

**COMPORTAMIENTO DE LAS PÉRDIDAS
DE ENERGÍA CON LA CONVERSIÓN DE
CIRCUITOS DE 4 KV A 13 KV**

***BEHAVIOR OF ENERGY LOSSES WITH
THE CONVERSION OF 4 KV TO 13 KV
CIRCUITS***

MSc. Yulier Ortuño Borroto

MSc. Gretchen Villar Vázquez

Yulier Ortuño Borroto y Gretchen Villar Vázquez, 2021

Sobre la presente edición, Editorial Feijóo, 2021



Atribución-NoComercial-SinDerivadas CC BY-NC-ND

Edición y corrección: Anabel Amil Portal

ISBN 978-959-312-475-1



Editorial Samuel Feijóo, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas,
Carretera a Camajuaní, km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba. CP 54830

Índice

Resumen	6
<i>Abstract</i>	7
Introducción.....	8
Capítulo 1: Redes eléctricas de distribución.....	11
1.1 Sistema de distribución.....	11
1.2 Características de las redes de distribución.....	12
1.3 Importancia de las redes de distribución.....	13
1.4 Partes y componentes de un sistema de distribución.....	14
1.5 Clasificación de las redes de distribución.....	16
1.5.1 Por el servicio que prestan.....	17
1.5.2 Por la densidad de carga.....	17
1.5.3 Por su configuración.....	18
Capítulo 2: Pérdidas de energía eléctrica.....	19
2.1 Clasificación de las pérdidas de energía eléctrica.....	19
2.2 Pérdidas técnicas.....	19
2.3 Pérdidas de potencia (activa y reactiva), de energía y caídas de voltaje.....	21
2.4 Ventajas de los esquemas de distribución a 13 kV.....	21
Capítulo 3: Estado actual y pérdidas de los circuitos de distribución de 4 kV en Camajuaní.....	23
3.1 Características de las subestaciones y circuitos de distribución de 4,16 kV en el municipio de Camajuaní.....	23
3.1.1 Subestación Camajuaní I.....	23

3.1.1.1	<i>Circuito VJ-72 Camajuaní I</i>	24
3.1.1.2	<i>Circuito VJ-129 Camajuaní I</i>	25
3.1.2	Subestación Camajuaní II.....	25
3.1.2.1	<i>Circuito VJ-73 Camajuaní II</i>	26
3.1.2.2	<i>Circuito VK-156 Camajuaní II</i>	26
3.2	Esquema de subtransmisión y lazos	27
3.3	Utilización del software Radial 10.0 para el estudio de redes de distribución.....	27
3.4	Estimación de cargas en los circuitos de distribución	29
3.5	Cálculo de los parámetros de operación actuales	32
3.5.1	Circuito VJ-72 Camajuaní I. Estado actual	33
3.5.2	Circuito VJ-73 Camajuaní II. Estado actual.....	34
	La tabla 3.2 muestra los resultados del flujo de carga obtenidos para el circuito VJ-73 en su estado actual. A pesar de no ser tan grande y complejo, este circuito presenta también un alto valor de pérdidas técnicas.....	34
3.5.3	Circuito VJ-129 Camajuaní Expreso. Estado actual	35
	La siguiente tabla refleja los resultados del flujo de carga obtenidos para el circuito VJ-129 en su estado actual.	35
3.5.4	Circuito VK-156 Camajuaní II. Estado actual.....	36
	A continuación se muestra el resultado obtenido a partir de la corrida realizada en el software Radial del circuito VK-156, de 13 kV, perteneciente a Camajuaní II.	36
	Tabla 3.5 Comparación de los resultados.....	37
	Capítulo 4: Propuestas de mejora y disminución de pérdidas a partir de cambios de calibre y conversión a 13 kV	38
4.1	Análisis de las principales variantes	38
4.2	Normalización del calibre primario	38

4.3	Distribución de las cargas entre las tres fases, alcanzando un por ciento de desbalance menor que el 15 % establecido en los procedimientos	39
4.4	Conversión del circuito completo del voltaje actual 4,16 a 13,2 kV	39
4.5	Análisis de la propuesta de variantes en los circuitos de distribución primaria ...	40
4.5.1	Circuito VJ-72 Camajuaní I con cambio de calibre primario y neutro.....	40
4.5.2	Circuito VJ-72 Camajuaní I con cambio de calibre y convertido a 13 kV	41
	Tabla 4.3 Comparación de resultados del circuito VJ-72	42
4.5.	3 Circuito VJ-73 Camajuaní II con cambio de calibre primario y neutro	43
4.5.4	Circuito VJ-73 Camajuaní II con cambio de calibre y convertido a 13 kV	44
4.5.5	Circuito VJ-129 expreso con cambio de calibre primario.....	45
4.5.6	Circuito VJ-129 expreso con cambio de calibre y convertido a 13 kV	46
	Tabla 4.9 Comparación de resultados del circuito VJ-129.....	47
4.5.7	Comparación de los resultados obtenidos.....	48
	Conclusiones.....	49
	En el presente trabajo se realizó un análisis de algunos circuitos de distribución primaria del municipio de Camajuaní, donde se estudió el comportamiento de estas redes. A partir de ello, se arribó a las siguientes conclusiones:	49
	Referencias bibliográficas	50

Resumen

El estudio más frecuente en una red eléctrica, ya sea de circuitos de transmisión o de distribución, lo constituye el cálculo de las condiciones de operación en régimen permanente. En estos cálculos interesa determinar las tensiones en las distintas barras de la red eléctrica, los flujos de potencia activa y reactiva en todas las líneas, y las pérdidas de energía eléctrica en líneas y transformadores. Los estudios de este tipo en redes eléctricas ya existentes revisten gran importancia, pues buscan resolver problemas de operación económica, regulación de voltaje y ahorro de energía. La presente monografía realiza un estudio de un grupo de circuitos de distribución de 4 kV, para lo que se utilizó el software Radial 10.0, que permite evaluar de forma rápida y sobre bases científicamente justificadas las variables fundamentales que reflejan el comportamiento de los mismos. Se analizaron sus condiciones actuales, régimen de operación y pérdidas de energía. A partir de los resultados obtenidos, se propuso convertir los circuitos de distribución de 4 kV a 13 kV, con las normas establecidas para este nivel de voltaje, realizando además una serie de mejoras iniciales en cuanto a cambio de postes, estructuras, aislamiento, herrajes y calibre de conductores. El resultado refleja una serie de ventajas en todos los aspectos, donde resaltan la disminución de las pérdidas de energía eléctrica en transformadores y líneas, la eliminación de condiciones inseguras y una mejor operación de estas redes eléctricas.

Palabras clave: Redes eléctricas, circuitos de distribución, pérdidas de energía.

Abstract

The most frequent study in an electrical network, whether of transmission or distribution circuits, is the calculation of the steady-state operating conditions. In these calculations, it is of interest to determine the voltages in the different bars of the electrical network, active and reactive power flows in all lines, electrical energy losses in lines and transformers. Studies of this type are of great importance both in existing electrical networks seeking to solve problems of economic operation, voltage regulation and energy saving. This monograph studies a group of 4 kV distribution circuits, using Radial 10.0 software that allows evaluating quickly and on a scientifically justified basis the fundamental variables that reflect the behavior of these circuits. Their current conditions, their operating regime, as well as their energy losses, are analyzed. Based on the results obtained, it is proposed to convert the 4 kV distribution circuits to 13 kV, with the standards established for this voltage level, also making a series of initial improvements, in terms of change of poles, structures, insulation, fittings, and conductor size. The result reflects a series of advantages in all aspects, highlighting the reduction of electrical energy losses in transformers and lines. The elimination of unsafe conditions and a better operation of these electrical networks.

Keywords: Electrical networks, distribution circuits, energy losses.

Introducción

La energía eléctrica apenas existe libre en la naturaleza de manera aprovechable. El ejemplo más relevante y habitual de esta manifestación son las tormentas eléctricas, de las cuales solo obtenemos daños materiales y a menudo humanos. Por tanto, la generación de energía eléctrica y su consumo es una actividad humana básica, ya que está directamente relacionada con los requerimientos y necesidades actuales del hombre.

Todas las formas de utilización de las fuentes de energía eléctrica, tanto las habituales como las denominadas alternativas o no convencionales, agreden en mayor o menor medida al medio ambiente y resultan asimismo muy costosas para la economía de un país, más aún para aquellos que no poseen fuentes renovables de energía. Por ello resulta tan relevante trabajar para que, luego de generada, se pueda utilizar en su totalidad con la menor pérdida posible de energía.

El objetivo de todas las redes eléctricas de potencia consiste en la producción de energía eléctrica en los centros de generación (centrales termoeléctricas, centrales hidroeléctricas, fotovoltaicas, eólicas, etc.) y su transportación hasta los consumidores o clientes (industrias, residenciales, etc.). Para lograr este objetivo de generar y transportar con eficiencia y buena calidad la energía eléctrica, es necesaria la inversión de capital y la realización de complicados estudios y diseños ajustados a las normas internacionales y nacionales. Además, se requieren investigaciones sobre materiales más eficientes y más económicos que garanticen la operación adecuada con un mantenimiento riguroso, para lograr un servicio fiable y de calidad.

Por otra parte, dentro de las redes eléctricas de potencia los circuitos de distribución tienen gran importancia. Los mismos se encargan de hacer llegar la energía a los clientes, pero al mismo tiempo presentan un grupo de pérdidas de energía donde la calidad del servicio se deteriora y se ve afectada también por robos, fraudes y otras pérdidas de carácter comercial, por lo que el sector eléctrico cubano ha comenzado a prestarle gran atención en los últimos años.

Las pérdidas de energía en los circuitos de distribución han alcanzado actualmente un alto valor porcentual, lo que ha dejado grandes preocupaciones dentro del sector. Ello implica la realización de inversiones adicionales para satisfacer la demanda real y la disminución de las

pérdidas de energía eléctrica, debido a que los circuitos de distribución estaban ya obsoletos, con altos niveles de sobrecarga, y esto, sin lugar a duda, implicaba una carga financiera muy elevada para el país.

En este sentido comenzaron a tener lugar grandes cambios en el país con la llegada de la revolución energética, a partir de la cual se impulsó la reorganización total del sector con un gigantesco plan de recuperación de pérdidas de energía eléctrica a nivel de distribución. Para ello las empresas eléctricas de todo el país emprendieron la ardua tarea de llevar a cabo una remodelación de la mayoría de las redes eléctricas ya existentes, con un enorme despliegue de recursos materiales, técnicos y humanos. Fue imprescindible emplear programas y herramientas computacionales para evaluar problemas y obtener buenas alternativas de soluciones fiables.

En el país aún no ha concluido el plan de recuperación de pérdidas de energía eléctrica de la revolución energética: las empresas eléctricas tienen como principal objetivo el aumento de la eficiencia en el planeamiento, diseño, construcción y operación de las redes eléctricas (con tendencia hacia la automatización). Estas metas propuestas en el país pretenden llevar la electricidad al más alto nivel de confiabilidad en la prestación del servicio, lo que incluye la duración del servicio con la mejor calidad posible y la menor frecuencia de interrupciones.

Por la importancia que presenta este tema en la actualidad, nos hemos propuesto realizar un estudio de pérdidas de energía en tres circuitos de distribución de 4 kV en el municipio de Camajuaní, debido al alto valor que existe en estas redes eléctricas, asociado al mal estado general de las líneas, la presencia de calibres no adecuados y un voltaje de distribución obsoleto. Esta es la problemática que se desea abordar en el presente trabajo.

Debido a los avances en los métodos computacionales y al desarrollo de la ciencia y la tecnología, la electricidad cuenta hoy con el software Radial, creado en la Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, el cual permite evaluar, de forma rápida y sobre bases científicamente justificadas, las variables fundamentales que reflejan el comportamiento de las redes eléctricas de distribución a partir de la actualización de los monolineales de los circuitos primarios.

Luego, se realizó un estudio en Radial 10.0 de los circuitos de distribución de 4 kV en su estado actual. Este estudio incluyó los circuitos VJ-72 y VJ-73 de 4 kV, y los circuitos VJ-

129 y VK-156 de 13 kV, a partir de las corridas por flujo de carga, con vistas a proponer mejoras y a disminuir las pérdidas técnicas mediante dos acciones:

- Cambios de calibre del conductor primario.
- Conversión de 4 kV a 13 kV.

Capítulo 1: Redes eléctricas de distribución

Las redes eléctricas de distribución incluyen todos los elementos de transporte de la energía eléctrica comprendidos entre las subestaciones primarias, donde la transmisión de potencia se reduce a niveles de distribución.

Un sistema de distribución normal consta de redes de subtransmisión y de subestaciones de distribución que transforman la energía a una tensión más baja, adecuada para la distribución local, que constituyen alimentadores o *feeders*, los cuales alimentan un área bien definida. Luego se tienen las redes de distribución de baja tensión, que transportan la energía a lo largo de las calles y paseos.

La función de los sistemas de distribución es recibir la energía eléctrica de las centrales de generadoras o subestaciones primarias y distribuir a los usuarios la tensión adecuada, con la conveniente continuidad del servicio y la calidad del suministro para los distintos usos.

1.1 Sistema de distribución

Un sistema de distribución de energía eléctrica puede definirse como el conjunto de elementos encargados de conducir la energía desde una subestación de potencia hasta el usuario. Básicamente, la distribución de energía eléctrica comprende las líneas primarias de distribución, los transformadores de distribución, las líneas secundarias, las acometidas y los medidores.

De la definición anterior se puede observar que un sistema de distribución forma parte de un sistema eléctrico, ya que este último comprende la generación, la transmisión y la distribución, por lo que prácticamente en todo el mundo se separa el estudio de ambos componentes. Es decir, por una parte se trata la generación y la transmisión, y por otra se estudia la distribución. Incluso en las empresas eléctricas de todo el mundo cada parte es atendida por gerencias diferentes y por grupos de ingenieros especializados en cada una de estas ramas de la ingeniería eléctrica. Los dos campos se han especializado de tal modo, que han dado como resultado que sea muy difícil encontrar a una persona que domine estas dos áreas del conocimiento con la misma profundidad.

Como resultado de esta brecha que se ha abierto entre los sistemas de potencia y los sistemas de distribución, actualmente no solo existe una diferencia entre estos dos

campos de la ingeniería eléctrica en las empresas, sino también en las instituciones de nivel superior, donde ambos sistemas se contemplan como materias diferentes en los planes de estudios. Por esta razón, en la literatura técnica también se aborda la temática referente a las redes de distribución de manera separada respecto a los sistemas eléctricos de potencia.

1.2 Características de las redes de distribución

Las redes de distribución presentan características muy particulares que las diferencian de los sistemas de transmisión. Entre estas se distinguen:

- Topología radial.
- Razón R/X alta (líneas de resistencia comparables a la reactancia).
- Múltiples conexiones (monofásicas, bifásicas, etc.).
- Estructura lateral compleja.
- Cargas de distinta naturaleza.
- Líneas sin transposiciones.
- Cargas distribuidas [1,2].

Los sistemas de distribución son típicamente radiales, es decir, el flujo de potencia nace solo en un nodo. Este nodo principal es el que se reconoce como la subestación, que alimenta al resto de la red (ver figura 1.1). En la subestación se reduce la tensión del nivel de alta tensión (AT) al de media tensión (MT) [3,4].

La distribución se hace en el nivel de MT o en baja tensión (BT). Los clientes residenciales o comerciales se alimentan en BT; los clientes industriales se alimentan en MT o BT, según los requerimientos particulares de cada uno de ellos [4,5].

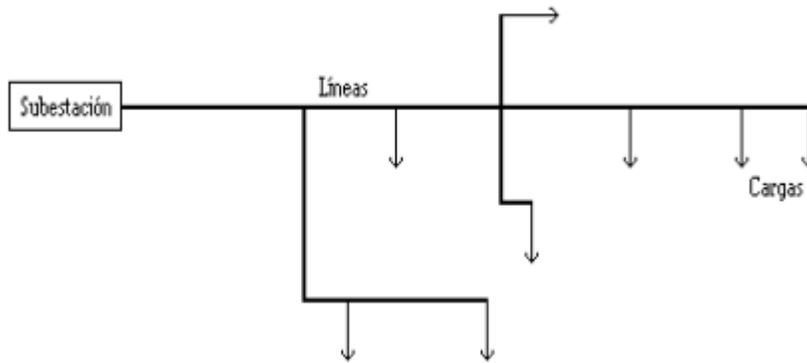


Figura 1.1 Red de distribución típica

En estos sistemas se pueden encontrar muchos tipos de conexiones: trifásicas, bifásicas o monofásicas. Si bien es cierto que en MT predominan las redes trifásicas, es frecuente encontrar cargas bifásicas, especialmente en zonas rurales. Sin embargo, es en BT donde se encuentran las más variadas conexiones, como consecuencia de una mayoría de cargas residenciales de naturaleza monofásica. Los desbalances que se generan en BT tratan de amortiguarse repartiendo equitativamente las cargas en las tres fases [1,2,3].

1.3 Importancia de las redes de distribución

Las redes de distribución ocupan un lugar importante en el sistema electroenergético, donde su función es tomar la energía eléctrica de la fuente y distribuirla o entregarla a los consumidores. La efectividad con que las redes de distribución realizan esta función se mide en términos de regulación de voltaje, continuidad del servicio, flexibilidad, eficiencia y costo.

El costo de las redes de distribución representa aproximadamente el 50 % del costo del sistema eléctrico en su conjunto. Las tareas de la distribución son: el diseño, construcción, operación y mantenimiento del sistema para poder brindar, al menor costo posible, un servicio eléctrico adecuado a un área determinada, en la actualidad y en un futuro próximo.

Las redes de distribución toman diferentes formas en dependencia de las características de la carga a servir. Existen, sin embargo, varios principios comunes que estas deben cumplir. De este modo, las redes de distribución deben brindar servicio con un mínimo de variaciones en el voltaje y un mínimo de interrupciones. Las interrupciones del servicio deben ser de

corta duración y afectar al menor número posible de consumidores. El costo total, incluyendo los de construcción, operación y mantenimiento del sistema, debe ser lo más económico posible, en dependencia de la calidad del servicio requerido por la carga en cuestión.

El sistema debe ser flexible para permitir exposiciones pequeñas y cambios en las condiciones de carga con un mínimo de modificaciones y gastos. Como se puede apreciar a partir de lo anteriormente expuesto, el diseño, construcción, mantenimiento y operación de las redes de distribución son factores muy importantes a tener en cuenta para poder brindar un servicio eléctrico de calidad a un costo razonable.

1.4 Partes y componentes de un sistema de distribución

Un sistema de distribución está compuesto fundamentalmente por:

- Líneas de subtransmisión.
- Subestaciones de distribución.
- Seccionadores y desconectivos (interruptores, cuchillas, *drop out*).
- Alimentadores primarios.
- Banco de capacitores.
- Transformadores de distribución y capacitores.
- Alimentadores secundarios.
- Alimentadores de servicio.
- Sistemas de protección y medición.

Líneas de subtransmisión: Son las líneas que partiendo de una fuente, planta o subestación, van a alimentar subestaciones de distribución o industriales, en las cuales el voltaje se reduce a los valores requeridos para el servicio de la industria o para los alimentadores de los circuitos de distribución. Sobre la base de esta definición, pueden considerarse como de subtransmisión aquellas líneas que van desde las subestaciones de enlace hasta la subestación industrial, que cuentan con un nivel de voltaje de 34,5 kV. Asimismo, pueden clasificarse de este modo las líneas que van desde la subestación de salida de la planta hasta una subestación de distribución (SD), con un nivel de voltaje de 34,5 kV.

En este análisis se toman en cuenta las líneas de subtransmisión por el servicio que prestan y no por el nivel de voltaje de las mismas. Normalmente, el voltaje de las líneas de subtransmisión es de 34,5 kV y en muchos casos se toma este nivel para definir estas líneas, aunque esto no es lo correcto.

Subestaciones de distribución: Se consideran de distribución las subestaciones que reciben las líneas de subtransmisión y reducen su voltaje a los valores normales en los circuitos de distribución desde 2,4 hasta 13,2 kV.

Seccionalizadores y desconectivos: Son dispositivos que sirven para conectar y desconectar diversas partes de una instalación eléctrica, para efectuar maniobras de reparación o mantenimiento y de protección. Entre estos pueden mencionarse: los interruptores Nulec, los interruptores de aire, pasas *bypass (drop out)*, cuchillas monopolares, entre otros.

Alimentadores primarios: Son las líneas que saliendo de una subestación de distribución van a alimentar a los transformadores de distribución. Su valor de voltaje varía desde 2,4 hasta 13,8 kV. Aunque ya en nuestro país pueden considerarse las redes de 33 kV como alimentadores primarios debido a la presencia de transformadores de 19,1 kV/120-240 volt a partir de conversiones efectuadas.

Transformadores de distribución: Son los transformadores destinados a reducir el voltaje de los valores usados en los circuitos de distribución primaria de 2,4 a 13,8 kV, y de 19,1 kV a los valores de utilización residenciales, para bombeos e industrias.

Banco de capacitores: Son dispositivos para compensar reactivos en las líneas de distribución, con lo que se logra estabilidad en el voltaje de las mismas.

Alimentadores secundarios: Son las líneas energizadas al voltaje secundario que parten de los transformadores y que junto al conductor neutro distribuyen el servicio a los consumidores del área.

Alimentadores de servicio: Son las líneas que parten de los alimentadores secundarios y se extienden hasta los metros contadores de los consumidores, dígame acometidas, corridos de fachadas, conductores pretensados, entre otros.

Sistemas de protección y medición: Son los instrumentos conectados a los consumidores, destinados a la medición y protección. Entre estos se cuentan los metros contadores y *breakers*.

1.5 Clasificación de las redes de distribución

Los sistemas de distribución pueden clasificarse de diversas formas:

I. Por su ubicación o tipo de construcción:

- Aéreas.
- Soterradas.
- Mixtas.

II. Por el servicio que prestan:

- Residenciales.
- Industriales.
- Comerciales.
- Alumbrado.
- Mixtas.

III. Por la densidad de carga o tipo de área servida:

- Rurales.
- Urbanas.
- Mixtas.

IV. Por su configuración:

- Radiales.
- Lazo.
- Red.

V. Por su ubicación.

Redes de distribución aéreas: Se conocen como redes de distribución aéreas ~~aquella~~ en las que los alimentadores primarios, ramales, transformadores, interruptores, seccionalizadores, etc., están soportados por estructuras que los mantienen separados de la tierra a la altura establecida por las normas.

Redes de distribución soterradas: Son aquellas en las cuales los alimentadores primarios, ramales, transformadores, etc., se hallan bajo tierra.

Redes de distribución mixtas: Son aquellas en que determinadas partes de la red se encuentran soterradas, mientras que en otras partes de la misma la distribución se realiza por líneas aéreas.

1.5.1 Por el servicio que prestan

Atendiendo al servicio que prestan, las redes de distribución pueden clasificarse en: residenciales, comerciales, industriales, de alumbrado y mixtas. Sus nombres respectivos indican el tipo de cargas a servir por dichas redes. Las características de estas cargas son diferentes y las mismas serán consideradas en detalle posteriormente. Las redes más comunes en las zonas urbanas son mixtas.

1.5.2 Por la densidad de carga

Según la densidad de carga a servir, las redes de distribución pueden clasificarse en urbanas, rurales y mixtas. Ahora bien, no es posible establecer una definición que permita determinar cuándo un circuito deja de ser de distribución urbana y pasa a ser de distribución rural y viceversa. Para establecer cuándo un circuito se considera de uno u otro tipo de distribución, necesitamos utilizar el término *densidad de carga*, esto es, los kVA por kilómetros o los kVA por kilómetro cuadrado que solicita la carga a servir. Basándose en esta disposición podemos establecer como distribución rural típica aquella que sirve una carga de 50 kVA o menos, distribuida en una longitud de 2 a 3 km aproximadamente, mientras que una distribución urbana típica sería aquella que sirviera una carga de 2 000 kVA/km. Ahora bien, las redes urbanas tienen lógicamente una densidad de carga mayor en el centro de la ciudad que en sus alrededores, donde en muchos casos el circuito se va extendiendo para servir solicitudes cada vez más distintas unas de otras. En esta zona de densidad de carga es difícil establecer cuándo el circuito deja de ser de distribución urbana y pasa a ser de distribución rural.

En los circuitos de distribución urbana se necesita tener mejor regulación de voltaje, mayor seguridad en la continuidad del servicio y un porcentaje menor de pérdidas que en los circuitos rurales. En los circuitos de distribución rural normalmente es el factor mecánico el que determina el calibre del conductor. La regulación del voltaje y la continuidad del servicio no son factores determinantes debido a que las características de las cargas permiten más flexibilidad.

Un factor característico de las líneas rurales es el uso de tramos mayores y de postes más bajos debido a que la separación vertical permisible es menor y no existen circuitos de distribución secundarios. Al estar separados 30 cm entre sí, estos limitan el tramo permisible. En algunos casos, cuando es necesario extender circuitos de distribución secundarios en líneas rurales ya existentes, se instalan postes de menor altura para soportar solamente circuitos secundarios.

Estos circuitos también pueden instalarse directamente en el poste si el número de conductores a instalar y la altura de los postes existentes lo permiten.

1.5.3 Por su configuración

Atendiendo a su configuración, las redes de distribución pueden ser de tipo radial, de lazo y malla. Sus nombres indican la configuración que toma la red con el fin de brindar el servicio solicitado. Las características de cada uno de estas redes son diferentes. Las redes más comúnmente utilizadas en distribución son las del tipo radial.

Capítulo 2: Pérdidas de energía eléctrica

2.1 Clasificación de las pérdidas de energía eléctrica

En nuestro país la energía eléctrica se genera empleando mayoritariamente tecnologías que funcionan a partir de la quema de combustibles fósiles, ya sean centrales térmicas o grupos electrógenos agrupados en baterías para la generación distribuida. En menor medida, también se emplean para la satisfacción de la demanda eléctrica nacional determinadas tecnologías que permiten el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, aunque en el proceso de generación, transmisión y distribución a cada consumidor siempre se producen pérdidas en una u otra medida. En este epígrafe no se tratarán las pérdidas en generación, pues estas varían de acuerdo a la composición del sistema y no constituyen objeto de análisis de este trabajo.

Las pérdidas de energía eléctrica se pueden clasificar en dos grandes grupos según su origen: pérdidas técnicas y pérdidas no técnicas o comerciales. Como uno de los objetivos de este trabajo es la reducción de las pérdidas técnicas en los circuitos de distribución, a continuación dedicamos un subepígrafe a estas.

2.2 Pérdidas técnicas

Las pérdidas técnicas se deben a la energía consumida por los equipos relacionados con los procesos de generación, transmisión y distribución. Estas son un fiel reflejo del estado y la ingeniería de las instalaciones eléctricas, dependen básicamente del grado de optimización de la estructura del sistema eléctrico y de las políticas de operación y mantenimiento. Su mayor concentración es ocasionada por la transmisión de energía eléctrica a través de conductores, transformadores y otros equipos del sistema de distribución (efecto Joule, pérdidas en el núcleo), así como por las ocasionadas en las líneas de transmisión por el efecto corona. El mejoramiento de las redes y la eliminación de las zonas de baja tensión eléctrica constituyen dos de los más importantes programas de la Revolución Energética.

Las pérdidas descritas hasta aquí son inevitables y se conocen como «pérdidas técnicas». Estas representan una verdadera pérdida de energía desde el punto de vista físico; es energía

que no puede ser utilizada de ninguna manera. Las pérdidas técnicas son imposibles de eliminar completamente, por lo que cualquier medida que permita reducirlas representa un beneficio para la empresa y para la economía en general. Estas pueden subdividirse, a su vez, según el tipo y las causas de origen.

Según el tipo se pueden considerar las siguientes:

1 Pérdidas por transporte:

- En las líneas de transmisión.
- En las líneas de subtransmisión.
- En los circuitos de distribución primaria.
- En los circuitos de distribución secundaria.
- En acometidas.

2 Pérdidas por transformación:

- En transformadores de transmisión-subtransmisión.
- En transformadores de subtransmisión-distribución.
- En transformadores de distribución.

3 Pérdidas en las mediciones: Son las que se producen en los equipos y aparatos de medición, incluidas las pérdidas en los transformadores de medición cuando esta sea indirecta.

Según la causa de origen:

- 1) Pérdidas por efecto corona: Estas son solo consideradas en los niveles elevados de voltaje.
- 2) Pérdidas por efecto Joule: Las ocasionadas por el paso de la corriente a través del conductor.
- 3) Pérdidas por corrientes parásitas o histéresis: Estas aparecen en los transformadores.

2.3 Pérdidas de potencia (activa y reactiva), de energía y caídas de voltaje

El estudio de los circuitos de distribución no ha recibido la misma atención que el de otras partes o secciones que conforman los sistemas electroenergéticos, tales como las plantas generadoras o las líneas de transmisión. Ello se debe quizás a que su estructura no tiene el mismo grado de complejidad o a que las soluciones a los problemas se pueden materializar en una forma menos rigurosa, o posiblemente teniendo en cuenta que la potencia que manipula un circuito aislado es pequeña comparada con la de una línea de transmisión, sin detenerse a pensar que en su conjunto los circuitos de distribución constituyen un eslabón fundamental en la compleja cadena existente para lograr hacer llegar la indispensable energía eléctrica a todos los rincones del país. Sea cual fuere la causa, hay, sin embargo, dos hechos incuestionables:

- a) En las redes de distribución se acumulan inversiones solo superadas por las de las plantas generadoras.
- b) En ellas se producen las mayores pérdidas del sistema, lo que justifica ampliamente la dedicación rigurosa a este tema.

Además, en las redes de distribución suelen tener lugar, con bastante frecuencia, caídas de voltaje por debajo de los niveles establecidos, dando lugar a las llamadas *zonas de bajo voltaje*. Ello atenta contra la calidad del servicio prestado a los clientes y disminuye la eficiencia del sistema de distribución.

2.4 Ventajas de los esquemas de distribución a 13 kV

En los últimos tiempos, la selección del voltaje de distribución ha estado marcada por la norma NC8205, que establece el voltaje preferido de 13 kV. Hasta la fecha, la Unión Nacional Eléctrica ha llevado a cabo un proceso de conversión de cada uno de los circuitos de distribución de 4 kV del país, debido al mal estado general de estas redes, y sobre todo al alto nivel de pérdidas, por lo que ya es considerado un nivel de voltaje obsoleto.

Los sistemas de mayor voltaje pueden trasladar mayor potencia para una corriente dada. Además, utilizan un número menor de subestaciones y tienen menores costos anuales en pérdidas. Pues menos corriente significa menor caída de voltaje, menos pérdidas y mayor capacidad de transporte de energía. Su principal desventaja consiste en que reduce la fiabilidad, pues al tener mayor voltaje presenta mayor número de líneas, las cuales se ven afectadas por fenómenos climatológicos como descargas eléctricas, vientos, etc.

La tabla 2.1 muestra otras ventajas y desventajas del empleo de mayores voltajes para mejorar el sistema de distribución primario.

Es importante destacar que ya ninguna empresa productora de transformadores fabrica para el nivel de voltaje de 4,16 kV, incluyendo la empresa Latino de nuestro país. Hoy día estos circuitos de distribución son sostenidos a partir de las conversiones realizadas en otros, donde destacan los transformadores.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de los circuitos de distribución a 13 kV

Ventajas	Desventajas
- Caída de voltaje: El circuito de alto voltaje tiene menos caída de tensión para un determinado flujo de potencia.	-Confiabilidad: Una importante desventaja de los circuitos de altos voltajes; es que pueden producir un mayor número de interrupciones a los clientes.
- Capacidad: Un sistema de alto voltaje puede llevar más potencia para una determinada capacidad de corriente.	-Seguridad y aceptación de los trabajadores: Los trabajadores les desagrada trabajar con los sistemas de distribución de alto voltaje.
-Pérdidas: Para un determinado nivel de flujo de potencia, un sistema de alto voltaje tiene unas menores pérdidas de líneas.	-Coste de los equipos: Partiendo desde los transformadores hasta al cableado, estos sistemas son más costosos.
-Alcance: Con menos caída de voltaje y más capacidad, los circuitos de alto voltaje pueden cubrir un área mucho más amplia.	
- Pocas subestaciones: Debido al gran alcance, los sistemas de distribución necesitan un menor número de subestaciones.	

Capítulo 3: Estado actual y pérdidas de los circuitos de distribución de 4 kV en Camajuaní

3.1 Características de las subestaciones y circuitos de distribución de 4,16 kV en el municipio de Camajuaní

La caracterización de las subestaciones y los circuitos está dada por varios criterios, que indica el nivel de carga que tienen que entregar a sus clientes, teniendo en cuenta la capacidad instalada en sus transformadores y la descripción del tipo y distancia de sus conductores, que influyen significativamente en los niveles de pérdidas eléctricas. Es necesario conocer si presenta algún banco de capacitores conectado y sus capacidades correspondientes. El desbalance de potencia que circula entre las fases de una línea es importante conocerlo, ya que se puede evitar la sobrecarga de una fase si se tiene subcargada otra; ello influye positivamente en la magnitud de las pérdidas y de los voltajes.

3.1.1 Subestación Camajuaní I

La subestación Camajuaní I está ubicada en la parte noroeste de la ciudad, en la calle Andrés Cuevas, entre Pedro Valdés y Fábrica de Arados. Presta servicios a dos circuitos de distribución: el VJ-72 y el VJ-129. En dicha subestación está instalado un transformador de 4 000 kVA, con una relación de transformación de 33/4,16 kV. El circuito VJ-72 es el más grande del municipio, cuenta con carga predominantemente residencial, en su horario pico demanda una potencia de 2 750 kVA, mientras que el circuito VJ-129 presenta mayormente carga industrial y en su hora de máxima demanda presenta una potencia de 520 kVA.

Seguidamente se muestra en la figura 3.1 el diagrama de conexión de esta subestación.

Sub. Camajuani I 33/4.16 kV

SE Camajuani I
CÓDIGO VE-112

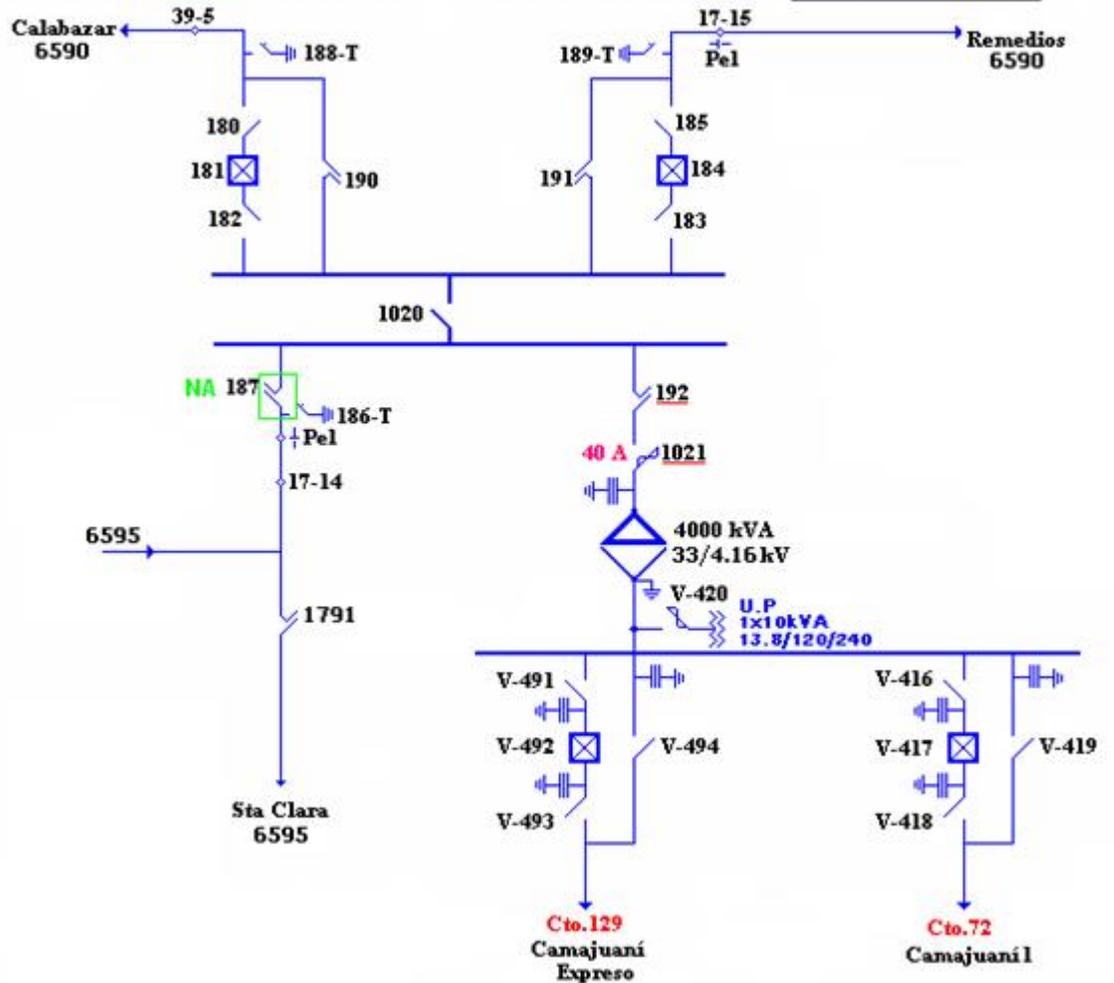


Figura 3.1 Diagrama monolineal de la subestación Camajuani I

3.1.1.1 Circuito VJ-72 Camajuani I

El tronco de este circuito se extiende a lo largo de la calle Andrés Cuevas hasta su intersección con la calle Camilo Cienfuegos; sus ramales ocupan la mayor área céntrica de la ciudad, por lo que abastece a la mayoría de los centros laborales, tiendas de recaudación de divisas, panaderías, etc. Cuenta con un total de 76 bancos de transformadores, que equivalen a 3,5 MVA instalados a través de 8,4 km de conductores. El factor de potencia del circuito es de 0,94. El tronco de este circuito se extiende hasta el nodo principal, donde seccionaliza con las cuchillas H-0102, H-0103 y V-978. Asimismo, cuenta con un conductor

de aluminio de 150 mm². A partir de las cuchillas se realiza la distribución hacia el centro, norte y sur respectivamente, teniendo sus troncos en Andrés Cuevas, Camilo Cienfuegos, Avenida Independencia, Santa Teresa y Lino Pérez. Con la excepción de Andrés Cuevas, que presenta un conductor Cu 2/0, y Lino Pérez, que presenta un conductor de Aluminio AAAC de 78 mm, el resto presenta Cu # 6 y Cu # 4 en mal estado y con niveles de corriente no acordes con estos calibres.

3.1.1.2 Circuito VJ-129 Camajuaní I

Este circuito fue construido para alimentar fundamentalmente a determinadas industrias existentes en esta área de la ciudad, como la Planta Álamos, la fábrica de hielo y ron Combinado Cubanacán y la fábrica de arados Anastasio Cárdenas, por lo que se define con carga industrial. Se encuentra ubicado en la zona comprendida entre las calles Dagoberto Cubela, Pedro Valdés y Andrés Cuevas. Cuenta con un total de ocho bancos de transformadores, que equivalen a 1,13 MVA instalados a través de 1,3 km de conductor primario. El factor de potencia del circuito promedia 0,9. No cuenta con bancos de capacitores y todos sus conductores son mayormente de cobre (Cu # 6).

3.1.2 Subestación Camajuaní II

Esta subestación está ubicada hacia el final de la calle Andrés Cuevas. De ella parten dos circuitos de distribución: VJ-73 y VK-156, de 4,16 y 13,2 kV respectivamente. Esta subestación alimenta a ambos circuitos de manera independiente.

Para abastecer el circuito VJ-73 se cuenta con un transformador de 1 600 kVA, con una relación de transformación de 33/4,16 kV. El mismo presenta una carga predominantemente residencial y demanda en su hora de máxima potencia 1 720 kVA. En el circuito VK-156 se halla instalado otro transformador de 1 600 kVA, con una relación de transformación de 33/13 kV. También cuenta con cargas predominantemente residenciales y demanda en su horario de máxima potencia un total de 1 700 kVA.

En la figura 3.2 se muestra el diagrama de conexión de esta subestación.

Sub. Camajuaní No II *33/13.2/4.16kV*

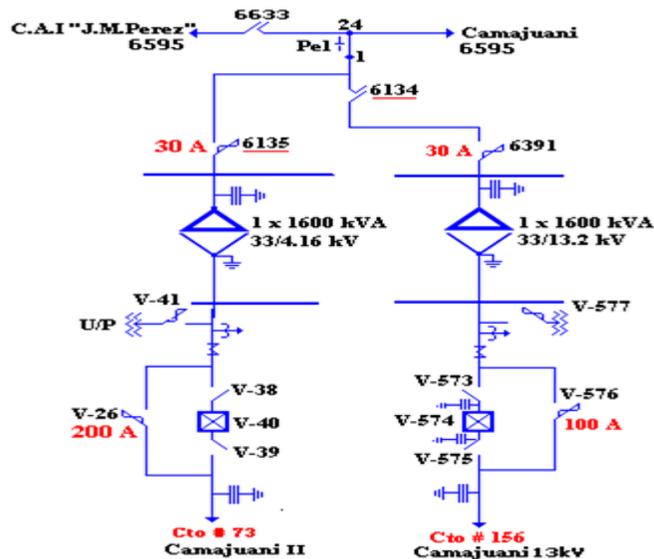


Figura 3.2 Diagrama de conexión de la subestación Camajuaní II

3.1.2.1 Circuito VJ-73 Camajuaní II

Caracterizado por la carga residencial que alimenta, el tronco del circuito que se extiende por toda la calle Andrés Cuevas (tronco principal) hasta su intersección con la calle Leoncio Vidal, toma gran parte de la carga en la zona, por lo que constituye uno de los más extensos de la ciudad. Cuenta con un total de 46 bancos de transformadores, que equivalen a 2,2 MVA instalados. El factor de potencia del circuito promedia aproximadamente 0,94. No cuenta con bancos de capacitores instalados. El tronco principal fue construido con Cu 2/0, la calle Lino Pérez con AAAC de 78 mm y Raúl Torres con Cu # 6 en muy mal estado.

3.1.2.2 Circuito VK-156 Camajuaní II

Se encuentra ubicado en la parte noreste de la ciudad, se extiende por la carretera que une el CAI José María Pérez con la cabecera municipal de Camajuaní, brindándole servicio a la zona de Arroyo Frío. En este sector destacan como cargas importantes la granja avícola y la planta de incubación Rolando Vera. Por otra parte, hacia la calle Luz Caballero, se extiende hacia el reparto Minerva, prestándole servicio a los edificios residenciales como carga

principal. Cuenta con un total de 44 bancos de transformadores, que equivalen a 1 787 MVA instalados. Dicho circuito demanda en su horario pico un total de 1 500 kVA, a través de 7,6 km de conductor primario. El factor de potencia promedio del circuito es 0,94 y en su mayoría presenta conductores de aluminio de 35 mm².

3.2 Esquema de subtransmisión y lazos

El municipio cuenta con una nueva y moderna subestación de tecnología china de 110/34,5 kV, con 25 MVA instalados. Esta subestación constituye un lazo importante de la provincia de Villa Clara; la misma se alimenta de la línea de 110 kV de Santa Clara-Remedios y presenta cuatro salidas de 33 kV (6580, 6585, 6590 y 6595).

La salida 6580 alimenta los circuitos de distribución de Vueltas de 13 kV (VK-59, VK-77 y VK-185). Normalmente permanece abierta en el interruptor 1727 a la entrada de Remedios.

La salida 6585, pendiente de construcción, será un posible lazo con el municipio de Placetas.

El 6590 alimenta los siguientes circuitos de distribución: VJ-72 (Camajuaní I), VJ-129 (Camajuaní Expreso), VK-75 (La Quinta), VK-157 y VK-158 (Luis Arcos Bergnes), VJ-76 (Vega Alta) y VJ-90 (La Luz). Esta permanece normalmente abierta en el interruptor 1760, límite con el municipio de Encrucijada.

La salida 6595 le brinda servicio a los circuitos de distribución VJ-73 (Camajuaní II), VK-156 (Camajuaní, 13 kV) y VK-74 (José María Pérez). Normalmente permanece abierta en el interruptor 6611, ubicado en la carretera nueva al aeropuerto.

Es de destacar asimismo que nuestro municipio presenta una sección de línea del 1955 (tramo Pavón-Jutiero), que alimenta al circuito de distribución VK-78, de 13 kV (Jutiero).

3.3 Utilización del software Radial 10.0 para el estudio de redes de distribución

Para realizar el estudio del flujo de carga de estos circuitos se utiliza el software Radial en su versión 10.0.

Radial es un software realizado en el Centro de Estudios Electroenergéticos de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, especializado

en el análisis de los circuitos radiales de distribución primaria y de subtransmisión, que permite calcular:

- Flujos de carga.
- Estado de carga en los transformadores de distribución.
- Ubicación y selección óptima de capacitores.
- Cortocircuitos.
- Coordinación de protecciones.

Para poder realizar un uso eficiente del Radial fue imprescindible la actualización de sus bibliotecas, con el propósito de conocer detalladamente el estado en que se encontraban las cargas y circuitos localizados en la zona de nuestro estudio. Ello es fundamental para la programación del futuro desarrollo del sistema, garantizando estabilidad y fiabilidad. Se tuvieron en cuenta las lecturas de los interruptores de tipo Nulec para la obtención de datos como: potencia activa (P), reactiva (Q), aparente (S), factor de potencia (fp), corriente (I) y voltaje (V), a partir de los cuales se obtuvieron como resultado los gráficos durante un período determinado, ya que el comportamiento de la energía demandada es muy inestable durante el día. Para la puesta en marcha de este software fue preciso realizar varias observaciones previas:

- La familiarización con la red de distribución del municipio de Camajuaní, la actualización del calibre de los conductores, tipos de transformadores y sus ubicaciones y capacidades demandadas e instaladas, por lo que fue necesario realizar la actualización de estos circuitos.
- La familiarización, interpretación y actualización de los monolineales pertenecientes a este municipio.
- Actualización de las características de cargas con la ayuda de las lecturas realizadas a los interruptores Nulec.
- Actualización de las bibliotecas y ficheros para el Radial 10.0 con los datos obtenidos según las cargas, tipo y distancias de los conductores.

3.4 Estimación de cargas en los circuitos de distribución

La base para cualquier tipo de estudio en un circuito de distribución es la estimación de las cargas eléctricas suministradas por los distintos bancos de transformadores del circuito. Esto se debe a que comúnmente no existen mediciones actualizadas de dichas cargas y se hace casi imposible realizarlas antes de llevar a cabo el estudio requerido.

La carga se caracteriza por su magnitud pico (kW y kVAr) y por su comportamiento horario (gráfico de carga). Además, debido a las características de los bancos de transformadores que se emplean en estos circuitos, para determinar la corriente de carga en cada fase del circuito primario es preciso conocer en todo momento la magnitud de la carga monofásica y trifásica del banco, tal como se aprecia en el siguiente análisis.

Bancos de tres transformadores

Los bancos de tres transformadores (3T) se conectan en modo Y-Delta (figura 3.3):

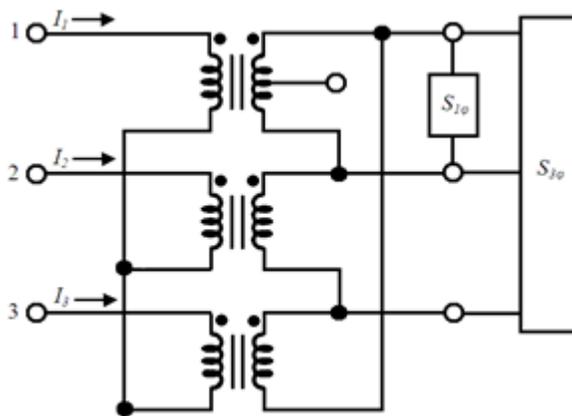


Figura 3.3 Banco Y-Delta

La carga monofásica de 120/240 V ($S_{1\phi}$) se alimenta por el transformador de alumbrado, mientras que por otra parte dos transformadores de fuerza completan el banco para suministrar la carga trifásica de 240 V ($S_{3\phi}$). Para simplificar el análisis, la carga monofásica se considera distribuida entre los dos secundarios del transformador de alumbrado.

Las tensiones de línea en el secundario están en fase con las tensiones de fase en los primarios V_{1n} , V_{2n} y V_{3n} . Entonces, aplicando el principio de superposición, las corrientes

primarias I1, I2 e I3 se obtienen mediante:

$$\begin{aligned} I_1 &= +\frac{2}{3}(S_{1\phi}/V_{1n})^* + \frac{1}{3}(S_{3\phi}/V_{1n})^* \\ I_2 &= -\frac{1}{3}(S_{1\phi}/V_{1n})^* + \frac{1}{3}(S_{3\phi}/V_{2n})^* \\ I_3 &= -\frac{1}{3}(S_{1\phi}/V_{1n})^* + \frac{1}{3}(S_{3\phi}/V_{3n})^* \end{aligned} \quad (1)$$

Bancos de dos transformadores

Los bancos de dos transformadores (2T) son Y abierta-Delta abierta (figura 3.4):

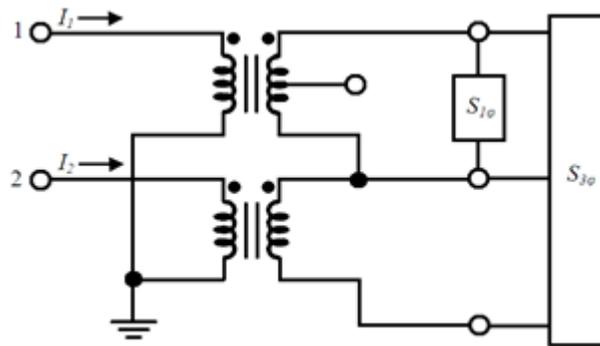


Figura 3.4 Banco de dos transformadores

La carga monofásica de 120/240 V se alimenta del transformador de alumbrado, mientras que un solo transformador de fuerza completa el banco para suministrar la carga trifásica de 240 V.

Las corrientes del primario I1, I2 e I3 se obtienen de:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{3}(S_{3\phi}/V_{1n} - S_{3\phi}/V_{3n})^* + (S_{1\phi}/V_{1n})^* \\ I_2 &= \frac{1}{3}(S_{3\phi}/V_{2n} - S_{3\phi}/V_{3n})^* \\ I_3 &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Transformadores monofásicos

Los transformadores monofásicos de distribución (1T) suministran solo carga monofásica de 120/240 V. En este caso solo existe el terminal 1:

$$\begin{aligned} I_1 &= (S_{1\phi} / V_{1n})^* \\ I_2 &= 0 \\ I_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Como puede apreciarse, las corrientes por el primario en los distintos tipos de bancos dependerán de las cargas y de las fases a las que se conectan los primarios 1, 2 y 3.

Procedimiento de estimación

Aun cuando no se dispone de mediciones en los distintos bancos de transformadores, sí es posible conocer las mediciones de carga por fase y la medición total en el interruptor totalizador del circuito, así como el comportamiento horario de estas mediciones.

En cada instante de tiempo las corrientes totales por fase del circuito tienen que ser iguales a la suma de las corrientes de fase por el primario de los distintos bancos de transformadores del circuito. Sin embargo, no existe un procedimiento que permita calcular la carga en cada banco, disponiendo solamente de las mediciones de la carga total.

Aunque el problema no tiene solución desde el punto de vista matemático, desde el punto de vista ingenieril puede hacerse una estimación de dichas cargas sobre la base de cierto presupuesto en torno a la distribución de la misma en el circuito.

En este caso se ha considerado distribuir la carga total de cada fase de forma proporcional a la potencia de los transformadores conectados a dicha fase. Se considera el factor de potencia en todas las cargas igual al medido, por lo que todas las potencias aparentes monofásicas y trifásicas se consideran en fase.

El procedimiento es el siguiente:

- 1) Se determina una matriz *Sload* que contiene la potencia nominal de los transformadores conectados en cada nodo (fila) y fase (columna). Es una aproximación inicial para las potencias de carga por fase.
- 2) Se realiza un lazo hasta que se obtenga una convergencia entre la suma fasorial de las potencias aparentes por fase de dicha matriz, y las potencias aparentes medidas en el horario pico en el que se realizan los siguientes pasos:

-
- a. Se distribuye la potencia aparente, medida en cada fase de forma proporcional a la potencia de carga por fase Sload, calculada previamente.
 - b. En cada banco de transformadores, según su tipo, se realiza el cálculo de la potencia aparente monofásica y trifásica, que provocan las potencias aparentes por fase que más se acercan a los valores de Sload.
 - c. Con estas potencias de carga monofásica y trifásica se recalculan los valores de Sload y se regresa al paso a. hasta que haya convergencia.
- 3) Se imprimen los valores de carga monofásica y trifásica.

Finalmente, estos valores deben dividirse entre los coeficientes del gráfico de carga escogido en el Radial para cada carga, para que de esta forma se ajusten las cargas a dichos gráficos.

3.5 Cálculo de los parámetros de operación actuales

A continuación se muestran los resultados generales obtenidos con el software Radial luego de llevar a cabo las respectivas corridas de cada uno de los circuitos analizados, lo cual revela el comportamiento de estos circuitos como punto de partida para el análisis de las variantes propuestas para reducir las pérdidas.

3.5.1 Circuito VJ-72 Camajuaní I. Estado actual

En la tabla 3.1 se muestra el resultado actual a partir de la corrida realizada en el software Radial del circuito VJ-72, donde resalta el alto valor de pérdidas eléctricas que presenta el mismo.

Tabla 3.1 Resultado del flujo de carga trifásico del circuito VJ-72. Estado actual

Resultados del Flujo de Carga Trifásico					
 Salvar		 Vista Previa		 Imprimir	
 Salir		 Notas		Converge (6 iteraciones)	
Fichero : VJ 72Actual.comp					
Hora de análisis: 20		<input checked="" type="checkbox"/> Hora de máxima		<input type="checkbox"/> Hora de mínima	
Concepto	Valor	U/M	Concepto	Valor	U/M
Potencia activa de las cargas	2362 kW		Energía activa de las cargas	35 MW.h/día	
Potencia reactiva de las cargas	761 kvar		Energía reactiva de las cargas	12 Mvar.h/día	
Pérdidas activas en líneas	87 kW		Pérdidas de energía activa en líneas	785 kW.h/día	
Pérdidas reactivas en líneas	72 kvar		Pérdidas de energía reactiva en líneas	653 kvar.h/día	
Pérdidas de cobre en transformadores	27 kW		Pérdidas de energía de cobre en transformadores	251 kW.h/día	
Pérdidas de hierro en transformadores	15 kW		Pérdidas de energía de hierro en transformadores	349 kW.h/día	
Pérdidas reactivas en transformadores	43 kvar		Pérdidas de energía reactiva en transformadores	408 kvar.h/día	
Pérdidas totales de potencia activa	128 kW		Pérdidas totales de energía activa	1385 kW.h/día	
Pérdidas totales de potencia reactiva	115 kvar		Pérdidas totales de energía reactiva	1061 kvar.h/día	
% de pérdidas de potencia	5 %		% de pérdidas de energía	4 %	
Factor de potencia del circuito	0.94		Factor de potencia medio pesado	0.94	
Potencia activa de cogeneración	0 kW		Energía activa de cogeneración	0 kW.h/día	
Potencia reactiva de cogeneración	0 kvar		Energía reactiva de cogeneración	0 kW.h/día	
Potencia reactiva en capacitores.	0 Ckvar				

3.5.2 Circuito VJ-73 Camajuaní II. Estado actual

La tabla 3.2 muestra los resultados del flujo de carga obtenidos para el circuito VJ-73 en su estado actual. A pesar de no ser tan grande y complejo, este circuito presenta también un alto valor de pérdidas técnicas.

Tabla 3.2 Resultado del flujo de carga trifásico del circuito VJ-73. Estado actual

Resultados del Flujo de Carga Trifásico					
 Salvar		 Vista Previa		 Imprimir	
 Salir		 Notas		Converge (6 iteraciones)	
Fichero : VJ_73Actual.comp					
Hora de análisis: 20		<input checked="" type="checkbox"/> Hora de máxima		<input type="checkbox"/> Hora de mínima	
Concepto	Valor	U/M	Concepto	Valor	U/M
Potencia activa de las cargas	1583	kW	Energía activa de las cargas	23	MW.h/día
Potencia reactiva de las cargas	494	kvar	Energía reactiva de las cargas	7	Mvar.h/día
Pérdidas activas en líneas	62	kW	Pérdidas de energía activa en líneas	561	kW.h/día
Pérdidas reactivas en líneas	55	kvar	Pérdidas de energía reactiva en líneas	505	kvar.h/día
Pérdidas de cobre en transformadores	18	kW	Pérdidas de energía de cobre en transformadores	172	kW.h/día
Pérdidas de hierro en transformadores	9	kW	Pérdidas de energía de hierro en transformadores	217	kW.h/día
Pérdidas reactivas en transformadores	30	kvar	Pérdidas de energía reactiva en transformadores	281	kvar.h/día
Pérdidas totales de potencia activa	89	kW	Pérdidas totales de energía activa	950	kW.h/día
Pérdidas totales de potencia reactiva	85	kvar	Pérdidas totales de energía reactiva	786	kvar.h/día
% de pérdidas de potencia	5	%	% de pérdidas de energía	4	%
Factor de potencia del circuito	0.94		Factor de potencia medio pesado	0.95	
Potencia activa de cogeneración	0	kW	Energía activa de cogeneración	0	kW.h/día
Potencia reactiva de cogeneración	0	kvar	Energía reactiva de cogeneración	0	kW.h/día
Potencia reactiva en capacitores.	0	Ckvar			

3.5.3 Circuito VJ-129 Camajuaní Expreso. Estado actual

La siguiente tabla refleja los resultados del flujo de carga obtenidos para el circuito VJ-129 en su estado actual.

Tabla 3.3 Resultados del flujo de carga trifásico del circuito VJ-129. Estado actual

Resultados del Flujo de Carga Trifásico					
 Salvar		 Vista Previa		 Imprimir	
 Salir		 Notas		Converge (6 iteraciones)	
Fichero : vj 129 Actual.comp					
Hora de análisis: <input type="text" value="8"/>		Horas		<input checked="" type="checkbox"/> Hora de máxima	
<input type="checkbox"/> Hora de mínima					
Concepto	Valor	U/M	Concepto	Valor	U/M
Potencia activa de las cargas	549	kW	Energía activa de las cargas	7	MW.h/día
Potencia reactiva de las cargas	294	kvar	Energía reactiva de las cargas	4	Mvar.h/día
Pérdidas activas en líneas	3	kW	Pérdidas de energía activa en líneas	30	kW.h/día
Pérdidas reactivas en líneas	1	kvar	Pérdidas de energía reactiva en líneas	13	kvar.h/día
Pérdidas de cobre en transformadores	6	kW	Pérdidas de energía de cobre en transformadores	60	kW.h/día
Pérdidas de hierro en transformadores	3	kW	Pérdidas de energía de hierro en transformadores	82	kW.h/día
Pérdidas reactivas en transformadores	13	kvar	Pérdidas de energía reactiva en transformadores	119	kvar.h/día
Pérdidas totales de potencia activa	13	kW	Pérdidas totales de energía activa	172	kW.h/día
Pérdidas totales de potencia reactiva	15	kvar	Pérdidas totales de energía reactiva	132	kvar.h/día
% de pérdidas de potencia	2	%	% de pérdidas de energía	2	%
Factor de potencia del circuito	0.88		Factor de potencia medio pesado	0.90	
Potencia activa de cogeneración	0	kW	Energía activa de cogeneración	0	kW.h/día
Potencia reactiva de cogeneración	0	kvar	Energía reactiva de cogeneración	0	kW.h/día
Potencia reactiva en capacitores.	0	Ckvar			

3.5.4 Circuito VK-156 Camajuaní II. Estado actual

A continuación se muestra el resultado obtenido a partir de la corrida realizada en el software Radial del circuito VK-156, de 13 kV, perteneciente a Camajuaní II.

Tabla 3.4 Resultado del flujo de carga trifásico del circuito VK-156. Estado actual

Fichero Salir					
 Salvar	 Vista Previa	 Imprimir	 Notas	 Salir	
Hora de análisis:					
Concepto	Valor	U/M	Concepto	Valor	U/M
Potencia activa de las cargas	1322 kW		Energía activa de las cargas	19 MWh	
Potencia reactiva de las cargas	424 kvar		Energía reactiva de las cargas	6 Mvar.h	
Potencia reactiva en capacitores.	0 Ckvar		Pérdidas de energía en líneas	27 kW.h	
Factor de potencia	0.95		Pérdidas de energía Cu en transf.	175 kW.h	
Pérdidas activas en líneas	2 kW		Pérdidas de energía Fe en transf.	153 kW.h	
Pérdidas reactivas en líneas	3 kvar		Pérdidas totales de energía	355 kW.h	
Pérdidas de cobre en transf.	15 kW		% de pérdidas de potencia de Distribution	2 %	
Pérdidas de hierro en transf.	6 kW		% de pérdidas de energía de Distribution	2 %	
Pérd. totales de potencia activa	23 kW		Potencia activa de cogeneración	0 kW	
			Potencia reactiva de cogeneración	0 kvar	

En este circuito puede apreciarse la gran diferencia respecto a los circuitos de distribución de 4 kV, debido al bajo porcentaje de pérdidas y al mejor funcionamiento y estabilidad de los circuitos de 13 kV. De modo general, puede afirmarse que actualmente este es el circuito de distribución con menor índice de fallas y disparos en Camajuaní.

Se ha estudiado este circuito, pues como se ha mencionado anteriormente, el circuito VK-156 convive en una misma subestación con el VJ-73. Esta subestación cuenta con una infraestructura adecuada para realizar un aumento de la capacidad de distribución de 13 kV del transformador, considerando la carga actual del circuito VJ-73, su conversión y el retiro de 1 600 kVA de 4 kV.

Para obtener estos resultados a partir del software Radial, se recorrieron inicialmente todos los circuitos nodo a nodo, actualizando la distancia de los conductores, su calibre y número

de fases, así como la capacidad de los transformadores y la fase del primario a la cual se encuentran conectados.

En estas corridas se aprecia el alto valor de pérdidas presentes en los circuitos de 4 kV, provocadas en gran medida por el mal estado de los conductores y el calibre de los mismos, que ya no se corresponde con la demanda de la carga que existe actualmente. A continuación se muestra una tabla resumen con los principales resultados obtenidos en las simulaciones realizadas.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en estas simulaciones con el software Radial, se hace necesario realizar mejoras en estos circuitos. En el próximo capítulo se analizarán propuestas de cambio de calibre y de conversión a 13 kV de los circuitos de distribución del municipio.

Tabla 3.5 Comparación de los resultados

Circuito	Demanda máx. (kW)	ΔP (kW)				ΔE (kWh/día)				kV fase min.	Distancia a la subestación (km)
		Transformador		Líneas	Total	Transformador		Líneas	Total		
		Cu	Fe			Cu	Fe				
VJ-72	2 362	27	15	87	128	251	349	785	1 385	2,05	4,28
VJ-73	1 583	18	9	62	89	172	217	561	950	2,34	1,65
VJ-129	549	6	3	3	13	60	82	30	172	2,37	0,69
VK-156	1 322	15	6	2	23	175	153	27	355	7,60	0,85

Capítulo 4: Propuestas de mejora y disminución de pérdidas a partir de cambios de calibre y conversión a 13 kV

4.1 Análisis de las principales variantes

La elaboración de variantes que solucionen los problemas de funcionamiento de cada circuito en particular resulta un paso definitivo para la culminación de este trabajo. Las características particulares de cada circuito tienen relación con el número de variantes determinadas, aquellas que pueden ser consideradas variantes a corto, mediano y largo plazo.

Se consideran prioritarias las variantes a corto plazo, dado que estas resultan más económicas y pueden mejorar las condiciones de operación de un circuito determinado de manera eventual. Las variantes a largo plazo resultan más eficaces, pero implican un mayor gasto y necesitan más tiempo de ejecución. La selección de una variante a corto plazo no significa la exclusión de variantes a largo plazo, dado que se pueden considerar determinadas etapas en el proceso de mejoramiento de un circuito. Las mismas se muestran a continuación:

- Normalización del calibre primario.
- Distribución de las cargas entre las tres fases, alcanzando un por ciento de desbalance menor que el 15 % establecido en los procedimientos.
- Conversión de circuitos con voltajes de 4,16 a 13,2 kV.
- Convertir totalmente la subestación Camajuaní II a 13 kV, con aumento de la capacidad del transformador.

4.2 Normalización del calibre primario

La normalización del calibre primario consiste en el cambio del mismo de forma masiva, con lo que se logra que todo el circuito quede con un conductor acorde con los valores de carga. Para la selección del calibre se precisa la determinación previa de la corriente promedio por el tronco para su estado de carga.

4.3 Distribución de las cargas entre las tres fases, alcanzando un por ciento de desbalance menor que el 15 % establecido en los procedimientos

La variante de balanceo de carga en un circuito determinado es sumamente barata si se la compara con el resto de las mejoras. Esto se debe principalmente a que su costo consiste solamente en cambiar de fases algunas cargas o ramales determinados, y en algunos casos extremos se hace necesaria la extensión de conductores en pequeñas secciones. Después del proceso de levantamiento en el cual se pueden conocer a fondo las características de la línea, resulta fácil comprobar cómo se comporta la carga en relación a las fases de conexión de las mismas, mediante las corridas del Radial, para el flujo de carga trifásico. Se ha comprobado que los circuitos con elevados índices de desbalance en sus cargas no operan satisfactoriamente, pues en ellos se incrementa considerablemente el efecto de las pérdidas y sus caídas de voltaje se hacen mucho más pronunciadas.

Los trabajos de balanceo serán ejecutados simultáneamente con la normalización del cambio de calibre; de este modo, el grupo de trabajo que cambie los conductores conectará a su vez los ramales y transformadores a las fases convenientes. Con esto quedan erradicados los problemas de desbalance y se garantiza menos del 15 % establecido para este parámetro según el procedimiento [6].

4.4 Conversión del circuito completo del voltaje actual 4,16 a 13,2 kV

La conversión trae consigo grandes beneficios en cuanto al ahorro por concepto de reducción de pérdidas, pues estas disminuyen considerablemente, ya que la corriente circulante por las líneas se hace mucho menor al incrementarse el nivel de voltaje para una misma carga. Estas ventajas se multiplican si la conversión se lleva a cabo en un circuito entero [7]. Su principal inconveniente radica en el costo de la misma, por lo que para realizar la conversión se debe tener en cuenta varias etapas. Primeramente se comenzará la conversión por un circuito, luego de tener colocados, con la anticipación de trabajos anteriores, los calibres adecuados y los aisladores normados para este voltaje de distribución. Luego de convertir un circuito se continúa con otro. Asimismo, se puede valorar también la variante de realizar trasposos de carga de un circuito a otro, con el objetivo de balancear los mismos.

4.5 Análisis de la propuesta de variantes en los circuitos de distribución primaria

A continuación, se realiza una descripción de las diferentes variantes propuestas para cada uno de los circuitos estudiados, así como un análisis de los resultados de las mismas.

4.5.1 Circuito VJ-72 Camajuaní I con cambio de calibre primario y neutro

En el circuito VJ-72, luego de analizar su infraestructura en el tronco, se concluyó que se obtenía un buen resultado al realizar los cambios de calibre primario y neutro en el punto situado en Avenida Independencia, entre la calle Camilo Cienfuegos y Santa Teresa. La mejora consiste en la sustitución de 3,7 km de conductor del tronco por el conductor Aluminio Anaheim AAAC/2/0 (78 mm²) para las fases y Cu # 2 para el conductor neutro. Al ser sustituido el circuito sufre una ligera mejoría en sus condiciones de operación, al ejecutar las corridas en el paquete Radial; las pérdidas y energía disminuyeron a 94 kW y 1 087 kW.h/día respectivamente; el porcentaje de pérdidas disminuyó a 4 % y el de energía a 3 %.

Tabla 4.1 Flujo de carga trifásico del circuito VJ-72 con cambio de calibre primario y neutro

Resultados del Flujo de Carga Trifásico					
Salvar		Vista Previa		Imprimir	
Salir		Notas		Converge (6 iteraciones)	
Fichero : VJ 72Acamb. cal					
Hora de análisis: 20		<input checked="" type="checkbox"/> Hora de máxima		<input type="checkbox"/> Hora de mínima	
Concepto	Valor	U/M	Concepto	Valor	U/M
Potencia activa de las cargas	2362	kW	Energía activa de las cargas	35	MW.h/día
Potencia reactiva de las cargas	761	kvar	Energía reactiva de las cargas	12	Mvar.h/día
Pérdidas activas en líneas	54	kW	Pérdidas de energía activa en líneas	491	kW.h/día
Pérdidas reactivas en líneas	66	kvar	Pérdidas de energía reactiva en líneas	608	kvar.h/día
Pérdidas de cobre en transformadores	26	kW	Pérdidas de energía de cobre en transformadores	247	kW.h/día
Pérdidas de hierro en transformadores	15	kW	Pérdidas de energía de hierro en transformadores	349	kW.h/día
Pérdidas reactivas en transformadores	42	kvar	Pérdidas de energía reactiva en transformadores	402	kvar.h/día
Pérdidas totales de potencia activa	94	kW	Pérdidas totales de energía activa	1087	kW.h/día
Pérdidas totales de potencia reactiva	108	kvar	Pérdidas totales de energía reactiva	1009	kvar.h/día
% de pérdidas de potencia	4	%	% de pérdidas de energía	3	%
Factor de potencia del circuito	0.94		Factor de potencia medio pesado	0.94	
Potencia activa de cogeneración	0	kW	Energía activa de cogeneración	0	kW.h/día
Potencia reactiva de cogeneración	0	kvar	Energía reactiva de cogeneración	0	kW.h/día
Potencia reactiva en capacitores	0	Ckvar			

4.5.2 Circuito VJ-72 Camajuaní I con cambio de calibre y convertido a 13 kV

Luego de realizar la normalización del calibre primario se analiza la propuesta de conversión de voltaje de 4,16 a 13,2 kV, con lo que se comprobó una considerable reducción en las pérdidas de este circuito. Las pérdidas de potencia y energía se reducen a 44 kw y 633 kw.h/día, respectivamente.

Tabla 4.2 Flujo de carga trifásico del circuito VJ-72 convertido a 13 kV

Resultados del Flujo de Carga Trifásico					
 Salvar  Vista Previa  Imprimir  Salir  Notas		Converge (5 iteraciones)		Fichero : VJ 72A 13.2	
Hora de análisis: 20		<input checked="" type="checkbox"/> Hora de máxima		<input type="checkbox"/> Hora de mínima	
Concepto	Valor	U/M	Concepto	Valor	U/M
Potencia activa de las cargas	2362 kW		Energía activa de las cargas	35 MW.h/día	
Potencia reactiva de las cargas	761 kvar		Energía reactiva de las cargas	12 Mvar.h/día	
Pérdidas activas en líneas	5 kW		Pérdidas de energía activa en líneas	46 kW.h/día	
Pérdidas reactivas en líneas	6 kvar		Pérdidas de energía reactiva en líneas	57 kvar.h/día	
Pérdidas de cobre en transformadores	25 kW		Pérdidas de energía de cobre en transformadores	237 kW.h/día	
Pérdidas de hierro en transformadores	15 kW		Pérdidas de energía de hierro en transformadores	349 kW.h/día	
Pérdidas reactivas en transformadores	40 kvar		Pérdidas de energía reactiva en transformadores	387 kvar.h/día	
Pérdidas totales de potencia activa	44 kW		Pérdidas totales de energía activa	633 kW.h/día	
Pérdidas totales de potencia reactiva	46 kvar		Pérdidas totales de energía reactiva	444 kvar.h/día	
% de pérdidas de potencia	2 %		% de pérdidas de energía	2 %	
Factor de potencia del circuito	0.95		Factor de potencia medio pesado	0.95	
Potencia activa de cogeneración	0 kW		Energía activa de cogeneración	0 kW.h/día	
Potencia reactiva de cogeneración	0 kvar		Energía reactiva de cogeneración	0 kW.h/día	
Potencia reactiva en capacitores.	0 Ckvar				

La siguiente tabla compara los resultados generales obtenidos para el circuito VJ-72 en su estado actual, con las variantes de mejoras introducidas a partir del cambio de calibre

primario y neutro y la conversión del mismo a 13,2 kV (voltaje real de operación). En la tabla 4.3 se puede observar el ahorro que se obtiene con este circuito totalmente convertido al voltaje propuesto.

Tabla 4.3 Comparación de resultados del circuito VJ-72

Demanda máx. 2 362 (kW)	Circuito VJ-72									
	ΔP (kW)				ΔE (kWh/día)				kV fase min.	Distancia a la subestación (km)
	Transformador		Líneas	Total	Transformador		Líneas	Total		
Cu	Fe			Cu	Fe					
Estado actual	27	15	87	128	251	349	785	1 385	2,05	4,2
Cambio de calibre	26	15	54	94	247	349	491	1 087	2,13	4,28
Convertido a 13,2 kV	25	15	5	44	237	349	46	633	7,54	4,0
Ahorro	2	0	82	84	14	0	739	752		

4.5.3 Circuito VJ-73 Camajuaní II con cambio de calibre primario y neutro

Este circuito, el segundo más grande y complejo del municipio, presenta un alto valor de pérdidas, tal como puede apreciarse en la tabla 4.4. La variante de mejora consiste en realizar los cambios de calibre primario y neutro en las calles Raúl Torres, Joaquín Paneca y Leoncio Vidal, donde serán sustituidos 1,8 km de conductores de Cu # 4 y Cu # 2 por conductores de Aluminio Anaheim AAAC/2/0 (78 mm²) para la fase y el conductor neutro por Cu # 2.

Tabla 4.4 Flujo de carga trifásico del circuito VJ-73 a partir de cambio de calibre primario

Resultados del Flujo de Carga Trifásico					
 Salvar  Vista Previa  Imprimir  Salir  Notas		Converge (6 iteraciones)		Fichero : VJ_73camb.cal	
Hora de análisis: 20		<input checked="" type="checkbox"/> Hora de máxima		<input type="checkbox"/> Hora de mínima	
Concepto	Valor	U/M	Concepto	Valor	U/M
Potencia activa de las cargas	1583 kW		Energía activa de las cargas	23 MWh/día	
Potencia reactiva de las cargas	494 kvar		Energía reactiva de las cargas	7 Mvar.h/día	
Pérdidas activas en líneas	46 kW		Pérdidas de energía activa en líneas	417 kWh/día	
Pérdidas reactivas en líneas	54 kvar		Pérdidas de energía reactiva en líneas	497 kvar.h/día	
Pérdidas de cobre en transformadores	18 kW		Pérdidas de energía de cobre en transformadores	172 kWh/día	
Pérdidas de hierro en transformadores	9 kW		Pérdidas de energía de hierro en transformadores	218 kWh/día	
Pérdidas reactivas en transformadores	30 kvar		Pérdidas de energía reactiva en transformadores	280 kvar.h/día	
Pérdidas totales de potencia activa	73 kW		Pérdidas totales de energía activa	807 kWh/día	
Pérdidas totales de potencia reactiva	84 kvar		Pérdidas totales de energía reactiva	777 kvar.h/día	
% de pérdidas de potencia	4 %		% de pérdidas de energía	3 %	
Factor de potencia del circuito	0.94		Factor de potencia medio pesado	0.95	
Potencia activa de cogeneración	0 kW		Energía activa de cogeneración	0 kWh/día	
Potencia reactiva de cogeneración	0 kvar		Energía reactiva de cogeneración	0 kWh/día	
Potencia reactiva en capacitores.	0 Ckvar				

4.5.4 Circuito VJ-73 Camajuani II con cambio de calibre y convertido a 13 kV

En este circuito también se comprueba cómo disminuyen las pérdidas de potencia y energía cuando este queda convertido totalmente a 13,2 kV. En la siguiente tabla se muestran los resultados generales del comportamiento de las variables de este circuito en su horario pico.

Tabla 4.5 Resultado del flujo de carga trifásico del circuito VJ-73 convertido a 13 kV

Resultados del Flujo de Carga Trifásico					
Salvar Vista Previa Imprimir Salir Notas		Converge (5 iteraciones)		Fichero : VJ_73 13.2	
Hora de análisis: 20		<input checked="" type="checkbox"/> Hora de máxima		<input type="checkbox"/> Hora de mínima	
Concepto	Valor	U/M	Concepto	Valor	U/M
Potencia activa de las cargas	1583 kW		Energía activa de las cargas	23 MW.h/día	
Potencia reactiva de las cargas	494 kvar		Energía reactiva de las cargas	7 Mvar.h/día	
Pérdidas activas en líneas	4 kW		Pérdidas de energía activa en líneas	41 kW.h/día	
Pérdidas reactivas en líneas	5 kvar		Pérdidas de energía reactiva en líneas	48 kvar.h/día	
Pérdidas de cobre en transformadores	18 kW		Pérdidas de energía de cobre en transformadores	169 kW.h/día	
Pérdidas de hierro en transformadores	9 kW		Pérdidas de energía de hierro en transformadores	218 kW.h/día	
Pérdidas reactivas en transformadores	29 kvar		Pérdidas de energía reactiva en transformadores	275 kvar.h/día	
Pérdidas totales de potencia activa	31 kW		Pérdidas totales de energía activa	427 kW.h/día	
Pérdidas totales de potencia reactiva	34 kvar		Pérdidas totales de energía reactiva	323 kvar.h/día	
% de pérdidas de potencia	2 %		% de pérdidas de energía	2 %	
Factor de potencia del circuito	0.95		Factor de potencia medio pesado	0.95	
Potencia activa de cogeneración	0 kW		Energía activa de cogeneración	0 kW.h/día	
Potencia reactiva de cogeneración	0 kvar		Energía reactiva de cogeneración	0 kvar.h/día	
Potencia reactiva en capacitores.	0 Ckvar				

Tabla 4.6 Comparación de resultados del circuito VJ-73

Demanda máx. 1 583 (kW)	Circuito VJ-73							kV fase min.	Distancia a la subestación (km)	
	ΔP (kW)				ΔE (kWh/día)					
	Transformador		Líneas	Total	Transformador		Líneas			Total
Cu	Fe			Cu	Fe					
Estado actual	18	9	62	89	172	218	561	950	2,34	1,65
Cambio de calibre	18	9	46	73	172	218	417	807	2,35	1,65
Convertido a 13,2 kV	18	9	4	31	169	218	41	427	7,6	1,65
Ahorro	0	0	58	58	1	0	520	523		

4.5.5 Circuito VJ-129 expreso con cambio de calibre primario

El circuito VJ-129 es el más pequeño de los circuitos de distribución de 4 kV del municipio, pero también se realizó la propuesta de cambio de calibre para disminuir sus pérdidas y eliminar los conductores en mal estado. La propuesta para este circuito es sustituir los conductores de fases por conductores de Aluminio Anaheim AAAC/2/0 (78 mm²) y el conductor neutro por Cu # 2 a lo largo de todo el circuito, excepto en la zona residencial, que ya posee aluminio de 78 mm.

Tabla 4.7 Flujo de carga trifásico del circuito VJ-129 con cambio de calibre primario y neutro

Resultados del Flujo de Carga Trifásico					
 Salvar  Vista Previa  Imprimir  Salir  Notas		Converge (6 iteraciones)		Fichero : vj 129 camb.cal	
Hora de análisis: 8		Horas		<input checked="" type="checkbox"/> Hora de máxima	
<input type="checkbox"/> Hora de mínima					
Concepto	Valor	U/M	Concepto	Valor	U/M
Potencia activa de las cargas	549	kW	Energía activa de las cargas	7	MW.h/día
Potencia reactiva de las cargas	268	kvar	Energía reactiva de las cargas	3	Mvar.h/día
Pérdidas activas en líneas	1	kW	Pérdidas de energía activa en líneas	11	kW.h/día
Pérdidas reactivas en líneas	1	kvar	Pérdidas de energía reactiva en líneas	10	kvar.h/día
Pérdidas de cobre en transformadores	5	kW	Pérdidas de energía de cobre en transformadores	53	kW.h/día
Pérdidas de hierro en transformadores	3	kW	Pérdidas de energía de hierro en transformadores	82	kW.h/día
Pérdidas reactivas en transformadores	11	kvar	Pérdidas de energía reactiva en transformadores	103	kvar.h/día
Pérdidas totales de potencia activa	10	kW	Pérdidas totales de energía activa	146	kW.h/día
Pérdidas totales de potencia reactiva	12	kvar	Pérdidas totales de energía reactiva	114	kvar.h/día
% de pérdidas de potencia	2	%	% de pérdidas de energía	2	%
Factor de potencia del circuito	0.89		Factor de potencia medio pesado	0.91	
Potencia activa de cogeneración	0	kW	Energía activa de cogeneración	0	kW.h/día
Potencia reactiva de cogeneración	0	kvar	Energía reactiva de cogeneración	0	kW.h/día
Potencia reactiva en capacitores.	0	Ckvar			

En la actualidad se está valorando la posibilidad de pasar más carga desde el circuito VJ-72 al VJ-129 y construir un nuevo tronco a través de la calle Dagoberto Cubela, que enlazaría con Valeriano López, Lino Pérez y la Avenida Independencia. Es decir, el suroeste de la ciudad quedaría alimentado por el VJ-129.

4.5.6 Circuito VJ-129 expreso con cambio de calibre y convertido a 13 kV

Este circuito, a pesar de ser uno de los más pequeños, debe convertirse también a 13 kV, para eliminar las pérdidas que se producen en el obsoleto nivel de voltaje de 4,16 kV, a causa de las altas corrientes que circulan por las líneas.

La tabla que se muestra a continuación es el resultado arrojado por el Radial al realizarse la corrida de este circuito.

Tabla 4.8 Flujo de carga trifásico del circuito VJ-129 convertido a 13 kV

Resultados del Flujo de Carga Trifásico					
 Salvar		 Vista Previa		 Imprimir	
 Salir		 Notas		Converge (5 iteraciones)	
Fichero : vj 129 13.2					
Hora de análisis: 8		Horas		<input checked="" type="checkbox"/> Hora de máxima	
<input type="checkbox"/> Hora de mínima					
Concepto	Valor	U/M	Concepto	Valor	U/M
Potencia activa de las cargas	549 kW		Energía activa de las cargas	7 MW.h/día	
Potencia reactiva de las cargas	268 kvar		Energía reactiva de las cargas	3 Mvar.h/día	
Pérdidas activas en líneas	0 kW		Pérdidas de energía activa en líneas	1 kW.h/día	
Pérdidas reactivas en líneas	0 kvar		Pérdidas de energía reactiva en líneas	1 kvar.h/día	
Pérdidas de cobre en transformadores	5 kW		Pérdidas de energía de cobre en transformadores	53 kW.h/día	
Pérdidas de hierro en transformadores	3 kW		Pérdidas de energía de hierro en transformadores	82 kW.h/día	
Pérdidas reactivas en transformadores	11 kvar		Pérdidas de energía reactiva en transformadores	103 kvar.h/día	
Pérdidas totales de potencia activa	9 kW		Pérdidas totales de energía activa	136 kW.h/día	
Pérdidas totales de potencia reactiva	11 kvar		Pérdidas totales de energía reactiva	104 kvar.h/día	
% de pérdidas de potencia	2 %		% de pérdidas de energía	2 %	
Factor de potencia del circuito	0.89		Factor de potencia medio pesado	0.91	
Potencia activa de cogeneración	0 kW		Energía activa de cogeneración	0 kW.h/día	
Potencia reactiva de cogeneración	0 kvar		Energía reactiva de cogeneración	0 kvar.h/día	
Potencia reactiva en capacitores.	0 Ckvar				

Asimismo, de igual forma que los circuitos anteriores, la siguiente tabla resume los resultados y compara los mismos.

Tabla 4.9 Comparación de resultados del circuito VJ-129

Circuito VJ-129										
Demanda máx. 549 (kW)	ΔP (kW)				ΔE (kWh/día)			kV fase min.	Distancia a la subestación (km)	
	Transformador		Líneas	Total	Transformador		Líneas			Total
	Cu	Fe			Cu	Fe				
Estado actual	6	3	3	13	60	82	30	172	2,37	0,69
Cambio de calibre	5	3	1	10	53	82	11	146	2,39	0,69
Convertido a 13,2 kV	5	3	0	9	53	82	1	136	7,62	0
Ahorro	1	0	0	4	7	0	29	36		

4.5.7 Comparación de los resultados obtenidos

Los resultados obtenidos de los estados actuales, con los cambios de calibre y los circuitos convertidos, se resumen en la tabla que aparece a continuación.

Tabla 4.10 Comparación de los resultados obtenidos de los circuitos

Circuito	ΔP totales (kWh/día)		Ahorro (Día)	Ahorro (Año)
	Estado actual	Propuesta (13,2 kV)		
VJ-72	1 385	633	752 (kWh/día)	274,4 (MWh/año)
VJ-73	950	427	523 (kWh/día)	190,8 (MWh/año)
VJ-129	172	136	36 (kWh/día)	13,1 (MWh/año)
Total	—————→			478,3 (MWh/año)

Conclusiones

En el presente trabajo se realizó un análisis de algunos circuitos de distribución primaria del municipio de Camajuaní, donde se estudió el comportamiento de estas redes. A partir de ello, se arribó a las siguientes conclusiones:

1. A partir de la actualización de los circuitos en el Radial 10.0, se obtuvieron los resultados del estado actual de los mismos, y se comprobó su alto valor de pérdidas eléctricas.
2. Existen circuitos topológicamente muy extensos, de configuración radial y líneas de calibres inapropiados, con nivel de voltaje primario bajo, lo que provoca caídas muy grandes de voltaje al final de los mismos y pérdidas técnicas importantes.
3. Muchos de los circuitos de distribución primaria del municipio se encuentran en mal estado y con varias condiciones inseguras.
4. Se propone inicialmente realizar cambios de calibre en cada uno de ellos, en los tramos identificados con Cu # 4 y Cu # 6, por conductores de Aluminio AAAC 2/0 Anaheim (78 mm).
5. Una segunda y última etapa se enfoca en convertir estos circuitos a 13 kV, lo cual arroja resultados muy positivos, donde resalta el valor considerable de reducción de pérdidas de energía eléctrica. Ello implica un ahorro para el país de 478,3 MWh/año, equivalente a 275 979 USD, calculado al costo actual de 577 USD por cada MWh generado en el país.

Referencias bibliográficas

- [1] KHAN, A.H., R. P. BROADWATER and A. CHANDRASEKARAN. (1988). A comparative study of three radial power flow methods. *Proceedings of the IASTED International Symposium, High Technology in the Power Industry*. Arizona, EE. UU.
- [2] CÉSPEDES, R. (1990). New method for the analysis of distribution network. *IEEE transaction on power delivery*, 5 (1), 391-396.
- [3] MUÑOZ, C. (1989). Flujo de potencia trifásico para sistemas de distribución. Memoria para optar por el título de Ingeniero Civil Electricista, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.
- [4] GÖNEN, T. (1986). *Electric Power Distribution System Engineering*. EE. UU.: McGraw Hill Book Company.
- [5] PANSINI, A.: *Basic Electrical Power Distribution*. vols. 1-2. EE. UU.: Hayden Book Company Inc.
- [6] UNIÓN ELÉCTRICA NACIONAL. (2001). UR-BD-0102 «Balanceo de fases en circuitos primarios» (rev. 00). Cuba.
- [7] STEVENSON, W. (1977). *Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia*. Madrid: Mc Graw Hill.

Datos de los autores

Yulier Ortuño Borroto. Jefe Técnico de la Empresa Eléctrica del municipio de Camajuaní, Villa Clara, Cuba. Ingeniero Electricista (2005). MSc. en 2010. Realiza trabajos académicos e investigativos en el área de Pérdidas de energía en redes eléctricas. E-mail: yulierob@elecvccl.une.cu

Gretchen Villar Vázquez. Metodóloga de la Dirección General de Economía. Asistente docente de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. Ingeniera Electricista por la Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Cuba (2005). MSc. en 2012. Realiza trabajos académicos e investigativos en el área de Pérdidas de energía en redes eléctricas. E-mail: gretchen@uclv.cu