

# **Trabajo de Diploma**

**Para Optar por el Título de**

## **Ingeniero Eléctrico**

**Diseño de la red eléctrica del municipio Antilla  
mediante el software DIGSILENT PowerFactory**

**José Alejandro Palacio García**

**Tutor: Dr. C Reynaldo Laborde Brown**

**Moa, 2017**

**“Año 59 de la Revolución”**



## *Declaración de autoridad*

En decisión conjunta, el autor José Alejandro Palacio García y el tutor Dr. C Reynaldo Laborde Brown, certificamos nuestra propiedad intelectual sobre este Trabajo de Diploma con título: “Diseño de la red eléctrica del municipio Antilla mediante el software DIgSILENT PowerFactory”. Somos los únicos autores de este Trabajo de Diploma, y autorizamos al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, a hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

---

José Alejandro Palacio García

---

Dr. C Reynaldo Laborde Brown

## *Dedicatoria:*

*De forma muy especial le dedico este Trabajo de Diploma a **mi hija Lauren Alejandra Palacio García**, quién de una manera u otra me ha dado fuerzas para que yo salga adelante.*

*A mi Madre **Irene Margarita García Morera** y mi Padre **José Francisco Palacio González** quienes han logrado guiarme por los caminos del saber y a los cuales les daré siempre mi bendición por traerme al mundo.*

*A mi mujer **Mileydis García Chong** por estar a mi lado todo este tiempo en las buenas y en las malas  
A todos **mis familiares y amigos** que ocupan un lugar muy importante en mi corazón.*

## *Agradecimientos:*

*A mi hija Lauren Alejandra Palacio García.*

*A mis padres por su apoyo incondicional.*

*A mis abuelos maternos y paternos, por confiar en mí.*

*A mi mujer Mileydis García Chong.*

*A Osmar García Tamayo por su destacada preparación y participación en mi trabajo y demostrar ser buen amigo.*

*A Enid Mulet Jiménez, por su ayuda al cabo de todos estos años.*

*A mis amigos del aula: Niorge, Henry, Norbis, Guillermo, Ramiro, Rafa, Juan Antonio, Ramón, Endris, etc.*

*A mis colegas del basket: José Carlos, Carlos Córdoba, Sergitín, Eliot, Livan, Aminu, Amarildo, Francis y demás.*

*A Dayli, por estar pendiente de mí en la etapa de estudios universitarios y a su madre Felina.*

*A José Osvaldo Batista Velázquez, Gretel Rodríguez, José Luis Bajuelos y mis colegas (Los Roberto) por tenerme siempre presente en sus actos.*

*A mi Tutor el Dr C Reynaldo Laborde Brown.*

*A mi abuelo Marino, por cuidarme desde pequeño cada vez que tenía un chance.*

*A Nancy, quien inspirada en sus propios esfuerzos, dedica siempre una parte importante de su vida al sacrificio de apoyarme en mis decisiones.*

*A mis suegros Amalia Mileydis y José García Santiesteban.*

*Y a todos los demás que no he mencionado, les ruego que me disculpen, a todos los llevo dentro de mí.*

**Resumen:**

En este trabajo se muestra la necesidad de efectuar un conjunto de medidas para minimizar al máximo los niveles de pérdidas existentes y la radicalidad en el circuito Antilla, perteneciente al municipio Antilla de la provincia de Holguín. Se definen las pérdidas de energía eléctrica y su clasificación. Se actualiza el monolineal del circuito realizando un levantamiento físico de las cargas instaladas. A través de un diagnóstico del circuito se determinaron los niveles de pérdidas existentes, así como la restructuración del mismo para lograr la interconexión con otros circuitos del municipio, permitiendo así la coordinación establecida por la Unión Nacional Eléctrica para establecer una conexión automática entre dichos circuitos a la hora de tomar decisiones en los distintos despachos de carga. Se obtiene además el gráfico de carga para un día típico y se plantea una propuesta técnico - organizativa para reducir los niveles de pérdidas de la red con su respectiva valoración económica y su impacto medio ambiental.

**Abstract:**

In this Work the need to implement a set of measures to minimize the existing losses levels at the highest rate and the radial nature in Antilla circuit, in the municipality of Antilla, Holguin province is shown. Power losses and their classification are defined. The circuit single line is updated by performing a physical analysis of the installed charges. Through a circuit diagnostic, the existing losses levels were determined, as well as through its restructuration, to achieve interconnection with other circuits in town, allowing the established coordination by the National Electricity Union to establish an automatic connection between such circuits when taking decisions in the different charge dispatches. Loading graph for a typical day is also obtained and it is presented a technical - organizational proposal to reduce network level losses with their respective economic valuation and its environmental impact.

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción General .....	1
1 CAPITULO I. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL .....	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Revisión de los trabajos precedentes .....	5
1.3 Fundamentación teórica .....	7
1.3.1 Conceptos básicos generales.....	7
1.4 Clasificación de las redes eléctricas .....	10
1.5 Transformadores y sus conexiones .....	11
1.5.1 Transformadores monofásicos. ....	12
1.5.2 Transformadores monofásicos de 19.1 kV.....	17
1.6 Clasificación de cargas.....	17
1.7 Elementos de Redes eléctricas .....	18
1.7.1 Estructuras aéreas .....	18
1.7.2 Conductores eléctricos .....	18
1.7.3 Bajantes o Acometida.....	19
1.7.4 Aisladores.....	20
1.7.5 Cruceetas.....	20
1.8 Factores para el cálculo de sistemas eléctricos.....	20
1.9 Conclusiones del capítulo.....	23
2 CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS .....	24
2.1 Introducción.....	24
2.2 Caracterización del objeto de estudio .....	24
2.3 Introducción al Software DIgSILENT PowerFactory.....	26
2.3.1 Funciones de simulación del DIgSILENT PowerFactory .....	26
2.3.2 Aplicaciones del DIgSILENT PowerFactory .....	27

2.3.3	Creación de proyectos en DlgSILENT PowerFactory .....	27
2.4	Comportamiento de los registros eléctricos. ....	30
2.5	Levantamiento de cargas .....	33
2.6	Penalización por las empresas distribuidoras de energía .....	33
2.6.1	Beneficios de corregir el factor de potencia .....	34
2.7	Pérdidas en los conductores.....	35
2.7.1	Método de densidad económica de corriente .....	37
2.7.2	Método a través de la corriente de cálculo.....	38
2.8	Pérdidas en los transformadores .....	39
2.9	Vías para la reducción de pérdidas en el diagrama monolineal Antilla.....	41
2.10	Conclusiones del capítulo .....	42
3	Capítulo III Resultados y análisis .....	43
3.1	Introducción.....	43
3.2	Variantes para la disminución de pérdidas eléctricas.....	43
3.3	Estudios de propuestas .....	43
3.3.1	Variante #1 División del circuito, reacomodo de cargas por fase sumado a la instalación de un banco de capacitores en las cargas del Molino de Maíz. ....	43
3.3.2	Variante #2 Conversión total de tensión del circuito Antilla de 4,16 kV a 13,8 kV y cambio total de la sección de los conductores. ....	46
3.4	Valoración económica .....	48
3.4.1	Tiempo de amortización, VAN y TIR.....	53
3.5	Impacto medioambiental.....	55
3.6	Conclusiones del capítulo .....	56
CONCLUSIONES GENERALES		
RECOMENDACIONES		
Bibliografía		
Anexos .....		VI

## **INTRODUCCIÓN GENERAL**

En las últimas décadas ha existido un desarrollo acelerado en la generación de energía eléctrica. Las altas exigencias en la calidad del servicio de energía obligan cada vez más a las empresas a disponer de sistemas más flexibles y seguros que garanticen la menor interrupción posible en el fluido eléctrico. Como ya es conocido, el nivel máximo de pérdidas de un sistema eléctrico no debe ser mayor de un 10% y que idealmente debe oscilar entre un 6 y 8% [1]. En los países en vías de desarrollo es común que este valor sea superior a un 20%, por lo tanto, cualquier esfuerzo destinado a la reducción de las pérdidas es generalmente justificable, específicamente si se tiene en cuenta que algunos bancos internacionales condicionan sus créditos a los índices de pérdidas existentes. Para lograr este objetivo, la automatización de los sistemas de distribución es prácticamente indispensable y ha producido excelentes resultados en las empresas de energía que la han implementado.

Para el análisis del sistema eléctrico, una de las principales tareas a considerar es el servicio al cliente que brinda la Unión Eléctrica Básica (UEB), ya que toda unidad debe girar en función del mejoramiento de este, siendo el cliente la persona más importante para una organización.

En la actualidad se están haciendo importantes esfuerzos en hardware, software y en sistemas de comunicación para automatizar los sistemas de distribución a gran escala, los cuales normalmente incluyen entre sus funciones la reconfiguración de los circuitos de distribución.

En Cuba sobre la base de la política y del sistema de gestión empresarial con vista a generar, transmitir, distribuir y comercializar la energía eléctrica por la dirección del Partido Comunista se han trazado estrategias que ayuden a consolidar las elevadas pérdidas existentes para satisfacer los requisitos y expectativas de los clientes, disminuir los riesgos laborales que van encaminados a momentos perjudiciales y alcanzar una mejora continua en el desempeño energético.

A tono con lo anterior y teniendo en cuenta el desarrollo continuo de los sistemas eléctricos de potencia y con el propósito de elevar la satisfacción de los clientes, se realiza la presente investigación en el municipio de Antilla. Sin embargo existen deficiencias que están atentando con el logro de esta meta.

Por estudios empíricos realizados con especialistas de la empresa eléctrica se encontraron un conjunto de deficiencias que influyen en la mejora continua de sus procesos, ocasionados por:

- Niveles de caída de tensión del  $\pm 10\%$  en los nodos finales del circuito.
- Altos niveles de pérdidas por tener la distribución primaria a 4,16 kV en el circuito Antilla.
- Altos niveles de tiempo de interrupción al usuario por no contar con una doble alimentación en el municipio por 33 kV ni enlaces entre el circuito primario de Antilla y El Ramón.
- Inadecuado calibre en el circuito del Ramón y Antilla.

Estos síntomas revelan que en la red del municipio Antilla existen pérdidas, influyendo negativamente en su sistema eléctrico, siendo esta la **situación problemática** que genera la investigación.

Determinando como **problema de la investigación**: la no existencia de una propuesta para la disminución de las pérdidas eléctricas en el circuito principal de alimentación del municipio Antilla.

Como **objeto de estudio** se define: La red de distribución primaria residencial Antilla.

El **campo de acción** lo constituye el análisis de pérdidas eléctricas en el circuito de distribución primaria residencial.

El **objetivo general** que se propone es: Formular una propuesta para la reducción de las pérdidas en el circuito principal de alimentación del municipio Antilla, mediante el uso del software PowerFactory, para contribuir al mejoramiento técnico económico de este sistema.

La **hipótesis** del presente trabajo consiste en que si se diseña la red eléctrica del municipio Antilla en el software PowerFactory se podrá analizar las pérdidas eléctricas por distribución de energía para brindar mejor confiabilidad del servicio eléctrico y hacerlo más económico.

Para el cumplimiento de este objetivo general se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

1. Verificar el comportamiento energético concerniente a las pérdidas eléctricas del sistema a través del software PowerFactory para realizar propuestas que conlleven a la reducción de las pérdidas eléctricas.
2. Analizar los beneficios técnico económico que se obtienen si se logra reducir las pérdidas en el circuito principal de alimentación del municipio Antilla.

Dentro de las principales **tareas** tenemos:

- ❖ Conformación detallada del estado del arte, sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
- ❖ Evaluación de las pérdidas en condiciones actuales del sistema.
- ❖ Proposición de medidas técnicas y organizativas para disminuir las pérdidas eléctricas en el municipio.
- ❖ Análisis técnico – económico de los resultados.

Haciendo énfasis en los **resultados esperados** se puede afirmar que los resultados esperados de esta investigación son:

- Lograr una aproximación exacta del porcentaje de pérdidas eléctricas del municipio Antilla.
- Proponer una doble alimentación de 33 kV para eliminar la configuración radial del sistema.
- Enlazar las subestaciones del Ramón y Antilla para en caso de cualquier anomalía estas garanticen el fluido para el tiempo mínimo de interrupciones en la línea

Para la realización de este trabajo se emplearon **métodos teóricos** como:

- ✓ Histórico - Lógico: proporcionó la vía o camino a seguir para el análisis bibliográfico, los antecedentes, fundamentos teóricos, etapas y tendencias fundamentales de las pérdidas eléctricas y la demanda en el contexto nacional e internacional
- ✓ Sistémico - Estructural: permitió estudiar el problema y el objeto atendiendo a sus componentes y a los nexos que se establecen entre ellos, determinando así su estructura y dinámica, así como diseñar la estructura del procedimiento, imprimiéndole un carácter de sistema
- ✓ Análisis - Síntesis: para el análisis de pérdidas y demanda, el estudio en la organización así como de sus componentes e indicadores, permitiendo determinar las principales relaciones que inciden en estos
- ✓ Inducción – Deducción: teniendo en cuenta el estudio teórico previo, para la verificación de la idea a defender planteada a través del estudio las pérdidas eléctricas y el análisis de la demanda en el municipio objeto de estudio práctico y la aplicación del procedimiento propuesto.

# **1 CAPITULO I. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL**

## **1.1 Introducción**

El municipio de Antilla por su cercanía a la Región Turística del Atlántico Norte fue objeto de diversos estudios de Desarrollo para posibilitar un crecimiento armónico de las redes del Sistema Electroenergético Nacional (SEN), en respuesta al rápido crecimiento de la demanda de electricidad en el Polo Turístico del Ramón, estudiado completamente y listo para iniciar las inversiones. En el presente capítulo se realiza un análisis a partir de los trabajos precedentes, se enuncian los principales conceptos para un mejor acercamiento al objeto de la investigación y se sustenta un marco teórico-metodológico de la investigación.

## **1.2 Revisión de los trabajos precedentes**

Las redes eléctricas desde sus orígenes se han convertido en una red expansiva destinada a llegar hasta todos los consumidores. Como ya es notable, la electricidad es hoy en día uno de los portadores energéticos más precisos, y costosos del mundo. A continuación se expone una relación de los principales temas relacionados en los trabajos precedentes.

Realiza un análisis del SEN en el municipio de Antilla con el objetivo de plantear mejoras en todo el sistema de distribución y montar una subestación en los litorales de la Península del Ramón para economizar las pérdidas del Polo turístico venidero. Hace referencia y un análisis íntegro del interruptor 6580 en máxima y mínima demanda para reducir las pérdidas de energía en dicha transmisión. No se especifica en qué medidas se encuentran las pérdidas eléctricas [2].

El autor demuestra la necesidad de implementar un conjunto de medidas para reducir al máximo los niveles de pérdidas que existen actualmente en el circuito de la distribución #6 del municipio de Moa. Propone variantes técnico organizativas y hace una valoración económica para cada una de ellas. Se asume por parte del autor lo antes planteado considerando que permite visualizar un diagnostico detallado del circuito, definiéndose las pérdidas eléctricas y su clasificación [3].

Presenta la confección de un mapa digital en el software Mapinfo con las principales variables eléctricas de la red de distribución del municipio Antilla, como impacto social tenía que la UEB Eléctrica trabajaba con un único monolineal y pocas veces estaba actualizado, no contaba con herramientas de software para destinar las ubicaciones exactas de los transformadores, postes, líneas aéreas y demás elementos montados en la red. Resalto en este trabajo la exactitud en cuanto a ubicación de los elementos eléctricos gracias al software Mapinfo **[4]**.

Teniendo en cuenta la política trazada por los órganos superiores del partido el autor plantea un riguroso análisis para llevar a cabo una reducción de pérdidas técnicas en los circuitos 1 y 2 de Báguanos, como consecuencia propone una conversión de un nivel de tensión a otro en los circuitos 1 y 2 sumado a un cambio en la sección transversal en los conductores existentes. Como impacto mostró esta variante que cumplía rigurosamente la reducción de pérdidas eléctricas. Asumo lo planteado por el autor en lo referente al cambio de tensión y sección transversal de los conductores **[5]**.

Este autor hace un estudio de las principales variables eléctricas que intervienen en el proceso de distribución de energía eléctrica ya que el circuito H-184 refleja un alto nivel de pérdidas gracias a su nivel de tensión de 4,16 kV y el estado de los conductores. Como incidencia llegó a la conclusión que el circuito aún tiene altos niveles de pérdidas técnicas en las cuales incide el nivel de tensión de 4,16 kV y el mal estado de los conductores. Como punto significativo propone una conversión de 4,16 a 13,8 kV y cambio de transformadores y conductores. Concuero con lo planteado por haciendo énfasis en que se debe profundizar en el problema de las pérdidas eléctricas por conductores y transformadores **[6]**.

La autora asume que en el circuito de subtransmisión TU-6100 de Las Tunas presenta un elevado nivel de pérdidas técnicas, como resultados de la investigación propone una división del circuito con variantes, deja plasmado el tema para que otros investigadores se tracen esta meta de economizar al máximo

las pérdidas técnicas. No se especifica el problema que presenta el Radial con el  $\tau$  para el cálculo de las pérdidas de energía [7].

### 1.3 Fundamentación teórica

#### 1.3.1 Conceptos básicos generales

- **Conciencia Energética:** Sistema de valores éticos y morales que el individuo desarrolla en su quehacer cotidiano, pendientes al empleo racional de los recursos y tecnologías energéticas disponibles, en armonía con el medio ambiente.
- **Energía Eléctrica:** Es forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, la cual es transferida a través de conductores para la conexión de equipos eléctricos. La energía eléctrica es la que nos trasmite la corriente eléctrica y de este modo funcionan todos los equipos electrodomésticos que conocemos.
- **SEN:** Sistema Electro energético Nacional: Red de líneas eléctricas que abastecen de energía el país.
- **Transmisión de electricidad:** Forma de transportar la energía eléctrica generada a largas distancias con pocas pérdidas de electricidad.
- **Sistema de distribución:** Es el conjunto formado por las redes eléctricas del sistema Primario, Sistema Secundario y los Servicios.
- **Distribución de electricidad:** Es la forma de repartir la energía eléctrica entre los diferentes circuitos.
  - Ejemplo: La energía eléctrica generada por la termoeléctrica (Renté) se distribuye por líneas eléctricas de alta tensión al transformador y de ahí por los diferentes circuitos.
- **Redes de Distribución:** Es el conjunto formado por líneas aéreas o soterradas, subestaciones y/o transformadores de 110 kV. y menores.
- **Redes eléctricas:** Es el conjunto formado por líneas aéreas o soterradas subestaciones y/o transformadores, pueden ser de diferentes combinaciones y tensiones.

- **Mejoras:** Trabajos que se realizan en las redes eléctricas con vista a mejorar las condiciones de operación, calidad del servicio eléctrico y disminuir pérdidas.
- **Pérdidas Técnicas:** Es la parte de la potencia activa que se consume en calentar las líneas eléctricas y no en alimentar la carga.
- **Pérdidas Comerciales:** Son aquellas que se producen en el área comercial por bajos consumos, tendederas que no se cobran, CEE defectuosos y/o parados.
- **Pérdidas de Distribución:** Es la suma de las Pérdidas Técnicas y Pérdidas Comerciales.
  - Pérdidas de Distribución Primaria: Se les denomina a aquellas pérdidas de energía eléctrica que ocurren en las líneas de distribución primaria.
  - Pérdidas de Distribución Secundaria: Se les denomina a aquellas pérdidas de energía eléctrica que ocurren en las líneas de Distribución Secundaria.
- **Pérdidas por Transmisión:** Son aquellas que ocurren en las líneas de transmisión.
- **Mantenimiento Correctivo Planificado:** Trabajo que se realiza para reparar todos los aquellos defectos de una línea con una programación anual.
- **Mantenimiento Preventivo o por Diagnóstico:** Es el que se ejecuta sobre todos los elementos de la red después de un estudio donde se determinan las labores a realizar.
- **Celaje:** Inspección que se realiza para conocer el estado técnico de las líneas aéreas de distribución de energía eléctrica.
- **Horario pico:** Es el horario de la noche donde se produce la mayor demanda eléctrica (de 6 a 10 de la noche).
- **Interrupciones voluntarias:** Son producto de una planificación para ejecutar trabajos sobre las redes o sobre algún elemento de las mismas

estas interrupciones pueden ser causadas por Mantenimiento, Inversiones Y Operaciones.

- **Interrupciones involuntarias:** Son aquellas que se presentan de forma aleatoria en cualquier momento y lugar de las redes.
- **Sistema de Subtransmisión:** Es el conjunto de elementos que forman en su conjunto las redes eléctricas de subtransmisión. La tensión utilizada en Cuba en estas redes es de 33 de Kv.
  - Líneas de Subtransmisión: Son aquellas que nacen en las subestación de transmisión y que terminan generalmente en una subestación de distribución o en un desconectivo que enlaza con otra línea.
- **Distribución Primaria:**
  - Circuitos Primarios: Circuitos que operan a tensión nominal de 13,8 Kv. y menores hasta 4,16 Kv.
  - Sistema de Distribución Primario: Es el conjunto formado por las redes eléctricas primarias que comprenden las líneas eléctricas aéreas o soterradas y las subestaciones de distribución.
- **Distribución Secundaria:**
  - Sistema de Distribución secundario: Es el conjunto formado por las redes eléctricas secundarias que comprenden los transformadores de distribución y las líneas eléctricas de distribución.
  - Circuitos Secundarios: Circuitos que operan a menos de 480 voltios.
  - Balanceo: Acto y acción de emparejar las fases en corriente (y como colateral tensión) en un circuito de distribución.
- **Otros Programas Vinculados:**
  - Demanda Eléctrica: Es la suma de la energía que consumen todos los equipos que están conectados en un mismo momento, lo que determina la potencia que debe entregar las plantas generadoras

Ejemplo: La sala de nuestra casa tiene encendida dos lámparas de 20 vatios (W), lo que equivale a tener una demanda de 40 W.

- **Generación distribuida:** Descentralización de la generación. Es generar la electricidad cerca de los usuarios. Producción de electricidad con instalaciones que son suficientemente pequeñas en relación con las grandes centrales de generación, de forma que se puedan conectar en cualquier punto de un sistema eléctrico.
- **Mínima demanda:** Es la demanda de la carga cuando alcanza su valor mínimo.
- **Máxima demanda:** Es la demanda de la carga cuando alcanza su valor elevado.

#### 1.4 Clasificación de las redes eléctricas

A grandes rasgos, se puede afirmar que existen dos tipos fundamentales de sistemas de distribución: radiales y mallados [8].

- Radial: Un sistema radial es aquel que presenta un solo camino simultáneo al paso de la potencia hacia la carga. Con relación a este arreglo, la principal ventaja es que es simple y económica y su principal desventaja es que cualquier problema general deja a un número de usuarios sin servicio hasta que el problema se resuelva. La Figura. 1.1 muestra un sistema radial.

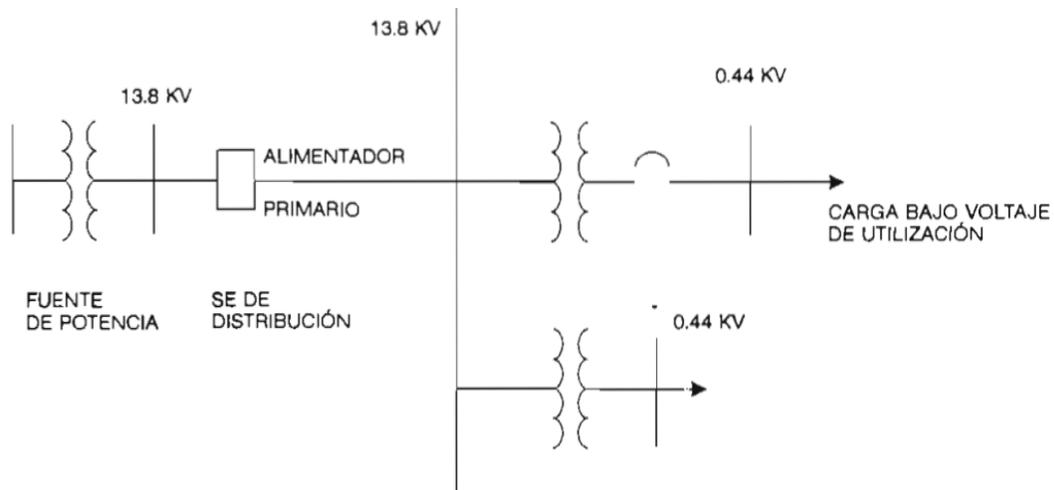


Figura. 1.1. Sistema de distribución radial.

- Malla: Un sistema mallado, por el contrario, tiene más de un camino simultaneo para el flujo de potencia. Este tipo de conexión es más costosa debido a que requiere más equipos, pero cualquier punto sobre la línea tiene servicio desde dos direcciones. La Figura. 1.2 muestra un sistema mallado.

Estos arreglos en red están diseñados para proporcionar un servicio muy confiable a las áreas con alta densidad de carga, tales como: el centro de una ciudad, áreas bancarias, comerciales, centros comerciales de autoservicio, etc.

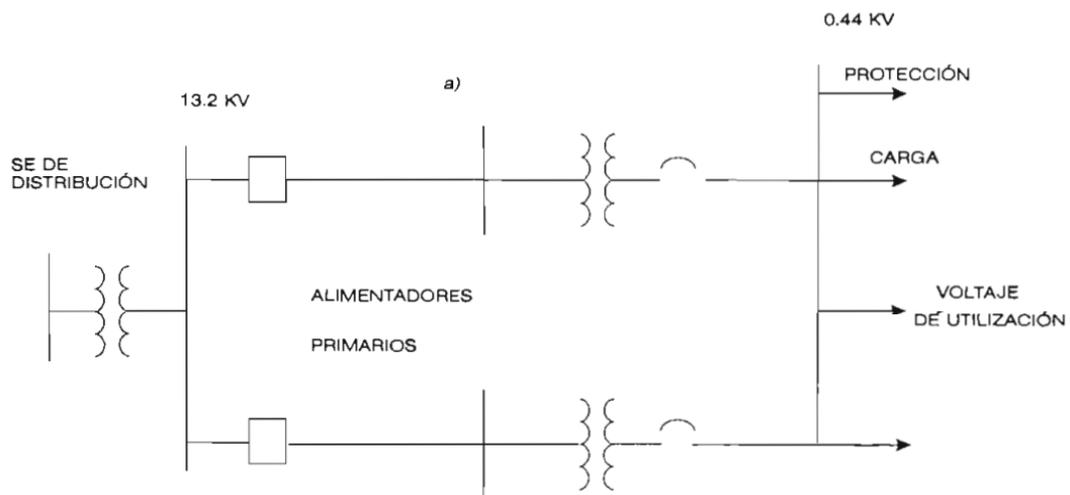


Figura. 1.2. Sistema de distribución en Malla

### 1.5 Transformadores y sus conexiones

Se denomina Transformador a un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal (esto es, sin pérdidas), es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño y tamaño, entre otros factores [9].

El transformador es un dispositivo capaz de convertir la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, basándose en el fenómeno de inducción electromagnética.

La conexión de Transformadores en paralelo se hace necesaria debido a los incrementos de la demanda que superan la capacidad existente o cuando los requerimientos de confiabilidad y continuidad de operación lo exigen, por ejemplo, si un transformador falla, el otro continuará alimentando la carga sin interrupción. Cuando la demanda de energía se reduce temporalmente, resulta más económico operar un transformador pequeño cerca de su límite de capacidad a plena carga que un transformador de mayor capacidad, por lo que, cuando la demanda energética es muy fluctuante resulta más provechoso la conexión de dos o tres transformadores en paralelo que utilizar un transformador de gran capacidad.

Los transformadores más usados en las redes de distribución aéreas son transformadores trifásicos y monofásicos, de instalación en poste y devanados inmersos en aceite.

Los transformadores monofásicos pueden ser aditivos o sustractivos. Esta característica de los transformadores monofásicos se denomina polaridad y se especifica en la chapa del equipo.

La polaridad de los transformadores debe tenerse muy en cuenta a la hora de formar bancos trifásicos con unidades monofásicas. Para una correcta ejecución de bancos trifásicos deben seguirse las siguientes reglas.

Estrella - Deben coincidir todos los inicios de las bobinas o todos los finales de estas en el punto centro de la estrella.

Delta - El inicio de una bobina debe coincidir con el final de la otra.

### **1.5.1 Transformadores monofásicos.**

Los transformadores de distribución monofásicos, tienen sus bornes identificados como lo muestra la Figura 1.3.

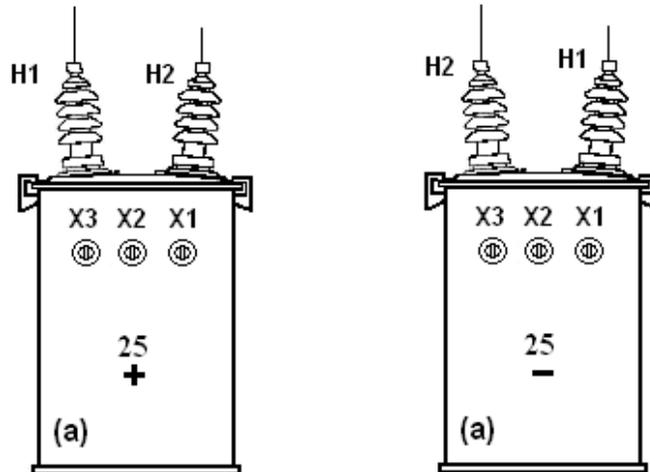


Figura 1.3. Transformador monofásico.

H1 y H2 - bornes primarios del transformador.

X1, X2 y X3 – bornes secundarios del transformador.

± – indica que el transformador es aditivo / sustractivo. No en todos los transformadores se imprimen estos símbolos por lo que la polaridad debe ser verificada en la chapa.

En la práctica, diferentes fabricantes rotulan los bornes de formas diferentes. La identificación de los bornes representada en la Figura 1.3, puede tomarse como referencia a la hora de realizar las conexiones independientemente de los rótulos que aparezcan en el transformador.

(a) indica que el transformador es de alumbrado en caso de que el transformador sea de fuerza se representaría por (f).

En su comportamiento natural, las fases de estos transformadores tendrían respectivamente en la A 120 v, en la B, 120 v y en la C 208 v.

#### **1.5.1.1 Conexión estrella – delta.**

La Figura 1.4 muestra un banco con tres transformadores aditivos.

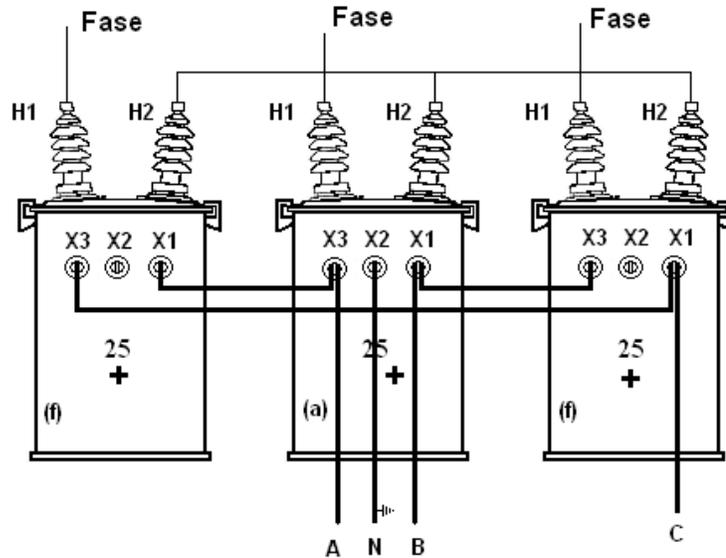


Figura 1.4 Conexión estrella - delta de tres transformadores monofásicos aditivos.

El borne de neutro secundario se conecta a tierra, el cierre por alta no se conecta a tierra y se denomina estrella flotante. Si uno o más transformadores del grupo son sustractivos, las conexiones secundarias se mantienen iguales.

La conexión correcta se logra invirtiendo la conexión primaria de los transformadores sustractivos del banco, como muestra la Figura 1.5.

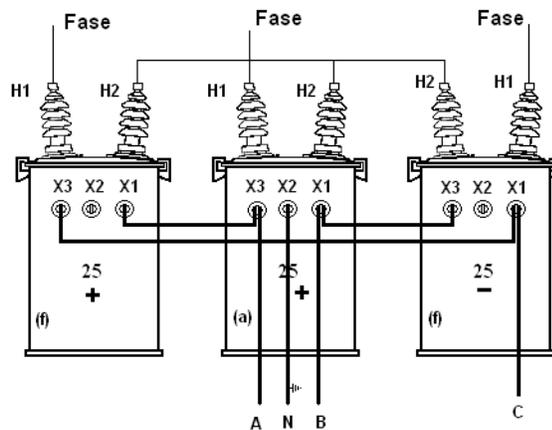


Figura 1.5. Conexión estrella - delta de dos transformadores monofásicos aditivos y uno sustractivo.

### 1.5.1.2 Conexión estrella abierta – delta abierta.

Esta conexión se realiza con dos transformadores monofásicos y se diferencia de la estrella - delta en que el cierre primario está conectado a tierra, como se muestra en la Figura 1.6.

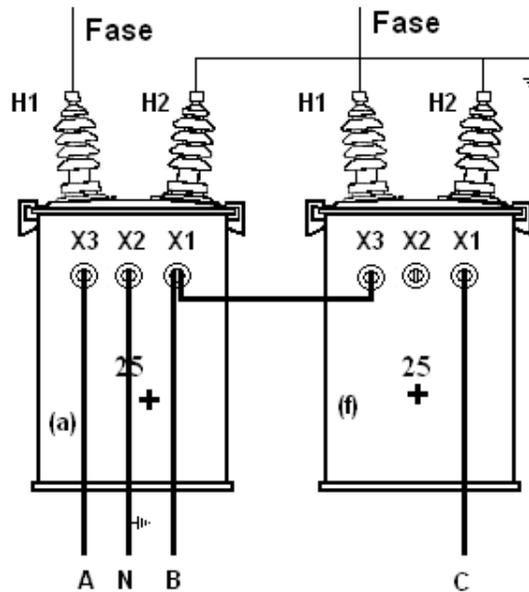


Figura 1.6 Conexión estrella abierta – delta abierta con dos transformadores monofásicos aditivos.

En el caso de que uno de los transformadores sea sustractivo se aplican las mismas reglas que para la conexión estrella- delta como muestra la Figura 1.7.

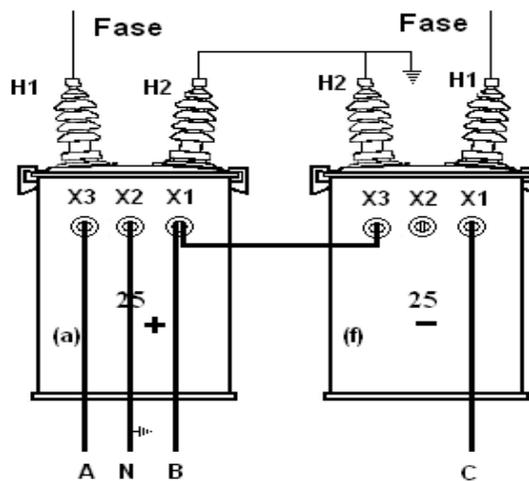


Figura 1.7 Conexión estrella abierta – delta abierta con un transformadores aditivo y uno sustractivo.

### 1.5.1.3 Conexión estrella – estrella.

El cierre de la estrella y el neutro secundario se conectan a tierra, Figura 1.8.

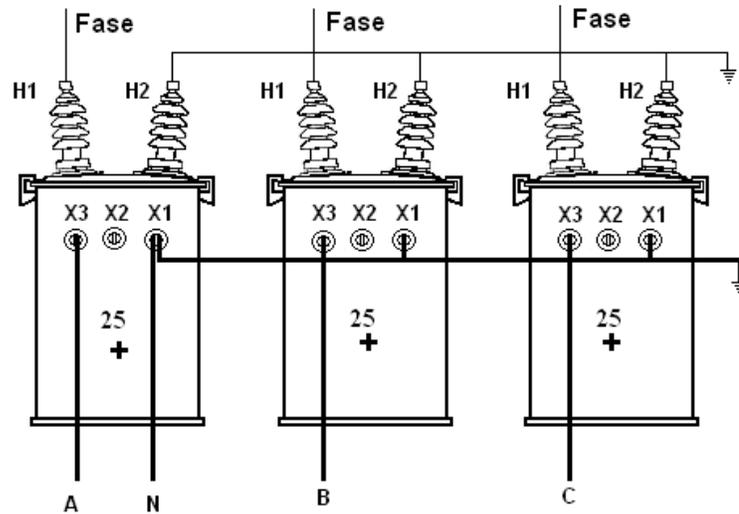


Figura 1.8 Conexión estrella – estrella con tres transformadores monofásicos aditivos

En caso de que uno de los transformadores del grupo sea sustractivo se aplican las mismas reglas que para las conexiones vistas anteriormente como muestra la Figura 1.9.

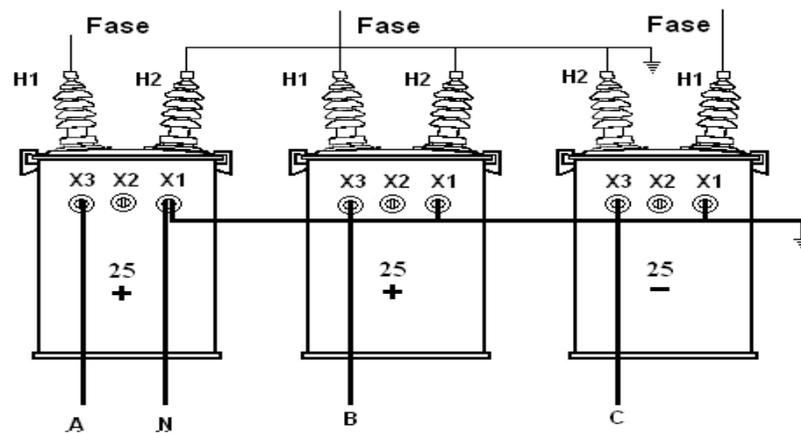


Figura 1.9 Conexión estrella – estrella con dos transformadores monofásicos aditivos y uno sustractivo.

Es extremadamente importante que se preste atención a la polaridad de los transformadores ya que los errores en la ejecución de las conexiones pueden

provocar variaciones de tensión significativas y corto circuitos con disparos de los transformadores en el caso de la conexión estrella – delta.

### **1.5.2 Transformadores monofásicos de 19.1 kV.**

En las líneas de 34.5 kV el uso de los transformadores monofásicos en la ejecución de bancos trifásicos en estrella - delta, con neutro flotante, puede conllevar a que aparezca, con altas probabilidades, el fenómeno de la ferro resonancia.

Esta conexión no se recomienda por lo que se deben utilizar transformadores trifásicos, o las conexiones estrella abierta- delta abierta o estrella-estrella.

### **1.6 Clasificación de cargas.**

Los principales consumidores de energía eléctrica pueden ser de diversos tipos atendiendo a los servicios que estos alimenten. La carga se puede definir como la cantidad que caracteriza el consumo de potencia por parte de receptores o consumidores de energía eléctrica. Un receptor es un consumidor individual y un consumidor es un grupo de receptores [10].

Entre ellos se encuentran:

- Residenciales
- Industriales
- Comercial y de Servicios

#### **Residencial: urbana, suburbana y rural**

La carga residencial tiene la menor densidad respecto a la carga comercial e industrial y decrece de la urbana a la rural, de tal forma que resulta poco económica la electrificación rural, aunque esto se justifica desde el punto de vista social. Actualmente en zonas rurales se utilizan sistemas de distribución monofásicos, si como plantas de energía solar e híbridas.

#### **Comercial y de Servicios**

Estas se encuentran en áreas céntricas, centros y edificios comerciales. La densidad de carga en estos casos es mayor.

## **Carga industrial**

Pequeñas y grandes industrias. Algunas veces la carga industrial se incluye en las cargas comerciales. Este tipo de cargas en general puede tener grandes potencias y contratar el servicio en medias y altas tensiones como son 34,5 kV en adelante.

### **1.7 Elementos de Redes eléctricas**

El desarrollo de las tecnologías y el equipamiento utilizado en las líneas eléctricas, aéreas y soterradas, hace necesario la revisión y actualización periódica de los manuales de diseño, construcción, operación y mantenimiento de estas líneas [11].

#### **1.7.1 Estructuras aéreas**

Es la encargada de soportar el peso de las líneas, los aisladores y los conductores. Estas pueden ser de acero, hormigón, madera o plásticas aunque el material a utilizar depende de muchos factores como la carga, la tensión y la separación necesaria. Con referencia a Cuba el material comúnmente utilizado es madera u hormigón para niveles de tensión desde 4,16 kV, 34.5 kV, hormigón, acero y madera para 110 kV y acero para 220 kV.

Existen diferentes tipos de estructuras como las del tipo A, B, C, D, E, T y las combinaciones de ellas de acuerdo a las características del circuito, por ejemplo para tramos de líneas curvas se utiliza el tipo B, porque este tipo de estructura permite mantener un adecuado aislamiento y una distancia constante entre las líneas a pesar de la curvatura y para tramos de líneas rectas del sistema se dispone la utilización del tipo A.

#### **1.7.2 Conductores eléctricos**

El conductor en la distribución puede aparecer en forma de cable y en los alimentadores secundarios en forma de alambres. En este caso se encuentran fundamentalmente conductores de aluminio reforzado con acero ACSR y en mayor proporción cobre #2. Los primeros son conductores de aluminio trenzados en capas simétricas sobre un alma de acero con una tensión mecánica de rotura

de 340-380 N/mm. Por su parte los conductores de cobre por su característica son los más estables, es cuatro veces más fuerte a la tensión mecánica que el aluminio pero por su alto costo inicial nos obliga a utilizarlo solamente cuando su uso sea imprescindible, por esta razón el conductor más utilizado es el aluminio.

### **1.7.3 Bajantes o Acometida**

Los bajantes del secundario de los transformadores hasta los clientes constituyen un eslabón fundamental en el abastecimiento de energía a los hogares y principales consumidores. Por lo general no resalta a la hora de analizar circuitos eléctricos y monolineales ya que una mala conexión de las mismas produce fallas y recalentamiento en las líneas eléctricas, con límites de alteración de operación en transformadores. Las malas conexiones son producidas por:

Contactores con dimensiones incorrectas: si estos son muy pequeños no tendrán ni la presión ni el área suficientes. Si son muy grandes, no se ajustan bien.

Cuchillas y placas de presión flojas en los seccionadores cortacircuitos e interruptores operados o accionados en Tándem.

Uso de conectores de bronce en conectores de aluminio resultando una derivación de corriente (aislamiento) y corrosión.

Uso de conectores de aluminio en conectores de cobre lo que da como resultado una corrosión y falla de la conexión.

Empalmes de conductores de aluminio envolviendo los hilos de un conductor alrededor de otro.

Este principio de operación es válido para cobre estirado en frío pero los hilos de aluminio no tienen la suficiente resistencia a la tracción. La conexión se puede aflojar causando pérdidas, comenzar arco y quemarse. Para prevenir las malas conexiones se requiere el uso de conectores adecuados todo el tiempo, el uso desconectivo a compresión cuando sea posible y chequear las conexiones existentes. Los dispositivos de monitoreo más efectivos son los detectores de infrarrojos que pueden usarse para localizar puntos calientes sobre el sistema.

### **1.7.4 Aisladores**

Su función principal es aislar los conductores de las estructuras y de tierra. Existen dos grupos fundamentales, de pedestal y de suspensión.

Los aisladores están compuestos por materiales tales como vidrio, porcelana o plásticos resistentes a cambios atmosféricos.

#### **1.7.4.1 Ventajas de los aisladores de suspensión.**

El mismo tipo de aislador puede servir para diferentes niveles de tensión, variando el número de unidades.

Posibilidad de tramos mayores entre postes porque soporta una carga mayor que los de pedestal.

Facilidad en la instalación de los conductores porque se hace de abajo hacia arriba.

#### **1.7.4.2 Desventajas de los aisladores de suspensión.**

- Se necesitan estructuras más altas.
- El costo inicial es mayor.
- Las crucetas deben ser mayores.

### **1.7.5 Crucetas.**

Son diseñadas para soportar una carga vertical, en este caso el aislador de pedestal. Se construyen principalmente de acero galvanizado y/o madera y su longitud depende del nivel de la tensión donde se vaya a utilizar. Para 34,5 kV estas poseen una longitud de 9 pies (2,70 m)

## **1.8 Factores para el cálculo de sistemas eléctricos.**

Para llevar a cabo estudios sobre el ahorro de energía, diseño y demás aspectos relacionados con los sistemas eléctricos, es necesario conocer cada detalle de la utilización de la energía en los equipos que la consumen así como las especificaciones técnicas de los mismos. También es importante conocer los consumidores que operan simultáneamente.

Como herramientas de trabajo para lograr los fines indicados, se definen una serie de factores o términos que permiten conocer los parámetros característicos de cada carga y del sistema eléctrico, y expresar en forma cuantitativa sus variaciones, sus efectos sobre el sistema y la relación entre las cargas.

➤ Factor de Demanda

Es la relación existente entre la máxima y la carga instalada expresada en las mismas unidades. Su valor máximo es uno.

$$F.Dem = \frac{Dem.Máx}{Car.Inst} \quad (1.1)$$

➤ Factor de Diversidad.

Para un intervalo de tiempo dado se define la demanda como el valor promedio que durante ese tiempo es capaz de portar la misma energía que la carga con sus variaciones reales. Cuando se desea representar gráficamente la curva de variación diaria para un circuito de distribución, se obtienen buenos resultados con un intervalo de 15 minutos.

La demanda máxima es individual cuando se considera solo una carga. Para dos o más carga el valor máximo de la demanda se conoce como demanda máxima del conjunto.

$$Fact.Div. = \frac{\sum Máx.Dem.Indiv.}{Dem.Máx.Conj.} \quad (1.2)$$

➤ Factor de Carga.

Es la relación entre la carga promedio y la carga pico en el transcurso de un tiempo dado.

$$F.Car = \frac{P.med}{D.Máx} \quad (1.3)$$

➤ Factor de Coincidencia.

Se define como el inverso del factor de diversidad

$$F.Coinc = \frac{Dem.Máx.Conj.}{\sum Máx.Dem.Indiv.} \quad (1.4)$$

- Factor de pérdidas individuales.

Es la relación entre las pérdidas promedio y la magnitud de pérdida máxima.

$$F.Pérd = 0.5(F.Car.)^2 + 0.5(F.Car.) \quad (1.5)$$

- Horas Equivalentes.

Para apreciar las pérdidas de energía eléctrica se toma el valor de tiempo de pérdidas. Este valor  $\tau$  se determina por los gráficos y son funciones de  $T_m$  y el factor de potencia, para los gráficos típicos se puede utilizar la fórmula empírica siguiente.

$$H.Eq. = 24(F.Pérd.) \text{ Para 1 día} \quad (1.6)$$

$$H.eq = 8760(F.Pérd.) \text{ Para 1 año} \quad (1.7)$$

- Factor de Capacidad.

Relación entre demanda máxima del circuito analizado y la suma de las capacidades de los transformadores instalados en el mismo.

$$F.Cap. = \frac{D.Máx}{\sum KVAinst} \quad (1.8)$$

- Factor de potencia

El factor de potencia es un tema importante para la industria. Se puede definir como la relación entre la potencia activa (kW) y la potencia aparente (KVA) y es el indicativo de la eficiencia con que está utilizando la energía eléctrica para producir un trabajo útil. Un bajo factor de potencia (varía entre 0 y 1) limita la capacidad de los equipos y los arriesga a sobrecargas peligrosas y pérdidas excesivas de energía. El origen del bajo factor de potencia son las cargas de naturaleza inductiva, principalmente motores de inducción, luces fluorescentes, equipos electrónicos y formas de onda distorsionadas (armónicas). El primer

paso en la corrección de un problema de factor de potencia es prevenirlos mediante la selección y operación correcta de los equipos. Los sistemas de compensación de reactivos (condensadores principalmente) son una forma práctica y económica de mejorar el factor de potencia, sobre todo en instalaciones existentes. Su utilización puede ser un problema complejo y es conveniente recurrir a especialistas si no se cuenta con los recursos necesarios para resolverlo.

$$Fp = \cos \varphi = P / S = P / \sqrt{P_{med}^2 + Q_{med}^2} \quad (1.9)$$

Dónde:

P→ Potencia activa se expresa en (kW)

S→ Potencia aparente (kVA)

### **1.9 Conclusiones del capítulo**

- ✓ Existe una gran cantidad de publicaciones sobre el diseño de redes eléctricas de distribución que posibilitan la profundización de conocimientos en este tema.
- ✓ La bibliografía consultada pone de manifiesto que aunque se han realizado algunas investigaciones sobre los circuitos de distribución de Antilla, ninguno de estos trabajos han estado dirigidos a la digitalización de dichos circuitos utilizando el software PowerFactory.

## **2 CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se comentara una breve reseña del PowerFactory, sus principales rasgos, así como simular en dicho software el monolineal actual de distribución eléctrica del municipio Antilla y sus principales análisis como el cálculo de flujo de cargas. Además de las propuestas para la reducción de pérdidas en dicho monolineal de distribución.

### **2.2 Caracterización del objeto de estudio**

El municipio Antilla de la provincia Holguín cuenta con una extensión territorial de 100,81 km<sup>2</sup> y una densidad de población de 12375 habitantes, de ellos 10982 urbanos y 1393 rurales. [12]

Se registran 4620 clientes para un índice de electrificación 99,6% y 18 viviendas aisladas que representa el 0.4% que para este año 2017 se les instalarán paneles fotovoltaicos respectivamente. [13]

Antilla presenta un diagrama monolineal de distribución primaria por donde se rigen los especialistas de la UEB para el análisis de circuitos (Ver *Anexo 1*). Consta de 3 Subestaciones de distribución, las cuales se pueden observar en la Tabla 2.1. Cuenta con conductores de Cobre # 2 y 4 para las líneas de 4,16 kV, y Cobre # 2, # 6, AAAC 78 mm<sup>2</sup> para líneas de 13,8 kV y Cu # 2, # 4, AAAC 78 mm<sup>2</sup> y ACSR 95 mm<sup>2</sup> para 34,5 kV, estas se observan en la Tabla 2.2. Se registran 3 circuitos principales, mostrados en la Tabla 2.3, alimentando generalmente clientes residenciales. Entre las estructuras más utilizadas se encuentran la A, B, C, D, E, EE estas garantizan la separación exacta que deben tener los conductores eléctricos para evitar un posible corto-circuito. Existen instalados dos tipos de postes a lo largo y ancho de todo el terreno, 9,15 m de madera y 10,70 m de hormigón, por lo general estos se encuentran separados los unos de otros a 50 m. Se encuentran 4 interruptores Nulec telecomandados para el control de consumo de las subestaciones y 5 seccionalizadores principales, para dar mantenimiento correctivo sin afectar a toda la población,

permitiendo desconectar una zona del servicio eléctrico y ejecutar los mantenimientos.

Tabla 2.1 Subestaciones en el municipio Antilla.

Subestaciones			
Subestaciones	Capacidad (kVA)	Relación de Tensión (kV)	Ubicación
OE.806	2500	33/4,33	Antilla
OE.807	1000	33/0,48	Molino
OE.808	1600	33/13,8	V. Alegre

Tabla 2.2 Conductores empleados en los circuitos del municipio Antilla.

Tipo	Calibre mm <sup>2</sup>	Diámetro mm	Peso kg/km	Tensión de rotura Kg	R Ω/km		I máx. (A)	Km Nivel de Tensión		
					20°C	70°C		4,16 kV	13,8 kV	34,5 kV
Cu #2	33,63	7,42	305	1389	0,54	0,59	240	9,89	15,44	5,91
Cu #4	21,16	5,89	192	874	0,85	0,94	180	9,89	4,54	5,91
Cu #6	13,29	4,67	120	546	1,35	1,48	120	-	4,45	-
Cu 1/0	53,48	9,35	485	2167	0,34	0,38	310	0,44	-	-
AAAC	78	11,34	272	2402	0,426	0,5	275	-	19,35	4,69
	158	16,31	434	4976	0,211	0,24	460	-	-	4,65
ACSR	95	13,5	328	2875	0,306	0,36	198	-	-	3,32
	90	12,5	298	2501	0,395	0,32	182	-	-	3,73
	70	11,4	243	2140	0,428	0,5	160	-	-	0,97

Tabla 2.3 Circuitos principales del Municipio Antilla.

Circuitos Principales			
Circuitos	BT	Clientes	KVA instalados
Antilla	77	2790	2275
El Ramón	52	1366	1887,5
H-2130	23	459	892,5
Total	152	4620	5055

### **2.3 Introducción al Software DlgSILENT PowerFactory**

El programa de cálculo DlgSILENT es una herramienta computarizada avanzada de diseño asistido en ingeniería para el análisis de sistemas eléctricos de potencia comercial, industrial y de gran escala. La naturaleza actual de los sistemas eléctricos de potencia es la de ser una compleja estructura formada por miles de elementos: generadores, transformadores, líneas, cargas etc., cada uno de los cuales tiene asociado elementos de medición, control, etc. Estas características flexibles nos permiten crear modelos detallados del sistema eléctrico de potencia en una simple base de datos, lo que permite que la funcionalidad del modelo sea fácilmente extendido para especificar un gran rango de características de régimen permanente, dominio del tiempo, de la frecuencia y sistemas estocásticos, para todos los requerimientos de análisis.

Como aspecto significativo de este software y no se puede dejar de pasar por alto es el análisis de cargas desbalanceadas, particularidad que muchos programas computacionales relacionados con la energía eléctrica no presentan.

#### ***2.3.1 Funciones de simulación del DlgSILENT PowerFactory***

Flujo de potencia y análisis de corto-circuito de representación completa e redes AC/DC, y permiten redes malladas de 1,2 y 3 fases, AC o redes DC a ser modeladas.

- Análisis de redes.
- Optimización de sistemas de distribución.
- Dimensionamiento de cables por la norma IEC.
- Simulación dinámica.
- Simulaciones electromagnéticas (EMT).
- Análisis de auto valores.
- Identificación de sistemas.
- Análisis de sistemas de protección.
- Análisis de armónicos.
- Análisis de confiabilidad.
- Planificación de producción.

- Análisis de estabilidad de tensión.
- Análisis de contingencia.
- Base de datos multiusuario, y control de usuarios.

### 2.3.2 Aplicaciones del DlgSILENT PowerFactory

- Sistemas de transmisión de alta tensión:
- Sistemas de distribución de media y baja tensión:
- Sistemas industriales:
- Aplicaciones de generación eólica.

### 2.3.3 Creación de proyectos en DlgSILENT PowerFactory

Una vez instalada la herramienta de diseño DlgSILENT PowerFactory se procederá a crear un nuevo proyecto, para esto en la barra de herramientas se dirige a la pestaña Archivo, Nuevo, Proyecto, como se presenta en la *Figura 2.1*, luego aparece una ventana especificando el nombre del proyecto y la frecuencia de trabajo de la red, viene predeterminada 50 Hz, se trabajará a 60 Hz. Antes de comenzar se recomienda ir en la barra de herramientas al botón: formato de dibujo para especificar el tipo de sabana con la que se quiere trabajar; A0, A1, etc.

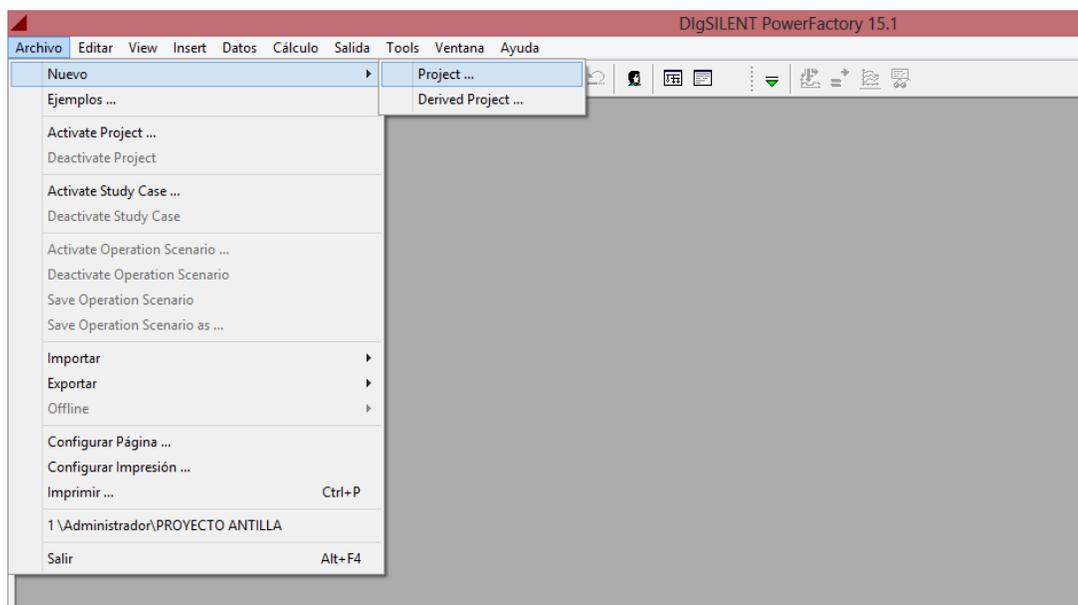


Figura 2.1 Creación de nuevo proyecto en DlgSILENT PowerFactory.

Para diseñar el sistema eléctrico lo primero que se debe hacer es colocar los nodos, líneas, transformadores, cargas, subestaciones si las tiene y un sistema para que este alimente todo el circuito, hay que tener en cuenta que cada línea, transformador y subestación debe tener su tipo elemento respectivamente, estos se crean en el administrador de datos del software.

La ventana del administrador de datos ofrece las ventajas necesarias para controlar y manejar los datos de los proyectos y estados del sistema. En esta ventana se obtiene información acerca de los parámetros y elementos de un sistema de potencia o de otros elementos (objetos) creados; allí pueden ser definidos nuevos casos de estudio, se pueden crear nuevos elementos, pueden ser creados nuevos estados del sistema, se pueden activar o desactivar parámetros, los objetos se pueden cambiar, eliminar, copiar, etc. Todas estas acciones pueden ser tomadas y controladas simplemente por la ventana del administrador de datos. Todas las aplicaciones realizadas por el PowerFactory, están íntimamente ligadas en su proceso al administrador de datos. A continuación se muestra la Figura 2.2 donde se especifican los diferentes elementos que conforman la ventana del administrador de datos.

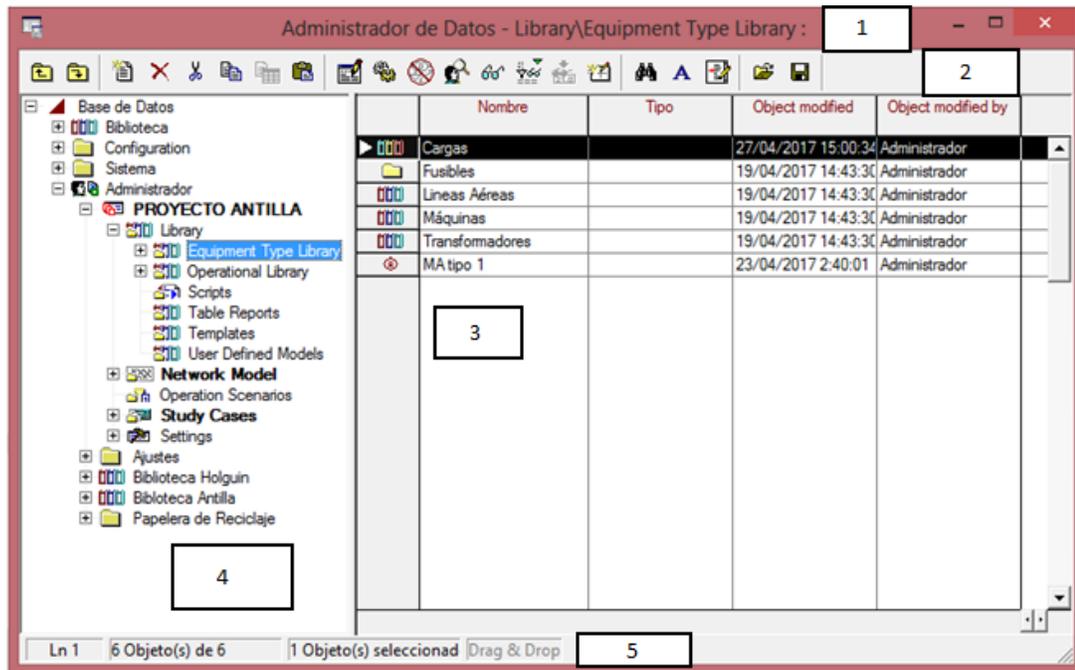


Figura 2.2 Administrador de datos de DlgSILENT PowerFactory

1.- **Barra de títulos:** Ellas nos muestran el nombre del elemento de la base de datos que estamos utilizando.

2.- **Barra de herramientas:** Es la barra local de herramientas de la base de datos.

3.- **Buscador de la base de datos:** Este accesorio a la ventana de la base de datos, es la interfaz entre el usuario y la base de datos del software, donde todos los datos que es introducidos o seleccionados en la ventana de la base de datos es mostrada por este buscador. Esta ventana muestra de forma específica y detallada la información contenida en los elementos seleccionados de la base de datos, aquí se realizan, se editan, se interconectan y se modifican todos los elementos que forman parte de un proyecto. La información de los elementos seleccionados de la base de datos mostrada en este adjunto puede ser modificada, es decir; el usuario puede modificar la información que será mostrada en este agregado de acuerdo a su necesidad o grado de interés.

4.- **Ventana de la base de datos:** Esta ventana es la primordial interfaz entre el programa y el usuario, a través de la misma podemos introducir todo el proyecto a diseñar en la base de datos del programa. La información que es almacenada en esta ventana esta ordenada usando el modo de carpetas aplicado por el sistema para Windows de Microsoft. En esta ventana, se crean los proyectos con todos sus elementos, los casos de estudio que se le aplicaran al mismo, las variantes o escenarios del sistema, etc. Esta ventana mantiene una relación directa con el buscador de la base de datos. También presenta la ventaja que podemos acceder a la ventana de representación gráfica, existiendo una relación bidireccional entre estas ventanas. Toda la información necesaria en un proyecto y la forma como esta ordenada lo encontramos aquí.

5.- **Drag & Drop:** Esta es una herramienta de arrastre que posee el software, la cual nos permite mover objetos dentro del programa sin perder sus propiedades y funciones. También permite el intercambio de escenarios siempre y cuando tengamos el Drag & Drop activado. Es una variante de copiar y pegar de forma rápida, pero se debe tener presente que todos los vínculos de los objetos que

sean movidos deben ser actualizados para que tengan efecto en el diagrama unifilar.

#### **2.4 Comportamiento de los registros eléctricos.**

Por lo general, la mayoría de las subestaciones tienen montados interruptores telecomandados Nulec para las mediciones y las protecciones de las mismas. Mediante el Sistema Operativo para Windows (WSOS), este paquete de software se ha desarrollado para permitir su pleno funcionamiento tele comandado a distancia y para hacer descargas mediante PC o equipos portátiles mediante el puerto RS-232. El programa permite como medida de seguridad la protección por contraseña de los escenarios de configuración. El WSOS corre con dos modos complementarios: El funcionamiento en línea que se controla directamente por el software y el funcionamiento desconectado, que este se conecta a un emulador de PC donde se puede hacer uso de descargas de archivos para su posterior análisis.

Los datos descargados del software WSOS son ejecutados con su emulador y nos muestra una demanda semanal, mensual y anual durante un periodo determinado. Esto garantiza que los operadores puedan exportar sus datos y crear gráficos de líneas respectivamente para el análisis de datos.

A continuación se mostrará en la Tabla 2.4 los datos mensuales desde Mayo del 2016 hasta Abril del 2017 lo cual se pudo concretar que el consumo trimestral promedio del año en análisis osciló por los 3.64 MW y su pico de demanda por los 3.9 MW respectivamente.

Tabla 2.4 Comportamiento de la demanda en el municipio Antilla.

MESES	P (kW)	PICO (kW)	FP
may-16	1215	1324	0,93
jun-16	1305	1459	0,93
jul-16	1274	1364	0,93
ago-16	1306	1426	0,93
sep-16	1151	1273	0,82
oct-16	1256	1337	0,8

nov-16	1203	1325	0,84
dic-16	1179	1297	0,83
ene-17	1042	1236	0,83
feb-17	1289	1398	0,83
mar-17	1191	1289	0,82
abr-17	1148	1257	0,84
PROMEDIO MES	1213	1332	0,86
PROM. TRIMESTRE	3640	3996	0,86

Visto de otra forma analicemos estos mismos datos en la Figura 2.3 mediante gráficos de líneas.

$$\% P\acute{e}rd = \frac{P(kW)}{Psum} \quad (2.1)$$

Donde:

$P(kW)$  → Pérdidas en kW

$Psum$  → Potencia Activa en el Punto Frontera de la Red

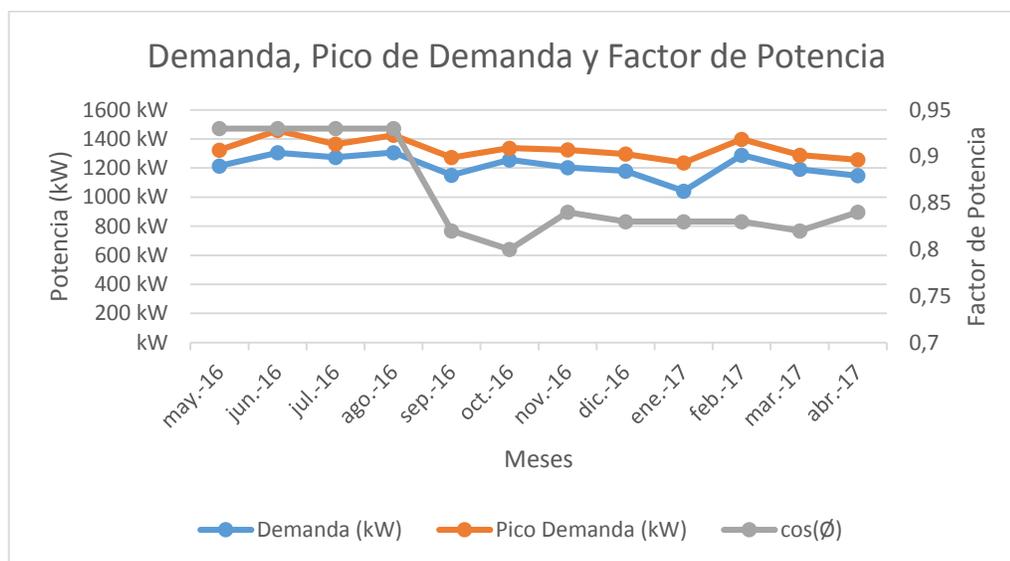


Figura 2.3 Comportamiento de la demanda y el factor de potencia.

Considerando el comportamiento de la Figura 2.3, se puede estimar que el mes de máxima demanda fue agosto del 2016 con 1306 kW y el pico de demanda

máxima fue junio del 2016 con 1459 kW. Esto es considerando que las mediciones realizadas fueron entre las 5:30 PM y las 8:00 PM donde los usuarios residenciales llegan a sus casas y conectan sus equipos a la red eléctrica.

En la Figura 2.4 se muestran la Potencia Activa, Reactiva, Aparente y el factor de potencia de los datos recogidos por el software WSOS. Como aspecto significativo el aumento de potencia reactiva a partir del mes de abril debido al consumidor Molino de Maíz, cuya entidad es penalizada por bajo factor de potencia, dicho  $\cos(\phi)$  habitó por los 0,58, muy bajo, debido a la cantidad de motores asincrónicos que se encuentran en explotación. Las cargas industriales por su naturaleza eléctrica son reactivas a causa de la presencia principalmente de equipos de refrigeración, motores, balastos, etc. La Potencia Reactiva, la cual no produce trabajo físico directo en los equipos, es necesaria para producir el flujo electromagnético que pone en funcionamiento elementos tales como motores, transformadores, lámparas fluorescentes, etc. cuando la cantidad de estos quipos es apreciable los requerimientos de reactivo también se hacen significativos, (a mayor número de equipo que consume reactivo, mas reactivo se requiere) lo que produce una disminución significativa del factor de potencia. Sin embargo la Potencia Aparente o total, es la suma geométrica de las Potencia Activa y Reactiva.

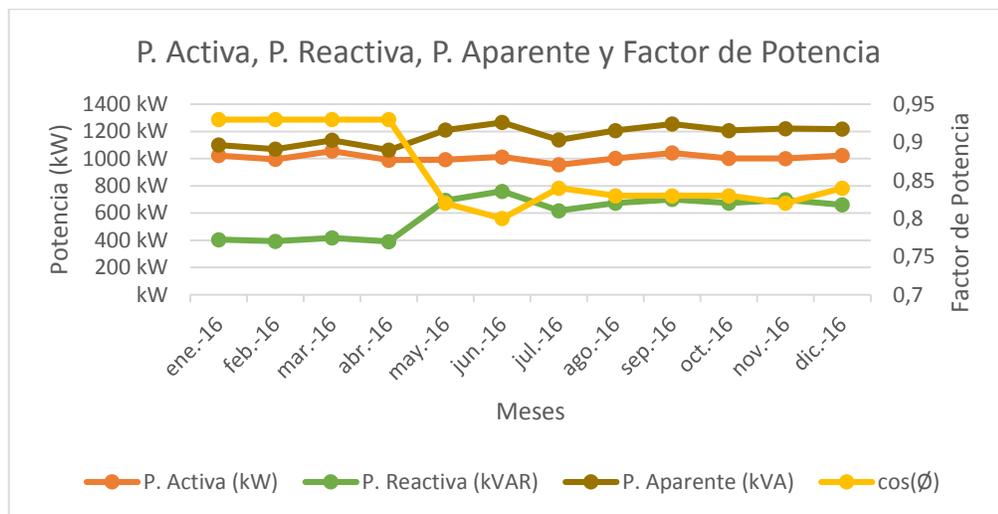


Figura 2.4 Comportamiento de la Potencia Activa, Reactiva y Aparente con el Factor de Potencia.

## 2.5 Levantamiento de cargas

Acto seguido se realizó un detallado levantamiento de cargas del municipio, teniendo en cuenta que ha surgido un elevado incremento de cargas en el área residencial. En el levantamiento se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- ✓ Distancia entre los postes: Se especificaron la distancia entre uno y otro.
- ✓ Tipos de postes: Se especificó el tipo de poste que se utiliza.
- ✓ Tipo de estructura.
- ✓ Transformadores: todo lo relacionado con el dato de chapa de cada uno, ubicación, cantidad de transformadores por banco y dirección.
- ✓ Secuencia de fase.
- ✓ Calibre del conductor: Se tiene en cuenta el calibre de los conductores por fases y el neutro.
- ✓ Desconectivo: Se tomaron los dispositivos desconectivos o seccionalizadores del circuito.
- ✓ Dirección: se detalló la dirección exacta e cada elemento que compone la red.

## 2.6 Penalización por las empresas distribuidoras de energía

Cuando el FP tenga un valor inferior a 0,9 se calcula la penalización por la ecuación 2.2:

$$Penalización(\%) = \frac{3}{5} x \left[ 1 - \frac{0.9}{FP} \right] x 100 \quad (2.2)$$

Cuando el FP tenga un valor superior a 0,9 se estima la bonificación por la ecuación 2.3

$$Bonificación\% = \frac{1}{4} x \left[ 1 - \frac{0.9}{FP} \right] x 100 \quad (2.3)$$

El Molino de Maíz promedia 0,58 de factor de potencia, entonces aplicando la ecuación 2.2 de penalización por bajo factor de potencia el Molino es penalizado por el 33% por lo que la empresa distribuidora de energía eléctrica tendrá derecho a cobrar al usuario un cargo del 33% por la cantidad de kW que resulta facturada,

es decir, el Molino de Maíz factura promedio 220 kW, entonces, la multiplicación de estos es 72,6 kW, por lo que las Empresas distribuidora le cobrarán a dicha entidad el consumo de 292,6 kW.

### **2.6.1 Beneficios de corregir el factor de potencia**

Entre los principales se encuentran la disminución de pérdidas en los conductores, reducción de pérdidas de las caídas de tensión, aumento de la disponibilidad de potencia de transformadores y líneas, incremento de la vida útil de las instalaciones eléctricas y reducción del costo de su facturación de energía eléctrica.

El costo de un banco de capacitores puede tener un retorno de inversión muy corto, debido al ahorro que se obtiene, al evitar los cargos por bajo factor de potencia en el recibo de energía eléctrica.

Se pueden manejar tres arreglos para la aplicación de capacitores los cuales son:

- Compensación individual: únicamente estaría en servicio cuando opere la carga a controlar.
- Compensación en grupo: varias cargas de igual capacidad y período de trabajo, se pueden compensar con un capacitor en común, en un punto como centro de carga.
- Compensación central: cargas distintas que operan a diferentes períodos pueden ser compensadas, con un banco único de capacitores, mejora tensión pero no reduce pérdidas.

Para calcular la capacidad del banco de capacitores se utiliza la ecuación 2.4:

$$kVAR_c = P(kW) * (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (2.4)$$

Donde:

KVAR<sub>c</sub> → Capacidad del Banco de condensadores.

P (kW) → Potencia que demanda la carga.

Una vez conocido el consumo trimestral y su factor de potencia promedio se inserta en sus respectivas cargas y corre el flujo de potencia desbalanceado, lo cual arroja que la línea principal del circuito Antilla de Cu 1/0 presenta una cargabilidad del 109,4%, se puede ver en el color rojo, lo que significa que esta pasada del 100% (Ver Anexo 2), las pérdidas totales en el circuito Antilla oscila por los 242 kW cuyas líneas son de Cu#2 respectivamente, el circuito Ramón con 90 kW, el Molino de Maíz 29,82 kW y el circuito H-2130 con 4,45 kW.

## 2.7 Pérdidas en los conductores

Como se sabe, "Las pérdidas de potencia por el calor generado en los conductores, están en función del cuadrado de la corriente y de la resistencia efectiva que el conductor ofrece al paso de la corriente por efecto Joule". Esta resistencia efectiva deberá ser calculada a la temperatura de operación del conductor y tomar en cuenta los efectos de skin (piel) y de proximidad, según las condiciones de operación o instalación.

$$P_p = I^2 * R \quad (2.5)$$

Donde:

$P_p$ . → Pérdidas de potencia se expresan en vatio (W).

$I$  → Corriente que circula en el conductor se expresa en ampere (A).

$R$  → Resistencia efectiva se ohmio ( $\Omega$ )

Para la selección de los conductores se debe de tener en cuenta varias características relacionadas, luego se mostrara una tabla con la relación de los conductores, que es necesario cambiar y el que se debe usar para una reducción significativa de las pérdidas técnicas en el circuito de distribución primaria Antilla.

Una parte fundamental en el diseño de las redes eléctricas es la relativa a seleccionar la sección de los conductores que tendremos que utilizar para transmitir las potencias activas y reactivas desde la fuente hasta los consumidores. Este aspecto es de gran importancia, si tomamos en cuenta la parte no despreciable en las inversiones que representan los conductores de las

líneas, tanto por su volumen y peso, como por el costo. La decisión de instalar una u otra sección se realiza por varios métodos atendiendo a las características de los sistemas a alimentar, su nivel de tensión y si es aéreo o soterrado.

Parte importante al seleccionar los conductores es lo relativo a los consumidores y su curva de carga y la información que debemos poseer de los mismos, para poder realizar el cálculo de la corriente por los elementos de la red. La selección que realicemos de los conductores, es decir, su sección, debe cumplir siempre con ciertas exigencias mínimas en cuanto a su capacidad en ampere; su sección (F) debe ser mayor o igual que la necesaria para soportar la corriente nominal.

$$F \geq F_{\text{nom carga.}}$$

Dónde: F es la sección del conductor.

También se debe tener en cuenta las exigencias relativas a los esfuerzos o tensiones mecánicas a las que estará sometido el conductor una vez tensado por los equipos correspondientes por lo cual debe cumplirse que:

$$F \geq F_{\text{nom mecánica}}$$

Es igualmente importante contar con el factor calentamiento, es decir el paso de una corriente por un conductor provoca pérdidas calóricas (efecto joule) que elevan la temperatura del mismo; es obligado chequear la tolerancia del conductor seleccionado y su tolerancia máxima de soportar corrientes debido a sobrecargas o cortocircuito, por diferentes causas:

$$F \geq F_{\text{nom sobrecarga.}}$$

Existe según el caso, la consideración de los factores de correcciones para el caso en que las temperaturas a las que se encuentran los conductores no sean las del medio ambiente, 25°C en general; también si es el caso de cables soterrados. Para la selección de los conductores existen diferentes métodos según el nivel de tensión existente. La baja tensión, hasta 1000 voltios, hay varios, como por ejemplo el de la caída de tensión. En mediana y alta tensión,

hasta 220 KV se usan el llamado densidad económica de corriente y el método de los intervalos económicos.

### 2.7.1 Método de densidad económica de corriente

$$F_{ec} = \frac{I_m}{j_{ec}} \quad (2.6)$$

Dónde:

$j_{ec}$  → Densidad económica de corriente en A/mm<sup>2</sup>.

$I_m$  → Corriente máxima en amperios.

$F_{ec}$  → Sección económica en mm<sup>2</sup>.

$$J_{ec} = 1$$

$$T_m = \frac{kWh / día}{P_{m \acute{a}x}} \quad (2.7)$$

$$t = \left[ 0.124 + \frac{T_m}{10^4} \right]^2 * 8760 \quad (2.8)$$

$$\Delta W = \Delta P_m * t \quad (2.9)$$

Donde:

$T_m$  → Duración de la carga máxima.

$P_{m \acute{a}x}$  → Carga máxima.

$t$  → Tiempo de pérdidas máximas.

$\Delta W$  → Pérdidas de energía.

$\Delta P_m$  → Pérdidas de Potencia en el caso de cargas máximas.

Entonces:

$$T_m = 22,29 \text{ h/día}$$

$$T_m = 8135,85 \text{ h/año}$$

$$t = 7699,2 \text{ h/año}$$

En la Tabla 2.5 se muestra el coeficiente de densidad económica para la corriente con los datos del tiempo de duración de la carga máxima y el tipo de conductor a usar.

Tabla 2.5 Densidad económica de la corriente para (Tm) en horas

Conductores	De 1000-3000 h	De 3000-5000 h	De 5000-8760 h
Cobre	2,3	2,1	1,8
Aluminio	1,3	1,1	1

Luego se determina la corriente máxima, para ello nos apoyamos de la siguiente ecuación:

$$I_m = \frac{S_m}{\sqrt{3} * n * V_l} \quad (2.10)$$

Donde:

$I_m$  → Corriente máxima

$S_m$  → Potencia instalada

$n$  → conductores por fase

$V_l$  → tensión de línea

Según la ecuación 2.10 la corriente máxima  $I_m = 460 \text{ A}$

Apoyándose en el *Anexo 3* se escoge el conductor acorde a esa corriente máxima permisible lo cual coincide entre sus parámetros con el Butte 158 mm<sup>2</sup>. Los costos totales de inversión de la línea se incrementan con el aumento de la sección de los conductores.

### **2.7.2 Método a través de la corriente de cálculo**

Este método consiste en determinar la sección del conductor mediante la siguiente expresión:

$$S_c = \frac{1.73 \cdot L \cdot I_{nom} \cdot \cos(\varphi)}{R_e \cdot V_p \cdot V_L} \quad (2.11)$$

Donde:

$S_c$  → área seccional del conductor en  $\text{mm}^2$ .

$L$  → longitud del conductor en metros.

$I_{nom}$  → corriente nominal en amperes.

$R_e$  → resistencia específica del conductor en  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

$V_l$  → tensión nominal de línea en volts.

$V_p$  → caída de potencia máxima permisible, tomado normalmente como un 5% del valor nominal de la tensión de trabajo.

$\cos \varphi$  → Factor de potencia.

## 2.8 Pérdidas en los transformadores

Estas están presentes en el devanado del transformador y en su núcleo. Las del devanado se denominan pérdidas en el cobre y serán de forma variable debido al factor de carga que tenga el transformador. Las del núcleo denominadas pérdidas en el hierro serán constantes solo para cada capacidad, o sea cada transformador según su capacidad tendrá un valor constante de pérdidas en el hierro. En la Figura 2.5 se puede apreciar las pérdidas en el diagrama actual de los transformadores con carga y sin carga de potencia activa y reactiva.

Las pérdidas de energía en el hierro se calculan por la ecuación 2.12:

$$WP_{Fe} = P_{Fe} \cdot 8760 \quad (2.12)$$

Donde:

$P_{Fe}$  → Pérdidas nominales del transformador en el hierro en kW.

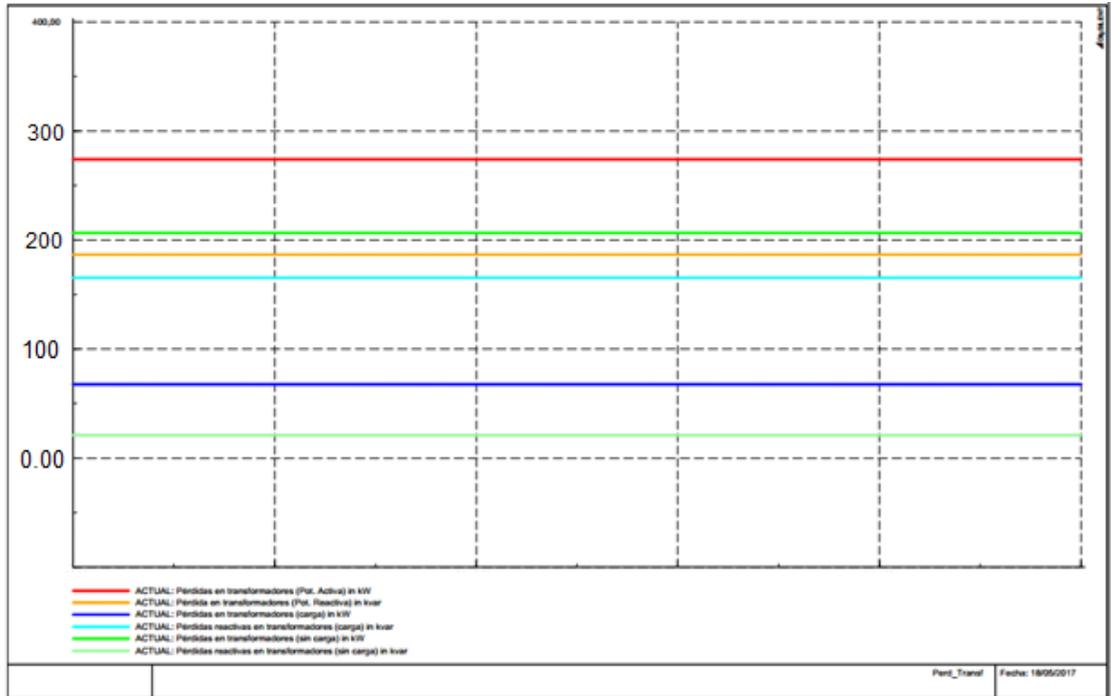


Figura 2.5 Pérdidas de los transformadores en la red Actual.

Las pérdidas en el cobre se estiman por la ecuación 2.13:

$$WP_{CU} = P_{CU} \cdot \left( \frac{S_{\max}}{S_n} \right)^2 \cdot T_{eq} \quad (2.13)$$

$$P_{cu} = I^{2*} R \quad (2.14)$$

$$T_{eq} = 8760 \cdot F_{perd} \quad (2.15)$$

Donde:

$P_{cu}$  → Pérdidas nominales del transformador en el cobre (kW).

$S_n$  → Potencia nominal del transformador (kVA).

$S_{m\acute{a}x}$  → Potencia máxima a la que se carga el transformador en (kVA).

$T_{eq}$  → Tiempo equivalente de pérdidas (h).

Tabla 2.6 Comportamiento de las pérdidas de los transformadores.

Pérdidas de los transformadores					
Monofásicos			Trifásicos		
Potencia (kVA)	Pfe (kW)	Pcu (kW)	Potencia (kVA)	Pfe (kW)	Pcu (kW)
10	0,066	0,146	50	0,268	1,125
15	0,085	0,188	100	0,468	1,771
25	0,133	0,287	200	1,143	2,738
37.5	0,157	0,398	500	1,484	6,883
50	0,199	0,518	1000	2,594	11,115
75	0,242	0,734	1600	3,174	16,587
100	0,302	0,976	2500	5,175	23,1

En la Tabla 2.6 se representan las pérdidas de los transformadores monofásicos y trifásicos en dependencia de su capacidad, lo que influye en el proceso de pérdidas del diagrama.

## 2.9 Vías para la reducción de pérdidas en el diagrama monolineal Antilla

- ✓ Conversión de tensión del circuito Antilla de 4.16 kV a 13.8 kV

La conversión de tensión de 4,16 kV a 13,8 kV en circuitos de distribución se realiza con el propósito de disminuir las pérdidas eléctricas y aumentar la confiabilidad del circuito. En estos se tiene en cuenta los conductores a emplear, transformadores, estructuras, aisladores, etc.

- ✓ Cambio en la sección transversal de los conductores

Esta variante se realiza teniendo en cuenta la carga máxima instalada y el tiempo de duración de la misma, mediante el método de densidad económica de corriente. Teniendo en cuenta que un conductor de cobre ofrece menos tensión de rotura que el aluminio al paso de la corriente eléctrica, el aluminio es buen conductor, pero presenta menos resistencia mecánica que el cobre, por eso, los conductores de aluminio suelen reforzarse con conductores de acero en su radio central, formando el ACSR y el AAAC.

- ✓ División de circuito

Cuando se requiere dar mantenimiento a las subestaciones en el municipio resulta inminente las quejas de los clientes por las largas interrupciones. Para solucionar esto se debe construir una sección de línea aérea que vincule la conexión por baja y alta de las subestaciones, esto significa que si desconecto uno de los transformadores principales de las subestaciones, el o los otros continúen operando y brinden servicio a los clientes de la subestación desconectada. Dicha línea cuenta con 2.2 km de alcance de una subestación de Antilla a la del Ramón de Antilla.

- ✓ Reacomodo de cargas por fase

Esta consiste en eliminar al máximo desbalance de las capacidades instaladas por fase para balancear en gran medida el circuito y no corra por el neutro una corriente elevada.

- ✓ Instalación de bancos de capacitores

Hoy en día es fundamental conectar bancos de capacitores en cargas industriales donde demanden exceso de reactivo, para así compensar su factor de potencia y no pagar recargos a las empresas distribuidoras de energía.

## **2.10 Conclusiones del capítulo**

- ✓ Se realizó una caracterización del circuito con minucioso levantamiento de carga de los bancos de transformadores.
- ✓ Se realizó la simulación del circuito en el software DIgSILENT PowerFactory y se llegó a la conclusión de que no está operando óptimamente debido a la cargabilidad de los conductores en la línea principal del circuito Antilla, que están en mal estado o fuera de norma.
- ✓ Se crearon una serie de medidas para contrarrestar las pérdidas del municipio Antilla.

## **3 CAPÍTULO III RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **3.1 Introducción**

Este capítulo tiene como objetivo primordial realizar el análisis técnico económico de las propuestas partiendo de las simulaciones de las mismas, así como verificar si la propuesta será factible o no.

### **3.2 Variantes para la disminución de pérdidas eléctricas**

Luego del análisis que se realizó al circuito de distribución se verificó que existen grandes pérdidas, fluctuando por el 10 %, lo que se hace necesario tomar una serie de medidas que garanticen la confiabilidad del servicio eléctrico.

Consecutivamente con ellas se necesita reducir en su mayoría las pérdidas no técnicas. Para ello las causas fundamentales son:

- ❖ Contador de energía defectuoso o inadecuado.
- ❖ Contador de energía traficado.
- ❖ Errores en la lectura de contadores de energía.
- ❖ Determinación de los consumos estimados.
- ❖ Circuitos de distribución defectuosos.
- ❖ Tendederas.

### **3.3 Estudios de propuestas**

#### ***3.3.1 Variante #1 División del circuito, reacomodo de cargas por fase sumado a la instalación de un banco de capacitores en las cargas del Molino de Maíz.***

Para esta variante se propone realizar una división de circuito en la subestación de Antilla para disminuir la cargabilidad de la línea principal y sus pérdidas eléctricas, reacomodar las cargas por fase para lograr un balance en el circuito y corregir la corriente que se encuentra circulando por el neutro de los conductores y montar un banco de capacitores en el consumidor Molino de Maíz para reducir la potencia reactiva que existe en la red.

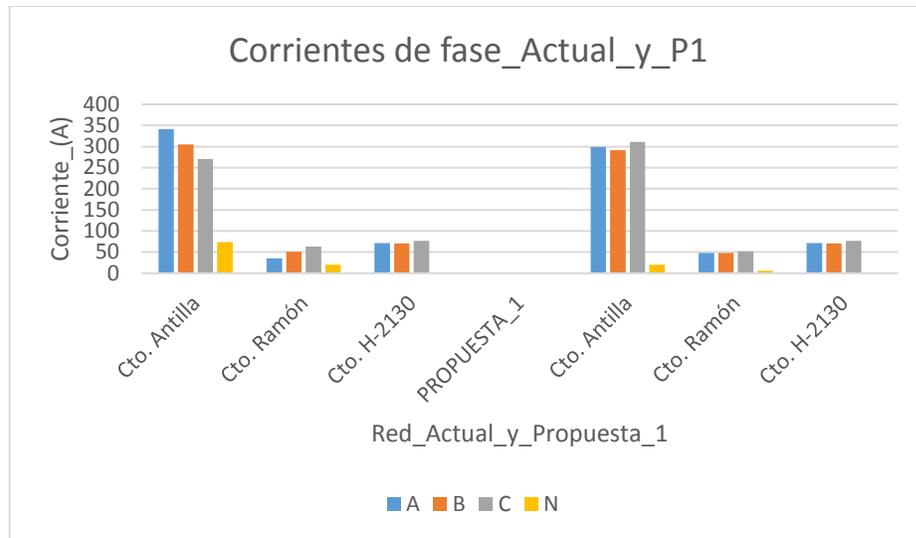


Figura 3.1 Corrientes de Fase en la red Actual y Variante 1

En la *Figura 3.1* se observa la pendiente que existe en las corrientes del circuito Antilla y el Ramón de Antilla de la red actual debido al desequilibrio existente de fase en las cargas. Esto se debe al poco análisis que se realiza en el municipio para lograr un balance de carga en el circuito. Sin embargo, después del reacomodo de cargas por fase se aprecia en la variante 1 como las corrientes están balanceadas, ver la *Tabla 3.1*.

Tabla 3.1 Corrientes circulantes por las fases

Circuito. Antilla	A	B	C	N
Actual	340,99	305,21	270,37	73,39
Variante 1_LT1	168,48	162,9	175,46	1.14
Propuesta 1_LT2	130,42	128,79	135,53	1.10
Variante_1	298,9	291,69	310,99	2.28

La potencia activa suministrada por el SEN se visualiza en la *Tabla 3.2* en conjunto con las pérdidas existentes en la red. A medida que se realizan mejoras en el circuito están se reducen, gracias a los ajustes pertinentes que proporcionan los especialistas para lograr un óptimo aprovechamiento de la potencia suministrada a través del SEN. Gráficamente estos datos se visualizan en la *Figura 3.2*. El porcentaje de pérdidas se calcula por la ecuación 2.1

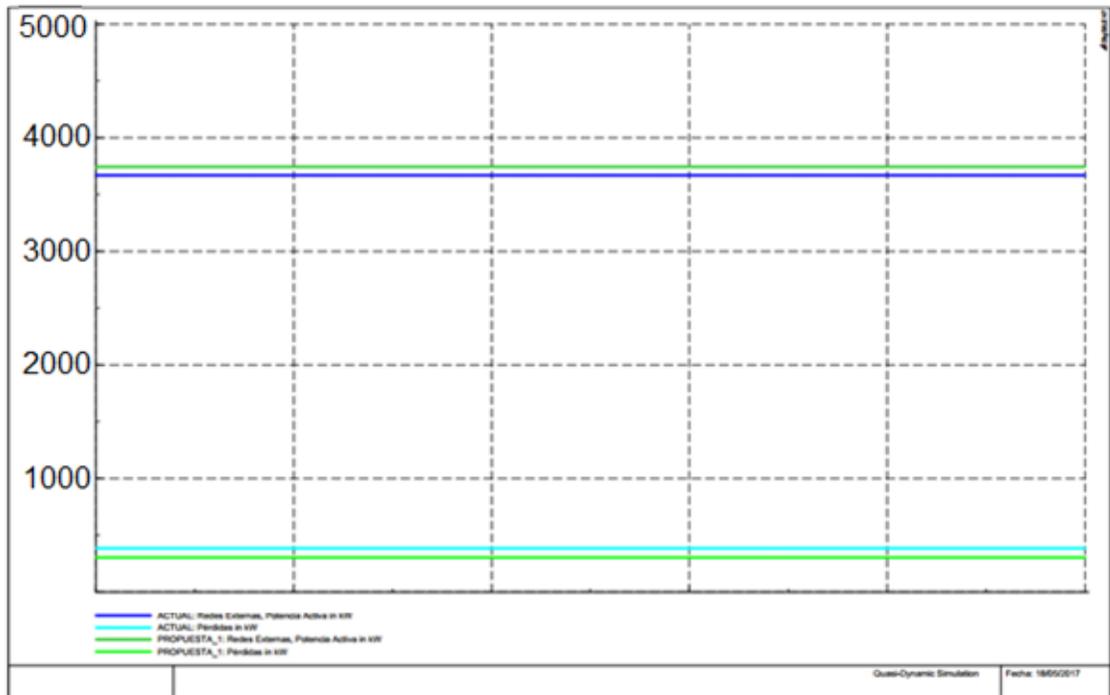


Figura 3.2 Representación de la Potencia Activa reflejada en el punto de Frontera Banes – Antilla y las pérdidas de la red en la red Actual y Variante 1

Tabla 3.2 Comportamiento de las pérdidas en la Red

Red	P.sum	Pérdidas Red	% de pérdidas
Actual	3668,9	384,32	10,47
Variante_1	3927,39	357,75	9,16

Para esta variante de mejora se necesita instalar un banco de capacitores para erradicar el exceso de reactivo en la red. Para ello se utilizó la ecuación 2.4:

El molino se alimenta promedio con 220 kW a un factor de potencia de 0,58 como se había analizado. Para este modelo se propone compensar la potencia reactiva mediante una mejora del factor de potencia [14] a 0,96. Como se muestra en la Figura 3.3.

$$Q_c = P_o (\text{tg } \phi_o - \text{tg } \phi)$$

F.P. ACTUAL	F.P. DESEADO	POTENCIA ACTIVA.	CONDENSADOR
		kw	kVAr
0,58	0,96	220	245

Figura 3.3 Capacidad del banco de capacitores necesaria en el molino de maíz

Según la ecuación anterior el banco de condensadores será de 245 kvar.

Con este nuevo banco de capacitores se reducirá en gran medida el exceso de reactivo en la red, lo que significa una mejora de las pérdidas eléctricas.

### 3.3.2 Variante #2 Conversión total de tensión del circuito Antilla de 4,16 kV a 13,8 kV y cambio total de la sección de los conductores.

Consiste en aumentar el nivel de tensión del circuito Antilla mediante su subestación de 4,16 kV a 13,8 kV, lo que discretiza en gran medida las pérdidas eléctricas.

Por consiguiente:

$$\Delta P = \left[ \frac{P^2}{U^2 \cos(\phi)} \right] * [(R \cos(\phi) + X \text{sen}(\phi)) - j(R \text{sen}(\phi) + X \cos(\phi))] \quad (3.1)$$

Donde:

$\Delta P$  → Pérdidas de Potencia en vatios

U → Tensión en voltios

P → Potencia Activa en vatios

R → Resistencia en ohmios

X → Reactancia

Como se puede apreciar las pérdidas son inversamente proporcionales a la tensión y para las mismas condiciones de cargas las pérdidas en el primario serían:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_1} = \frac{U^2}{U_1^2} \quad (3.2)$$

Donde:

$\Delta P_1 \rightarrow$  Nuevas pérdidas de Potencia en vatios

$U_1 \rightarrow$  Nueva Tensión en voltios

Por tanto:

$$\Delta P_1 = \Delta P * \frac{U^2}{U_1^2} = \Delta P \left[ \frac{(4,16kV)^2}{(13,8kV)^2} \right] \approx 0,09 * \Delta P \quad (3.3)$$

Las pérdidas en el primario disminuirán aproximadamente 11 veces con respecto a las existentes actualmente en el circuito. Lo cual resulta provechoso para los consumidores de energía.

Para la segunda parte de esta variante se propone cambiar la sección de los conductores de todo el circuito Antilla. Los utilizados son de Cu #2, un conductor de cobre, tiene menos resistencia que un conductor de aluminio del mismo tamaño, el aluminio tiene la ventaja de pesar menos y ser más barato, en sus aplicaciones no se usa mucho solo el aluminio, ya que este tiene menos resistencia mecánica que el cobre. Por lo tanto, estos conductores suelen ser reforzados con acero en su centro (ACSR), estando los cables de aluminio entrelazados a su alrededor, por lo tanto, la corriente es transportada por el aluminio mientras que el acero se encarga del soporte mecánico.

En la Tabla 3.3 se aprecia como con la conversión de tensión y cambio en la sección de los conductores de la propuesta 2 se reducen las pérdidas en un 2,7%,

Tabla 3.3 Comportamiento del porcentaje de pérdidas en toda la red

Red	P.sum	Pérdidas Red	% de pérdidas
Actual	3668,9	384,32	10,47
Propuesta_1	3927,4	357,75	9,1
Propuesta_2	3885,03	300,66	7,77

### 3.4 Valoración económica

El análisis de la propuesta 1 está basado en el acomodo de cargas, división de circuito y la instalación de bancos de capacitores para disminuir en gran medida la transferencia de potencia reactiva y así, mejorar las pérdidas existentes en el municipio.

Tabla 3.4 Resumen de Potencias en la red actual y variante 1

Red	P. Activa (kW)	P. Reactiva (kVAR)	P. Aparente (VA)	Cos (Ø)
Actual	3668,91	2353,77	4358,48	0,86
Variante_1	3927,39	1504,16	4205,58	0,94

En la Tabla 3.4 se representa la potencia activa, reactiva y aparente de la red actual y propuesta 1 donde la potencia reactiva decrece en la variante 1 gracias a la implementación de un banco de capacitores de 245 kvar para reducir el exceso de reactivo y se nota un ligero aumento de potencia activa debido al incremento del factor de potencia en la red.

Los gastos de adquisición y montaje mostrados en la Tabla 3.5 relacionan todos los costos en los que es necesario incurrir para la adquisición del equipamiento que se pretende instalar y en la Tabla 3.6 se evidencia el costo de los materiales para su funcionamiento.

Tabla 3.5 Gastos de adquisición

Descripción	kvar/kV	Cantidad	Pecio (CUC)	Total (CUC)
Bancos de condensadores.  Firma ERKA	77/0,48	1	2477,06	2477,06
	59/0,48	1	1834,02	1834,02
	56/0,48	1	1801,50	1801,05
	53/0,48	1	1704,99	1704,99
Flete marítimo y otros gastos.				3045,05
Seguro				9529,76
<b>Total</b>				<b>20391,93</b>

Tabla 3.6 Costo de materiales para la puesta en marcha del banco de capacitores

No.	Descripción	U/M	Cant.	Costo	Costo	Costo
				(CUP)	(CUC)	Total (CUC)
1	Cable de cobre Flex 4x35MM <sup>2</sup> aislamiento XLPE cubierta PVC	M	40	7,45	16,00	648,52
2	Cinta aislante (Teype de goma )	U	15	1,43	7,00	105,00
3	Cinta aislante ( Teype eléctrico)	U	20	0,33	0,83	16,60
4	Terminales de 120 mm <sup>2</sup>	U	25	5,71	15,00	375,00
Costo de los materiales						1145,12
Imprevistos (5%)						57,25
<b>Costo total de los materiales</b>						<b>1202,37</b>

El costo total de la variante No.1, se justifica con 20391,93 CUC para la adquisición y montaje de los bancos de capacitores sumado a 1202,37 CUC que cuestan los materiales para la puesta en marcha de dicha variante, 78 lts de petróleo que significa 68,64 CUC, 37 CUC de salario correspondiente, lo que suma un total de 22739,42 CUC lo que representa en moneda nacional \$ 568485,5.

A través de las simulaciones se demostró la correcta utilización de la energía eléctrica con un adecuado acomodo de carga y la instalación de bancos de condensadores para la compensación del factor de potencia. El empleo de los bancos de condensadores permite elevar el factor de potencia y mejorar la eficiencia energética en el sistema de suministro del municipio Antilla.

La utilización de cuatro bancos de capacitores controlados y ubicados lo más cercano posible a las cargas del Molino de Maíz, individualmente en cuatro secciones de barras del centro de control de motores respectivamente, permite elevar el factor de potencia en la subestación a valores de 0.96, lográndose una disminución de las pérdidas de potencia activa en la red.

Para la ejecución de la variante No. 2, se tomaron en cuenta los transformadores que se encontraban fuera de los parámetros eléctricos establecidos así como los conductores, ya que al aumentar la tensión disminuirá la corriente, por lo que la propuesta requiere del recorrido de todo el circuito de Antilla y el Ramón de Antilla para el cambio total de los transformadores, drop-out y pararrayos en el caso de Antilla y los conductores en Antilla y el Ramón, siendo necesarios los siguientes recursos con un valor total de \$ 140527,55 CUP y 5283,32 CUC mostrados en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Recursos necesarios para la solución de la segunda variante

Recursos	U/M	Cant	Precio (MN)	Precio (CUC)	V. total (MN)	V. Total (CUC)
Transf. de 10 kVA	U	21	709,7	596,15	14903,7	596,15
Transf. de 15 kVA	U	17	830,00	564,40	14110	564,40
Transf. de 25 kVA	U	51	920,00	1876,80	46920	1876,80
Transf. de 37,5 kVA	U	60	939,84	2255,62	56390,4	2255,62
Transf. de 50 kVA	U	37	1139,4	1686,31	42157,8	1686,31
Transf. de 75 kVA	U	1	6170,00	246,80	6170	246,80
Transf. De 2,5 MVA	U	1	24680,00	987,20	24680	987,20
Drop-out	U	188	70,84	532,72	13317,92	532,72
Pararrayos 13,8 kV	U	188	29,12	218,98	5474,56	218,98
Conduc. ACSR 150 mm <sup>2</sup> 28,34 km	kg	6532	9,92	2591,90	64797,44	2591,90
Conduc. AAAC 78 mm <sup>2</sup> 16,32 km	kg	5287,68	10,62	2246,21	56155,1616	2246,21
Valor de los recursos Materiales	Pesos	-	-	-	<b>345076,982</b>	<b>13803,08</b>
Combustible	l	354	-	0,98	-	346,92
Salarios	Pesos	6	-	-	6372,37	254,89
Seg. Social (20% del salario)	Pesos	-	-	-	1274,474	50,98
Costo de ejecución	Pesos				<b>352723,826</b>	<b>14455,87</b>
Valor de los recursos recup. (10%)	Pesos	561	-	-	35272,38	7850,97
Costo total de la variante	Pesos	-	-	-	317451,44	<b>20407,98</b>

Luego de ejecutada la variante en su totalidad serán retirados los 188 transformadores de distribución de 2,4 kV, la misma cantidad de drop-out y

pararrayos. Considerando que estos elementos mantienen un valor residual igual al 10% de su valor inicial se recuperan \$ 35272,38 CUP, que pueden ser utilizados para otros trabajos, de ahí que el costo de los recursos materiales de la variante utilizada para el cálculo económico sea \$ 345076,98 CUP. A esto se le suma el gasto de combustible y el gasto de salario para un mes de trabajo de la brigada de Antilla mostrados en la *Tabla 3.8* que significan \$ 346,92 CUC de combustible y \$ 6372,37 CUP de salario correspondiente por lo que el costo de la variante sería \$ 317451,44 CUP y 20407,98 CUC para un total en moneda nacional de **827650.94 CUP**.

Tabla 3.8 Gasto de salario para 1 mes

No.	Horas	Tfa Hor.	Tfa Hor.	T. Perfecc	Condic.	500001	500522	500301	500701	500901	TOTAL
1	254,00	0,40760	1,65	1,4076	0,24	419,10	357,53	356,24	209,55	122,03	1464,44
2	254,00	0,40760	1,36	0,3935	0,24	345,44	99,95	293,62	172,72	82,88	994,61
3	252,00	0,40760	1,31	0,3935	0,24	330,12	99,16	280,60	165,06	79,53	954,48
4	256,00	0,40760	1,31	0,3935	0,24	335,36	100,74	285,06	167,68	80,79	969,63
5	254,00	0,40760	1,36	0,3935	0,24	345,44	99,95	293,62	172,72	82,88	994,61
6	254,00	0,40760	1,36	0,3935	0,24	345,44	99,95	293,62	172,72	82,88	994,61
	<b>1524,0</b>	<b>2,45</b>				2120,90	857,28	1802,77	1060,45	530,98	<b>6372,37</b>
											<b>6372,37</b>

Donde la numeración de salarios pertenecen en ese orden a:

1. Arlex Arcaya Azucarino
2. Yordanis González Hidalgo
3. Ismel Wiliam Hidalgo
4. Jose A. Marrero Rodríguez
5. Rafael Pérez Sotolongo
6. Leonel Calzadilla C.

En la *Tabla 3.9* se representa el dinero recuperado por disminución de pérdidas en la red.

Tabla 3.9 Valor recuperado por mejoras en la red

Red	P.sum (kW)	Pérd Red (kW)	% Pérd	Energía Anual Consumida (kWh)	Precio \$/kW	Costo total CUP / año
Actual	1222,8	128	10,48	553392	0,3	166018
Propuesta_1	1309,1	119,25	9,11	515160	0,3	154548
Propuesta_2	1290	100,36	7,780	433555	0,3	130067
Diferencia_P1	86,3	-9	-1,4	38232	0,3	<b>286740</b>
Diferencia_P2	67,2	-27,7	-2,7	119837	0,3	<b>748980</b>

La producción de energía eléctrica constituye uno de los métodos de mayor consumo de petróleo en el país. La central termoeléctrica Lidio Ramón Pérez consume 278,5 gramos de petróleo para producir 1 kW, a continuación los análisis pertinentes:

En el mes de abril del presente año, el costo de combustible fue de 268,62 pesos/MWh generado:

Un barril tiene 160 Litros, 1 litro de petróleo equivale a 1020 g. 1HL representa 45,6779 pesos. El precio del combustible por kW significa 0,167 pesos. El importe de un barril cuesta 73,08464 pesos. La cantidad de gramos por kWh generados suma 270,2 g

Como se evidencia en la *Tabla 3.9*, las pérdidas disminuyen considerablemente tomando como referencia un ahorro de energía de 119,84 MWh al año para un 2,7% menos de pérdidas respecto a la red actual del sistema. Esta conservación de energía solo es posible realizando la variante #2 de conversión de tensión y cambio de calibre en la sección transversal de los conductores. Considerando que 1 kWh generado son 270,2 g se obtiene un ahorro total en litros de petróleo de 31745,1 lt, lo que equivale en barriles de petróleo a 198,41 anuales lo que evidencia un capital de \$ 14499,8 CUP.

### 3.4.1 Tiempo de amortización, VAN y TIR

El **Tiempo de amortización** de las inversiones se utiliza para la comparación económica de variantes de inversión y significa el tiempo en que la inversión se amortiza. Normalmente en la energética se considera variante con factibilidad de aplicación, aquellas que posean el **Ta** inferior a 3 años. En caso de comparación de variantes mutuamente excluyente, posee ventajas la variante que tenga menor tiempo de amortización. El tiempo de amortización se calcula como la relación entre el costo de la inversión ( $CF_0$ ) y la diferencia entre los costos de explotación antes y después de la inversión en el período de un año, o sea los ahorros obtenidos por la inversión en el período ( $CF_1$ ). Es fácil de ser aplicada para aquellas inversiones que traen consigo ahorros anuales fijos a partir de su ejecución, lo que ocurre en las variantes utilizadas, por tanto:

$$Ta = \frac{CF_0}{CF_1} \quad (3.4)$$

Dónde:

$CF_0$  → Costo de la inversión (Pesos)

$CF_1$  → Ahorro provocado por la inversión durante el 1er año de explotación (Pesos/años).

El **VAN** es un método para evaluar las variantes de inversión de capital, la obtención del valor presente de los flujos netos de efectivos en el futuro, descontando el costo del capital de la empresa o tasa de requerimiento requerida.

Si el VAN es (+), el proyecto debería ser aceptado, mientras que si es (-) debe ser rechazado. Si los dos proyectos son mutuamente excluyentes aquel que tenga el VAN más alto debería ser el elegido, siempre y cuando sea positivo expresándose de la siguiente forma:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0 \quad (3.5)$$

Donde:

$Vt \rightarrow$  Flujos de caja en cada período t.

$I_0 \rightarrow$  Valor del desembolso inicial de la inversión.

$n \rightarrow$  Número de períodos considerado.

$k \rightarrow$  Tipo de interés.

La tasa interna de retorno, **TIR**, es aquella tasa de interés (tasa de descuento) que hace igual a cero el valor actual de un flujo de beneficios netos.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+TIR)^t} - I_0 = 0 \quad (3.6)$$

Dónde:

$Ft \rightarrow$  Flujo de caja en el período t.

$n \rightarrow$  Número de períodos.

$I_0 \rightarrow$  Valor de la inversión inicial.

En la Tabla 3.10 se muestra el criterio de evaluación de proyectos para las 2 variantes en análisis. Como se puede observar, las dos variantes tienen un tiempo de amortización de 1 a 2 años respectivamente, afín con lo aceptado en la energética cubana para este criterio, por lo que acorde con el mismo las dos variantes son factibles de ser aplicadas. Al utilizar este criterio lo que estamos haciendo es evaluar el proyecto en función de una única tasa de rendimiento por período con la cual la totalidad de los beneficios actualizados son exactamente iguales a los desembolsos expresados en moneda actual.

Aunque las afirmaciones anteriores son ciertas no se debe dejar de pasar por alto una frase que es muy utilizada por inversionistas donde expresan que **es conveniente realizar la inversión cuando la tasa de interés es menor que la tasa interna de descuento**.

El diplomante apoyándose en esta afirmación anterior considera que la variante a proponer para su ejecución es la 2 de conversión de tensión de 4,16 kV a 13,8 kV y cambio en la sección transversal de los conductores, debido a que esta disminuye las pérdidas en la red en un 2,7 % con respecto a la red actual,

garantiza el enunciado anterior en menos tiempo en porciento de TIR que la variante 1 y se ahorra en cuestiones de energía 119837 kWh anuales.

Tabla 3.10 Criterios de evaluación de proyectos

CEP		Variante 1	Variante 2
Costo inversión (CUP)		568485,5	827650,94
Energía ahorrada (kWh)		38232	119837
Energía ahorrada (\$/kWh)		286740	748981,25
Tasa de amortización (años)		1,98	1,11
Tasa de descuento		15%	15%
VAN	1 año	-319146,37	-176362,9
	2 años	-102329,73	389974,53
	3 años	86206,47	882441,86
	4 años	250151,00	1310674,32
	5 años	-	-
TIR (%)		15,28	9,14

### 3.5 Impacto medioambiental

La generación de energía eléctrica en el mundo entero sigue dependiendo en gran parte de combustibles fósiles como petróleo, gas, carbón y otros, de los cuales la mayoría son sumamente contaminantes. Una de las amenazas más graves para el medio ambiente procede de esta contaminación, las emisiones en rápido aumento de los denominados gases “de invernadero”, en especial el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) considerado por muchos científicos como el principal responsable del recalentamiento de la tierra. En las termoeléctricas por cada kW que se genera se expulsa a la atmósfera 0,8 kg de este gas tan perjudicial para el medio ambiente. Aunque los gobiernos se han comprometido con la tendencia mundial hacia una reducción de las cantidades de CO<sub>2</sub> producidas por cada unidad de energía consumida, relativamente pocos países han logrado reducir la expulsión de gases a la atmósfera mediante el paso a los combustibles no fósiles. Al realizar la propuesta expuesta en este trabajo, se dejan de expulsar al medio ambiente 95869.6 kg de dióxido de carbono por el concepto de ahorro de pérdidas eléctricas y cada 11630 kW generado se consume una Tonelada de

petróleo, por lo que se estaría ahorrando 198.41 barriles de combustible al año lo que evidencia en 31.8 toneladas de combustible, significando esto un aporte fundamental para la economía del país.

### **3.6 Conclusiones del capítulo**

- Se cumplió con la reducción del nivel de pérdidas en el circuito objeto de estudio logrando disminuir un 2,7 % del total de pérdidas de la red.
- Se realizó un análisis económico a las variantes, en la cual se pudo concretar un ahorro de energía de 119,84 MWh lo que equivale en \$ 35951 CUP.
- Se realizó una conformación detallada del arte, sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.

## **CONCLUSIONES GENERALES**

- Se estableció la base teórica para el desarrollo del trabajo de diploma.
- Se caracterizó y virtualizó el objeto de estudio.
- Se determinó el nivel de pérdidas técnicas.
- Se erradicó la radialidad del circuito mediante rediseño de la red.
- Se cumplió con la reducción del nivel de pérdidas en el circuito objeto de estudio.
- Se logró enlazar las subestaciones de Antilla y el Ramón de Antilla.

## RECOMENDACIONES

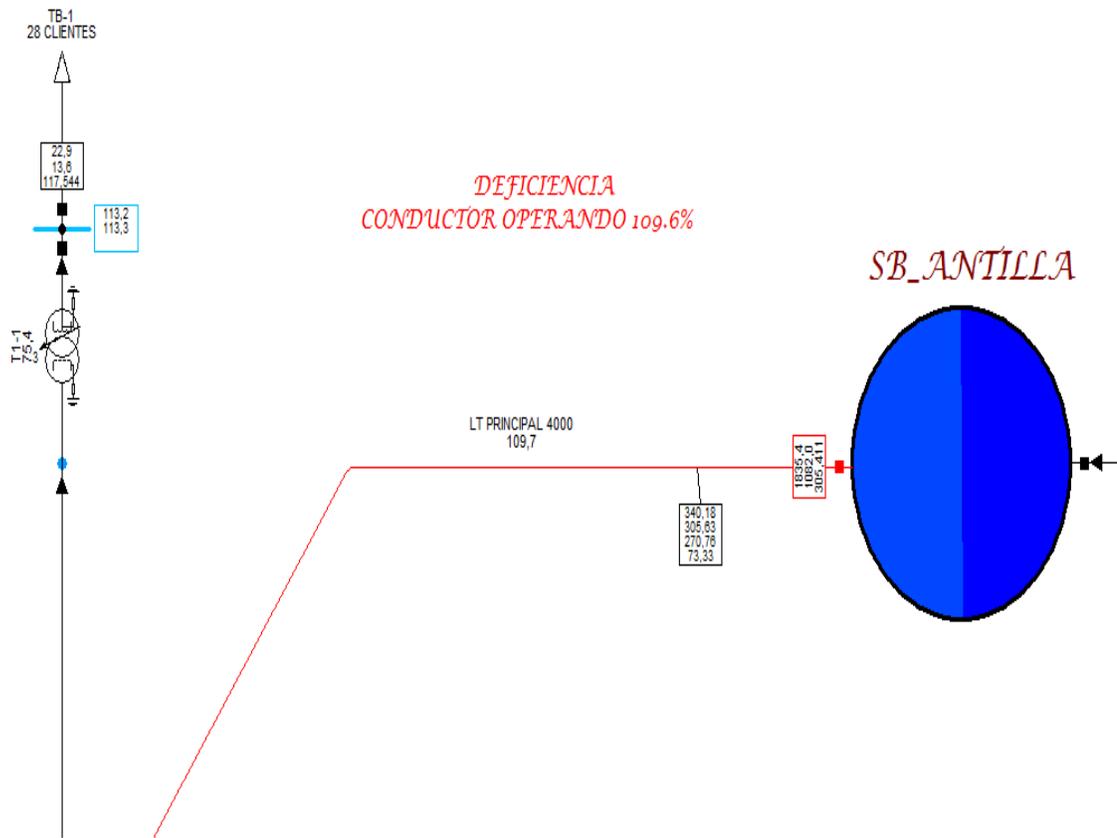
- Estudiar la factibilidad de estas mejoras de circuitos para su posterior aplicación en aquellos municipios donde sean necesarios.
- Presentar este proyecto a la UNE para obtener el financiamiento de la propuesta de mejora.
- Recomendar el software DIgSILENT PowerFactory para su explotación en el centro de estudio Universitario ISMM "Dr. Antonio Núñez Jiménez", lo cual le ayudará al estudiantado a entender más a fondo el mundo de la energética.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Gers, *Alternativas para automatizar sistemas de distribución*, 2013.
- [2] A. S. Gutierrez, *Desarrollo del SEN en el municipio de Antilla*, 2006.
- [3] D. L. Espinosa, "Mejoras en el circuito #6 del municipio Moa," 2010.
- [4] O. G. Tamayo, "Digitalización de los circuitos de distribución eléctrica del municipio Antilla," 2013.
- [5] L. A. Galván, "Análisis para la disminución de pérdidas técnicas en los circuitos Báguanos 1 y 2.," 2014.
- [6] A. R. Labrada, "Análisis para la disminución de pérdidas técnicas en el circuito de distribución primaria H-184 del municipio Urbano Noris," 2014.
- [7] M. V. Rodríguez, "Mejoras en el circuito de subtransmisión TU-6100 para la disminución de pérdidas técnicas en la Provincia Las Tunas," 2016.
- [8] J. D. J. Cervantes, *Sistemas de distribución de Energía Eléctrica*. Mexico D.F, 1995.
- [9] Wikipedia. (2017). *Concepto de Transformadores*. Available: <http://www.wikipedia.org/transformadores.php>
- [10] J. D. C. Juárez, *Sistemas de distribución de Energía Eléctrica*, 1995.
- [11] U. N. Eléctrica, *Manual de construcción de líneas*, 2013.
- [12] D. d. P. Física, "Datos específicos de la Poblacion Antilla 2017," J. A. P. García, Ed., ed, 2017.
- [13] A. S. Santiesteban, "Densidad de electrificación del municipio Antilla," J. A. P. García, Ed., ed, 2017.
- [14] Capacitores. (2017). *Cálculo de Banco de Capacitores*. Available: <http://www.murilloingenieros.com/Calcuo Bateria Condensadores.xls>
- [15] V. K. A., *Manual de proyecto de suministro eléctrico a ciudades*, 1986.
- [16] R. Á. Elías, "Impacto de las mejoras eléctricas en el Consejo Popular del Naranjal municipio Mayarí," 2009.
- [17] G. R. F. Martín, "Reducción de pérdidas eléctricas en el circuito de distribución primaria de Guerrita, municipio Mayarí, 2014.
- [18] H. M. M. Zaldívar, "Reestructuración del circuito de distribución primaria Banes 2 del municipio Banes," 2016.



## Anexo 2 Línea principal del circuito Antilla de Cu 1/0 53 mm<sup>2</sup> sobrecargada



### Anexo 3 Tabla para la selección de los conductores

#### Conductores AAAC

Código	Calibre AWG (MCM)	Sección mm <sup>2</sup>	Diámetro mm	Peso kg/km	Tensión de rotura kg	R Ω/km		I max (A)
						20°C	70°C	
Arnes	1/0	53.48	9.36	147	1733	0.626	0.72	256
Azusa	2/0	67.45	10.52	185	2090	0.497	0.571	296
Anaheim	3/0	85.00	11.79	233	2641	0.394	0.453	342
<b>Butte</b>	<b>312.8</b>	<b>158.50</b>	<b>16.31</b>	<b>434</b>	<b>4976</b>	<b>0.211</b>	<b>0.242</b>	<b>460</b>
Canton	394.5	199.9	18.31	547	6016	0.168	0.193	532
Cairo	465	235.80	19.89	645	7097	0.143	0.161	590
Darrien	559.5	283.5	21.79	773	8525	0.118	0.135	663

#### Conductores de Cobre

Calibre mm <sup>2</sup>	Equivalente aproximado AWG o MCM	Diámetro total mm	Peso total kg/km	Tensión de rotura kg	R Ω/km		I max (A)
					20°C	70°C	
35	2	8.4	122	1155	0.789	0.916	107
50	1	9.6	174	1626	0.603	0.700	128
70	1/0 – 2/0	11.4	243	2140	0.428	0.496	160
95	3/0	13.5	328	2875	0.306	0.357	198
120	4/0	15.2	415	3634	0.249	0.292	256
150	266	17.0	518	4306	0.198	0.227	299
185	336	19.0	640	5964	0.162	0.184	349
240	397	21.6	830	8920	0.124	0.143	417

#### Conductores ACSR

Calibre mm <sup>2</sup>	Equivalente aproximado AWG o MCM	Diámetro total mm	Peso total kg/km	Tensión de rotura kg	R Ω/km		I max (A)
					20°C	70°C	
35	2	8.4	122	1155	0.789	0.916	107
50	1	9.6	174	1626	0.603	0.700	128
70	1/0 – 2/0	11.4	243	2140	0.428	0.496	160
95	3/0	13.5	328	2875	0.306	0.357	198
120	4/0	15.2	415	3634	0.249	0.292	256
150	266	17.0	518	4306	0.198	0.227	299
185	336	19.0	640	5964	0.162	0.184	349
240	397	21.6	830	8920	0.124	0.143	417

## Anexo 4 Comportamiento del VAN y la TIR en las dos variantes

