



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS TÉCNICO DE EXTENSIONES DE LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN EN 13.8 KV CON
CABLE AAAC ECOLÓGICO Y COMPARACIÓN ECONÓMICA CON LÍNEAS CONSTRUIDAS
CON CABLE ACSR AISLADAS EN AIRE**

Julio Andrés Gaitán Álvarez

Asesorado por el Ing. Julio Rolando Barrios Archila

Guatemala, mayo de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS TÉCNICO DE EXTENSIONES DE LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN EN 13.8 KV CON
CABLE AAAC ECOLÓGICO Y COMPARACIÓN ECONÓMICA CON LÍNEAS CONSTRUIDAS
CON CABLE ACSR AISLADAS EN AIRE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JULIO ANDRÉS GAITÁN ÁLVAREZ

ASESORADO POR EL ING. JULIO ROLANDO BARRIOS ARCHILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

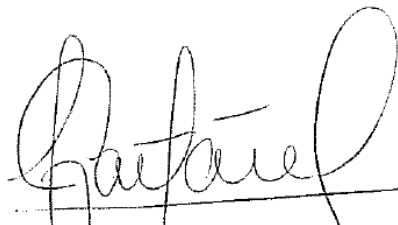
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS TÉCNICO DE EXTENSIONES DE LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN EN 13.8 KV CON CABLE AAAC ECOLÓGICO Y COMPARACIÓN ECONÓMICA CON LÍNEAS CONSTRUIDAS CON CABLE ACSR AISLADAS EN AIRE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha de 4 de mayo de 2011.



Julio Andrés Gaitán Álvarez

Guatemala, 21 de Octubre de 2011

Ingeniero
Romero López
Coordinador del Área de Electrotecnia
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor coordinador

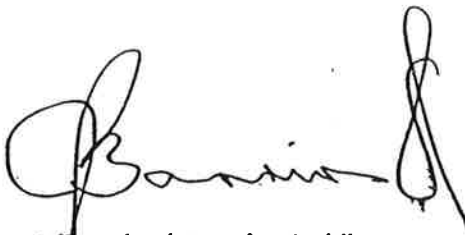
De manera atenta envío a usted el trabajo de graduación elaborado por el señor Julio Andrés Gaitán Álvarez, titulado:

Análisis técnico de extensiones de línea de media tensión en 13.8KV con cable AAAC ecológico y comparación económica con líneas construidas con cable ACSR aisladas en aire

En mi calidad de asesor le informo que he revisado el mencionado trabajo y me permito sugerir el mismo para su aprobación e impresión ya que considero que reúne los requisitos establecidos para tal fin.

Por lo tanto, el autor de éste trabajo de graduación y yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente,



Ing. Julio Rolando Barrios Archila
Colegiado 2833
Asesor

Julio Rolando Barrios Archila
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 2833



Ref. EIME 10-A 2012
Guatemala 7 de MARZO 2012.

Señor Director:
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
ANÁLISIS TÉCNICO DE EXTENSIONES DE LÍNEA DE MEDIA
TENSIÓN EN 13.8KV CON CABLE AAAC ECOLÓGICO Y
COMPARACIÓN ECONÓMICA CON LÍNEAS CONSTRUIDAS
CON CABLE ACSR AISLADAS EN AIRE, del estudiante Julio
Andrés Gaitán Álvarez, que cumple con los requisitos establecidos
para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
DID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Ernesto Iván López Orozco
Coordinador de Electrotécnica



RNLO/sro



REF. EIME 18. 2012.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación de la estudiante; Julio Andrés Gaitán Alvarez titulado: ANÁLISIS TÉCNICO DE EXTENSIONES DE LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN EN 13.8KV CON CABLE AAAC ECOLÓGICO Y COMPARACIÓN ECONÓMICA CON LÍNEAS CONSTRUÍDAS CON CABLE ACSR AISLADAS EN AIRE, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

GUATEMALA, 8 DE MARZO 2012.

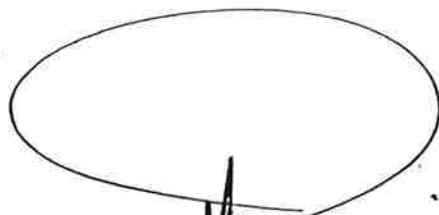




Ref. DTG.204-2011

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS TÉCNICO DE EXTENSIONES DE LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN EN 13.8 KV CON CABLE AAAC ECOLÓGICO Y COMPARACIÓN ECONÓMICA CON LÍNEAS CONSTRUIDAS CON CABLE ACSR AISLADAS EN AIRE**, presentado por el estudiante universitario Julio Andrés Gaitán Alvarez, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, mayo de 2012

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por permitirme vivir este gran momento.
- Mi madre** Cecilia Álvarez, por siempre apoyarme a lo largo de toda mi vida y convertirse en mi modelo a seguir.
- Mi padre** Julio Gaitán, por sus enseñanzas y por todo su apoyo.
- Mis hermanos** Luis Pedro y Juan Antonio, por su incondicional apoyo.
- Mi abuela** Gloria Macelli, por su ejemplo.
- Mi asesor** Julio Barrios, por su ayuda en la asesoría de este trabajo.

1.2.1.4.	Propiedades de los conductores con la fatiga	20
1.2.2.	Conductor <i>ACSR</i> aislado en aire	21
1.2.3.	Conductor <i>AAAC</i> ecológico	23
1.3.	Factores de riesgo de falla	30
1.3.1.	Desgaste de conductores	30
1.3.2.	Robos de energía	31
1.3.3.	Arbolado	31
2.	EXTENSIONES DE LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN CON CABLE <i>AAAC</i> ECOLÓGICO	33
2.1.	Aspectos generales	33
2.1.1.	Requerimientos de diseño	36
2.1.2.	Ventajas.....	38
2.1.3.	Desventajas.....	39
2.1.4.	Herrajes	43
2.2.	Diseño mecánico	57
2.2.1.	Apoyos.....	58
2.2.2.	Distancias de seguridad	61
2.3.	Diseño eléctrico	67
2.3.1.	Capacidad	67
2.3.2.	Cálculo de conductores	73
2.4.	Mantenimiento preventivo	75
2.4.1.	Factores técnicos de riesgo de falla	76
2.4.2.	Factores no técnicos de riesgo de falla	77
3.	CASO REAL: EXTENSIÓN EN 10 CALLE COLONIA LOS PINOS, ZONA 7 DE MIXCO	81
3.1.	Generalidades	81

3.1.1.	Características y criterios de diseño	82
3.1.2.	Métodos de construcción, diseño y presupuesto	84
3.2.	Diseño mecánico	87
3.2.1.	Apoyos y herrajes	87
3.2.2.	Distancias de seguridad	90
3.3.	Diseño eléctrico	90
3.3.1.	Análisis de carga.....	90
3.3.2.	Conductores.....	95
3.4.	Diseño utilizando cable AAAC ecológico	95
3.4.1.	Criterios y requerimientos de diseño.....	96
3.4.2.	Apoyos y herrajes	96
3.4.3.	Conductores y capacidad.....	98
3.4.4.	Riesgos de operación	98
3.5.	Costos de mano de obra.....	100
3.6.	Materiales y mano de obra con conductor ACSR desnudo	102
4.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	105
4.1.	Extensiones usando cable ecológico	112
4.1.1.	Costos técnicos.....	112
4.1.2.	Costos no técnicos	112
4.2.	Extensiones usando cable aislado en aire	115
4.2.1.	Costos técnicos.....	116
4.2.2.	Costos no técnicos.....	117
4.3.	Análisis comparativo de inversión.....	119
4.3.1.	Inversión inicial.....	120
4.3.2.	Análisis de inversión a 1 año.....	121
4.3.3.	Análisis de inversión a 10 años.....	126
4.3.4.	Análisis de inversión a 15 años.....	127

CONCLUSIONES.....	129
RECOMENDACIONES	131
BIBLIOGRAFÍA	133

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Línea de distribución trifásica aérea.....	3
2.	Configuración mallada de líneas de distribución	5
3.	Conexión de circuitos principales a una subestación de transformación.....	6
4.	Conexión de ramales en los circuitos principales.....	7
5.	Cable tripolar de cobre	16
6.	Cable de aluminio trefilado.....	17
7.	Conductor <i>ACSR</i> aislado en aire	22
8.	Configuraciones aéreas de líneas ecológicas.....	24
9.	Cable ecológico.....	24
10.	Línea ecológica de distribución trifásica convencional	34
11.	Línea ecológica compacta.....	36
12.	Variables calóricas de un conductor energizado	40
13.	Circuito térmico de transferencia de calor entre el elemento conductor y aislante en un cable energizado	40
14.	Aislador de polímero tipo pin 15 kV.....	44
15.	Alambre de amarre para líneas ecológicas.....	46
16.	Aisladores tipo pin con grapa incorporada.....	47
17.	Distancia entre cables de fase en líneas de distribución.....	49
18.	Espaciador para líneas compactas	51
19.	Espaciador para líneas compactas sin grapas incorporadas	52
20.	Espaciador instalado y apoyado en poste.....	53
21.	Espaciador trifásico con grapas incorporadas.....	54





22.	Espaciador para ángulos mayores de 20 grados.....	54
23.	Espaciador para redes monofásicas.....	55
24.	Conversión a líneas compactas.....	56
25.	Apoyo para espaciador.....	57
26.	Catenaria entre dos postes.....	63
27.	Vectores para cálculo de flecha.....	65
28.	Plano de construcción.....	86
29.	Demanda diaria según AMM.....	106
30.	Demanda diaria calculada.....	107
31.	Curva diaria de pérdidas monetarias.....	110

TABLAS

I.	Comparación técnica entre cobre y aluminio.....	19
II.	Características técnicas de conductores normados en Guatemala...20	
III.	Características del conductor AAAC ecológico.....	26
IV.	Características de capacidad y peso de conductores.....	26
V.	Alturas de postes.....	59
VI.	Distancias mínimas de seguridad.....	62
VII.	Cuantificación de materiales para extensión de línea con cable ecológico.....	88
VIII.	Cálculos generales.....	93
IX.	Porcentaje de reserva para sobrecarga.....	94
X.	Herrajes agrupados para línea aislada al aire.....	97
XI.	Cuantificación de unidades de mano de obra línea ecológica.....	101
XII.	Precio total de extensión de línea ecológica.....	101
XIII.	Cuantificación de unidades de mano de obra línea ACSR.....	102
XIV.	Total de inversión línea desnuda.....	103
XV.	Análisis de pérdidas.....	108

XVI.	Pérdidas monetarias para la distribuidora.....	109
XVII.	Análisis de ingresos	111
XXVIII.	Costos de rutas de mantenimiento de arbolado.....	113
XIX.	Costos por rutas de monitoreo de línea	114
XX.	Inversión inicial línea ecológica.....	114
XXI.	Costos no técnicos de línea ecológica.....	115
XXII.	Pérdidas y corte de energía por roce de árboles mayo 2011.....	117
XXIII.	Costo anual por rutas de monitoreo	118
XXIV.	Costos no técnicos anuales.	119
XXV.	Costos iniciales de inversión línea ecológica	120
XXVI.	Inversión inicial de línea con cable desnudo.....	120
XXVII.	Análisis de flujo de efectivo para el primer año.....	122
XXVIII.	Balance de inversión a 5 Años.....	123
XXIX.	Flujo de efectivo anual para los años cero y uno	124
XXX.	Análisis de inversión a 5 años.....	124
XXXI.	Comparación económica a 5 años de operación	125
XXXII.	Flujo de efectivo a los 10 años de operación y comparación económica entre ambos proyectos.	126
XXXIII.	Flujo de efectivo a los 15 años de operación y comparación económica entre ambos proyectos.	127

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
	Cortacircuitos para media tensión
Hz	Hercio
kV	Kilovoltios
kW	<i>Kilowatts</i> (kilovatios)
	Línea primaria de media tensión nueva
Ω	Ohmios
Ω/km	Ohmios por kilómetro
	Poste existente
	Poste nuevo
V	Voltios
W	<i>Watts</i> (Vatios)

GLOSARIO

Abrasión	Acción mecánica de rozamiento y desgaste que provoca la erosión de un material o tejido.
Aislamiento termoestable	Los plásticos termoestables son polímeros infusibles e insolubles, los cuales, a cambios abruptos de temperatura, permanecen estables.
Aislamiento termoplástico	Aislamiento plástico que, a temperatura caliente, es plástico o deformable, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado vítreo cuando se enfría lo suficiente.
Alambre	Elemento eléctrico conductor, fabricado comúnmente de aluminio o cobre.
Alúmina	Óxido de aluminio.
Ampacidad	Capacidad de conducción de corriente.
ANSI	American National Standards Institute (por sus siglas en inglés), Instituto Nacional Americano de Estándares.
AWG	American Wire Gauge (por sus siglas en inglés), calibre de cable estadounidense.
B/C	Relación costo beneficio.
Barra de media	Nodo eléctrico donde se interconectan la fuente y carga,

tensión	en voltaje de media tensión (13,8 kV fase-fase).
Cable	Conjunto de alambres con una capacidad de conducción de corriente específica.
Carga	Magnitud eléctrica medida en watts, la cual mide la capacidad de consumo que un circuito de distribución tendrá.
Compañía distribuidora	Compañía encargada de suministrar de energía al consumidor final, es responsable del cobro de la factura mensual y del buen funcionamiento de la red de media y baja tensión.
Configuración anillada	Configuración que permite la alimentación de cargas desde dos fuentes, teniendo un punto abierto dentro de la instalación.
Configuración mallada	Configuración de conexión de redes de media tensión, la cual permite alimentar cargas desde diferentes fuentes, haciendo maniobras.
Configuración radial	Configuración que alimenta cargas desde una sola fuente.
Corriente eléctrica	Magnitud medida en amperios la cual representa el flujo de electrones en cierta cantidad de tiempo.
Crucero	Herraje fabricado de madera o hierro que soporta las líneas de distribución.
Cuchillas seccionadoras	Elemento manufacturado de cobre cuya principal función es realizar maniobras, como aislar centros de carga,

transferencia de carga y apertura de circuitos.

Demanda	Energía consumida por una carga a cierta hora del día.
DRC	Distribuidora de la región central.
Efecto corona	Efecto que se produce cuando el aire pierde sus propiedades dieléctricas, convirtiéndose en conductor eléctrico.
Energía	Capacidad de realizar un trabajo.
Espaciador	Elemento manufacturado de polímero utilizado para sostener líneas de media tensión ecológicas compactas.
Frecuencia	Magnitud que mide el número de ciclos en una onda.
Hélice de cableado	Sentido de cableado con el cual se entrelazan los conductores que forman el cable.
Herrajes	Conjunto de piezas de hierro con las que se arman las estructuras de soporte para las redes eléctricas.
ICEA	Insulated Cable Engineers Association (por sus siglas en inglés), Asociación de Ingenieros de Cables Aislados).
IEC	International Electrotechnical Commission (por sus siglas en inglés), Comisión Internacional de Electrotecnia.
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers (por sus siglas en inglés).Asociación de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

Línea de distribución	Instalación eléctrica que conecta las centrales de transformación con los clientes finales, operan a un nivel de tensión de 13,8 kV para la región central del país.
Línea de fuga	Distancia más corta entre partes conductoras sobre una superficie aislante
Línea de transmisión	Instalación eléctrica que conecta las centrales generadoras con los grandes centros de consumo de energía eléctrica, consta de cables diseñados para soportar amperajes altos, los niveles en Guatemala son 69 kV, 138 kV y 230 kV.
Mantenimiento preventivo	Rutina de mantenimiento que se anticipa a cualquier contingencia, reduciendo las probabilidades de fallas.
Material extruido	Material formado con sección transversal definida y fija.
Ménsula	Pequeño saliente que sirve para dar soporte a algún elemento.
Nivel cerámico	Magnitud que mide los días de tormenta eléctrica al año.
Nivel de tensión	Magnitud normada de tensión de operación. Puede ser media, baja o alta tensión.
Par galvánico	Formado por dos partes distintas de una superficie metálica o de dos metales distintos, que en contacto con un electrolito (generalmente agua), tienen una diferencia de potencial.
Polietileno reticulado	Polietileno formado por la unión de cadenas

XLPE	tridimensionales poliméricas diferentes.
Rayos ultra violeta	Radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 400 nm (4×10^{-7} m) y los 15 nm ($1,5 \times 10^{-8}$ m). Son producidos por rayos solares y tienen diversos efectos sobre la salud.
Reactancia	Parte imaginaria de la impedancia la cual está directamente afectada por la frecuencia.
Reconectador	Equipo de protección eléctrica que permite proteger los circuitos de media tensión contra fallas temporales, es programable.
Resistencia eléctrica	Magnitud que mide la oposición de un material a conducir corriente eléctrica.
Subestación	Central eléctrica, la cual puede ser de transformación o bien conmutación. Comprende varios equipos de seccionamiento, protección y conexión.
Temperatura de emergencia	Temperatura a la que un material pierde sus propiedades físicas y químicas.
TIR	Tasa interna de retorno.
Transformador	Máquina eléctrica estacionaria, la cual mantiene la potencia en ambos lados modificando los valores de corriente y voltaje.
VPN	Valor presente neto.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación, es un estudio sobre el cable ecológico, así como información de los calibres y capacidades de conducción eléctrica, tanto de cables aislados al aire (desnudos) como de cables ecológicos. También se analizará el recubrimiento que le permite a este conductor la ventaja de ser resistente al roce con los árboles.

El capítulo uno incluye la descripción de las líneas de distribución aéreas en general, tomando en cuenta los tipos de construcción, clasificación de circuitos principales y ramales, configuraciones mallada, radial y anillada. Se describen también, las ventajas y desventajas, tanto económicas como técnicas de una línea eléctrica aérea, se analizan también los conductores de aluminio haciéndose una comparación con los conductores de cobre, para finalizar con una descripción del conductor ecológico.

En el capítulo dos se analizan las diferencias entre los requerimientos de diseño entre una línea de distribución construida con cable desnudo y con cable ecológico, las distancias de seguridad a respetar a la hora de la instalación, los métodos de construcción donde se hace especial énfasis al método compacto, el cual, entre otros beneficios reduce el área transversal que ocupa la línea a lo largo de su paso, reduciendo aún más la necesidad de desramar o incluso talar árboles. En este capítulo se analizan las características de los herrajes para líneas trifásicas y monofásicas, los componentes básicos que una línea de este

tipo debe tener. El diseño eléctrico y mecánico para líneas ecológicas, también se incluye en el contenido, así como los cálculos necesarios y los criterios a tomar en cuenta para la correcta construcción y explotación de la red.

En el capítulo tres se hace una descripción de la aplicación de los requerimientos de diseño analizados en el capítulo dos, para realizar un proyecto real de una línea de distribución aérea con cable ecológico. Asimismo, la presentación un plano de diseño y de los materiales a utilizar, también el detalle de las unidades de mano de obra que al final sumarán el costo total de la línea de distribución, tanto ejecutándola con cable ecológico como con cable desnudo, para hacer la comparación económica.

En el capítulo cuatro se analiza el proyecto desde el punto de vista económico financiero, haciendo un balance entre la inversión y el ahorro de pérdidas que el cambio de conductor desnudo por ecológico representa. Finalmente, se concluye con la factibilidad económica de la extensión de líneas con cable ecológico.

OBJETIVOS

General

Realizar un estudio técnico y financiero de la factibilidad de extensiones de línea de media tensión, para distribución de energía eléctrica utilizando cable ecológico, incluyendo datos de fábrica del cable, así como métodos técnicos de construcción y dimensionamiento de la estructura en las redes con este conductor.

Específicos

1. Analizar la importancia de las redes aéreas construidas, usando cable ecológico para preservar el medio ambiente.
2. Analizar la configuración compacta para líneas de distribución con cable ecológico.
3. Realizar un análisis completo de las diferencias en la construcción de redes de distribución trifásicas, utilizando cable aislado al aire y ecológico.
4. Comprobar la factibilidad técnica y económica del uso de este tipo de cable, realizando un análisis financiero de inversión que incluya las ventajas y desventajas de la utilización de esta nueva tecnología.

INTRODUCCIÓN

Las líneas de distribución eléctrica en media tensión son un activo vital para el desarrollo humano y económico de un país, ya que representan el medio en el cual la electrificación avanza a lo largo de un territorio determinado. Actualmente, en países en vías de desarrollo como Guatemala, se utilizan conductores aislados al aire, es decir, sin ningún recubrimiento, ya que son mucho más baratos. Económicamente representa una gran ventaja construir las líneas de distribución con este tipo de conductor, puesto que los herrajes, los postes y las técnicas de construcción en instalaciones de distribución para este tipo de cable son bastante conocidas en el medio guatemalteco; sin embargo, por el nivel de tensión en el que operan, significan un peligro latente tanto para personas, animales, como para edificaciones y vegetación.

Debido a que en Guatemala, gran parte de las áreas con alta demanda de energía eléctrica se encuentran en el interior del país, donde la densidad de vegetación es considerable, las fallas por roce se dan con mucha frecuencia, limitando la calidad de energía brindada por el distribuidor, y en ocasiones, cortando completamente el servicio eléctrico. Para reducir este problema, se ha optado por adquirir un conductor fabricado con tecnología que cuenta con un recubrimiento diseñado para aislar el elemento conductor (aluminio) del cable contra el roce con los árboles, el cual ha recibido el nombre de cable ecológico, ya que disminuye casi en su totalidad, la necesidad de reducir la vegetación para el paso de las líneas de distribución.

Las consecuencias de un servicio eléctrico no confiable, pueden llegar a ser fatales, ya que las comunidades del interior del país, comúnmente están aisladas de las grandes ciudades, y situadas lejos de las carreteras principales del país, por lo tanto, a la hora de un apagón quedarían desenergizados hospitales, clínicas, centros de almacenamiento de comida y medicinas, entre otros. Por lo tanto, en ciertos lugares del país, la utilización de este nuevo cable se está convirtiendo en una necesidad real.

1. GENERALIDADES

Desde las subestaciones ubicadas cerca de las áreas de consumo, el servicio eléctrico es responsabilidad de la compañía suministradora (distribuidora) que ha de construir y mantener las líneas necesarias para llegar a los clientes. Estas líneas, tanto en media como en baja tensión, constituyen la red de distribución, la cual puede ser aérea, subterránea o mixta.

Los elementos que conforman la red o sistema de distribución son los siguientes:

- Subestación de distribución: es el conjunto de elementos (transformadores, interruptores, seccionadores, etc.), cuya función es reducir los niveles de alta tensión de las líneas de transmisión (o sub transmisión) hasta niveles de media tensión para su ramificación en múltiples salidas, siendo estos 13,8 kV fase-fase para la región central de Guatemala y 34,5 kV fase-fase para el interior del país.
- Circuito primario: red eléctrica que alimenta transformadores de distribución colocados, ya sea en líneas aéreas, o bien subterráneas.
- Circuito secundario: alimenta cargas finales como domicilios o comercios.

La red de distribución, en el caso de la región central de Guatemala, opera con un voltaje de 13,8 kV con características radiales y anilladas. Esta red cubre la superficie de los grandes centros de consumo (población, gran industria, etc.).

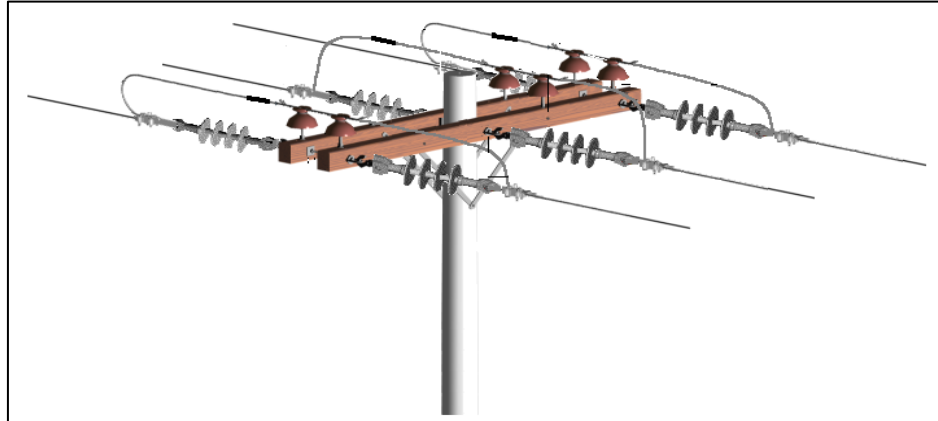
Las líneas que forman la red de distribución en baja tensión operan de forma radial, al contrario que las redes de alta y media tensión las cuales están en configuración anillada.

El propósito de una red eléctrica de distribución, es llevar energía eléctrica al consumidor final. Por lo tanto, representa la columna vertebral del consumo eléctrico para los usuarios, los cuales consumen energía en baja tensión, gracias a las instalaciones, equipos y herrajes que esta parte del sistema eléctrico posee, los cuales son calculados y diseñados tomando como principal variable la demanda de los usuarios; sin embargo, hay factores no técnicos que intervienen de manera muy importante en la constitución de estas redes, afectando de manera directa la selección de rutas y características constructivas finales.

1.1. Líneas de distribución aéreas

Aquellas líneas de distribución en media tensión, operando entre 4 kV a 34,5 kV, las cuales toda su estructura desde los apoyos, herrajes y conductores se instalan sobre el nivel del suelo, en el caso puntual de Guatemala en la región central, el voltaje de la red de distribución es de 13,8 kV fase-fase.

Figura 1. **Línea de distribución trifásica aérea**



Fuente: Normas DRC. p. 3.

Las líneas de distribución aéreas constituyen el más popular medio de distribución en países en vías de desarrollo como Guatemala, debido a su bajo costo inicial en comparación con líneas subterráneas. Por lo tanto, la continuidad y calidad en el servicio eléctrico depende totalmente de la operación de este tipo de redes, tomando en cuenta las ventajas y desventajas tanto técnicas como no técnicas de funcionamiento del sistema de distribución aéreo.

Las redes aéreas tienen toda una gama de herrajes y conductores, los cuales están diseñados para una operación óptima, de manera que se mantenga la calidad del servicio al usuario final, también se tienen opciones para alimentar cada tipo de carga dependiendo de su magnitud y ubicación.

1.1.1. Aplicaciones y conceptos

Según sea la necesidad del centro de consumo y el diseño de la red a nivel macro, las redes de distribución aérea pueden tener ciertas variantes de operación y diseño.

En el ramo de operación de la línea de distribución, es posible hablar de dos clasificaciones:

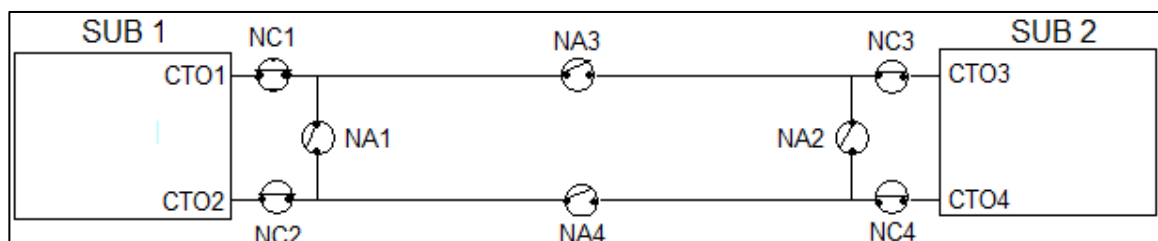
1.1.1.1. Circuito principal

Alimentador conectado directamente a la barra de media tensión de la subestación, por su naturaleza, constituye la rama más importante de la red de distribución. Es diseñado de tal forma que cubra una importante región con cierta densidad de carga, por lo tanto, tiene el conductor con más capacidad y herrajes especiales para dicho fin, protegido desde la subestación contra fallas permanentes como instantáneas por un reconectador (*recloser*), el cual, representa la última parte de la coordinación de protecciones para mantener continuo el servicio. Debido a su larga longitud, la cual en la región central de Guatemala en ocasiones es hasta de 30km, para evitar una caída de tensión considerable, utiliza reguladores de voltaje, los cuales son autotransformadores con control electrónico automático de cambio de derivaciones, quienes aumentan o disminuyen el voltaje en un margen del 5%. En situaciones especiales, donde las líneas son demasiado largas, o bien alimentan zonas industriales con importante carga reactiva, le son instalados capacitores en derivación, ubicados estratégicamente para compensar el factor de potencia.

El circuito principal de distribución, por su importancia y capacidad se instalan herrajes de conexión y desconexión manuales en distintos puntos del recorrido del mismo, esto con el fin de poder interconectar dos o más circuitos en paralelo, según necesidades por contingencias o maniobras de mantenimiento, de manera que los circuitos principales de distribución están diseñados y construidos en configuración mallada, aumentando de manera importante tanto la flexibilidad como calidad del suministro, mejorando la regulación y disminuyendo las pérdidas de energía, permitiendo también la

interconexión entre subestaciones. Sin embargo, construir la red de esta manera, conlleva una inversión más elevada que si se construyera de manera anillada o radial debido a que los herrajes y los dispositivos de protección son más costosos.

Figura 2. **Configuración mallada de líneas de distribución**



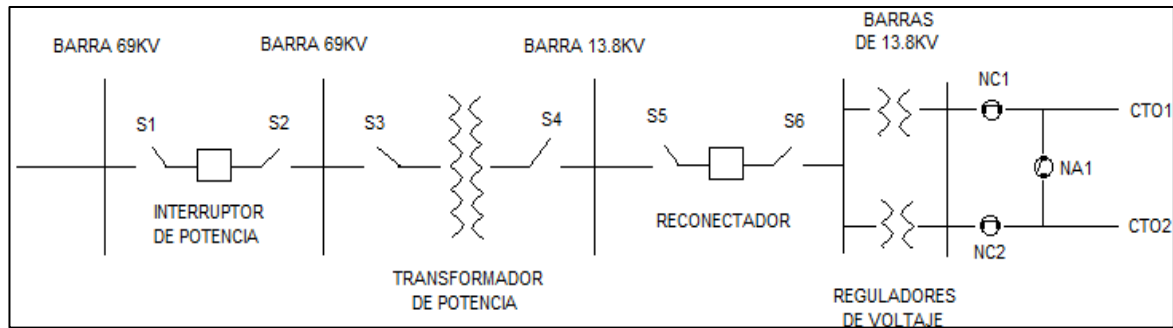
Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la figura 2, hay 4 circuitos principales, los cuales, están siendo alimentados por 2 subestaciones de transformación. Los elementos de conexión y desconexión están instalados para que la red de distribución sea más confiable.

Los elementos de cierre manual son llamados cuchillas seccionalizadoras, las cuales están manufacturadas de cobre sólido y tienen una ampacidad de 600 amperios. Estas cuchillas tienen una función muy importante en las redes malladas de distribución, ya que permiten maniobras para mejorar la confiabilidad del sistema.

Como se muestra en la figura 2, los elementos de cierre manual NC1 (normalmente cerrado) al NC4 y NA1 (normalmente abierto) a NA4 tienen como función conectar los circuitos principales a las barras de media tensión de las subestaciones, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 3. **Conexión de circuitos principales a una subestación de transformación**



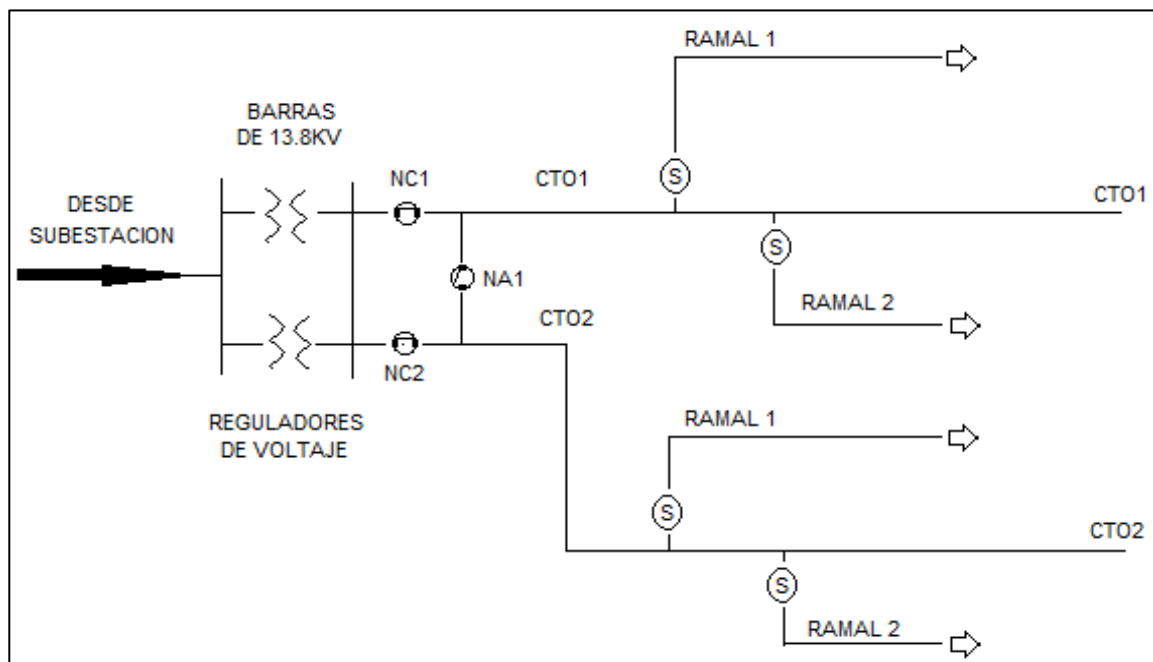
Fuente: elaboración propia.

1.1.1.2. **Ramales**

Los ramales de distribución de energía en media tensión, son derivaciones de los circuitos principales, cuyo fin es dar la cobertura de la red de distribución, llegando a lugares donde el circuito principal no alcanza por razones de arquitectura o topografía, como de costos de expansión del mismo. Debido a su naturaleza, se adecuan a las necesidades más específicas de las cargas a alimentar, dependiendo de la magnitud de la carga como del tipo de servicio que el consumidor necesita. Tomando en cuenta la flexibilidad de diseño que representa, es importante tomar en cuenta que debido a que la carga a alimentar es menor que un circuito principal, es posible construirlo con un conductor con menos capacidad, dependiendo de la longitud. Es posible derivar dos fases o una. Un ramal debido a que está diseñado únicamente para alimentar cierto número de cargas ya contempladas, es construido de manera radial, lo cual simplifica su diseño y operación, baja los costos de herrajes y construcción, hace más sencillo el sistema de protecciones, ya que en el enganche al circuito principal se instalan corta circuitos con fusibles calculados

en función de corriente de corto circuito del sistema de cargas a alimentar, lo cual, permite una localización muy sencilla de las fallas. Sin embargo, el hecho de que sean radiales, disminuye la fiabilidad del suministro, debido a que únicamente tienen una fuente de energía, a futuro, tienen muchas limitantes para la expansión y pueden tener caídas importantes de tensión.

Figura 4. **Conexión de ramales en los circuitos principales**



Fuente: elaboración propia.

1.1.2. **Ventajas de las líneas de distribución aéreas**

La distribución eléctrica en redes aéreas, tiene ventajas las cuales es importante analizar, tanto desde el punto de vista técnico, como económico financiero. Existe toda una gama de variables de diseño que pueden ser acopladas a las líneas de distribución aérea según sea el tipo de carga a

conectar, por lo tanto una ventaja es la flexibilidad de diseño y construcción de la misma permitiendo dejar para el futuro mejoras y expansiones de la red, como aumento de capacidad en los conductores y el tipo de servicio a brindar, ya sea monofásico o trifásico según sea el caso.

1.1.2.1. Ventajas técnicas

- Extensión y expansión: las redes aéreas se prestan a ampliarse continuamente debido a su sencilla construcción si el terreno lo permite, tomando en cuenta siempre variables de calidad como caída de tensión y continuidad del servicio.
- Posibilidad de realizar trabajos en las líneas de media tensión sin necesidad de cortar el servicio, aumentando así, la eficiencia de la misma.
- Los centros de transformación pueden ser instalados de manera arbitraria, tomando como únicas variables, la carga a conectar y la ubicación en la red.
- Existe toda una gama de herrajes y conductores los cuales se acoplan a las necesidades de diseño de las cargas.
- Es posible realizar grandes extensiones de red en muy corto tiempo.
- Es de fácil acceso a las fallas y de sencilla reparación.
- Permite la instalación de redes de alumbrado público.

1.1.2.2. Ventajas económicas

Las ventajas de construir redes aéreas, radican en los bajos costos de inversión inicial en comparación con las redes subterráneas. Esto es, debido a que es muchísimo más barata la instalación de postes, tomando en cuenta si son manufacturados de concreto armado, madera, fibra de carbono o metal, la instalación de herrajes, el tendido de conductores mediante el uso de equipo especializado, que la construcción de una obra civil ajena a los herrajes y conductores de corriente.

Según la Ley General de Electricidad de Guatemala, cuando un usuario tiene una carga puntual de más de 100 kW, puede entrar en el mercado mayorista de energía eléctrica como gran usuario, lo cual le permite comprar energía por medio de contratos a largo plazo, utilizando para esto, el asesoramiento de comercializadores. Si la red de distribución autorizada a la que el gran usuario se piensa conectar es aérea, facilita la instalación de transformadores de medición para este fin, por lo tanto, el hecho que la red de distribución sea aérea representa facilidades de conexión y extensión para este fin, aumentando las ganancias tanto para los comercializadores como para los distribuidores, debido a que incluido en la factura de consumo del mes, está el valor del peaje por el uso de las redes.

La vida útil de una línea de distribución, es de 25 a 35 años, dependiendo del material del que sean fabricados los postes instalados, ya sean de madera o concreto. Por lo tanto, analizando de manera general la inversión inicial, se tendrá más de un cuarto de siglo para explotar la red de distribución y generar ganancias, antes de tener que invertir en mejoras.

Los equipos de transformación son de fácil instalación, lo cual baja los costos por mano de obra. Existe una gran cantidad de marcas homologadas por las principales distribuidoras, por lo que los precios son muy competitivos y accesibles, también tienen características de fábrica como la capacidad y voltaje secundario, que lo convierte en un equipo de flexible utilización. Tienen una vida útil importante, la cual depende del porcentaje de carga en la que opere.

1.1.3. Desventajas

Las líneas aéreas de distribución tienen importantes desventajas, las cuales, ponen en peligro el servicio, medio ambiente y a los propios seres humanos. En algunos casos, representan ciertas situaciones de pérdidas económicas importantes.

1.1.3.1. Desventajas técnicas

La mayor desventaja en una línea de distribución, en general, es la caída de tensión, tanto en la parte primaria (media tensión) como en la secundaria (baja tensión). Las distribuidoras dedican muchos esfuerzos a mantener la red vigente ante los altos índices de crecimiento de demanda en ciertos lugares, utilizando reguladores de tensión en la salida de la subestación, bancos de capacitores, o incluso si la longitud de la línea es demasiado larga, usando reguladores de voltaje de línea. Los ramales de distribución permiten derivar menos de 3 fases, es decir, solamente haciendo extensiones de dos o incluso una fase; sin embargo, esto representa una desventaja debido a que si no se dejaron los herrajes preparados para la expansión a 3 fases, es necesario instalar nuevamente el 100% de la red a mejorar, lo cual, puede significar cortes del servicio durante tiempos prolongados de manera continua o bien reiterativa.

1.1.3.2. Desventajas no técnicas

En lo que se refiere a desventajas no técnicas, la mayor desventaja es que las líneas están expuestas a cualquier agente externo que puede dañarlas o afectar su operación de manera importante. En las regiones tanto urbanas como rurales, las líneas están expuestas a las siguientes situaciones:

- Construcciones ubicadas, imprudentemente, muy cerca de los conductores.
- Accidentes automovilísticos contra los postes, algunos incluso se desploman, cortando así el servicio de manera indefinida.
- Contaminación visual.
- Robo de herrajes, conductores y en ciertas ocasiones hasta postes. En países como Guatemala, donde la delincuencia está en niveles altísimos, los activos de las distribuidoras están vulnerables, también a este azote.
- En zonas rurales, donde el arbolado es muy denso, las líneas aisladas al aire (que comprenden casi el 98% de la red de Guatemala) tienen recurrentes fallas a tierra por roces de ramas.
- Las lluvias y tormentas eléctricas representan también un peligro latente para la continuidad del servicio, ya que los herrajes y apoyos se van deteriorando con el paso del tiempo. Las descargas electro atmosféricas (rayos), también son las culpables de numerosas interrupciones debido a los sobre voltajes que provocan, activando así las protecciones de línea. En el caso fundamental de Guatemala, el nivel cerámico es bastante alto

en la región de la costa sur, lo cual implica que las instalaciones de distribución tengan pararrayos casi en cada poste, así como aisladores de mayor *BIL*.

- En las zonas marginales, los habitantes se conectan de manera ilegal a la red de baja tensión, utilizando empalmes con materiales no diseñados para este fin, provocando así cortos circuitos en las viviendas e incluso incendios.
- En la costa, debido a la salinidad es necesario utilizar herrajes y conductores especiales para evitar que la corrosión reduzca demasiado su vida útil.

1.1.3.3. Desventajas económicas

Las redes de distribución en media tensión tienen importantes desventajas, las cuales son producto de las desventajas tanto técnicas como no técnicas:

- Extensiones y mejoras no contempladas: según la Ley General de Electricidad, en Guatemala, la distribuidora está obligada a extender su red a usuarios ubicados a menos de 200 metros del último poste de servicio; sin embargo, no indica qué tipo de servicio, ni carga máxima a conectar para este tipo de casos, por lo tanto en ciertas ocasiones, la inversión de extensión de red no se recupera a mediano plazo, sino que a largo plazo.
- Robo de componentes.
- Interrupciones que pueden ser provocadas por maniobra o casusas de fuerza mayor, como tempestades o accidentes: el costo de la energía no

suministrada es una pérdida importante, ya que golpea directamente las ganancias de la distribuidora y puede significar incluso indemnizaciones para clientes y al ente regulador.

- Mantenimiento, tanto predictivo, preventivo y correctivo: representan un gasto inevitable para estas redes, siendo muchísimo mayor al mantenimiento de redes subterráneas. El mantenimiento predictivo comprende el planeamiento de rutinas de monitoreo y mediciones a puntos calientes. El preventivo comprenderá la ejecución de las rutas, las cuales deberán ser, según el tipo de terreno donde esté ubicada la red, de aproximadamente 3 a 9 veces al año, tomando como principal catalizador el arbolado que rodee los conductores.
- Indemnizaciones a clientes y al ente regulador: debido a mala operación, baja calidad de energía e interrupciones por razones no enfundadas.
- Robo de energía en áreas marginales y anomalías por medidores adulterados para reflejar un consumo menor al real.

1.2. Conductores

La función de todo conductor en un cable para media o alta tensión o en un conjunto de cables, es la de transportar energía eléctrica, cuenta con características propias que dependen del tipo de utilización que se haga del mismo.

1.2.1. Aspectos generales

Los materiales, usualmente utilizados, son el cobre y/o aluminio. El cableado de un conductor consiste en el número de hilos que éste debe poseer, según el calibre y los parámetros mecánicos como la flexibilidad y resistencia. La escogencia de un conductor, depende únicamente de su capacidad de conducir corriente, peso y aislamiento.

En Guatemala las redes de distribución aéreas en la parte primaria de media tensión, más del 98%, son construidas con cables aislados al aire, es decir, sin ningún aislamiento plástico ni cubiertas. Sin embargo, en contadas ocasiones, los conductores de media tensión están aislados, como en las redes subterráneas o en redes aéreas con cable ecológico.

Los cables aislados, generalmente, cuentan con aislamiento en el orden de 500 μm hasta los 5 cm de espesor; dicho aislamiento es plástico, su tipo y grosor dependerá del nivel de tensión de trabajo, la corriente nominal, temperatura ambiente y de la temperatura de operación del conductor.

Las partes generales de un cable eléctrico aislado son:

- Conductor: elemento que conduce la corriente eléctrica y puede ser de diversos materiales metálicos. Puede estar formado por uno o varios hilos, de aluminio, cobre y aleaciones de metal como el acero.
- Aislamiento: recubrimiento que envuelve al conductor para evitar la circulación de corriente eléctrica fuera del mismo. Están fabricados de materiales plásticos, elastoméricos, papel impregnado en aceite viscoso o fluido. Si es aislamiento termoplástico, puede ser policloruro de vinilo

(PVC), polietileno (PE) o policloropreno (PCP). Si es aislamiento termoestable puede ser polietileno reticulado (XLPE), etileno-propileno (EPR) o cobre revestido mineral aislado (MICC).

- Capa de relleno: material aislante que envuelve a los conductores para mantener la sección circular del conjunto.
- Cubierta: está hecha de materiales que protejan mecánicamente al cable. Tiene como función proteger el aislamiento de los conductores de la acción de la temperatura, sol, lluvia, entre otros.

1.2.1.1. Clasificación de los conductores eléctricos

Los cables eléctricos, son un arreglo de conductores de manera de formar un medio conductor que permita un transporte de potencia, a cierto nivel de tensión, dependiendo de la capacidad de conducción de corriente de cada cable; se subdividen en calibres y tipos.

Clasificación de los cables según nivel de tensión:

- Cables de muy baja tensión hasta 50 V DC: utilizados para comunicaciones y aplicaciones electrónicas como computadoras.
- Cables de baja tensión hasta 1000 V AC: utilizados en redes secundarias para servicios residenciales o industriales, se instalan en acometidas, alimentadores a centros de carga o tableros de distribución.

- Cables de media tensión hasta 30 kV AC: son empleados en redes de distribución en la parte primaria. En la región central de Guatemala el voltaje de distribución es de 13,8 kV.
- Cables de alta tensión hasta 69 kV AC: utilizados para sub transmisión de potencia entre subestaciones de distribución para los centro de consumo.
- Cables de muy alta tensión por encima de los 77 kV AC, son utilizados para líneas de transmisión largas, en Guatemala se utilizan para conectar los generadores de la costa sur y la región del norte con las subestaciones principales.

Así mismo, es posible brindar una clasificación en función del número de conductores con los que cuenta el cable o la flexibilidad del mismo; estos son:

- Unipolar, bipolar, tripolar y tetrapolar. Según cuántos conductores contengan.
- Conductor rígido o flexible.

Figura 5. **Cable tripolar de cobre**



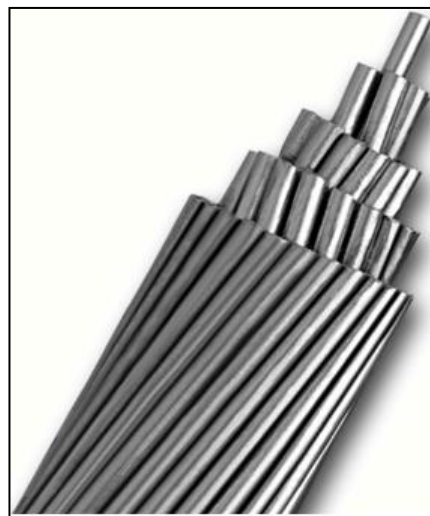
Fuente: Boletín técnico Centelsa. Diciembre 2004. p. 12.

Debido a que actualmente, por cuestión de costos a partir de años atrás, únicamente se está usando cables de aluminio para conducción de energía eléctrica en líneas de distribución, tanto en la red primaria como secundaria.

1.2.1.2. Cables de aluminio para redes de distribución aérea

Están formados por alambres de aluminio, en estado duro, cableado en capas concéntricas. El sentido de la hélice del cableado es contrario en cada capa, pero el de la capa exterior debe de ser siempre a la derecha.

Figura 6. **Cable de aluminio trefilado**



Fuente: Manual de compras Phelps-Dodge para conductores de aluminio. p. 5.

El progresivo desarrollo de las técnicas ha conducido a una correcta utilización del aluminio como conductor eléctrico. Pero ha sido el encarecimiento del cobre, el que ha introducido el afianzamiento del aluminio en la industria eléctrica. Desde hace años, la mayoría de las conducciones eléctricas están

tendidas en aluminio, siendo empleado en la actualidad para conducciones subterráneas en media y baja tensión.

Las características de la conductividad, económicas y propiedades físicas del aluminio son:

- Descubierta en 1812, en Les Baux, Francia
- Conductividad: equivalente al 60% del cobre
- Peso liviano: facilita el manejo y reduce los costos de instalación
- Dureza: depende del tipo de aleación
- Proceso, enrollado y posteriormente estirado ó trefilado
- Resistente a la corrosión
- Bajo nivel de deformación con el tiempo
- Compatibilidad con aislantes, no se mezcla con los materiales aislantes

Tabla I. **Comparación técnica entre cobre y aluminio**

CARACTERÍSTICAS	COBRE	ALUMINIO
Resistencia eléctricas	1	1,56
Conductividad	1	0,615
Resistencia mecánica	1	0,45
Por igual volumen: relación de pesos	1	0,30
Sección	1	1,64
Diámetros	1	1,27
Capacidad de conducción de corriente	1	0,78
Precio por metro calibre 4/0 desnudo (Q.)	22,26	9,41

Fuente: Manual de compras Phelps-Dodge para conductores de aluminio año 2009. p. 5.

Como se puede observar en la tabla I, el aluminio tiene características eléctricas muy similares al cobre, y tomando en cuenta su costo considerablemente más bajo, se ha optado por utilizar cables de aluminio dejando obsoletos los cables de cobre.

Para los cables de aluminio utilizados en líneas aéreas, existen una serie de tipos conocidos internacionalmente por sus abreviaturas en inglés.

- All Aluminium Conductor (AAC), conductor fabricado de aluminio 1350-H19.
- All Alloy Aluminium Conductor (AAAC6201), conductor fabricado de una aleación de aluminio 6201.
- Aluminium Conductor Steel Reinforced (ACSR), conductor fabricado de aluminio 1350-H19 y reforzado con un núcleo de acero galvanizado.

1.2.1.3. Datos técnicos de los conductores

El conductor debe estar constituido por hilos entorchados en forma concéntrica, es decir, el hilo central constituye el núcleo del conductor y es rodeado por una o más capas de hilos aplicados helicoidalmente.

El material que constituye el cable conductor debe ser retardante a la formación de llamas, como se especifica en el National Electrical Code. Los datos técnicos que se presentan en la tabla II, se refieren a diámetro, sección efectiva en AWG, MCM y mm², tipo de conductor, peso por unidad de longitud, tensión de ruptura, capacidad de conducción (ampacidad) y resistencia.

Tabla II. **Características técnicas de conductores normados en Guatemala**

Conductor	Tipo	Calibre MCM/AWG	Sección mm ²	Diámetro mm	Peso kg/km	R (ohm/km)	Ampacidad (A)	Tensión de ruptura (kg)
RAVEN	ACSR	1/0	62,44	10,11	216	0,72	242	1983
AZUSA	AAAC	123,30	62,44	10,11	172	0,64	256	2019
OXLIP	AAC	4/0	107,23	13,26	296	0,33	383	1734
ALLIANCE	AAAC	246,90	125,11	14,30	344	0,32	395	3875
TULIP	AAC	336,40	170,23	16,92	470	0,21	513	2784
CANTON	AAAC	394,50	199,90	18,31	551	0,20	532	6021
MISTELTOE	AAC	556,50	281,79	21,79	777	0,12	704	4500
DARIEN	AAAC	559,50	283,41	21,79	781	0,14	663	8511
FLINT	AAAC	740,80	375,37	25,17	1005	0,12	790	11046

Fuente: Manual de compras Phelps-Dodge para conductores de aluminio. p. 9.

1.2.1.4. Propiedades de los conductores con la fatiga

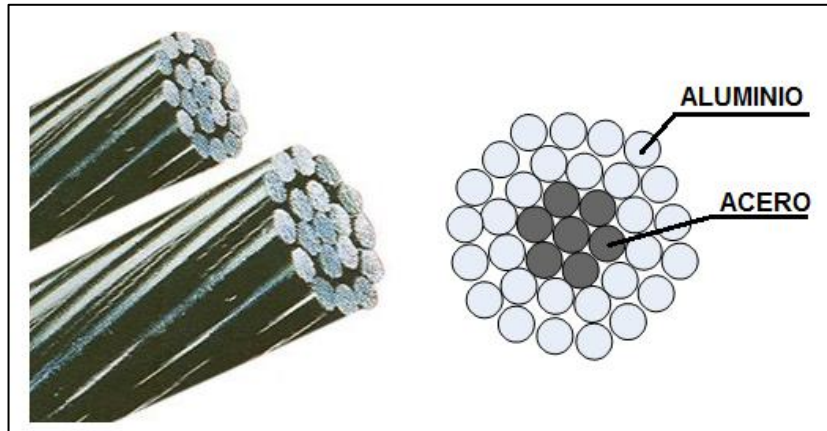
La fatiga se define como la tendencia de un metal a fracturarse bajos repetidos ciclos de tensión considerablemente más bajos que su tensión de ruptura. Conforme se reduce la tensión aplicada, aumenta el número de ciclos requeridos para producir la fractura.

Algunos metales adquieren un número muy grande de ciclos para producir fractura. Los alambres de aleaciones pueden resistir 500MHz ciclos sin rotura. Los límites de resistencia a la fatiga presentan resultados optimistas sobre los esfuerzos permitidos para cables, ya que este parámetro (resistencia a reiterados esfuerzos), no toma en cuenta la reducción producida por mellas y el roce de los alambres contra las grapas de suspensión. Este tipo de rozadura produce puntos débiles donde se inician las grietas de fatiga, las que provocan cierta cantidad de partículas de metal y de óxido, que causan severa reducción a la resistencia a la fatiga de cualquier metal utilizado en conductores para líneas aéreas. Para efectos de este trabajo de graduación, se profundizara únicamente en los cables AAAC ecológico y ACSR.

1.2.2. Conductor ACSR aislado en aire

Los cables de aluminio tipo ACSR están constituidos por un conductor formado por alambres de aluminio de aleación 1350 H-19, cableados helicoidalmente alrededor de un núcleo de acero galvanizado. Este núcleo puede estar formado de un solo alambre, o de un cableado helicoidal de una o varias capas de acero galvanizado. La conductividad del ACSR es semejante a la del aluminio 1350 H-19 (61,2%). En muchos casos, el conductor de aluminio 1350-H19 no tiene la suficiente tensión a la ruptura como para cumplir con los requerimientos de flecha/vano, en estos casos es necesario un conductor con mayor resistencia a la ruptura, como lo es el conductor tipo ACSR.

Figura 7. **Conductor ACSR aislado en aire**



Fuente: Boletín técnico Centelsa, diciembre 2004. p.3.

La relación del área transversal del aluminio al área transversal del acero, puede ser variada, de tal manera que para una conductividad dada, el conductor puede ser cableado con diferentes cargas de ruptura, simplemente variando el área del núcleo de acero.

El núcleo de acero reduce la resistencia a la corrosión del conductor. Esto no presenta problema en ambientes secos y no contaminados, tampoco en ambientes contaminados donde la lluvia es frecuente y bien distribuida.

Para el caso de ambientes corrosivos, el núcleo de acero puede sufrir contaminación y eventualmente perder la resistencia a la ruptura que proporciona el acero. En estos casos es mejor utilizar un conductor AAAC 6201.

A continuación se listan las características principales del conductor ACSR:

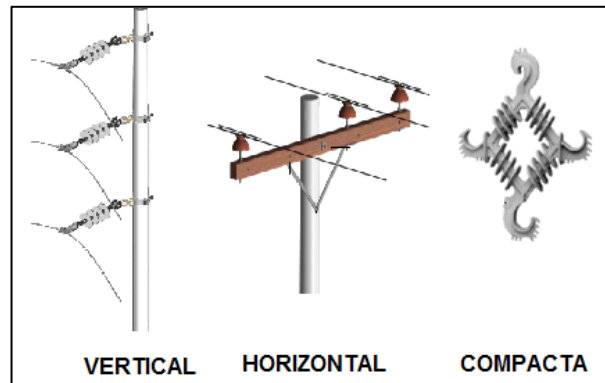
- Relación ruptura/peso es favorable
- Peso promedio
- Vanos largos debido a la alta tensión de ruptura
- Costo comparativamente bajo
- Buena conductividad
- No se rompe fácilmente con ramas que caen
- Permite calcular con exactitud los requerimientos de diseño de la línea

1.2.3. Conductor AAAC ecológico

En las líneas de distribución, el cable es el componente de mayor importancia, ya que sus características determinan la geometría y el comportamiento de la línea. Por lo tanto, la cuidadosa selección de los cables, basada en el conocimiento a fondo de sus propiedades, es de máxima importancia para asegurar los mejores costos y óptimas características de operación.

Las líneas ecológicas (distribución aislada) tienen como objetivo minimizar las interrupciones de energía eléctrica debido a contactos con árboles o caída de ramas en las líneas. Una técnica para reducir las fallas, es aislar las líneas primarias con polietileno reticulado *XLPE* e instalarlas en separadores poliméricos en posición vertical, horizontal, o formando un triángulo equilátero (esta es la instalación más recomendada).

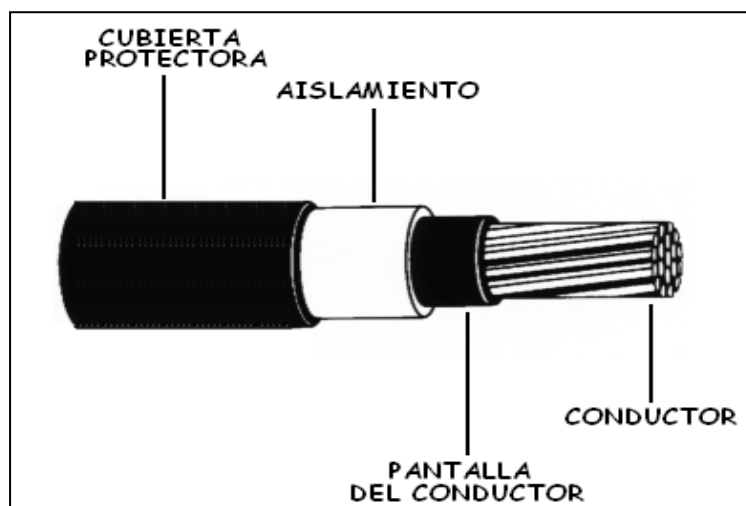
Figura 8. **Configuraciones aéreas de líneas ecológicas**



Fuente: Boletín técnico Centelsa, Diciembre 2004. p. 8.

La figura 9, muestra las partes principales del cable ecológico, analizando el conductor, la pantalla del conductor, el aislamiento y la cubierta protectora. Más adelante se analizarán detenidamente cada una de las partes.

Figura 9. **Cable ecológico**



Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli edición 2010. p. 15.

A continuación se listan las características principales del conductor ecológico:

- Los cables ecológicos aislados de aluminio para 15 kV, para líneas aéreas de distribución de energía eléctrica en media tensión son tipo AAAC y AAC.
- La capa del conductor es una capa de compuesto semiconductor extruido sobre el conductor con el fin de evitar un gradiente eléctrico excesivo en la zona de geometría irregular del conductor y de evitar eventuales vacíos entre conductor y el aislamiento. Para ser efectiva, debe adherirse perfectamente con el aislamiento y mantener un íntimo contacto con éste, bajo todas las condiciones de servicio y debe cumplir con las características de la Norma ICEA S 66-524 / S 68-516.
- El Aislamiento tiene la función de proveer la rigidez dieléctrica necesaria para la operación normal del cable al nivel de tensión especificado y de un compuesto de polietileno reticulado de cadena cruzada (XLPE) al 100%, su espesor es variable según el nivel de tensión al cual va a operar el cable y debe cumplir con las características de la Norma ICEA S 66-524 / S 68-516.

La tabla III, contiene las características más importantes del conductor AAAC ecológico:

Tabla III. **Características del conductor AAAC ecológico**

Sección nominal	Formación	Diámetro aproximado		Masa aproximada	Resistencia óhmica		Corriente admisible	
		Conductor	Cable		20°C DC	80°C AC	V=0	V=0.6 m/s
mm ²	N° X mm	mm	mm	kg/km	ohm/km	ohm/km	A	A
16	7 x 1,7	5,1	12,5	138	2,09	2,54	66	97
25	7 x 2,15	6,5	13,9	177	1,31	1,59	87	128
35	7 x 2,52	7,6	10,11	216	0,72	1,158	106	242
50	19 x 1,85	9,3	16,7	275	0,654	0,795	134	194
70	19 x 2,15	10,8	18,2	345	0,484	0,589	161	232
95	19 x 2,52	12,6	20,0	433	0,352	0,428	197	282
120	37 x 2,15	15,1	22,5	527	0,249	0,303	246	348
150	37 x 2,52	15,8	23,2	615	0,227	0,276	261	369
185	37 x 2,52	17,6	25,0	730	0,181	0,221	301	423
240	37 x 2,85	20,0	27,4	904	0,142	0,173	353	492
240	37 x 2,35	20,3	27,7	907	0,138	0,168	359	500

Fuente: Manual de compras Pirelli para conductores de aluminio edición 2010. p. 2.

Tabla IV. **Características de capacidad y peso de conductores**

Tensión (kV)	Calibre AWG/kCM	Área nominal de la sección transversal mm ²	Número de Hilos	Espesor nominal de aislamiento mm	Diámetro exterior mm	Masa total kg/100m	Ampacidad A
15	1/0	53,48	7	3	15,7	26	200
15	3/0	85,01	7	3	19,3	40	270
15	266,8	135,20	19	3	22,7	58	345
15	336,4	170,50	19	3	24,6	70	395

Fuente: Catálogo de conductores del norte. p. 1.

- Ventajas del conductor ecológico AAAC sobre el cobre
 - Su menor costo es el incentivo principal en el uso del aluminio en la mayoría de aplicaciones.

- A igual ampacidad: el aluminio tiene mejores características de corto circuito.
- Gran afinidad con el oxígeno, y en presencia de aire forma una película de óxido delgada, la cual posee altas propiedades dieléctricas y es químicamente estable y resistente a la corrosión.
- Aplicaciones del conductor ecológico AAAC
 - La principal aplicación del conductor AAAC ecológico es para líneas de distribución y de transmisión, especialmente en lugares donde las condiciones atmosféricas pueden producir corrosión.
 - Es el conductor ideal para tramos medios y largos en líneas primarias urbanas.
 - Se utiliza en líneas de sub-transmisión cuando la economía de la estructura de soporte es favorable.
 - Parques nacionales.
 - En lugares en donde abundan los árboles con ramas secas.
 - Calles estrechas.
 - Redes eléctricas con más de un circuito.
 - Líneas troncales (alimentadores).

- Zonas en donde es necesario podar árboles con bastante frecuencia.
- Lugares de alta contaminación.
- Líneas de distribución cerca del mar.
- Precauciones en la utilización de cable ecológico
 - Se debe manipular cuidadosamente, en especial durante el tendido y montaje, ya que pequeños defectos superficiales pueden provocar efectos desastrosos frente a las vibraciones.
 - Siendo el aluminio electronegativo con relación a otros metales como el cobre, el contacto con ellos en presencia de humedad, dará lugar a la formación de un par galvánico que ocasionará una seria corrosión.
 - Aunque los conductores de aluminio AAAC están protegidos por una capa de alúmina, que, por su estabilidad química protege al aluminio, hay ciertos productos para los que la alúmina no sirve de protección. Entre ellos están los compuestos alcalinos como la cal y el cemento y los derivados sulfurados.
 - El aislamiento no está diseñado para contacto humano directo, por lo tanto no es posible que sean tratados como tal por las personas en general, ya que aíslan roces o apoyo de ciertos agentes externos sin provocar fallas (árboles), pero el contacto con seres humanos provoca accidentes, ocasionando fuertes quemaduras e incluso la muerte.

El aislamiento de los conductores ecológicos se denomina polietileno reticulado (*XLPE*) el cual será analizado a continuación.

- Polietileno reticulado (*XLPE*)

Material termoplástico de la familia del *PVC*, empleado para aislamiento térmico y acústico. Se lo conoce con las siglas en ingles *XLPE*. A diferencia del *PVC* que es termoplástico, el *XLPE* es un material termoestable. Esto significa que reaccionan de formas distintas frente a los cambios de temperatura.

El *PVC*, ante el calor se reblandece, pero el *XLPE* se caracteriza porque frente a los cambios de temperatura no se modifican sus propiedades mecánicas debido al proceso de reticulación.

La reticulación es una reacción química mediante la cual los polímeros se unen en cadenas tridimensionales componiendo una especie de red que vuelve más estable químicamente al material. Luego de esta reacción, las propiedades químicas del polímero inicial se modifican. La reticulación le ofrece al material estabilidad química frente a los cambios de temperatura (termo estabilidad).

- Características del polietileno reticulado
 - El *XLPE* tiene una temperatura normal de trabajo de 90 grados
 - Temperatura de emergencia de 130 grados
 - Temperatura de cortocircuito de 250 grados
 - Es resistente a los rayos ultravioleta de sol

- Resistente a la humedad
- Resistente a la intemperie

1.3. Factores de riesgo de falla

Las líneas de distribución aéreas, están a merced de múltiples factores que hacen su operación irregular, poniendo en peligro la calidad del servicio, por lo que se mencionarán puntualmente las razones por las cuales las redes aéreas, tienen muchas probabilidades de fallas. Las redes aéreas de distribución presentan serias desventajas de operación, las cuales opacan el costo más bajo comparadas con las redes subterráneas. Sin embargo, el empleo de redes aéreas utilizando cable ecológico, reduce en un porcentaje importante el costo de operación de la red, tomando en cuenta el área donde la red esté operando. A continuación se analizarán los factores que se ven mermados debido a la utilización de este conductor.

1.3.1. Desgaste de conductores

Gracias al recubrimiento *XLPE*, el conductor está protegido contra los agentes externos que ponen en peligro la integridad del cable, tales como: la lluvia, exposición al sol, corrosión debida a la salinidad en áreas cercanas al mar, etc. extendiendo de manera importante la vida útil de la red y minimizando su mantenimiento y cortes del servicio.

1.3.2. Robos de energía

El principal riesgo para la red de distribución en lo que se refiere al robo de energía, es además de la pérdida económica, el empleo de empalmes de muy baja calidad, lo cual pone en serio peligro la continuidad del servicio a la hora de un corto circuito provocado por este tipo de anomalías. El conductor ecológico, disminuye este problema, ya que es necesario de equipo especializado para poder conectar centros de transformación clandestinos y por consiguiente servicios ilegales.

1.3.3. Arbolado

En áreas rurales mayormente, las líneas de distribución en media tensión están a merced del crecimiento desmedido de la vegetación que la rodea, la cual representa uno de los principales inconvenientes a la hora de utilizar cables desnudos, pero con la utilización del conductor ecológico, este problema se minimiza casi al 100% gracias al aislamiento *XLPE*.

2. EXTENSIONES DE LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN CON CABLE AAAC ECOLÓGICO

2.1. Aspectos generales

Las redes de distribución aéreas con cables ecológicos, representan toda una gama de situaciones técnicas que forman una nueva corriente de construcción y operación de este tipo de instalaciones.

En este capítulo se analizarán los métodos de diseño y construcción con cable ecológico que son utilizados actualmente en Guatemala, tomando en cuenta las ventajas y desventajas entre uno y otro, así como los herrajes a utilizar y los criterios de diseño a respetar en cada uno de ellos.

Los métodos de construcción de líneas de distribución con cable ecológico son:

- Método convencional

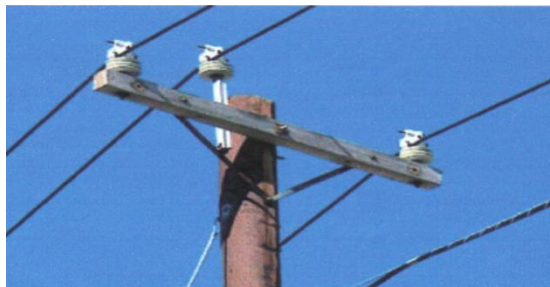
Muy similar forma de construcción y diseño en comparación a los métodos utilizados empleando cable desnudo para media tensión, lógicamente el conductor es diferente así como sus herrajes de acople con el apoyo, el cual, según sea el caso, será un crucero de madera o hierro, un soporte de extensión primaria o incluso el poste utilizando cadenas de remate al momento de una configuración vertical.

Una línea de distribución ecológica construida con este método no representará cambios sustanciales al realizar el diseño, ya que en la mayoría de ocasiones, se emplea únicamente para tramos cortos donde la vegetación está protegida. Por lo tanto, este método es mayormente utilizado en áreas donde la línea desnuda no puede pasar, más por presiones sociales que por cuestiones técnicas.

La planeación económica de líneas de distribución ecológicas utilizando el método convencional, es muchísimo más fácil, ya que no representa un cambio al efectuar el análisis de las unidades básicas de mano de obra. Sin embargo, al tendido debe aplicársele un factor de corrección para cuantificar la mano de obra del tendido, ya que el cable es considerablemente más pesado debido al aislamiento, por lo que también es necesario acortar los vanos.

La distancia máxima entre postes para una línea trifásica de cable ecológico calibre 1/0 instalado a una tensión mecánica 4 veces inferior a la tensión de ruptura y tomando en cuenta el mínimo de altura para un cable instalado en red aérea dictado por la Municipalidad de Guatemala (8m sobre el nivel del suelo) es de 95m.

Figura 10. **Línea ecológica de distribución trifásica convencional**



Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p. 18.

Como se puede apreciar en la figura 10, los apoyos principales como el crucero y el poste, son iguales tanto en instalación como en materiales. Sin embargo, los herrajes de aislamiento entre el cable y crucero son diferentes, fabricados de polímero, tanto los aisladores como los remates preformados.

- Método compacto

Contrario al método convencional, éste difiere totalmente en cuestiones de diseño y presupuesto a las redes aéreas de distribución con cable desudo. Por lo tanto, significa toda una nueva forma de distribuir energía eléctrica en áreas donde la vegetación es tan densa y comprende longitudes considerablemente largas entre el centro de consumo y la subestación de distribución. Por lo tanto, es posible mencionar las siguientes características técnicas y de diseño que una red compacta de cable ecológico tiene:

- Uso de herrajes de soporte especialmente diseñados
- Utilización de cable de acero de soporte llamado mensajero
- Reducción drástica del área que ocupan los conductores ya instalados
- Posibilidad de instalación en zonas de vegetación densa con longitudes largas
- Reduce del desrame previo a la instalación
- Reducción del mantenimiento preventivo

- Alta inversión inicial
- Especialización en los métodos de construcción.

Figura 11. **Línea ecológica compacta**



Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p. 14.

A continuación se analizará cada uno de los métodos anteriormente descritos, ya que en ocasiones el diseño demanda que se combinen los métodos, convencional y compacto.

2.1.1. Requerimientos de diseño

La comparación entre los métodos de construcción antes mencionados en función del diseño se debe hacer sobre bases comunes tales como:

- Seguridad

Las redes aéreas de distribución en media tensión, representan un peligro latente para las personas. Por lo tanto es de vital importancia que el diseño de la misma prevea este importante requerimiento, tomando en cuenta el crecimiento

de la zona urbana a futuro, así como el utilizar configuraciones adecuadas para alejar los conductores energizados del alcance de las personas, tanto al nivel del suelo como de edificaciones. Las líneas de distribución construidas con cable ecológico, no resuelven este problema sólo por su naturaleza de conductor ecológico, por lo tanto, esta importante característica es contemplada de igual forma que con las líneas de distribución aéreas con cable desnudo.

- Confiabilidad

La confiabilidad del servicio de energía eléctrica, depende en gran parte de la buena operación de las redes de distribución, donde ocurren la mayoría de fallas que alteran de manera importante la continuidad del servicio. Por lo tanto, el diseño de la red de media tensión, debe contemplar este detalle.

Las redes construidas con cable ecológico, son de mucha ayuda para la confiabilidad y la continuidad del servicio, mayormente en áreas rurales donde la vegetación es considerablemente mucho más densa que en las áreas urbanas. Tomando en cuenta que si sacamos del análisis de confiabilidad de líneas de distribución aéreas, las fallas a tierra provocadas por roce con los árboles, la incidencia de fallas permanentes baja de manera abrupta.

Por lo tanto, la confiabilidad de las líneas de distribución con cable ecológico en áreas rurales, es muy grande, ya que la continuidad del servicio es mucho mayor.

- Simplicidad de operación

La operación de una línea de distribución ya construida, es medida en función de la continuidad o no del servicio de energía eléctrica que suministra.

Por lo tanto, es importante tomar en cuenta las razones por las cuales la red podría quedar desenergizada por situaciones de fuerza mayor. Las redes de distribución que emplean conductores ecológicos, tienen una operación mucho mejor gracias al bajo mantenimiento preventivo que ameritan, es decir, las rutas de monitoreo por cercanía de vegetación o bien por corrosión debida a la salinidad es mucho más baja que con los conductores desnudos.

- **Costo**

La eficiencia de una línea de distribución de cualquier tipo, incluyendo conductores, herrajes, mano de obra, etc. es función, no solamente de la buena o mala operación y continuidad del servicio, sino que también de la inversión inicial que represente el diseño y construcción de la misma. La utilización de conductores ecológicos, incrementa considerablemente, el costo de la instalación de distribución de manera que, inicialmente la inversión es bastante alta; sin embargo, más adelante se analizarán los beneficios económicos que representa a largo plazo.

2.1.2. Ventajas

Las líneas de distribución aéreas construidas con cables ecológicos, representan una serie de beneficios tanto técnicos y operativos, como de calidad de energía y confiabilidad, los cuales son:

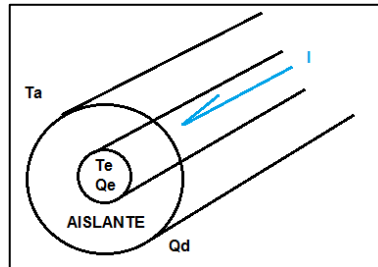
- Costos de mantenimiento prácticamente despreciables.
- Reducción del número de perturbaciones debidas al viento, al hielo y a las ramas de los árboles.

- Alta probabilidad de continuidad del servicio en caso de la caída de la línea físicamente a tierra, característica muy importante para comunidades lejanas y aisladas.
- Posibilidad de más de un circuito en el mismo posteo.
- Reducción drástica de la tasa de fallas en la red, con la consiguiente mejoría en la calidad de atención.
- Color gris del forro del conductor para reducir el impacto ambiental.
- Más alto nivel de seguridad del público.
- Menor contaminación del medio ambiente a través del menor número de podas a los árboles.

2.1.3. Desventajas

La principal desventaja de la construcción de las líneas de distribución con conductores ecológicos desde el punto de vista técnico, es que los conductores por la misma razón de estar recubiertos por el aislamiento antes mencionado, su capacidad de conducción de corriente comparada con cables desnudos del mismo calibre disminuyen, este fenómeno se debe a la transferencia de calor entre el elemento conductor del cable, el aislante y el ambiente exterior. Las figuras 12 y 13 demuestran ésta afirmación:

Figura 12. **Variables calóricas de un conductor energizado**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

Q_e = calor emitido desde el elemento conductor del cable

Q_d = calor disipado al exterior del cable

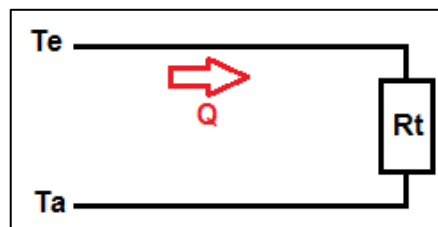
T_e = temperatura del elemento conductor del cable

T_a = temperatura al exterior del cable

I = corriente circulante en el cable.

La transferencia de calor desde el elemento conductor hasta el exterior, se modela con un circuito térmico:

Figura 13. **Circuito térmico de transferencia de calor entre el elemento conductor y aislante en un cable energizado**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

R_t = equivale a la resistencia térmica que el aislante del cable representa al paso del flujo de calor

Q = flujo de calor desde el elemento conductor hasta el exterior

Para que la temperatura del conductor se mantenga constante la siguiente ecuación debe cumplirse:

$$Q_e - Q_d = 0$$

Según la figura 13, el flujo calórico desde el elemento conductor hasta el exterior del cable es:

$$Q_d = \frac{T_e - T_a}{R_t} = \frac{\Delta T}{R_t}$$

Como el elemento aislante es polietileno reticulado (*XLPE*) tiene una resistencia térmica mucho mayor que al aire, por lo tanto, según la ecuación el valor del calor disipado tiende a disminuir considerablemente.

La resistencia térmica es inversamente proporcional a la conductividad térmica del material aislante:

$$R_t = \frac{e}{K}$$

Donde:

e = Espesor de la capa de aislante en metros.

K = Conductividad térmica en *Watts*/(Kelvin)(metro)

Por lo tanto, como la resistencia del material *XLPE* es mucho mayor a la resistencia térmica del aire, el calor disipado tiende a disminuir proporcionalmente debido a este fenómeno.

Por lo tanto, el equilibrio del calor emitido y el calor disipado se pierde y se obtiene un calor del conductor resultante, Q_c :

$$Q_c = Q_e - Q_d$$

El cual tenderá a aumentar, mientras el valor del calor disipado disminuye. Aplicando la siguiente ecuación:

$$Q_c = K(m)(T_e - T_a)$$

Donde:

K = conductividad térmica

m = masa del material aislante

$T_e - T_a$ = temperatura en el aislante

Despejando el valor de la temperatura en el aislante:

$$\Delta T = T_e - T_a = \frac{Q_c}{Km} = i^2 R_e - Q_d$$

Por lo tanto, mientras aumente el calor en el conductor Q_c aumentará la temperatura del aislante. Mientras este valor se acerque al nivel crítico, el conductor va a empezar a perder las características aislantes al roce con árboles y puede provocar fallas a tierra que pondrían en peligro tanto a personas

como la continuidad del servicio eléctrico. Por lo tanto, como lo muestra la ecuación anterior, es mejor limitar la corriente circulante en el conductor para evitar este problema.

También es importante mencionar que el peso de los conductores aumenta significativamente. Económicamente representa una inversión inicial más elevada, la cual será analizada posteriormente en un cálculo de presupuesto real.

2.1.4. HERRAJES

En comparación con líneas aéreas desnudas, las líneas de distribución construidas con conductores ecológicos, tienen la gran ventaja que la distancia entre los conductores energizados puede reducirse, de tal manera que los herrajes de soporte con los apoyos donde se instalan los cables son diseñados especialmente para este tipo de conductores, ya que soportan el peso de los mismos y permiten el contacto con los árboles.

A continuación se analizarán los herrajes que se utilizan especialmente para líneas ecológicas, dejando por un lado los herrajes que también se utilizan para redes con conductores desnudos.

- Aislador tipo pin 15 kV

Estos tipos de aisladores están fabricados con alta densidad de polietileno, su peso es alrededor de 2 libras, son de color gris, tienen una alta resistencia al esfuerzo, prácticamente tienen las mismas características constructivas que los espaciadores. Son resistentes a golpes o vandalismo con armas de fuego, según pruebas que se han hecho por parte de los fabricantes se ha podido

comprobar que aún perforados por causa de proyectil de arma de fuego el aislador sigue en servicio.

Figura 14. **Aislador de polímero tipo pin 15 kV**



Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p. 8.

Debido a su diseño y forma, son auto lavables por efecto de la lluvia, además, su comportamiento es excelente en ambientes contaminados debido a este motivo y, a que tiene una gran línea de fuga hacen mucho más confiable la línea con conductor ecológico ante fallas por corrosión en los aisladores. Otra característica de los aisladores de polietileno es que evitan el efecto corona. El efecto corona es una manifestación de pérdidas que involucra al campo eléctrico en la superficie de los conductores cuando se excede a la rigidez dieléctrica del aire.

Por este motivo los aisladores de polietileno se pueden intercambiar con los aisladores de porcelana en redes con conductores desnudos, pero no se puede intercambiar aisladores de porcelana con los de polietileno en redes con cable protegido, ya que este efecto deteriora la superficie del cable. Los aisladores de polietileno se utilizan cuando existen ángulos de desvío en la red,

para lo cual los aisladores se instalan sobre ménsulas para ejercer los ángulos que se necesiten, estos aisladores se aseguran a la ménsula mediante un perno espiga.

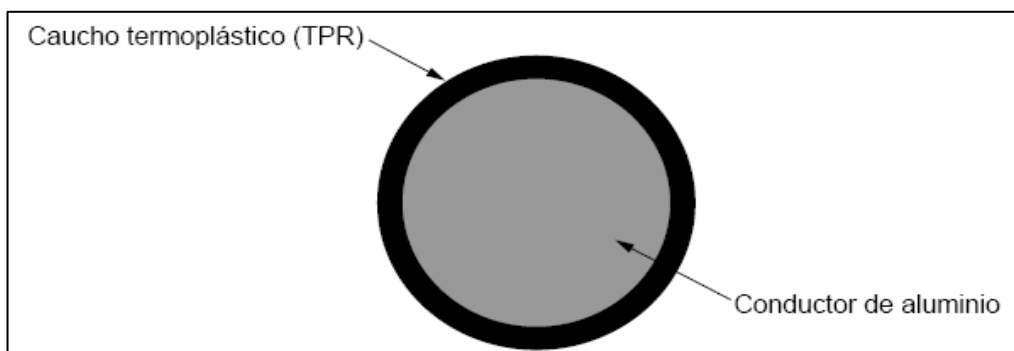
Características técnicas del aislador tipo pin:

- Tensión de servicio: 8,7/15 kV
- Resistencia al esfuerzo e intemperie
- Altísima resistencia al impacto
- Construido de polietileno de alta densidad
- Diámetro máximo de cables a apoyar 32 mm
- Línea de fuga: 415 mm
- Peso: 534 gramos
- Diámetro de rosca: 25-35 mm
- Escaso radio de interferencia
- Para asegurar el cable a los aisladores se tienen 2 opciones:
- Alambre recubierto para ataduras
- Aisladores tipo pin con grapas incorporadas

- Alambre recubierto para ataduras

Es un alambre de aluminio blando #4 AWG recubierto por una capa de 1,14mm de caucho termoplástico (TPR). Debe tenerse cuidado al momento de realizar el amarre para mantener los valores de tensión y flecha de los conductores de la red, después de realizado el amarre, el alambre no se desenrolla fácilmente.

Figura 15. **Alambre de amarre para líneas ecológicas**

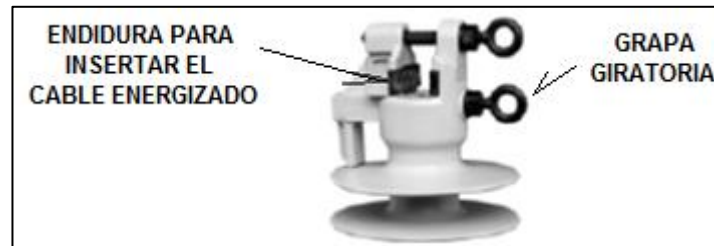


Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p. 20.

- Aisladores tipo pin con grapa incorporada

Este tipo de aislador es una alternativa al método anterior de asegurar los cables al aislador por medio del alambre para ataduras, ya que el aislador tiene una grapa para la sujeción de los cables, lo cual lo hace más fácil de instalar, ya que es posible utilizar pértigas de fibra de vidrio para ajustar el cable al mismo.

Figura 16. **Aisladores tipo pin con grapa incorporada**



Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p. 20.

Como se observa en la figura 16, la grapa está en la parte superior del aislador, siendo su ventaja el ahorro de tiempo en el montaje debido a que ya no se realiza el amarre. Si se va a montar este tipo de aislador en una red con cables desnudo, los aisladores deben tener insertos de aluminio en las mordazas de las grapas.

Características técnicas del aislador tipo pin con grapa incorporada:

- Tensión de servicio: 8,7/15 kV
- Resistencia al esfuerzo e intemperie
- Altísima resistencia al impacto
- Construido de polietileno de alta densidad
- Diámetro máximo de cables a apoyar 32 mm
- Línea de fuga: 415 mm
- Peso: 534 gramos
- Diámetro de rosca: 25-35 mm

- Espaciador

Los espaciadores están diseñados para niveles de voltaje de 15 kV, 25 kV y 46 kV, son fuertes y robustos, pero livianos, están hechos con alta densidad de polietileno, con una alta resistencia al desgaste, a la abrasión y a los rayos ultra violeta. Su función es la de sostener y separar a las fases en configuración triangular mientras el espaciador está suspendido del mensajero. Cuando la red pasa por el poste el cable mensajero se sujeta mediante una grapa que viene incorporada a una ménsula tangente, el espaciador se sostiene de la ménsula mediante un estribo diseñado especialmente para esta aplicación, tal como se observa en la figura 17, y estos elementos se los detallarán más adelante en este capítulo, También constan de un agujero para adhesión de la ménsula anti oscilaciones o anti balanceo, (agujero de acople), en lugares donde el espaciador está adherido al poste mediante ménsulas. Mientras que cuando el espaciador está en el vano, como se aprecia en la figura 17, el cable mensajero va en el gancho superior de éste.

Debido a su diseño los espaciadores presentan las siguientes características técnicas:

- Tensión de servicio: 8,7/15 kV.
- Resistente a la intemperie.
- Altísima resistencia al impacto.
- Material: polietileno de alta densidad.
- Color: gris.
- Diámetro de cables: 2 a 4/0
- Línea de fuga: 280mm.
- Peso: 450 grs.
- Baja radio interferencia.

- Son auto lavables por lluvia.
- Se minimiza la caída de tensión debido a que el espaciador es compacto, lo cual se demuestra con el siguiente análisis.

El espaciador de redes ecológicas compactas, también reduce la caída de tensión a lo largo de la línea, esto debido a que reduce la distancia entre fases de 3 pies a 18 cm, lo cual disminuye la inductancia de la línea y en consecuencia la impedancia de la línea.

Utilizando la fórmula para la reactancia por kilómetro de una línea trifásica:

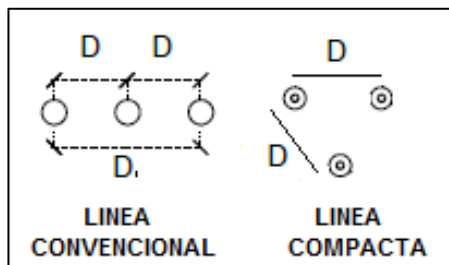
$$X = 0,1736 \text{Log} \frac{D}{r}$$

Donde:

D = distancia media geométrica entre conductores.

$$D = \sqrt{D_1 D_2 D_3}$$

Figura 17. **Distancia entre cables de fase en líneas de distribución**



Fuente: elaboración propia.

La distancia entre fases de una línea de distribución convencional es de 3ft (0,91m) entre los conductores de los extremos y centro y de 6ft (1,83m) entre los de los extremos. La distancia entre las fases de una línea compacta es de 18cm.

Por lo tanto la relación entre la reactancia por km entre estas configuraciones es la siguiente:

Línea convencional

$$D = \sqrt{(0,91)(0,91)(1,82)}$$

$$D = 1,22$$

Entonces

$$X = 0,1736 \text{Log} \frac{1,82}{0,00825}$$

$$X = 0,41 \Omega/km$$

Línea compacta

$$D = \sqrt{(0,18)(0,18)(0,18)}$$

$$D = 0,18$$

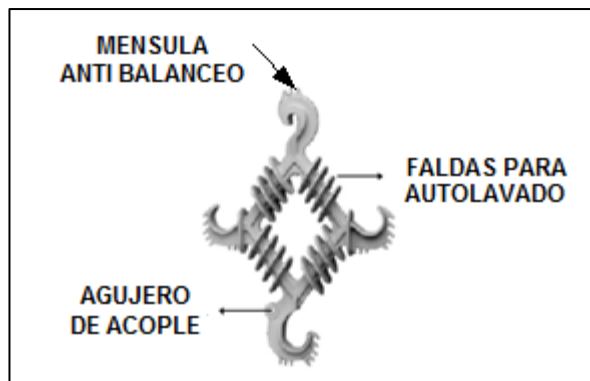
Entonces

$$X = 0,1736 \text{Log} \frac{0,18}{0,00825}$$

$$X = 0,23 \Omega/km$$

Los cálculos son concluyentes, ya que la reactancia de una línea convencional es casi dos veces la reactancia de una línea compacta, lo cual influye en la caída de tensión de manera directa.

Figura 18. **Espaciador para líneas compactas**



Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p. 20.

Los espaciadores tienen una alta resistencia al impacto con arma de fuego (rifle, pistola), considerando que hay zonas en la ciudad que se pueden considerar como peligrosas por la existencia de pandillas dedicadas al robo del cable neutro en redes de media y baja tensión.

Existen varios modelos de espaciadores los cuales se detallan a continuación:

- Sin grapas incorporadas
- con grapas incorporadas
- con grapas para desvíos mayores a 20°

- para red monofásica
- Espaciadores sin grapas incorporadas

Este tipo de espaciador asegura a las fases y mensajero mediante anillos de sujeción (accesorios que se detallarán más adelante).

Figura 19. **Espaciador para líneas compactas sin grapas incorporadas**



Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p. 21.

Este diseño hace ver al ojo del observador como si la red estuviera limpia o descongestionada, dando solución al problema que existe en algunos sectores de la ciudad de Guatemala donde el congestionamiento de cables es tan considerable que hace muy difícil el mantenimiento de las redes, ya que otras empresas utilizan los mismos postes para instalar sus cables como por ejemplo, los cables telefónicos o televisión por cable.

Figura 20. **Espaciador instalado y apoyado en poste**

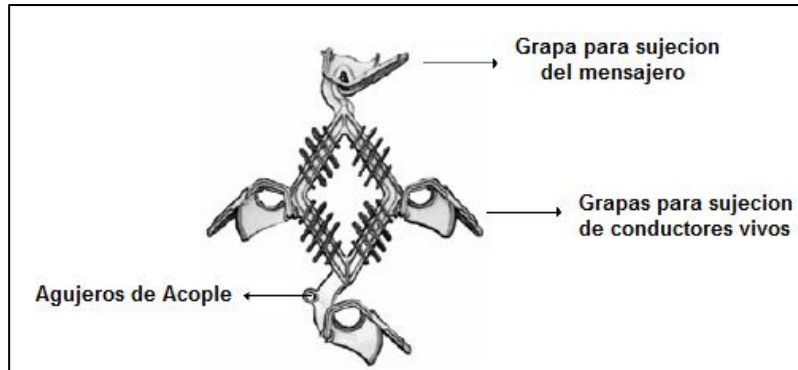


Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p. 22.

- Espaciadores con grapas incorporadas

Este modelo tiene las mismas aplicaciones que el espaciador sin grapas incorporadas, la diferencia radica en que el espaciador tiene grapas incorporadas para asegurar a los cables y al mensajero, haciendo que su montaje y remoción sean más rápidos y sencillos. Las grapas están diseñadas para sostener todas las secciones de los conductores y del mensajero.

Figura 21. **Espaciador trifásico con grapas incorporadas**

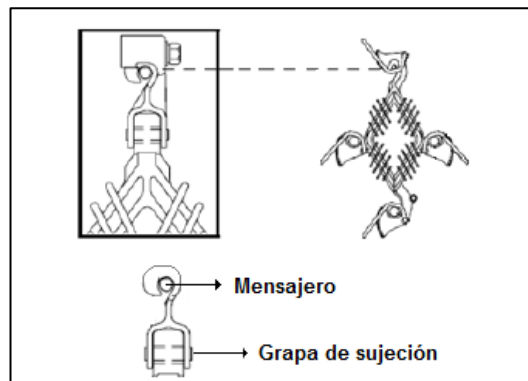


Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p. 23.

- Espaciadores con grapas para ángulos mayores a 20°

Una opción para redes con desvíos mayores a 20° es este espaciador, el cual posee una grapa metálica de sujeción con una especie de articulación giratoria para que el espaciador quede vertical aunque el mensajero esté inclinado según la pendiente.

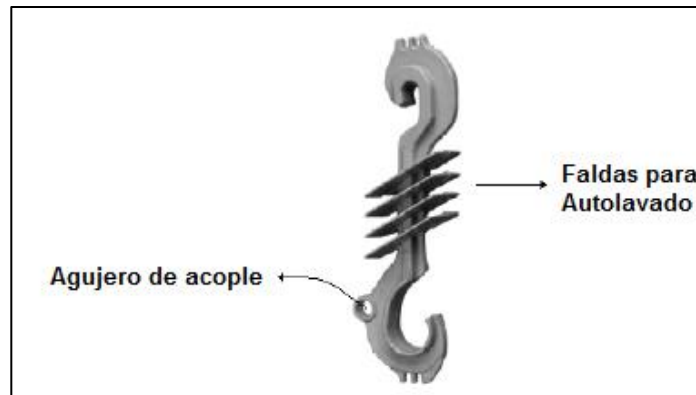
Figura 22. **Espaciador para ángulos mayores de 20 grados**



Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p. 23.

- Espaciador para red monofásica

Figura 23. **Espaciador para redes monofásicas**



Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p. 23.

Como se observa en la figura 6, el espaciador está diseñado para que la red tenga una configuración vertical, ya que la red es monofásica y el mensajero va por arriba de la fase. Los valores de voltaje para los cuales están diseñados estos espaciadores son de hasta 20 kV fase-tierra.

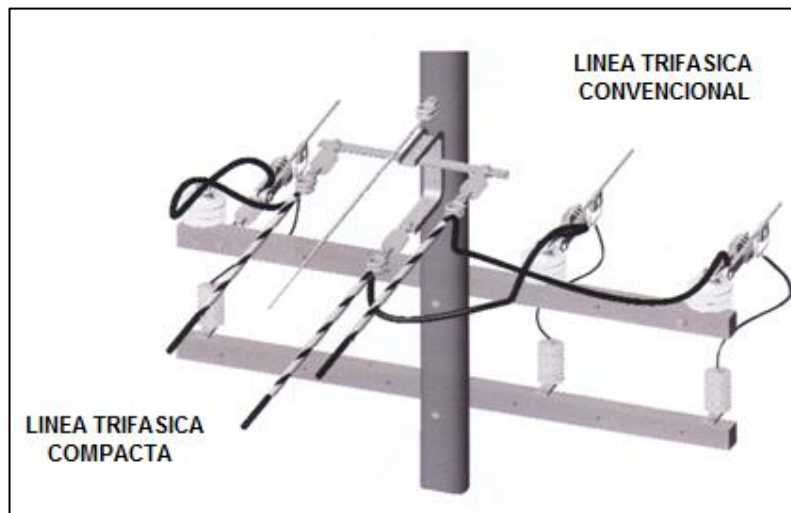
El espaciador, por sus pequeñas dimensiones permite instalar dos circuitos en un mismo apoyo (poste). Es el componente más importante de las redes compactas de distribución construidas con conductores ecológicos.

- Conversión de línea aérea normal a línea compacta

Según sea el diseño de la línea de distribución a construir, el cual depende directamente de la topografía del área donde será instalada, en ocasiones cuando las líneas aéreas con conductores desnudos pasan por áreas protegidas con gran nivel de vegetación. Entonces se opta por colocar conductor ecológico

utilizando el método compacto, reduciendo así el área transversal de la línea y evitando la necesidad de desrame al momento de la construcción así como en rutinas de mantenimiento preventivo a futuro.

Figura 24. **Conversión a líneas compactas**



Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p. 24.

En la figura 24, se puede apreciar una conversión de línea desnuda trifásica construida horizontalmente a línea ecológica compacta, como se describió anteriormente, esta configuración permite utilizar a completamente las ventajas de ambas formas de construcción. Se observa, la parte de la instalación donde se utiliza cable desnudo, cuenta con tres cadenas de remate, generalmente, fabricadas de polímero, formando un remate sencillo trifásico centrado. También en medida de protección para el empalme se utilizan pararrayos con un *BIL* de 15 kV en derivación.

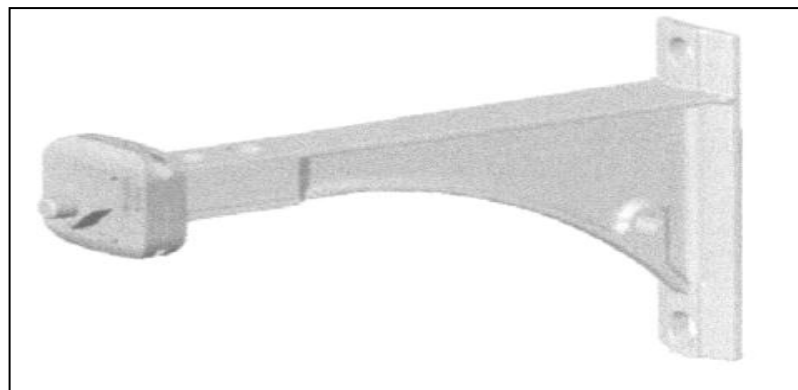
También se observa, que se utiliza línea compacta ecológica. Utilizando un soporte en el cual se remata la línea formando un área transversal con forma de

triángulo, de manera que se utilice el espaciador. El cable mensajero a utilizar, será de acero de ¼” también rematado en el poste.

- Apoyo para espaciador

El apoyo para el espaciador, se utiliza como soporte para los espaciadores de los conductores antes ilustrados. Este soporte se atornilla de manera muy segura al poste, ya sea éste de madera o concreto.

Figura 25. **Apoyo para espaciador**



Fuente: Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión Pirelli. p .24.

2.2. **Diseño mecánico**

El diseño mecánico de una línea de distribución de cualquier tipo, ya sea ecológica o utilizando cables desnudos, conlleva todo un estudio de condiciones que es la base del desarrollo de un proyecto de extensión de línea de media tensión. A continuación se analizarán una serie de parámetros a tomar en cuenta en la elaboración del diseño mecánico de una red de este tipo.

2.2.1. Apoyos

Los apoyos son la parte más importante de la red de distribución después de los conductores mismos, ya que son tanto la protección contra las personas y animales de sufrir un accidente fatal, como el soporte principal de los cables energizados. Cuando los apoyos fallan y la línea pierde altura, es posible que la misma esté al alcance tanto de personas como edificaciones, lo cual ponga en peligro a los seres humanos en primer lugar, y a la continuidad del servicio de energía eléctrica, en segundo lugar, se analizarán los requerimientos necesarios para realizar de la mejor manera tanto la ubicación como la escogencia de los apoyos para una red de distribución con cable ecológico. El apoyo se selecciona tomando en cuenta las variables de peso del conductor, tensión mecánica de instalación y ángulo de remate en poste.

Las distribuidoras de energía eléctrica en Guatemala, tienen normados como apoyos para líneas de distribución aéreas postes especialmente diseñados, cuyas propiedades de manufacturación así como de aplicación, ya en el campo permiten la utilización de los mismos en este tipo de redes. Por su costo moderado y fácil manejo en cuanto a su peso, en áreas de difícil acceso se utilizan postes de madera tratada, los cuales tienen una vida útil de 25 años.

De manera similar para áreas urbanas y carreteras, se utilizan postes manufacturados de concreto armado, los cuales tienen una serie de clasificaciones tanto por altura como por clase. Los postes de concreto armado tienen una resistencia mayor ante las cargas verticales como transversales que la línea de distribución le ocasione.

Tabla V. **Alturas de postes**

Altura (Pies)	Alumbrado público	Secundario	Primario	Trafos
30	x	x		
35	x	x	x	x
40	x	x	x	x
45	x	x	x	x

Fuente: Catálogo de posteo POSCRET. p. 1.

Como se muestra en la tabla V, según sean los requerimientos de diseño los postes tanto de madera como de concreto, tienen una funcionalidad especial la cual va a depender de su altura. Desde postes de 35' es posible utilizarlos como soporte de líneas primarias de media tensión y para instalar centros de transformación. La razón de que existan los postes de 40' y 45' son requerimientos no eléctricos desde el punto de vista de operación. La utilización de dobles circuitos, caminos ondulados, saltos de barrancos y pasos a desnivel, son las razones que justifican estas alturas.

- Selección de rutas

La revisión de la factibilidad de la ruta propuesta y los factores que puedan impactar el costo de la misma presentan el principal problema a resolver, ya que representa la base del presupuesto general del proyecto. La selección de la ruta donde la línea de distribución se instalara se ve afectada directamente por:

- El impacto de la vegetación, tala y corte de árboles.
- Limitaciones por derechos de vía y paso de servidumbre.
- Planes de crecimiento de caminos privados.
- Topografía del terreno.

- La ruta seleccionada debe ser identificada y mapeada con suficiente detalle señalando los puntos de control.

En las regiones rurales, donde las rutas para líneas de distribución tienen la problemática constante de la vegetación muy densa, la utilización de cable ecológico es muy funcional, ya que reduce en un porcentaje de casi el 90% la necesidad de talar árboles, lo cual reduce el impacto ambiental y mejora la continuidad del servicio de energía eléctrica.

- Mensajero

Cable no energizado utilizado como soporte principal mecánico para línea ecológica construida con el método compacto, con una carga de rotura mínima de 4500 kg. Los herrajes de remate utilizados son diseñados para soportar el peso de las 3 fases, por lo tanto estos están fabricados también de acero. En función de su tensión de ruptura, y tomando en cuenta el peso de los conductores energizados, se calcula la catenaria y flecha del tendido. Protege a los circuitos contra la caída de ramas pesadas y provee una conductancia de neutro adecuada.

- Puntos de control

Los puntos de control de las líneas de distribución aéreas, son aquellos puntos de referencia que determinan el diseño de la misma. Es decir, en función de estos puntos la línea de distribución es mecánicamente diseñada. A continuación se mencionarán las principales características a tomar en cuenta para la selección de un punto de control:

- Puntos donde es necesario que la línea cambie de dirección

- Construcciones o terrenos influyentes
- Atributos topográficos y geográficos

La correcta selección para la ubicación de puntos de control permitirá:

- El alineamiento general de la ruta.
- El requerimiento de estructuras especiales o la necesidad de buscar nueva ruta.

Utilizando cable ecológico, los puntos de control tienen menos limitaciones, debido a que el problema de la densa vegetación y la corrosión se reducen.

2.2.2. Distancias de seguridad

En líneas de distribución con cable ecológico, construidas con el método compacto, como ya se indicó, reducen en gran medida la distancia entre los conductores vivos de fase. Por lo tanto se estudiará cuál es la distancia óptima para la instalación de un espaciador.

Antes de construir una línea, se debe calcular la flecha máxima aceptable, es decir que no viole las distancias mínimas normadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) en la Norma Técnica de Diseño y Operación de Instalaciones de Distribución (NTDOID), la cual tiene una tabla que indica las distancias mínimas de seguridad a respetar. Únicamente se incluirán aquellas distancias que afecten líneas de media tensión en 13,8 kV.

Tabla VI. **Distancias mínimas de seguridad**

Naturaleza de la superficie bajo los conductores	Conductores suministradores en línea abierta de (775 V a 22 kV)(m)
Vías férreas	8,1
Carreteras, calles, caminos y otras áreas usadas para tránsito	5,6
Aceras o caminos accesibles sólo a peatones	4,4
Aguas donde no está permitida la navegación	5,2
Aguas navegables incluyendo lagos, ríos, estanques y canales	6,2

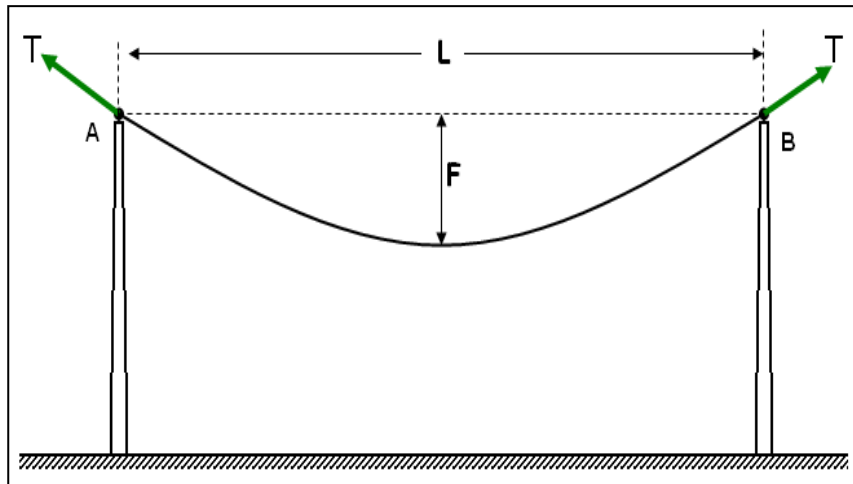
Fuente: Normas CNEE NTDOID. p. 46.

Por razones de la investigación, las líneas de media tensión construidas con el método convencional no serán analizadas. Únicamente el método compacto.

- Catenaria

Un conductor de peso uniforme, sujetado por dos postes ubicados en los puntos A y B que se encuentran a la misma altura, forma una curva llamada catenaria. La distancia F entre el punto más bajo situado en el centro de la curva y la recta AB, que une los postes, recibe el nombre de flecha. Se llama vano a la distancia L entre los postes de soporte A y B.

Figura 26. **Catenaria entre dos postes**



Fuente: elaboración propia.

Además, es importante tomar en cuenta la temperatura durante la construcción, si la línea es tendida en invierno, debe recordarse que durante el verano, por las altas temperaturas, el conductor va a alargarse y la flecha puede violar las distancias mínimas de seguridad al suelo normadas. A la inversa, si el conductor es tendido en el verano, la flecha no debe ser demasiada reducida, ya que con el frío del invierno, al contraerse el conductor, el mismo se sometería a tensiones peligrosas.

Otros elementos importantes que se deben tomar en cuenta son el viento y la lluvia, que aumentan carga considerable a la línea y pueden llegar a provocar la rotura del conductor. Como dato, para el área de servicio de la EEGSA la presión del viento normada que se utiliza en los cálculos de flechas y tensiones es de 48 kg/m^2 que corresponde a una velocidad del viento de 100 km/h .

En líneas de distribución con cables ecológicos, el concepto de catenaria se ve condicionado a la utilización de los espaciadores, ya que los cables están instalados uno muy cerca del otro y para preservar la catenaria del tramo, es necesario utilizar cierta cantidad de espaciadores, los cuales estarán sujetos al cable mensajero, quien al final de todo el análisis determinará el nivel de catenaria del sistema. Por lo tanto, para poder proceder la catenaria, inicialmente es necesario calcular la flecha del tramo.

- Flecha

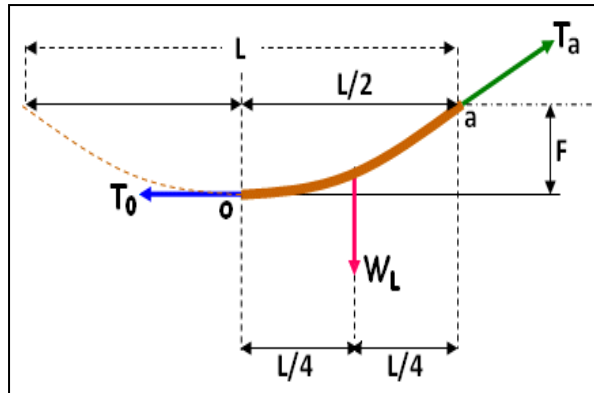
Como se describió, la distancia entre la horizontal, y el punto más bajo al que un cable se encuentra al estar tendido, se le conoce como flecha. Lo que depende de cada tipo de conductor y de la tensión que sea aplicada. Para calcularla se hará el análisis ilustrado en la figura 27.

Al imaginar suprimida la mitad izquierda del conductor en la curva de la catenaria, y que en su lugar se sustituye por una tensión T_0 en el punto más bajo del vano.

En la mitad derecha del conductor, T_a es la tensión aplicada en el poste B y WL es el peso del conductor correspondiente a medio vano, y para efectos de cálculo se puede aplicar en el punto medio de $L/2$ (usualmente la flecha es pequeña comparada con la longitud del vano).

T_0 , T_a y WL son las tres fuerzas que actúan sobre la mitad del conductor de acuerdo a la figura. Como el sistema está en equilibrio, quiere decir que: $\Sigma M = 0$ y tomando los momentos respecto al punto a, se puede hacer un diagrama de fuerzas, como se muestra en la figura 27.

Figura 27. Vectores para cálculo de flecha



Fuente: elaboración propia.

Haciendo el análisis matemático:

$$W_L \frac{L}{4} = T_0 F$$

Por lo tanto:

$$F = \frac{LW_L}{4T_0}$$

Al llamar W al peso unitario por unidad de conductor (Kg/m), entonces, el peso unitario por unidad de conductor en el tramo o-a que se ha llamado W_L será casi igual pues ($L/2 \approx$ a la longitud o-a) al peso unitario por unidad de conductor del tramo o-a.

Tomando que: $W_1 = W * L/2$ y sustituyendo en la ecuación anterior, se tiene:

$$F = \frac{L^2 W_L}{8T_0}$$

Donde:

F = flecha en metros

W1 = peso unitario del conductor en kg/m

L= distancia entre postes en metros

T1= tensión en estado inicial (tensión de tendido) kg

- Vano medio

Distancia medida entre 2 postes de una línea de conducción eléctrica en general. La longitud del vano medio en líneas de distribución, no obedece a ninguna fórmula matemática basada en cálculos eléctricos y mecánicos, ya que este tipo de líneas está en función de las rutas hacia los centros de carga, en ciertas ocasiones las brechas son carreteras o bien largos caminos planos. Sin embargo, la mayoría de ocasiones las líneas de transmisión recorren calles y avenidas de grandes ciudades, también callejones pequeños e incluso propiedades privadas.

- Distancia entre conductores

En líneas de distribución con cable ecológico, las distancias entre los conductores de fase se reducen debido al aislamiento que lo envuelve. Para líneas construidas utilizando el método convencional, la distancia entre conductores es la misma que en líneas de distribución utilizando cable desnudo. Los espaciadores tienen una distancia entre fases de 0,18m la cual reduce en un 80,4% a las líneas convencionales que tienen una distancia entre fases de 3 pies.

2.3. Diseño eléctrico

El estudio que determina los parámetros en general de este tipo de instalaciones de distribución, es el estudio de cargas y corriente eléctrica, que incluye la selección del nivel de voltaje y el cálculo de conductores. El hecho que la red se construya con cable ecológico o bien con cable aislado al aire, no significa que el cálculo difiera, únicamente las capacidades de los mismos ante el paso de corriente se ve afectada, a partir de ese punto, todo lo demás es exactamente igual.

2.3.1. Capacidad

La capacidad de distribución de un circuito, es decir, la cantidad de usuarios a los que puede alimentar depende de la demanda máxima coincidente que el conjunto de cargas a conectar tenga. Por lo tanto es importante analizar la capacidad de potencia a transportar para la cual los conductores serán calculados.

La potencia que una línea de distribución podrá transportar en condiciones ideales:

$$P_e = \sqrt{3}IV \cos \emptyset$$

Donde:

P_e = potencia activa o real a transportar en kW

I = corriente de línea a plena carga de la red en amperios

V = tensión de fase a neutro de operación de la línea en kV

$\cos \emptyset$ = factor de potencia de la carga a alimentar

Sin embargo, las líneas de distribución no son perfectas debido a que tienen pérdidas por caída de tensión. A continuación se analizarán los valores que modulan las pérdidas eléctricas en las líneas de media tensión.

- Impedancia

La impedancia es la magnitud que se opone al paso de corriente en circuitos de corriente alterna, está compuesta por la resistencia y la reactancia. La resistencia de un cable de media tensión, depende de los valores de fábrica. Sin embargo, la reactancia, depende de la longitud de la línea, así como de su inductancia y de la frecuencia del sistema interconectado de media tensión (60Hz en Guatemala).

La reactancia kilométrica de la línea en ohmios por kilómetro (Ω/km), se calcula empleando la siguiente fórmula:

$$X_L = 2\pi fL$$

Y sustituyendo L coeficiente de autoinducción por la expresión:

$$L = 0,00005 + 0,000046050 \log_{10} \frac{D}{r}$$

Se obtiene:

$$X = 2\pi f(0,00005 + 0,000046050 \log_{10} \frac{D}{r})$$

Donde:

X = reactancia aparente en ohmios por kilómetro

f = frecuencia de la red en Hertz

D= separación media geométrica entre conductores en milímetros

r = radio del conductor en milímetros

El valor D se determina a partir de las distancias entre conductores d_1 , d_2 y d_3 , en referencia al espaciador para líneas ecológicas y según sea el requerimiento de la línea a construir en general.

$$D = \sqrt[3]{D_1 D_2 D_3}$$

- Caída de tensión

La caída de tensión por resistencia y reactancia de una línea (despreciando la influencia de la capacidad) viene dada por la fórmula:

$$\Delta V = IL(R \cos \phi + X \sin \phi)$$

Dónde:

ΔV = caída de la tensión expresada en Voltios

I = intensidad de la línea en Amperios

X = reactancia por fase en Ω /km

R = resistencia por fase en Ω /km

θ = ángulo de desfase en radianes

L = longitud de la línea en kilómetros.

Teniendo en cuenta que la corriente de alimentador en amperios por fase es:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \phi}$$

Donde:

P = potencia transportada en kilovatios

V = tensión compuesta de la línea en kilovoltios

La capacidad de un circuito eléctrico de media tensión, utilizando cualquier conductor, ya sea desnudo o bien ecológico, dependen en primer lugar de las características generales de la carga a alimentar, es estos casos, la capacidad se define tomando en cuenta el valor de potencia aparente de la placa de datos del transformador de potencia de la subestación que alimentará al circuito.

Analizando lo que es un circuito de distribución en media tensión real, es necesario tomar en cuenta las pérdidas eléctricas que representa tanto la misma alimentación a la carga como la longitud del circuito, a continuación se analizarán las mismas. Por lo tanto la capacidad real de un circuito de distribución en términos de potencia a transportar, es la siguiente:

$$P_c = P_e - P_p$$

Donde:

P_c = Capacidad real del circuito en kW.

P_e = Potencia entregada a la red de distribución en kW.

P_p = Potencia de perdidas eléctricas, debido a caída de tensión en kW.

La capacidad de los circuitos de distribución representa la magnitud más importante a la hora de planificar las redes eléctricas, ya que en función de este dato toda la infraestructura de los circuitos es calculada y prevista.

- Pérdidas eléctricas

Las pérdidas eléctricas en un conductor, sea el que este sea, se definen en dos grandes rubros, debido a efecto joule y a la caída de tensión entre la fuente y carga. A continuación se analizarán las causas de los mismos, y las mejores maneras de evitarlas, mencionando también las repercusiones tanto técnicas como económicas que representan en los conductores ecológicos.

Analizando el efecto joule en los conductores de fase, es referirse al calentamiento que se da debido a una serie de posibles errores de instalación, que luego a la hora de la energización y posterior operación, representan pérdidas de potencia importante y por lo tanto pérdida económica. Tanto en líneas ecológicas como en líneas convencionales aisladas al aire, se encuentran los siguientes fenómenos que provocan este tipo de pérdidas:

- Falla de aislamiento *XLPE* en los conductores de fase, provoca calentamiento debido a la interacción con el medio exterior al aluminio energizado.
- Empalmes mal elaborados: en ciertas ocasiones, para realizar extensiones de línea, es necesario realizar empalmes al 100% para continuar con el circuito de media tensión, si estos empalmes se hacen mal, provocarían calentamiento.
- Falla de aislamiento por antigüedad: cuando pasa la vida útil de los conductores ecológicos, es necesario observar con equipo infrarrojo los soportes para crucero en líneas convencionales, o bien los soportes para espaciadores, ya que pueden provocar calentamientos por fuga de corriente.

- Falta de mejoras en circuitos principales: haciéndolos obsoletos para alimentar la demanda de los usuarios conectados, provocando disminución de la vida útil de estos e incluso si la corriente es demasiado alta, la calcinación de los mismos.

Analizando la caída de tensión como fuente principal de pérdidas, es posible mencionar los siguientes motivos:

- Líneas monofásicas muy largas provocan mal balance de cargas en las tres fases, lo cual baja el nivel de tensión para los usuarios.
- Demanda muy alta de potencia reactiva en líneas trifásicas, sucede mucho en áreas industrializadas y en líneas largas.
- Líneas trifásicas muy largas, aproximadamente mayores a 60km.
- Mal funcionamiento de reguladores de tensión en subestaciones de distribución.
- Líneas de baja tensión para servicios finales mal dimensionadas y con longitudes mal planificadas.

Para corregir este problema, es necesario realizar rutinas de mantenimiento con equipos de medición especializados. También prever crecimiento de demanda en áreas rurales como metropolitanas. Para disminuir el problema de la mala regulación de voltaje y por calentamiento, es posible realizar las siguientes mejoras a las instalaciones eléctricas de distribución:

- Cuando las extensiones de línea primaria son mayores a 300m desde el último poste de servicio, extender las 3 fases y neutral completas, sea cual sea la naturaleza del nuevo servicio a conectar.
- Monitorear constantemente la demanda sobredimensionada de potencia reactiva e instalar bancos de capacitores que compensen este problema.
- Cuando las líneas de distribución son demasiado largas, existen dos alternativas, instalar reguladores de tensión de línea, uno en cada fase, o bien reubicar estratégicamente los circuitos de distribución e interconectarlos mediante fusibles sólidos.
- Prever crecimiento de demanda en alimentadores principales como en ramales, realizando cambio de conductores donde sea necesario.
- Utilizar equipo especializado, tanto recurso material como humano, para la instalación de conductores como empalmes, previendo así una buena operación.

A continuación se analizarán las características a tomar en cuenta para el cálculo de conductores de fase para líneas de distribución en general, complementando con las propiedades de los conductores ecológicos para lograr un modelo que los tome en cuenta.

2.3.2. Cálculo de conductores

El cálculo de conductores de fase en líneas de distribución es indistinto sea cual sea la tecnología de los mismos, ya que las variables, las cuales

determinan el área transversal ideal del conductor para alimentar la densidad de carga para la cual será instalado, son las mismas, demanda máxima coincidente, resistividad del medio conductor, distancia al centro de carga, etc.

Se analizarán ambos criterios de selección de conductores de manera general, por caída de tensión debido a la distancia y por capacidad de conducción de corriente. Sin embargo, es importante mencionar que un conductor aislado al aire en comparación con un conductor aislado en cualquier medio (para líneas ecológicas es el *XLPE*, analizado anteriormente) su capacidad de conducción de corriente se ve mermada. Por lo tanto debe tomarse en cuenta este inconveniente para los cálculos.

La caída de tensión será calculada según las fórmulas dadas anteriormente y los datos como resistividad del conductor a temperatura de servicio será tomada como el límite de la temperatura de operación, para facilitar los cálculos y lograr unos resultados concluyentes.

Unificando, tanto el criterio de corriente crítica y el criterio de caída de tensión, es posible utilizar la siguiente fórmula, la cual incluye el cambio de resistividad del conductor según sea la temperatura de operación (para líneas trifásicas):

$$S = \frac{\rho C P L}{\sqrt{3} \Delta V * V_n}$$

Dónde:

S = sección transversal del conductor en mm cuadrados

C = incremento de resistencia en C.A. el cual es aproximadamente 1,02

- ρ = resistividad de conductor a la temperatura de servicio en ohmios
P = demanda máxima coincidente en vatios
L = longitud de la línea de distribución lineal
 ΔV = caída de tensión en voltios
Vn = voltaje de línea a línea en voltios

La demanda máxima coincidente a la hora del cálculo real, se tomará de mediciones rutinarias de la empresa distribuidora de la región central del país.

2.4. Mantenimiento preventivo

En líneas de distribución en general, el mantenimiento preventivo es una importante forma de preservar la calidad del servicio de energía eléctrica, reduciendo de manera considerable las interrupciones por la mala operación de la red. Por lo tanto, es importante que las rutinas de mantenimiento preventivo sean diseñadas de manera que cubran de forma integral todos y cada uno de los posibles factores, tanto técnicos como no técnicos que propicien fallas permanentes y por lo tanto el servicio se vea cortado.

Las líneas de distribución en media tensión con cable desnudo, tienen la principal desventaja que los conductores están expuestos a una serie de agentes externos que ponen en peligro la continuidad del servicio, por lo tanto, es necesario que las rutinas de mantenimiento contemplen este tipo de inconvenientes. En áreas urbanas, las construcciones muy cercanas, accidentes automovilísticos, vandalismo, etc. son fenómenos que atentan contra la red, en áreas rurales, la vegetación muy densa y el tipo de terreno donde la brecha de la línea se encuentre, también atentan contra la red.

A continuación se analizarán las importantes diferencias entre las rutinas de mantenimiento entre líneas con cables desnudos y líneas con cables ecológicos, analizando situaciones tanto técnicas como no técnicas para diseñar las actividades a realizar en el mantenimiento preventivo de cada tipo de red.

2.4.1. Factores técnicos de riesgo de falla

Técnicamente hablando, las líneas de distribución están a merced de los cambios abruptos de carga a alimentar, caída de tensión, crecimiento de carga a largo plazo, etc.

Los conductores desnudos en este tipo de líneas, presentan muy similares problemas a las líneas de distribución construidas con cable semiaislado, ya que el aislamiento no previene los daños al conductor por fenómenos eléctricos, al contrario, disminuye su resistencia ante sobre corrientes pasajeras.

El mantenimiento preventivo, como su nombre lo indica prevé los problemas que a futuro puedan causar fallas importantes en la red de distribución en media tensión, en cuestiones técnicas, es importante tomar las siguientes precauciones:

- Realizar medición de corriente en la salida de los circuitos principales de distribución.
- Realizar mejoras en los conductores en función del aumento de carga a alimentar.

- Hacer recorridos en toda la red de media tensión, tanto en circuitos principales como en ramales, realizando mediciones de puntos calientes y reparándolos inmediatamente.
- Balancear la carga de manera que la corriente de neutro sea mínima.
- Reducir los circuitos monofásicos, haciendo extensiones trifásicas para tener opción a balancear carga.
- En líneas de baja tensión mayores a 200 metros, añadir línea primaria para prevenir caída de voltaje.
- En zonas costeras de Guatemala, donde el nivel cerámico es muy alto, instalar pararrayos e hilo de guarda en las líneas largas.

Es necesario realizar estas actividades tanto en redes con cable desnudo y ecológico por lo menos tres veces al año, debido a que en Guatemala el consumo de energía eléctrica tiene mucho que ver con las fechas del año.

2.4.2. Factores no técnicos de riesgo de falla

En donde más diferencia existe en lo que se refiere al mantenimiento preventivo de este tipo de redes, es a la hora de analizar los factores no técnicos que pueden poner en peligro la operación de la red.

Los factores no técnicos, como se mencionó anteriormente, son el robo, vandalismo, conexiones ilegales, accidentes automovilísticos y de personas en contacto con los conductores energizados. Ahora bien, los agentes externos no

técnicos donde en realidad se aprecia la valía de las líneas ecológicas de media tensión, frente a las líneas desnudas son el arbolado y la corrosión.

Las líneas construidas con cable aislado al aire en áreas rurales, están atadas al crecimiento natural de la vegetación. Por lo tanto es muy importante que se realicen rutas de monitoreo, para procurar que la distancia entre las líneas vivas y los árboles o las ramas de los mismos sea la adecuada.

En Guatemala, las áreas rurales tienen una proporción de servicios del 96% de usuarios residenciales los cuales tienen una demanda máxima coincidente de 3kW, por lo tanto, los circuitos principales tienen una ruta estratégica para abarcar esta gran densidad de carga distribuida en mucho territorio, por lo tanto, una falla en los circuitos principales provocada por un mal monitoreo al crecimiento de los árboles, deja a miles de clientes sin energía. Analizando lo anterior, es necesario que el personal que realice esta importante actividad tome en cuenta las siguientes situaciones:

- Identificar el tipo de árbol que se encuentra cerca de las líneas, para prever el nivel de altura y crecimiento que tendrá.
- Realizar el corte definitivo de árboles cuya envergadura represente un obstáculo importante a la brecha de la línea.
- Realizar rutas mensuales de monitoreo con personal especializado que recorte las ramas que puedan tener contacto con los conductores energizados.

- En territorios de costa, es necesario revisar los puntos calientes en los herrajes de apoyo de los conductores en los postes y repararlos inmediatamente si es posible.

Si se utiliza conductor ecológico en lugar de cable desnudo, las rutinas de mantenimiento preventivo se reducen en gran parte, ya que por la misma naturaleza del conductor éste está diseñado para estar instalado en áreas con vegetación muy densa.

Sin embargo, también es necesario realizar rutas de monitoreo para prevenir fallas, las cuales deben tener las siguientes revisiones:

- Observar si existen árboles con crecimiento muy rápido en la brecha del conductor, ya que puede atentar contra las redes ya tendidas.
- En áreas costeras, revisar temperatura de empalmes y derivaciones para centros de transformación y si supera la temperatura normal de operación, repararlos inmediatamente.

Como se describió, las líneas de media tensión con cable ecológico tienen mucho mejor operación que las líneas con conductores aisladas en aire, ya que los agentes externos que atentan contra su buen desempeño son mucho menores.

Más adelante se realizará un análisis económico de inversión y se concluirá si la reducción de los costos de mantenimiento justifica la alta inversión inicial.

3. CASO REAL: EXTENSIÓN EN 10 CALLE COLONIA LOS PINOS, ZONA 7 DE MIXCO

En Guatemala, las redes de distribución en media tensión, son aéreas construidas con conductores desnudos. En algunos condominios residenciales y áreas turísticas de las principales ciudades se utilizan redes subterráneas, sin embargo, casi no existen redes construidas con cable ecológico, por lo tanto a continuación se realizará un análisis técnico para el diseño de este tipo de redes.

Inicialmente, antes de mencionar los diseños tanto mecánicos y eléctricos, se presentará un bosquejo del diseño realizado tomando en cuenta las normas de la distribuidora que energizara esta línea, después se analizaran las características de la línea.

3.1. Generalidades

En los límites del municipio de Mixco, específicamente la colonia el Encinal, donde la vegetación es bastante densa la distribución de energía eléctrica se ve muy amenazada. Se analizará entonces una mejora a las líneas de media tensión del con el objetivo de reducir en gran porcentaje tanto la interrupción del servicio debido a fallas provocadas por el arbolado, así como las rutinas de mantenimiento preventivo.

3.1.1. Características y criterios de diseño

Debido a la ubicación geográfica de la zona donde se instalarán las líneas ecológicas de media tensión, la totalidad de la obra será cubierta por la distribuidora de la región central del país. Se tomará como punto de partida la demanda máxima coincidente del área a conectar. Por lo tanto, se utilizarán datos emulados para lograr un cálculo lo más aproximado posible.

Como se mencionó en el capítulo anterior, los dos principales fines con los que este tipo de inversiones se hacen, es la seguridad de las líneas ante agentes externos como lluvia y vegetación, y la continuidad del servicio de energía eléctrica a usuarios en áreas geográficamente difíciles de alcanzar.

Se utilizarán postes tanto de madera como de concreto armado, dependiendo de la ubicación donde se instalará el mismo. El principal criterio de diseño será el alejar eléctricamente las líneas de distribución de la vegetación lo más posible, explotando al máximo las ventajas que el conductor semiaislado tiene, se reducirá el desrame casi en un 90%, ya que únicamente se necesitará cortar ramas para el tendido del conductor, también mediante el uso del cable ecológico y la correcta instalación de los postes se reducirá la contaminación visual que la red provoca.

- Instalación de postes

Los postes a utilizar en esta red, serán ubicados en áreas donde la instalación es problemática, ya que por la misma vegetación y topografía del terreno, no es posible la entrada de camiones linieros para instalarlos y la instalación será muy complicada, por ende, para estas áreas se utilizaran postes de madera.

Para sitios donde los camiones tengan paso libre se instalarán postes de concreto.

En el trayecto de la línea, el cual es de aproximadamente 1km utilizará postes de diferentes alturas las cuales son desde 35' hasta 40' realizando la selección con base en la topografía y vegetación del terreno. Se detallará más a profundidad la selección de postes en el diseño mecánico de la red posteriormente.

- Selección de ruta

La ruta ideal para instalar la red será la que logre un mejor aprovechamiento de los materiales y disminuya, al mínimo posible, la mano de obra, facilitando así el tendido de los conductores y la instalación de los postes.

En el caso especial de las líneas de distribución con cable ecológico, la ruta se selecciona de manera que el desrame para el tendido de los conductores sea mínimo. Por lo tanto, la selección de la ruta en esta línea a diseñar, será tomando en cuenta esta condición.

- Selección de conductor

El conductor eléctrico es la parte más importante de la línea de distribución en media tensión, ya que es el medio donde la energía es trasladada desde las centrales eléctricas de transformación, hasta los consumidores finales. Por lo tanto, depende en su totalidad de la magnitud de la densidad de carga. Tomando en cuenta los criterios de capacidad de conducción de corriente y caída de tensión.

Debido a que el conductor es ecológico, la capacidad de conducción de corriente en comparación con un cable desnudo se reduce, la cual debe tomarse en cuenta para el análisis final.

3.1.2. Métodos de construcción, diseño y presupuesto

El método de construcción a utilizar será el método compacto, ya que el área de tendido y de la construcción se reducirá. Los herrajes a utilizar en los postes donde se instalara la línea, así como en punto de enganche con la red de cable desnudo.

Tanto el diseño como el presupuesto de este proyecto se realizarán, analizando poste por poste, teniendo en cuenta los requerimientos que la línea necesite en cada uno de dichos postes. Según estos requisitos, tanto la altura de los postes como los herrajes a utilizar serán ubicados en cada parte de la línea.

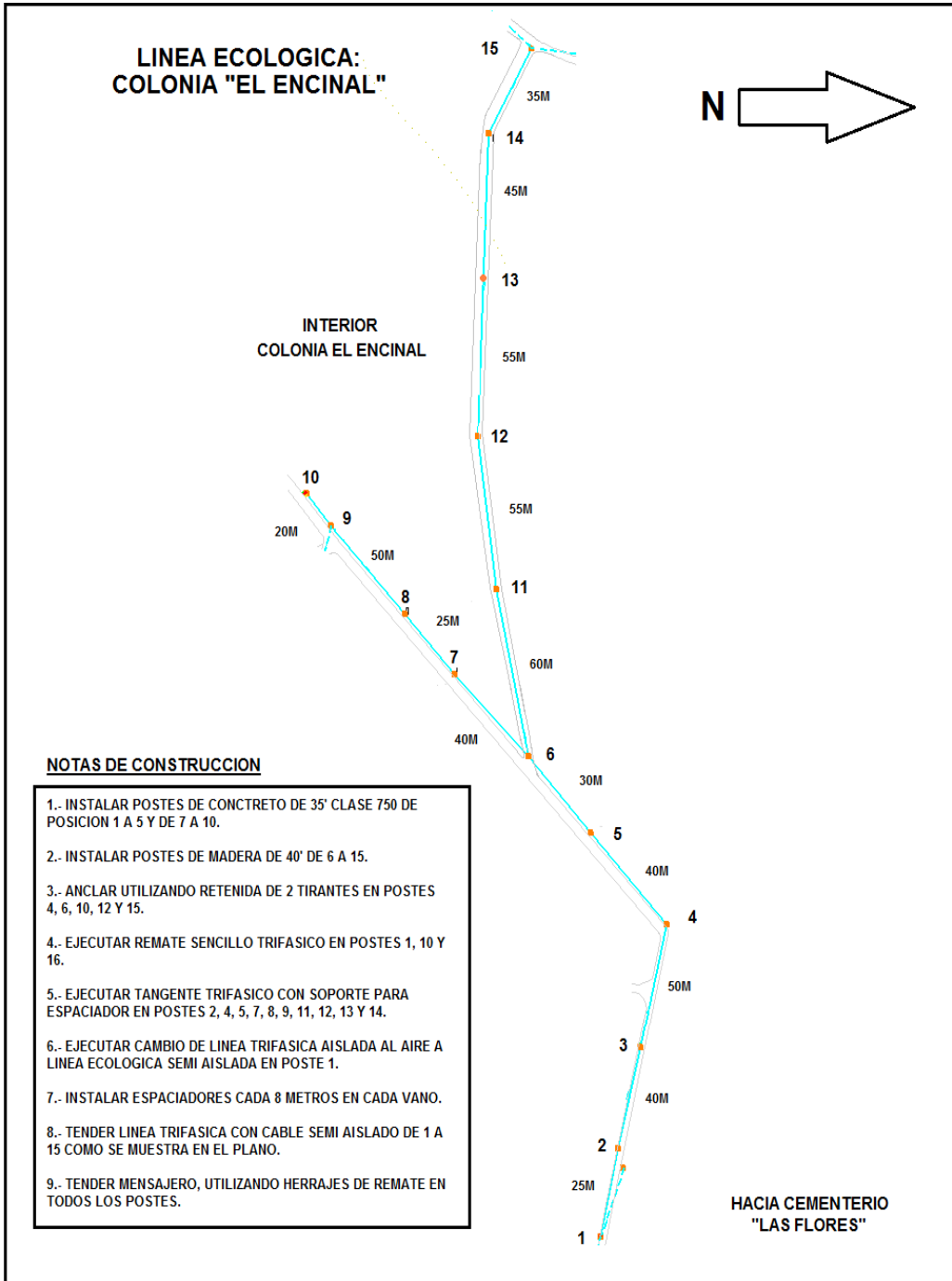
Según sea el caso, los postes serán numerados e identificados, en función de los herrajes a utilizar de la siguiente manera:

- Remate sencillo
- Tangente
- Remate doble en línea
- Remate doble en ángulo

Cada clasificación mencionada, contiene herrajes agrupados los cuales completan la unidad básica de construcción. De manera similar, la mano de obra será cuantificada tomando en cuenta el tipo de trabajo realizado. Por cada poste se incluirá dependiendo del tipo de construcción que se incluya, la mano de obra correspondiente. Las unidades básicas de mano de obra a utilizar serán las siguientes:

- Tendido de vanos menores a 100 m (vanos individuales)
- Instalación de herrajes de soporte (espaciadores)
- Instalación de herrajes de remate
- Instalación y movimiento de postes
- Horas de trabajo del personal, cuantificado por cuadrilla y camión
- Desrame parcial o tala del árbol

Figura 28. **Plano de construcción**



Fuente: elaboración propia.

3.2. Diseño mecánico

Para el diseño mecánico de la línea de distribución con cable ecológico a construir, es necesario tomar en cuenta la topografía del terreno, incluso antes de los valores obtenidos en los cálculos de flecha y catenaria. El principal objetivo del diseño mecánico será reducir lo más posible el impacto ambiental de la línea.

3.2.1. Apoyos y herrajes

En lo que se refiere a postes y herrajes para este proyecto, se utilizarán las denominaciones del apartado 3.1.2 para la cuantificación de los mismos, separando los postes por altura y por materia prima con la que fueron manufacturados, ya sea de madera o concreto. Debido a la topografía del terreno, en ciertas partes de la línea se utilizaran postes de madera para facilitar tanto el transporte al lugar de la instalación como la construcción, debido a que su peso es considerablemente menor al poste de concreto, mientras que su solidez y vida útil son aceptables. Por norma de la empresa distribuidora de energía del departamento de Guatemala, el conductor con el que se escogerán los herrajes y apoyos será el 1/0 AAAC ecológico.

Según sea el ángulo de deflexión de la línea, así será el tipo de construcción que se utilizará, dependiendo de esto último, se escogerán los herrajes para la correcta instalación de la línea. Como se observa en el plano del apartado 3.1.2.2. Se instalarán 15 postes, 6 de madera de 40' y 9 de concreto de 35' los cuales serán ubicados estratégicamente para evitar tanto hondonadas como drenajes. Para evitar lo más posible el roce con los árboles se escogerá la altura y el tipo de construcción que cada estructura tendrá.

A continuación se analizará una tabla con los herrajes que se utilizarán para la ejecución de este proyecto, incluyendo los conductores tanto de líneas vivas, mensajero y neutral, los costos indicados en dicha tabla se encuentran en precios en dólares de los Estados Unidos de América, y se utiliza un tipo de cambio de Q. 7,81 por 1\$.

Es necesario tomar en cuenta los precios de los herrajes, los cuales dependen tanto de la tienda importadora de herrajes de construcción eléctrica y conductores. Se analizarán también los costos de mano de obra brindados por una empresa contratista por la distribuidora de la región central de Guatemala, la cual ejecutará la extensión, facturando los precios de utilización de equipo como camión liniero de construcción de doble canasta, disponibilidad del personal especializado y su equipo de protección.

Tabla VII. **Cuantificación de materiales para extensión de línea con cable ecológico**

Descripción	Precio		
	Cant.	\$	Q.
Abrazadera doble 6" a 8"	30	215,70	1 684,80
Adaptador sencillo P/Tirante	10	168,79	1 318,40
Aislador porcelana t/pin p/13.2 kV	23	91,11	711,62
Aislador sintético de remate P/ 15 kV	37	329,84	2 576,31
Alambre alum #4 AWG Forrado P/Amarrad	250	406,49	3 175,00
Arandela cuadrada 11/16" galv.	110	38,02	297
Argolla s/rosca 5/8"	28	88,08	687,96
Brace 28" de hierro galvanizada.	8	23,77	185,68
Brace 7' galvanizada. P/Bandera	2	58,64	458,04
Brazo antibalanceo para red compacta	10	169,39	1 323,10
Cable acero galv 5/16"	1 000	550,52	4 300,00
Cable aluminio 1/0 AAAC semi protegido 15 kV	2 000	6 409,08	50 060,00
Cinta autosold. silicón resistente al arco eléctrico	8	117,96	921,36
Conector compres. de 1/0 a 1/0 AWG	15	8,08	63,15

Continuación tabla VII.

Crucero madera de 96"	6	84,97	663,66
Empalme Al. comp 1/0 ACSR 100%	6	41,72	325,86
Espaciador de polímero para red compacta 15 kV	50	714,91	5 584,00
Estribo P/brazo T/ "L" Red Compacta	10	98,42	768,7
Estribo univ. p/cable 1/0 AWG	16	138,93	1 085,12
Gancho pasador 5/8"	29	131,77	1 029,21
Grapa de hierro para suspensión	1	21,17	165,34
Grapa remate alum 1/0-123.3	18	98,77	771,48
Grapa univ. rosca cable 1/0	16	104,96	819,84
Guarda cabo 2 1/4"P/Rem.PrefCab1/0Proteg	38	695,22	5 430,20
Montura de acero para conexión en ángulo	5	486	3 796,05
Poste concreto 10.60 m (35') C750	9	1 863,72	14 556,78
Poste de madera de 12.20 m (40')	5	1 043,08	8 147,30
Poste de madera de 45'	1	272,63	2 129,46
Remate pref. 1/0 AAC semiaislado	38	587,6	4 589,64
Remate pref. tirante 5/16"	15	26,83	209,55
Soporte brazo tipo L para red compacta	10	448,43	3 502,60
Soporte recto 5/8" Cruc. hierro	3	10,93	85,41
Soporte recto 5/8" crucero madera	20	82,89	647,4
Tornillo carruaje 1/2" x 6"	2	1,97	15,38
Tornillo carruaje 3/8" x 5"	8	3,62	28,24
Tornillo máquina 1/2" x 9"	2	2,29	17,92
Tornillo máquina 5/8" x 10"	40	47,37	370
Tornillo máquina 5/8"x18"	7	13,33	104,09
Tornillo R/corrida 5/8"x18"	2	5,21	40,72
TOTAL		15 702,21	122 646,37

Fuente: EEGSA, plantilla de presupuesto para proyectos de extensión de red, precios vigentes 2011.

Los herrajes expuestos en la tabla VII deben ser de primera calidad y de lote nuevo. Debido a que la línea es trifásica, no se utilizarán espaciadores monofásicos. La tabla anterior fue realizada con unidades de construcción con herrajes desglosados.

3.2.2. Distancias de seguridad

La distancia de seguridad será la altura del poste, separando los conductores vivos del suelo, ya sea de 35' hasta 40', reduciendo de esa manera importantes riesgos ante cualquier falla debida a descargas en personas o vehículos. Debido a que el conductor semiaislado no protege el contacto directo de personas, es vital alejarlo del contacto con personas o edificaciones tomando un criterio parecido a los conductores desnudos.

El espaciador tiene una distancia promedio entre fases de 18cm. Es evidente que el área transversal de la línea es mucho menor al área abarcada por conductores desnudos la cual está normada en 30 cm.

3.3. Diseño eléctrico

El diseño eléctrico comprende el cálculo de todos los parámetros eléctricos de la extensión de línea, tales como la corriente que circulará por los conductores, la potencia eléctrica que será transportada así como las perdidas por efecto *Joule* en los conductores.

3.3.1. Análisis de carga

Se tomará como principal dato de cálculo la demanda máxima coincidente del área que la línea alimentará, tanto los servicios conectados directamente sobre postes de la extensión, como de la densidad de carga que el circuito alimentará en todo el recorrido del circuito.

Según mediciones realizadas por la empresa distribuidora de la región central de Guatemala, en la región metropolitana. Para fines de diseño, la

demanda máxima coincidente del área a alimentar será de 4,5 MVA. Por lo tanto, a partir de este dato será calculado el valor de la corriente del alimentador en media tensión, utilizando un voltaje de línea a línea de 13,8 kV y utilizando un factor de potencia de diseño de 0,88.

- Cálculos generales

A continuación se realizarán los cálculos necesarios para dimensionar de manera correcta la línea de distribución, utilizando los datos de la tabla IV del capítulo 1 como datos del problema. Se presentarán los datos finales en una tabla de cálculo para la escogencia del conductor.

- Corriente de alimentador

Aplicando la fórmula:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}V}$$

Teniendo:

$$S = 4,5 \text{ MVA}$$

$$V = 13,8 \text{ kV}$$

Por lo tanto, la corriente por fase será:

$$I = 188,49 \text{ amperios}$$

- Caída de tensión

El análisis de la caída de tensión es muy importante para calcular los conductores de fase y neutro de una línea de alimentación trifásica, ya que la calidad de energía se ve afectada directamente por este fenómeno. Para fines de diseño, se utilizará una caída de tensión máxima de 3% a plena carga.

Utilizando los conductores de la tabla IV del capítulo 1, y aplicando la corriente de alimentador calculada en el apartado anterior se calculara el porcentaje de pérdidas de tensión.

Para fines ilustrativos, se realizara el cálculo para el conductor de calibre 1/0. Inicialmente se modelarán las pérdidas de la línea a calcular tomando los datos tanto de reactancia y de resistencia del conductor como punto de partida.

Los datos son los siguientes:

Resistencia óhmica por kilómetro a 20°C = 0,663 Ω /km

Distancia entre conductores de fase = 18 cm

Radio de conductor = 8,25 mm

Distancia de la línea = 3km

Factor de potencia = 0,88 = 28,34°

Los cálculos se realizarán tomando en cuenta la longitud completa del ramal, sin embargo, el conductor ecológico solamente se instalará a lo largo de 570m del total de la línea.

Calculando:

$$\text{Resistencia total de la línea} = (3\text{m})(0,663 \Omega/\text{km}) = 1,99 \Omega$$

$$\text{Distancia media geométrica} = \sqrt[3]{(18\text{cm})(18\text{cm})(18\text{cm})} = 18 \text{ cm}$$

$$\text{Reactancia de la línea} = X = 0,1736 \log (0,18/0,00825) = 0,23\Omega/\text{km}$$

$$\text{Reactancia total de la línea} = (3\text{km}) (0,23 \Omega /\text{km}) = 0,69 \Omega$$

$$\text{Corriente de alimentador} = 188,49 \text{ A}$$

$$\Delta V = I(R\cos\theta + X\text{sen}\theta)$$

$$\Delta V = (188,49\text{A})(1,99\text{Cos}(28,34^\circ) + 0,69\text{Sen}(28,34^\circ)) = 387,63 \text{ V}$$

$$\text{Porcentaje de regulación} = 100(V_i - V_f)/V_f = 100(13.800 - 387,63)/13.800$$

$$= 97,19\%$$

$$\text{Porcentaje de caída de tensión} = 100 - 97,19 = 2,81\%$$

Tabla VIII. **Cálculos generales**

Calibre AWG	Sección transversal (mm ²)	Demanda en MVA	Reactancia (Ohm/km)	Resistencia total de la línea (Ohm)	Reactancia total de la línea (Ohm)	Corriente de Alimentador (A)	Caída de tensión (V)	% de Regulación	% de Regulación
5	16	4,5	0,25	6,27	0,76	188,49	1 108,11	91,97	8,03
3	25	4,5	0,25	3,93	0,74	188,49	717,80	94,80	5,20
2	35	4,5	0,24	2,86	0,72	188,49	538,10	96,10	3,90
1/0	50	4,5	0,23	1,96	0,69	188,49	387,63	97,19	2,81
2/0	70	4,5	0,23	1,45	0,68	188,49	301,28	97,82	2,18
3/0	95	4,5	0,22	1,06	0,65	188,49	233,69	98,31	1,69
250 kcmil	120	4,5	0,21	0,75	0,63	188,49	180,04	98,70	1,30
350 kcmil	150	4,5	0,21	0,68	0,62	188,49	168,48	98,78	1,22
400 kcmil	185	4,5	0,20	0,54	0,60	188,49	144,07	98,96	1,04
500 kcmil	240	4,5	0,19	0,43	0,58	188,49	122,81	99,11	0,89

Fuente: elaboración propia.

- Análisis de resultados

Los cálculos obtenidos para el conductor ecológico 1/0, se obtuvo un porcentaje de caída de tensión del 2,81% el cual está por debajo del 3% máximo según la NTDOID. Es por esto que es el conductor normado para extensiones de línea trifásica en 13,8 kV menores a 10 km en áreas rurales. Analizando en primer lugar el criterio de corriente de alimentador crítica, a plena carga de 188,49 amperios, el conductor idóneo sería según la tabla IV del capítulo 1, el conductor 1/0 ya que con una velocidad de viento de 0,6 m/s (2,16 km/h) es de 194 amperios. Lo cual da un porcentaje de reserva para sobrecarga de:

$$\% \text{ reserva} = 100 * (194 - 188,49) / 194 = 2,84\%$$

La tabla IX expresa el porcentaje de reserva de cada conductor, en función de su capacidad de conducción de corriente de fábrica en comparación con la corriente de alimentador de la línea a construir.

Tabla IX. **Porcentaje de reserva para sobrecarga**

Calibre AWG	Ampacidad V = 0.6 m/s	Corriente de alimentador (amperios)	% de reserva para sobrecarga
5	97	188,49	-94,32
3	128	188,49	-47,26
2	154	188,49	-22,40
1/0	194	188,49	2,84
2/0	232	188,49	18,75
3/0	282	188,49	33,16
250 kcmil	348	188,49	45,84
350 kcmil	369	188,49	48,92
400 kcmil	423	188,49	55,44
500 kcmil	492	188,49	61,69

Fuente: elaboración propia.

Según el criterio de corriente de alimentador crítica el conductor idóneo a instalar en la línea debido a su capacidad de conducción de corriente sería el conductor 1/0, ya que muestra un porcentaje de reserva para sobrecarga de 2,84%.

3.3.2. Conductores

El criterio de máxima caída de tensión admisible el cual según Normas Técnicas de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) el porcentaje máximo de caída de tensión de 3% para circuitos alimentadores. Por lo tanto, según la tabla VI del capítulo 2, el conductor 1/0 tiene un porcentaje de caída de tensión de 2,84% el cual cumple con la norma arriba indicada.

Para el tipo de red que se diseñó en los apartados anteriores, se concluyó que el conductor calibre 1/0 es el conductor que cumple a cabalidad con los parámetros de diseño de la línea, los herrajes y apoyos se dimensionaran con base en las características constructivas de este conductor.

3.4. Diseño utilizando cable AAAC ecológico

Con el objetivo de realizar el análisis comparativo entre ambas maneras de construcción de líneas de distribución en media tensión, se realizará el presupuesto tanto de materiales como de mano de obra para la misma red de distribución, que se analizó en el apartado anterior. Se utilizarán los cálculos realizados en el apartado anterior para la escogencia del conductor.

3.4.1. Criterios y requerimientos de diseño

En una red de distribución utilizando conductores desnudos, de manera convencional se buscan ciertas características mínimas de diseño que tanto el tipo de terreno como la brecha que la línea ocupe deben de cumplir, los cuales como se describió anteriormente, tienen que ver con la ubicación de los postes y la selección de ruta. Ambas situaciones tienen como principal objetivo alejar las líneas energizadas en media tensión de personas, edificaciones y árboles.

Siendo la última de éstas la más complicada, ya que el crecimiento natural de los árboles depende tanto del área donde son sembrados, como a la especie que pertenezca. De manera que es necesario acondicionar el área donde se instalarán las líneas evitando precisamente algún roce con los conductores. Comparativamente con las líneas de conductores semiprotegidos, el diseño y presupuesto es muy parecido, en lo que se refiere a la selección de rutas, las líneas aéreas con conductores desnudos requieren de una brecha de mínimo 8 metros de espacio a cada lado del poste idealmente, de manera que se evite el acercamiento a las líneas energizadas, en primer lugar para evitar tragedias humanas o animales, o bien la interrupción súbita del servicio por algún corto circuito a tierra por el contacto con edificaciones o árboles.

3.4.2. Apoyos y herrajes

Los apoyos para este tipo de líneas, es exactamente igual que los que se utilizan en instalaciones de distribución con conductores ecológicos; sin embargo los herrajes que se utilizan son muy diferentes.

Los costos indicados en la tabla X se encuentran en precios en dólares de los Estados Unidos de América, y se utiliza un tipo de cambio de Q. 7,81 por 1\$.

Tabla X. **Herrajes agrupados para línea aislada al aire**

Descripción	Cant.	Precio	
		\$	Q.
Poste madera 12.20m (40') CI-4	5	1 043,08	8 147,30
Poste de madera de 13.70 m (45') clase 3	1	272,63	2 129,46
Poste conc. 10.60 m (35') C750	9	1 863,68	14 556,78
Cortacircuitos 100 amp. p/15 kV	3	146,88	1 147,23
Estribo univ. p/cable 1/0 AWG	3	26,05	203,46
Cadenas de remate de 2 a 1/0	24	566,91	4 428,00
Soportes rectos para crucero de madera	38	337,78	2 638,34
Crucero sencillo de 96" para poste de madera	4	93,17	727,72
Crucero doble de 96" para poste de madera	3	161,21	1 259,19
Crucero sencillo de 96" para poste de concreto	6	161,91	1 264,62
Crucero doble de 96" para poste de concreto	4	235,66	1 840,68
Anclas de 2 ojos	6	342,80	2 677,56
Herraje de tangente para neutral	10	87,88	686,40
Herraje de remate sencillo para neutral	8	93,85	733,04
Cable alum. #1/0 ACSR	1 730	1 218,19	9 515,00
Cable alum 3#1/0 t/forr.	570	1 726,61	13 486,20
Conector compres. de 1/0 a 1/0 AWG	6	3,23	25,26
Cubierta plástica C-7	6	4,00	31,26
Fusible tipo "T" 25 amp. P / 15 kV	3	4,68	36,57
TOTAL		8 390,20	65534,07

Fuente: EEGSA, Plantilla de presupuesto para proyectos de extensión de red.

En la tabla X se puede apreciar los herrajes de una línea equivalente a la del apartado anterior, construida con la tecnología convencional de conductores aislados al aire. Siendo la principal diferencia el conductor *ACSR* (Conductor de aluminio con alma de acero, por sus siglas en inglés).

3.4.3. Conductores y capacidad

El conductor escogido para esta línea de distribución será el calibre 1/0, ya que cumple a cabalidad tanto con la ampacidad necesaria para la correcta operación de la línea, como de la resistencia ideal para que la caída de tensión no sobrepase los límites permitidos en las normas.

3.4.4. Riesgos de operación

En comparación con las líneas aéreas ecológicas, se pueden mencionar los siguientes riesgos de operación los cuales atentan contra la continuidad del servicio de energía eléctrica. Tanto su instalación como mantenimiento dependen de factores externos como lluvia, humedad, temperatura ambiente y corrosión bajando considerablemente la vida útil.

- **Riesgos técnicos**

Técnicamente los riesgos que afectan a este tipo de líneas de distribución, recaen en la posibilidad de fallas por maniobra que puedan suceder. Las maniobras que ponen en peligro la continuidad del servicio eléctrico son las siguientes:

- Traslado de cargas
- Conexión en paralelo de circuitos principales y ramales

La sobrecarga de circuitos y ramales de distribución puede afectar de manera latente la continuidad del servicio. Otros fenómenos que afectan técnicamente a las líneas son los siguientes:

- Mala coordinación de protecciones
- No respetar las libranzas eléctricas entre conductores
- Mala regulación
- Mala conexión a tierra de neutral
- Falsos contactos

Estos riesgos técnicos afectan a ambas tecnologías de distribución de manera similar, algunos pueden afectar de manera más abrupta que otros a la desenergización de las líneas. Mecánicamente, también existen riesgos importantes para la operación de la instalación de distribución:

- Tensión de tendido en los cables mal calculada
 - Mala instalación de los postes y anclajes
 - Ángulo de inclinación demasiado pronunciado entre dos vanos
- Riesgos no técnicos

En lo que se refiere a agentes externos a situaciones tanto eléctricas como mecánicas de las líneas, es donde en realidad la importancia y valía que las líneas con cable ecológico representan.

Empezando con el agente externo más importante que hay que evitar, el factor humano, en países como Guatemala donde la ignorancia hacia estos temas es muy generalizada, es vital que el diseño eléctrico y mecánico vayan hacia la misma meta, la cual es evitar a toda costa que las instalaciones de este tipo atenten contra la vida humana. Por lo tanto, la altura de los postes a utilizar son cuidadosamente escogidas a partir de este requerimiento.

El medio ambiente en general afecta de manera directa a las líneas, como se expresó en la introducción de este apartado son las siguientes:

- Corrosión
- Humedad
- Lluvia
- Derrumbes
- Altas temperaturas
- Vegetación

La vida útil de la red de distribución está en función de la magnitud del daño que los anteriores fenómenos hagan a los cables de distribución. El factor humano, afecta de manera mucho más peligrosa el correcto funcionamiento de la instalación, ya que las líneas aéreas, tanto con conductores ecológicos como aislados al aire, están expuestos a este fenómeno. Las principales situaciones que pueden sacar de línea un circuito completo de distribución o bien un ramal, son las siguientes:

- Accidentes automovilísticos
- Sabotaje
- Robo de herrajes y conductores neutros
- Accidentes
- Construcciones demasiado cercanas a las líneas

3.5. Costos de mano de obra

A continuación se analizara una tabla con los costos de mano de obra por la instalación de todos los componentes de la línea, de igual manera que los materiales en la tabla V del capítulo 2, los precios son vigentes 2011 están

indicados en dólares de los Estados Unidos de América, y se utiliza un tipo de cambio de Q. 7,81 por 1\$.

Tabla XI. **Cuantificación de unidades de mano de obra línea ecológica**

Trabajos en media tensión TRABAJOS EN CONDUCTORES AÉREOS	Precios				
		Frío	Caliente	Totales	
Desconexión y conexión de servicio	Unidad	Q. 121,06	X	2	Q. 242,12
Trabajos en alumbrado público					
Inst. de luminaria completa	Unidad	Q. 226,20	X	1	Q. 226,20
Trabajos en media tensión					
Trabajos en postes					
Cambio de poste de 35' a 40'	Unidad	X	Q. 1 706,58	2	Q. 3 413,16
TRABAJOS EN CONDUCTORES AÉREOS					
Tendido de conductor ecológico	Vano	Q. 986,17	X	48	Q. 47 336,16
Trabajos en herrajes					
Instalación de espaciadores trifásicos	Unidad	Q. 356,87	X	39	Q. 13 917,93
Trabajos en tirantes					
Empalmes a tierra de mensajero	Unidad	Q. 266,78	X	6	Q. 1 600,68
Trabajos en cruceros y soportes					
Instalación de crucero doble	Unidad	Q. 1 248,79	X	6	Q. 7 492,74
Instalación de soporte para espaciador en poste	Unidad	Q. 816,93	X	13	Q. 10 620,09
Trabajos en puentes y conexiones					
Cambio de estribo universal y/o grapa universal	Unidad	Q. 239,67	X	1	Q. 239,67
Cambio de puentes en empalme aéreo	Unidad	Q. 419,56	X	3	Q. 1 258,68
Trabajos en equipos					
Instalación de cortacircuitos	Unidad	X	Q. 854,70	3	Q. 2 564,10
Trabajos de operación (apertura y cierre)					
Cuchillas, cortacircuitos y fusibles	Juego	X	Q. 449,03	1	Q. 449,03
				Valor total de la obra	
				Q. 89 360,56	

Fuente: EEGSA, Plantilla de presupuesto para proyectos de extensión de red.

En resumen, los costos totales del proyecto son los siguientes (ver tabla XXII):

Tabla XII. **Precio total de extensión de línea ecológica**

Concepto	Precio	
	\$	Q.
Costo de Herrajes	15 702,21	122 646,37
Costo de Mano de Obra	11 440,68	89 360,56
TOTAL	27 142,89	212 006,93

Fuente: elaboración propia.

3.6. Materiales y mano de obra con conductor *ACSR* desnudo

La cuantificación de red con conductores y herrajes para cable desnudo, 1/0 *ACSR* se describe en la tabla XIII, los precios se encuentran vigentes para el año 2011 y se utilizan precios en dólares a un tipo de cambio de Q. 7,81 por 1\$:

Tabla XIII. **Cuantificación de unidades de mano de obra línea *ACSR***

INSTALACIÓN DE POSTES			
Pino tratado de 12,20 m hasta 13,72 m	1	6	5 443,20
Concreto hasta 10,6 m, clase 750	1	9	8 416,80
TRASLADO DE POSTES			
10 a 15 postes hasta 13,72 m	1	15	3612,00
COMPONENTES DE APOYO			
HERRAJES NEUTROS Y LÍNEA DE GUARDA			
Tangente	1	10	235,20
Remate sencillo	1	9	211,68
2 ó 3 FASES CENTRADO			
Tangente	1	10	2128,00
Remate sencillo	1	4	1 684,48
Remate doble en línea ó ángulo	1	2	1 568,00
COMPONENTES LÍNEAS PRIMARIAS Y SECUNDARIAS			
SUBTERRÁNEAS			
TENDIDO DE CABLES			
1/0 <i>ACSR</i>	1	42	12 653,76
1/0 Aislado.	1	14	6 287,68
Cortacircuitos y fusibles 2F y 3F, hasta 200 Amp. (incluye conexiones)	1	1	390,87
DERIVACIONES			
2 ó 3 fases con protección hasta 336	2	1	993,44
Total			38 952,00
Total con IVA			43 625,11

Fuente: EEGSA, Plantilla de presupuesto para proyectos de extensión de red.

La obra completa utilizando desnudo 1/0 ACSR se describe en la tabla XIV, los precios se encuentran vigentes para el año 2011 y se utilizan precios en dólares a un tipo de cambio de Q. 7,81 por 1\$:

Tabla XIV. Total de inversión línea desnuda

Concepto	Precio	
	\$	Q.
Costo de herrajes	8 390,20	65 534,07
Costo de mano de obra	5 585,24	43 625,11
TOTAL	13 975,44	109 159,20

Fuente: EEGSA, Plantilla de presupuesto para proyectos de extensión de red.

4. ANÁLISIS ECONÓMICO

Se realizará un análisis de la inversión para la construcción de esta línea de distribución con cable ecológico, separando los costos técnicos y no técnicos de la construcción y operación de la instalación. Utilizando métodos financieros de análisis del valor del dinero respecto al tiempo y se concluirá si la inversión es económicamente conveniente. Los beneficios y rentas debidas a este proyecto serán los mismos, exactamente para cualquier tipo de línea, dejando por un lado los disparos por roce con los árboles.

Desde el punto de vista del usuario, se analizarán las interrupciones de energía en función de tiempos e incidencia, tomando como principal referencia las aperturas debidas a roce con árboles en cierta área de la red de distribución en el área rural de la región central del país.

Por otro lado, en la situación de la compañía distribuidora se analizarán las interrupciones en función de las pérdidas por energía no suministrada, así como el gasto en el mantenimiento de arbolado y reparaciones inesperadas. Las ganancias del proyecto se tomarán como la ausencia de pérdidas por fallas a tierra o entre fases provocadas por el roce con las ramas.

Es necesario tomar en cuenta las tendencias de consumo y demanda de este nuevo circuito a construir, tomando como principal referencia las mediciones realizadas por el Administrador del Mercado Mayorista (AMM). Según estas mediciones, la curva de demanda del país es la siguiente:

Figura 29. **Demanda diaria según AMM**



Fuente: http://www.amm.org.gt/pdfs/2010/despacho/ene/PDD20100104_01.html.

Consulta: 10/10/2011

Según la figura 29, se tienen dos picos de consumo durante el día aproximadamente a partir de las 6:00 y 19:00 horas del día. La variable dependiente de la figura 29, representa el factor de demanda a lo largo del día. Tomando como punto de partida los datos anteriores, se realiza la figura 30, tomando la demanda de diseño de 4,5 MVA de la línea a construir:

Figura30. Demanda diaria calculada



Fuente: http://www.amm.org.gt/pdfs/2010/despacho/ene/PDD20100104_01.html.

Consulta: 10/10/2011

La operación de la línea representa costos técnicos que se miden en la energía no suministrada debido a las pérdidas de potencia que las líneas representen por la caída de tensión, por lo tanto, las pérdidas monetarias debidas a este fenómeno se calcularán en función del calibre que se obtuvo en el apartado anterior. Utilizando el conductor AAAC ecológico 1/0, el porcentaje de caída de tensión a plena carga es el 2,47% el cual representa una caída de tensión de 341,01V. El siguiente cálculo se realiza de la misma manera para las líneas construidas con conductor desnudo.

Utilizando el pliego tarifario publicado en la página web de la CNEE para los meses de mayo-junio del año 2011, el costo por kWh de la empresa distribuidora de energía eléctrica en la región central es de 1,574187 Q/kWh. Es necesario analizar las pérdidas de potencia que están ligadas a la operación de

la línea de distribución, ambas debidas tanto a la caída de tensión y a las pérdidas en los transformadores de distribución, las perdidas por roce con árboles serán analizadas posteriormente.

Los cuales representan los costos técnicos más importantes, la tabla XV contiene los datos de demanda y pérdidas pronosticados para este circuito, tomando como principal referencia las mediciones de la DRC del país:

Tabla XV. **Análisis de pérdidas**

Hora	Demanda		Factor de demanda	Perdidas por caída de tensión	Perdidas en transformadores de distribución	Pérdidas totales	Pérdidas de energía	Pérdidas monetarias
	MVA	kW	Factor de demanda	kW	kW	kW	kWh	Q.
00:00	1,80	1 584	0,40	64,37	0,02	64,39	64,39	101,36
01:00	1,60	1 408	0,36	64,37	0,01	64,38	64,38	101,35
02:00	1,51	1 329	0,34	64,37	0,01	64,38	64,38	101,35
03:00	1,50	1 320	0,33	64,37	0,01	64,38	64,38	101,35
04:00	1,60	1 408	0,36	64,37	0,01	64,38	64,38	101,35
05:00	1,80	1 584	0,40	64,37	0,02	64,39	64,39	101,36
06:00	2,50	2 200	0,56	64,37	0,02	64,39	64,39	101,37
07:00	3,00	2 640	0,67	64,37	0,03	64,40	64,40	101,37
08:00	2,90	2 552	0,64	64,37	0,03	64,40	64,40	101,37
09:00	2,80	2 464	0,62	64,37	0,02	64,39	64,39	101,37
10:00	2,75	2 420	0,61	64,37	0,02	64,39	64,39	101,37
11:00	2,40	2 112	0,53	64,37	0,02	64,39	64,39	101,36
12:00	2,60	2 288	0,58	64,37	0,02	64,39	64,39	101,37
13:00	2,50	2 200	0,56	64,37	0,02	64,39	64,39	101,37
14:00	2,60	2 288	0,58	64,37	0,02	64,39	64,39	101,37
15:00	2,70	2 376	0,60	64,37	0,02	64,39	64,39	101,37
16:00	2,75	2 420	0,61	64,37	0,02	64,39	64,39	101,37
17:00	2,85	2 508	0,63	64,37	0,03	64,40	64,40	101,37
18:00	3,10	2 728	0,69	64,37	0,03	64,40	64,40	101,37
19:00	3,75	3 300	0,83	64,37	0,03	64,40	64,40	101,38
20:00	3,49	3 071	0,78	64,37	0,03	64,40	64,40	101,38
21:00	3,00	2 640	0,67	64,37	0,03	64,40	64,40	101,37
22:00	2,60	2 288	0,58	64,37	0,02	64,39	64,39	101,37
23:00	2,40	2 112	0,53	64,37	0,02	64,39	64,39	101,36
Totales							1 545,41	2 432,77

Fuente: elaboración propia.

Las pérdidas monetarias totales diarias por caída de tensión en la línea de distribución son Q. 58 386,51 en total. Según el pliego tarifario publicado por la

CNEE en el mes de mayo de 2011, el Valor Agregado de Distribución (VAD) para usuarios con la tarifa social es del 14,94% de la factura mensual y para usuarios de la tarifa no social es del 12,47% de la factura mensual. Por lo tanto haciendo un aproximado de que en la línea a construir con cable ecológico los cálculos monetarios se harán utilizando un 70% de los usuarios en el ramo de tarifa no social y el restante 30% en tarifa social.

Tomando como referencia las características anteriores, las pérdidas monetarias diarias, serán como se muestra en la tabla XVI:

Tabla XVI. **Pérdidas monetarias para la distribuidora**

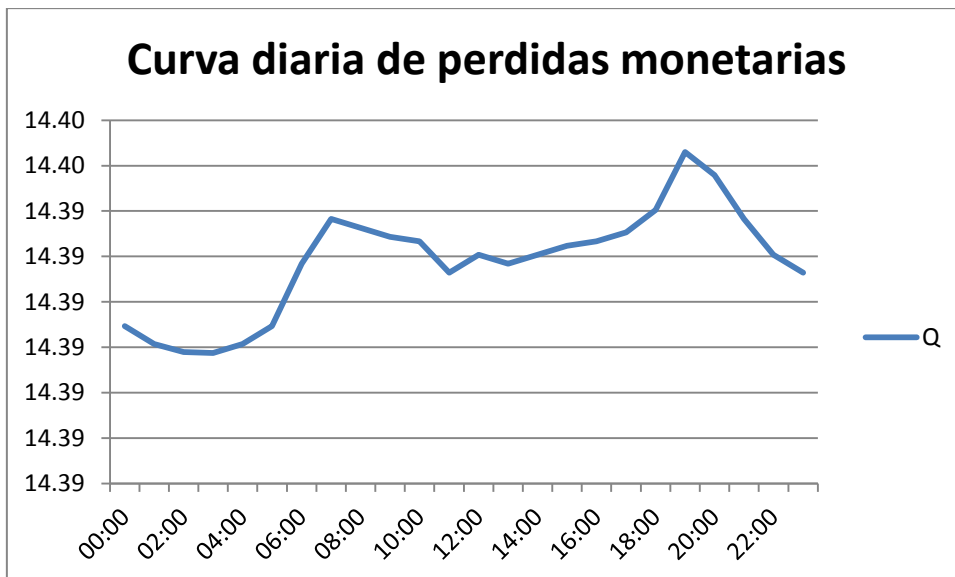
Hora	Demanda		Pérdidas monetarias	Pérdidas monetarias VAD
	MVA	kW	Q.	Q.
00:00	1,80	1 584	101,36	14,39
01:00	1,60	1 408	101,35	14,39
02:00	1,51	1 329	101,35	14,39
03:00	1,50	1 320	101,35	14,39
04:00	1,60	1 408	101,35	14,39
05:00	1,80	1 584	101,36	14,39
06:00	2,50	2 200	101,37	14,39
07:00	3,00	2 640	101,37	14,39
08:00	2,90	2 552	101,37	14,39
09:00	2,80	2 464	101,37	14,39
10:00	2,75	2 420	101,37	14,39
11:00	2,40	2 112	101,36	14,39
12:00	2,60	2 288	101,37	14,39
13:00	2,50	2 200	101,37	14,39
14:00	2,60	2 288	101,37	14,39
15:00	2,70	2 376	101,37	14,39
16:00	2,75	2 420	101,37	14,39
17:00	2,85	2 508	101,37	14,39
18:00	3,10	2 728	101,37	14,39
19:00	3,75	3 300	101,38	14,40
20:00	3,49	3 071	101,38	14,39
21:00	3,00	2 640	101,37	14,39
22:00	2,60	2 288	101,37	14,39
23:00	2,40	2 112	101,36	14,39
Totales			2 432,77	345,43

Fuente: elaboración propia.

El dato total de pérdidas económicas diarias por caída de tensión y transformadores de distribución para la compañía distribuidora es de Q.345,43 diarios el resto corresponde a los rubros de generación de energía y transporte.

La figura 31, muestra la tendencia de perdidas diaria:

Figura 31. **Curva diaria de pérdidas monetarias**



Fuente: elaboración propia.

Los ingresos que la línea de distribución representará, partiendo de los datos obtenidos en las tablas XV y XVI, suponiendo que la línea está a plena carga, serán los siguientes (ver tabla XVII).

Tabla XVII. Análisis de ingresos

Hora	Potencia entregada total	Energía diaria	Renta diaria	Perdidas VAD	Total de ingreso aproximado 70% TS 30% TnS	Utilidades totales
	kW	kwh	Q/kWh	Q.	Q.	Q.
00:00	1 519,61	1 519,61	2 398,18	14,39	316,82	302,43
01:00	1 343,62	1 343,62	2 120,43	14,39	280,13	265,74
02:00	1 264,42	1 264,42	1 995,44	14,39	263,62	249,23
03:00	1 255,62	1 255,62	1 981,55	14,39	261,78	247,39
04:00	1 343,62	1 343,62	2 120,43	14,39	280,13	265,74
05:00	1 519,61	1 519,61	2 398,18	14,39	316,82	302,43
06:00	2 135,61	2 135,61	3 370,31	14,39	445,25	430,86
07:00	2 575,60	2 575,60	4 064,69	14,39	536,99	522,59
08:00	2 487,60	2 487,60	3 925,81	14,39	518,64	504,25
09:00	2 399,61	2 399,61	3 786,93	14,39	500,29	485,90
10:00	2 355,61	2 355,61	3 717,50	14,39	491,12	476,73
11:00	2 047,61	2 047,61	3 231,43	14,39	426,90	412,51
12:00	2 223,61	2 223,61	3 509,18	14,39	463,60	449,21
13:00	2 135,61	2 135,61	3 370,31	14,39	445,25	430,86
14:00	2 223,61	2 223,61	3 509,18	14,39	463,60	449,21
15:00	2 311,61	2 311,61	3 648,06	14,39	481,95	467,55
16:00	2 355,61	2 355,61	3 717,50	14,39	491,12	476,73
17:00	2 443,60	2 443,60	3 856,37	14,39	509,47	495,07
18:00	2 663,60	2 663,60	4 203,56	14,39	555,33	540,94
19:00	3 235,60	3 235,60	5 106,25	14,40	674,59	660,19
20:00	3 006,80	3 006,80	4 745,18	14,39	626,89	612,49
21:00	2 575,60	2 575,60	4 064,69	14,39	536,99	522,59
22:00	2 223,61	2 223,61	3 509,18	14,39	463,60	449,21
23:00	2 047,61	2 047,61	3 231,43	14,39	426,90	412,51
Diario	51 694,59			345,43	10 777,77	10 432,34
Mensual				10 362,88		312 970,12

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla XVII, la utilidad mensual de la línea será de Q. 312 970,12 más adelante se le aplicaran a este valor los datos de costos no técnicos y un factor de crecimiento anual de la demanda, para lograr un análisis de inversión completo.

4.1. Extensiones usando cable ecológico

Luego de haber analizado el costo por pérdidas del circuito de distribución, a continuación se procede a analizar la utilización del cable ecológico:

4.1.1. Costos técnicos

Los costos de inversión de la línea de distribución con cable ecológico radican en el monto invertido para su diseño y construcción, los cuales ya fueron expuestos en el capítulo anterior, la tendencia se mantiene de manera similar con la demanda. Por lo tanto, mensualmente el flujo monetario en concepto de costos por pérdidas técnicas mensuales es de Q. 10 362,88 tomando los meses con 30 días.

4.1.2. Costos no técnicos

Como se argumentó en los capítulos anteriores, existen una infinidad de fenómenos y situaciones que ponen en peligro la vida útil y la operación de las líneas de distribución en media tensión. Sin embargo, en este capítulo se analizarán únicamente los costos que tienen que ver estrictamente con la exposición de los conductores a la vegetación.

La incidencia en el desrame de estas líneas, se reduce al mínimo. Únicamente se realizan rutas de monitoreo 3 veces por año. Las cuales tienen los siguientes costos (ver tabla XVIII):

Tabla XVIII. **Costos de rutas de mantenimiento de arbolado**

Disponibilidad de personal por hora	
Vehículo liviano con dos lineros	Q. 523,04
Camión de canasta con dos lineros	Q. 627,20
Tala y desrame de arboles	
Tala de árbol	Q. 99,68
Desrame de árbol	Q. 60,48

Fuente: EEGSA, Precios de contratista homologado de DRC.

Las rutas de mantenimiento se programan por zonas y, a determinados horarios, acoplándose a las necesidades del terreno donde la línea este instalada. Una ruta típica tiene 3 días (8 horas por día) de duración, donde se desraman un promedio de 100 árboles diarios.

El equipo utilizado en estas rutas por los linieros, consta de escaleras de fibra de carbono, indumentaria para realizar trabajos con líneas energizadas tales como recubrimientos de hule y/o caucho con 15 kV de capacidad dieléctrica, etc.

Los costos para una ruta de monitoreo de líneas de distribución típica, se describen en la tabla XIX:

Tabla XIX. **Costos por rutas de monitoreo de línea**

	Duración (horas)	Árboles	Costo
Camión	12	X	Q. 7 526,40
Vehículo	6	X	Q. 3 138,24
Tala	X	40	Q. 3 987,20
Desrame	X	60	Q. 3 628,80
		Total	Q. 18 280,64

Fuente: Contratista homologado de DRC.

El costo de las 3 rutas completas de monitoreo para revisar el crecimiento de los árboles en las líneas ecológicas es de Q. 54 841,92.

En total, la inversión y los costos anuales de operación de la línea de distribución con cable ecológico el primer año se muestran en la tabla XX:

Tabla XX. **Inversión inicial línea ecológica**

Concepto	Q.	\$
Diseño y construcción	212 006,90	27 145,57
Mantenimiento preventivo	54 841,92	7 022,13
Totales	266 848,82	34 167,58

Fuente: elaboración propia.

Como la red tiene una vida útil de 25 años mínimos. Para los siguientes años únicamente se reflejaría el monto por mantenimiento y operación, tomando en cuenta los fenómenos que se resuelven en construcciones con conductor ecológico, incluidos en la tabla XX como mantenimiento preventivo. Los costos de energía no suministrada debido a cortes en las líneas debido a fallas

provocadas por el roce con los arboles fueron despreciadas, ya que es el principal beneficio del empleo de conductores ecológicos.

Los costos no técnicos utilizando 3 rutas de monitoreo anuales, y tomando las pérdidas por roce con árboles como el 10% de las pérdidas que tendrán los conductores desnudos, son (ver tabla XXI):

Tabla XXI. **Costos no técnicos de línea ecológica**

Mes	Costo rutas de mantenimiento	Roce con árboles	COSTO TOTAL	COSTO TOTAL
	Q.	Q.	Q.	\$
ENERO	0,00	66,13	66,13	8,47
FEBRERO	0,00	66,13	66,13	8,47
MARZO	0,00	66,13	66,13	8,47
ABRIL	18 280,64	66,13	18 346,77	2 349,14
MAYO	0,00	66,13	66,13	8,47
JUNIO	0,00	66,13	66,13	8,47
JULIO	0,00	66,13	66,13	8,47
AGOSTO	18 280,64	66,13	18 346,77	2 349,14
SEPTIEMBRE	0,00	66,13	66,13	8,47
OCTUBRE	0,00	66,13	66,13	8,47
NOVIEMBRE	0,00	66,13	66,13	8,47
DICIEMBRE	18 280,64	66,13	18 346,77	2 349,14
TOTAL			55 635,44	7 123,62

Fuente: elaboración propia.

4.2. Extensiones usando cable aislado en aire

Luego de analizar el costo de instalación de cable ecológico, se procede a realizar el análisis del costo por la instalación de conductor aislado en aire.

4.2.1. Costos técnicos

Los costos técnicos directamente relacionados con líneas de distribución de energía empleando cable desnudo como principal medio de conducción, varían de manera importante a las líneas ecológicas, ya que el cable desnudo está expuesto a las fallas debidas al roce con el arbolado y vegetación en general.

Utilizando el conductor *ACSR 1/0*, el porcentaje de caída de tensión a plena carga es el 2,47% el cual representa una caída de tensión de 430,63V.

$$\text{Potencia de pérdidas} = (364,10\text{V}) \cdot (188,49\text{A}) = 68,63 \text{ kW}$$

$$\text{Energía diaria de pérdidas} = (81,17\text{kW}) \cdot (24\text{h}) = 1\,948,08 \text{ kWh}$$

$$\text{Energía mensual de pérdidas} = (1\,948,08 \text{ kWh}) \cdot (30) = 58\,442,4\text{kWh}$$

Utilizando nuevamente el pliego tarifario publicado en la página web de la CNEE para los meses de mayo-junio del año 2011, el costo por kWh de la empresa distribuidora de energía eléctrica en la región central es de 1,574187 Q/kWh. De manera que, diariamente se perderá la cantidad de:

$$(1\,948,08 \text{ kWh}) \cdot (1,574187 \text{ Q/kWh}) = \text{Q. } 3\,066,64$$

Mensualmente:

$$(58\,442,4 \text{ kWh}) \cdot (1,574187 \text{ Q/kWh}) = \text{Q. } 91\,999,27$$

Los costos anteriormente indicados, están calculados únicamente para las pérdidas ocurridas en los conductores cuando la línea está a plena carga, lo cual sucede a largo plazo y sin tomar en cuenta las pérdidas en el núcleo del transformador de distribución. Por lo tanto, es necesario aplicarles factores de coincidencia según sea la hora del día.

4.2.2. Costos no técnicos

Únicamente serán expuestos los costos provocados por roces con arbolado en líneas primarias. Las estadísticas por cortes en el servicio eléctrico en el área rural de la región central del país, en los departamentos de Guatemala, Escuintla y Sacatepéquez.

Las fallas son clasificadas según la fecha y hora en la que sucedieron, así como la duración de las mismas y hora de normalización del servicio. Estas fallas fueron monofásicas, bifásicas y trifásicas. Según información de la distribuidora de la región central de Guatemala, en el mes de mayo de 2011 en el área metropolitana se tuvieron los siguientes datos en concepto de fallas provocadas por roce con árboles:

Tabla XXII. **Pérdidas y corte de energía por roce de árboles mayo 2011**

FECHA	Horas	Q.
Total 01/05/2011	18,31	2 131,22
Total 02/05/2011	9,09	3 544,45
Total 03/05/2011	1,61	107,15
Total 04/05/2011	2,91	649,18
Total 06/05/2011	9,52	2 891,45
Total 07/05/2011	8,29	1 515,68
Total 08/05/2011	1,92	127,60
Total 09/05/2011	4,05	446,87
Total 10/05/2011	12,73	30 748,76
Total 11/05/2011	1,94	4 140,64
Total 12/05/2011	4,45	1 165,22

Continuación tabla XXII.

Total 13/05/2011	6,78	2 694,38
Total 14/05/2011	7,23	1 296,67
Total 17/05/2011	8,08	5 586,99
Total 18/05/2011	3,07	375,53
Total 19/05/2011	3,40	10 637,85
Total 20/05/2011	6,87	4 800,33
Total 21/05/2011	3,62	575,30
Total 22/05/2011	14,07	2 718,99
Total 23/05/2011	3,30	330,15
Total 24/05/2011	1,31	200,74
Total 25/05/2011	1,22	1 596,87
Total 26/05/2011	3,57	14 994,95
Total 27/05/2011	6,03	1 686,74
Total 28/05/2011	7,86	5 356,56
Total 29/05/2011	12,83	51 903,82
Total 30/05/2011	1,14	37,82
Total 31/05/2011	11,63	6 443,83
Total general	176,83	158 705,77

Fuente: Mediciones entregadas por la EEGSA.

Como solo se analizando un ramal trifásico de la red de distribución, se tomarán únicamente el 5% del valor total de pérdidas. Por lo tanto las pérdidas anuales por rozamiento de árboles son de Q. 7 935,29. Entonces si dividimos este costo en los meses del año, mensualmente el monto es de Q. 661,27. Las rutas de monitoreo para revisar el crecimiento de árboles es una vez al mes, por lo tanto los costos por esta situación son los siguientes:

Tabla XXIII. **Costo anual por rutas de monitoreo**

Concepto	Precio	
	Q.	\$
12 Rutas de monitoreo	219 367,68	28 088,05

Fuente: Contratista homologado de DRC.

Los costos no técnicos son los siguientes:

Tabla XXIV. **Costos no técnicos anuales**

Mes	Costo rutas de mantenimiento	Roce con árboles	COSTO TOTAL	COSTO TOTAL
	Q.	Q.	Q.	\$
ENERO	18 280,64	661,27	18 941,91	2 425,34
FEBRERO	18 280,64	661,27	18 941,91	2 425,34
MARZO	18 280,64	661,27	18 941,91	2 425,34
ABRIL	18 280,64	661,27	18 941,91	2 425,34
MAYO	18 280,64	661,27	18 941,91	2 425,34
JUNIO	18 280,64	661,27	18 941,91	2 425,34
JULIO	18 280,64	661,27	18 941,91	2 425,34
AGOSTO	18 280,64	661,27	18 941,91	2 425,34
SEPTIEMBRE	18 280,64	661,27	18 941,91	2 425,34
OCTUBRE	18 280,64	661,27	18 941,91	2 425,34
NOVIEMBRE	18 280,64	661,27	18 941,91	2 425,34
DICIEMBRE	18 280,64	661,27	18 941,91	2 425,34

Fuente: elaboración propia.

4.3. Análisis comparativo de inversión

A continuación se analizará la inversión en conductor ecológico, tomando como valor de referencia la Tasa Interna de Retorno (TIR), la cual según sea su valor, si el proyecto es rentable en los diferentes periodos de análisis.

4.3.1. Inversión inicial

- Línea de distribución ecológica

La inversión inicial de este proyecto incluye los costos de diseño, materiales y mano de obra (ver tabla XXV):

Tabla XXV. **Costos iniciales de inversión línea ecológica**

Concepto	Precio	
	\$	Q.
Costo de herrajes	15 702,21	122 646,40
Costo de mano de obra	11 440,68	89 360,56
TOTAL	27 142,89	212 006,96

Fuente: elaboración propia.

- Línea de distribución con cable desnudo

Los costos de inversión inicial de este proyecto incluyen los costos de diseño, mano de obra y materiales. También por la naturaleza del conductor, es necesario incluir el gasto del desrame inicial, por lo tanto el monto inicial es:

Tabla XXVI. **Inversión inicial de línea con cable desnudo**

Concepto	Precio	
	\$	Q.
Costo de herrajes	8 390,20	65 534,07
Costo de mano de obra	5 585,24	43 625,11
2 Rutas de mantenimiento	4 681,34	36 561,28
TOTAL	18 656,78	145 720,46

Fuente: elaboración propia.

El monto de la inversión inicial será cubierto mediante un préstamo fiduciario a un banco del sistema con una tasa de interés anual del 15%.

4.3.2. Análisis de inversión a 1 año

El análisis de la inversión se realizará comparando ambos proyectos, utilizando los mismos parámetros tanto de crecimiento anual de la red, como de costos debido a pérdidas técnicas.

Las ganancias se analizarán tomando una tasa anual de crecimiento de la demanda en el primer año del 10% y posteriormente irá en aumento cada año con un 5%.

- Línea ecológica

El análisis de flujo económico para el proyecto de la construcción de la línea de distribución en media tensión con cable ecológico, se realizara analizando utilizando los datos obtenidos en las tablas número XVII y No XXI del capítulo 3, en las cuales están los datos tanto de ingresos con los datos técnicos ya incluidos en el cálculo y los costos no técnicos, respectivamente.

Por lo tanto el flujo monetario para el primer año será como se describe en la tabla XXVII:

Tabla XXVII. **Análisis de flujo de efectivo para el primer año.**

Mes	Q.	Aumento anual	Flujo Demanda	AÑO 1		
				INGRESOS	COSTOS	FLUJO TOTAL
				Q.	Q.	Q.
0	0	0	0	0	(266 848,32)	(145 718,46)
Enero	312 970,10	10%	0,88	27 645,69	(66,13)	27 579,57
Febrero	312 970,10	10%	0,89	27 854,34	(66,13)	27 788,21
Marzo	312 970,10	10%	0,93	29 001,90	(66,13)	28 935,77
Abril	312 970,10	10%	0,95	29 627,84	(18 346,77)	11 281,07
Mayo	312 970,10	10%	0,94	29 419,19	(66,13)	29 353,06
Junio	312 970,10	10%	0,93	29 001,90	(66,13)	28 935,77
Julio	312 970,10	10%	0,95	29 732,16	(66,13)	29 666,03
Agosto	312 970,10	10%	0,93	29 106,22	(18 346,77)	10 759,45
Septiembre	312 970,10	10%	0,95	29 627,84	(66,13)	29 561,71
Octubre	312 970,10	10%	0,95	29 836,48	(66,13)	29 770,36
Noviembre	312 970,10	10%	0,97	30 462,43	(66,13)	30 396,30
Diciembre	312 970,10	10%	0,98	30 775,40	(18 346,77)	12 428,63
Flujo de efectivo total						296 455,94

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXVII, se calculó el flujo de efectivo mensual tomando en cuenta tanto pérdidas técnicas como no técnicas del proyecto. En la columna 2 de la tabla anterior, se encuentra el cálculo del ingreso mensual neto ya tomando en cuenta las pérdidas técnicas debidas a caída de tensión, efecto joule y pérdidas en transformadores de distribución, las cuales serán de la misma magnitud para ambos proyectos. En la columna 3 se encuentra el porcentaje de aumento de demanda anual, el cual para el primer año será del 5% de la capacidad total de la línea. La columna 6, representa los costos no técnicos de la línea ecológica, los cuales incluyen perdidas por roce con árboles y rutas de mantenimiento y finalmente la columna 7 contiene el flujo de efectivo mensual.

La inversión teniendo un aumento del 5% anual sobre las ganancias y de un 3,85% sobre los gastos debido a la inflación anual proporcionada por el

Centro de Investigaciones Económicas Nacionales (CIEN) será el siguiente balance (ver tabla XXVIII):

Tabla XXVIII. **Balance de inversión a 5 años**

AÑO	BALANCE
0	(266 848,32)
1	296 455,94
2	311 918,55
3	328 178,91
4	345 277,88
5	363 258,36
TIR	113%
VPN	Q. 1. 087 443,33
B/C	4,08

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXVIII, la tasa de descuento que se utilizó para calcular el valor presente neto es la misma del préstamo de la inversión inicial. El valor de la TIR y B/C denotan una rentabilidad excelente a los 5 años de operación. Esta rentabilidad tan grande se debe al gran ahorro que representa el empleo de la tecnología del conductor semi protegido.

- Línea con cable desnudo

Para el análisis del flujo de efectivo a tomar en cuenta para este proyecto, es necesario considerar que las pérdidas por mantenimiento y operación de la línea con conductor desnudo son mayores, ya que las rutas de mantenimiento y operación, el mantenimiento preventivo será mucho mayor en este tipo de red.

El flujo de efectivo anual para los años cero y uno será el siguiente:

Tabla XXIX. Flujo de efectivo anual para los años cero y uno

Mes	Q.	Aumento anual	F. Demanda	AÑO 1		
				INGRESOS	COSTOS	FLUJO TOTAL
				Q.	Q.	Q.
0	0	0	0	0	(145 718,46)	(145 718,46)
Enero	312 970,10	10%	0,88	27 645,69	(18 346,77)	9 298,93
Febrero	312 970,10	10%	0,89	27 854,34	(18 346,77)	9 507,57
Marzo	312 970,10	10%	0,93	29 001,90	(18 346,77)	10 655,13
Abril	312 970,10	10%	0,95	29 627,84	(18 346,77)	11 281,07
Mayo	312 970,10	10%	0,94	29 419,19	(18 346,77)	11 072,42
Junio	312 970,10	10%	0,93	29 001,90	(18 346,77)	10 655,13
Julio	312 970,10	10%	0,95	29 732,16	(18 346,77)	11 385,39
Agosto	312 970,10	10%	0,93	29 106,22	(18 346,77)	10 759,45
Septiembre	312 970,10	10%	0,95	29 627,84	(18 346,77)	11 281,07
Octubre	312 970,10	10%	0,95	29 836,48	(18 346,77)	11 489,72
Noviembre	312 970,10	10%	0,97	30 462,43	(18 346,77)	12 115,66
Diciembre	312 970,10	10%	0,98	30 775,40	(18 346,77)	12 428,63
Flujo de efectivo total						131 930,18

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXIX, se hizo un análisis igual al que se hizo a la línea ecológica, en la fila 0 se ingresa la inversión inicial. El flujo efectivo anual total que se muestra en la tabla, solamente incluye el flujo de efectivo de enero a diciembre.

El flujo de efectivo en los primeros 5 años de operación, serán analizados con las mismas tasas que el conductor ecológico:

Tabla XXX. Análisis de inversión a 5 años

AÑO	BALANCE
0	(145 718,46)
1	131 930,18
2	141 058,54
3	150 740,80

Continuación tabla XXX.

4	161 008,40
5	171 894,51
TIR	93%
VPN	Q. 498 015,97
B/C	3,42

Fuente: elaboración propia.

En comparación con el análisis de la inversión a 5 años de la línea ecológica se observan pronósticos más discretos en cuanto a rentabilidad, sin embargo sigue siendo un proyecto bastante rentable.

La tabla XXXI expone el porcentaje mayor tanto de inversión como de ganancias que tendrá la línea comparando ambos proyectos:

Tabla XXXI. **Comparación económica a 5 años de operación**

AÑO	DESNUDA	ECOLÓGICA	AUMENTO
	BALANCE	BALANCE	
0	(Q. 145 718,46)	(Q. 266 848,32)	45,39%
1	Q. 131 930,18	Q. 296 455,94	55,50%
2	Q. 141 058,54	Q. 311 918,55	54,78%
3	Q. 150 740,80	Q. 328 178,91	54,07%
4	Q. 161 008,40	Q. 345 277,88	53,37%
5	Q. 171 894,51	Q. 363 258,36	52,68%
TIR	93%	113%	18,03%
VPN	Q. 498 015,97	Q. 1.087 443,33	54,20%
B/C	3,42	4,08	16,13%

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla XXXI, se observa un porcentaje importante de aumento en la inversión inicial (45,39%) en el proyecto de línea ecológica. Sin embargo en los 5 años de operación la línea ecológica tuvo un aumento en las ganancias mayor al 50% que la línea con conductor desnudo, lo cual refleja el importante ahorro en el mantenimiento preventivo. Ahora bien, la tasa interna de retorno únicamente es un 18% mayor en el proyecto ecológico en comparación al proyecto con conductor aislado al aire.

4.3.3. Análisis de inversión a 10 años

El flujo de efectivo en 10 años de operación de ambos proyectos, se observa en la tabla XXXII:

Tabla XXXII. **Flujo de efectivo a los 10 años de operación y comparación económica entre ambos proyectos**

AÑO	DESNUDA BALANCE	ECOLÓGICA BALANCE	MAYOR
0	(Q. 145 718,46)	(Q. 266 848,32)	45,39%
1	Q. 131 930,18	Q. 296 455,94	55,50%
2	Q. 141 058,54	Q. 311 918,55	54,78%
3	Q. 150 740,80	Q. 328 178,91	54,07%
4	Q. 161 008,40	Q. 345 277,88	53,37%
5	Q. 171 894,51	Q. 363 258,36	52,68%
6	Q. 183 434,09	Q. 382 165,46	52,00%
7	Q. 195 664,03	Q. 402 046,55	51,33%
8	Q. 208 623,22	Q. 422 951,46	50,67%
9	Q. 222 352,63	Q. 444 932,52	50,03%
10	Q. 236 895,50	Q. 468 044,71	49,39%
TIR	97%	116%	16,37%
VPN	Q. 840 839,69	Q. 1. 784 242,86	52,87%
B/C	5,77	6,69	13,70%

Fuente: elaboración propia.

A 10 años de operación se mantiene la misma tendencia; sin embargo, el porcentaje de aumento en las ganancias va en disminución a partir del quinto año de manera notoria, reduciendo la diferencia de utilidades en más del 5% entre el quinto año y el décimo año. De igual manera el aumento de la tasa interna de retorno en comparación de ambos proyectos, se redujo en un 2% y el valor de la comparación del costo-beneficio también disminuyó en un 3%.

4.3.4. Análisis de inversión a 15 años

La tabla XXXIII muestra el desarrollo de ambas inversiones en 15 años de operación:

Tabla XXXIII. **Flujo de efectivo a los 15 años de operación y comparación económica entre ambos proyectos**

AÑO	DESNUDA	ECOLÓGICA	MAYOR
	BALANCE	BALANCE	
0	(Q. 145 718,46)	(Q. 266 848,32)	45,39%
1	Q. 131 930,18	Q. 29 6455,94	55,50%
2	Q. 141 058,54	Q. 31 1918,55	54,78%
3	Q. 150 740,80	Q. 32 8178,91	54,07%
4	Q. 161 008,40	Q. 34 5277,88	53,37%
5	Q. 171 894,51	Q. 36 3258,36	52,68%
6	Q. 183 434,09	Q. 38 2165,46	52,00%
7	Q. 195 664,03	Q. 40 2046,55	51,33%
8	Q. 208 623,22	Q. 42 2951,46	50,67%
9	Q. 222 352,63	Q. 44 4932,52	50,03%
10	Q. 236 895,50	Q. 46 8044,71	49,39%
11	Q. 268 606,31	Q. 49 2345,84	45,44%
12	Q. 268 606,31	Q. 51 7896,63	48,14%
13	Q. 285 872,90	Q. 54 4760,90	47,52%
14	Q. 304 150,52	Q. 57 3005,71	46,92%
15	Q. 323 495,41	Q. 60 2701,52	46,33%
TIR	97,39%	116%	16,26%

Continuación tabla XXXIII.

VPN	Q. 1.077 982,56	Q. 2.230 457,54	51,67%
B/C	7,40	8,36	11,50%

Fuente: elaboración propia.

En 15 años de operación ambos proyectos son muy rentables y viables; sin embargo, el empleo del conductor ecológico para este proyecto representa ganancias considerablemente mayores, analizando el comportamiento del porcentaje de aumento en los ingresos a quince años, encontramos que en el año 15, el aumento de ganancias se habrá reducido en 10% y los valores de costo beneficio y TIR se reducen también, pero en una proporción casi insignificante.

CONCLUSIONES

1. El uso de cable ecológico es una opción que permite que los requerimientos de diseño y construcción de una línea de media tensión sean más respetuosos con el medio ambiente, ya que por su recubrimiento reducen en un 95% la tala, desrame de árboles y vegetación en general.
2. El método compacto para líneas con cable ecológico, reduce la libranza mínima entre conductores lo cual reduce la necesidad de desrame cuando la línea está construida, por lo que se evitan las fallas por roce con árboles, mejorando considerablemente la calidad del servicio de energía eléctrica en áreas rurales aisladas, reduciendo la probabilidad de un apagón total evitando el corte de energía hacia cargas especiales como hospitales, escuelas, bombas de agua potable, entre otros.
3. El costo de mantenimiento preventivo para la operación de la línea de distribución se reduce de manera tajante, disminuyendo las rutas de monitoreo y desrame de una vez al mes, a una vez cada cuatro meses.
4. La inversión inicial de un proyecto ecológico de líneas de distribución, es considerablemente más alto a la respectiva inversión de una línea de distribución con cable desnudo. Sin embargo, representa una operación más confiable del sistema de distribución, lo cual aumenta las ganancias.

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere que las empresas distribuidoras de energía eléctrica analicen detenidamente las áreas rurales que sufren más cortes de energía al año por inclemencias del tiempo, y así elaborar un listado de posibles inversiones con fines de reducción de pérdidas.
2. Implementar los conductores ecológicos para la electrificación de comunidades rurales cercanas a reservas naturales, de manera de respetar las áreas protegidas y al mismo tiempo proporcionar un servicio de energía eléctrica mucho más confiable.
3. Analizar la normalización de la utilización del cable ecológico, ya que representa un ahorro sustancial en recursos de mantenimiento y aumenta las ganancias del distribuidor.
4. Realizar un estudio de mercado de la injerencia de los cortes prolongados de energía debido a la vegetación de manera de justificar la inversión en esta nueva tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

1. Administrador del Mercado Mayorista. Curva de demanda diaria. [en línea] AMM.<
http://www.amm.org.gt/pdfs/2010/despacho/ene/PDD20100104_01.html>. [Consulta: 10 de octubre de 2011]
2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas técnicas de diseño y operación de instalaciones de distribución*. Guatemala: CNEE, 2000. 52 p.
3. Comisión Nacional de Energía Eléctrica, *Normas técnicas del servicio de distribución*. Guatemala: CNEE, 2000. 23 p.
4. Conductores del Norte. *Catálogo de conductores de aluminio*. 2ª ed. México: Mcgraw-Hill, 2006. 35 p.
5. High Voltage Cables. *British insulated callender's cables limited*. 2ª ed. *Publication number 225 A*. England: Mcgraw-Hill 1982. 200 p.
6. Phellps-Dodge. *Catálogo de conductores de aluminio*. 3ª ed. Estados Unidos: Thompson 2002. 75 p.
7. Pirelli Cables. *Catálogo de redes aéreas para baja y media tensión*. 3ª ed. México: Limusa, 2008. 60 p.