

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**ANÁLISIS DEL ESTADO PERMANENTE DE UNA RED  
DE DISTRIBUCIÓN RADIAL**

**Proyecto de Grado para optar el grado académico de Ingeniero Eléctrico**

**POR: UNIV. FREDDY OJEDA LOZA**

**TUTOR: ING. RODMY ADALID MIRANDA ORDOÑEZ**

**LA PAZ - BOLIVIA**

**2021**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Proyecto de Grado:**

ANÁLISIS DEL ESTADO PERMANENTE DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN  
RADIAL

**Presentado por:** Univ. Freddy Ojeda Loza

**Para optar el grado académico de Ingeniero Eléctrico**

Nota numeral:.....

Nota literal:.....

Ha sido aprobado como.....

**Ing. Rodmy Adalid Miranda Ordoñez**  
**Director de Carrera de Ingeniería Eléctrica**

Tutor: Ing. Rodmy Adalid Miranda Ordoñez

Tribunal: Ing. Gonzalo Oscar Eulate Choque

Ing. Walter Ramírez Críales

Ing. Jaime Ricardo Peña Montaña

Fecha:.....

## **DEDICATORIA**

Dedico el cumplimiento de este sueño a:

Dios, dueño de mi vida y talento.

A mis padres Simón Ojeda y Florencia Loza, por darme amor y cuidado.

A mis hermanas Sonia y Estela, por brindarme cariño y apoyo.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar agradecer a Dios por todas las bendiciones que me dio en la vida, de manera muy especial agradecer a mi asesor por su gran disponibilidad ante cualquier consulta, también agradecer a mis docentes que nos brindaron su conocimiento para prepararnos en la vida laboral y agradecer a mis padres, hermanas por su apoyo incondicional.

## **RESUMEN**

Para la determinación del estado eléctrico o en la decisión de una reconfiguración de una red de distribución radial de media tensión se requiere conocer los voltajes nodales y su posterior determinación de flujos de carga en tiempo real.

Motivo por el cual este proyecto presenta una metodología que tiene la ventaja de acortar los cálculos realizados manualmente mediante la elaboración de un programa computacional que permitirá contribuir a ver en forma técnica el estado de las redes de distribución trifásica de media tensión, dimensionamiento de banco de condensadores y banco reguladores automáticos de voltaje para reducir pérdidas y caídas de tensión entre otras.

El método para el cálculo de flujos de carga es el ‘‘**Método Escalonado**’’ por el solo manejo de vectores complejos y su capacidad de admitir subiteraciones.

# **“ANÁLISIS DEL ESTADO PERMANENTE DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN RADIAL”**

## **ÍNDICE GENERAL**

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ÍNDICE DE CUADROS

ÍNDICE DE FIGURAS

## **CAPÍTULOS**

### **CAPÍTULO I**

#### **MARCO REFERENCIAL**

1.1	INTRODUCCIÓN	I - 1
1.2	OBJETIVO GENERAL	I - 2
1.3	OBJETIVOS ESPECIFICOS	I - 2
1.4	ALCANCE	I - 2
1.5	LÍMITES	I - 3

### **CAPÍTULO II**

#### **SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

2.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	II - 1
2.2	ESTADO PERMANENTE O ESTACIONARIO	II - 3
2.3	ESTADO TRANSITORIO O DINÁMICO	II - 4
2.4	CLASIFICACIÓN DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN	II - 4
2.4.1	NIVEL DE VOLTAJE	II - 4
2.4.1.1	RED PRIMARIA (MT)	II - 5

2.4.1.2	RED SECUNDARIA (BT)	II - 5
2.4.2	ÁREA GEOGRAFÍA SERVIDA	II - 5
2.4.2.1	RED URBANA	II - 5
2.4.2.2	RED RURAL	II - 6
2.4.3	TIPO CONSTRUCTIVO DE LA RED	II - 6
2.4.3.1	RED AÉREA (OVERHEAD LINES)	II - 6
2.4.3.2	RED SUBTERRANEA (UNDERGROUND LINES)	II - 7
2.5	EL VOLTAJE EN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	II - 8
2.6	CONTROL DE VOLTAJE	II - 8
2.6.1	CONSTRUCTIVA	II - 9
2.6.2	BALANCE DE CARGAS	II - 9
2.6.3	TRANSFERENCIA DE CARGA A NUEVOS ALIMENTADORES	II - 9
2.6.4	AUMENTO DEL NIVEL DE VOLTAJE PRIMARIO	II - 9
2.6.5	APLICACIÓN DE REGULADORES AUTOMÁTICOS DE VOLTAJE	II - 10
2.6.6	APLICACIÓN DE CAPACITORES	II - 11
2.7	PÉRDIDAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA RED	II - 12
2.8	VENTANA DE CARGA	II - 12
2.9	CLASIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS	II - 14
2.9.1	PÉRDIDAS NO TÉCNICAS	II - 14
2.9.2	PÉRDIDAS TÉCNICAS	II - 16
2.10	CONFIGURACIONES FÍSICAS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN	II - 19
2.10.1	CONFIGURACIONES TIPO RADIAL	II - 19
2.10.1.1	CARACTERÍSTICAS DE LA RED RADIAL	II - 20
2.10.2	CONFIGURACIÓN TIPO LAZO	II - 20
2.10.2.1	CARACTERÍSTICAS DE LA RED EN LAZO	II - 21
2.10.3	CONFIGURACIÓN TIPO MALLA	II - 22
2.10.3.1	CARACTERÍSTICAS DE LA RED MALLADA	II - 23



**CAPÍTULO III**  
**FLUJOS DE POTENCIA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN RADIAL**

3.1	INTRODUCCIÓN	III - 1
3.2	MÉTODO DE FLUJOS DE POTENCIA	III - 1
3.2.1	MÉTODO ESCALONADO	III - 2
3.2.2	MÉTODO DE SUMA DE POTENCIAS	III - 2
3.2.3	MÉTODO DE SUMA DE CORRIENTES (Current Summation Method)	III - 4
3.2.4	MÉTODO SIMPLIFICADO DE SUMA DE POTENCIAS	III - 6

**CAPÍTULO IV**  
**MÉTODO ESCALONADO CON SUBITERACIONES PARA EL CÁLCULO DE**  
**FLUJOS DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN RADIAL -**  
**MEDIA TENSIÓN**

4.1	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO ESCALONADO	IV - 1
4.2	FLUJOS DE POTENCIA EN UNA SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL	IV - 3
4.2.1	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE A (ALIMENTADOR)	IV - 4
4.2.2	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE B (ALIMENTADOR)	IV - 15
4.2.3	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE C (ALIMENTADOR)	IV - 26
4.3	CONCLUSIÓN Y COMENTARIOS	IV - 37

**CAPÍTULO V**  
**INGRESO DE PARÁMETROS Y DATOS TOPOLÓGICOS**

5.1	INTRODUCCIÓN	V - 1
5.2	PARÁMETROS DE ANÁLISIS DEL SITEMA	V - 1
5.3	REQUERIMIENTO DE SISTEMA COMPUTARIZADO	V - 3
5.4	RESULTADOS OBTENIDOS	V - 3
5.5	CONCLUSIONES	V - 4

**CAPÍTULO VI**  
**APLICACIONES A SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

6.1	RESUMEN	VI - 1
6.2	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL (SUBESTACIÓN KENKO)	VI - 1
6.3	SISTEMA DE DE DISTRIBCIÓN RADIAL (SUBESTACIÓN ACHACACHI)	VI - 4
6.4	RESULTADOS OBTENIDOS Y ANALISIS	VI - 8

**ANEXOS**

**Anexo A. HOJA DE RESULTADOS OBTENIDOS**

**Anexo B. GRÁFICOS**

**BIBLIOGRAFÍA**

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Número</b>	<b>CUADRO</b>	<b>Capítulo –Página</b>
4.1	Datos del Sistema de Distribución Radial Fase A (Alimentador)	IV - 4
4.2	Resultados Fase A (Alimentador)	IV - 10
4.3	Potencia Activa y Reactiva Entregada y Recibida Fase A (Alimentador)	IV - 12
4.4	Pérdida de Potencia Activa y Reactiva Fase A (Alimentador)	IV - 14
4.5	Datos del Sistema de Distribución Radial Fase B (Alimentador)	IV - 15
4.6	Resultados Fase B (Alimentador)	IV - 21
4.7	Potencia Entregada, Recibida y Pérdida Fase B (Alimentador)	IV - 24
4.8	Datos del Sistema de Distribución Radial Fase C (Alimentador)	IV - 26
4.9	Resultados Fase C (Alimentador)	IV - 32
4.10	Potencia Entregada, Recibida y Pérdida Fase C (Alimentador)	IV - 35
6.1	Alimentador SIMSA	VI - 2
6.2	Alimentador ACHACACHI	VI - 7

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Número</b>	<b>FIGURA</b>	<b>Capítulo - Página</b>
2.1	Sistemas de Distribución Típica.	II - 2
2.2	Red de Distribución.	II - 3
2.3	Reguladores de Voltaje.	II - 10
2.4	Banco de Capacitores instalado sobre poste, ciudad EL Alto-La Paz.	II - 11
2.5	Ventana de carga Típica.	II - 14
2.6	Configuración tipo radial.	II - 19
2.7	Configuración tipo lazo.	II - 21
3.1	Representación unifilar de un alimentador radial.	III - 5
4.1	Alimentador Radial.	IV - 1
4.2	Sistema de Distribución Radial Fase A (Alimentador)	IV - 4
4.3	Potencia Activa y Reactiva entregada, recibida en cada nodo Fase A (Alimentador).	IV - 14
4.4	Sistema de Distribución Radial Fase B (Alimentador)	IV - 15
4.5	Potencia Activa y Reactiva entregada, recibida en cada nodo Fase B (Alimentador).	IV - 25
4.6	Sistema de Distribución Radial Fase C (Alimentador)	IV - 26
4.7	Potencia Activa y Reactiva entregada, recibida en cada nodo Fase C (Alimentador)	IV - 36
5.1	Ingreso de datos “Alimentador principal” (entrada.xlsx).	V - 2
5.2	Resultados para cada una de las Fases (Método Escalonado).	V - 3
5.3	Resultados Alimentador Principal.	V - 4
6.1	Subestación de Achacachi.	VI - 5

# CAPÍTULO I

## MARCO REFERENCIAL

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Para la determinación del estado eléctrico de un sistema de distribución o en la decisión de una reconfiguración de una red de distribución se requieren cálculos de voltaje nodales y su posterior determinación de flujos de potencia, con una precisión y rapidez sobre todo para sistemas en tiempo real.

Estos cálculos son de gran ayuda para resolver problemas de operación económica, regulación de tensión, planificación de nuevos sistemas de esta manera incrementar su eficiencia y mejorar la administración de energía.

Es por eso que se hace necesario disponer de un software que permita realizar cálculos de flujos de potencia, en la que nos permita determinar las tensiones en las distintas barras de la red, las potencias activas y reactivas entregadas y/o recibidas en cada nodo, las pérdidas de potencia activa y reactiva en cada nodo entre otros, dichas operaciones son apropiadas para realizar acciones de control tales como en el diseño, la expansión, reconfiguración, control de voltajes y potencia reactivas etc.

La elección de un método adecuado para satisfacer las necesidades de exactitud y confiabilidad es “El método Escalonado”, por el manejo de vectores complejos y su capacidad de admitir subiteraciones.

El método que se presenta también puede formar parte en la modelación y solución de flujos de potencia orientado a redes de distribución trifásicas con un cierto desbalance.

## 1.2 OBJETIVO GENERAL

En un sistema de distribución es necesario determinar el estado eléctrico de operación de la red, una forma de saber es determinando los voltajes en los distintos nodos o puntos de alimentación, mediante un programa computacional para un sistema de distribución radial.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Mostrar los procesos iterativos que se deben realizar para el cálculo de voltajes nodales de la red usando el Método Escalonado.
- ✓ Realizar los cálculos de voltajes, corrientes en los distintos nodos de la red, flujos de potencia activa, reactiva en todos los nodos y pérdidas en las fases entre otros.
- ✓ Elaborar un programa computacional para el cálculo de flujos de potencia.
- ✓ Validar los resultados obtenidos con el programa con cálculos hechos manualmente y con un software especializado en Sistemas de Distribución CYMDIST.

## 1.4 ALCANCE

En el presente proyecto tiene los siguientes alcances:

- ✓ Aplicación a Redes de Distribución Radial Trifásica de MT, con un número de nodos.
- ✓ El cálculo de voltajes nodales y su posterior cálculo de flujos de potencia se la hace para un alimentador principal.
- ✓ Aplicación para la red de MT alimentador KENKO.
- ✓ Aplicación para la red de MT alimentador ACHACACHI.

- ✓ Aplicación del programa computacional en materias relacionadas al tema dentro la carrera de Ingeniería Eléctrica.

## 1.5 LÍMITES

- ✓ Todas las cargas se consideran inductivas.
- ✓ No se toma en cuenta corto circuitos, armónicos.
- ✓ No se toma en cuenta la regulación de tensiones con la instalación de capacitores.
- ✓ No se toma en cuenta transformadores reductores o elevadores.
- ✓ Se usa la configuración tipo Radial.
- ✓ Se usa cargas desbalanceadas.
- ✓ No se realiza ubicación óptima de reconectores.
- ✓ No se realiza ubicación de condensadores.
- ✓ No se realiza ubicación óptima de reguladores de tensión.
- ✓ No se realiza la localización de fallas, mínima, serie y simultánea.
- ✓ No se realiza flujo de carga con perfiles.
- ✓ No se toma en cuenta análisis de dispositivos de protección y distancia.
- ✓ No se toma en cuenta balance de cargas.
- ✓ No se toma en cuenta dimensionamiento de cables de alta, baja y media tensión.
- ✓ No se toma en cuenta estabilidad transitoria.

## **CAPÍTULO II**

### **SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

#### **2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

Un sistema de Distribución es una parte integrante de un sistema Eléctrico de Potencia constituido por las etapas de generación, transmisión o sub transmisión y distribución, que tiene la función principal de llevar la energía eléctrica de los centros de generación hasta los centros de consumo de manera segura y confiable.

Las redes de distribución presentan características muy particulares que los diferencian de los sistemas de transmisión tales características son:

- Topologías radiales.
- Múltiples conexiones (monofásicas, bifásicas y trifásicas).
- Cargas de distinta naturaleza.

Los sistemas de distribución son típicamente radiales, esto implica que el flujo de potencia nace solo de un nodo. Este nodo se reconoce como la subestación que alimenta al resto de la red fig. (2.1).



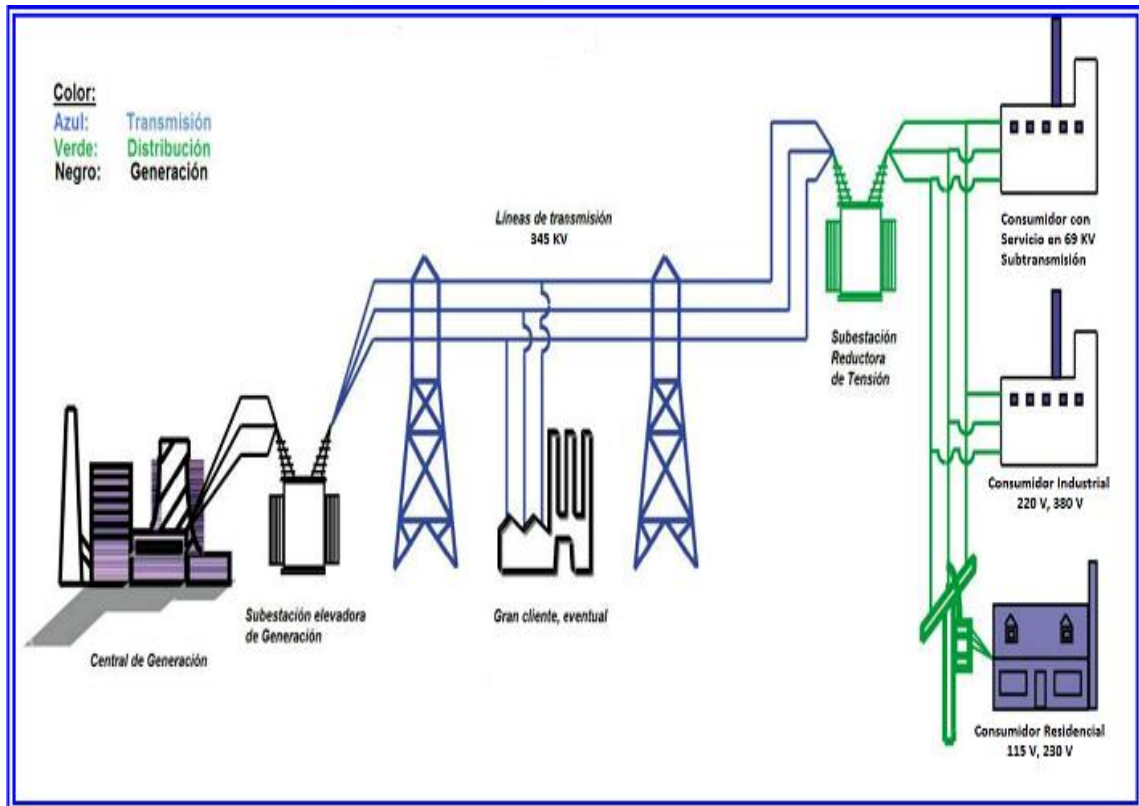


fig. (2.1) Sistemas de Distribución típica  
Fuente: Elaboración Propia.

En estos sistemas se puede encontrar muchos tipos de conexiones: Trifásicas, Bifásicas o Monofásicas. Si bien en Media Tensión predominan las redes trifásicas es frecuente encontrar cargas monofásicas especialmente en zonas rurales. Sin embargo es en baja tensión en donde se encuentran las más variadas conexiones, consecuencia de una mayoría de cargas residenciales de naturaleza monofásica. Los desequilibrios que se generan en Baja Tensión tratan de amortiguarse repartiendo equitativamente las cargas en las tres fases.

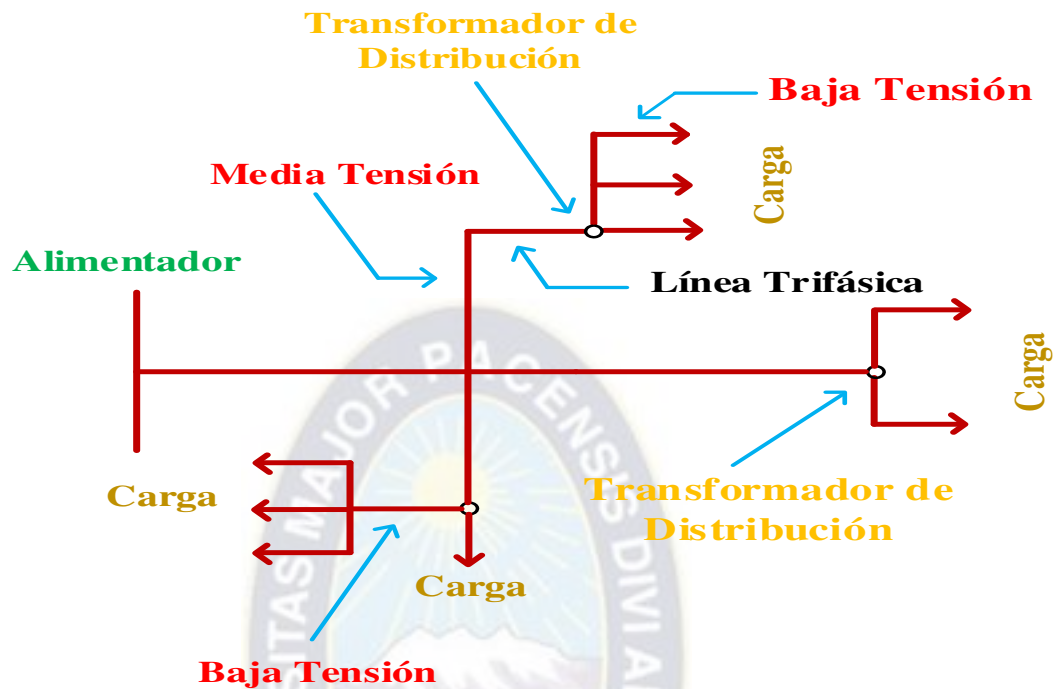


Fig. (2.2) Red De Distribución.  
Fuente: Elaboración Propia.

Se puede encontrar en un sistema de distribución cargas de diferente naturales tales como: Residenciales comerciales, industriales y agro industriales, todas estas tiene un factor de potencia típico y un determinado comportamiento frente a las variaciones de tensión y temperatura.

## 2.2 ESTADO PERMANENTE O ESTACIONARIO

Antes de llegar a una situación estacionaria o régimen permanente pasa por un periodo de transición durante el cual tensiones y corrientes varían hasta llegar a la condición de equilibrio impuesta por la red.

El estado permanente es la respuesta que permanece constante hasta que existe alguna anomalía en la red de distribución, que puede ser una conexión o desconexión.

## 2.3 ESTADO TRANSITORIO O DINÁMICO

Se llama estado transitorio o solamente “transitorio”, aquella respuesta que se extingue en el tiempo.

En general cualquier proceso de conexión/desconexión, como ser evento de “switch” o apertura del reconectador (al momento que abre el reconectador, se desconecta el ramal donde está interconectado esta parte del alimentador, hará que existan fenómenos transitorios.

Estos aunque generalmente son de corta duración, pueden producir problemas series en el funcionamiento de los equipos.

## 2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

Las redes eléctricas de distribución se clasifican en función a los siguientes parámetros:

- Nivel de voltaje.
- Área geografía servida.
- Tipo constructivo de la red.

### 2.4.1 NIVEL DE VOLTAJE

Se presentan:

- Red primaria (MT)
- Red secundaria (BT)

#### 2.4.1.1 RED PRIMARIA (MT)

La red primaria de tensión es el conjunto de alimentadores aéreos o subterráneos con sus respectivas derivaciones que alimentaran un área urbana o rural, a los transformadores de distribución y consumidores conectados, el intervalo de voltaje de la red primaria va desde 1 KV hasta 40 KV.

#### 2.4.1.2 RED SECUNDARIA (BT)

La red de sistema de distribución secundaria es la parte del sistema de distribución aérea o subterránea, dentro de un perímetro, la cual es alimentada por los transformadores de distribución. El intervalo de voltajes de la red secundaria va desde 110 V hasta 1KV.

#### 2.4.2 ÁREA GEOGRAFÍA SERVIDA

Según el Área geográfica servida se clasifican:

- Red urbana (centros urbanos, ciudades)
- Red rural (área rural)

##### 2.4.2.1 RED URBANA

Las redes de distribución urbana presentan las siguientes características:

Usuarios muy concentrados.

- Cargas monofásicas y trifásicas.
- Facilidad de acceso.
- En general se usa postes d concreto.
- Facilidad de transporte desde los proveedores de materiales y equipos al sitio de trabajo.

- Transformadores generalmente trifásicos en áreas de alta densidad de carga y monofásicos tetrafilares en áreas de carga moderada.

#### 2.4.2.2 RED RURAL

Las redes de distribución rural presentan las siguientes características:

- Usuarios muy dispersos.
- Cargas generalmente monofásicas.
- Dificultades de acceso en las zonas montañosas lo que implica costo extra en el transporte y manejo de materiales.
- Los conductores son ACSR por lo general.
- A menudo es necesario efectuar desmonte, esto en zonas trópicas.

#### 2.4.3 TIPO CONSTRUCTIVO DE LA RED

Según el tipo constructivo se clasifican en:

- Red aérea (overhead lines).
- Red subterránea (underground lines).

##### 2.4.3.1 RED AÉREA (OVERHEAD LINES)

El conductor que usualmente está desnudo, va soportado a través de aisladores instalados en crucetas, en postes de madera o concreto.

Tiene las siguientes ventajas respecto a la subterránea.

- Costo inicial más bajo.
- Son las más comunes y materiales de fácil obtención.

- Fácil mantenimiento.
- Fácil localización de fallas.
- Tiempos de construcción más bajo.

Sus desventajas:

- Mal aspecto estético
- Menor seguridad (ofrece mayor peligro para los transeúntes)
- Son susceptibles de fallas y cortes de energía ya que están expuestos a: descargas atmosféricas. Lluvia, granizo, polvo, temblores gases contaminantes contactos con cuerpos extraños, choques de vehículo y vandalismo.

#### 2.4.3.2 RED SUBTERRANEA (UNDERGROUND LINES)

Son empleadas por razones de urbanismo, estética, congestión o condiciones de seguridad. Actualmente el sistema subterráneo es competitivo frente al sistema aéreo en zonas urbanas céntricas.

Tiene las siguientes ventajas:

- Mucho más confiable ya que la mayoría de las contingencias que tiene la red aérea no afecta a las redes subterráneas.
- Son más estéticas pues no están a la vista.
- Son mucho más seguras.
- No están expuesta a vandalismo.

Tiene las siguientes desventajas:

- Su alto costo de inversión inicial.
- Se dificulta la localización de fallas.

- El mantenimiento es más complicado y las reparaciones demoran mucho tiempo.
- Están expuestas a la humedad y a la acción de roedores.

Los conductores usados son aliados de acuerdo al voltaje de operación y conformados por varias capas aislantes y cubiertas protectoras. Estos cables están directamente enterrados o instalados en ductos. Un sistema subterráneo cuenta con ductos, cables, cámaras, empalmes, uniones y terminales.

## 2.5 EL VOLTAJE EN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Una empresa eléctrica no puede suministrar energía eléctrica con voltaje constante e igual al voltaje nominal. Por lo tanto la práctica común en las empresas es de mantener los niveles de voltaje dentro del rango apropiados para los consumidores.

En general la elevación del voltaje en estado permanente, causa la reducción de la vida útil de algunos dispositivos electrónicos, por tanto la disminución de voltaje en estado permanente causa bajos niveles de iluminación, lento calentamiento en equipos que dan calor, dificultad en el arranque de motores y/o sobrecalentamiento, pero los equipos ya modernos trabajan en un rango de voltaje máximo y mínimo sin necesidad de ser afectados de gran manera.

## 2.6 CONTROL DE VOLTAJE

El voltaje en circuitos de distribución debe permanecer dentro de los límites permisibles, es decir aumentando si es bajo o disminuyendo si es alto. Existen varias maneras para regular el nivel de voltaje.

- a) Constructiva.
- b) Balance de cargas.



- c) Transferencia de carga a nuevos alimentadores.
- d) Aumentó de nuevo nivel de voltaje primario.
- e) Aplicación de reguladores automáticos de voltaje.
- f) Aplicación de capacitores.

### 2.6.1 CONSTRUCTIVA

Es el aumento del calibre del conductor o cambiando las secciones del alimentador monofásico por alimentador multifase o finalmente variar la disposición física de los conductores de fase acercándoles más.

### 2.6.2 BALANCE DE CARGAS

El balance de cargas en un sistema trifásico permite evitar tener subtensiones y sobretensiones en algunas fases, así mismo se disminuye el nivel de pérdidas de potencia en la red.

### 2.6.3 TRANSFERENCIA DE CARGA A NUEVOS ALIMENTADORES

La transferencia de carga a nuevos alimentadores logra disminuir la carga en el alimentador en cuestión subiendo los niveles de voltaje en los nodos de la red.

### 2.6.4 AUMENTÓ DEL NIVEL DE VOLTAJE PRIMARIO

El aumento del nivel de voltaje primario produce en la red, una disminución de la magnitud de la corriente eléctrica, por lo cual se consigue disminuir las caídas de tensión en la red.



### 2.6.5 APLICACIÓN DE REGULADORES AUTOMÁTICOS DE VOLTAJE

La aplicación de reguladores automáticos de voltaje como equipos auxiliares en la red, tiene el objeto de mantener un nivel de voltaje dentro de un rango de variación aceptable.

Cuando la carga aumenta el regulador levanta el voltaje en la subestación para compensar la caída de voltaje en el alimentador. En caso donde los consumidores están localizados lejos de la subestación o donde la caída de voltaje a lo largo del alimentador es excesiva, se instalan reguladores o capacitores adicionales para mejorar el perfil de voltaje.



Fig. (2.3) Reguladores de Voltaje.

## 2.6.6 APLICACIÓN DE CAPACITORES

La aplicación de capacitores, es otra alternativa adoptada en la mejora del perfil de voltaje de la red. Los capacitores se instalan sobre el alimentador en algún nodo de la red para mejorar el perfil de voltaje.



Fig. (2.4) Banco de Capacitores instalado sobre poste, ciudad de EL Alto-La Paz.

El uso más común de un banco de capacitores es la corrección del factor de potencia de la fuente de alimentación, un factor de potencia de uno o “factor de potencia unitario” es el objetivo de cualquier empresa de servicio eléctricos, ya si el factor de potencia es menor que uno, deben suministrar más corriente al usuario. Al hacerlo, incurren en más pérdidas en la línea. También deben tener equipos de mayor capacidad en lugar de lo que sería necesario. Como resultado a una instalación industrial se le cobrar una multa si su factor de potencia es diferente de 1, dependiendo de la legislación de cada país.

En las industrias que utilizan una gran cantidad de transformadores y motores eléctricos, debido a que estos equipos usan una gran carga inductiva son susceptibles a cambios de fase y retardos del factor de potencia en la fuente de alimentación, lo que puede ocasionar una pérdida de eficiencia del sistema si no se corrige.

## 2.7 PÉRDIDAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA RED

En los distintos componentes de la red eléctrica se producen, en condiciones normales de operación, pérdidas técnicas.

Estas pérdidas representan un serio problema que se refleja en deficiencias operativas de las Empresas de Distribución, las que ocasionan mayores costos internos que producen un serio impacto sobre las tarifas eléctricas y sobre la economía de las Empresas.

## 2.8 VENTANA DE CARGA

Las redes de distribución presentan características muy particulares, entre estas se distinguen:

- Topologías mayormente radiales.
- Múltiples conexiones (trifásicas, bifásicas, monofásicas).

- Cargas de distinta naturaleza.

Los sistemas de distribución en un alto porcentaje son típicamente radiales, esto significa que el flujo de potencia nace solo de un nodo, este nodo principal es la subestación que alimenta al resto de la red. En la subestación se reduce el voltaje del nivel de alta tensión (A.T.), al nivel de media tensión (M.T.).

La distribución se hace en el nivel de M.T. o en baja tensión (B.T.). Los clientes residenciales y comerciales se alimentan en B.T., los clientes industriales en cambio se alimentan en M.T. o en B.T., según los requerimientos de cada uno de ellos.

En estos sistemas de distribución se puede encontrar varios tipos de conexiones así tenemos: trifásicas, bifásicas o monofásicas. Si bien es cierto que en M.T. la gran mayoría son redes trifásicas, se puede también encontrar cargas bifásicas, especialmente en zonas rurales. Pero es en B.T. en donde se encuentran los más variados tipos de conexiones, por la gran mayoría de cargas residenciales de naturaleza monofásica. Los desequilibrios que se generan en B.T. se pueden amortiguar equilibrando las cargas en las tres fases.

Otro aspecto particular en las redes de distribución es la presencia de cargas de distinta naturaleza; en efecto los tipos de carga que comúnmente se encuentran son: residenciales, comerciales, industriales, agro-industriales (estas últimas muy típicas en zonas rurales).

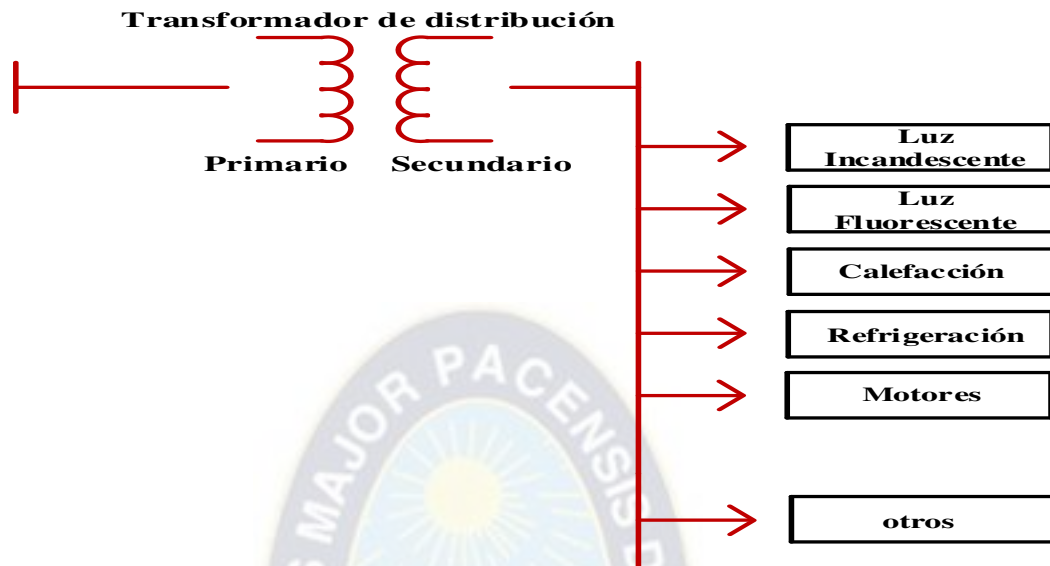


Fig. (2.5) Ventana de carga típica  
 Fuente: Elaboración propia.

## 2.9 CLASIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS

Las pérdidas de energía equivalen a la diferencia entre la energía comprada y la energía vendida y pueden clasificarse como pérdidas no técnicas o comerciales (comúnmente llamadas pérdidas negras) y pérdidas técnicas.

### 2.9.1 PÉRDIDAS NO TÉCNICAS

No toda la energía eléctrica que se produce, se vende y se factura, por lo tanto todas las empresas suministradoras del servicio de electricidad registran pérdidas en la energía que generan y tienen disponible para su venta.

Los aparatos de medición no lo contabilizan como entregado a los usuarios y por lo tanto, no puede ser objeto de cobro, las pérdidas no técnicas no constituyen una pérdida



real de energía, ésta es utilizada por algún usuario que es suscriptor o no, de la empresa distribuidora.

Las pérdidas no técnicas se pueden clasificar de acuerdo con varios criterios así tenemos:

a) Clasificación según la causa que las produce.

- Consumo de usuarios no suscriptores o contrabando, comprende fundamentalmente la conexión directa de usuarios del servicio a una red sin haber suscrito un contrato o acuerdo con la empresa distribuidora de energía. En este grupo también se encuentran los usuarios que habiendo tenido un contrato con la empresa distribuidora son desconectados de la red, y se vuelven a conectar a ésta sin autorización sin tener además medición de energía consumida.
- Error en la contabilización de energía, comprende todos los errores de medición de contadores de energía, lectura y facturación de suscriptores excluyendo de este grupo a los casos de adulteración de los equipos de medición.
- Fraude o hurto, comprende todos los casos en los que el usuario, siendo un suscriptor de la empresa distribuidora de energía, altera intencionalmente el equipo de medición o toma directamente la energía de la red.
- Error en consumo propio de las empresas distribuidoras.- comprende la energía consumida y no contabilizada por la empresa encargada de la distribución. Incluye generalmente el consumo no medido de auxiliares de subestaciones, alumbrado público, etc.

b) Clasificación según relación con la actividad administrativa de la empresa.

Es evidente que un sistema de medición defectuoso o que no se aplique en forma estrictamente periódica, procesos de facturación inadecuados e incapacidad para detectar y controlar las conexiones ilegales son un reflejo de la capacidad administrativa de la empresa distribuidora, o la falta de mecanismos legales para actuar en estos casos, así tenemos:

- Por registro o medición deficiente del consumo.
- Por facturación incorrecta de los usuarios.

Todas las pérdidas de energía tienen efectos adversos para las empresas de distribución por esa razón se encuentran obligadas a comprar energía adicional para satisfacer la demanda aparente, con lo cual se incrementan los costos.

### 2.9.2 PÉRDIDAS TÉCNICAS

Las pérdidas técnicas constituyen una parte de la energía que no es aprovechada y que el sistema requiere para su operación, es decir, es la energía que se pierde en los diferentes equipos, redes y elementos que forman parte del sistema de distribución y que sirven para conducir y transformar la electricidad.

Representan la energía que se pierde durante la transmisión dentro de la red y la distribución como consecuencia de un calentamiento natural de los conductores que transportan la electricidad desde las plantas generadoras.

Este tipo de pérdidas es normal en cualquier distribuidora de energía y no pueden ser eliminadas totalmente; sólo pueden reducirse a través del mejoramiento de la red.

Para lograr un plan adecuado de control y reducción de pérdidas técnicas, se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Diagnóstico del estado actual del sistema.
- Proyección de la carga.
- Revisión de los criterios de expansión.
- Estudios de flujos de carga para optimizar la operación de líneas y redes.
- Analizar la ubicación óptima de transformadores y usuarios.

Se puede realizar una clasificación de las pérdidas técnicas según la función del componente y según la causa que las originan.

a) Por la función del componente.

Pérdidas por transporte:

- En líneas de subtransmisión.
- En circuitos de distribución primaria.
- En circuitos de distribución secundaria.

Pérdidas por transformación:

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



b) Por la causa que las originan:

- Pérdidas por efecto Joule.

Cuando una corriente eléctrica atraviesa un conductor isotérmico, hay una generación de calor. Este efecto ocurre debido a la transferencia de energía eléctrica a través del conductor por un proceso análogo al rozamiento. Este efecto se denomina “efecto Joule”.

La ley de Joule enuncia que, “El calor que desarrolla una corriente eléctrica al pasar por un conductor es directamente proporcional a la resistencia, al cuadrado de la intensidad de la corriente y el tiempo que dura la corriente “.

$$Q = I^2 \times R \times t \text{ (Watt)}$$

Las pérdidas por efecto Joule se manifiestan principalmente en:

- ✓ Calentamiento de cables.
- ✓ Calentamiento de bobinados de los transformadores de distribución.

- Pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.

Existe una potencia que sirve exclusivamente para magnetizar el núcleo, esta potencia no tiene otra aplicación práctica, por lo que se la puede considerar como potencia perdida en la imantación del núcleo del transformador y es llamada pérdida por histéresis.

Por otro lado los equipos eléctricos están formados por pedazos de conductor que se mueven en un campo magnético o están situados en un campo magnético variable, dando lugar a corrientes inducidas que circulan por el volumen del conductor, estas corrientes se denominan de Foucault y son corrientes que generan pérdidas.

## 2.10 CONFIGURACIONES FÍSICAS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

Las configuraciones físicas de una red de distribución están referidas a la disposición geométrica de una línea, tales casos pueden ser: configuraciones tipo radial, tipo lazo, tipo malla.

### 2.10.1 CONFIGURACIONES TIPO RADIAL

La configuración tipo radial se usa generalmente en las zonas suburbanas y zonas rurales, formadas por un conjunto de líneas que solamente reciben alimentación por uno de sus extremos es decir la corriente tiene un solo camino de recorrido y en un solo sentido fig.(2.6).

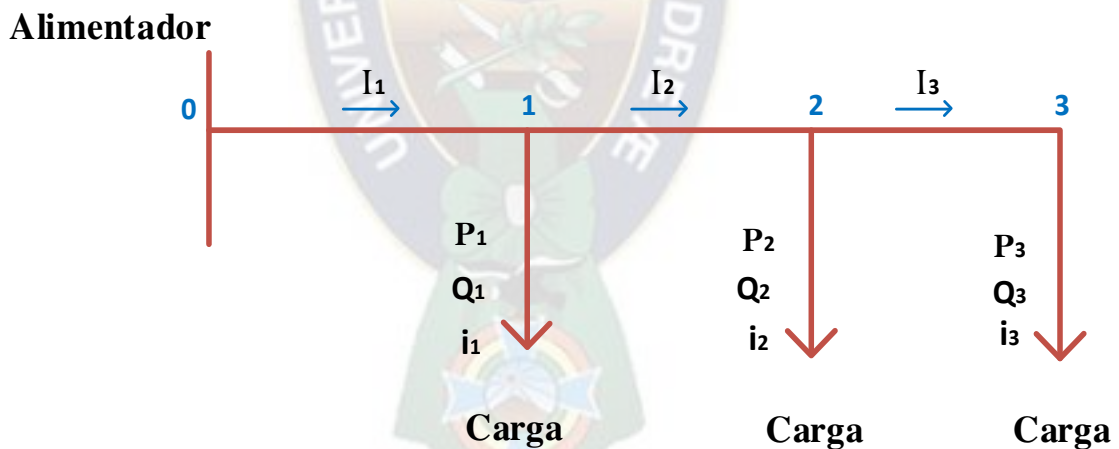


Fig. (2.6) Configuración tipo radial.  
Fuente: Elaboración propia.

Supongamos que se tiene un centro de cargas, y varias cargas que deben ser alimentadas desde este centro. Desde cada carga hasta el centro se debe encontrar un camino a través de un cable. El cable puede ser exclusivo para cada carga o bien puede pasar por varias cargas sucesivamente.

El sistema de alimentación en el cual cada carga está unida con el centro de alimentación a través de un cable exclusivo, es característico de las instalaciones industriales en el nivel de alimentación de las cargas. Una ventaja de este sistema es que permite el control centralizado desde el centro de alimentación, un ejemplo clásico es un centro de control de motores.

Los alimentadores primarios que parten de la subestación de distribución están constituidos por líneas aéreas sobre postes y alimentan los transformadores de distribución. En regiones rurales donde la densidad de carga es baja, se usa el sistema radial puro. En regiones suburbanas, con mayor densidad de carga, los alimentadores primarios que parten de la misma subestación o de subestaciones diferentes, tiene puntos de interconexión. En servicio normal estos puntos de interconexión están abiertos; en condiciones de emergencia permiten pasar parte de la carga de un alimentador a otro.

#### 2.10.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA RED RADIAL

Las características son:

La red radial crece en sentido del área de crecimiento de la carga (densidad de carga)

Calibre del conductor telescópico.

Menor confiabilidad de servicio

Menor inversión en su construcción

Porcentaje de regulación alta es decir mayor caída de tensión.

#### 2.10.2 CONFIGURACIÓN TIPO LAZO

En zonas de densidad de carga elevada, se puede recurrir para mejorar la continuidad de servicio, interconectando los extremos de los alimentadores primarios que salen de una misma subestación mediante un interruptor como se muestra en la figura (2.7)

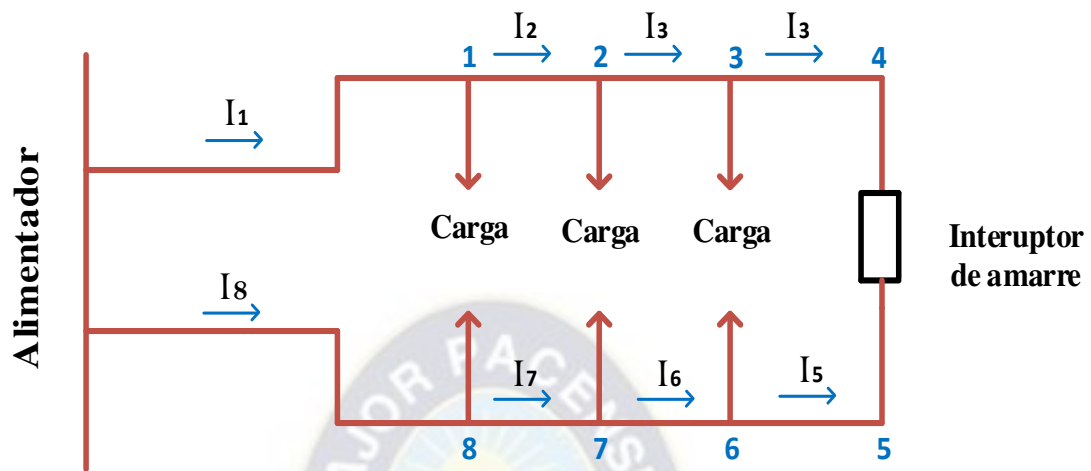


Fig. (2.7) Configuración tipo lazo.  
Fuente: Elaboración propia.

Operación con el interruptor de interconexión normalmente abierto, en cuyo caso los dos alimentadores funcionan como alimentadores radiales; en caso de una falla en un alimentador, abre el interruptor correspondiente de la subestación y después de desconectar la zona afectada por la falla puede cerrarse el interruptor de interconexión para tomar parte de la carga del alimentador afectado por la falla.

Operación con el interruptor de amare normalmente cerrado en cuyo caso opera como anillo; la carga total se divide entre los dos alimentadores y se obtiene una, mejor regulación del voltaje y se reducen las pérdidas. Una falla en un punto del anillo provoca la apertura del interruptor de amare el cual abre instantáneamente, separando los dos alimentadores y después abre el interruptor de la subestación correspondiente al alimentador afectado por la falla.

#### 2.10.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA RED EN LAZO

Existen algunas características especiales de la red en lazo:

Suelen operarse en forma radial.

Suministro a diferentes centros de consumo alejado entre sí con grandes cargas con alta calidad de suministro.

Menores caídas de tensión ante variaciones bruscas de carga (cerrado).

Mayor confiabilidad y continuidad en el suministro de energía eléctrica.

Mayor flexibilidad de operación.

Mayor facilidad de mantenimiento.

### 2.10.3 CONFIGURACIÓN TIPO MALLA

La red mallada es el resultado de entrelazar anillos y líneas radiales formando mallas.

El sistema mallado puede tener también más puntos de alimentación, frecuentemente en el nivel de distribución el funcionamiento de las redes, aun teniendo estructura mallada es radial, es decir se abren cierta cantidad de ramas a fin de poder alimentar todas las cargas y la red queda radial. En caso de pérdida de un cable en servicio se conectan otros cables (que estaban desconectados) a fin de que nuevamente la red con un nuevo esquema radial preste servicio a todos los usuarios, se puede decir que la red mallada funciona como red radial dinámica (que cambia).

Si se desea mantener las mallas cerradas, debe considerarse que los sistemas de protección deberán garantizar el buen funcionamiento separando exclusivamente el tramo que en cada condición se encuentre en falla. Esta es la principal dificultad que aún cuando se plantean sistemas mallados a nivel de distribución se los hace funcionar en modo radial, para facilitar la identificación de los puntos donde ocurren las fallas.

Las redes de alta tensión (transmisión) son las que funcionan en modo mallado, a medida que se baja a tensiones menores el funcionamiento se plantea en modo radial.

### 2.10.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA RED MALLADA

Algunas características en la red malla:

Seguridad de servicio.

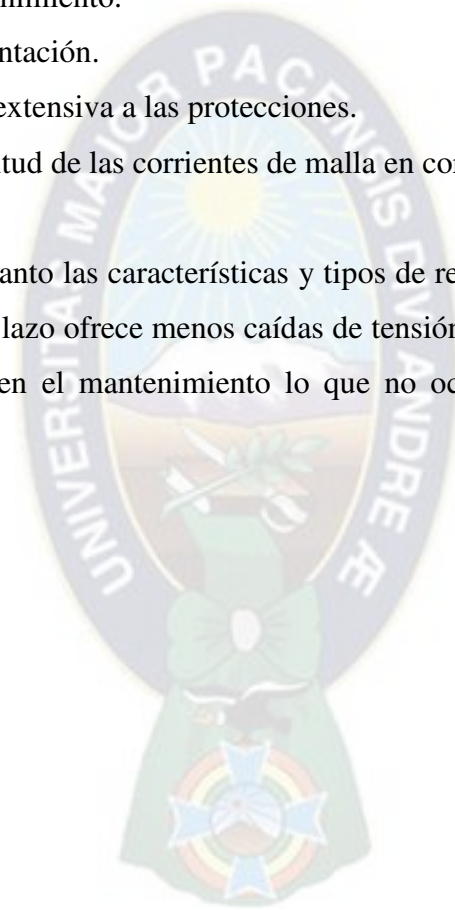
Facilidad en el mantenimiento.

Flexibilidad de alimentación.

Mayor complejidad, extensiva a las protecciones.

Aumento de la magnitud de las corrientes de malla en cortocircuitos.

Tomando en cuenta tanto las características y tipos de red que existe se puede decir que la configuración tipo lazo ofrece menos caídas de tensión, ofrece mayor confiabilidad de servicio y facilidad en el mantenimiento lo que no ocurre con la configuración tipo radial.



## **CAPÍTULO III**

### **FLUJOS DE POTENCIA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN RADIAL**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN**

El análisis más frecuente que se presenta en sistemas eléctricos es el cálculo en condiciones de operación en régimen permanente o estacionario, esto involucra calcular las tensiones nodales, corrientes de rama, corrientes de nodo, potencias activas y reactivas entregadas y/o recibidas en cada nodo, pérdidas de potencia activa y reactiva.

Los problemas de Flujos de Potencia fueron tratados por muchos autores debido a su gran importancia en el área de redes de distribución.

Para un Sistema de Distribución se ha considerado la topología Radial y es en base a esto que se desarrolló varios métodos tales como: el método escalonado, método de suma de corrientes y el método suma de potencias.

#### **3.2 MÉTODO DE FLUJOS DE POTENCIA**

Los métodos tradicionales para el cálculo de flujos de potencia son principalmente los métodos de Gauss-Seidel y Newton Raphson,

El método de Newton Raphson conocido por su excelente característica de convergencia (convergencia cuadrática), sobre todo las versiones desacopladas. La mayor desventaja de Newton Raphson consiste en el tener que calcular e invertir para cada iteración, la matriz jacobiana.



El método Gauss-Seidel directo es más confiable que el otro método ya mencionado (rara vez diverge). Además aunque las tensiones presentan convergencia de oscilaciones mayores que en el método indirecto, el proceso global converge mucho más rápido.

Debido a que la mayor parte de las redes de distribución en media y baja tensión son operadas radialmente estos métodos difícilmente se aplican a redes radiales, por tanto es necesario buscar métodos adecuados que estén orientados a sistemas de distribución de tipo radial.

### 3.2.1 MÉTODO ESCALONADO

El método escalonado es un proceso iterativo de cálculo de tensiones nodales, aguas arriba de la red.

El método usa los siguientes datos:

Tensión de alimentación de fase en la barra de origen.

Resistencia y reactancia de cada tramo.

Potencia Activa y Reactiva en cada nodo.

Longitud de cada tramo.

En un sistema de distribución el ángulo del voltaje nodal es pequeña por lo que solo se comprara magnitudes. Este método se encuentra desarrollado en el Capítulo IV, pág. (1, 2 y 3).

### 3.2.2 MÉTODO DE SUMA DE POTENCIAS

Este método usa dos procesos de iteración aguas arriba y otras aguas abajo de la red. El proceso aguas arriba consiste en determinar potencias equivalentes activas y reactivas  $P_i$



y  $Q_i$  (incluyendo pérdidas) vista desde un nodo aguas abajo, para lo cual se emplea las ecuaciones (3.1) y (3.2).

$$P_i = P_{Li} + \sum_{k=0}^{NAi} P_k + \sum_{k=0}^{NAi} R_k \left[ \frac{P_k^2 + Q_k^2}{V_k^2} \right] \quad (3.1)$$

$$Q_i = Q_{Li} + \sum_{k=0}^{NAi} Q_k + \sum_{k=0}^{NAi} X_k \left[ \frac{P_k^2 + Q_k^2}{V_k^2} \right] \quad (3.2)$$

Este proceso aguas abajo consiste en resolver para cada nodo desde la fuente, las nuevas tensiones nodales aguas abajo, mediante las ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.5) utilizando para ello las potencias equivalentes antes calculadas.

$$V_i^4 + A_i V_i^2 + B_i = 0 \quad (3.3)$$

$$A_i = 2 (P_i R_i + Q_i X_i) - V_{i-1}^2 \quad (3.4)$$

$$B_i = (P_i^2 + Q_i^2) (R_i^2 + X_i^2) \quad (3.5)$$

La convergencia se comprueba solo con las magnitudes de las tensiones en cada nodo es decir:

$$\text{Error} = \left| V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)} \right| \quad (3.6)$$

K (N° de iteración)

Si el error es mayor al especificado se vuelve a calcular las potencias equivalentes con nuevas pérdidas.

Una vez que se haya alcanzado la convergencia se puede calcular los ángulos respectivos, con ayuda de las ecuaciones (5.7), (5.8).

$$\tan \beta_i = \frac{P_i X_i - Q_i R_i}{P_i R_i - Q_i X_i + V_i^2} \quad (3.7)$$

$$\beta_i = \text{ang}(V_{i-1}) - \text{ang}(V_i) \quad (3.8)$$

### 3.2.3 MÉTODO DE SUMA DE CORRIENTES (Current Summation Method)

Este método usa dos procesos de iteración una de ellas aguas arriba de la red en donde se procede la determinación de la corriente de rama y la otra aguas debajo de la red para el cálculo de voltajes de la barra.

La desventaja que presenta este método es para sistemas fuertemente cargados, ya que en el proceso aguas arriba de la corriente se inicialmente sumadas, cada corriente contendría un error proporcional al perfil de tensión inicial propuesto. Luego para el mismo perfil de tensión inicial, al aumentar la carga el error crecería conjuntamente con ella, por lo que el perfil inicial podría caer fuera de la región de convergencia.

Aplicando el método a la fig. (3.1).

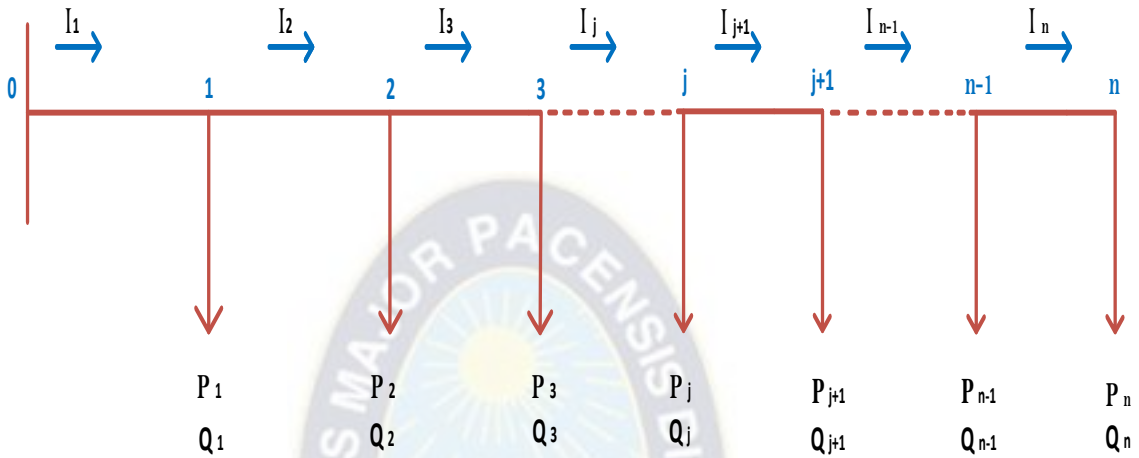


Fig. (3.1) Representación unifilar de un alimentador radial.

El procedimiento es lo siguiente:

- a) Suponer un conjunto de tensiones nodales.

$$(V_1, V_2, V_3, \dots, V_n)$$

- b) Calcular las corrientes de rama a partir de las corrientes de carga.

$$I_n^{(k)} = i_n^{(k)} = \left[ \frac{S_n}{V_n^{(k)}} \right]^* \quad (3.9)$$

$$I_{n-1}^{(k)} = I_n^{(k)} + \left[ \frac{S_{n-1}}{V_{n-1}^{(k)}} \right]^* \quad (3.10)$$

•

•

•

$$I_j^{(k)} = I_2^{(k)} + \left[ \frac{S_1}{V_1^{(k)}} \right]^* \quad (3.11)$$

c) Empezando desde el nodo fuente, las otras tensiones son recalculadas.

$$V_1^{(k+1)} = V_s - I_1^{(k)} \times Z_1 \quad (3.12)$$

•

•

•

$$V_n^{(k+1)} = V_{n-1}^{(k+1)} - I_n^{(k)} \times Z_n \quad (3.13)$$

d) La convergencia es calculada para cada tensión nodal, es decir se pregunta si:

$$|V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}| \leq \epsilon; i = 1, \dots, n \quad (3.14)$$

e) si el error es mayor al especificado se vuelve al paso b) y se continúa el proceso.

### 3.2.4 MÉTODO SIMPLIFICADO DE SUMA DE POTENCIAS

Este método no considera las pérdidas de potencia activa y reactiva en una rama  $i$  de la red, debido a que son pequeñas comparado al flujo de potencia activa y reactiva por dicha rama, por tanto esto supone.

$$R_i, X_i \rightarrow 0$$

Luego

$$B_i \rightarrow 0$$

Con esto las magnitudes de las tensiones de nodo se determinan en forma aproximada mediante la siguiente expresión.

$$V_i^2 + A_i = 0 \quad (3.15)$$

$$A_i = 2 (P_i R_i + Q_i X_i) - V_{i-1}^2 \quad (3.16)$$

$$P_i = P_{Li} + \sum_{k=0}^{NAi} P_k \quad (3.17)$$

$$Q_i = Q_{Li} + \sum_{k=0}^{NAi} Q_k \quad (3.18)$$

Este método simplificado como se puede ver, es de carácter no iterativo y representa la primera iteración del método de suma de potencias, donde se han despreciado las pérdidas activas y reactivas de la red.

Una vez conocidas las magnitudes de las tensiones a través de la ecuación (3.15) es posible estimar las pérdidas de potencia activa y reactiva de la red mediante las expresiones que se indican a continuación.

$$P_p = \sum_{i=1}^{n-1} R_i \left( \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \text{ (pu)} \quad (3.19)$$

$$Q_p = \sum_{i=1}^{n-1} X_i \left( \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \text{ (pu)} \quad (3.20)$$

**CAPÍTULO IV**  
**MÉTODO ESCALONADO CON SUBITERACIONES PARA EL CÁLCULO DE**  
**FLUJOS DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN RADIAL -**  
**MEDIA TENSIÓN**

4.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO ESCALONADO

Se tiene el diagrama unifilar de un alimentador Radial:

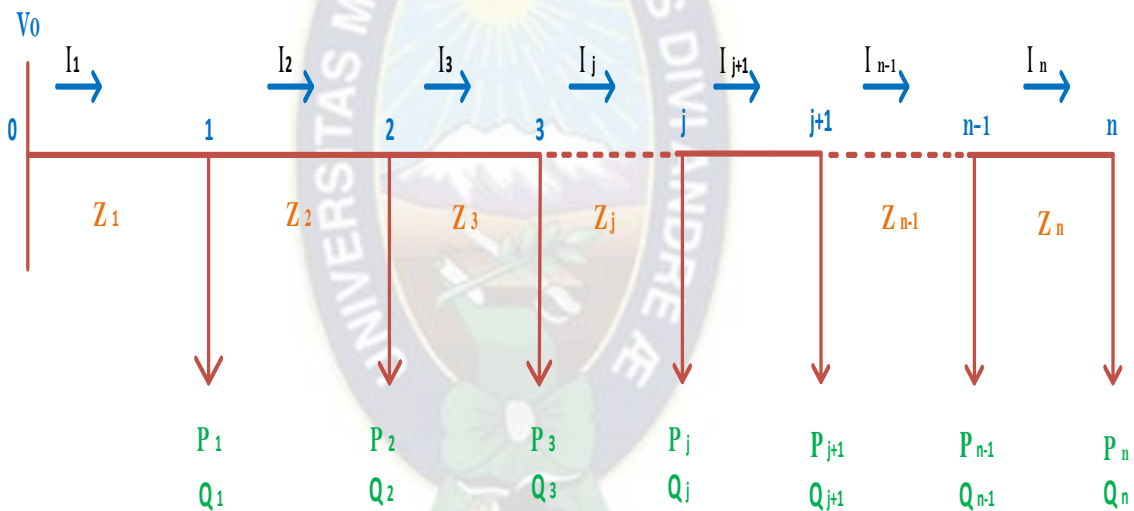


Fig. (4.1) Alimentador Radial.

Se tiene como datos conocidos :  $V_0$  ,  $r_j$  ,  $P_j$  y  $Q_j$  donde  $j=1, 2, 3, 4, \dots, N$

$V_0$  = Voltaje en la fuente del alimentador (KV).

$r_j$  = Resistencia del tramo j (ohms/km).

$x_j$  = Reactancia inductiva en el tramo j (ohms/km).

$P_j$  = Potencia Activa en cada nodo (KW).

$Q_j$  = Potencia Reactiva en cada nodo (KVAR).

Donde la impedancia se calcula:

$$Z_j = r_j + j x_j$$

En la iteración k, la corriente en el nodo n será:

$$i_n = \left( \frac{S_n}{V_n^k} \right)^* = I_n^k \quad (1)$$

En la iteración inicial K=0,  $V_n^{(0)}$  es un valor inicial asumido.

Calculamos la tensión nodal en la barra n-1, como:

$$V_{n-1}^{(k)} = V_n^{(k)} + I_n^{(k)} Z_n \quad (2)$$

Con esta tensión calculamos la corriente de barra  $i_{n-1}$ :

$$i_{n-1}^{(k)} = \left( \frac{S_{n-1}^{(k)}}{V_{n-1}^{(k)}} \right)^* \quad (3)$$

La corriente en el tramo n-1 será:

$$I_{n-1}^{(k)} = i_{n-1}^{(k)} + I_n^{(k)} \quad (4)$$

Luego tendremos también:

$$V_{n-2}^{(k)} = V_{n-1}^{(k)} + I_{n-1}^{(k)} Z_{n-1} \quad (5)$$

Se puede expresar de manera general lo siguiente:

$$i_j^{(k)} = \left( \frac{S_j^{(k)}}{V_j^{(k)}} \right)^*$$

$$I_j^{(k)} = I_{j+1}^{(k)} + i_j^{(k)} \quad (6)$$

$$V_j^{(k)} = V_{j+1}^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} Z_{j+1}$$

Donde el término:  $j=n-1, n-2, n-3, \dots, 2, 1$ , y k es el número de iteraciones.

Cuando todo el cálculo realizado y el proceso llega a la barra de origen, se calcula el error:

$$\text{Error} = \left| V_o - V_o^{(k)} \right| = \left| V_o \right| - \left| V_o^{(k)} \right|$$

Se tomara en cuenta que si el error es mayor que el especificado se continuara a realizar la siguiente interacción pero si el error es menor al especificado ahí concluye nuestro proceso.

Cuando el error sea mayor al prefijado se usara la siguiente ecuación para hallar el nuevo voltaje de la barra n:

$$V_n^{(k+1)} = V_n^{(k)} + Error$$

Las ecuaciones genéricas (6) son válidas para la configuración de redes radiales unidireccionales únicamente. Cuando la red tiene laterales se requiere realizar subiteraciones en cada bifurcación.

#### 4.2 FLUJOS DE POTENCIA EN UNA SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL

En los últimos años se ha visto un creciente interés por desarrollar flujos de potencia especializados para Sistemas de Transmisión y de Distribución.

En todo caso existen diferentes métodos para el cálculo de flujos de potencia cada uno de ellos con su respectiva precisión.

Para mostrar este método se tiene un Sistema de Distribución Radial de Media Tensión que consta de tres nodos en el alimentador como en cada una de las ramas por fase. Se realizó un análisis y resolución del problema en forma manual con el objetivo de dar a conocer el “Método Escalonado” y los resultados obtenidos comparar con el programa desarrollado.



#### 4.2.1 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE A (ALIMENTADOR)

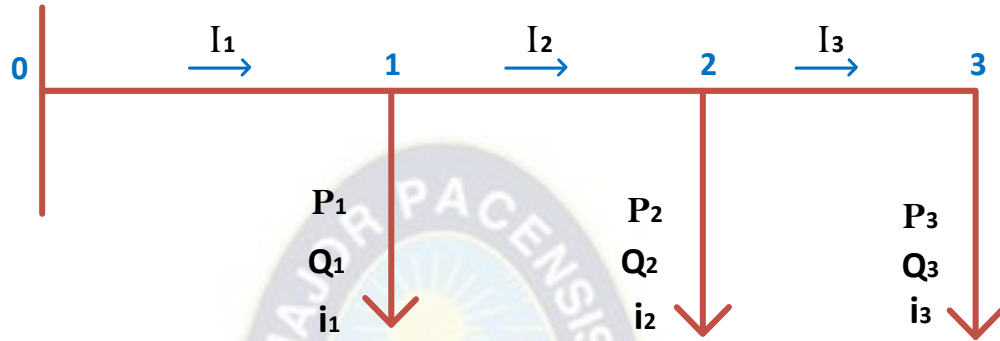


Fig. (4.2)  
Sistema de Distribución Radial Fase A (Alimentador)

Datos:

Fase A (Alimentador)							
Tramo	ni	nf	r' (ohm/Km)	x' (ohm/Km)	L (Km)	P (KW)	Q (KVAR)
1	0	1	0,24	0,32	1,5	250	200
2	1	2	0,24	0,32	2,0	220	180
3	2	3	0,24	0,32	1,8	180	140

Cuadro (4.1)  
Datos del Sistema de Distribución Radial Fase A (Alimentador)

$$V_b = 6,9/\sqrt{3} \text{ (KV)}$$

$$V_0 = 1 \angle 0^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_b = 100 \text{ (KVA)}$$

$$E_p = 10^{-3}$$

Sol:

Cálculo  $Z_b$

$$Z_b = \frac{(V_b)^2}{S_b}$$

$$Z_b = \frac{(6,9/\sqrt{3})^2}{100} \times 10^3 = 158,7 (\Omega)$$

Cálculo de las impedancias por tramo en (pu)

$$Z = \left( \frac{r' + jx'}{z_b} \right) L$$

Tramo 1

$$Z_1 = \left( \frac{0,24 + j0,32}{158,7} \right) \times 1,5 = (0,002268 + j0,003025) = 0,003781 \angle 53,130102^\circ (\text{pu})$$

Tramo 2

$$Z_2 = \left( \frac{0,24 + j0,32}{158,7} \right) \times 2,0 = (0,003025 + j0,004033) = 0,005041 \angle 53,130102^\circ (\text{pu})$$

Tramo 3

$$Z_3 = \left( \frac{0,24 + j0,32}{158,7} \right) \times 1,8 = (0,002722 + j0,003629) = 0,004537 \angle 53,130107^\circ (\text{pu})$$

Potencias Activas y Reactivas en cada Nodo

$$S_{\text{pu}} = \frac{S (\text{KVA})}{S_b (\text{KVA})}$$

$$S = P + jQ$$

$$S_1 = \frac{250 \text{ Kw} + j200 \text{ KVAR}}{100 \text{ KVA}} = (2,5 + j2) = 3,201562 \angle 38,659808^\circ (\text{pu})$$

$$S_2 = \frac{220 \text{ Kw} + j180 \text{ KVAR}}{100 \text{ KVA}} = (2,2 + j1,8) = 2,842534 \angle 39,289407^\circ (\text{pu})$$

$$S_3 = \frac{180 \text{ Kw} + j140 \text{ KVAR}}{100 \text{ KVA}} = (1,8 + j1,4) = 2,280351 \angle 37,874984^\circ (\text{pu})$$

MÉTODO ESCALONADO

1<sup>ra</sup> Iteración

k=1

$$\text{Sea: } V_3^{(1)} = 0,9 \angle -0,4^\circ (\text{pu})$$

i) Corriente Nodal

$$i_n^{(k)} = \left( \frac{S_n}{V_n^{(k)}} \right)^* = I_n^{(k)}$$

$$i_3^{(1)} = \left( \frac{S_3}{V_3^{(1)}} \right)^* = \frac{1,8-j1,4}{0,9 \angle +0,4} = 2,533723 \angle -38,274984^\circ = I_3^{(1)}$$

ii) Voltaje Nodal  $V_2^{(1)}$

$$V_j^{(k)} = V_{j+1}^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} \cdot Z_{j+1}$$

$$V_2^{(1)} = V_3^{(1)} + I_3^{(1)} \cdot Z_3$$

$$V_2^{(1)} = 0,9 \angle -0,4 + (2,533723 \angle -38,274984^\circ) \times (0,004537 \angle 53,13^\circ)$$

$$V_2^{(1)} = 0,911095 \angle -0,209788^\circ \text{ (pu)}$$

iii) Corriente Nodal

$$i_j^{(k)} = \left( \frac{S_j}{V_j^{(k)}} \right)^* ; j=n-1, n-2 \dots\dots\dots$$

$$i_2^{(1)} = \left( \frac{S_2}{V_2^{(1)}} \right)^* = \frac{2,842534 \angle -39,289407^\circ}{0,911095 \angle +0,209788^\circ} = 3,119910 \angle -39,499195^\circ \text{ (pu)}$$

Corriente en el tramo

$$I_j^{(k)} = i_j^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} ; j=n-1, n-2 \dots\dots\dots$$

$$I_2^{(1)} = i_2^{(1)} + I_3^{(1)}$$

$$I_2^{(1)} = 3,119910 \angle -39,499195^\circ + 2,533723 \angle -38,274984^\circ = 5,653314 \angle -38,950557^\circ \text{ (pu)}$$

iv) Voltaje Nodal  $V_1^{(1)}$

$$V_j^{(k)} = V_{j+1}^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} \cdot Z_{j+1}$$

$$V_1^{(1)} = V_2^{(1)} + I_2^{(1)} \cdot Z_2$$

$$V_1^{(1)} = 0,911095 \angle -0,209788 + (5,653314 \angle -38,950557^\circ) \times (0,005041 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_1^{(1)} = 0,938726 \angle 0,222478^\circ \text{ (pu)}$$

v) Corriente Nodal

$$i_j^{(k)} = \left( \frac{S_j}{V_j^{(k)}} \right)^* ; j=n-1, n-2 \dots\dots\dots$$

$$i_1^{(1)} = \left( \frac{S_1}{V_1^{(1)}} \right)^* = \frac{3,201562 \angle -38,659808^\circ}{0,938726 \angle -0,222478^\circ} = 3,410539 \angle -38,437330^\circ \text{ (pu)}$$

Corriente en el tramo

$$I_j^{(k)} = i_j^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} ; j=n-1, n-2, \dots$$

$$I_1^{(1)} = i_1^{(1)} + I_2^{(1)} = 3,410539 \angle -38,437330^\circ + 5,653314 \angle -38,950557^\circ$$

$$I_1^{(1)} = 9,063768 \angle -38,757441^\circ \text{ (pu)}$$

vi) Voltaje nodal  $V_0^{(1)}$

$$V_j^{(k)} = V_{j+1}^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} \cdot Z_{j+1}$$

$$V_0^{(1)} = V_1^{(1)} + I_1^{(1)} \cdot Z_1$$

$$V_0^{(1)} = 0,938726 \angle 0,222478^\circ + (9,063768 \angle -38,757441^\circ) \times (0,003781 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_0^{(1)} = 0,971992 \angle 0,716329^\circ \text{ (pu)}$$

Calculo del Error

$$\text{Error} = V_0 - V_0^{(1)}$$

$$\text{Error} = 1 \angle 0^\circ - 0,971992 \angle 0,716329^\circ = 0,030600 \angle -23,397942^\circ \text{ (pu)}$$

$$\text{Error} > E_p$$

$$0,030600 > 0,001$$

2<sup>da</sup> Iteración

a) Cálculo Voltaje Nodal

$$V_n^{(k)} = V_n^{(k-1)} + \text{Error}$$

$$V_3^{(2)} = V_3^{(1)} + \text{Error} = V_3^{(1)} = 0,9 \angle -0,4^\circ + 0,030600 \angle -23,397942^\circ$$

$$V_3^{(2)} = 0,928245 \angle -1,137963^\circ \text{ (pu)}$$

b) Cálculo Corriente Nodal  $I_3^{(2)}$

$$i_n^{(k)} = \left( \frac{S_n}{V_n^{(k)}} \right)^* = I_n^{(k)}$$

$$i_3^{(2)} = \left( \frac{S_3}{V_3^{(2)}} \right)^* = \frac{2,280351 \angle -37,874984^\circ}{0,928245 \angle +1,137963^\circ} = 2,456625 \angle -39,012947^\circ = I_3^{(2)}$$

c) Cálculo de Voltaje Nodal  $V_2^{(2)}$

$$V_2^{(2)} = V_3^{(2)} + I_3^{(2)} \cdot Z_3$$

$$V_2^{(2)} = 0,928245 \angle -1,137963^\circ + (2,456625 \angle -39,012947^\circ) \times (0,004537 \angle 53,130107^\circ)$$

$$V_2^{(2)} = 0,939003 \angle -0,959020^\circ \text{ (pu)}$$

d) Cálculo corriente Nodal  $I_2^{(2)}$

$$i_2^{(2)} = \left( \frac{S_2}{V_2^{(2)}} \right)^* = \frac{2,842534 \angle -39,289407^\circ}{0,939003 \angle +0,959020^\circ} = 3,027188 \angle -40,248427^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_2^{(2)} = i_2^{(2)} + I_3^{(2)}$$

$$I_2^{(2)} = 3,027188 \angle -40,248427^\circ + 2,456625 \angle -39,012947^\circ = 5,483498 \angle -39,694962^\circ \text{ (pu)}$$

e) Cálculo  $V_1^{(2)}$

$$V_1^{(2)} = V_2^{(2)} + I_2^{(2)} \cdot Z_2$$

$$V_1^{(2)} = 0,939003 \angle -0,959020^\circ + (5,483498 \angle -39,694962^\circ) \times (0,005041 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_1^{(2)} = 0,965802 \angle -0,551360^\circ \text{ (pu)}$$

f) Cálculo de la Corriente Nodal  $I_1^{(2)}$

$$i_1^{(2)} = \left( \frac{S_1}{V_1^{(2)}} \right)^* = \frac{3,201562 \angle -38,659808^\circ}{0,965802 \angle +0,551360^\circ} = 3,3124926 \angle -39,211168^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_1^{(2)} = i_1^{(2)} + I_2^{(2)}$$

$$I_1^{(2)} = 3,3124926 \angle -39,211168^\circ + 5,483498 \angle -39,694962^\circ = 8,798350 \angle -39,512686^\circ \text{ (pu)}$$

g) Cálculo de  $V_0^{(2)}$

$$V_0^{(2)} = V_1^{(2)} + I_1^{(2)} \cdot Z_1$$

$$V_0^{(2)} = 0,965802 \angle -0,551360^\circ + (8,798350 \angle -39,512686^\circ) \times (0,003781 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_0^{(2)} = 0,998090 \angle -0,083905^\circ \text{ (pu)}$$

h) Cálculo del Error

$$\text{Error} = V_0 - V_0^{(2)} = 1 \angle 0^\circ - 0,998090 \angle -0,083905^\circ = 0,002406 \angle 37,406067^\circ \text{ (pu)}$$

$$\text{Error} > E_p$$

$$0,002406 > 0,001$$

### 3<sup>ra</sup> Iteración

#### a) Cálculo Voltaje Nodal

$$V_n^{(k)} = V_n^{(k-1)} + \text{Error}$$

$$V_3^{(3)} = V_3^{(2)} + \text{Error} = V_3^{(1)} = 0,928245 \angle -1,137963^\circ + 0,002406 \angle 37,406067^\circ$$

$$V_3^{(3)} = 0,930128 \angle -1,045611^\circ \text{ (pu)}$$

#### b) Cálculo Corriente Nodal $I_3^{(3)}$

$$i_n^{(k)} = \left( \frac{S_n}{V_n^{(k)}} \right)^* = I_n^{(k)}$$

$$i_3^{(3)} = \left( \frac{S_3}{V_3^{(3)}} \right)^* = \frac{2,280351 \angle -37,874984^\circ}{0,930128 \angle +1,045611^\circ} = 2,451653 \angle -38,920595^\circ = I_3^{(3)}$$

#### c) Cálculo de Voltaje Nodal $V_2^{(3)}$

$$V_2^{(3)} = V_3^{(3)} + I_3^{(3)} \cdot Z_3$$

$$V_2^{(3)} = 0,930128 \angle -1,045611^\circ + (2,451653 \angle -38,920595^\circ \times (0,004537 \angle 53,130107^\circ))$$

$$V_2^{(3)} = 0,940864 \angle -0,867384^\circ \text{ (pu)}$$

#### d) Cálculo corriente Nodal $I_2^{(3)}$

$$i_2^{(3)} = \left( \frac{S_2}{V_2^{(3)}} \right)^* = \frac{2,842534 \angle -39,289407^\circ}{0,940864 \angle +0,867384^\circ} = 3,021195 \angle -40,156791^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_2^{(3)} = i_2^{(3)} + I_3^{(3)}$$

$$I_2^{(3)} = 3,021195 \angle -40,156791^\circ + 2,451653 \angle -38,920595^\circ = 5,472533 \angle -39,603019^\circ \text{ (pu)}$$

#### e) Cálculo $V_1^{(3)}$

$$V_1^{(3)} = V_2^{(3)} + I_2^{(3)} \cdot Z_2$$

$$V_1^{(3)} = 0,940864 \angle -0,867384^\circ + (5,472533 \angle -39,603019^\circ \times (0,005041 \angle 53,130102^\circ))$$

$$V_1^{(3)} = 0,967609 \angle -0,461290^\circ \text{ (pu)}$$

#### f) Cálculo de la Corriente Nodal $I_1^{(3)}$

$$i_1^{(3)} = \left( \frac{S_1}{V_1^{(3)}} \right)^* = \frac{3,201562 \angle -38,659808^\circ}{0,967609 \angle +0,461290^\circ} = 3,308735 \angle -39,12109^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_1^{(3)} = i_1^{(3)} + I_2^{(3)}$$

$$I_1^{(3)} = 3,308735 \angle -39,12109^\circ + 5,472533 \angle -39,603019^\circ = 8,781195 \angle -39,421434^\circ \text{ (pu)}$$

g) Cálculo de  $V_0^{(2)}$

$$V_0^{(3)} = V_1^{(3)} + I_1^{(3)} \cdot Z_1$$

$$V_0^{(3)} = 0,967609 \angle -0,461290^\circ + (8,781195 \angle -39,421434^\circ) \times (0,003781 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_0^{(3)} = 0,999834 \angle 0,004478^\circ \text{ (pu)}$$

h) Cálculo del Error

$$\text{Error} = V_0 - V_0^{(3)} = 1 \angle 0^\circ - 0,999834 \angle 0,004478^\circ = 0,000183 \angle -25,207845^\circ \text{ (pu)}$$

$$\text{Error} < E_p$$

$$0,000183 < 0,001$$

Fase A (Alimentador)						
Nodo	$V_j$ (pu)	$\delta_j$ (°)	$I_j$ (pu)	$\theta_j$ (°)	$i_j$ (pu)	$\phi_j$ (°)
0	0,999834	0,004478	-	-	-	-
1	0,967609	-0,461290	8,781195	-39,421434	3,308735	-39,121090
2	0,940864	-0,867384	5,472533	-39,603019	3,021195	-40,156791
3	0,930128	-1,045611	2,451653	-38,920595	2,451653	-38,920595

Cuadro (4.2)

#### Resultados Fase A (Alimentador)

Potencia Activa y Reactiva entregada en cada Nodo

$$S_{ej} = V_{j-1} \times I_j^* \quad ; \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad \text{según el Nodo}$$

Rama 1

$$S_{e1 \text{ pu}} = V_0 \times I_1^*$$

$$S_{e1 \text{ pu}} = (0,999834 \angle -0,004478^\circ) \times (8,781195 \angle +39,421434^\circ)$$

$$S_{e1 \text{ pu}} = 8,779737 \angle 39,416956^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e1} = S_{e1 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{e1} = (8,779737 \angle 39,416956^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{e1} = 877,9737 \angle 39,416956^\circ \text{ (KVA)}$$

$$S_{e1} = 678,274830 \text{ (KW)} + j 557,477469 \text{ (KVAR)}$$

Rama 2

$$S_{e2 \text{ pu}} = V_1 \times I_2^*$$

$$S_{e2 \text{ pu}} = (0,967609 \angle -0,461290^\circ) \times (5,472533 \angle +39,603019^\circ)$$

$$S_{e2 \text{ pu}} = 5,295272 \angle 39,141729^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e2} = S_{e2 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{e2} = (5,295272 \angle 39,141729^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{e2} = 529,527218 \angle 39,141729^\circ \text{ (KVA)}$$

$$S_{e2} = 410,694360 \text{ (KW)} + j 334,259207 \text{ (KVAR)}$$

Rama 3

$$S_{e3 \text{ pu}} = V_2 \times I_3^*$$

$$S_{e3 \text{ pu}} = (0,940864 \angle -0,867384^\circ) \times (2,451653 \angle +38,920595^\circ)$$

$$S_{e3 \text{ pu}} = 2,306672 \angle 38,053211^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e3} = S_{e3 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{e3} = (2,306672 \angle 38,053211^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{e3} = 230,667205 \angle 38,053211^\circ \text{ (KVA)}$$

$$S_{e3} = 181,636271 \text{ (KW)} + j 142,181660 \text{ (KVAR)}$$

Potencia Activa y Reactiva recibidas en cada Nodo

$$S_{rj \text{ pu}} = V_j \times I_j^*$$

Rama 1

$$S_{r1 \text{ pu}} = V_1 \times I_1^*$$

$$S_{r1 \text{ pu}} = (0,967609 \angle -0,461290^\circ) \times (8,781195 \angle +39,421434^\circ)$$

$$S_{r1 \text{ pu}} = 8,496763 \angle +38,960144^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r1} = S_{r1 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{r1} = (8,496763 \angle +38,960144^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{r1} = 849,676331 \angle 38,960144^\circ \text{ (KVA)}$$



$$S_{r1} = 660,694330 \text{ (KW)} + j 534,25917 \text{ (KVAR)}$$

Rama 2

$$S_{r2 \text{ pu}} = V_2 \times I_2^*$$

$$S_{r2 \text{ pu}} = (0,940864 \angle -0,867384^\circ) \times (5,472533 \angle +39,603019^\circ)$$

$$S_{r2 \text{ pu}} = 5,148909 \angle 38,735635^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r2} = S_{r2 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{r2} = (5,148909 \angle 38,735635^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{r2} = 514,890929 \angle 38,735635^\circ \text{ (KVA)}$$

$$S_{r2} = 401,636235 \text{ (KW)} + j 322,181631 \text{ (KVAR)}$$

Rama 3

$$S_{r3 \text{ pu}} = V_3 \times I_3^*$$

$$S_{r3 \text{ pu}} = (0,930128 \angle -1,045611^\circ) \times (2,451653 \angle +38,920595^\circ)$$

$$S_{r3 \text{ pu}} = 2,280351 \angle 37,874984^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r3} = S_{r3 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{r3} = (2,280351 \angle 37,874984^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{r3} = 228,035110 \angle 37,874984^\circ \text{ (KVA)}$$

$$S_{r3} = 180,000019 \text{ (KW)} + j 140,000017 \text{ (KVAR)}$$

Fase A (Alimentador)					
Tramo	Nodo	Potencia Entregada		Potencia Recibida	
		P (KW)	Q (KVAR)	P (KW)	Q (KVAR)
0-1	1	678,274830	557,477469	660,694330	534,25917
1-2	2	410,694360	334,259207	401,636235	322,181631
2-3	3	181,636271	142,181660	180,000019	140,000017

Cuadro (4.3)

Potencia Activa y Reactiva Entregada y Recibida Fase A (Alimentador)

Pérdida de Potencia Activa y Reactiva

Pérdida de Potencia Activa

$$\Delta P_1 = P_{e1} - P_{r1}$$

$$\Delta P_1 = 678,274830 - 660,694330$$

$$\Delta P_1 = 17,580500 \text{ (KW)}$$

$$\Delta P_2 = P_{e2} - P_{r2}$$

$$\Delta P_2 = 410,694360 - 401,636235$$

$$\Delta P_2 = 9,058125 \text{ (KW)}$$

$$\Delta P_3 = P_{e3} - P_{r3}$$

$$\Delta P_3 = 181,636271 - 180,000017$$

$$\Delta P_3 = 1,636252 \text{ (KW)}$$

$$\Delta P_T = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

$$\Delta P_T = 17,580500 + 9,058125 + 1,636252 \text{ (KW)}$$

$$\Delta P_T = 28,274877 \text{ (KW)}$$

Pérdida de Potencia Reactiva

$$\Delta Q_1 = Q_{e1} - Q_{r1}$$

$$\Delta Q_1 = 557,477469 - 534,25917$$

$$\Delta Q_1 = 23,218299 \text{ (KVAR)}$$

$$\Delta Q_2 = Q_{e2} - Q_{r2}$$

$$\Delta Q_2 = 334,259207 - 322,181631$$

$$\Delta Q_2 = 12,077576 \text{ (KVAR)}$$

$$\Delta Q_3 = Q_{e3} - Q_{r3}$$

$$\Delta Q_3 = 142,181660 - 140,000017$$

$$\Delta Q_3 = 2,181643 \text{ (KVAR)}$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3$$

$$\Delta Q_T = 23,218299 + 12,077576 + 2,181643 \text{ (KVAR)}$$

$$\Delta Q_T = 37,477518 \text{ (KVAR)}$$

$$\% \text{ de Pérdida de Pot. Activa} = \frac{\Delta P_T}{P_{e1}} \times 100 = \frac{28,274877}{678,274830} \times 100 = 4,168646 \%$$

$$\% \text{ de Pérdida de Pot. Reactiva} = \frac{\Delta Q_T}{Q_{e1}} \times 100 = \frac{37,477518}{557,477469} \times 100 = 6,722696 \%$$

Pérdida de Potencia Fase A (Alimentador)			
Tramo	Nodo	P (KW)	Q (KVAR)
0-1	1	17,580500	23,218299
1-2	2	9,058125	12,077576
2-3	3	1,636252	2,181643
<b>Total</b>		28,274877	37,477518
<b>% de Pérdida</b>		4,168646	6,722696

Cuadro (4.4)

Pérdida de Potencia Activa y Reactiva Fase A (Alimentador)

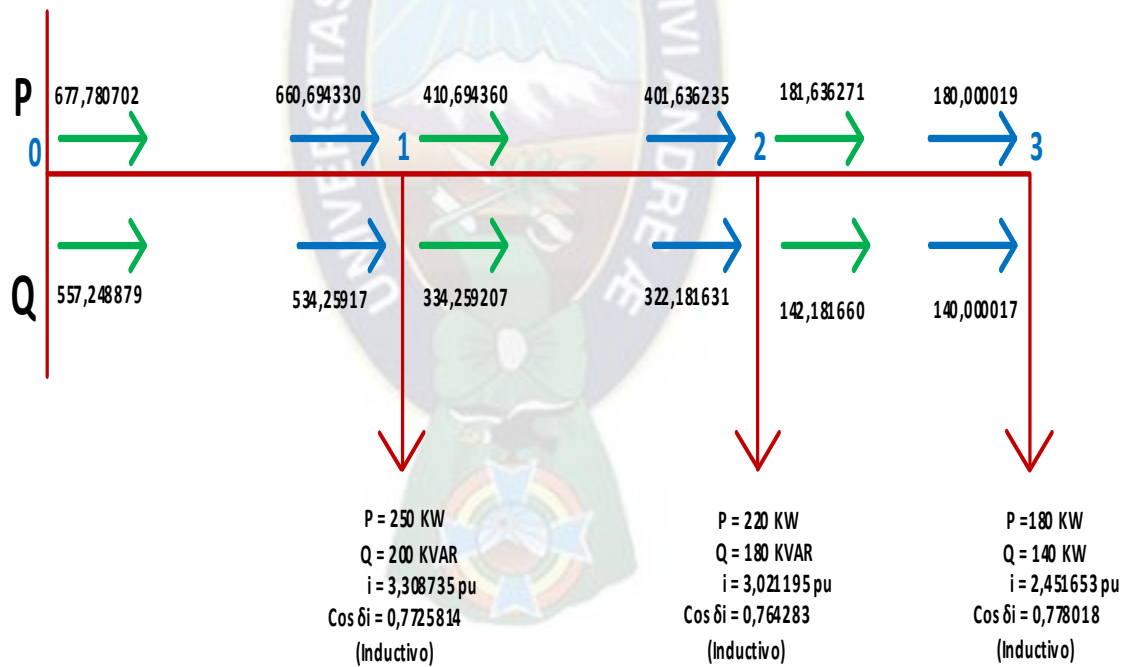


Fig. (4.3)

Potencia Activa y Reactiva entregada, recibida en cada nodo Fase A (Alimentador)

#### 4.2.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE B (ALIMENTADOR)

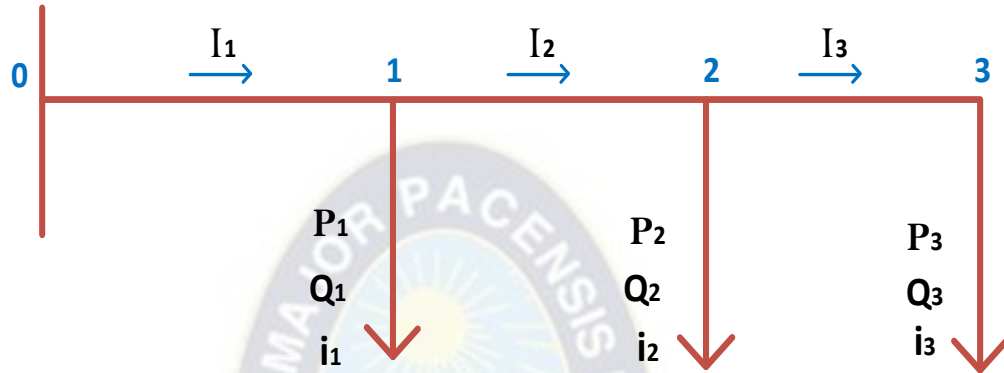


Fig. (4.4) Sistema de Distribución Radial Fase B (Alimentador)

Datos:

Fase B (Alimentador)							
Tramo	ni	nf	r' (ohm/Km)	x'(ohm/Km)	L (Km)	P (KW)	Q (KVAR)
1	0	1	0,24	0,32	1,5	240	180
2	1	2	0,24	0,32	2,0	210	160
3	2	3	0,24	0,32	1,8	170	130

Cuadro (4.5) Datos del Sistema de Distribución Radial Fase B (Alimentador)

$$V_b = 6,9/\sqrt{3} \text{ (KV)}$$

$$V_0 = 1 \angle 0^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_b = 100 \text{ (KVA)}$$

$$E_p = 10^{-3}$$

Sol:

Cálculo  $Z_b$

$$Z_b = \frac{(V_b)^2}{S_b}$$

$$Z_b = \frac{(6,9/\sqrt{3})^2}{100} \times 10^3 = 158,7 (\Omega)$$

Cálculo de las impedancias por tramo en (pu)

$$Z = \left( \frac{r' + jx'}{z_b} \right) L$$

Tramo 1

$$Z_1 = \left( \frac{0,24 + j0,32}{158,7} \right) \times 1,5 = (0,002268 + j0,003025) = 0,003781 \angle 53,130102^\circ (\text{pu})$$

Tramo 2

$$Z_2 = \left( \frac{0,24 + j0,32}{158,7} \right) \times 2,0 = (0,003025 + j0,004033) = 0,005041 \angle 53,130102^\circ (\text{pu})$$

Tramo 3

$$Z_3 = \left( \frac{0,24 + j0,32}{158,7} \right) \times 1,8 = (0,002722 + j0,003629) = 0,004537 \angle 53,130107^\circ (\text{pu})$$

Potencias Activas y Reactivas en cada Nodo

$$S_{\text{pu}} = \frac{S (\text{KVA})}{S_b (\text{KVA})}$$

$$S = P + jQ$$

$$S_1 = \frac{240 \text{ Kw} + j180 \text{ KVAR}}{100 \text{ KVA}} = (2,4 + j1,8) = 3,000000 \angle 36,869898^\circ (\text{pu})$$

$$S_2 = \frac{210 \text{ Kw} + j160 \text{ KVAR}}{100 \text{ KVA}} = (2,1 + j1,6) = 2,640076 \angle 37,303948^\circ (\text{pu})$$

$$S_3 = \frac{180 \text{ Kw} + j140 \text{ KVAR}}{100 \text{ KVA}} = (1,7 + j1,3) = 2,140093 \angle 37,405357^\circ (\text{pu})$$

## MÉTODO ESCALONADO

1<sup>ra</sup> Iteración

K=1

$$V_3^{(1)} = 0,9 \angle -0,4^\circ (\text{pu})$$

i) Corriente Nodal

$$i_n^{(k)} = \left( \frac{S_n}{V_n^{(k)}} \right)^* = I_n^{(k)}$$

$$i_3^{(1)} = \left( \frac{S_3}{V_3^{(1)}} \right)^* = \frac{2,140093 \angle -37,405357^\circ}{0,9 \angle +0,4} = 2,377881 \angle -37,805357^\circ = I_3^{(1)}$$

ii) Voltaje Nodal  $V_2^{(1)}$

$$V_j^{(k)} = V_{j+1}^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} \cdot Z_{j+1}$$

$$V_2^{(1)} = V_3^{(1)} + I_3^{(1)} \cdot Z_3$$

$$V_2^{(1)} = 0,9 \angle -0,4 + (2,377881 \angle -37,805357^\circ) \times (0,004537 \angle 53,130107^\circ)$$

$$V_2^{(1)} = 0,9100389 \angle -0,215986^\circ \text{ (pu)}$$

iii) Corriente Nodal

$$i_j^{(k)} = \left( \frac{S_j}{V_j^{(k)}} \right)^* ; j=n-1, n-2 \dots\dots\dots$$

$$i_2^{(1)} = \left( \frac{S_2}{V_2^{(1)}} \right)^* = \frac{2,640076 \angle -37,303948^\circ}{0,9100389 \angle +0,215986^\circ} = 2,899943 \angle -37,519934^\circ \text{ (pu)}$$

Corriente en el tramo

$$I_j^{(k)} = i_j^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} ; j=n-1, n-2 \dots\dots\dots$$

$$I_2^{(1)} = i_2^{(1)} + I_3^{(1)}$$

$$I_2^{(1)} = 2,899943 \angle -37,519934^\circ + 2,377881 \angle -37,805357^\circ = 5,277808 \angle -37,643529^\circ \text{ (pu)}$$

iv) Voltaje Nodal  $V_1^{(1)}$

$$V_j^{(k)} = V_{j+1}^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} \cdot Z_{j+1}$$

$$V_1^{(1)} = V_2^{(1)} + I_2^{(1)} \cdot Z_2$$

$$V_1^{(1)} = 0,9100389 \angle -0,215986^\circ + (5,277808 \angle -37,643529^\circ) \times (0,005041 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_1^{(1)} = 0,935679 \angle 0,224942^\circ \text{ (pu)}$$

v) Corriente Nodal

$$i_j^{(k)} = \left( \frac{S_j}{V_j^{(k)}} \right)^* ; j=n-1, n-2 \dots\dots\dots$$

$$i_1^{(1)} = \left( \frac{S_1}{V_1^{(1)}} \right)^* = \frac{3,000000 \angle -36,869898^\circ}{0,935679 \angle -0,224942^\circ} = 3,206228 \angle -36,644956^\circ \text{ (pu)}$$

Corriente en el tramo

$$I_j^{(k)} = i_j^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} ; j=n-1, n-2, \dots$$

$$I_1^{(1)} = i_1^{(1)} + I_2^{(1)} = 3,206228 \angle -36,644956^\circ + 5,277808 \angle -37,643529^\circ$$

$$I_1^{(1)} = 8,483733 \angle -37,266158^\circ \text{ (pu)}$$

vi) Voltaje nodal  $V_0^{(1)}$

$$V_j^{(k)} = V_{j+1}^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} \cdot Z_{j+1}$$

$$V_0^{(1)} = V_1^{(1)} + I_1^{(1)} \cdot Z_1$$

$$V_0^{(1)} = 0,935679 \angle 0,224942^\circ + (8,483733 \angle -37,266158^\circ) \times (0,003781 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_0^{(1)} = 0,966607 \angle 0,737511^\circ \text{ (pu)}$$

Cálculo del Error

$$\text{Error} = V_0 - V_0^{(1)}$$

$$\text{Error} = 1 \angle 0^\circ - 0,966607 \angle 0,737511^\circ = 0,035710 \angle -20,390004^\circ \text{ (pu)}$$

Error > Ep

2<sup>da</sup> Iteración

2) Cálculo Voltaje Nodal

$$V_n^{(k)} = V_n^{(k-1)} + \text{Error}$$

$$V_3^{(2)} = V_3^{(1)} + \text{Error} = V_3^{(1)} = 0,9 \angle -0,4^\circ + 0,035710 \angle -20,390004^\circ$$

$$V_3^{(2)} = 0,933639 \angle -1,149195^\circ \text{ (pu)}$$

b) Cálculo Corriente Nodal  $I_3^{(2)}$

$$i_n^{(k)} = \left( \frac{S_n}{V_n^{(k)}} \right)^* = I_n^{(k)}$$

$$i_3^{(2)} = \left( \frac{S_3}{V_3^{(2)}} \right)^* = \frac{2,140093 \angle -37,405357^\circ}{0,933639 \angle 1,149195^\circ} = 2,292206 \angle -38,554552^\circ = I_3^{(2)}$$

c) Cálculo de Voltaje Nodal  $V_2^{(2)}$

$$V_2^{(2)} = V_3^{(2)} + I_3^{(2)} \cdot Z_3$$

$$V_2^{(2)} = 0,933639 \angle -1,149195^\circ + (2,292206 \angle -38,554552^\circ) \times (0,004537 \angle 53,130107^\circ)$$

$$V_2^{(2)} = 0,943654 \angle -0,978064^\circ \text{ (pu)}$$

d) Cálculo corriente Nodal  $I_2^{(2)}$

$$i_2^{(2)} = \left( \frac{S_2}{V_2^{(2)}} \right)^* = \frac{2,640076 \angle -37,303948^\circ}{0,943654 \angle +0,978064^\circ} = 2,797716 \angle -38,282012^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_2^{(2)} = i_2^{(2)} + I_3^{(2)}$$

$$I_2^{(2)} = 2,797716 \angle -38,282012^\circ + 2,292206 \angle -38,554552^\circ = 5,089908 \angle -38,404748^\circ \text{ (pu)}$$

e) Cálculo  $V_1^{(2)}$

$$V_1^{(2)} = V_2^{(2)} + I_2^{(2)} \cdot Z_2$$

$$V_1^{(2)} = 0,943654 \angle -0,978064^\circ + (5,089908 \angle -38,404748^\circ) \times (0,005041 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_1^{(2)} = 0,968379 \angle -0,567172^\circ \text{ (pu)}$$

f) Cálculo de la Corriente Nodal  $I_1^{(2)}$

$$i_1^{(2)} = \left( \frac{S_1}{V_1^{(2)}} \right)^* = \frac{3,000000 \angle -36,869898^\circ}{0,968379 \angle +0,567172^\circ} = 3,097961 \angle -37,437070^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_1^{(2)} = i_1^{(2)} + I_2^{(2)}$$

$$I_1^{(2)} = 3,097961 \angle -37,437070^\circ + 5,089908 \angle -38,404748^\circ = 8,187594 \angle -38,038620^\circ \text{ (pu)}$$

g) Cálculo de  $V_0^{(2)}$

$$V_0^{(2)} = V_1^{(2)} + I_1^{(2)} \cdot Z_1$$

$$V_0^{(2)} = 0,968379 \angle -0,567172^\circ + (8,187594 \angle -38,038620^\circ) \times (0,003781 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_0^{(2)} = 0,998222 \angle -0,087576^\circ \text{ (pu)}$$

h) Cálculo del Error

$$\text{Error} = V_0 - V_0^{(2)} = 1 \angle 0 - 0,998222 \angle -0,087576^\circ = 0,002344 \angle 40,615620^\circ \text{ (pu)}$$

Error > Ep

3<sup>ra</sup> Iteración

2) Cálculo Voltaje Nodal

$$V_n^{(k)} = V_n^{(k-1)} + \text{Error}$$



$$V_3^{(3)} = V_3^{(2)} + \text{Error} = V_3^{(1)} = 0,933639 \angle -1,149195^\circ + 0,002344 \angle 40,615620^\circ$$

$$V_3^{(3)} = 0,935389 \angle -1,05356^\circ \text{ (pu)}$$

b) Cálculo Corriente Nodal  $I_3^{(3)}$

$$i_n^{(k)} = \left( \frac{S_n}{V_n^{(k)}} \right)^* = I_n^{(k)}$$

$$i_3^{(3)} = \left( \frac{S_3}{V_3^{(3)}} \right)^* = \frac{2,140093 \angle -37,405357^\circ}{0,935389 \angle +1,05356^\circ} = 2,287918 \angle -38,458918^\circ = I_3^{(3)}$$

c) Cálculo de Voltaje Nodal  $V_2^{(3)}$

$$V_2^{(3)} = V_3^{(3)} + I_3^{(3)} \cdot Z_3$$

$$V_2^{(3)} = 0,935389 \angle -1,05356^\circ + (2,287918 \angle -38,458918^\circ) \times (0,004537 \angle 53,130107^\circ)$$

$$V_2^{(3)} = 0,945385 \angle -0,883062^\circ \text{ (pu)}$$

d) Cálculo corriente Nodal  $I_2^{(3)}$

$$i_2^{(3)} = \left( \frac{S_2}{V_2^{(3)}} \right)^* = \frac{2,640076 \angle -37,303948^\circ}{0,945385 \angle +0,883062^\circ} = 2,792593 \angle -38,187010^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_2^{(3)} = i_2^{(3)} + I_3^{(3)}$$

$$I_2^{(3)} = 2,792593 \angle -38,187010^\circ + 2,287918 \angle -38,458918^\circ = 5,080497 \angle -38,309459^\circ \text{ (pu)}$$

e) Cálculo  $V_1^{(3)}$

$$V_1^{(3)} = V_2^{(3)} + I_2^{(3)} \cdot Z_2$$

$$V_1^{(3)} = 0,945385 \angle -0,883062^\circ + (5,080497 \angle -38,309459^\circ) \times (0,005041 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_1^{(3)} = 0,970065 \angle -0,473635^\circ \text{ (pu)}$$

f) Cálculo de la Corriente Nodal  $I_1^{(3)}$

$$i_1^{(3)} = \left( \frac{S_1}{V_1^{(3)}} \right)^* = \frac{3,000000 \angle -36,869898^\circ}{0,970065 \angle +0,473635^\circ} = 3,092576 \angle -37,343533^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_1^{(3)} = i_1^{(3)} + I_2^{(3)}$$

$$I_1^{(3)} = 3,092576 \angle -37,343533^\circ + 5,080497 \angle -38,309459^\circ = 8,172800 \angle -37,943969^\circ \text{ (pu)}$$

g) Cálculo de  $V_0^{(2)}$

$$V_0^{(3)} = V_1^{(3)} + I_1^{(3)} \cdot Z_1$$

$$V_0^{(3)} = 0,970065 \angle -0,473635^\circ + (8,172800 \angle -37,943969^\circ) \times (0,003781 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_0^{(3)} = 0,999854 \angle 0,004346^\circ \text{ (pu)}$$

h) Cálculo del Error

$$\text{Error} = V_0 - V_0^{(3)} = 1 \angle 0 - 0,999854 \angle 0,004346^\circ = 0,000165 \angle -27,449540^\circ \text{ (pu)}$$

Error < Ep

Fase B (Alimentador)						
Nodo	$V_j$ (pu)	$\delta_j$ (°)	$I_j$ (pu)	$\theta_j$ (°)	$i_j$ (pu)	$\varphi_j$ (°)
0	0,999854	0,004346	-	-	-	-
1	0,970065	-0,473635	8,172800	-37,943969	3,092576	-37,343533
2	0,945385	-0,883062	5,080497	-38,309459	2,792593	-38,187010
3	0,935389	-1,053560	2,287918	-38,458918	2,287918	-38,458918

Cuadro (4.6) Resultados Fase B (Alimentador)

Potencia Activa y Reactiva entregada en cada Nodo Fase B

$$S_{ej} = V_{j-1} \times I_j^* \quad ; \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad \text{según el Nodo}$$

Rama 1

$$S_{e1 \text{ pu}} = V_0 \times I_1^*$$

$$S_{e1 \text{ pu}} = (0,999854 \angle 0,004346^\circ) \times (8,172800 \angle 37,943969^\circ)$$

$$S_{e1 \text{ pu}} = 8,171607 \angle 37,948315^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e1} = S_{e1 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{e1} = (8,171607 \angle 37,948315^\circ) \times (100 \text{ KVA}) = 817,1607 \angle 37,948315^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e1} = 644,384985 \text{ (KW)} + j 502,513284 \text{ (KVAR)}$$

Rama 2

$$S_{e2 \text{ pu}} = V_1 \times I_2^*$$

$$S_{e2 \text{ pu}} = (0,970065 \angle -0,473635^\circ) \times (5,080497 \angle +38,309459^\circ)$$

$$S_{e2 \text{ pu}} = 4,928412 \angle 37,835824^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e2} = S_{e2 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{e2} = (4,928412 \angle 37,835824^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{e2} = 492,8412 \angle 37,835824^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e2} = 389,232003 \text{ (KW)} + j 302,309273 \text{ (KVAR)}$$

Rama 3

$$S_{e3 \text{ pu}} = V_2 \times I_3^*$$

$$S_{e3 \text{ pu}} = (0,945385 \angle -0,883062^\circ) \times (2,287918 \angle +38,458918^\circ)$$

$$S_{e3 \text{ pu}} = 2,162963 \angle 37,575856^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e3} = S_{e3 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{e3} = (2,162963 \angle 37,575856^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{e3} = 216,2963 \angle 37,575856^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e3} = 171,424944 \text{ (KW)} + j 131,899938 \text{ (KVAR)}$$

Potencia Activa y Reactiva recibidas en cada Nodo

$$S_{rj \text{ pu}} = V_j \times I_j^*$$

Rama 1

$$S_{r1 \text{ pu}} = V_1 \times I_1^*$$

$$S_{r1 \text{ pu}} = (0,970065 \angle -0,473635^\circ) \times (8,172800 \angle +37,943969^\circ)$$

$$S_{r1 \text{ pu}} = 7,928147 \angle +37,470334^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r1} = S_{r1 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{r1} = (7,928147 \angle +37,470334^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{r1} = 792,8147 \angle +37,470334^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r1} = 629,232018 \text{ (KW)} + j 482,309291 \text{ (KVAR)}$$

Rama 2

$$S_{r2 \text{ pu}} = V_2 \times I_2^*$$

$$S_{r2 \text{ pu}} = (0,945385 \angle -0,883062^\circ) \times (5,080497 \angle +38,309459^\circ)$$

$$S_{r2 \text{ pu}} = 4,803026 \angle 37,426397^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r2} = S_{r2 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{r2} = (4,803026 \angle 37,426397^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{r2} = 480,3026 \angle 37,426397^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r2} = 381,424966 \text{ (KW)} + j 291,899954 \text{ (KVAR)}$$

Rama 3

$$S_{r3 \text{ pu}} = V_3 \times I_3^*$$

$$S_{r3 \text{ pu}} = (0,935389 \angle -1,053560^\circ) \times (2,287918 \angle +38,458918^\circ)$$

$$S_{r3 \text{ pu}} = 2,140093 \angle 37,405358^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r3} = S_{r3 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{r3} = (2,140093 \angle 37,405358^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{r3} = 214,0093 \angle 37,405358^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r3} = 169,999987 \text{ (KW)} + j 129,999996 \text{ (KVAR)}$$

Pérdida de Potencia Activa y Reactiva

Pérdida de Potencia Activa

$$\Delta P_1 = P_{e1} - P_{r1}$$

$$\Delta P_1 = 644,384985 - 629,232018$$

$$\Delta P_1 = 15,152967 \text{ (KW)}$$

$$\Delta P_2 = P_{e2} - P_{r2}$$

$$\Delta P_2 = 389,232003 - 381,424966$$

$$\Delta P_2 = 7,807037 \text{ (KW)}$$

$$\Delta P_3 = P_{e3} - P_{r3}$$

$$\Delta P_3 = 171,424944 - 169,999987$$

$$\Delta P_3 = 1,424957 \text{ (KW)}$$

$$\Delta P_T = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

$$\Delta P_T = 15,152967 + 7,807037 + 1,424957 \text{ (KW)}$$

$$\Delta P_T = 24,384961 \text{ (KW)}$$

Pérdida de Potencia Reactiva

$$\Delta Q_1 = Q_{e1} - Q_{r1}$$

$$\Delta Q_1 = 502,513284 - 482,309291$$

$$\Delta Q_1 = 20,203993 \text{ (KVAR)}$$

$$\Delta Q_2 = Q_{e2} - Q_{r2}$$

$$\Delta Q_2 = 302,309273 - 291,899954$$

$$\Delta Q_2 = 10,409319 \text{ (KVAR)}$$

$$\Delta Q_3 = Q_{e3} - Q_{r3}$$

$$\Delta Q_3 = 131,899938 - 129,999996$$

$$\Delta Q_3 = 1,899942 \text{ (KVAR)}$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3$$

$$\Delta Q_T = 20,203993 + 10,409319 + 1,899942 \text{ (KVAR)}$$

$$\Delta Q_T = 32,513254 \text{ (KVAR)}$$

$$\% \text{ de Pérdida de Pot. Activa} = \frac{\Delta P_T}{P_{e1}} \times 100 = \frac{24,384961}{644,384985} \times 100 = 3,784222 \%$$

$$\% \text{ de Pérdida de Pot. Reactiva} = \frac{\Delta Q_T}{Q_{e1}} \times 100 = \frac{32,513254}{502,513284} \times 100 = 6,470128 \%$$

Fase B (Alimentador)							
Tr.	Nd	Potencia Entregada		Potencia Recibida		Pérdida de Potencia	
		P (KW)	Q (KVAR)	P (KW)	Q (KVAR)	P(KW)	Q(KVAR)
0-1	1	644,384985	502,513284	629,232018	482,309291	15,152967	20,203993
1-2	2	389,232003	302,309273	381,424966	291,899954	7,807037	10,409319
2-3	3	171,424944	131,899938	169,999987	129,999996	1,424957	1,899942
<b>Total</b>						24,384961	32,513254
<b>% de Pérdida</b>						3,784222	6,470128

Cuadro (4.7) Potencia Entregada, Recibida y Pérdida Fase B (Alimentador)

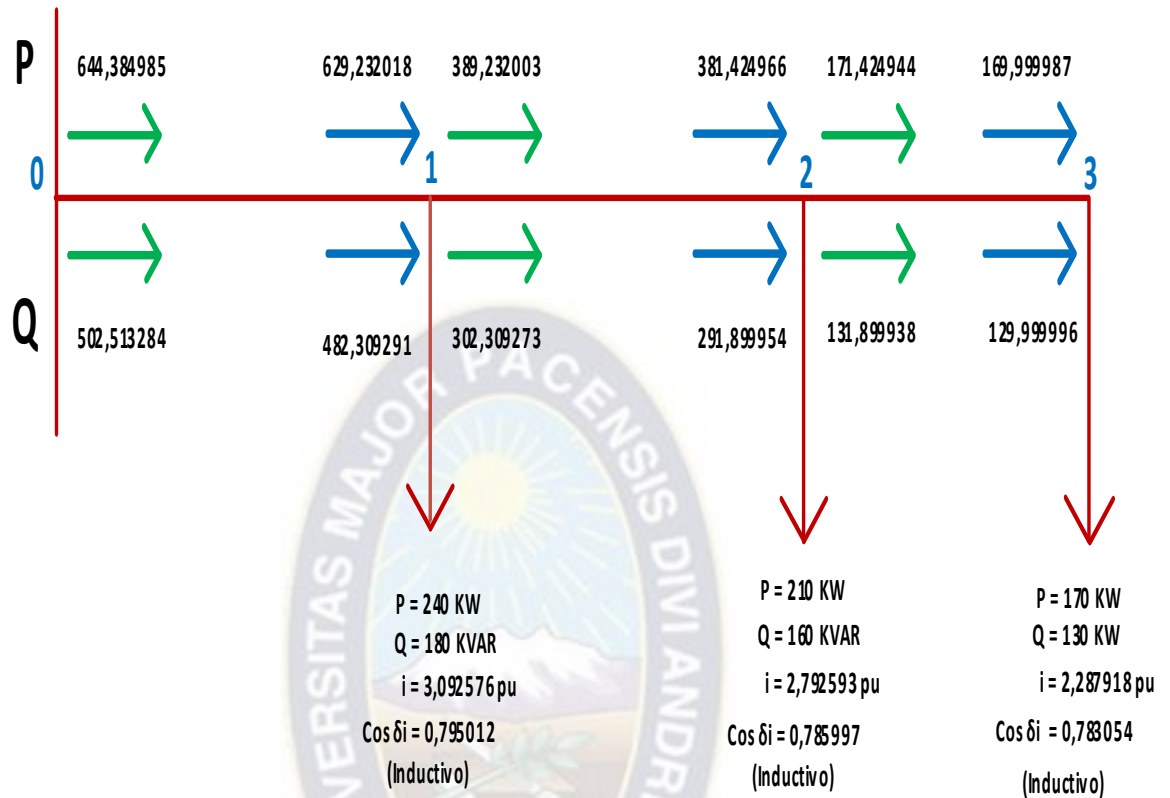


Fig. (4.5)

Potencia Activa y Reactiva entregada, recibida en cada nodo Fase B (Alimentador)

#### 4.2.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE C (ALIMENTADOR)

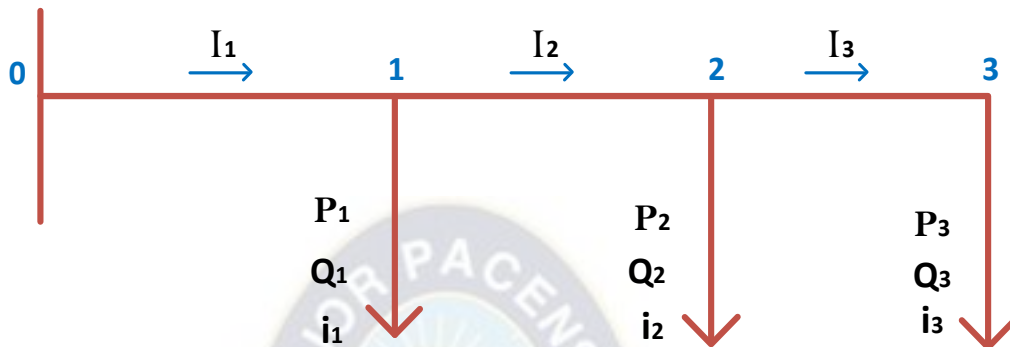


Fig. (4.6) Sistema de Distribución Radial Fase C (Alimentador)

Datos:

Fase C (Alimentador)							
Tramo	ni	nf	r' (ohm/Km)	x'(ohm/Km)	L (Km)	P (KW)	Q (KVAR)
1	0	1	0,24	0,32	1,5	230	170
2	1	2	0,24	0,32	2,0	200	150
3	2	3	0,24	0,32	1,8	160	110

Cuadro (4.8) Datos del Sistema de Distribución Radial Fase C (Alimentador)

$$V_b = 6,9 / \sqrt{3} \text{ (Kv)}$$

$$V_0 = 1 \angle 0^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_b = 100 \text{ (KVA)}$$

$$E_p = 10^{-3}$$

Sol:

Cálculo  $Z_b$

$$Z_b = \frac{(V_b)^2}{S_b}$$

$$Z_b = \frac{(6,9 / \sqrt{3})^2}{100} \times 10^3 = 158,7 \text{ (\Omega)}$$

Cálculo de las impedancias por tramo en (pu)

$$Z = \left( \frac{r' + jx'}{z_b} \right) L$$

Tramo 1

$$Z_1 = \left( \frac{0,24 + j 0,32}{158,7} \right) \times 1,5 = (0,002268 + j 0,003025) = 0,003781 \angle 53,130102^\circ \text{ (pu)}$$

Tramo 2

$$Z_2 = \left( \frac{0,24 + j 0,32}{158,7} \right) \times 2,0 = (0,003025 + j 0,004033) = 0,005041 \angle 53,130102^\circ \text{ (pu)}$$

Tramo 3

$$Z_3 = \left( \frac{0,24 + j 0,32}{158,7} \right) \times 1,8 = (0,002722 + j 0,003629) = 0,004537 \angle 53,130107^\circ \text{ (pu)}$$

Potencias Activas y Reactivas en cada Nodo

$$S_{pu} = \frac{S \text{ (KVA)}}{S_b \text{ (KVA)}}$$

$$S = P + j Q$$

$$S_1 = \frac{230 \text{ Kw} + j 170 \text{ KVAR}}{100 \text{ KVA}} = (2,3 + j 1,7) = 2,860070 \angle 36,469234^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_2 = \frac{200 \text{ Kw} + j 150 \text{ KVAR}}{100 \text{ KVA}} = (2,0 + j 1,5) = 2,500000 \angle 36,869898^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_3 = \frac{160 \text{ Kw} + j 110 \text{ KVAR}}{100 \text{ KVA}} = (1,6 + j 1,1) = 1,941649 \angle 34,508523^\circ \text{ (pu)}$$

MÉTODO ESCALONADO

1<sup>ra</sup> Iteración

K=1

$$V_3^{(1)} = 0,9 \angle -0,4^\circ \text{ (pu)}$$

i) Corriente Nodal

$$i_n^{(k)} = \left( \frac{S_n}{V_n^{(k)}} \right)^* = I_n^{(k)}$$

$$i_3^{(1)} = \left( \frac{S_3}{V_3^{(1)}} \right)^* = \frac{1,941649 \angle -34,508523^\circ}{0,9 \angle +0,4^\circ} = 2,157388 \angle -34,903523^\circ = I_3^{(1)}$$

ii) Voltaje Nodal  $V_2^{(1)}$

$$V_j^{(k)} = V_{j+1}^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} \cdot Z_{j+1}$$

$$V_2^{(1)} = V_3^{(1)} + I_3^{(1)} \cdot Z_3$$

$$V_2^{(1)} = 0,9 \angle -0,4^\circ + (2,157388 \angle -34,903523^\circ) \times (0,004537 \angle 53,130107^\circ)$$



$$V_2^{(1)} = 0,909281 \angle -0,203005^\circ \text{ (pu)}$$

iii) Corriente Nodal

$$i_j^{(k)} = \left( \frac{S_j}{V_j^{(k)}} \right)^* ; j=n-1, n-2 \dots\dots\dots$$

$$i_2^{(1)} = \left( \frac{S_2}{V_2^{(1)}} \right)^* = \frac{2,500000 \angle -36,869898^\circ}{0,909281 \angle +0,203005^\circ} = 2,749425 \angle -37,072903^\circ \text{ (pu)}$$

Corriente en el tramo

$$I_j^{(k)} = i_j^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} ; j=n-1, n-2 \dots\dots\dots$$

$$I_2^{(1)} = i_2^{(1)} + I_3^{(1)}$$

$$I_2^{(1)} = 2,749425 \angle -37,072903^\circ + 2,157388 \angle -34,903523^\circ = 4,905947 \angle -36,119103^\circ \text{ (pu)}$$

iv) Voltaje Nodal  $V_1^{(1)}$

$$V_j^{(k)} = V_{j+1}^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} \cdot Z_{j+1}$$

$$V_1^{(1)} = V_2^{(1)} + I_2^{(1)} \cdot Z_2$$

$$V_1^{(1)} = 0,909281 \angle -0,203005^\circ + (4,905947 \angle -36,119103^\circ) \times (0,005041 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_1^{(1)} = 0,932933 \angle 0,246487^\circ \text{ (pu)}$$

v) Corriente Nodal

$$i_j^{(k)} = \left( \frac{S_j}{V_j^{(k)}} \right)^* ; j=n-1, n-2 \dots\dots\dots$$

$$i_1^{(1)} = \left( \frac{S_1}{V_1^{(1)}} \right)^* = \frac{2,860070 \angle -36,469234^\circ}{0,932933 \angle -0,246487^\circ} = 3,065676 \angle -36,222747^\circ \text{ (pu)}$$

Corriente en el tramo

$$I_j^{(k)} = i_j^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} ; j=n-1, n-2 \dots\dots\dots$$

$$I_1^{(1)} = i_1^{(1)} + I_2^{(1)} = 3,065676 \angle -36,222747^\circ + 4,905947 \angle -36,119103^\circ$$

$$I_1^{(1)} = 7,971620 \angle -36,158962^\circ \text{ (pu)}$$

vi) Voltaje nodal  $V_0^{(1)}$

$$V_j^{(k)} = V_{j+1}^{(k)} + I_{j+1}^{(k)} \cdot Z_{j+1}$$

$$V_0^{(1)} = V_1^{(1)} + I_1^{(1)} \cdot Z_1$$

$$V_0^{(1)} = 0,932933 \angle 0,246487^\circ + (7,971620 \angle -36,158962^\circ) \times (0,003781 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_0^{(1)} = 0,961838 \angle 0,763176^\circ \text{ (pu)}$$

Cálculo del Error

$$\text{Error} = V_0 - V_0^{(1)}$$

$$\text{Error} = 1 \angle 0^\circ - 0,961838 \angle 0,763176^\circ = 0,040336 \angle -18,518595^\circ \text{ (pu)}$$

Error > Ep

2<sup>da</sup> Iteración

a) Cálculo Voltaje Nodal

$$V_n^{(k)} = V_n^{(k-1)} + \text{Error}$$

$$V_3^{(2)} = V_3^{(1)} + \text{Error} = V_3^{(1)} = 0,9 \angle -0,4^\circ + 0,040336 \angle -18,518595^\circ$$

$$V_3^{(2)} = 0,938420 \angle -1,165897^\circ \text{ (pu)}$$

b) Cálculo Corriente Nodal  $I_3^{(2)}$

$$i_n^{(k)} = \left( \frac{S_n}{V_n^{(k)}} \right)^* = I_n^{(k)}$$

$$i_3^{(2)} = \left( \frac{S_3}{V_3^{(2)}} \right)^* = \frac{1,941649 \angle -34,508523^\circ}{0,938420 \angle +1,165897^\circ} = 2,069062 \angle -35,674420^\circ = I_3^{(2)}$$

c) Cálculo de Voltaje Nodal  $V_2^{(2)}$

$$V_2^{(2)} = V_3^{(2)} + I_3^{(2)} \cdot Z_3$$

$$V_2^{(2)} = 0,938420 \angle -1,165897^\circ + (2,069062 \angle -35,674420^\circ) \times (0,004537 \angle 53,130107^\circ)$$

$$V_2^{(2)} = 0,947321 \angle -0,984600^\circ \text{ (pu)}$$

d) Cálculo corriente Nodal  $I_2^{(2)}$

$$i_2^{(2)} = \left( \frac{S_2}{V_2^{(2)}} \right)^* = \frac{2,500000 \angle -36,869898^\circ}{0,947321 \angle +0,984600^\circ} = 2,639021 \angle -37,854498^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_2^{(2)} = i_2^{(2)} + I_3^{(2)}$$

$$I_2^{(2)} = 2,639021 \angle -37,854498^\circ + 2,069062 \angle -35,674420^\circ = 4,707243 \angle -36,896434^\circ \text{ (pu)}$$

e) Cálculo  $V_1^{(2)}$

$$V_1^{(2)} = V_2^{(2)} + I_2^{(2)} \cdot Z_2$$

$$V_1^{(2)} = 0,947321 \angle -0,984600 + (4,707243 \angle -36,896434) \times (0,005041 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_1^{(2)} = 0,970012 \angle -0,569701^\circ \text{ (pu)}$$

f) Cálculo de la Corriente Nodal  $I_1^{(2)}$

$$i_1^{(2)} = \left( \frac{S_1}{V_1^{(2)}} \right)^* = \frac{3,860070 \angle -36,469234^\circ}{0,970012 \angle +0,569701^\circ} = 2,948489 \angle -37,038935^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_1^{(2)} = i_1^{(2)} + I_2^{(2)}$$

$$I_1^{(2)} = 2,948489 \angle -37,038935^\circ + 4,707243 \angle -36,896434^\circ = 7,655726 \angle -36,951316^\circ \text{ (pu)}$$

g) Cálculo de  $V_0^{(2)}$

$$V_0^{(2)} = V_1^{(2)} + I_1^{(2)} \cdot Z_1$$

$$V_0^{(2)} = 0,970012 \angle -0,569701^\circ + (7,655726 \angle -36,951316^\circ) \times (0,003781 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_0^{(2)} = 0,997765 \angle -0,090693^\circ \text{ (pu)}$$

h) Cálculo del Error

$$\text{Error} = V_0 - V_0^{(2)} = 1 \angle 0^\circ - 0,997765 \angle -0,090693^\circ = 0,002738 \angle 35,234587^\circ \text{ (pu)}$$

Error > Ep

3<sup>ra</sup> Iteración

a) Cálculo Voltaje Nodal

$$V_n^{(k)} = V_n^{(k-1)} + \text{Error}$$

$$V_3^{(3)} = V_3^{(2)} + \text{Error} = V_3^{(1)} = 0,938420 \angle -1,165897^\circ + 0,002738 \angle 35,234587^\circ$$

$$V_3^{(3)} = 0,940625 \angle -1,066926^\circ \text{ (pu)}$$

b) Cálculo Corriente Nodal  $I_3^{(3)}$

$$i_n^{(k)} = \left( \frac{S_n}{V_n^{(k)}} \right)^* = I_n^{(k)}$$

$$i_3^{(3)} = \left( \frac{S_3}{V_3^{(3)}} \right)^* = \frac{1,941649 \angle -34,508523^\circ}{0,940625 \angle +1,066926^\circ} = 2,064212 \angle -35,575449^\circ = I_3^{(3)}$$

c) Cálculo de Voltaje Nodal  $V_3^{(3)}$

$$V_2^{(3)} = V_3^{(3)} + I_3^{(3)} \cdot Z_3$$

$$V_2^{(3)} = 0,940625 \angle -1,066926^\circ + (2,064212 \angle -35,575449^\circ) \times (0,004537 \angle 53,130107^\circ)$$

$$V_2^{(3)} = 0,949505 \angle -0,886470^\circ \text{ (pu)}$$

d) Cálculo corriente Nodal  $I_2^{(3)}$

$$i_2^{(3)} = \left( \frac{S_2}{V_2^{(3)}} \right)^* = \frac{2,500000 \angle -36,869898^\circ}{0,949505 \angle +0,886470^\circ} = 2,632951 \angle -37,756368^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_2^{(3)} = i_2^{(3)} + I_3^{(3)}$$

$$I_2^{(3)} = 2,632951 \angle -37,756368^\circ + 2,064212 \angle -35,575449^\circ = 4,696325 \angle -36,797959^\circ \text{ (pu)}$$

e) Cálculo  $V_1^{(3)}$

$$V_1^{(3)} = V_2^{(3)} + I_2^{(3)} \cdot Z_2$$

$$V_1^{(3)} = 0,949505 \angle -0,886470^\circ + (4,696325 \angle -36,797959^\circ) \times (0,005041 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_1^{(3)} = 0,972143 \angle -0,473432^\circ \text{ (pu)}$$

f) Cálculo de la Corriente Nodal  $I_1^{(3)}$

$$i_1^{(3)} = \left( \frac{S_1}{V_1^{(3)}} \right)^* = \frac{2,860070 \angle -36,469234^\circ}{0,972143 \angle +0,473432^\circ} = 2,923979 \angle -36,942666^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_1^{(3)} = i_1^{(3)} + I_2^{(3)}$$

$$I_1^{(3)} = 2,923979 \angle -36,942666^\circ + 4,696325 \angle -36,797959^\circ = 7,620298 \angle -36,853484^\circ \text{ (pu)}$$

g) Cálculo de  $V_0^{(2)}$

$$V_0^{(3)} = V_1^{(3)} + I_1^{(3)} \cdot Z_1$$

$$V_0^{(3)} = 0,972143 \angle -0,473432^\circ + (7,620298 \angle -36,853484^\circ) \times (0,003781 \angle 53,130102^\circ)$$

$$V_0^{(3)} = 0,999767 \angle 0,002447^\circ \text{ (pu)}$$

h) Cálculo del Error

$$\text{Error} = V_0 - V_0^{(3)} = 1 \angle 0^\circ - 0,999767 \angle 0,002447^\circ = 0,000237 \angle -10,40160^\circ \text{ (pu)}$$

$$\text{Error} < E_p$$

Fase C (Alimentador)						
Nodo	$V_j$ (pu)	$\delta_j$ (°)	$I_j$ (pu)	$\theta_j$ (°)	$i_j$ (pu)	$\varphi_j$ (°)
0	0,999767	0,002447	-	-	-	-
1	0,972143	-0,473432	7,620298	-36,853484	2,923979	-36,942666
2	0,949505	-0,886470	4,696325	-36,797959	2,632951	-37,756368
3	0,940625	-1,066926	2,064212	-35,575449	2,064212	-35,575449

Cuadro (4.9) Resultados Fase C (Alimentador)

Potencia Activa y Reactiva entregada en cada Nodo Fase C

$$S_{ej} = V_{j-1} \times I_j^* \quad ; \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad \text{según el Nodo}$$

Rama 1

$$S_{e1 \text{ pu}} = V_0 \times I_1^*$$

$$S_{e1 \text{ pu}} = (0,999767 \angle 0,002447^\circ) \times (7,620298 \angle +36,853484^\circ)$$

$$S_{e1 \text{ pu}} = 7,618522 \angle 36,855931^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e1} = S_{e1 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{e1} = (7,618522 \angle 36,855931^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{e1} = 761,8522 \angle 36,855931^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e1} = 609,593207 \text{ (KW)} + j 456,962765 \text{ (KVAR)}$$

Rama 2

$$S_{e2 \text{ pu}} = V_1 \times I_2^*$$

$$S_{e2 \text{ pu}} = (0,972143 \angle -0,473432^\circ) \times (4,696325 \angle +36,797959^\circ)$$

$$S_{e2 \text{ pu}} = 4,565499 \angle 36,324527^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e2} = S_{e2 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{e2} = (4,565499 \angle 36,324527^\circ) \times (100 \text{ KVA}) = 456,5499 \angle 36,324527^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e2} = 367,830779 \text{ (KW)} + j 270,441070 \text{ (KVAR)}$$

Rama 3

$$S_{e3 \text{ pu}} = V_2 \times I_3^*$$

$$S_{e3 \text{ pu}} = (0,949505 \angle -0,886470^\circ) \times (2,064212 \angle +35,575449^\circ)$$

$$S_{e3 \text{ pu}} = 1,959980 \angle 34,688979^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e3} = S_{e3 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{e3} = (1,959980 \angle 34,688979^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{e3} = 195,9980 \angle 34,688979^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{e3} = 161,160015 \text{ (KW)} + j 111,546629 \text{ (KVAR)}$$

Potencia Activa y Reactiva recibidas en cada Nodo

$$S_{rj \text{ pu}} = V_j \times I_j^*$$

Rama 1

$$S_{r1 \text{ pu}} = V_1 \times I_1^*$$

$$S_{r1 \text{ pu}} = (0,972143 \angle -0,473432^\circ) \times (7,620298 \angle +36,853484^\circ)$$

$$S_{r1 \text{ pu}} = 7,408019 \angle +36,380052^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r1} = S_{r1 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{r1} = (7,408019 \angle +36,380052^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{r1} = 740,801936 \angle +36,380052^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r1} = 596,419900 \text{ (KW)} + j 439,39828 \text{ (KVAR)}$$

Rama 2

$$S_{r2 \text{ pu}} = V_2 \times I_2^*$$

$$S_{r2 \text{ pu}} = (0,949505 \angle -0,886470^\circ) \times (4,696325 \angle +36,797959^\circ)$$

$$S_{r2 \text{ pu}} = 4,459184 \angle 35,911489^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r2} = S_{r2 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{r2} = (4,459184 \angle 35,911489^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{r2} = 445,9184 \angle 35,911489^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r2} = 361,160040 \text{ (KW)} + j 261,546653 \text{ (KVAR)}$$

Rama 3

$$S_{r3 \text{ pu}} = V_3 \times I_3^*$$

$$S_{r3 \text{ pu}} = (0,940625 \angle -1,066926^\circ) \times (2,064212 \angle +35,575449^\circ)$$

$$S_{r3 \text{ pu}} = 1,941649 \angle 34,508523^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r3} = S_{r3 \text{ pu}} \times S_b$$

$$S_{r3} = (1,941649 \angle 34,508523^\circ) \times (100 \text{ KVA})$$

$$S_{r3} = 194,1649 \angle 34,508523^\circ \text{ (pu)}$$

$$S_{r3} = 160,000052 \text{ (KW)} + j 110,000036 \text{ (KVAR)}$$

Pérdida de Potencia Activa y Reactiva

Pérdida de Potencia Activa

$$\Delta P_1 = P_{e1} - P_{r1}$$

$$\Delta P_1 = 609,593207 - 596,419900$$

$$\Delta P_1 = 13,173307 \text{ (KW)}$$

$$\Delta P_2 = P_{e2} - P_{r2}$$

$$\Delta P_2 = 367,830779 - 361,160040$$

$$\Delta P_2 = 6,670739 \text{ (KW)}$$

$$\Delta P_3 = P_{e3} - P_{r3}$$

$$\Delta P_3 = 161,160015 - 160,000052$$

$$\Delta P_3 = 1,159963 \text{ (KW)}$$

$$\Delta P_T = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

$$\Delta P_T = 13,173307 + 6,670739 + 1,159963 \text{ (KW)}$$

$$\Delta P_T = 21,004009 \text{ (KW)}$$

Pérdida de Potencia Reactiva

$$\Delta Q_1 = Q_{e1} - Q_{r1}$$

$$\Delta Q_1 = 456,962765 - 439,39828$$

$$\Delta Q_1 = 17,564485 \text{ (KVAR)}$$

$$\Delta Q_2 = Q_{e2} - Q_{r2}$$

$$\Delta Q_2 = 270,441070 - 261,546653$$

$$\Delta Q_2 = 8,894417 \text{ (KVAR)}$$

$$\Delta Q_3 = Q_{e3} - Q_{r3}$$

$$\Delta Q_3 = 111,546629 - 110,000036$$

$$\Delta Q_3 = 1,546593 \text{ (KVAR)}$$



$$\Delta Q_T = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3$$

$$\Delta Q_T = 17,564485 + 8,894417 + 1,546593 \text{ (KVAR)}$$

$$\Delta Q_T = 28,005495 \text{ (KVAR)}$$

$$\% \text{ de Pérdida de Pot. Activa} = \frac{\Delta P_T}{P_{e1}} \times 100 = \frac{21,004009}{609,593207} \times 100 = 3,445577 \%$$

$$\% \text{ de Pérdida de Pot. Reactiva} = \frac{\Delta Q_T}{Q_{e1}} \times 100 = \frac{28,005495}{456,962765} \times 100 = 6,128616 \%$$

Fase C (Alimentador)							
Tr.	Nd	Potencia Entregada		Potencia Recibida		Pérdida de Potencia	
		P (KW)	Q (KVAR)	P (KW)	Q (KVAR)	P(KW)	Q(KVAR)
0-1	1	609,593207	456,962765	596,419900	439,398280	13,173307	17,564485
1-2	2	367,830779	270,441070	361,160040	261,546653	6,670739	8,894417
2-3	3	161,160015	111,546629	160,000052	110,000036	1,159963	1,546593
<b>Total</b>						21,004009	28,005495
<b>% de Pérdida</b>						3,445577	6,128616

Cuadro (4.10) Potencia Entregada, Recibida y Pérdida Fase C (Alimentador)



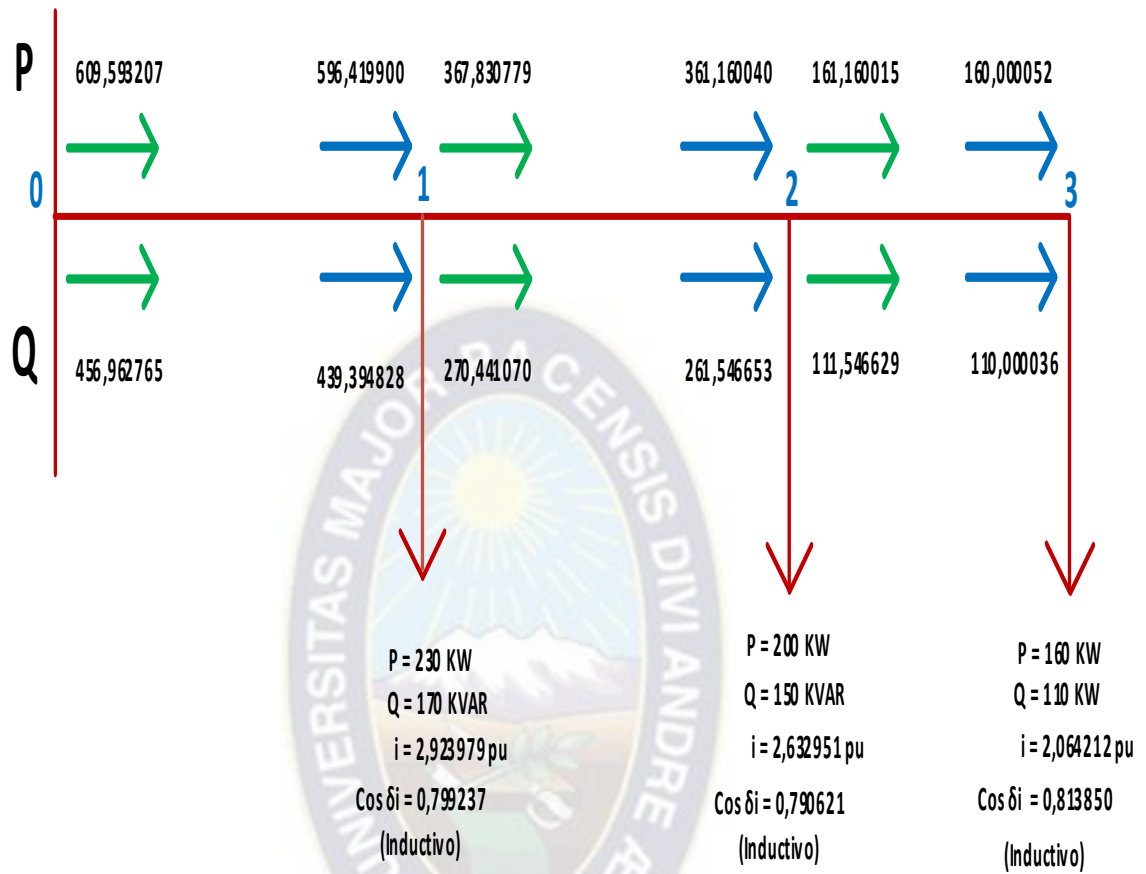


Fig. (4.7)

Potencia Activa y Reactiva entregada, recibida en cada nodo Fase C (Alimentador)

### 4.3 CONCLUSIÓN Y COMENTARIOS

Al realizar el análisis de cada Sistema propuesto y realizar los flujos de potencia por el “Método Escalonado” en una Red de Distribución Radial de Media Tensión en forma manual se pudo comprobar la dificultad, demora, error que se puede cometer al ingresar los datos, en este caso se realizó el ejemplo con un alimentador de 3 nodos.

Por esta razón se realizó un programa que pueda de alguna manera ayudar al estudiante y/o investigador a realizar “Cálculos de Flujos de Potencia en una Red de Distribución Radial de Media Tensión” usando el método escalonado, así evitando la demora, el error en los cálculos.

Los resultados obtenidos por el programa se encuentran en el Anexo A en las páginas 3 al 8, comparando con los resultados obtenidos de forma manual existe una diferencia mínima, que puede ser por el redondeo y también por el manejo de número de decimales, de esta manera se pudo comprobar que el programa desarrollado cumple con los requisitos.

## CAPÍTULO V

### INGRESO DE PARÁMETROS Y DATOS TOPOLÓGICOS

#### 5.1 INTRODUCCIÓN

El lenguaje de programación usado para el desarrollo del programa computacional basado en el “Método Escalonado”, fue desarrollado en el entorno de Matlab R2014a considerando su facilidad en el manejo sin perder los aspectos y conceptos fundamentales de Ingeniería Eléctrica enfocado a las Redes de Distribución.

La determinación de Flujos de Potencia en una Red de Distribución Radial, fue previo al cálculo de las Tensiones de Nodo, Corrientes de Nodo y Corrientes de Rama.

Los reportes con los resultados obtenidos, pueden ser guardados en archivo o ser impresos.

#### 5.2 PARÁMETROS DE ANÁLISIS DEL SISTEMA

Los parámetros de Análisis del Sistema que deben ingresarse son los siguientes:

- Ingrese el valor de Voltaje V Base [V]
- Ingrese el valor de Potencia Base [KVA]
- Ingrese el valor del número de nodos

El **Voltaje Base** es considerado como un parámetro de análisis del sistema está determinado en función al valor de tensión siendo esta una relación:

$$V_b = \frac{\text{Valor de tensión de línea}}{\sqrt{3}} = V_b = \frac{V}{\sqrt{3}} = (\text{KV}) \quad (5.1)$$

La **Potencia Base** está en base a la mayor carga en KVA existente en la red.

El **Número de Nodos** esta numeración que se da es solo factible en una red topológicamente radial. En primer lugar se determina el alimentador principal de la red llegando a ser la de mayor longitud.

Después de toda la información introducida nos pedirá lo siguiente.

- Ingrese el valor de  $Z$  [Ohms]
- Ingrese el valor de  $L$  [Km]
- Ingrese el valor de números de nodos a analizar ( $n$ ).
- Ingrese los valores de Potencia Activa (KW) y Potencia Reactiva (KVAR) para cada una de las fases.
- Ingrese el valor de  $S_b$  [KVA]

	Tramo	ni	nf	r	x	L	FASE A		FASE B		FASE C		Vb[kv]	Sb[kVA]	n
							P	Q	P	Q	P	Q			
3	1	0	1	0,0664	0,1249	0,47	0,43	-0,03	0,24	0,36	0	0	6,9	100	23
4	2	1	2	0,1677	0,3093	0,445	11,05	6,85	11,05	6,85	11,05	6,85			
5	3	2	3	0,1677	0,3093	0,042	11,9	7,38	11,9	7,38	11,9	7,38			
6	4	3	4	0,1677	0,3093	0,188	12,47	7,73	12,47	7,73	12,47	7,73			
7	5	4	5	0,1677	0,3093	0,13	19,49	10,49	19,74	12,09	18,24	11,51			
8	6	5	6	0,1677	0,3093	0,168	100,1	48,69	769,6	43,54	166,4	136			
9	7	6	7	0,1677	0,3093	0,441	8,1	6,3	11,98	4,03	12	8,52			
10	8	7	8	0,1677	0,3093	0,574	3,4	2,11	3,4	2,11	3,4	2,11			
11	9	8	9	0,1677	0,3093	0,824	16,88	13,92	15,3	11,59	18,11	11,39			
12	10	9	10	0,1677	0,3093	0,059	250,8	159,5	248,9	152	249,8	149,7			
13	11	10	11	0,2663	0,3246	0,046	5,11	15,8	0	15,8	9,07	15,8			
14	12	11	12	0,2141	0,3165	0,102	0	0	0	0	0	0			
15	13	12	13	0,1677	0,3093	1,559	0	0	0	0	0	0			
16	14	13	14	0,2663	0,3246	0,182	14,68	-1,07	8,27	12,18	0	0			

Fig. (5.1) Ingreso de datos “Alimentador principal” (entrada.xlsx)

### 5.3 REQUERIMIENTO DE SISTEMA COMPUTARIZADO

El equipo debe tener las siguientes características:

- Una computadora superior Pentium IV.
- Un mínimo de 128 Megabits de memoria extendida.
- 1 Giga de espacio disco duro.
- Un ratón, impresora compatible con Windows.
- Sistema operativo con Windows 7 profesional o superior.

### 5.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez ingresado la información que nos pide inciso (5.2) ejecutamos el programa, obteniendo como resultados:

- Voltajes nodales y Corrientes de tramo.
- Potencia activa y reactiva entregada por cada nodo
- Potencia activa y reactiva recibidas por cada nodo
- Perdidas de Potencia Activa y Reactiva en cada Nodo
- % de Regulación de cada uno de los nodos a analizar por fase.
- Perdidas de Potencia Activa y Reactiva de todo el Sistema.

Tramo	Nodo	Vj(pu)	$\theta_j$	Ij(pu)	$\phi_j$	ij(pu)	$\delta_j$	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pe
0--1	1	0,99773389	-0,06983555	5,94838601	-32,1263616	0,00432024	3,92107755	503,693881	316,307336	502,998076	314,998511	
1--2	2	0,99263104	-0,23629577	5,94489351	-32,1508635	0,13097476	-32,031463	502,568076	315,028511	500,906179	311,963365	1
2--3	3	0,99216045	-0,25174551	5,81391904	-32,1535533	0,14113299	-32,0576136	489,856179	305,113365	489,706161	304,836677	0
3--4	4	0,99010591	-0,31938985	5,67278625	-32,1559402	0,14818142	-32,113656	477,806161	297,456677	477,166857	296,277569	0
4--5	5	0,9887231	-0,36510013	5,52460487	-32,1570743	0,22386135	-28,6553365	464,696857	288,547569	464,27758	287,774267	0
5--6	6	0,9870067	-0,42170401	5,30117911	-32,3048559	1,12806343	-26,3538691	444,78758	277,284267	444,288683	276,36412	0
6--7	7	0,98340106	-0,53368563	4,18083104	-33,9078629	0,10434785	-38,4086693	344,158683	227,67412	343,344129	226,171785	0
7--8	8	0,97883516	-0,6775372	4,0768132	-33,7927812	0,04088035	-32,5007887	335,244129	219,871785	334,236015	218,012455	1
8--9	9	0,97235627	-0,88420679	4,03594335	-33,8058667	0,22501251	-40,394718	330,836015	215,902455	329,417698	213,28656	1
9--10	10	0,97192014	-0,89845936	3,81250445	-33,4178489	3,05779826	-33,3591534	312,537698	199,36656	312,447077	199,199422	0
10--11	11	0,97183272	-0,90012167	0,7547143	-33,65566	0,17087082	-72,9779951	61,687065	39,6894219	61,6826799	39,6840627	0
11--12	12	0,97170263	-0,90510993	0,63187612	-23,7887996	0	0	56,5726799	23,8840627	56,5671857	23,8759408	0
12--13	13	0,96999798	-0,98567961	0,63187612	-23,7887996	0	0	56,5671857	23,8759408	56,5014099	23,7546262	0
13--14	14	0,96972893	-0,99407231	0,63187612	-23,7887996	0,1517841	3,17474657	56,5014099	23,7546262	56,4892164	23,7397632	0
14--15	15	0,96878021	-1,01443994	0,50133804	-31,6791425	0	0	41,8092164	24,8097632	41,7771212	24,7706415	0

Fig. (5.2) Resultados para cada una de las Fases (Método Escalonado).



Tramo	Nodo							Potencia Entregada		Potencia recibida		Perdida de Potencias		%reg			
		Vj(pu)	θj	I(pu)	φj	ij(pu)	δj	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)				
0-1	1	0,99773389	-0,06983555	5,94838601	-32,1263616	0,00432024	3,92107755	503,693881	316,307336	502,998076	314,998511	0,6958046	1,30882523	0.22			
1-2	2	0,99263104	-0,23629577	5,94489351	-32,1508635	0,13097476	-32,031463	502,568076	315,028511	500,906179	311,963365	1,66189777	3,06514598	0.73			
2-3	3	0,99216045	-0,25174551	5,81391904	-32,1535533	0,14113299	-32,0576136	489,856179	305,113365	489,706161	304,836677	0,15001801	0,27668795	0.77			
3-4	4	0,99010591	-0,31938985	5,67278625	-32,1559402	0,14818142	-32,113656	477,806161	297,456677	477,166857	296,277569	0,63930312	1,17910826	0.98			
4-5	5	0,9887231	-0,36510013	5,52460487	-32,1570743	0,22386135	-28,6553365	464,696857	288,547569	464,27758	287,774267	0,41927786	0,77330139	1.12			
5-6	6	0,9870067	-0,42170401	5,30117911	-32,3048559	1,12806343	-26,3538691	444,78758	277,284267	444,288683	276,36412	0,4988964	0,92014704	1.29			
6-7	7	0,98340106	-0,53368563	4,18083104	-33,9078629	0,10434785	-38,4086693	344,158683	227,67412	343,344129	226,171785	0,81455415	1,50233511	1.65			
7-8	8	0,97883516	-0,6775372	4,0768132	-33,7927812	0,04088035	-32,5007887	335,244129	219,871785	334,236015	218,012455	1,00811402	1,85933015	2.11			
8-9	9	0,97235627	-0,88420679	4,03594335	-33,8058667	0,22501251	-40,394718	330,836015	215,902455	329,417698	213,28656	1,41831753	2,61589512	2.77			
9-10	10	0,97192014	-0,89845936	3,81250445	-33,4178489	3,05779826	-33,3591534	312,537698	199,36656	312,447077	199,199422	0,090621	0,1671382	2.81			
10-11	11	0,97183272	-0,90012167	0,7547143	-33,65566	0,17087082	-72,9779951	61,6870765	39,6894219	61,6826799	39,6840627	0,0043966	0,00535913	2.82			
11-12	12	0,97170263	-0,90510993	0,63187612	-23,7887996	0	0	56,5726799	23,8840627	56,5671857	23,8759408	0,00549419	0,00812196	2.83			
12-13	13	0,9699798	-0,98567961	0,63187612	-23,7887996	0	0	56,5671857	23,8759408	56,5014099	23,7546262	0,0657758	0,12131458	3.00			
13-14	14	0,96972893	-0,99407231	0,63187612	-23,7887996	0,1517841	3,17474657	56,5014099	23,7546262	56,4892164	23,7397632	0,01219353	0,01486301	3.03			
14-15	15	0,96878021	-1,01443994	0,50133804	-31,6791425	0	0	41,8092164	24,8097632	41,7771212	24,7706415	0,03209521	0,03912169	3.13			
15-16	16	0,96828284	-1,02513484	0,50133804	-31,6791425	0,06565316	-56,8601132	41,7771212	24,7706415	41,7602933	24,7501296	0,01682784	0,0205119	3.18			
16-17	17	0,96770209	-1,04015637	0,44280598	-28,0622873	0,07419991	-1,59873263	38,1902933	19,4901296	38,1724934	19,4684328	0,01779994	0,02169681	3.24			
17-18	18	0,96746524	-1,04487488	0,37783052	-33,082913	0,00751143	-56,6987775	30,9924934	19,3984328	30,9865048	19,3911331	0,00598864	0,00729971	3.26			
18-19	19	0,9666796	-1,06096537	0,37096036	-32,6181446	0,19228048	-32,3736308	30,5765048	18,7911331	30,5569464	18,7672929	0,01955837	0,02384021	3.34			
19-20	20	0,96633058	-1,06801615	0,17868352	-32,8812649	0	0	14,6769464	9,10729288	14,6727675	9,10219915	0,00417886	0,00509372	3.37			
20-21	21	0,96616862	-1,06820736	0,17868352	-32,8812649	0,10095715	-32,8681186	14,6727675	9,10219915	14,6703387	9,10062462	0,00242887	0,00157454	3.39			
21-22	22	0,96609243	-1,07078493	0,07772637	-32,8983403	0,05871157	-32,883434	6,38033866	3,96062462	6,38001372	3,9600253	0,00032495	0,00059932	3.40			
22-23	23	0,96618587	-1,07260772	0,01901481	-32,9443661	0,01901481	-32,9443661	1,56001372	0,9700253	1,56019546	0,97006948	-0,00018174	-4,4184E-05	3.39			
		error	0,0001091											Total	7,58368553	13,9372668	
														% perdida de pot. activa	1.51	% perdida de pot. react	4.41

Fig. (5.3) Resultados Alimentador Principal.

## 5.5 CONCLUSIONES

La necesidad de obtener resultados de forma rápida y confiable fue el motivo de realizar este trabajo para Sistemas Eléctricos de Distribución en Media Tensión (MT), que contiene todas las particulares características de estos sistemas. En este trabajo se muestra un programa de Flujos de Potencia Trifásico en una Red de Distribución Radial (MT), usando el Método Escalonado con Subiteraciones.

Este trabajo muestra las mayores contribuciones con esta nueva herramienta de análisis que puede ser utilizado por un estudiante o un profesional que tenga interés en Redes de Distribución.

Los datos deben ingresarse en el archivo Excel “entrada2.xlsx, una vez ejecutado el programa los resultados generados son para las fases A, B, C, en la cual el programa genera un archivo Excel, para luego ser impreso.

## **CAPÍTULO VI**

### **APLICACIONES A SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

#### **6.1 RESUMEN**

En este capítulo se presenta la información necesaria para que el programa propuesto pueda realizar los calcular los Flujos de Potencia en un Sistema de Distribución Radial.

#### **6.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL (SUBESTACIÓN KENKO)**

El sistema de distribución radial es el denominado alimentador SIMSA que tiene 23 nodos, sobre la cual se realizara el cálculo de voltajes nodales y posteriormente se realizará el cálculo de “Flujos de Potencia”.

El cuadro 6.1 muestra las distancias, resistencias y reactancias de cada tramo, potencias activas y reactivas en cada nodo, correspondientes a las fases A, B y C.

Datos del Alimentador SIMSA			Fase A				Fase B		Fase C		
Tr.	ni	nf	r (Ω/Km)	x (Ω/Km)	L (Km)	P (KW)	Q (KVAR)	P (KW)	Q (KVAR)	P (KW)	Q (KVAR)
1	0	1	0,0664	0,1249	0,470	0,43	-0,03	0,24	0,36	0,00	0,00
2	1	2	0,1677	0,3093	0,445	11,05	6,85	11,05	6,85	11,05	6,85
3	2	3	0,1677	0,3093	0,042	11,90	7,38	11,90	7,38	11,90	7,38
4	3	4	0,1677	0,3093	0,188	12,47	7,73	12,47	7,73	12,47	7,73
5	4	5	0,1677	0,3093	0,130	19,49	10,49	19,74	12,09	18,24	11,51
6	5	6	0,1677	0,3093	0,168	100,13	48,69	769,59	43,54	166,38	136,02
7	6	7	0,1677	0,3093	0,441	8,10	6,30	11,98	4,03	12,00	8,52
8	7	8	0,1677	0,3093	0,574	3,40	2,11	3,40	2,11	3,40	2,11
9	8	9	0,1677	0,3093	0,824	16,88	13,92	15,30	11,59	18,11	11,39
10	9	10	0,1677	0,3093	0,059	250,76	159,51	248,87	152,03	249,78	149,71
11	10	11	0,2663	0,3246	0,046	5,11	15,80	0,00	15,80	9,07	15,80
12	11	12	0,2141	0,3165	0,102	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	12	13	0,1677	0,3093	1,559	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	13	14	0,2663	0,3246	0,182	14,68	-1,07	8,27	12,18	0,00	0,00
15	14	15	0,2663	0,3246	0,761	0,00	0,00	8,35	-0,61	4,71	6,93
16	15	16	0,2663	0,3246	0,399	3,57	5,26	0,00	0,00	6,33	-0,46
17	16	17	0,2663	0,3246	0,541	7,18	0,07	4,42	5,79	0,85	0,53
18	17	18	0,2663	0,3246	0,250	0,41	0,60	0,00	0,00	0,72	-0,05
19	18	19	0,2663	0,3246	0,847	15,88	9,66	15,88	9,66	15,88	9,66
20	19	20	0,2663	0,3246	0,780	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	20	21	0,5342	0,3463	0,226	8,29	5,14	8,29	5,14	8,29	5,14
22	21	22	0,1677	0,3093	0,509	4,82	2,99	4,82	2,99	4,82	2,99
23	22	23	0,1677	0,3093	0,359	1,56	0,97	1,56	0,97	1,56	0,97

Cuadro (6.1) Alimentador SIMSA-Fuente Electropaz



El Alimentador denominado SIMSA, tiene su origen en la Subestación de KENKO en la ciudad de El Alto – La Paz.

Este alimentador es trifásico aéreo, los calibres de conductor que tiene son: 336 MCM, 4/0 y 1/0 AWG. La red tiene puesto de transformadores que se encuentran en postes de madera o de concreto. Se ha considerado como tensión de línea nominal de la red de 6,9 KV, Potencia Base de 100 KVA y con un error prefijado de 0,001.

El alimentador tiene 44 puestos de transformación trifásica y 10 con bancos de transformadores monofásicos conectados en delta abierto.

Con estos datos y con la información topológica y de cargas de sistema se ejecuta el programa de “Cálculo de Flujos de Potencia en una red de Distribución Radial de Media Tensión”.

En el diagrama unifilar de la red Anexo B (figura, pág.7), del alimentador SIMSA; han sido simplificadas en 23 nodos Anexo B (figura, pág. 6), refiriendo los ramales a un mismo nodo del alimentador troncal para lo cual se suma las demandas máximas esto hace suponer un factor de diversidad a la unidad.

### 6.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL – SUBESTACIÓN ACHACACHI

La subestación Achacachi se encuentra ubicada al sureste de la población de Achacachi, en la Provincia Omasuyos del departamento de La Paz a 92 km de la ciudad de La Paz.

En la “Subestación Achacachi”, se reemplazó los actuales transformadores monofásicos de potencia de 2X1MVA, 69/6,9 KV, por otro transformador trifásico de 5 MVA 69/6,9 KV; posee una infraestructura civil y electromecánica para la instalación de este último transformador.

Para el suministro de energía eléctrica a las poblaciones rurales aledañas a la población de Achacachi, como ser Warisata, Jankho Amaya, Kalaque, Ajllata Grande, Villa Asunción de Corpaputo, Franz Tamayo, Chua Visalaya, Soncachi y Copancara se realizó el reemplazo del transformador de 3 MVA por otro de 10 MVA 69/24,9 KV, permitiendo de esta manera garantizar el crecimiento de la demanda del sector, mejorar la confiabilidad entre las subestaciones cercanas, al brindar apoyo y asegurar la calidad en el suministro de energía eléctrica.

Para la protección del transformador de 69/6,9 KV, destinado para el suministro de energía eléctrica de la población de Achacachi en el nivel de 6,9 KV y del transformador de 69/24,9 KV, destinado para la distribución de energía eléctrica del sistema rural de Achacachi en el nivel de 24,9 KV tiene instalada dos interruptores-seccionadores (Circuit - Switcher), además de tres transformadores de corriente y dos reconectores electrónicos para la protección de las redes de Media Tensión.

El control y protección se logra con un armario de protección que concentra a los dispositivos de protección del transformador.

Existen postes de hormigón armado y algunos postes de madera, las crucetas son de madera y pocos son metálicos tiene aislador de porcelana de tensión y de paso. El calibre de los conductores varía entre 336 MCM, 4/0 y 1/0 AWG.

Como parte de las obras civiles, existe sistemas de recolección de aceites para los dos transformadores de potencia, lo que permite que las mejoras en la subestación Achacachi, cuenten con medidas que protegen el medio ambiente y se alinean con el compromiso de DELAPAZ por la conservación del medio ambiente.

Se realizó estas mejoras de la subestación Achacachi para cubrir las necesidades de crecimiento de la demanda y mejorar la confiabilidad y la seguridad del servicio de suministro de energía eléctrica a los clientes.



Fig. (6.1) Subestación de Achacachi

La Subestación de Achacachi presenta valores de Potencia Activa y Reactiva al igual que las distancias de cada nodo, resistencias y reactancia por cada fase, cuadros (6.2).

Cabe destacar que la información que se presenta en el cuadro ya mencionado es solo del suministro de energía eléctrica de la población de Achacachi en el nivel de 6,9 KV.



Datos del Alimentador					Fase A		Fase B		Fase C		
ID	Código	Tr.	r ( $\Omega$ /Km)	x ( $\Omega$ /Km)	L (Km)	P (KW)	Q (KVAR)	P (KW)	Q (KVAR)	P (KW)	Q (KVAR)
3790	H02365	1	0,17261321	0,3165	0,8260	14,05	9,83	20,21	9,79	18,19	11,27
3809	H02350	2	0,17261321	0,3165	0,8020	17,05	15,40	10,26	7,48	7,23	5,61
3808	H02195	3	0,17261321	0,3165	0,2630	3,40	2,11	17,42	15,64	15,71	14,57
3740	H02395	4	0,17261321	0,3165	0,3100	26,10	21,02	3,19	1,98	2,59	1,61
3741	H02390	5	0,17261321	0,3165	0,1270	11,24	5,44	22,37	18,71	19,47	16,91
3765	H02475	6	0,17261321	0,3165	0,3010	7,18	3,48	8,72	4,22	12,84	6,22
3764	H02490	7	0,17261321	0,3165	0,3710	10,39	5,03	11,18	5,42	10,57	5,12
3763	H02495	8	0,17261321	0,3165	0,0620	11,65	5,64	11,39	5,52	3,92	1,90
3810	H02500	9	0,17261321	0,3165	0,2270	7,56	3,66	0,19	0,12	15,42	7,47
3813	H02425	10	0,17261321	0,3165	0,1340	0,98	0,48	9,32	4,51	17,64	8,540
3814	H02355	11	0,17261321	0,3165	0,0370	11,95	5,79	18,04	8,74	39,54	21,21
3815	H02450	12	0,17261321	0,3165	0,5460	26,54	16,45	42,95	23,54	30,24	14,65
3762	H02435	13	0,55024495	0,3463	0,7180	10,53	5,10	27,80	13,47	37,42	18,12
2546	H02440	14	0,55024495	0,3463	0,5070	34,88	16,90	39,17	18,97	38,03	18,42
5483	H02485	15	0,55024495	0,3246	0,2880	49,43	23,94	25,47	12,76	20,44	9,90
3738	H02420	16	0,55024495	0,3463	0,3990	30,84	14,94	11,49	5,57	11,80	5,71
3737	H02670	17	0,55024495	0,3463	0,0310	10,76	6,21	0,33	0,21	17,29	8,37
3812	H02415	18	0,17261321	0,3165	0,3140	40,68	19,70	17,34	8,40	30,37	14,71
3761	H02445	19	0,17261321	0,3165	0,3040	12,76	7,91	0,20	0,12	16,92	10,48
4820	H02455	20	0,27425070	0,3246	0,2220	9,15	4,43	20,70	12,39	1,33	0,83
3732	H02460	21	0,27425070	0,3246	0,2520	10,83	5,24	0,19	0,12	11,03	5,34

Cuadro N° (6.2) Alimentador Achacachi-Fuente Analizador de Redes Eléctricas.



## 6.4 RESULTADOS OBTENIDOS Y ANALISIS

El proceso de flujo de potencia se ejecutó en software que se desarrolló bajo el método “Escalonado “con un error pre fijado de 0,001, con un determinado número de iteraciones según el número de nodos a analizar.

Lo particularidad de este método es que permite definir una cantidad ilimitada de cargas desbalanceadas en una red de distribución radial con características individuales, validando los resultados con un software especializado en redes de distribución llamado CYMDIST.

En el anexo A se muestra la hoja de resultados obtenidos por el programa “Método Escalonado con Subiteraciones para el Cálculo de Flujos de Potencia en Sistema de Distribución Radial de Media Tensión”.

El Alimentador Kenko es trifásico aéreo los calibres de conductor son: 336 MCM, 4/0 y 1/0 AWG. Cuenta de una tensión nominal de 6,9 KV y potencia base de 100 KVA.

En el primer nodo se tiene una potencia activa entregada de 1177,40377 KW, en el nodo 23 se tiene un potencia activa recibida de 1,5603881 KW esto se da por las cargas que se encuentran en cada uno de los nodos.

El mayor porcentaje de pérdidas de potencia Activa está dada en la fase B con un 1,81 %, tenemos un porcentaje total de pérdida del sistema de potencia activa es 1,68 % y porcentaje total de pérdida de potencia reactiva de 6,59 %.

El alimentador de Achacachi es trifásico aéreo lleva conductor 336 MCM, 1/0 AWG, una tensión nominal de 6,9 KV.

El mayor porcentaje de pérdidas de potencia Activa está dada en la fase A con un 2,43 %, tenemos un porcentaje total de pérdida de potencia activa de 2,11 % y porcentaje total de pérdida de potencia reactiva es 6,59 % de las tres fases, estos resultados nos da a conocer que existe perdidas tanto técnicas como no técnicas.

Por lo tanto, con los estudios de flujos de potencia se puede ver cómo actúa una red en cada instante y la potencia que demanda cada una de sus fases. Esto ofrece ventajas al tomar decisiones ante cambios en la demanda del sistema y que además estas decisiones sean rápida y concretas.

El hecho que hace más atractivo a este programa es que es factible de ser ejecutado en cualquier computador independiente, tiene poco requerimiento de memoria ya que después de realizar el análisis respectivo libera la memoria utilizando de manera automática estas, características permiten que este programa se constituya en una herramienta de análisis para gran parte de los estudiantes.

**ANEXO A**  
**HOJAS DE RESULTADOS OBTENIDOS**  
**ÍNDICE**

	Pág.
Índice	1
A.1 Introducción	2
A.2 Sistema de Distribución Radial Fase A (Alimentador)	3
A.3 Sistema de Distribución Radial Fase B (Alimentador)	3
A.4 Sistema de Distribución Radial Fase C (Alimentador)	4
A.5 Sistema de Distribución Radial Fase A (Alimentador) - 23 Nodos (SIMSA)	5
A.6 Sistema de Distribución Radial Fase B (Alimentador) - 23 Nodos (SIMSA)	6
A.7 Sistema de Distribución Radial Fase C (Alimentador) - 23 Nodos (SIMSA)	7
A.8 Sistema de Distribución Radial Fase A (Alimentador Achacachi)	8
A.9 Sistema de Distribución Radial Fase B (Alimentador Achacachi)	9
A.10 Sistema de Distribución Radial Fase C (Alimentador Achacachi)	10



## A.1 INTRODUCCIÓN

En este anexo se muestra la hoja de resultados obtenidos por el programa “Método Escalonado con Subiteraciones para el Cálculo de Flujos de Potencia en Sistema de Distribución Radial de Media Tensión”, para los sistemas denominados de 3 nodos, de 23 nodos (SIMSA) y del Alimentador de Achacachi.

## A.2 SISTEMA DE DISTRIBUCION RADIAL FASE A (ALIMENTADOR)

$$V_b = 6,9 \text{ (KV)}$$

$$S_b = 100 \text{ (KVA)}$$

Tramo	Nodo	Vj(pu)	$\theta_j$	Ij(pu)	$\phi_j$	ij(pu)	$\delta_j$	Potencia Entregada		Potencia recibida		Perdida de Potencias		%reg
								Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	
0--1	1	0,96761202	-0,46125156	8,78116597	-39,4213899	3,30872503	-39,1210598	678,185879	557,581173	660,694263	534,259017	17,4916164	23,3221553	3.23
1--2	2	0,94086703	-0,86733922	5,47251388	-39,6029713	3,02118575	-40,1567461	410,694263	334,259017	401,636143	322,181524	9,05811968	12,0774929	5.91
2--3	3	0,930299	-1,05018746	2,45164314	-38,9205433	2,45164314	-38,9205433	181,636143	142,181524	180,043697	140,010648	1,59244669	2,17087604	6.97
		error	0,00018345									Total	28,1421828	37,5705242
										% perdida de pot. activa	% perdida de pot. react			
										4.15	6.74			

## A.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE B (ALIMENTADOR) -

Tramo	Nodo	Vj(pu)	$\theta_j$	Ij(pu)	$\phi_j$	ij(pu)	$\delta_j$	Potencia Entregada		Potencia recibida		Perdida de Potencias		%reg
								Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	
0--1	1	0,9700433	-0,47399658	8,17298628	-37,9443404	3,09264545	-37,3438942	644,384801	502,513068	629,232202	482,309603	15,1525984	20,2034646	2.98
1--2	2	0,94536333	-0,88343903	5,08061403	-38,3098367	2,79265726	-38,1873873	389,232202	302,309603	381,424977	291,899969	7,80722538	10,4096338	5.46
2--3	3	0,93553777	-1,05799189	2,28797093	-38,4592962	2,28797093	-38,4592962	171,424977	131,899969	170,040157	130,01165	1,38482033	1,88831901	6.45
		error	0,00018275									Total	24,3446441	32,5014174
										% perdida de pot. activa	% perdida de pot. react			
										3.78	6.47			

#### A.4 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE C (ALIMENTADOR)

Tramo	Nodo	Vj(pu)	$\theta_j$	Ij(pu)	$\phi_j$	ij(pu)	$\delta_j$	Potencia Entregada		Potencia recibida		Perdida de Potencias		%reg
								Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	
0--1	1	0,97214528	-0,47342385	7,63832547	-36,8536816	2,94201903	-36,9426582	611,065621	458,087495	597,830684	440,440912	13,2349375	17,6465833	2.77
1--2	2	0,94950713	-0,88645612	4,69631221	-36,7979419	2,63294496	-37,7563538	367,830684	270,440912	361,159879	261,546505	6,6708048	8,8944064	5.04
2--3	3	0,94079576	-1,07044422	2,06420546	-35,5754282	2,06420546	-35,5754282	161,159879	111,546505	160,035386	110,009771	1,12449305	1,53673411	5.92
		error	0,00017784									Total	21,0302353	28,0777238
										% perdida de pot. activa	% perdida de pot. react			
										3.44	6.13			

#### Perdidas Alimentador

% Activa	3.80
% Reactiva	6.46

### A.5 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE A (ALIMENTADOR) - 23 NODOS (SIMSA)

$$V_b = 6,9 \text{ (KV)}$$

$$S_b = 100 \text{ (KVA)}$$

Tramo	Nodo	Vj(pu)	$\theta_j$	I(pu)	$\phi_j$	ij(pu)	$\delta_j$	Potencia Entregada		Potencia recibida		Perdida de Potencias		%reg
								Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	
0--1	1	0,99773389	-0,06983555	5,94838601	-32,1263616	0,00432024	3,92107755	503,693881	316,307336	502,998076	314,998511	0,6958046	1,30882523	0.22
1--2	2	0,99263104	-0,23629577	5,94489351	-32,1508635	0,13097476	-32,031463	502,568076	315,028511	500,906179	311,963365	1,66189777	3,06514598	0.73
2--3	3	0,99216045	-0,25174551	5,81391904	-32,1535533	0,14113299	-32,0576136	489,856179	305,113365	489,706161	304,836677	0,15001801	0,27668795	0.77
3--4	4	0,99010591	-0,31938985	5,67278625	-32,1559402	0,14818142	-32,113656	477,806161	297,456677	477,166857	296,277569	0,63930312	1,17910826	0.98
4--5	5	0,9887231	-0,36510013	5,52460487	-32,1570743	0,22386135	-28,6553365	464,696857	288,547569	464,27758	287,774267	0,41927786	0,77330139	1.12
5--6	6	0,9870067	-0,42170401	5,30117911	-32,3048559	1,12806343	-26,3538691	444,78758	277,284267	444,288683	276,36412	0,4988964	0,92014704	1.29
6--7	7	0,98340106	-0,53368563	4,18083104	-33,9078629	0,10434785	-38,4086693	344,158683	227,67412	343,344129	226,171785	0,81455415	1,50233511	1.65
7--8	8	0,97883516	-0,6775372	4,0768132	-33,7927812	0,04088035	-32,5007887	335,244129	219,871785	334,236015	218,012455	1,00811402	1,85933015	2.11
8--9	9	0,97235627	-0,88420679	4,03594335	-33,8058667	0,22501251	-40,394718	330,836015	215,902455	329,417698	213,28656	1,41831753	2,61589512	2.77
9--10	10	0,97192014	-0,89845936	3,81250445	-33,4178489	3,05779826	-33,3591534	312,537698	199,36656	312,447077	199,199422	0,090621	0,1671382	2.81
10--11	11	0,97183272	-0,90012167	0,7547143	-33,65566	0,17087082	-72,9779951	61,6870765	39,6894219	61,6826799	39,6840627	0,0043966	0,00535913	2.82
11--12	12	0,97170263	-0,90510993	0,63187612	-23,7887996	0	0	56,5726799	23,8840627	56,5671857	23,8759408	0,00549419	0,00812196	2.83
12--13	13	0,96999798	-0,98567961	0,63187612	-23,7887996	0	0	56,5671857	23,8759408	56,5014099	23,7546262	0,0657758	0,12131458	3.00
13--14	14	0,96972893	-0,99407231	0,63187612	-23,7887996	0,1517841	3,17474657	56,5014099	23,7546262	56,4892164	23,7397632	0,01219353	0,01486301	3.03
14--15	15	0,96878021	-1,01443994	0,50133804	-31,6791425	0	0	41,8092164	24,8097632	41,7771212	24,7706415	0,03209521	0,03912169	3.13
15--16	16	0,96828284	-1,02513484	0,50133804	-31,6791425	0,06565316	-56,8601132	41,7771212	24,7706415	41,7602933	24,7501296	0,01682784	0,0205119	3.18
16--17	17	0,96770209	-1,04015637	0,44280598	-28,0622873	0,07419991	-1,59873263	38,1902933	19,4901296	38,1724934	19,4684328	0,01779994	0,02169681	3.24
17--18	18	0,96746524	-1,04487488	0,37783052	-33,082913	0,00751143	-56,6987775	30,9924934	19,3984328	30,9865048	19,3911331	0,00598864	0,00729971	3.26
18--19	19	0,9666796	-1,06096537	0,37096036	-32,6181446	0,19228048	-32,3736308	30,5765048	18,7911331	30,5569464	18,7672929	0,01955837	0,02384021	3.34
19--20	20	0,96633058	-1,06801615	0,17868352	-32,8812649	0	0	14,6769464	9,10729288	14,6727675	9,10219915	0,00417886	0,00509372	3.37
20--21	21	0,96616862	-1,06820736	0,17868352	-32,8812649	0,10095715	-32,8681186	14,6727675	9,10219915	14,6703387	9,10062462	0,00242887	0,00157454	3.39
21--22	22	0,96609243	-1,07078493	0,07772637	-32,8983403	0,05871157	-32,883434	6,38033866	3,96062462	6,38001372	3,9600253	0,00032495	0,00059932	3.40
22--23	23	0,96618587	-1,07260772	0,01901481	-32,9443661	0,01901481	-32,9443661	1,56001372	0,9700253	1,56019546	0,97006948	-0,00018174	-4,4184E-05	3.39
		error	0,0001091											
												Total	7,58368553	13,9372668
										% perdida de pot. activa	% perdida de pot. react			
										1.51	4.41			

### A.6 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE B (ALIMENTADOR) - 23 NODOS (SIMSA)

Tramo	Nodo	Vj(pu)	$\theta_j$	I(pu)	$\phi_j$	ij(pu)	$\delta_j$	Potencia Entregada		Potencia recibida		Perdida de Potencias		%reg
								Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	
0--1	1	0,99626255	-0,20630874	12,2542108	-16,0518373	0,00434289	-56,5162412	1177,40377	338,898892	1174,45079	333,344275	2,95297456	5,5546163	0.36
1--2	2	0,98785938	-0,7080319	12,250907	-16,0386558	0,13160741	-32,5031992	1174,21079	332,984275	1167,15326	319,967617	7,05752841	13,0166579	1.20
2--3	3	0,98708086	-0,75547257	12,1247535	-15,8623916	0,14185927	-32,5613406	1156,10326	313,117617	1155,45081	311,91425	0,65245605	1,20336706	1.28
3--4	4	0,9836556	-0,96702623	11,9889461	-15,6675863	0,14915312	-32,7612924	1143,55081	304,53425	1140,69535	299,267741	2,85545945	5,2665093	1.63
4--5	5	0,98133223	-1,11292507	11,8464629	-15,4555457	0,23588469	-32,5988114	1128,22535	291,537741	1126,29748	287,982052	1,92786617	3,55568877	1.87
5--6	6	0,9784151	-1,29990511	11,6212664	-15,112744	7,87825804	-4,53799515	1106,55748	275,892052	1104,15991	271,470048	2,3975757	4,42200455	2.17
6--7	7	0,97482108	-1,40884183	4,1376326	-35,5650557	0,12966145	-20,0014719	334,569907	227,930048	333,772098	226,458598	0,79780835	1,47144974	2.53
7--8	8	0,97026899	-1,54518516	4,01287621	-36,0617809	0,04124127	-33,3684367	321,792098	222,428598	320,815357	220,627131	0,97674131	1,80146742	2.99
8--9	9	0,96380931	-1,74092814	3,97168098	-36,0897378	0,19914957	-38,8854518	317,415357	218,517131	316,041846	215,983875	1,37351074	2,53325506	3.65
9--10	10	0,96337094	-1,75440431	3,77278094	-35,942222	3,02720673	-33,1743771	300,741846	204,393875	300,653104	204,230202	0,08874243	0,16367343	3.69
10--11	11	0,96327847	-1,7549247	0,76323552	-46,9842282	0,16402318	-91,7549247	51,7831038	52,2002021	51,7786073	52,1947212	0,00449644	0,00548083	3.70
11--12	12	0,96312764	-1,75833661	0,65702506	-36,8579663	0	0	51,7786073	36,3947212	51,7726671	36,3859399	0,00594024	0,00878134	3.72
12--13	13	0,96109473	-1,81860302	0,65702506	-36,8579663	0	0	51,7726671	36,3859399	51,7015513	36,2547764	0,0711158	0,13116349	3.92
13--14	14	0,96079002	-1,82367491	0,65702506	-36,8579663	0,1532309	-57,6478786	51,7015513	36,2547764	51,6883678	36,2387067	0,01318346	0,01606967	3.95
14--15	15	0,95982327	-1,84657591	0,51664206	-30,8151064	0,08722701	2,3316814	43,4183678	24,0587067	43,3842832	24,0171601	0,03408462	0,04154663	4.05
15--16	16	0,9593695	-1,85410669	0,44616584	-36,9516698	0	0	35,0342832	24,6271601	35,0209553	24,6109145	0,01332784	0,01624565	4.10
16--17	17	0,95875427	-1,86432898	0,44616584	-36,9516698	0,07597634	-54,5067525	35,0209553	24,6109145	35,0028843	24,5888871	0,01807108	0,02202731	4.16
17--18	18	0,95852019	-1,86916219	0,37442984	-33,4428114	0	0	30,5828843	18,7988871	30,5770029	18,7917182	0,00588132	0,0071689	4.18
18--19	19	0,9577272	-1,88555468	0,37442984	-33,4428114	0,19407783	-33,1982201	30,5770029	18,7917182	30,557077	18,76743	0,01992593	0,02428823	4.26
19--20	20	0,95737492	-1,89273795	0,18035569	-33,7060123	0	0	14,677077	9,10743001	14,6728196	9,10224051	0,00425744	0,0051895	4.30
20--21	21	0,95721144	-1,89293275	0,18035569	-33,7060123	0,10190187	-33,692844	14,6728196	9,10224051	14,670345	9,10063636	0,00247454	0,00160415	4.31
21--22	22	0,95713454	-1,89555879	0,07845383	-33,7231162	0,05926106	-33,7082079	6,38034503	3,96063636	6,38001397	3,96002577	0,00033106	0,00061059	4.32
22--23	23	0,95729931	-1,90179545	0,01919277	-33,7691483	0,01919277	-33,7691483	1,56001397	0,97002577	1,56038812	0,97002292	-0,00037415	2,8575E-06	4.31
		error	0,00020257									Total	21,2733788	39,2688687
										% perdida de pot. activa	% perdida de pot. react			
										1.81	11.59			

### A.7 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE C (ALIMENTADOR) - 23 NODOS (SIMSA)

Tramo	Nodo	Vj(pu)	$\theta_j$	I(pu)	$\phi_j$	ij(pu)	$\delta_j$	Potencia Entregada		Potencia recibida		Perdida de Potencias		%reg
								Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	
0--1	1	0,99730382	-0,07334729	6,91277643	-35,2570012	0	0	564,404062	399,007296	563,464352	397,239678	0,9397104	1,7676179	0.26
1--2	2	0,99119715	-0,24832513	6,91277643	-35,2570012	0,13116423	-32,0434924	563,464352	397,239678	561,217258	393,095217	2,24709363	4,14446071	0.87
2--3	3	0,99063187	-0,2646007	6,78182242	-35,3191197	0,14135076	-32,0704688	550,167258	386,245217	549,963132	385,868734	0,20412597	0,37648278	0.93
3--4	4	0,98815369	-0,33598369	6,64070364	-35,3882319	0,14847417	-32,1302498	538,063132	378,488734	537,187055	376,872929	0,87607681	1,61580535	1.18
4--5	5	0,98647809	-0,38431921	6,49247492	-35,4626974	0,21863616	-32,6375029	524,717055	369,142929	524,138	368,07494	0,57905531	1,06798931	1.34
5--6	6	0,98438473	-0,44470459	6,27411375	-35,5611081	2,18313053	-39,711601	505,898	356,56494	505,199172	355,276046	0,69882783	1,28889355	1.55
6--7	7	0,98086825	-0,55687899	4,09975471	-33,3523447	0,15004065	-35,9316308	338,819172	219,256046	338,035904	217,811414	0,78326816	1,44463233	1.91
7--8	8	0,9764681	-0,69912834	3,94987184	-33,2544004	0,04097945	-32,5223799	326,035904	209,291414	325,089593	207,546071	0,94631132	1,74534342	2.35
8--9	9	0,97022702	-0,9033818	3,90889577	-33,2620745	0,22050533	-33,070577	321,689593	205,436071	320,359164	202,982275	1,33042846	2,45379561	2.98
9--10	10	0,96980575	-0,91727154	3,68839175	-33,2735228	3,00276393	-31,8543715	302,249164	191,592275	302,164347	191,435842	0,08481687	0,15643326	3.02
10--11	11	0,96972358	-0,91831209	0,69056488	-39,4557369	0,18787062	-61,0603061	52,3843473	41,7258417	52,3806664	41,7213548	0,00368096	0,00448682	3.03
11--12	12	0,96960775	-0,92150722	0,52050965	-31,818756	0	0	43,3106664	25,9213548	43,3069382	25,9158435	0,00372819	0,00551131	3.04
12--13	13	0,96806026	-0,97576749	0,52050965	-31,818756	0	0	43,3069382	25,9158435	43,2623048	25,8335233	0,04463338	0,08232025	3.20
13--14	14	0,96782444	-0,9807914	0,52050965	-31,818756	0	0	43,2623048	25,8335233	43,2540306	25,8234377	0,00827415	0,01008557	3.22
14--15	15	0,96683849	-1,00182452	0,52050965	-31,818756	0,08666474	-56,7996932	43,2540306	25,8234377	43,2194338	25,7812667	0,03459684	0,04217099	3.32
15--16	16	0,96641272	-1,0133566	0,44346544	-27,0846516	0,06567269	3,14301155	38,5094338	18,8512667	38,4962668	18,8352171	0,013167	0,01604959	3.36
16--17	17	0,96588965	-1,0244525	0,38813287	-31,9711627	0,01037073	-32,9692053	32,1662668	19,2952171	32,152591	19,2785474	0,01367579	0,01666977	3.42
17--18	18	0,96565445	-1,02945361	0,37776375	-31,9437649	0,00747404	2,94304233	31,302591	18,7485474	31,2966045	18,7412502	0,00598653	0,00729713	3.44
18--19	19	0,96486733	-1,04560456	0,3716575	-32,6027993	0,19264163	-32,35827	30,5766045	18,7912502	30,5569725	18,7673203	0,01963195	0,0239299	3.52
19--20	20	0,96451765	-1,05268186	0,17901951	-32,8659357	0	0	14,6769725	9,10732033	14,672778	9,10220743	0,00419459	0,0051129	3.55
20--21	21	0,96435538	-1,05287378	0,17901951	-32,8659357	0,10114698	-32,8527851	14,672778	9,10220743	14,6703399	9,10062697	0,00243801	0,00158046	3.57
21--22	22	0,96427906	-1,05546106	0,07787254	-32,8830169	0,05882198	-32,8681102	6,38033994	3,96062697	6,38001377	3,96002539	0,00032617	0,00060157	3.58
22--23	23	0,96437728	-1,05736557	0,01905057	-32,9290439	0,01905057	-32,9290439	1,56001377	0,97002539	1,56020492	0,97007234	-0,00019115	-4,695E-05	3.57
		error	0,00011407									Total	8,84385716	16,2772235
										% perdida de pot. activa	% perdida de pot. react			
										1.57	4.08			

#### Perdidas Alimentador

% Activa	1.68
% Reactiva	6.59

### A.8 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE A (ALIMENTADOR ACHACACHI)

$$V_b = 6,9 \text{ (KV)}$$

$$S_b = 5000 \text{ (KVA)}$$

Tramo	Nodo							Potencia Entregada		Potencia recibida		Perdida de Potencias		%reg
		Vj(pu)	$\theta_j$	I(pu)	$\phi_j$	ij(pu)	$\delta_j$	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	
0--1	1	0,9930862	-0,23658869	0,0846912	-29,9420975	0,00345334	-35,2149221	366,875108	211,343404	365,264114	208,38952	1,61099333	2,95388395	0.68
1--2	2	0,98681097	-0,46375475	0,08125309	-29,7183123	0,00465647	-42,5529169	351,214114	198,55952	349,77435	195,919599	1,43976379	2,63992101	1.31
2--3	3	0,98488776	-0,53619427	0,07671994	-28,9457995	0,00081258	-32,3594458	332,72435	180,519599	332,303421	179,747791	0,42092947	0,77180755	1.50
3--4	4	0,98264775	-0,62111776	0,07590881	-28,909279	0,00682074	-39,4678349	328,903421	177,637791	328,417704	176,747191	0,48571688	0,89060038	1.73
4--5	5	0,98182155	-0,65381615	0,06921484	-27,874614	0,00254369	-26,4801375	302,317704	155,727191	302,152265	155,423844	0,16543953	0,30334649	1.81
5--6	6	0,97993532	-0,72857092	0,06667193	-27,9278112	0,00162845	-26,5870956	290,912265	149,983844	290,548442	149,316746	0,36382264	0,66709764	2.00
6--7	7	0,97766852	-0,81876466	0,06504394	-27,9613746	0,00236144	-26,6512867	283,368442	145,836746	282,941642	145,054174	0,42680025	0,78257209	2.23
7--8	8	0,97730346	-0,83331107	0,06268314	-28,0107248	0,0026488	-26,6658715	272,551642	140,024174	272,4854	139,902715	0,06624152	0,12145907	2.27
8--9	9	0,97602295	-0,88432799	0,0600351	-28,0700555	0,00172114	-26,7172046	260,8354	134,262715	260,612929	133,854797	0,222471	0,40791821	2.40
9--10	10	0,97528872	-0,91361093	0,05831445	-28,1099809	0,00022378	-27,0090351	253,052929	130,194797	252,929023	129,967605	0,12390656	0,2271925	2.47
10--11	11	0,97508679	-0,92167236	0,05809072	-28,1142217	0,00272361	-26,7727343	251,949023	129,487605	251,915072	129,425353	0,03395098	0,06225181	2.49
11--12	12	0,97224655	-1,03521893	0,05536789	-28,1802051	0,00642318	-32,826646	239,965072	123,635353	239,509931	122,800816	0,45514065	0,83453645	2.78
12--13	13	0,96507987	-1,07730141	0,04896858	-27,5713905	0,00242468	-26,9196231	212,969931	106,350816	211,477554	105,41158	1,49237714	0,93923661	3.50
13--14	14	0,96026984	-1,10572797	0,04654407	-27,6053431	0,00807243	-26,9567676	200,947554	100,31158	199,995513	99,7124068	0,9520412	0,59917291	3.98
14--15	15	0,95804487	-1,11480286	0,03847226	-27,7414274	0,01146548	-26,9566965	165,115513	82,8124068	164,746019	82,5944354	0,36949379	0,21797144	4.20
15--16	16	0,95584669	-1,1268519	0,02700832	-28,07455	0,00717023	-26,9740609	115,316019	58,6544354	115,063736	58,4956598	0,25228254	0,15877555	4.42
16--17	17	0,95572115	-1,12748902	0,01983989	-28,4722506	0,0025998	-31,1183471	84,2237363	43,5556598	84,2131593	43,5490032	0,01057693	0,00665665	4.43
17--18	18	0,95521407	-1,14835424	0,01724328	-28,073432	0,00946364	-26,9877506	73,4531593	37,3390032	73,4277726	37,2924546	0,02538671	0,04654855	4.48
18--19	19	0,95498907	-1,15717091	0,0077834	-29,3935231	0,00314409	-32,9521914	32,7477726	17,5924546	32,7427648	17,5832724	0,00500783	0,00918225	4.51
19--20	20	0,9548628	-1,16054033	0,00464947	-26,9879029	0,00212931	-26,9946247	19,9827648	9,67327239	19,9806915	9,67081841	0,00207334	0,00245398	4.52
20--21	21	0,95492992	-1,16514224	0,00252016	-26,9822235	0,00252016	-26,9822235	10,8306915	5,24081841	10,8318737	5,24031683	-0,00118227	0,00050158	4.51
		error	0,00015081							Total	8,92323381	12,6430867		
										% perdida de pot. activa	% perdida de pot. react			
										2.43	5.98			



### A.9 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE B (ALIMENTADOR ACHACACHI)

Tramo	Nodo	Vj(pu)	$\theta_j$	I(pu)	$\phi_j$	ij(pu)	$\delta_j$	Potencia Entregada		Potencia recibida		Perdida de Potencias		%reg
								Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	
0--1	1	0,99393328	-0,20949405	0,07462854	-29,937617	0,00451869	-26,0556755	323,31783	186,206947	322,066917	183,913299	1,25091289	2,29364792	0.60
1--2	2	0,98848767	-0,40247417	0,07012089	-30,1875841	0,00256901	-36,4962005	301,856917	174,123299	300,784642	172,157197	1,07227535	1,96610183	1.14
2--3	3	0,98677369	-0,46431302	0,06756803	-29,9482075	0,00474492	-42,3823981	290,524642	164,677197	290,198148	164,078545	0,32649411	0,59865283	1.32
3--4	4	0,98491234	-0,53422727	0,0629427	-29,0181586	0,00076241	-32,3616738	272,778148	148,438545	272,444192	147,826209	0,3339562	0,61233516	1.50
4--5	5	0,98415978	-0,56262971	0,0621816	-28,977187	0,00592648	-40,4713366	269,254192	145,846209	269,120666	145,60138	0,13352564	0,24482983	1.58
5--6	6	0,98256556	-0,62577935	0,05638635	-27,7770954	0,00197187	-26,4502061	246,750666	126,89138	246,490439	126,414234	0,26022651	0,47714593	1.74
6--7	7	0,98066976	-0,70106811	0,05441503	-27,8251744	0,00253389	-26,5649101	237,770439	122,194234	237,47173	121,646527	0,29870927	0,54770713	1.93
7--8	8	0,98036763	-0,71307225	0,05188178	-27,8867202	0,00258212	-26,5695545	226,29173	116,226527	226,246351	116,14332	0,04537938	0,0832067	1.96
8--9	9	0,97931595	-0,75481978	0,04930039	-27,9557009	4,5894E-05	-33,0304641	214,856351	110,62332	214,706326	110,348237	0,15002499	0,27508271	2.07
9--10	10	0,97869599	-0,77948588	0,04925467	-27,9509786	0,00211585	-26,6020847	214,516326	110,228237	214,427929	110,066155	0,08839685	0,16208263	2.13
10--11	11	0,97853207	-0,78599927	0,04713944	-28,011518	0,00409709	-26,63521	205,107929	105,556155	205,085572	105,515162	0,0223567	0,04099277	2.15
11--12	12	0,97632113	-0,87368142	0,04304364	-28,1425089	0,01003315	-29,5999107	187,045572	96,7751618	186,770499	96,2707939	0,27507284	0,50436786	2.37
12--13	13	0,97148691	-0,90042466	0,03301472	-27,6996487	0,00635962	-26,7521151	143,820499	72,7307939	143,142142	72,3038654	0,67835774	0,42692856	2.85
13--14	14	0,96872987	-0,91514802	0,02665618	-27,9257011	0,00898534	-26,7560182	115,342142	58,8338654	115,029877	58,6373397	0,31226463	0,19652564	3.13
14--15	15	0,96770671	-0,91825072	0,01767366	-28,5203406	0,00588763	-27,528275	75,859877	39,6673397	75,7819003	39,6213398	0,07797667	0,04599992	3.23
15--16	16	0,96674579	-0,92231992	0,01178735	-29,0158464	0,00264163	-26,7850062	50,3119003	26,8613398	50,2638469	26,8310971	0,04805343	0,03024272	3.33
16--17	17	0,9666878	-0,92252694	0,0091483	-29,6598655	8,0926E-05	-33,3937192	38,7738469	21,2610971	38,771598	21,2596818	0,00224886	0,00141533	3.33
17--18	18	0,96641565	-0,93288176	0,00906755	-29,6265651	0,00398741	-26,7797783	38,441598	21,0496818	38,4345778	21,0368097	0,00702016	0,01287201	3.36
18--19	19	0,9662642	-0,93816505	0,00508892	-31,8568044	4,8276E-05	-31,9019216	21,0945778	12,6368097	21,0924371	12,6328845	0,00214073	0,00392519	3.38
19--20	20	0,96612245	-0,94104124	0,00504064	-31,8563723	0,00499413	-31,8437018	20,8924371	12,5128845	20,8900002	12,5100003	0,00243689	0,00288427	3.39
20--21	21	0,96622194	-0,94212544	4,652E-05	-33,2167136	4,652E-05	-33,2167136	0,19000024	0,12000028	0,19002207	0,12000904	-2,1836E-05	-8,7613E-06	3.38
		error	0,00010254									Total	5,387808	8,52693819
										% perdida de pot. activa	% perdida de pot. react			
										1.67	4.58			



### A.10 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL FASE C (ALIMENTADOR ACHACACHI)

Tramo	Nodo	Vj(pu)	$\theta_j$	Ij(pu)	$\phi_j$	ij(pu)	$\delta_j$	Potencia Entregada		Potencia recibida		Perdida de Potencias		%reg
								Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	Pj(KW)	Qj(KVAR)	
0--1	1	0,99277591	-0,25085321	0,08893407	-29,6488122	0,00431081	-32,0320157	386,388496	219,956964	384,612044	216,699699	1,77645215	3,25726579	0.71
1--2	2	0,98625517	-0,48894541	0,08462718	-29,5274495	0,00185575	-38,298034	366,422044	205,429699	364,860223	202,565976	1,56182087	2,86372235	1.36
2--3	3	0,98417133	-0,56641426	0,08279361	-29,3316303	0,00435419	-43,4103259	357,630223	196,955976	357,140008	196,057128	0,4902149	0,89884787	1.57
3--4	4	0,9818627	-0,65528986	0,07857735	-28,5592934	0,00062119	-32,5212676	341,430008	181,487128	340,909541	180,53281	0,52046737	0,95431817	1.81
4--5	5	0,98092538	-0,69156271	0,07795765	-28,5277483	0,00525792	-41,6663892	338,319541	178,92281	338,109667	178,53799	0,20987384	0,38482032	1.90
5--6	6	0,97887381	-0,77412409	0,07284717	-27,5876815	0,00291503	-26,6207705	318,639667	161,62799	318,205328	160,831595	0,43433913	0,79639521	2.11
6--7	7	0,97644777	-0,87216214	0,06993257	-27,6279837	0,00240561	-26,7172357	305,365328	154,611595	304,871961	153,706967	0,49336689	0,90462729	2.35
7--8	8	0,9760564	-0,888015	0,06752728	-27,6604271	0,00089261	-26,7471991	294,301961	148,586967	294,225085	148,44601	0,07687538	0,1409571	2.39
8--9	9	0,97464283	-0,94537811	0,06663478	-27,6726598	0,00351597	-26,7925871	290,305085	146,54601	290,031013	146,043477	0,27407215	0,50253301	2.54
9--10	10	0,97385237	-0,97748635	0,06311924	-27,7216812	0,00402494	-26,8103629	274,611013	138,573477	274,465847	138,307304	0,14516619	0,26617372	2.62
10--11	11	0,97364792	-0,98578224	0,05909484	-27,7837483	0,00921679	-29,1957283	256,825847	129,767304	256,790712	129,702881	0,03513484	0,06442252	2.64
11--12	12	0,97111107	-1,0900909	0,04988137	-27,5228764	0,00692028	-26,9383149	217,250712	108,492881	216,881304	107,815542	0,36940818	0,67733918	2.89
12--13	13	0,96482361	-1,12708097	0,04296151	-27,6170364	0,00861843	-26,9648797	186,641304	93,1655419	185,492614	92,4426071	1,14868965	0,7229348	3.52
13--14	14	0,96127362	-1,14757068	0,03434378	-27,7806892	0,00879169	-26,9910049	148,072614	74,3226071	147,554264	73,9963802	0,51835023	0,32622687	3.88
14--15	15	0,95979534	-1,1531728	0,02555321	-28,0523757	0,00473253	-26,9961413	109,524264	55,5763802	109,361258	55,4802201	0,16300566	0,09616015	4.03
15--16	16	0,9581002	-1,16212242	0,02082167	-28,2924331	0,00273644	-26,9843835	88,9212584	45,5802201	88,7713164	45,4858532	0,14994194	0,09436687	4.20
16--17	17	0,95798576	-1,1627039	0,01808605	-28,4903259	0,00401037	-26,994089	76,9713164	39,7758532	76,9625269	39,7703215	0,00878958	0,00553178	4.21
17--18	18	0,95756781	-1,17934543	0,01407743	-28,9165287	0,00704805	-27,0230167	59,6725269	31,4003215	59,6556063	31,3692963	0,01692052	0,03102511	4.25
18--19	19	0,95736122	-1,18699959	0,00703708	-30,8129937	0,00415782	-32,9604668	29,2856063	16,6592963	29,2815128	16,6517906	0,00409351	0,00750578	4.27
19--20	20	0,95728241	-1,18902848	0,00288639	-27,7187957	0,00032754	-33,1556722	12,3615128	6,17179057	12,3607138	6,17084482	0,00079905	0,00094575	4.28
20--21	21	0,9573424	-1,19354556	0,00256051	-27,0243399	0,00256051	-27,0243399	11,0307138	5,34084482	11,0318261	5,34030982	-0,00111234	0,000535	4.27
		error	0,00014468									Total	8,3966697	12,9966546
										% perdida de pot. activa		% perdida de pot. react		
										2.17		5.91		

#### Perdidas Alimentador

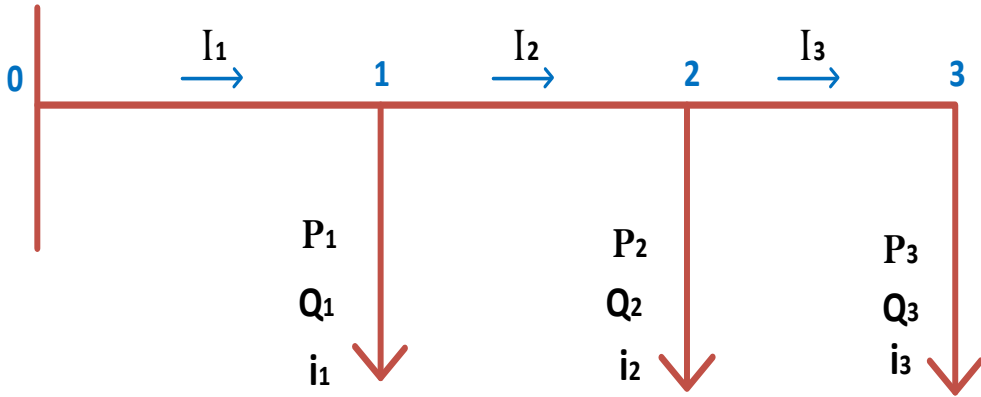
% Activa	2.11
% Reactiva	5.53

**ANEXO B  
GRÁFICOS**

**ÍNDICE**

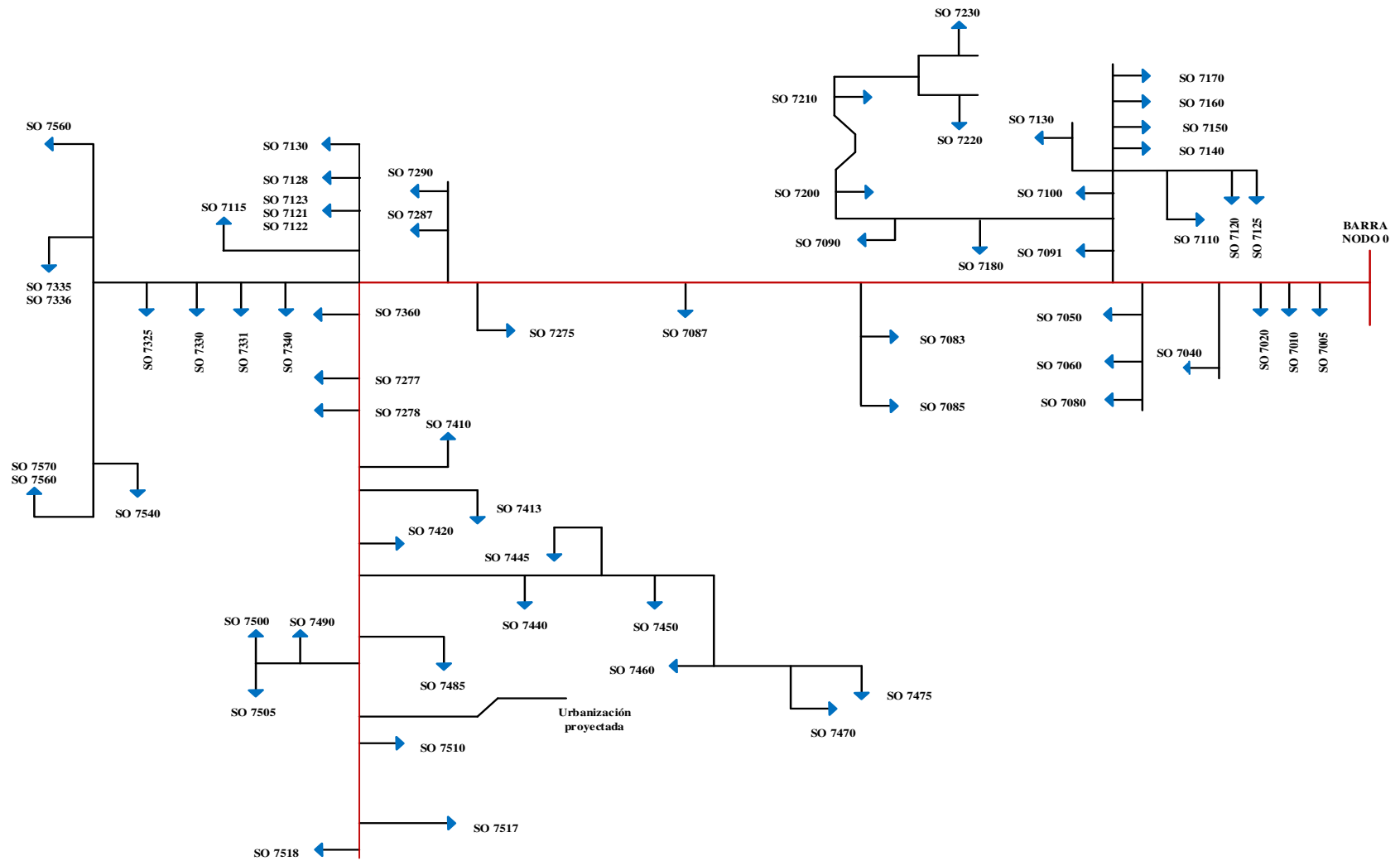
	Página
B.1 Sistema de Distribución Radial Alimentador	2
B.2 Sistema de Distribución Radial Alimentador SIMSA - 23 Nodos	3-4
B.3 Sistema de Distribución Radial Alimentador Achacachi	5-6

B.1 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL ALIMENTADOR



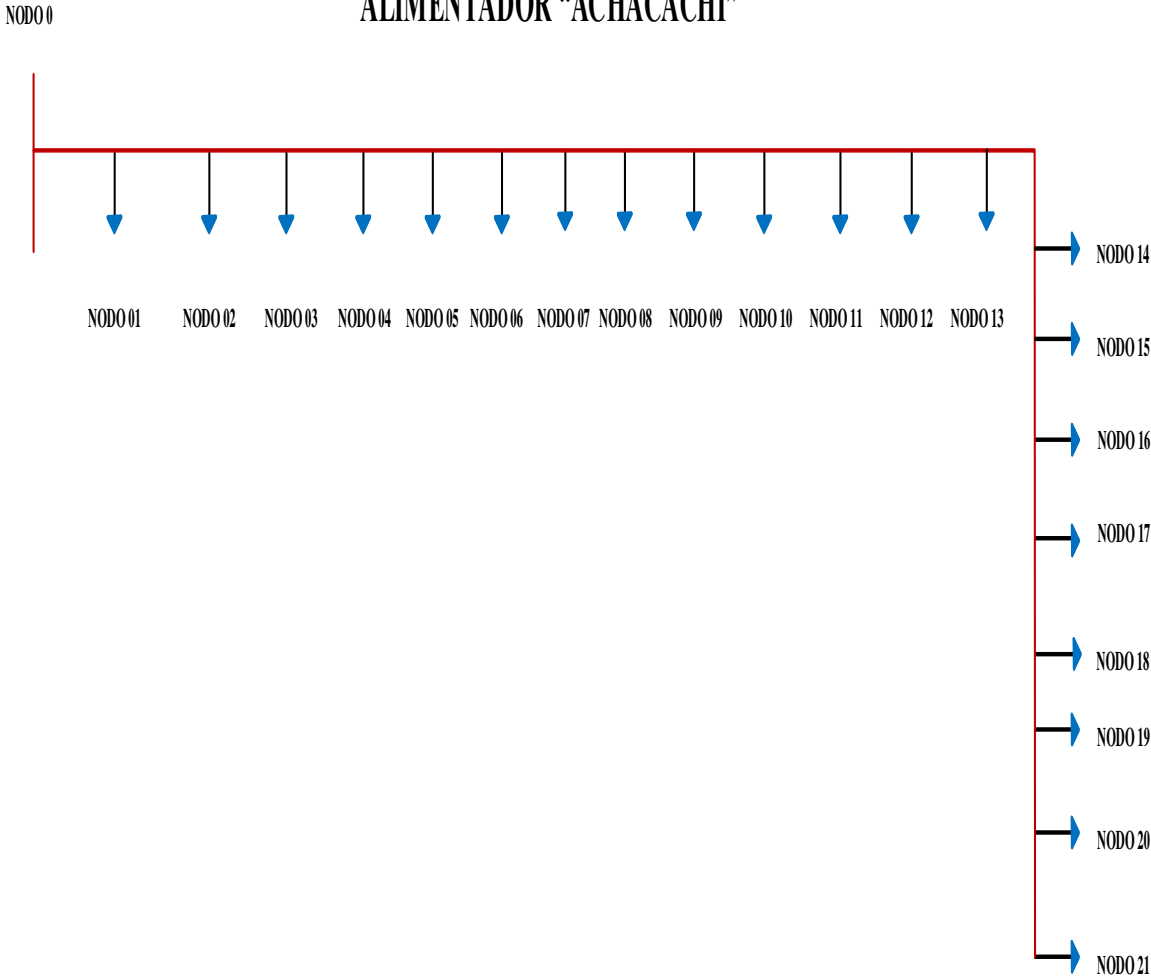


## DIAGRAMA UNIFILAR “SIMSA”

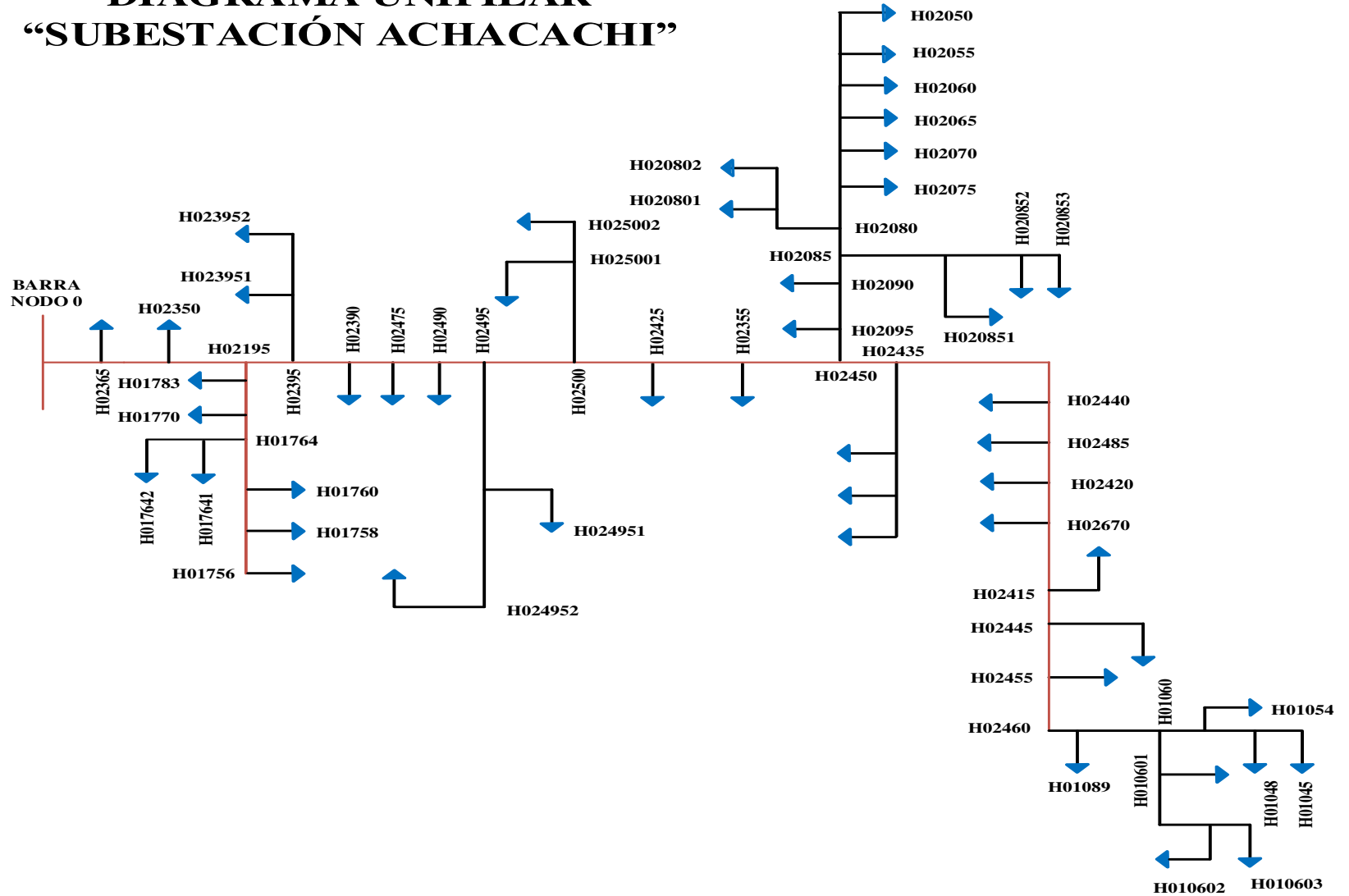


B.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL ALIMENTADOR ACHACACHI

DIAGRAMA UNIFILAR  
SIMPLIFICADO  
ALIMENTADOR "ACHACACHI"



# DIAGRAMA UNIFILAR “SUBESTACIÓN ACHACACHI”



## BIBLIOGRAFÍA

- (1). Khan A.H., Broadwater R.P., Chandrasenkaran A., A Comparative Study Of Three Radial Power Flow Methods. Proceedings of the IASTED International Symposium Technology in the Power Industry, Arizona Marzo de 1988.
- (2). Venpati N., Shoults R.. R., Chen M.S., Schwobel L., Simplified Feeder Modeling for Load flow Journal, 1988.
- (3). Gonen T., Análisis y Operación de Sistemas de Distribución Eléctrica, 1987.
- (4). Estudio y Análisis de Sistemas de Distribución, Gervacio García Apaza, Docente Titular de la carrera de Ingeniería Eléctrica, 2000.
- (5). Gabriel Estada Soria. Metodología Técnica – Económica de localización de Capacitores en Sistema de Distribución para la Reducción de Pérdidas Eléctricas, Instituto Técnico de Morelia, 2003.
- (6). Líneas de Transmisión y Redes de Distribución de Potencia Eléctrica, Vol. II, Enríquez Harper, Limusa, 1980 1ª. Ed.
- (7). Sistema de Distribución; Roberto Espinoza y Lara Ed. Limusa, México 1990.
- (8). Redes Eléctricas en Régimen Permanente Equilibrado, Viqueira Landa Jacinto, Segunda Edición México D.F., 1972.
- (9). IEEE Standard 399-1977, Industrial and Commercial Power System Analysis, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1977.
- (10). Shirmohamnadi D., Compensation Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, N°2, Mayo 1988, pag. 753-756.
- (11). El control de tensión en Redes de Distribución con Generación Distribuida, David Trebolle Treboll, Vol I, 2001.