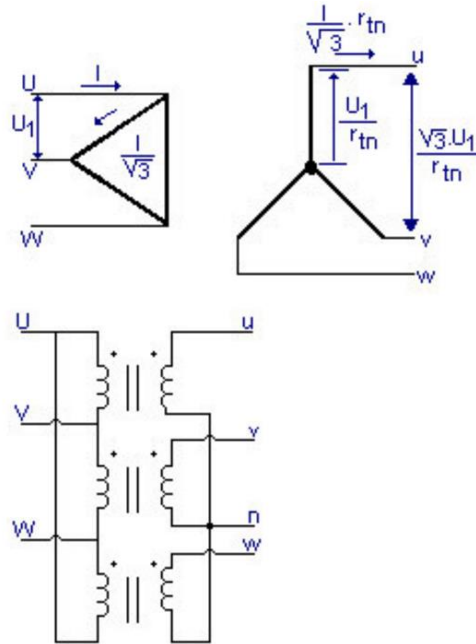


Figura 7. Conexión Δ -Y [10]

3.1.4.4. Conexión Delta-Delta

Cuando se requieren espiras de menor sección en transformadores de baja tensión, se suele utilizar. Esto se debe a que la corriente del transformador a través de los devanados es un 58% menor que la de la línea. Puede soportar la misma cantidad de tensión que la línea compuesta. [10]

$$I_L = \sqrt{3} * I_{devanado} \quad (2)$$

En caso de avería, la conexión Δ - Δ permite desconectar uno de los transformadores del resto del sistema sin interferir en el funcionamiento del sistema trifásico, aunque con una potencia global menor. [10]

3.2. Materiales

3.2.1. Postes

Soportan las redes de distribución de media y baja tensión y que es la estructura principal de la red de distribución. También pueden proporcionar alturas adecuadas para los operadores de la red de distribución. Se clasifican de acuerdo con su resistencia, longitud y material del que está construido. [2]

La mitad inferior y superior de las columnas están codificadas por colores en función de los elementos estructurales (figura 8): [2]

- Los emplazamientos se eligen en función de las fuerzas que deben soportar, por lo que las ubicaciones con muchos soportes, transformadores o soportes de anclaje requerirán más fuerza. Al determinar la fuerza necesaria para soportar el soporte, también se tiene en cuenta la velocidad del viento. Su resistencia de los postes está dada en [kgf]: kilogramos fuerza. [2]



Figura 8. Postes de concreto [2]

- Se utilizarán postes de al menos 12 m para media tensión y de al menos 9 m para baja tensión, en función de su longitud. La longitud del poste viene determinada por el número de circuitos instalados en él. En la mayoría de los casos, sólo se construyen dos circuitos, utilizándose postes de 14 m. [2]

- Para los soportes de las construcciones, existen de madera, metal, hormigón o poliéster reforzado, según el material de construcción. [2]



Figura 9. Placa de características en poste [2]

3.2.2. Conductores

La función principal de los conductores es trasladar la energía eléctrica desde las subestaciones de distribución hasta las subestaciones de tipo poste. Son los componentes más importantes del conjunto de la red de distribución, ya que la calidad de los servicios energéticos depende de su estado. [2]

Hoy en día, la mayoría de los cables están compuestos de aluminio o de aleaciones de aluminio. La utilización de conductores de cobre ha disminuido desde que el precio de estos ha subido y se han producido robos. [2]

Los conductores desnudos están compuestos por cables de aluminio ACSR y aleaciones de aluminio AAAC y se utilizan en circuitos de baja o media tensión. En media tensión se pueden utilizar cables desnudos; sin embargo, se suelen utilizar conductores revestidos construidos con AAC en las etapas y AAAC en el neutro para evitar maniobras de la línea por parte de terceros. [2]

Los conductores ACSR utilizados en la distribución de MT deben ser como mínimo del calibre 2 AWG; sin embargo, el calibre más utilizado es el 1/0 AWG. El 1/0 AWG es el calibre más pequeño utilizado en las redes de distribución secundaria. [2]

3.2.3. Crucetas

Dependiendo del tipo de construcción, del número de vigas necesarias y del tipo de aisladores a instalar, son estructuras que se fijan a las columnas mediante herrajes y sobre las que se instalan los aisladores. Su finalidad es mantener la horizontalidad de las líneas y ofrecer el mínimo espacio posible para cada nivel de tensión. [2]

El tipo de cruceta utilizado en los sistemas de distribución eléctrica viene determinado por el tipo de componente. Las crucetas suelen dividirse en dos grupos o tipos, que se diferencian en función del material de construcción: crucetas de madera y crucetas metálicas. [2]

- Crucetas de madera: Los herrajes de acero galvanizado son necesarios para la instalación de crucetas de madera. Debido al deterioro de estas crucetas en diversas regiones, como las zonas rurales, donde son víctimas de los pájaros carpinteros y las termitas, ya no se utilizan. [2]
- Crucetas metálicas: Se trata de crucetas de acero galvanizado. Las dos categorías son las angulares y las de bandera. Las crucetas angulares sirven para facilitar la fijación directa de la cruceta en el centro del poste mediante tornillos o abrazaderas. Las crucetas de bandera de 2,4 metros de longitud

deben utilizarse junto con un brazo angular o diagonal. Estas crucetas, que en un principio se diseñaron para alejar a los conductores de los edificios y cumplir con las distancias de seguridad, se emplean ahora con el objetivo adicional de colocar una red secundaria en el borde de la cruceta para evitar la manipulación por parte de personas ajenas. [2]

3.2.4. Aisladores

Se encargan de aislar las líneas de la estructura de cada poste. Dependiendo de la cantidad de tensión y del tipo de refuerzo de cada soporte, se utilizan. Los aisladores de anclaje se diferencian de los aisladores de alineación y de ángulo pequeño.

Los aisladores pueden ser de porcelana, vidrio, polímeros, esteatita u otros materiales resistentes a la intemperie. Para el entorno en el que se colocan, también deben ser resistentes mecánicamente y a la corrosión. [2]



Figura 10. Aisladores tipo poste de porcelana [2]



Figura 11. Aisladores tipos suspensión poliméricos

3.2.5. Transformadores De Distribución

Los transformadores de distribución se utilizan para reducir los niveles de tensión de la energía eléctrica de acuerdo con su tipo de uso. En la tabla 1 se muestran las relaciones de transformación que se pueden encontrar más comúnmente. [2]

Transformadores con potencias nominales de 25 kVA, 37,5 kVA, 50 kVA y 75 kVA, así como transformadores trifásicos con potencias nominales de 30 kVA, 45 kVA, 75 kVA, 112,5 kVA y 150 kVA. Los cortocircuitos, los fusibles, las válvulas y los pararrayos tipo SPT constituyen el sistema de protección de un transformador de distribución. [2]

Tabla 1. Relaciones de transformación más comunes [2]

Tensión de entrada	Tensión de salida
110 kV	34,5/13,2 kV
34,5 kV	13,2 kV
34,5 kV	440 V
13,2 kV	440 V
13,2 kV	240/120 V
7,6 kV	240/120 V

3.2.6. Fusibles

Existen 3 tipos de fusibles para los transformadores de media tensión, a continuación, se muestra los 3 tipos de fusibles más utilizados. [12]

- Fusibles tipo K
- Fusibles tipo T
- Fusibles tipo MS

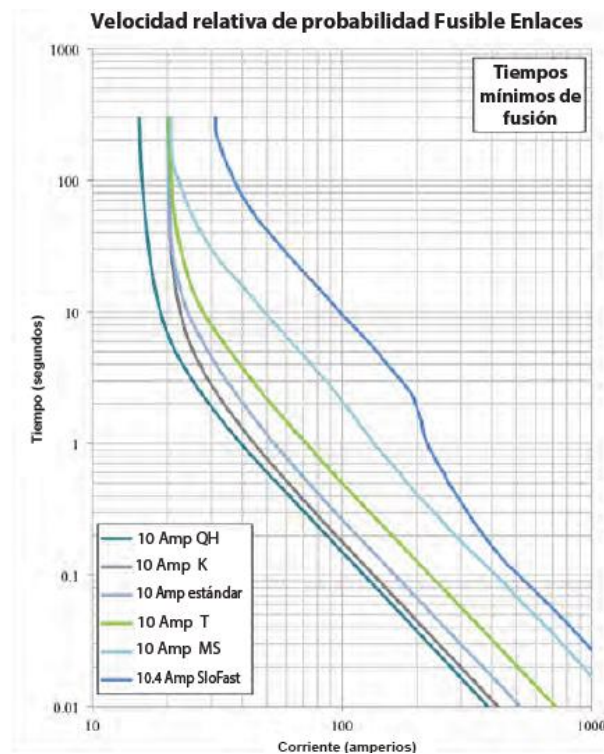


Figura 12. Característica corriente- tiempo de fusibles.[12]

- Eslabones fusibles Tipo K

La característica de "velocidad" de los fusibles tipo K es establecido por ANSI/NEMA para proporcionar esquemas de coordinación existentes. [12]

Los fusibles Tipo K están diseñados para transportar 150% de su corriente nominal sin dañar el fusible o el cortacircuitos donde está instalado. Esta función se aplica a las siguientes situaciones: Cargas especiales como sobrecarga a corto plazo y recogida de carga frío. [12]

- Los fusibles tipo T

Los fusibles tipo T la corriente de tiempo es más lenta que un fusible tipo K. Los fusibles T se coordinan bien con reconectores automáticos de circuitos de aceite. [12]

Los fusibles tipo T están diseñados para transportar el 150% de corriente nominal o cortocircuito donde está instalado. Esta capacidad es adecuada para condiciones especiales de carga, como sobrecarga a corto plazo. [12]

- Fusibles tipo MS

Los fusibles tipo MS tienen características de tiempo-corriente muy lento. Características en la aplicación: Los fusibles ANSI/NEMA tipo T son demasiado rápidos, y las funciones más lentas del tipo MS se pueden utilizar. [12]

Tabla 2. Características de los fusibles tipo K y tipo T. [12]

No	DESCRIPCIÓN	UNID	CARACTERÍSTICAS		
			SOLICITADO		GARANTIZADO
1	Norma a que Responde	----	ANSI C 37.42, ANSI C 37-41		
2	Voltaje	V	11.4 y 13.2 kV		34.5 kV
	Corriente	A	TIPO K	TIPO T	TIPO K
			6K	20T	15K
			10K	25T	
			15K	30T	
			20K	40T	
			25K	50T	
30K					
40K					
3	Identificación del Tipo de Elemento Fusible en Función de la Velocidad.	----	(*)		
4	Tensión de Servicio	kV	11.4, 13.2 y 34.5		
5	Tensión de Servicio Máxima Respectivamente	kV	12.5, 14.5 y 38		

3.2.7. Apartarrayos

Es un dispositivo que utiliza elementos de resistencia no lineal de óxidos metálicos y un electrodo en el aire para limitar las sobretensiones y la posterior corriente de arco provocada por las descargas atmosféricas. Se instala en paralelo a los aisladores de la línea y no tiene carga mecánica. [11]

Se clasifican en 3 diferentes clases:

- La clase 2 se utiliza en aplicaciones de transición aire-suelo con tensiones de hasta 34,5 kV.
- Para tensiones de hasta 230 kV se utiliza la clase 3.
- Clase 4. Para tensiones de 400 kV

Para tensiones nominales de 12 a 30 kV, los pararrayos de clase 2 deben tener una capacidad de energía para sobretensiones por operación de al menos 3.4 kJ/kV. Los datos de los pararrayos se muestran en la Tabla 4. [11]

En los apartarrayos deben instalarse lo siguiente:

- a) El descargador está equipado con dispositivos de desconexión. [11]
- b) Soporte para el montaje en cruceta que debe ajustarse a las especificaciones mostradas en la figura 14. El soporte para otro tipo de montaje viene determinado por el diseño del fabricante. [11]
- c) Cable flexible de cobre trenzado con una sección de $13,30 \text{ mm}^2$ y terminales de conexión al cable, con uno de ellos conectado en fábrica al terminal de tierra del apartarrayos y sin posibilidad de ajustar el indicador de fallo. [11]
- d) De tipo mecánico, para conductores con una sección de 13.30 mm^2 a 33.62 mm^2 [11]

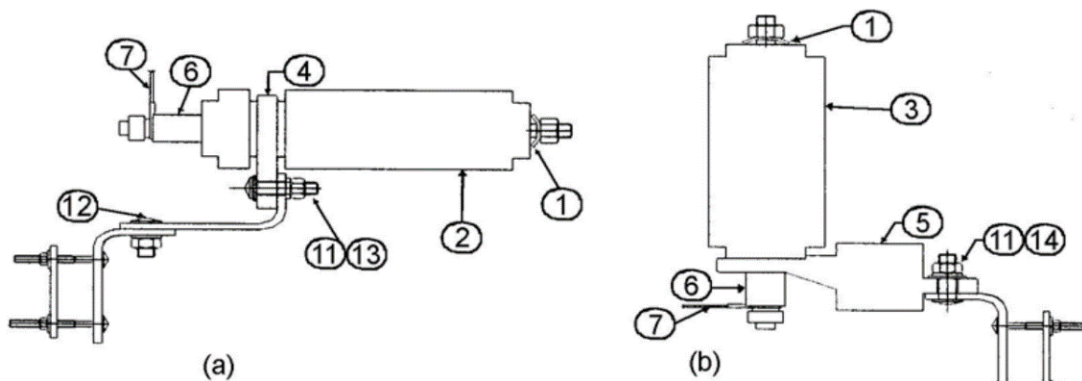


Figura 13. Apartarrayos: (a)envolvente de cerámica, (b)envolvente polimérica [11]

Tabla 3. Listado de partes de figura [11]

Ref.	Descripción	Cantidad
1	Conector de línea (mecánico)	1
2	Envoltorio cerámico	1
3	Envoltorio polimérico (EPDM o Silicón)	1
4	Abrazadera metálica	1
5	Soporte aislante	1
6	Dispositivo de desconexión /Indicador de falla	1
7	Cable de cobre trenzado flexible, estañado, de longitud: ADOM y ADOMC 10 y 12: 400 mm ADOM y ADOMC 18 y 21: 500 mm ADOM y ADOMC 27 y 30: 600 mm	1
8	Soporte "L". Solera de acero galvanizado de (9.5 x 44.4 x 282) mm	(*)
9	Soporte "I". Solera de acero galvanizado de (6.4 x 32x 171.4) mm	1
10	Tornillo de acero galvanizado, cabeza redonda y cuello cuadrado de Ø 9.5 mm x 127 mm, con arandela y tuerca (100mm mínimo de cuerda corrida)	2
11	Tornillo de acero galvanizado, cabeza redonda y cuello cuadrado de Ø 9.5 mm x 57 mm, con arandela de presión y tuerca	1
12	Tornillo de acero galvanizado, cabeza redonda y cuello cuadrado de Ø 12.7mm x 44.4 mm, con arandela de presión y tuerca	1
13	Arandela dentada exteriormente con espesor mínimo de 1.4 mm, diámetro interior de 13.49 mm y diámetro exterior de 34.9 mm	1
14	Arandela plana con espesor mínimo de 1.4 mm, diámetro interior nominal de 13.49 mm y diámetro exterior nominal de 34.9 mm	1

Tabla 4. Características Eléctricas de los Apartarrayos Clase 2 [11]

Tensión nominal del sistema U_r KV (rnc)	Tensión nominal del apartarrayos U_n kV (rnc)	Tensión de operación continua U_c kV (rnc)	Tensiones residuales máximas							
			A Impulsos de corriente por maniobra 30/60 μ s (cresta)		Al impulso de corriente por rayo 8/20 kV (cresta)					Al impulso de corriente escarpado 1/20 μ s kV (cresta)
			A de prueba	kV cresta	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA	
13.8	12	10.2	500	28	32	33	34	38	46	41
23	21	17	500	45	52	54	57	63	75	66
34.5	30	24.4	500	65	75	77	81	90	107	94

La tensión nominal del apartarrayos se calcula de acuerdo con la siguiente expresión: [13]

$$V_n = K_e (V_{max.}) \tag{3}$$

$V_{max.}$ = Tensión máxima del sistema entre fases en KV

V_n = Tensión nominal del apartarrayos en KV

K_e = Factor de conexión a tierra

Además, que K_e es una constante y se obtiene a partir de la siguiente tabla:

Tabla 5. Constante K_e para sistemas de conexión [13]

Tipo de sistema	K_e	Descripción
A	0.75	Sistema 3F-4H, conectado en Y, con neutro conectado sólidamente a tierra y corrido desde la subestación (multiaterrizado).
B	0.8	Sistema 3F-3H, conectado en Y, con neutro conectado sólidamente a tierra.
C	1	Sistema 3F-3H, conectado en Y, con neutro conectado sólidamente a tierra a través de una reactancia.
D	1.1	Sistema 3F-3H, conectado en delta.

3.3. Teoría De Cálculo Eléctrico Media Tensión

Se realizarán cálculos tanto en media tensión como en baja tensión, para así poder determinar los elementos que se usarán para el diseño de la puesta del transformador.

3.3.1. Cálculo De La Corriente Del Lado Primario

El cálculo de la corriente nominal se aplicará la siguiente formula [2]

Para una corriente trifásica

$$I_{NomP} = \frac{S}{\sqrt{3} * V} \quad (4)$$

Corriente Bifásica (Monofásico)

$$I_{NomP} = \frac{S}{V} \quad (5)$$

Dónde:

I_{NomP} : Corriente Nominal del lado primario (A).

S: Potencia de demanda (kVA)

V: Voltaje de línea (kV)

3.4. Diseño De Redes Aéreas De Baja Tensión

3.4.1. Teoría Cálculo Eléctrico

Para los cálculos eléctricos en BT, es necesario conocer el rango de consumo de los usuarios del transformador, así como la potencia de diseño que se muestra en la Tabla 6. [2]

La capacidad de diseño necesaria para el cálculo de la red de BT (véase Tabla 6) se calculó teniendo en cuenta una tasa de crecimiento durante un periodo de 15 años. [2]

Tabla 6. Cargas de diseño [2]

Rango	Consumo promedio (kWh/mes)	Potencia inicial (kW)	Tasa Anual de crecimiento (%)	Potencia de Diseño (kW)
Bajo Bajo	De 105 a 144	1.00	2.0	1.35
Bajo	De 145 a 189	1.20	2,0	1.62
Medio	De 190 a 279	1.70	1.0	1.97
Medio Alto	De 280 a 379	2.20	1.0	2.55
Alto	De 380 a 660	3.80	1.0	4.41

3.4.2. Factor De Demanda

El factor de demanda es la relación entre la demanda máxima de un sistema (o parte de un sistema) y la potencia total conectado a las consideraciones del sistema (o parte de un sistema). Cuando el factor de demanda es inferior a uno, el resultado es siempre menor a 1.

Tabla 7. Factor de demanda de Instituciones y construcciones

Factor de demanda Instituciones y construcciones	
Residencial	0.6
Comercial	0.7
Hotel	0.7
Centro comercial	0.7
Escuelas	0.8
Alumbrado publico	0.9
Hospital	0.8
Parque	0.8

3.4.3. Cálculo De La Corriente Del Lado Secundario

La corriente nominal trifásica en baja tensión se calcula mediante: [2]

$$I_{NomS} = \frac{P_T}{\sqrt{3} * V * \cos\phi} \tag{6}$$

Dónde:

I_{NomS} : Corriente Nominal del lado secundario (A).

P: Potencia trifásica de BT (kW)

V: Voltaje de línea (kV)

Cosφ: Factor de potencia

La corriente nominal monofásica en baja tensión se calcula mediante: [2]

$$I_{Noms} = \frac{P}{V * \cos\varphi} \quad (7)$$

3.4.4. Caída De Tensión

La caída de tensión está definida como una disminución de la tensión en una línea eléctrica. La caída de tensión es un problema para la calidad de energía y que es un problema comúnmente presentado en México, tiene repercusiones que dañan el funcionamiento de equipos y maquinaria conectada a la línea eléctrica. [2]

Además, que una caída de tensión significativa puede ocasionar daños parciales en equipos y maquinaria y que a futuro tendrán un coste económico elevado, ya sea su reparación o el adquirir un nuevo equipo. [2]

¿Qué ocasiona una caída de tensión?

- Una sobrecarga en el sistema eléctrico, esto se refiere cuando a una línea eléctrica se le es demandada una mayor carga a la que está diseñada.
- Larga distancia de conexión desde el transformador hacia la acometida eléctrica, mayor distancia y resistencia de la línea también habrá una mayor caída de tensión. [2]

La fórmula para el cálculo de la caída de tensión es la siguiente:

$$\Delta V_{Tn} = \frac{\sqrt{3} * \rho * L_{Tn} * I_{Tn}}{T_c} \quad (8)$$

Donde

ΔV_{Tn} =Caída de voltaje del tramo [V]

ρ =Resistividad del material conductor

L_{Tn} =Longitud del tramo [m]

I_{Tn} =Corriente del tramo [A]

T_c =Tamaño del cable

* T_n es el número de tramo.

Adicionalmente para calcular la potencia del tramo se requiere de la siguiente formula:

$$I_{Tn} = \frac{P_{Tn}}{\sqrt{3} * (V_L) * FP} \quad (9)$$

Donde

P_{Tn} = Potencia del tramo [W]

V_L = Voltaje de línea [V]

FP = Factor de potencia

* T_n es el número de tramo.

Para calcular el porcentaje de la caída de tensión se usará la siguiente formula:

$$\% = \frac{100\%}{220V} (\Delta V_{Tn}) \quad (10)$$

Donde

$\%$ = Porcentaje de caída de tensión

ΔV_{Tn} = Caída de voltaje del tramo [V]

El porcentaje no debe sobrepasar el 5% del porcentaje de la caída de tensión, y que el 5% de 220 V es 11 V máximo que se debe de tener como caída de tensión.

Es necesario el uso de la tabla de ampacidad y el calibre del conductor, en este proyecto se usará cable de aluminio, del calibre 1/0 a 90° que es el que está instalado en la línea eléctrica desde el transformador hasta el punto de conexión de cada casa habitación. Además, que el aluminio tiene una resistividad de $\rho = 0.0282 \frac{\Omega mm^2}{m}$

Tabla 8. Cable armado tipo MC-LS con 3 conductores de aluminio con aislamiento tipo XHHW-2 más conductor desnudo de tierra, con armadura de aluminio [7]

Tamaño o Designación		Número de hilos	Espesor de aislamiento	Tierra física		Tres Conductores				
				Designación		Diámetro exterior aproximado	Peso total aproximado	Capacidad de conducción de corriente*		
AWG/kcmil	mm ²		mm	AWG	mm ²			mm	kg/100m	60°C
6	13.3	7	1.14	6	13.3	20.9	38.4	40	50	55
4	21.15	7	1.14	6	13.3	22.7	54.4	55	65	75
2	33.62	7	1.14	6	13.3	25.2	69.7	75	90	100
1	42.41	19	1.4	4	21.15	28.7	88.2	85	100	115
1/0	53.48	19	1.4	4	21.15	30.5	101.1	100	120	135
2/0	67.43	19	1.4	4	21.15	32.6	117.4	115	135	150
3/0	85.01	19	1.4	4	21.15	35.2	137.2	130	155	175
4/0	107.2	19	1.4	2	33.62	39.3	159.6	150	180	205
250	126.7	37	1.65	2	33.62	43.0	186.2	170	205	230
300	152	37	1.65	2	33.62	45.7	213.0	195	230	260
350	177.3	37	1.65	2	33.62	48.2	239.4	210	250	280
400	202.7	37	1.65	1	42.41	50.6	268.0	225	270	305
500	253.4	37	1.65	1	42.41	54.8	318.6	260	310	350
600	304	61	2.03	1	42.41	60.8	382.2	285	340	385
750	380	61	2.03	1/0	53.48	66.0	460.3	320	385	435

3.4.5. Diseño De Centro De Transformación (Tipo Poste)

Para diseñar el centro de transformación, es necesario conocer el tipo y número de clientes que se conectarán al transformador. Con estos datos se puede determinar la potencia, los fusibles de protección de MT y los conductores secundarios de bajada. [2]

3.4.5.1. Intensidades nominales

Para cada tipo de transformador, la tabla 9 muestra las intensidades de corriente en media y baja tensión para transformadores trifásicos. [2]

Tabla 9. Intensidad nominal para transformador trifásico [2]

TRIFASICO						
KVA	33 KV	23 KV	13.2 KV	440 V	220 V	127 V
15 KVA	0.26 A	0.38 A	0.66 A	20 A	39 A	68 A
30 KVA	0.52 A	0.75 A	1.31 A	39 A	79 A	136 A
45 KVA	0.79 A	1.13 A	1.97 A	59 A	118 A	205 A
75 KVA	1.31 A	1.88 A	3.28 A	98 A	197 A	341 A
113 KVA	1.97 A	2.82 A	4.92 A	148 A	295 A	511 A
150 KVA	2.62 A	3.77 A	6.56 A	197 A	394 A	682 A
225 KVA	3.94 A	5.65 A	9.84 A	295 A	590 A	1023 A
300 KVA	5.25 A	7.53 A	13.12 A	394 A	787 A	1364 A
400 KVA	7.00 A	10.04 A	17.50 A	525 A	1050 A	1818 A
500 KVA	8.75 A	12.55 A	21.87 A	656 A	1312 A	2273 A
630 KVA	11.02 A	15.81 A	27.56 A	827 A	1653 A	2864 A
750 KVA	13.12 A	18.83 A	32.80 A	984 A	1968 A	3410 A
1000 KVA	17.50 A	25.10 A	43.74 A	1312 A	2624 A	4546 A

3.4.5.2. Cálculo de la potencia del transformador

La potencia del transformador está determinada por el número y el tipo de clientes a los que da servicio. El valor potencial del diseño por tipo de cliente se utiliza para determinar el tamaño. [2]

Se tendrá en cuenta otras cargas, como las del alumbrado público, las no residenciales y las de servicio público, si existen en el Paraje.

Disponer de una reserva técnica del 15% para el 15º año.

$$kVA_{TR} = \frac{P_{T(kW)}}{0.9} \quad (11)$$

Dónde:

$P_{T(kW)}$: Potencia total por alumbrado público y demanda total (kW)

kVA_{TR} : Potencia total trifásica (kVA)

3.4.6. Puesta A Tierra

La conexión a tierra se utiliza para obtener un punto de referencia para medir el voltaje, y para obtener una ruta de retorno común para la corriente. [14]

Los elementos que constituyen la instalación de puesta a tierra son el conductor a tierra y el electrodo de puesta a tierra. [14]

El sistema de puesta a tierra en la subestación es muy importante y que tiene como funciones: [14]

- Garantizar la seguridad del personal contra descargas eléctricas.
- Proporcionar la conexión a tierra para conectar los neutrales del devanado del transformador conectado a tierra a tierra (tierra del neutro).
- Descargar las sobretensiones de los cables de tierra aéreos o de los postes de relámpagos a tierra. Para proporcionar una ruta a tierra para los descargadores de sobretensión.
- Proporcionar una ruta para descargar la carga entre la fase y la tierra por medio de seccionadores de puesta a tierra.
- Proporcionar conexiones a tierra a las estructuras y otros objetos metálicos que no transporten corriente en la subestación (puesta a tierra del equipo) como disyuntores, aisladores, transformadores, condensadores, ... etc.

La puesta a tierra sirve a los siguientes objetivos:

- 1- Proporciona al sistema eléctrico un punto de referencia a través de la masa de la tierra conectando uno de los puntos de la fuente eléctrica con la tierra, de modo que cualquier otro punto del sistema tenga una tensión constante con la tierra.
- 2- La puesta a tierra de las estructuras externas de los equipos eléctricos hace que su voltaje sea igual al voltaje de la tierra, lo que brinda protección a las personas cuando los tocan.
- 3- Encontrar un camino con baja resistencia de tierra para descargar cargas estáticas, rayos y voltajes momentáneos transitorios.

La tierra eléctrica es el punto de referencia del sistema, ya que puede ser el suelo sobre el que nos encontramos, el suelo del equipo eléctrico o el suelo de la instalación.

Para la realización de la puesta a tierra es necesario calcular el conductor, a continuación, se da la fórmula para el cálculo del conductor.

$$A = I \sqrt{\frac{33s}{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}} \quad (12)$$

Dónde:

A= Área del conductor en milésimas de circulares(cmils)

I= Corriente de falla (A)

S= Tiempo de falla (s)

T_m= Temperatura máxima de fusión (tabla 10) en C°

T_a= Temperatura ambiente en C°

Cálculo del área del conductor en Kcmil según la norma IEEE.

$$A_{Kcmils} = I * K_f * \sqrt{t_c} \quad (13)$$

Dónde:

A_{Kcmils}= Area del conductor en Kcmil

I= Corriente de falla (A)

t_c= Tiempo de falla (s)

K_f= Constante de acuerdo con la tabla 11.

Tabla 10. Temperatura máxima de fusión [20]

Descripción	Temperatura de fusión
Alambre de cobre recocido	1083
Alambre de cobre duro	1084
Núcleo de acero con revestimiento de cobre	1084/1300
Alambre de aluminio	657
Aleación de aluminio	660
Alma de acero con recubrimiento de aluminio	660/1300
Alma de acero con cubierta de zinc	419/1300
Acero inoxidable	1400

Tabla 11. Constante Kf según IEEE [21]

Material	Conductivity (%)	T_m ° (°C)	K_f
Copper, annealed soft-drawn	100.0	1083	7.00
Copper, commercial hard-drawn	97.0	1084	7.06
Copper, commercial hard-drawn	97.0	250	11.78
Copper-clad steel wire	40.0	1084	10.45
Copper-clad steel wire	30.0	1084	12.06
Copper-clad steel rod	20.0	1084	14.64
Aluminum EC Grade	61.0	657	12.12
Aluminum 5005 Alloy	53.5	652	12.41
Aluminum 6201 Alloy	52.5	654	12.47
Aluminum-clad steel wire	20.3	657	17.20
Steel 1020	10.8	1510	15.95
Stainless clad steel rod	9.8	1400	14.72
Zinc-coated steel rod	8.6	419	28.96
Stainless steel 304	2.4	1400	30.05

Tabla 12. Calibre del conductor [20]

SIZE		CROSS-SECTIONAL AREA		WEIGHT		OVERALL DIAMETER	
AWG/ kcmil	cir mils	sq inch	sq mm	lb/1000 ft	kg/km	inch	mm
500	500000	0.3927	253.4	1513.5	2252.1	0.707	17.96
350	350000	0.2749	177.3	1059.5	1576.5	0.592	15.04
300	300000	0.2356	152.0	908.0	1351.1	0.548	13.92
250	250000	0.1963	126.7	756.6	1125.8	0.500	12.70
4/0	211600	0.1662	107.2	640.5	952.8	0.460	11.68
3/0	167800	0.1318	85.0	507.8	755.4	0.410	10.41
2/0	133100	0.1045	67.4	402.8	599.2	0.365	9.27
1/0	105600	0.0829	53.5	319.5	475.3	0.325	8.26
1	83690	0.0657	42.4	253.3	376.8	0.289	7.34
2	66360	0.0521	33.6	200.9	298.9	0.258	6.50
3	52620	0.0413	26.7	159.3	237.0	0.229	5.82
4	41740	0.0328	21.1	126.3	187.9	0.204	5.18
5	33090	0.0260	16.8	100.2	149.1	0.182	4.62
6	26240	0.0206	13.3	79.4	118.1	0.162	4.12
7	20820	0.0164	10.5	63.0	93.8	0.144	3.66
8	16510	0.0130	8.4	50.0	74.4	0.128	3.25
9	13090	0.0103	6.6	39.6	58.9	0.114	2.90
10	10380	0.0082	5.3	31.4	46.8	0.102	2.59
11	8230	0.0065	4.2	24.9	37.0	0.091	2.31
12	6530	0.0051	3.3	19.8	29.5	0.081	2.06
13	5180	0.0041	2.6	15.7	23.4	0.072	1.83
14	4110	0.0032	2.1	12.4	18.4	0.064	1.63
15	3260	0.0026	1.7	9.9	14.7	0.057	1.45
16	2580	0.0020	1.3	7.8	11.6	0.051	1.30

Cálculo de la resistencia del electrodo de puesta a tierra

El paraje este situado en la alcaldía milpa alta que el 63% de su suelo es de andosol por lo cual su resistencia es de 80 Ω*m.

La resistencia de puesta a tierra para subestaciones eléctricas debe ser menor a 40 Ω.

La resistencia de puesta a tierra de una varilla se calcula de la siguiente formula:

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1 \right] \tag{14}$$

R_v = Resistencia de una varilla en Ω

ρ = Resistividad del suelo en Ω*m

L = Longitud de la varilla en m

r =Radio de la varilla en m

3.5. Sistema De Aislamiento De Transformadores De Potencia

Dado que los transformadores son más sensibles a las altas temperaturas, su vida útil viene determinada en gran medida por su rendimiento y calidad, lo que determina la confiabilidad de la máquina. [9]

Los sistemas de aislamiento sólido y líquido constituyen la mayor parte del transformador. El aislamiento sólido es fácil de mantener y se puede sustituir fácilmente si se daña. Además, al transferir el calor de las partes móviles al núcleo, el aceite actúa como elemento de refrigeración. [9]

3.5.1. Aislamiento Solido.

El aislamiento de papel kraft en el transformador sumergido en aceite se considera la parte más importante del sistema de aislamiento porque separa el devanado de la parte operativa, y si falla, la vida útil del transformador se reducirá considerablemente. [9]

Su función es aislar las partes metálicas, dividir el espacio de aceite en volúmenes más pequeños que puedan soportar mayores gradientes de campo magnético. También se pueden crear sistemas de barrera de separación de aceite con aislamiento permanente. [9]

3.5.2. Aislamiento Líquido.

El aceite mineral se utiliza como fluido aislante en los equipos eléctricos más grandes. En términos de propiedades dieléctricas y térmicas, hay materiales aislantes que pueden superar a los hidrocarburos, pero ninguno ha logrado aún la combinación necesaria de propiedades iguales o mejores en términos de coste. Por ello, el aceite mineral líquido sigue siendo el tipo de aislamiento más común en los equipos eléctricos. [9]

El aceite mineral, que tiene excelentes propiedades físicas, químicas y eléctricas, desempeña un papel fundamental en el funcionamiento de los transformadores de potencia y se utiliza para el aislamiento y la refrigeración. El análisis de correlación es también un método excelente para detectar fallos en los transformadores y otros componentes del sistema de aislamiento, ya que proporciona información muy detallada sobre su naturaleza y comportamiento. El aceite mineral se utiliza para impregnar el papel aislante, evitando que entre en contacto directo con la humedad. El aceite también se encarga de disipar el calor que genera el transformador. [9]

3.5.3. Características Y Clasificación Del Aislamiento Líquido.

Los aceites aislantes orgánicos e inorgánicos son los dos tipos disponibles. Son los aceites minerales inorgánicos más utilizados en los equipos eléctricos. Además, existe una variedad de aislantes líquidos sintéticos en el mercado, el más común de los cuales es el aceite de silicona. [9]

Los hidrocarburos de alto peso molecular y el tetracloroetileno son dos nuevos aceites sintéticos orgánicos que se han introducido recientemente. Son más caros, pero tienen excelentes propiedades dieléctricas y térmicas. [9]

3.5.4. Funciones Del Aislamiento Líquido

3.5.4.1. Aislamiento eléctrico.

Los aceites aislantes sirven como medio dieléctrico que rodea a los conductores activos, actuando como aislante. El aceite aislante también sirve como capa protectora de las superficies metálicas del equipo. Esta capa evita que los procesos químicos, como la oxidación, afecten a la integridad de la conexión y provoquen la aparición de moho, contaminando así el sistema. [9]

3.5.4.2. Disipación de calor.

La función secundaria del líquido aislante es actuar como disipador de calor. Esto es especialmente importante en los transformadores, donde es habitual el calentamiento localizado en las bobinas y el núcleo. El aceite ayuda a eliminar el calor de estos lugares y a distribuir la energía térmica en la mayor parte de los depósitos de aceite y equipos. La conducción, la convección y la radiación pueden utilizarse para transportar el calor del aceite al entorno. [9]

3.5.5. Factores Que Deterioran El Estado Del Aceite.

A continuación, se indican los principales elementos que tienen un impacto perjudicial en el estado del aceite:

- La temperatura influye en el deterioro del aceite mineral. Por ejemplo, el aumento de la temperatura en 8 grados centígrados respecto a los 60 grados centígrados reduce la vida media del aislamiento líquido en un tercio. [9]
- El agua: La manipulación y el mantenimiento inadecuados del aceite pueden provocar la contaminación del agua en forma de gotas o "nubes". El agua es el enemigo número uno del aislamiento de los transformadores, como todos sabemos. [9]

- Gases disueltos en el aceite, como hidrógeno, oxígeno, metano, dióxido de carbono y otros gases. [9]
- Productos iónicos y polares: Estos contaminantes pueden estar presentes en el aceite como resultado de su proceso de refinado, así como del deterioro del aceite dentro del transformador, de los disolventes de pintura y barniz, y quizás de otros aislamientos contaminados inyectados. [9]
- Partículas: Estos contaminantes se introducen en el aceite fresco a lo largo del proceso de producción y durante el tránsito. Predominan los óxidos metálicos y los metales, principalmente el hierro y el cobre, así como los metales disueltos, como el zinc, el níquel, el vanadio y el sodio. [9]
- Tensión eléctrica: exponer el aceite a un fuerte campo eléctrico puede acelerar su descomposición. [9]
- PCBs: Los PCB se utilizaban antiguamente en los transformadores de potencia, pero ahora están prohibidos. Los PCB se consideran contaminantes, nocivos e inaceptables por el aceite de transformador detectable. [9]

CAPITULO IV. DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1. Cálculos Eléctricos Para El Transformador

4.1.1. Cálculo De La Carga

- Número de usuarios (actuales): 76
- Número de usuarios (a futuro): 12

Totales: 88

Actualmente el Paraje está en vigor una tarifa por parte de CFE y la cual es la tarifa 01 que cuenta con los siguientes datos:

- ◆ 250 kWh al mes

De acuerdo con la Tabla 6 se afirma que se encuentra en el rango “Medio” y se obtiene lo siguiente:

- P_i =Potencia inicial: 1.7 kW
- P_d =Potencia de diseño: 1.97 kW

A continuación, se realizará el cálculo de la potencia de diseño de cada usuario teniendo el factor de demanda.

Con la Tabla 7 se hará la referencia del tipo de construcciones que existe en el Paraje, se concluye que en el paraje existe casa habitación por lo que el factor de demanda para el transformador es de 0.6.

Por lo tanto

$$P_{00} = P_d * FD = 1.97kW * 0.6 = 1.182kW \quad (15)$$

Donde

P_{00} es la potencia de cada usuario

P_d es la potencia de diseño

Para calcular la potencia de todos los usuarios se multiplica P_{00} por el total de usuarios

$$P_{01} = 1.182kW * 88 = 104.02 kW \quad (16)$$

Se procede al cálculo de las luminarias de alumbrado público, para ello se tiene un factor de demanda del 0.9 y la potencia de cada luminaria es de 200 W

$$P_{02} = 0.12kW * 0.9 = 0.108kW \quad (17)$$

Se tiene un total de 25 luminarias de alumbrado público a lo largo del Paraje así que se procede a realizar el cálculo del total de luminarias

$$P_{03} = 0.108kW * 25 = 2.7 kW \quad (18)$$

Por último, se calcula la potencia total demandada, se suma la potencia total de los usuarios y la total de las luminarias

$$P_T = P_{01} + P_{03} = 104.02kW + 2.7kW = 106.71kW \quad (19)$$

Adicionalmente se le agrega una reserva técnica del 15% de la potencia total demandada

$$P_T = 115kW(15\%) = 122.72kW \quad (20)$$

4.1.2. Cálculo Del Centro De Transformación

Con la ecuación 11 se realizará el cálculo de kVA a partir de kW, por lo tanto, se obtiene

$$S = KVA_{TR} = \frac{P_{T(kW)}}{0.9} = \frac{122.72kW}{0.9} = 136.35kVA \quad (21)$$

4.1.3. Selección Del Transformador

La carga total demandada por parte de los usuarios del Paraje es de 136.35 kVA.

En la selección del transformador se tuvieron varias propuestas, de entre todas ellas se propone el transformador tipo poste trifásico de la marca IG con una potencia de 150 kVA y un voltaje del lado primario de 13200 V y un voltaje en el secundario de 220/127 V.

También se tiene la potencia activa y la potencia aparente nominales:

$$P_n = 135kW$$

$$S_n = 150 kVA$$

A continuación, se enlistan los datos del transformador por parte del fabricante.

- TRANSFORMADOR TIPO POSTE 150 KVA 13200V MONOFÁSICO 120/240V
- MARCA: IG
- NORMA "K" SE PUEDE CEDER A CFE
- DEVANADO A/A
- ACERO AL CARBON
- TRIFASICO
- TIPO POSTE

Con los kVA obtenidos del centro de transformación y la selección del transformador, obtenemos una cargabilidad del 90.9 % con una tolerancia del 10% por sobrecarga.



Figura 15. Transformador marca IG

4.1.4. Cálculo De Corriente Nominal Del Lado Secundario

$$I_{NomS} = \frac{P_n}{\sqrt{3}(V)(FP)} = \frac{135 \text{ kW}}{\sqrt{3}(0.22\text{kV})(0.9)} = 393.64 \text{ A} \quad (22)$$

4.1.5. Cálculo De Corriente Nominal Del Lado Primario

$$I_{NomP} = \frac{S_n}{\sqrt{3}(V)} = \frac{150\text{kVA}}{\sqrt{3}(13.2\text{kV})} = 6.56 \text{ A} \quad (23)$$

4.1.6. Cálculo De Corriente De Corto Circuito

De acuerdo con la IEEE para este transformador se tiene una impedancia de:

$$z=2.86\%$$

El cálculo de corto circuito queda de la siguiente forma

$$I_{cc} = \frac{I_{NomS}}{z} \quad (24)$$

$$I_{cc} = \frac{393.64\text{A}}{0.0286} = 13,763 \text{ A} \quad (25)$$

4.1.7. Cálculo De Caída De Tensión

Actualmente el Paraje cuenta con conductores del calibre AWG 1/0 ASCR, por ello ya no se realizará el cálculo para el conductor y en base al conductor instalado y la distancia se realizará el cálculo de la caída de tensión por tramo.

El paraje se divide en varias secciones que está delimitado por las cuadras, en ellas está instalado dicho conductor.

En la tabla 13 se presenta los datos por tramo:

Tabla13. Datos por tramo del Paraje.

Tramo	Longitud [m]	Luminarias [Lu]	Usuario [Us]
1	152	6	22
2	115	5	16
3	90	4	16
4	120	6	19
5	80	4	16
Total		25	88

Se utilizará la ecuación 8 para el cálculo de la caída de tensión en términos de voltaje y porcentaje para cada tramo, el cual no debe de sobre pasar 11 V o lo que es igual al 5%.

Como primer paso se calcula la potencia para cada tramo:

En este caso P_{02} y P_{00} se mantienen constante ya que son las potencias de cada luminaria y usuario. Solo Lu y Us van a variar por cada tramo.

$$P_{T1} = (P_{02})(Lu) + (P_{00})(Us) = (0.108kW)(6) + (1.182kW)(22) = 26.652kW \quad (26)$$

$$P_{T2} = (P_{02})(Lu) + (P_{00})(Us) = (0.108kW)(5) + (1.182kW)(16) = 19.452kW \quad (27)$$

$$P_{T3} = (P_{02})(Lu) + (P_{00})(Us) = (0.108kW)(4) + (1.182kW)(16) = 19.344kW \quad (28)$$

$$P_{T4} = (P_{02})(Lu) + (P_{00})(Us) = (0.108kW)(6) + (1.182kW)(19) = 23.106kW \quad (29)$$

$$P_{T5} = (P_{02})(Lu) + (P_{00})(Us) = (0.108kW)(4) + (1.182kW)(15) = 18.162kW \quad (30)$$

Se hará uso de la ecuación 9 para el cálculo de la corriente para cada tramo:

$$I_{T1} = \frac{P_{T1}}{\sqrt{3} \cdot (V_L) \cdot FP} = \frac{26652W}{\sqrt{3} (220V)(0.9)} = 77.71A \quad (31)$$

$$I_{T2} = \frac{19452W}{\sqrt{3} (220V)(0.9)} = 56.72A \quad (32)$$

$$I_{T3} = \frac{19344W}{\sqrt{3} (220V)(0.9)} = 56.40A \quad (33)$$

$$I_{T4} = \frac{23106W}{\sqrt{3} (220V)(0.9)} = 67.37A \quad (34)$$

$$I_{T5} = \frac{18162W}{\sqrt{3} (220V)(0.9)} = 52.95A \quad (35)$$

Una vez teniendo la corriente para cada tramo se realiza el cálculo de la caída de tensión para cada tramo, con la tabla 8 se obtiene el tamaño del conductor (T_c), además la resistividad del aluminio es de $\rho = 0.0282 \frac{\Omega mm^2}{m}$

$$\Delta V_{T1} = \frac{\sqrt{3} * \rho * L_{T1} * I_{T1}}{T_c} = \frac{\sqrt{3}(0.0282 \frac{\Omega mm^2}{m})(152m)(77.71A)}{53.48mm^2} = 10.78V \quad (36)$$

$$\Delta V_{T2} = \frac{\sqrt{3}(0.0282 \frac{\Omega mm^2}{m})(115m)(56.72A)}{53.48mm^2} = 5.96V \quad (37)$$

$$\Delta V_{T3} = \frac{\sqrt{3}(0.0282 \frac{\Omega mm^2}{m})(90m)(56.40A)}{53.48mm^2} = 4.64V \quad (38)$$

$$\Delta V_{T4} = \frac{\sqrt{3}(0.0282 \frac{\Omega mm^2}{m})(120m)(67.37A)}{53.48mm^2} = 7.38V \quad (39)$$

$$\Delta V_{T5} = \frac{\sqrt{3}(0.0282 \frac{\Omega mm^2}{m})(80m)(52.95A)}{53.48mm^2} = 3.86V \quad (40)$$

En porcentaje por tramo quedaría:

$$\%_1 = \frac{100\%}{220V} (\Delta V_{T1}) = \frac{100\%}{220V} (10.78V) = 4.90\% \quad (41)$$

$$\%_2 = \frac{100\%}{220V} (5.96V) = 2.70\% \quad (42)$$

$$\%_3 = \frac{100\%}{220V} (4.64V) = 2.11\% \quad (43)$$

$$\%_4 = \frac{100\%}{220V} (7.38V) = 3.36\% \quad (44)$$

$$\%_5 = \frac{100\%}{220V} (3.86V) = 1.76\% \quad (45)$$

Se concluye que cada tramo no excede más del 5%, así que la caída de tensión se encuentra en el rango permitido.

4.2. Selección Del Fusible

La corriente del lado primario es de 6.56 A @ 13,200 V.

De acuerdo con la tabla 14 se seleccionará un fusible tipo K (rápido).

Como el voltaje es a 13.2 kV, se usará un fusible 10K, ya que la corriente es de 6.56 A, y la corriente nominal para este fusible es de 10 A.

Se cuenta con los siguientes datos:

Tabla 14. Fusibles tipo K (rápidos) [15]

Corriente nominal permanente (A)	Corriente Nominal 300 Segundos +		Corriente Nominal 10 Segundos		Corriente Nominal 0,1 segundos		Relación de Velocidad
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
6	12	14,4	13,5	20,5	72	86	6
10	19,5	23,4	22,5	34	128	154	6,6
15	31	37,2	37,2	55	215	258	6,9
20	39	47	48	71	237	328	7
25	50	60	60	90	344	420	7
30	63	76	77,5	115	447	546	7,1
40	80	96	96	146	565	680	7,1

En la selección se usará: Eslabón / Liston fusible tipo K para media tensión 15 kV de 10 A, de la marca "Electramex" y número de parte EF 15K-10. [16]

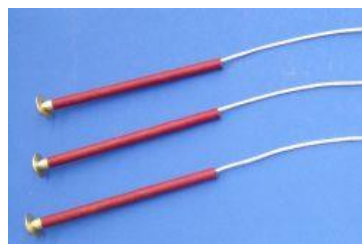


Figura 16. Liston fusible tipo K 10 A [16]

4.3. Puesta A Tierra

Por norma se establece lo siguiente:

- La puesta a tierra debe ser de un calibre 4 AWG de cobre desnudo como mínimo.
- Los conductores ASCR o AAC no se deben usar.

- Todos los neutros se deben interconectar.

Cálculo del conductor de puesta a tierra.

T_m se da a partir de la tabla 10, en donde se selecciona un conductor de alambre de cobre recocido, T_a se da por la temperatura ambiente del Paraje.

$$A = I \sqrt{\frac{33s}{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}} = (13763) \sqrt{\frac{33(3)}{\log\left(\frac{1083 - 24}{234 + 24} + 1\right)}} = 162,751.30 \text{ cmils} \quad (45)$$

Con estos valores y de acuerdo con la tabla 12, el calibre del conductor es del #3 AWG, que por norma esto no es posible. Así que se procede a realizar otro cálculo de acuerdo con la IEEE.

K_f se determina a partir de la tabla 7 dada por la IEEE.

$$A_{Kcmils} = I * K_f * \sqrt{t_c} = (13.763) * (7.06) * \sqrt{3} = 168.3 \text{ Kcmils} \quad (46)$$

Con estos valores el conductor a elegir es de cobre recocido calibre #4 AWG desnudo, así que el calibre del conductor es aceptable por norma.

Cálculo de resistencia de varilla de puesta a tierra.

Como primer paso es determinar el tipo de suelo, en el Paraje el suelo que más predomina es andosol, el cual tiene una resistividad de $80 \Omega \cdot m$.

A continuación, se realiza el cálculo de la resistencia de la varilla de puesta a tierra, la cual tiene que ser menor a 40Ω .

La longitud de la varilla es de 2.4 m con un radio de 0.008 m.

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1 \right] = \frac{80}{2\pi(2.4)} \left[\ln\left(\frac{4(2.4)}{0.008} - 1\right) \right] = 11.03\Omega \quad (47)$$

Entonces el valor de la resistencia de la varilla es mucho menor al que es aconsejado por norma, así que esta resistencia es adecuada para el sistema.

4.4. Selección Del Apartarrayos

Para su selección solo se usará la clase 2 ya que el voltaje nominal del sistema no es mayor a 34.5 kV.

Se tiene una tensión nominal del lado primario del transformador de 13.2 kV y de acuerdo con la tabla se tiene un sistema es 3F-4H y es multiterrizado, de acuerdo con la tabla 5, Ke es de 0.75.

El cálculo del voltaje del apartarrayos queda así:

$$V_n = K_e (V_{max.}) = (0.75)(13.2kV) = 9.9 \text{ kV} \quad (48)$$

Vn es el voltaje del apartarrayos

De acuerdo con la tabla X, y comparando las características dadas por el fabricante, se procede a seleccionar el apartarrayos de la marca "IUSA" con el No. de artículo: APMOAC-10 que cuenta con las características requeridas.

Tabla 15. Catálogo de apartarrayos de IUSA. [19]

CARACTERÍSTICAS	APMOAC-10	APMOAC-12	APMOAC-18	APMOAC-21	APMOAC-27	APMOAC-30
Descripción corta CFE	ADOM-C-10	ADOM-C-12	ADOM-C-18	ADOM-C-21	ADOM-C-27	ADOM-C-30
Tensión nominal del sistema (kV)	13,8	13,8	23	23	34,5	34,5
Tensión nominal y tipo de sistema	13,8 kV / 3F - 4H	13,8 kV / 3F - 3H	23 kV / 3F - 4H	23 kV / 3F - 3H	34,5 kV / 3F - 4H	34,5 kV / 3F - 3H
Tensión nominal del apartarrayo (kV)	10	12	18	21	27	30
Tensión de aguante del aislamiento	Prueba al impulso 1,2/50 µs (kV Cresta)	75	85	125	150	150
	Prueba de tensión c.a a 60 Hz húmedo 1 min (kV Eficaz)	24	27	36	36	60
	Tensión durante la prueba de contaminación (kV Eficaz)	8,4	8,4	14,6	14,6	21,9
Tensiones residuales máximas	Al impulso de corriente por maniobra 30/60 µs (kV Cresta)	29	35	53	61	79
	Al impulso de corriente por rayo 10 kA cresta 8/20 µs (kV Cresta)	36	44	65	76	98
	Al impulso de corriente escarpado 10 kA cresta 1/20 µs (kV Cresta)	40	48	72	84	108
Tensión operación continua (T.O.C) (kV Eficaz)	8,4	10,2	15,3	17,0	22,0	24,4
Valor máximo de descargas parciales (pC)	10	10	10	10	10	10
Distancia mínima de fuga (mm)	440	440	645	645	950	950
Masa neta aproximada (kg)	8,0	8,1	11,4	11,6	14,7	15,0



Figura 17. Apartarrayos IUSA APMOAC-10 [19]

4.5 Diseño Final

Para realizar el diseño fue necesario realizarlo en AUTOCAD, el cual establece el diseño de la puesta del transformador trifásico instalado en un poste, además de sus dispositivos necesarios para su funcionamiento.

En las siguientes figuras se muestran los planos en diferentes vistas.

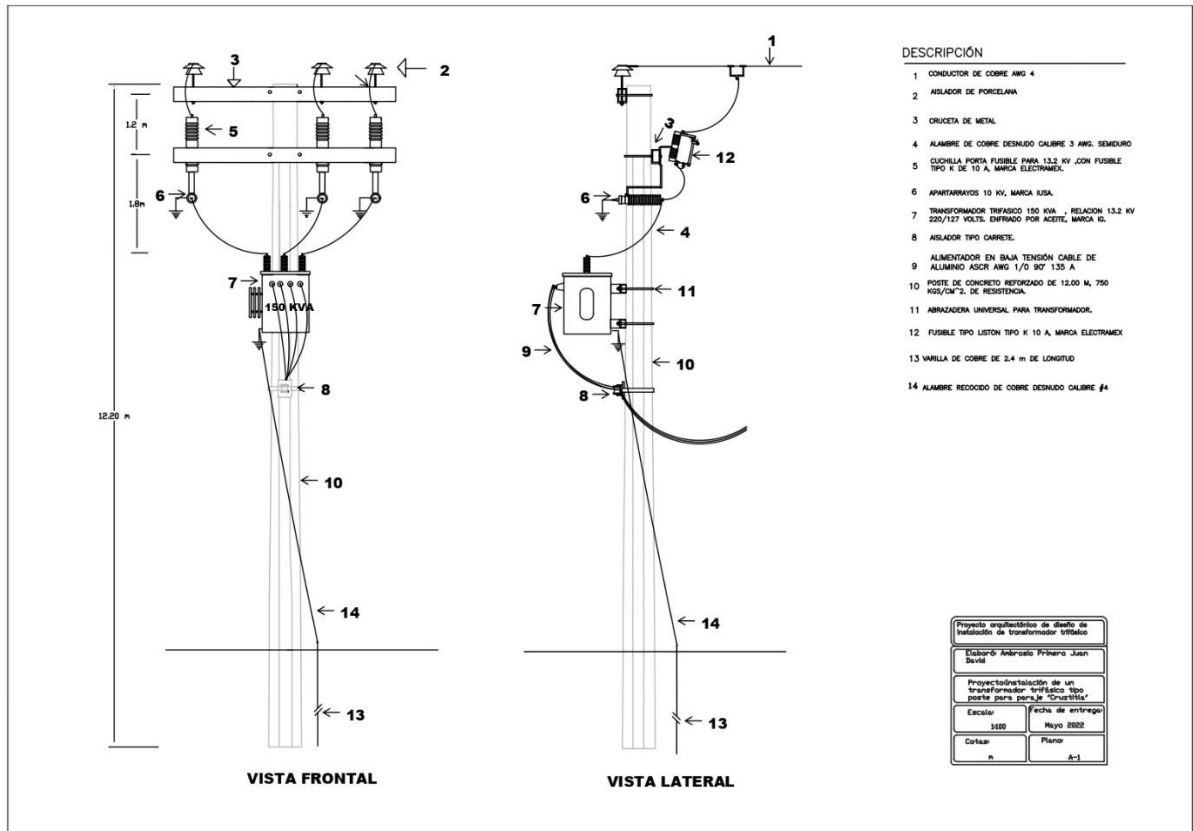


Figura 18. Vista frontal y vista lateral del diseño de instalación de transformador trifásico de 150 kVA.

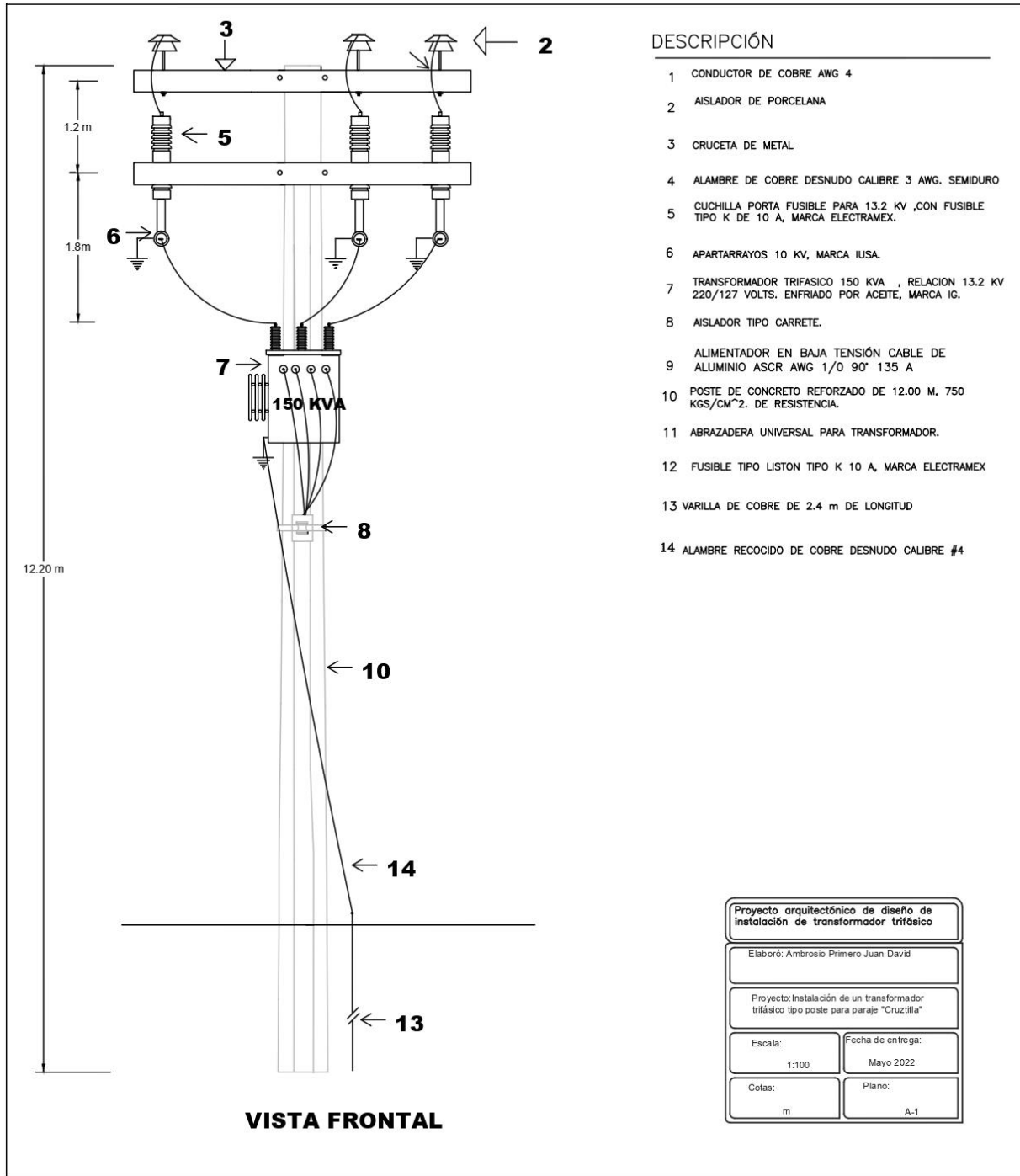


Figura 19. Vista frontal del diseño de instalación de transformador trifásico de 150 kVA.

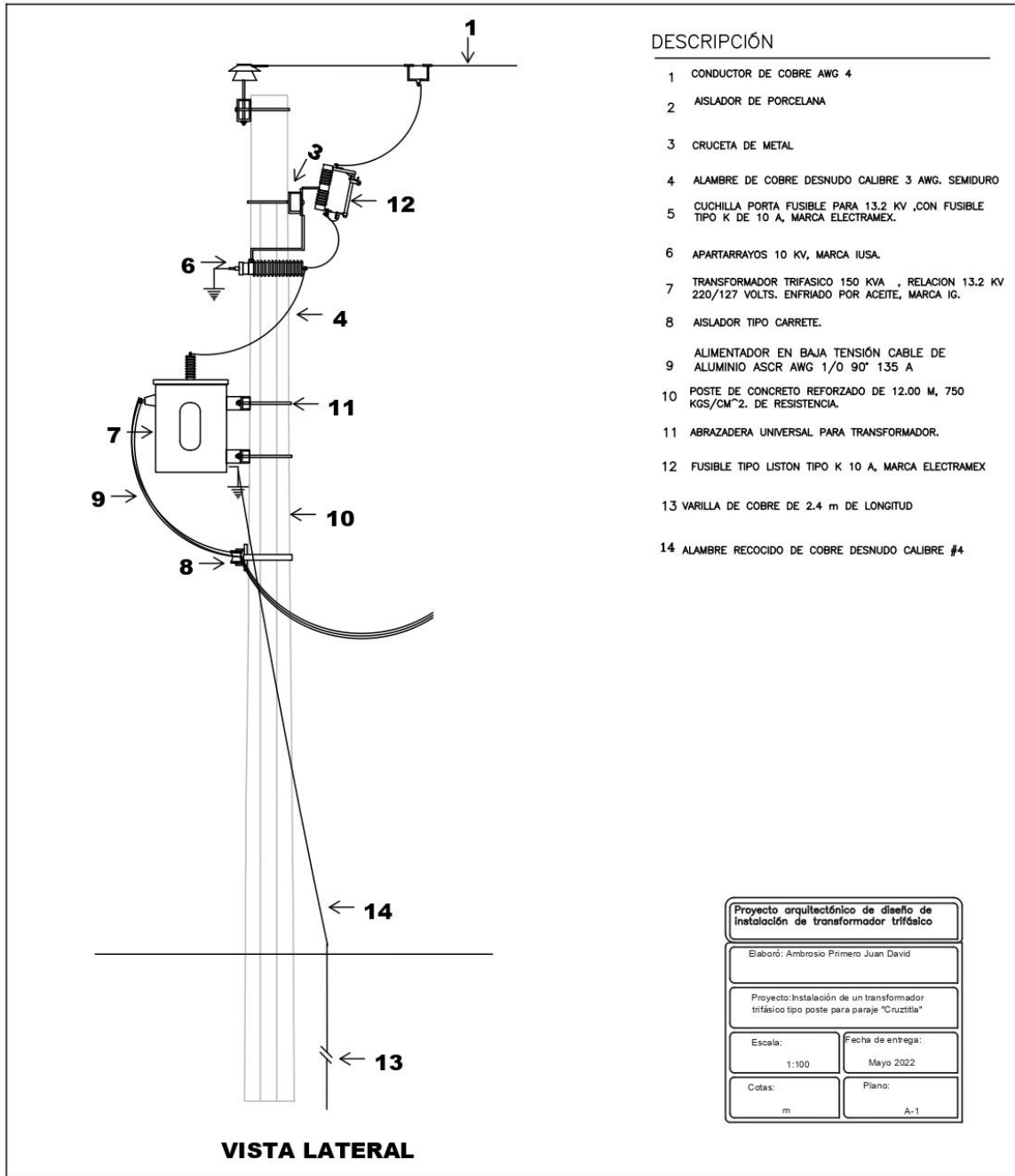


Figura 20. Vista lateral del diseño de instalación de transformador trifásico de 150 kVA.

CAPITULO V. CONCLUSIONES

Los transformadores son componentes indispensables en los sistemas de corriente alterna, para transformar tensiones, corrientes e impedancias a los niveles adecuados y así tener un buen funcionamiento.

El diseño de la puesta del transformador es una solución al problema de alta demanda del paraje. Mediante los cálculos realizados se determinó el transformador adecuado para la demanda de los usuarios y que garantiza un crecimiento dentro de los próximos 15 años.

El diseño realizado en AUTOCAD es una interpretación ilustrada para poder visualizar la instalación del transformador, es un diseño muy similar a los diseños de CFE, así como también cuenta con las normas vigentes para su posible instalación.

Los valores obtenidos en la caída de tensión calculados están dentro del rango establecido por norma, con ello se hace cumplimiento de la norma y así la caída de tensión queda regularizada y además cuando se realice la instalación la caída de tensión será baja.

En la selección de materiales para el diseño de la puesta del transformador se contempló que fueran dispositivos que su venta sea dentro de la República Mexicana y estén en existencia.

Todos los elementos para la puesta del transformador son los que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y NOM 001 recomienda más sin embargo el transformador carece de protecciones y seguridad para óptimo funcionamiento y garantizar más años de vida. Ejemplo de ello son las protecciones del lado del secundario, así como también protegerlo contra polvo, vientos fuertes y lluvias.

El no proteger y tener seguridad en los transformadores tipo poste es una consecuencia de su mal funcionamiento y como consecuencia se tiene un mal servicio de energía eléctrica en los hogares, siendo esto un problema grave para los aparatos eléctricos conectados a la red. Por ello este proyecto es una solución adecuada al problema de una alta demanda de energía eléctrica presentada en el Paraje.

CAPITULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]Hernández Acevedo Andrés, Ledesma Vilchis Rubén Rodrigo, & Perera Martínez Eduardo Alejandro. (2007). Manual de pruebas a transformadores de distribución. ESIME Zacatenco. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10577/77.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2]Grethel Vanessa Brenes Vanegas, & Denis Isaac Robles Rojas. (2016, septiembre). Diseño, cálculos eléctricos y mecanismos de un proyecto de electrificación rural en la comunidad Tisey municipio de Wiwili. Universidad Nacional de Ingeniería. <https://ribuni.uni.edu.ni/1356/1/80734.pdf>
- [3] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., & Stephen D. Umans. (2004). *Máquinas eléctricas* (Sexta edición ed.). McGraw-Hill.
- [4] Stephen J. Chapman, "Máquinas Eléctricas", 5º Edición, McGraw-Hill, 2012.
- [5] Bhag S. Guru, Huseyin R. Hiziroglu," Máquinas Eléctricas y Transformadores", 3º Edición, Oxford University Press, 2003
- [6] John J. Grainger, & William D. Stevenson Jr. (1994). *Análisis de sistemas de potencia* (Primera edición ed.). McGraw-Hill.
- [7] Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización).
- [8] Transformadores. (2021). Endesa. <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educacion/recursos/corrientes-alternas-con-un-transformador-electrico>
- [9] MARTÍNEZ AMAYA, W. S., RAMÍREZ SORTO, L. M., & SOTO HERNÁNDEZ, P. A. (2014, octubre). Evaluación térmica en transformadores de potencia, cargabilidad y efectos en la vida del sistema de aislamiento. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/6538/1/Evaluaci%C3%B3n%20t%C3%A9rmica%20en%20transformadores%20de%20potencia%20cargabilidad%20y%20efectos%20en%20la%20vida%20del%20sistema%20de%20aislamiento.pdf>

- [10] Separata del Curso Transformadores de Potencia. (2013). Análisis comparativo de los grupos de conexión más importantes. edu. <http://umh2223.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/188/2013/02/Grupos-de-Conexi%C3%B3n.pdf>
- [11] Apartarrayos de óxidos metálicos para redes de distribución. (2016). CFE, CFE. <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/t/VA410-43.pdf>
- [12] Eslabones fusibles. (2015, octubre). Chance. <https://hubbell.com.mx/wp-content/uploads/2020/08/10B-FuseLinks-GUIA-HPS.pdf>
- [13] J. (2021). Cálculo y Selección de Apartarrayos. Scribd. <https://es.scribd.com/document/507833368/Calculo-y-Seleccion-de-Apartarrayos>
- [14] Consorcio de ingeniería eléctrica. (2022, 19 febrero). Ingeniería eléctrica [Investigación]. Facebook. https://m.facebook.com/story.php?story_fbid=990423685192331&id=304540563780650
- [15] ET501 Fusibles para MT, tipo K y tipo T | Likinormas. (2016). likinormas. https://likinormas.micodensa.com/Especificacion/aisladores/et501_fusibles_mt_tipo_h_k_t
- [16] Eslabón Fusible tipo K para Canilla XS Electramex | Provelectrica. (s. f.). provelectrica. <https://provelectrica.com/producto/eslabon-fusible-tipo-k-para-canilla-xs-electramex/>
- [19] IUSA. (2018). Catálogo de energía. <https://www.iusa.com.mx/assets/descargables/catalogo-de-energia.pdf>
- [20] American Wire Gauge (AWG). (2014). electricalengineering. Geraadpleegd op 30 april 2022, van <https://www.electricalengineeringtoolbox.com/2014/07/american-wire-gauge-awg.html>
- [21] IEEE Green Book, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", ANSI/IEEE Std 142-1991, New York, 1996, USA. ISBN I-55937-141-2.