



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética

Trabajo de Diploma

Manual de Usuario del *software RADIAL 10.0*

Autor: Alejandro Padrón González

Tutores: Dr. Leonardo Casas Fernández

MSc. Yandi Gallego Landera

Lic. Maricel Meneses Gómez

Santa Clara

2013-2014



Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica



Trabajo de Diploma

Título: Manual de Usuario del *software* **RADIAL 10.0**

Autor:

Alejandro Padrón González.

apadron@uclv.edu.cu

Tutores:

Dr. Leonardo Casas Fernández

lcasas@uclv.edu.cu

MSc. Yandi Gallego Landera

gallego@uclv.edu.cu

Lic. Maricel Meneses Gómez.

mmenese@uclv.edu.cu

Santa Clara, Cuba

2013-2014

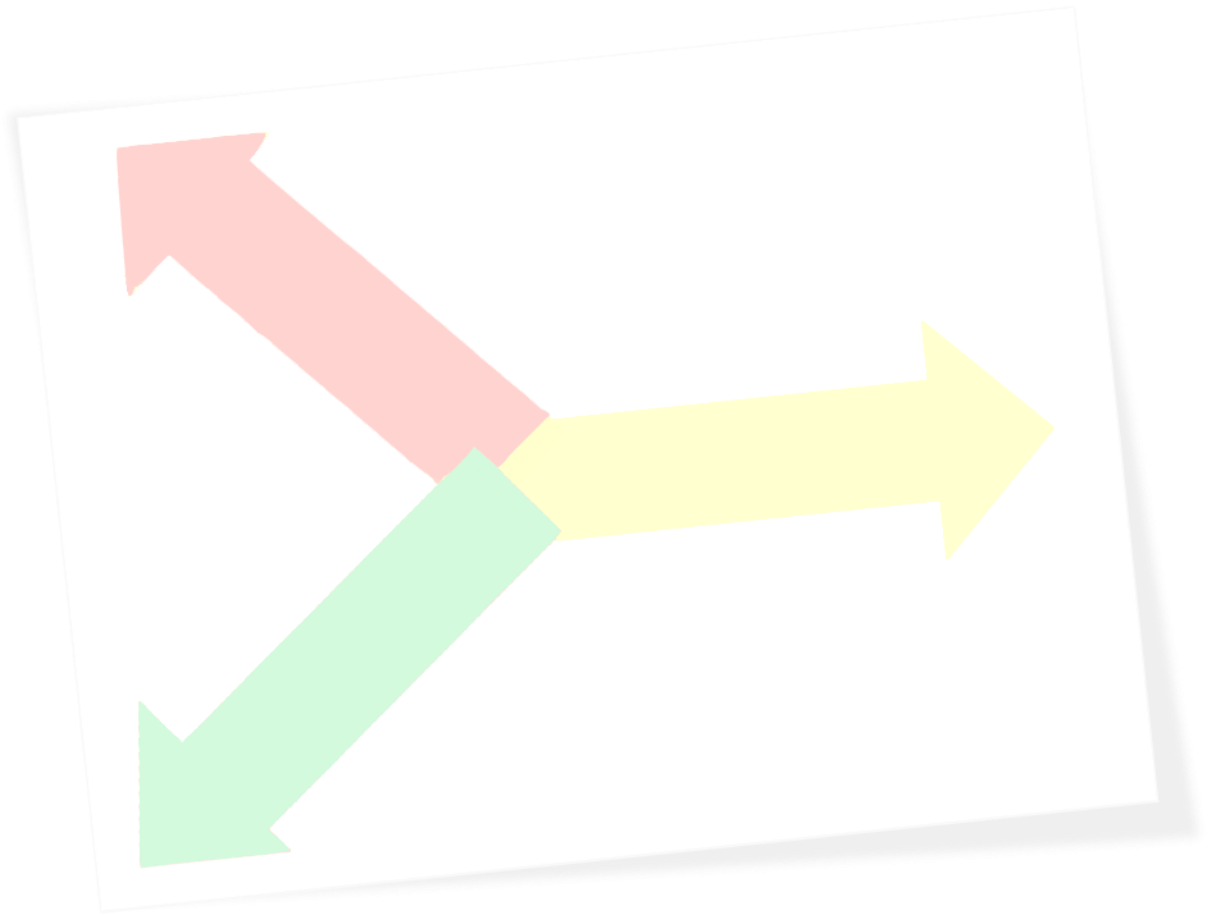
Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

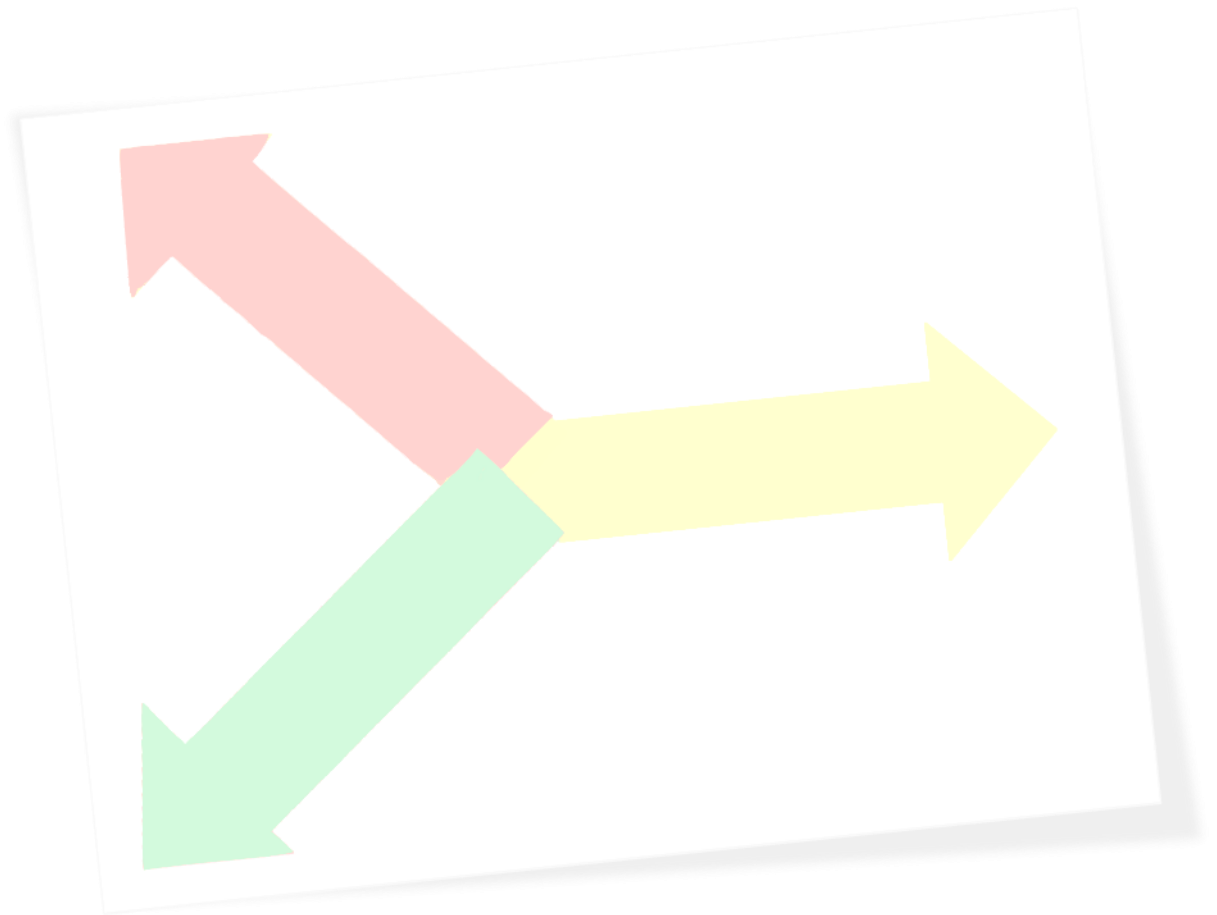
Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo



PENSAMIENTO

“Actuar es fácil, pensar es difícil; actuar según se piensa es aún más difícil.”

Goethe



DEDICATORIA

A mis padres y mi hermana por apoyarme y quererme en cada
momento.

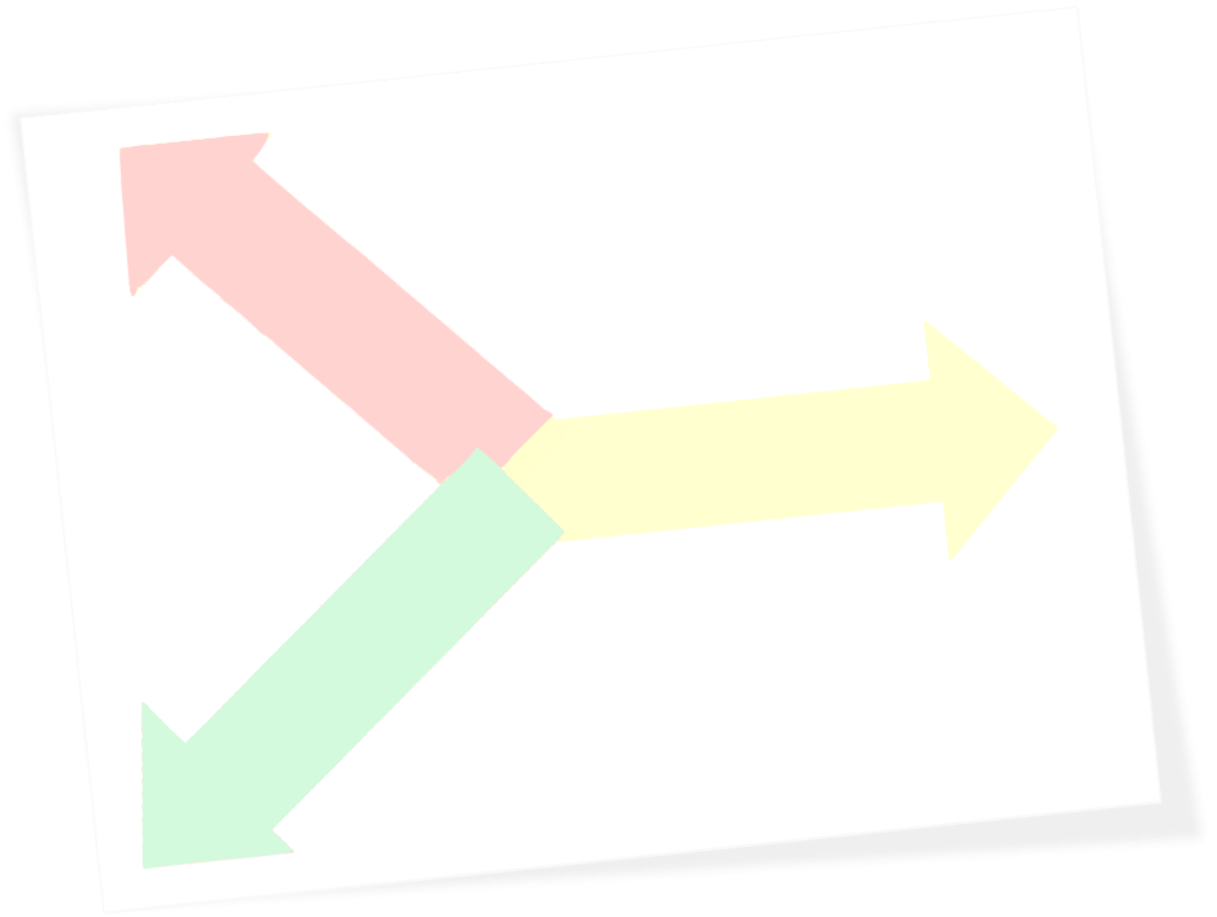
A mi sobrinita Liz Kamila, para quien deseo ser un ejemplo a seguir.

A todos mis tíos, primos y abuelos.

A mis amigos del barrio.

A mi novia Maricel por ayudarme y quererme.

A mis suegros y mi cuñada por brindarme su ayuda.



AGRADECMIENTOS

A toda mi familia en especial a mis padres y mi hermana por ser
mi punto de apoyo incondicional.

A mi novia Maricel, por su paciencia y por estar siempre a mi
lado.

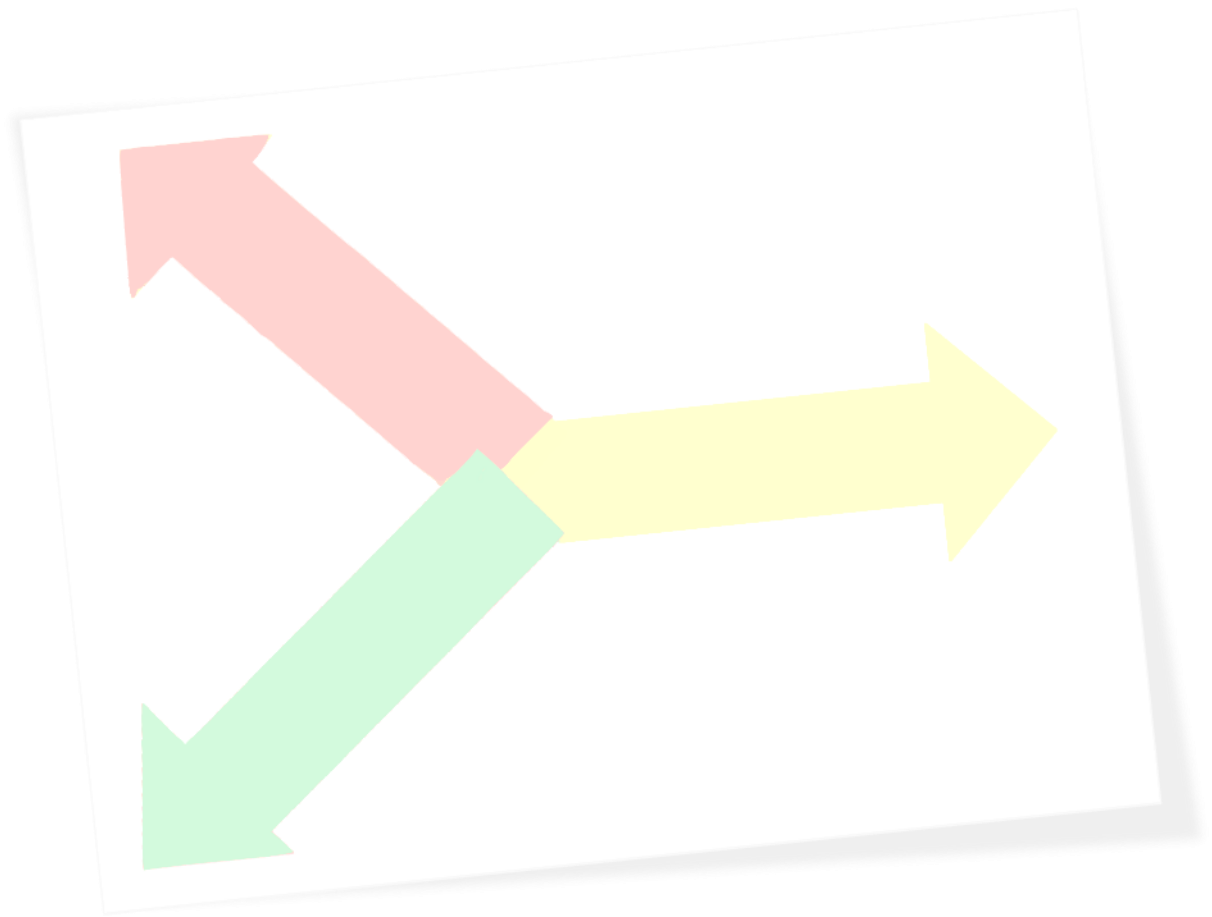
A mis suegros y a mi cuñada por su asistencia.

A mis amigos José Carlos, Reinier y Dayan por su amistad.

A todos mis profesores, en especial a mis tutores por sus
valiosas ideas.

A todas las personas que de una forma u otra me han ayudado
durante estos cinco años.

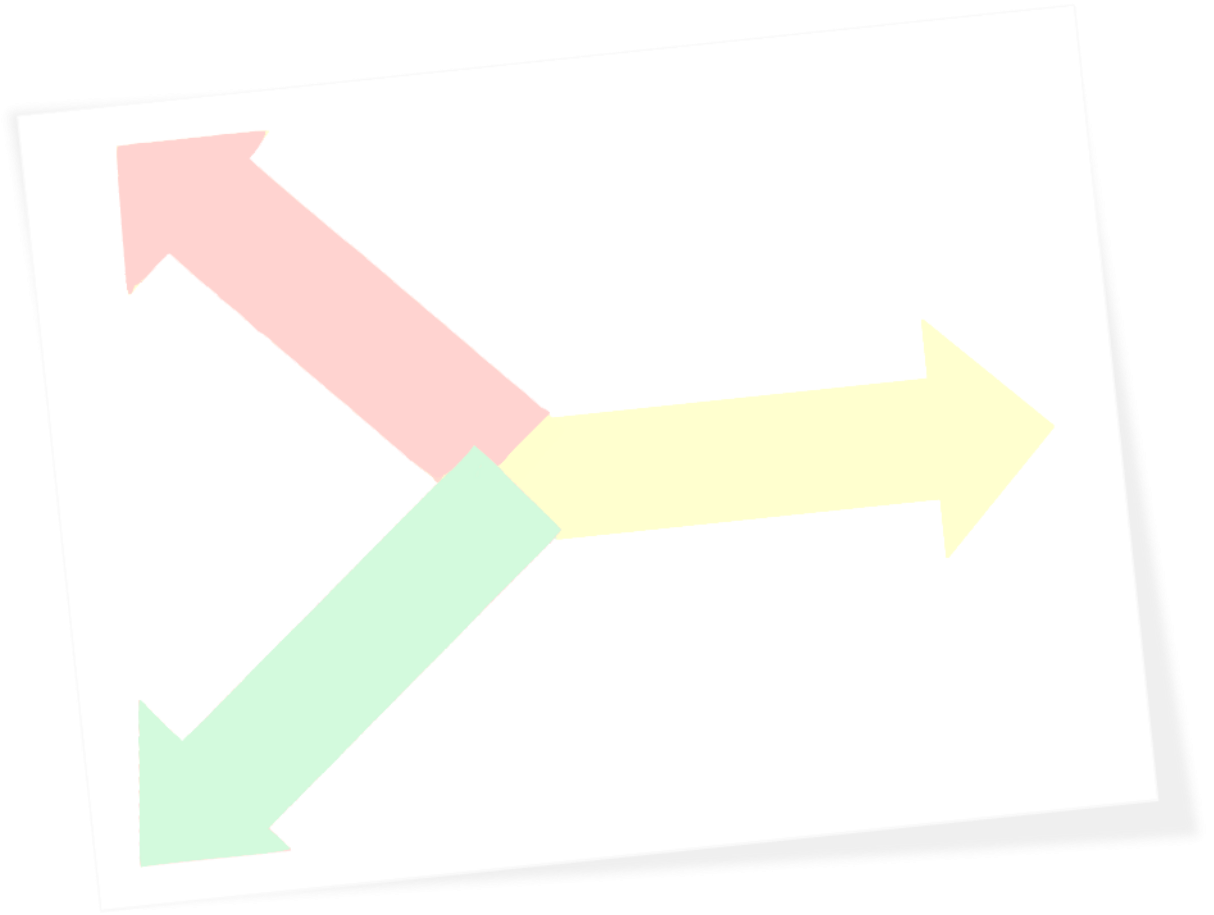
A todos, muchas gracias.



RESUMEN

RESUMEN

El impetuoso desarrollo que ha caracterizado a las últimas décadas ha estado sustentado por un portentoso uso de la energía, base fundamental para cualquier actividad humana. Dentro de este gran impulso, ocupa un lugar determinante la expansión de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), cuya complejidad ha crecido vertiginosamente y se desarrolla a partir de las posibilidades y avances que brinda la computación. Aprovechando este desarrollo tecnológico, se han creado *softwares* especializados para su análisis, donde se valoran prácticamente todas las características técnicas de los mismos. En el caso de la distribución estos resultan imprescindibles, puesto que la realización de los estudios requiere del análisis de un gran volumen de variantes que, por métodos tradicionales, no sería posible desarrollar debido a su complicación. **RADIAL** es un *software* que se utiliza para el estudio de los circuitos radiales de distribución; permite a los usuarios la realización de varias tareas en el cálculo de los flujos de cargas, trabajo con capacitores, selección y coordinación de protecciones y balanceo de carga, etc. El objetivo de este trabajo es proporcionar la información básica en forma de un Manual de Usuario o Ayuda incorporada al *software*, para facilitar su explotación de una forma concreta y eficiente.



ÍNDICE

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA. REDES DE DISTRIBUCIÓN	4
1.1 Generación de energía eléctrica.....	5
1.2 Sistema de transmisión	6
1.3 Sistema de distribución.....	6
1.3.1 Importancia de las redes de distribución.....	7
1.3.2 Componentes de un sistema de distribución.....	8
1.3.3 Tipos de circuitos	9
1.3.3.1 Circuitos radiales	9
1.3.3.2 Circuitos en lazo	11
1.3.3.3 Circuitos en malla	11
1.3.4 Principales elementos de los circuitos de distribución	12
1.3.5 Análisis de los circuitos de distribución	13
1.4 Consideraciones finales del capítulo.....	15
CAPÍTULO 2: PRINCIPALES CÁLCULOS RELACIONADOS CON LOS CIRCUITOS RADIALES DE DISTRIBUCIÓN PRIMARIA. EL <i>SOFTWARE RADIAL</i>	16
2.1 Métodos de cálculos.....	16
2.1.1 Métodos tradicionales: método de los nodos	16
2.1.2 Métodos de cálculo de flujo de potencia en sistemas radiales ..	17
2.2 Flujos de carga monofásico y trifásico.....	17

2.2.1	Flujo de carga monofásico	17
2.2.2	Flujo de carga trifásico	19
2.3	Efecto de los gráficos de carga.....	21
2.4	Valoración de la cogeneración y la generación distribuida sobre los circuitos.....	22
2.5	El estado de carga de los transformadores de distribución para determinar si los mismos están sobre o subcargados para los diferentes tipos de banco.....	23
2.6	Comportamiento de los circuitos para diferentes estados de carga y para distintas tensiones de operación de la subestación	24
2.7	Análisis técnico económico de los calibres de los conductores de las líneas.....	25
2.8	Valoración de los capacitores.....	26
2.8.1	Ubicación óptima para máxima reducción de pérdidas de potencia y/o energía en las líneas.....	27
2.8.2	Selección óptima para máxima reducción de pérdidas de potencia y/o energía en las líneas	28
2.8.2.1	En el caso de los bancos fijos.....	28
2.8.2.2	En el caso de los bancos controlados.....	28
2.8.2.3	Efecto sobre la tensión en los diferentes nodos de los circuitos a diferentes horas del día.....	28
2.9	Selección y ajuste de los dispositivos de protección.	29
2.10	Consideraciones finales del capítulo.....	29
CAPÍTULO 3: MANUAL DE USUARIO DEL <i>RADIAL</i> 10.0		31

3.1	Manual de Usuario.....	31
3.2	Información de entrada.....	32
3.3	Herramientas de <i>RADIAL</i>	33
3.3.1	Ventana de <i>RADIAL</i>	33
3.3.1.1	Barra de Tarea.....	33
3.3.1.2	Barra Estándar.....	34
3.3.1.3	Barra de Estudios	34
3.3.1.4	Barra de Elementos	34
3.3.2	Información mínima necesaria para cualquier análisis que se quiera realizar con este <i>software</i>	34
3.3.3	Introducción de datos a los elementos del monolineal	35
3.4	Descripción de la Barra de Tareas	35
3.5	Resultados de los estudios que realiza <i>RADIAL</i> 10.0.....	41
3.5.1	Flujo de Carga Monofásico	41
3.5.2	Flujo de Carga Trifásico	42
3.5.3	Estudio de Capacitores	42
3.5.4	Estudio de Cargabilidad de los Transformadores	43
3.5.5	Estudio del Análisis de las Corrientes de Fallas.....	43
3.5.6	Estudio de Selección y Coordinación de dispositivos de protección.....	44
3.5.7	Cambio del calibre de los Conductores.....	44
3.6	Consideraciones finales del capítulo.....	45
	CONCLUSIONES	47

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Representación global de un SEP 5

Figura 1.2 Ubicación de sistemas de distribución dentro de un sistema de potencia 7

Figura 1.3 Circuito radial típico..... 10

Figura 1.4 Circuito en lazo 11

Figura 1.5 Circuito de distribución en malla 12

Figura 2.1 a) Datos de un circuito radial b) Diagrama fasorial 17

Figura 2.2 Diagrama fasorial de los voltajes en una línea asimétrica con corrientes desbalanceadas y simétricas balanceada (en trazos discontinuos) 20

Figura 2.3 Gráfico de carga 22

Figura 2.4 Gastos actualizados para una misma fecha de tres calibres consecutivos $j-1$, j y $j+1$ 26

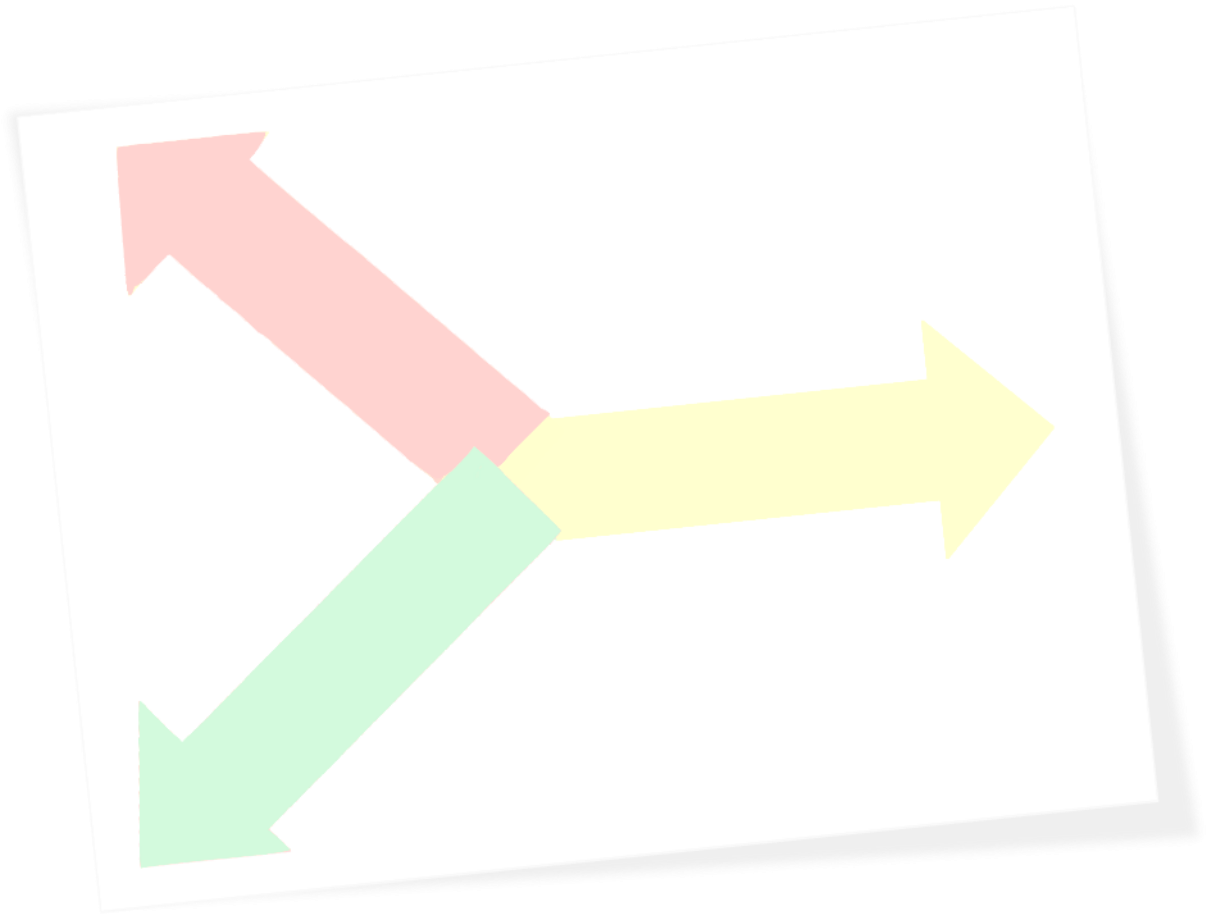
Figura 2.5 Variación de la potencia reactiva durante el día en un circuito radial 27

Figura 3.1 Ventana Principal de *RADIAL* 10.0 32

Figura 3.2 Barras de Herramientas 33

Figura 3.3 Ventana del Monolineal..... 35

Figura 3.4 Opciones del menú Archivos	36
Figura 3.5 Opciones del menú Edición	36
Figura 3.6 Opciones del menú Ver.....	37
Figura 3.7 Opciones del menú Bibliotecas	37
Figura 3.8 Ventana de Análisis	38
Figura 3.9 Cambio de los conductores, elegir la Estructura y división de los circuitos.....	38
Figura 3.10 Opciones del menú Reportes.....	39
Figura 3.11 Ventana de Opciones.....	40
Figura 3.12 Opciones del menú Ventanas	40
Figura 3.13 Ayuda del <i>RADIAL</i> 10.0	40
Figura 3.14 Resultado del estudio de Flujo de Carga Monofásico	41
Figura 3.15 Resultado del estudio de Flujo de Carga Trifásico.....	42
Figura 3.16 Resultado del estudio de la Ubicación de Capacitores	42
Figura 3.17 Resultado del estudio de la Cargabilidad de los Transformadores	43
Figura 3. 18 Resultado del estudio del Análisis de las Corrientes de Fallas .	43
Figura 3.19 Resultado del estudio de la Selección y Coordinación de los dispositivos de Protección.....	44
Figura 3.20 Cambio del calibre de los Conductores.....	44



INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Antes de la aparición de todas las herramientas que existen en la actualidad, para el análisis de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), los problemas se resolvían por medio de la modelación física en analizadores de redes, pues simulaban el sistema real a escala, pero tenían muchas limitaciones.

El suministro de energía en un SEP, debe ser a un costo e impacto ecológico mínimo, para ser capaz de cumplimentar la demanda, continuamente cambiante, de la potencia activa y reactiva.

Actualmente, la solución de problemas relacionados con el análisis de los SEP, requiere como elemento básico la computadora digital (modelación matemática), por las grandes ventajas que presenta respecto a los analizadores de redes. Esta tecnología, abrió el camino para el desarrollo sin precedentes en el estudio de los mismos y con ello, la disponibilidad de un suministro más confiable y económico de energía eléctrica, con un control más ajustado de la frecuencia del sistema y de los niveles de voltajes.

En los análisis de los SEP es común tener que resolver grandes sistemas de ecuaciones simultáneamente, que son mayores en la medida que la misma crece. Esto hace necesario que, además de las computadoras, se posean fundamentos teóricos necesarios para interpretar correctamente los resultados obtenidos.

En nuestro país, desde hace varios años, se han estado realizando *softwares* o herramientas avanzadas concebidas para asistir a los ingenieros en los estudios de operación, análisis y planificación de los Sistemas de Distribución de Energía (SDEs), realizados en el Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. Entre estos programas, se encuentra **RADIAL**, creado para el estudio de las redes radiales de distribución, y que ejecuta estudios de flujo de carga monofásico y trifásico, ubicación óptima de capacitores, selección y coordinación de protecciones, chequeo de carga de los transformadores, etc. Ofrece

una amplia variedad de reportes gráficos, incluido el perfil de voltaje; así como información numérica sobre el monolineal y código de colores para las condiciones de bajo voltaje y sobrecargas en líneas. Tiene potencialidades en estudios de análisis de variantes y permite el establecimiento de varios escenarios relativos a la misma base de datos, donde cada uno es un conjunto de modificaciones que alteran la topología de la base de datos.

Motivación del trabajo

RADIAL es un *software* que actualmente está en su versión 10.0, concebido para el análisis de los circuitos de distribución radiales. Debido a los constantes cambios a los que ha estado sometido en los últimos años, y atendiendo a las peticiones de los usuarios, entre los que se destacan las empresas eléctricas provinciales y municipales de prácticamente todo el país, se ha iniciado la tarea de la actualización de su Manual de Usuario o Ayuda, lo que constituye la motivación básica de este trabajo.

Objetivo general

Actualizar el manual de usuario del *software RADIAL 10.0*, permitiendo a los interesados un uso más cómodo y eficiente del mismo.

De este objetivo general, se derivan los objetivos específicos siguientes:

Objetivos específicos

1. Describir los sistemas de distribución y los estudios que realiza el *software*.
2. Describir a través de figuras, las principales potencialidades que se pueden realizar con este programa.
3. Implementar el manual de usuario en el *software Help and Manual*.

Estructura de la tesis

El trabajo se encuentra estructurado en tres capítulos:

Capítulo 1: Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). Redes de distribución.

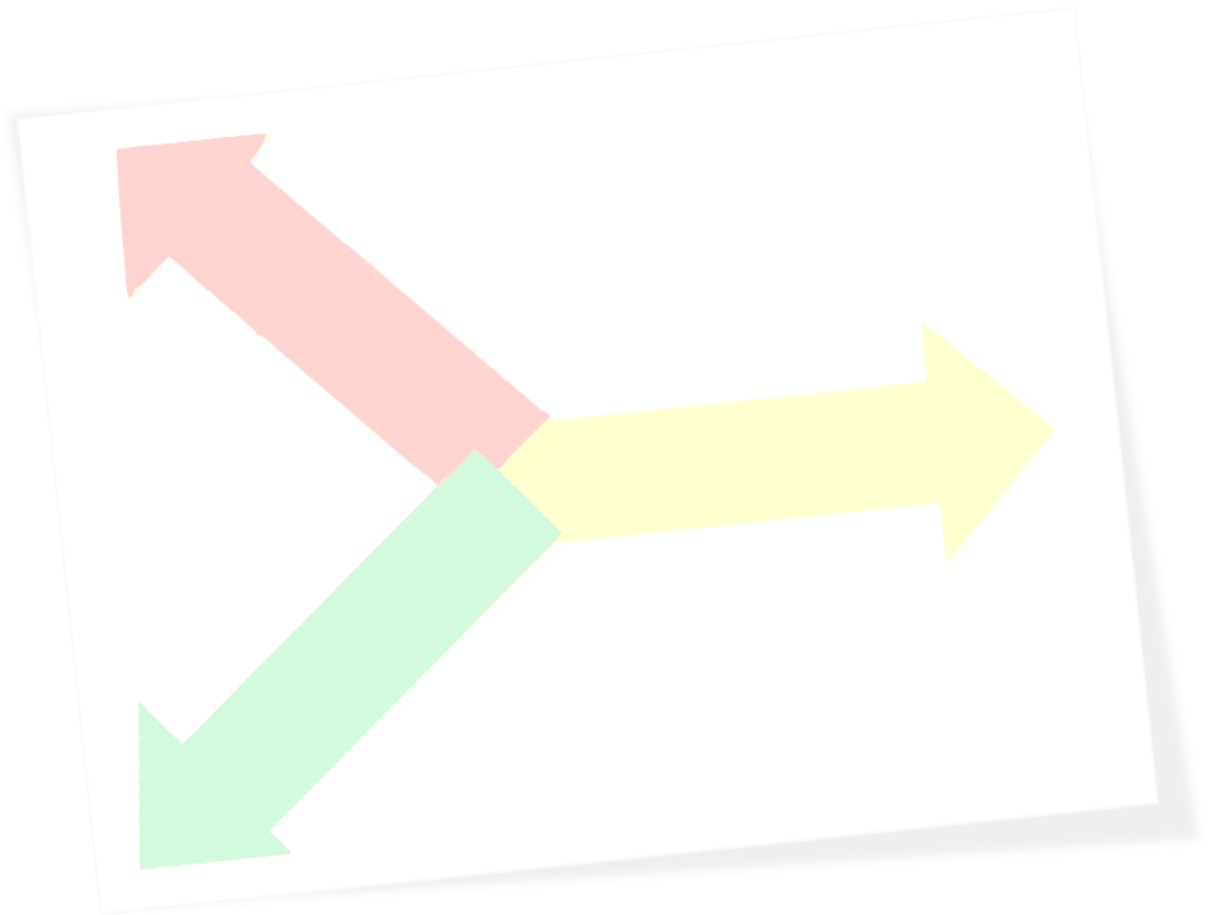
Aborda las principales características de los SEP y los sistemas que lo componen, principalmente los sistemas de distribución.

Capítulo 2: Principales cálculos relacionados con los circuitos radiales de distribución primaria. El *software* RADIAL.

Se exponen las principales características de los estudios y potencialidades que tiene este *software* mediante ecuaciones y fundamentos teóricos.

Capítulo 3: Manual de usuario del *RADIAL* 10.0.

Se realiza una presentación al usuario de las facilidades y funcionalidades del *software*, además de contener los elementos más importantes del Anexo 1 del trabajo.



**CAPÍTULO 1: SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA.
REDES DE DISTRIBUCIÓN**

CAPÍTULO 1: SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA. REDES DE DISTRIBUCIÓN

Un Sistema Eléctrico de Potencia, Figura 1.1, es probablemente la instalación más compleja de un país, pues comprende todas las subestructuras donde se realiza la transformación de diferentes fuentes primarias de energía en energía eléctrica, la que a su vez se transmite y distribuye a todos los clientes, independientemente de su tamaño y localización.

El SEP se extiende por el territorio nacional y lo abarca casi en su totalidad, exceptuando solo aquellas regiones donde existen asentamientos de difícil acceso que, aunque requieren del uso de esta versátil forma de energía imprescindible para disfrutar del confort y los adelantos tecnológicos del mundo actual, no es posible brindar sus servicios por medio del mismo.

El diseño, construcción, operación y mantenimiento de esta gigantesca infraestructura requiere de las técnicas más avanzadas de la ciencia y la tecnología, así como de personal de elevada calificación.

De manera general se pueden distinguir en el mismo tres partes fundamentales: generación, transmisión y distribución, ya sea primaria o secundaria.

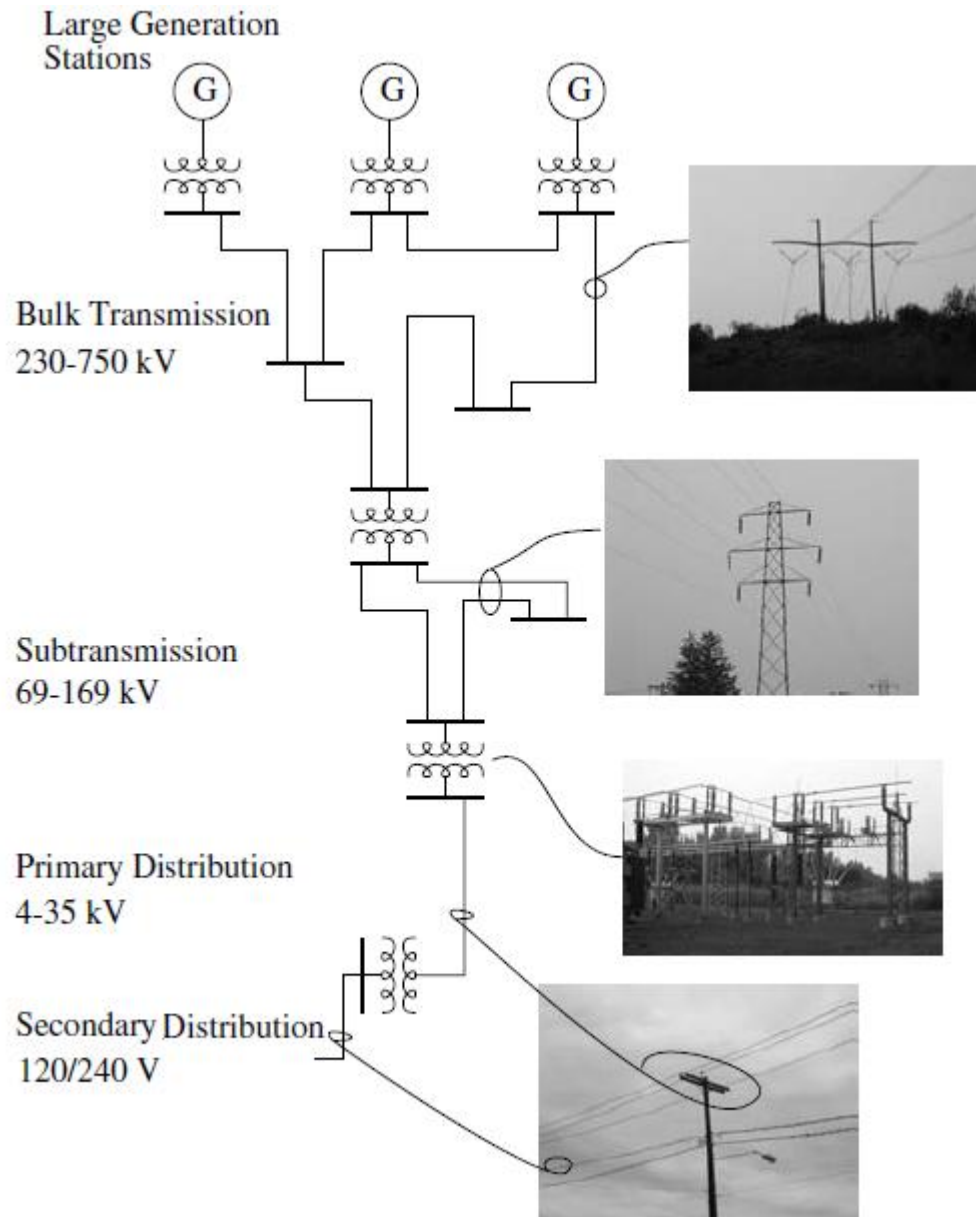


Figura 1.1 Representación global de un SEP

1.1 Generación de energía eléctrica

El sistema de generación de energía eléctrica está constituido por las plantas generadoras que transforman diferentes fuentes de energía primaria en eléctrica.

Hoy en día, existe una fuerte tendencia a utilizar cualquier fuente de energía primaria disponible, por lo que es una práctica común encontrar una integración de las fuentes tradicionales de energía (gas, carbón, petróleo, hidráulica, nuclear, etc.) con las fuentes renovables que ocupan un espacio de mayor impacto (eólica, solar, etc.).

Todas estas plantas de diferentes capacidades, se combinan para servir al alto propósito de abastecer de energía eléctrica a todos los clientes, los que serían incapaces de realizar las funciones que acometen sin su utilización; al menos, con la calidad, eficiencia y comodidad con que hoy lo realizan.

1.2 Sistema de transmisión

Una de las principales características de los actuales SEP, es su alto nivel de interconexión, al extremo que, prácticamente todas las plantas se encuentran unidas entre sí a través del sistema de transmisión, formado por las líneas de mayor tensión, longitud y capacidad de transferencia de todo el sistema. Los niveles de tensión van desde 110 hasta 750 kV y más.

El grado de interconexión ha llegado a un estado tal, que la expande más allá de las fronteras de cada país para asociarse a las naciones vecinas y formar fabulosas redes de carácter continental.

1.3 Sistema de distribución

El sistema de distribución, Figura 1.2, es el encargado de hacer llegar la preciada energía a cada cliente, independientemente de su demanda.

Hoy, la mayor parte de las inversiones asociadas a un SEP, se vinculan al proceso de distribución de la energía eléctrica por su gran extensión. Es en esta parte, donde se producen las mayores pérdidas de energía en todas sus manifestaciones, debido al gran volumen de elementos que lo conforman y a los bajos niveles de tensión que se manejan, además de ser la fracción del

SEP que está directamente frente a los clientes o consumidores, y a través del cual, se ve la imagen del mismo. [1]

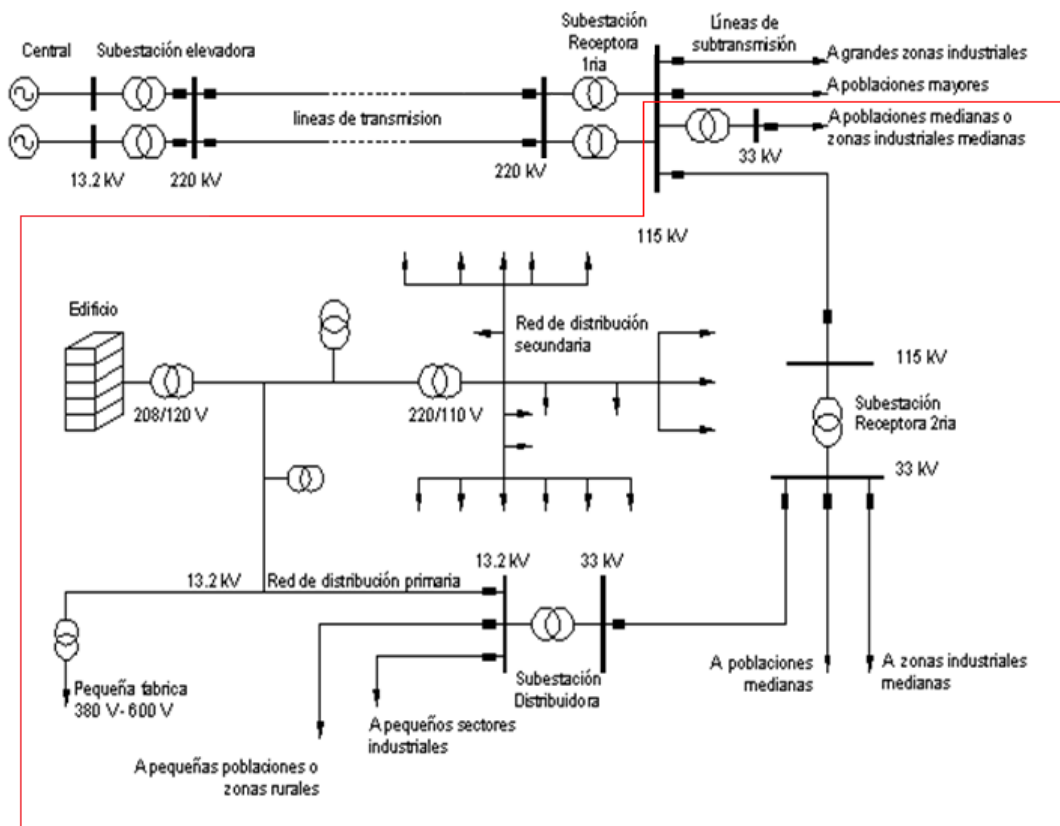


Figura 1.2 Ubicación de sistemas de distribución dentro de un sistema de potencia

1.3.1 Importancia de las redes de distribución

Las redes de distribución ocupan un lugar sustancial en el sistema electroenergético por las razones antes señaladas; su función es tomar la energía eléctrica de los niveles de mayor nivel y distribuirla o entregarla a los consumidores. La efectividad con que las redes de distribución realizan esta función, se mide en términos de regulación de la tensión, continuidad del servicio, flexibilidad, eficiencia y costo.

El diseño, construcción, operación y mantenimiento de un sistema de distribución, forman los aspectos fundamentales para poder brindar, al menor costo posible, un servicio eléctrico adecuado al área bajo consideración. Para ello, hay que tener en cuenta que las redes de distribución toman diferentes formas, dependiendo de las características de la carga a servir, por lo que existen varios principios comunes que deben cumplir. Así, deben brindar servicios con un mínimo de variaciones de la tensión y mínimas interrupciones, las que deben ser de corta duración y afectar al menor número posible de consumidores. El sistema debe ser flexible para permitir exposiciones pequeñas y cambios en las condiciones de carga, con un mínimo de modificaciones y gastos. [2]

1.3.2 Componentes de un sistema de distribución

Un sistema de distribución está compuesto fundamentalmente por [2]:

- **Líneas de subtransmisión:** Se originan de una fuente, planta o subestación, y alimentan subestaciones de distribución o industriales, en las cuales el voltaje se reduce a los valores requeridos para el servicio de la industria o hacia los alimentadores de los circuitos. En Cuba, normalmente la tensión de las líneas de subtransmisión es de 34,5 o 110 kV, mayoritariamente la primera, aunque no es la tensión la que define la función de la línea.
- **Subestaciones de distribución:** En ellas se transforma la energía recibida de las líneas de subtransmisión y son las encargadas de proveer a los circuitos de distribución primarios. Aquí, se reduce la tensión a los valores normales en los circuitos de distribución, que generalmente varían desde 4,16 hasta 34,5 kV, aunque la mayoría operan a 13,8 kV.
- **Circuitos primarios:** Recorren cada uno de los sectores urbanos y rurales, suministrando potencia a los transformadores de distribución.

- **Circuito secundario:** Son los encargados de distribuir la energía a los clientes de menor demanda. Su tensión nominal es de 120/240 V.
- **Transformadores de distribución:** Se conectan a un circuito primario y suministran servicio a los consumidores o abonados conectados al secundario. En Cuba se usan, fundamentalmente, transformadores monofásicos para formar bancos de uno, dos o tres transformadores.
- **Acometidas:** Líneas que, partiendo de los circuitos secundarios, se extienden hasta los metro-contadores de los consumidores.
- **Metro-contadores:** Instrumentos conectados a los consumidores, destinados a medir la potencia consumida por los mismos.

1.3.3 Tipos de circuitos

Básicamente existen tres tipos de circuitos de distribución de acuerdo a la forma de conexión o alimentación de estos desde las subestaciones de distribución:

1.3.3.1 Circuitos radiales

Un circuito radial, Figura 1.3, es aquel que partiendo de un punto de alimentación (planta, subestación, etc.), recorre una determinada región para cubrir la demanda eléctrica de esta. Está constituido por un tronco de donde se derivan ramales y sub ramales de una, dos o tres fases.

En algunas ocasiones, cuando el circuito radial sirve zonas densamente pobladas con varios alimentadores vecinos que parten de la misma subestación u otras cercanas, es posible prever ramales de interconexión, para en caso de avería, transferir carga de un circuito a otro. El cálculo eléctrico de estos circuitos es relativamente sencillo; sus inversiones capitales son menores que otras redes, pero presentan mayores pérdidas de potencia y caídas de tensión, así como menor fiabilidad.

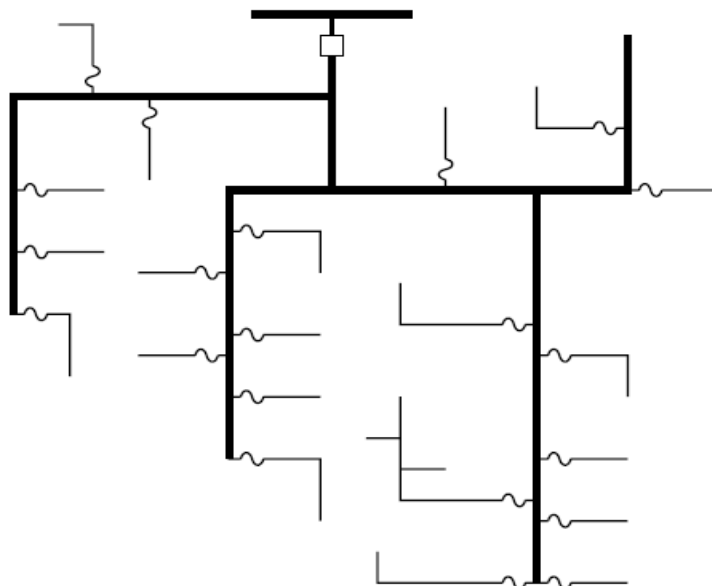


Figura 1.3 Circuito radial típico

Una de las características fundamentales de los circuitos radiales es que el flujo de potencia es en una sola dirección y al poseer un solo punto de alimentación, los hacen muy sencillos y económicos desde el punto de vista constructivo y de operación. Su regulación de voltaje es grande y su fiabilidad es baja, ya que una falla puede afectar a un gran número de clientes.

A pesar de estas desventajas, que se compensan con equipamiento adecuado, son los más utilizados. [3]

Otra de sus características, es que en ellos se puede apreciar un grado de desbalance relativamente grande cuando las cargas se alimentan desde bancos de transformadores monofásicos, como es el caso de la distribución primaria [4]. Contrariamente a lo que pasa en sistemas de transmisión, en los circuitos de distribución la resistencia de las líneas es comparable con su reactancia. Generalmente la relación X/R tiene un amplio rango de variación, llegando a ser menor que uno. [5]

1.3.3.2 Circuitos en lazo

Los circuitos en lazo, Figura 1.4, se forman al unirse entre sí dos circuitos radiales que parten de la misma subestación. Ellos presentan una mejor regulación de la tensión y operan con menores pérdidas.

Por formar una red cerrada sobre sí misma, requieren de equipamiento especializado para aislar las fallas que se produzcan en las líneas, a fin de evitar una pérdida completa de servicio. Esta característica los hace más costosos y de mayor complejidad en su operación, aunque más confiables.

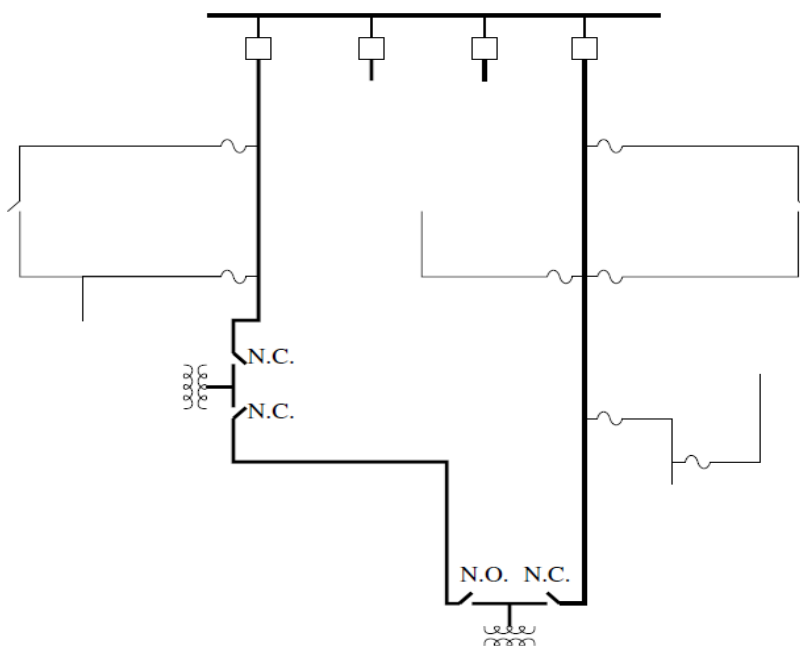


Figura 1.4 Circuito en lazo

1.3.3.3 Circuitos en malla

Estos circuitos, Figura 1.5, forman una red altamente interconectada por secundario (emplean transformadores trifásicos), de forma tal, que los clientes se alimentan de la red en sí y no de un transformador en particular, como ocurre en los radiales. Generalmente, están asociados a las grandes

ciudades, pues se requiere de una elevada fiabilidad de servicio con variaciones mínimas de la tensión. Son instalaciones soterradas, lo que hace que su costo sea elevado.

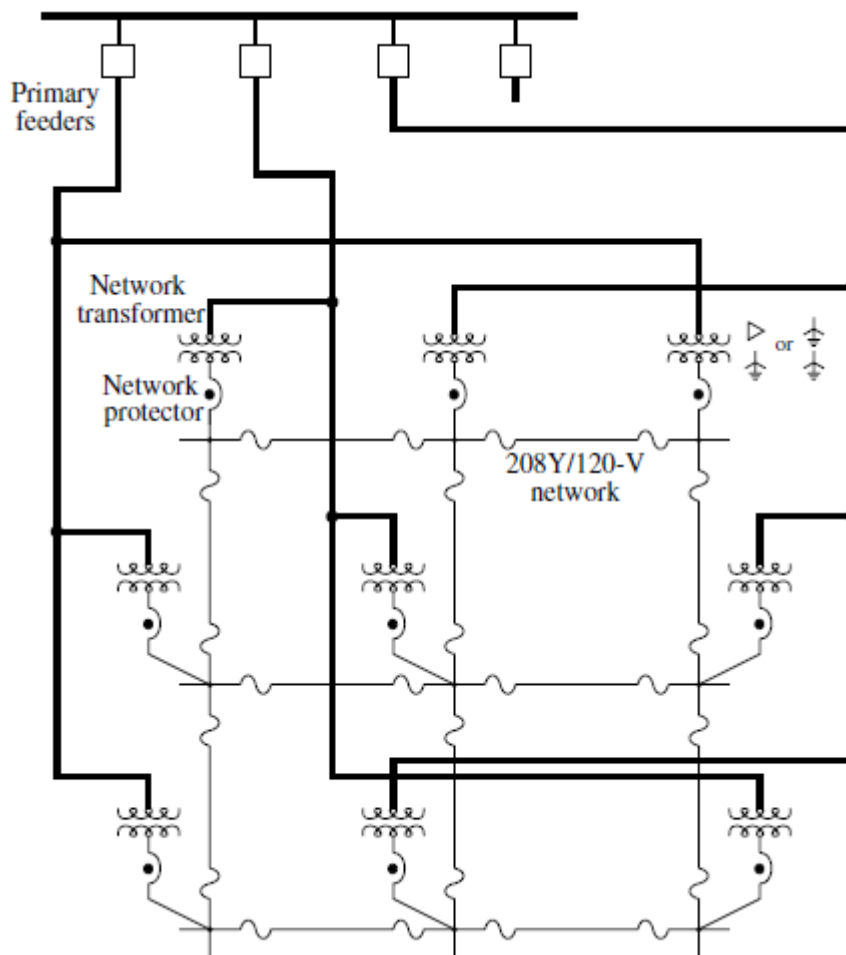


Figura 1.5 Circuito de distribución en malla

1.3.4 Principales elementos de los circuitos de distribución

Para su operación, los circuitos de distribución están equipados con diversos elementos que de una forma u otra contribuyen a que puedan realizar su función exitosamente. Entre los elementos fundamentales se destacan:

- Las líneas, que como ya se ha señalado, parten desde una subestación de distribución, y recorren calles y caminos para suministrar la energía eléctrica hasta los diferentes clientes.
- Los transformadores de distribución, que reducen el nivel de tensión de los valores nominales de la red primaria (4,16 – 34,5 kV) hasta los de utilización. Se conectan formando bancos de uno, dos o tres transformadores para alimentar cargas monofásicas y trifásicas.
- Interruptores para manipular los circuitos, los cuales pueden ser con capacidad interruptiva, operar con carga o simples desconectivos que pueden maniobrar sin carga.
- Capacitores que se emplean para compensar la demanda de potencia reactiva de las cargas de los circuitos. Tienen gran efecto sobre la tensión y las pérdidas, por lo que su instalación es una práctica frecuente.
- Sistemas de protección ubicados tanto en las subestaciones como a lo largo de las líneas, y en los bancos de transformadores y capacitores.
- Equipos de medición que se emplean para estudiar el comportamiento de las redes. La introducción de tecnologías de avanzada en este campo, ha facilitado los análisis de los circuitos, por lo cual se están logrando resultados más precisos en los cálculos.
- Sistemas de automatización que de igual forma, se están introduciendo a un ritmo acelerado y están elevando la fiabilidad y calidad del servicio.
- Sistemas de tierra, tanto de la subestación como a lo largo de los circuitos primarios.

1.3.5 Análisis de los circuitos de distribución

Es evidente que todos los elementos integrantes de las redes de distribución interactúan entre sí, por lo que se requiere de estudios que permitan diseñar,

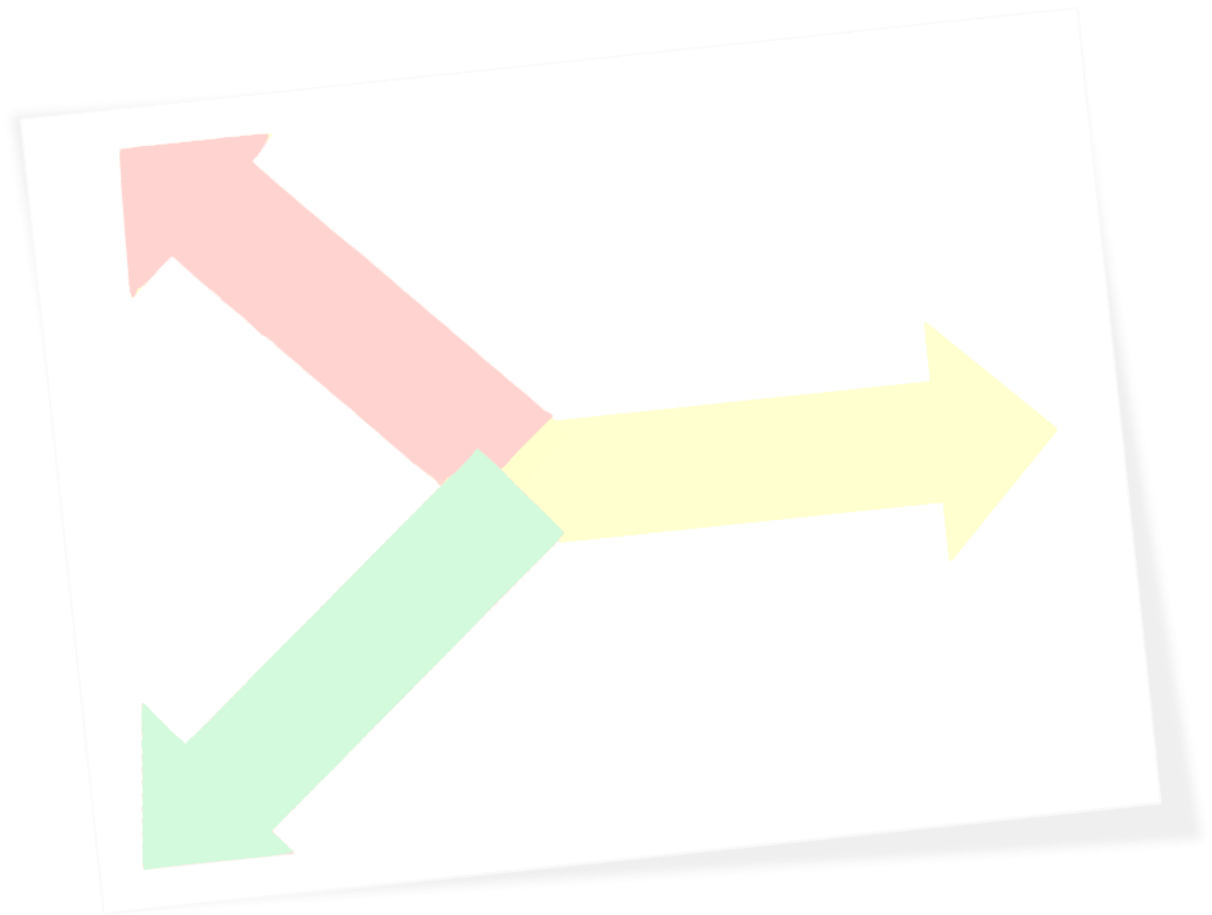
evaluar y manejar de forma correcta sus funciones específicas y la de los circuitos como un todo.

Entre los principales análisis y estudios relacionados con los circuitos de distribución, figuran aquellos que permiten determinar:

- Las tensiones en los nodos, las transferencias de potencia por líneas y transformadores y también, las pérdidas de potencia y energía en cada uno de los elementos del sistema. Estos estudios se denominan flujos de carga.
- El efecto de los gráficos horarios de carga sobre los circuitos.
- La influencia de la cogeneración y la generación distribuida sobre los circuitos.
- El estado de carga de los transformadores de distribución para determinar si los mismos están sobre o subcargados.
- El comportamiento de los circuitos para diferentes estados de carga y tensiones de operación de la subestación.
- El impacto de la representación de las cargas sobre el comportamiento del circuito.
- El análisis técnico-económico de los calibres de los conductores de las líneas.
- La valoración de los capacitores:
 - Ubicación óptima para máxima reducción de pérdidas de potencia y/o energía en las líneas.
 - Selección óptima para máxima reducción de pérdidas de potencia y/o energía en las líneas.
 - Efecto sobre la tensión en los diferentes nodos de los circuitos a diferentes horas del día.
- La selección y ajuste de los dispositivos de protección.

1.4 Consideraciones finales del capítulo

Los SEP comprenden todas las subestructuras donde se realiza la transformación de diferentes fuentes primarias de energía en energía eléctrica, la que a su vez se transmite y distribuye a todos los clientes, independientemente de su tamaño y localización. De manera general se pueden distinguir en el mismo tres partes fundamentales: generación, transmisión y distribución (primaria o secundaria). Esta última es la encargada de hacer llegar la energía a cada uno de los clientes, produciéndose las mayores pérdidas de energía, debido al gran volumen de elementos que lo conforman y a los bajos niveles de tensión que se manejan.



CAPÍTULO 2: PRINCIPALES
CÁLCULOS RELACIONADOS CON
LOS CIRCUITOS RADIALES DE
DISTRIBUCIÓN PRIMARIA.
EL SOFTWARE RADIAL

CAPÍTULO 2: PRINCIPALES CÁLCULOS RELACIONADOS CON LOS CIRCUITOS RADIALES DE DISTRIBUCIÓN PRIMARIA. EL *SOFTWARE RADIAL*.

Los estudios de flujo de carga son de gran valor en la planeación y diseño de la expansión futura de los sistemas de potencia y en la determinación de las mejores condiciones de operación de los sistemas existentes.

El flujo de carga, no es más que el cálculo que se realiza para conocer la transferencia de potencia activa y reactiva (en cada nodo, en las líneas y los transformadores), tensión en los nodos (módulo y ángulo), pérdidas de potencia activa en cada elemento, así como desgastes de energía y demás variables que describen el funcionamiento de un sistema eléctrico de potencia, durante condiciones de estado estable. [6]

2.1 Métodos de cálculos

2.1.1 Métodos tradicionales: método de los nodos

El método de los nodos se implementó desde que se comenzaron a analizar los circuitos eléctricos y, su aplicación asociada a los SEPs fue desde la década del cincuenta del pasado siglo. Fue la primera aplicación de la computación a los SEP. El primer método, *Gauss – Seidel*, también conocido como método de los desplazamientos sucesivos, se emplea para resolver, de manera iterativa, sistemas de ecuaciones. El segundo *Newton-Raphson* constituye la expansión en series de Taylor para funciones de múltiples variables; converge más rápido y es menos propenso a divergir.

Estos métodos son aplicables en los circuitos radiales, pero su mayor atención está concebida, esencialmente, para sistemas de transmisión. La

baja relación X/R de las líneas de distribución, hace que estos métodos resulten engorrosos en estos circuitos. [7] [8]

2.1.2 Métodos de cálculo de flujo de potencia en sistemas radiales

Dentro de todos estos métodos, los más usados son: el Método Escalonado, el Método Suma de Corrientes y el Método Suma de Potencias.

Entre ellos, existen pequeñas diferencias en el número de iteraciones requeridas para su convergencia en sistemas no muy cargados (factores de carga menores que la unidad). Sin embargo, al aumentar el nivel de carga (factores de carga sobre 1.5), el método Suma de Potencia es el más efectivo y rápido, puesto que su característica de convergencia es mejor, consume poco tiempo en CPU y poca memoria RAM. Estos procedimientos, aplicados a los sistemas de distribución (circuitos radiales) muestran mejores características de convergencia (rapidez y confiabilidad) que los tradicionales. [9] [5] [10] [11]

2.2 Flujos de carga monofásico y trifásico

2.2.1 Flujo de carga monofásico

El método de flujo de carga monofásico, Figura 2.1, para circuitos radiales considera que el circuito se encuentra balanceado.

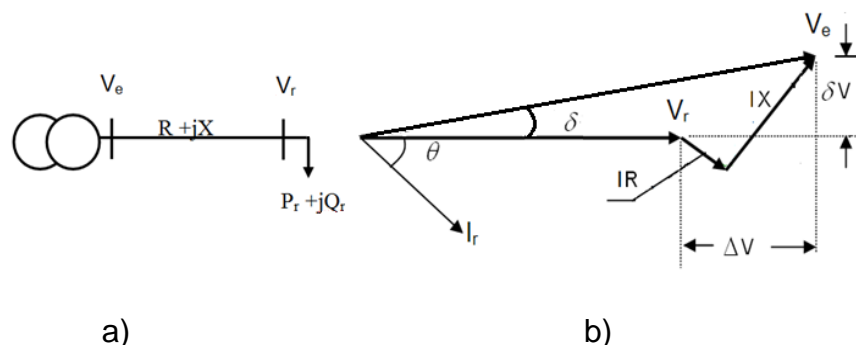


Figura 2.1 a) Datos de un circuito radial b) Diagrama fasorial

El voltaje de envío se describe por la siguiente ecuación:

$$V_e = V_r + IZ \quad (1)$$

De este diagrama fasorial, se infiere que:

$$\Delta V = IR \cos \theta + IX \cos \beta \quad (2)$$

$$\delta V = IX \sin \beta - IR \sin \theta \quad (3)$$

Donde ΔV es conocida como caída de voltaje longitudinal y δV es la caída de voltaje transversal. Aquí se cumple que $|\beta| + |\theta| = 90^\circ$.

El ángulo de desfase δ entre el voltaje de envío V_e y el de recibo V_r , es muy pequeño y se desprecia, por lo que:

$$V_e = (V_r + \Delta V) \quad (4)$$

$$V_e - V_r = \Delta V = IR \cos \theta + IX \sin \theta \quad (5)$$

Como las especificaciones de la carga se dan en potencia, se tiene que:

$$I \cos \theta = \frac{P}{V} \quad ; \quad I \sin \theta = \frac{Q}{V} \quad (6)$$

Por lo que:

$$V_r = V_e - \frac{RP + XQ}{V_r} \quad (7)$$

Las pérdidas de potencia activa y reactiva que se producen por efecto Joule en las líneas están dadas por:

$$\Delta P = 3I^2 R = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} R \quad (8)$$

$$\Delta Q = 3I^2 X = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} X \quad (9)$$

Estas, deben sumarse a la potencia de las cargas si se quiere tener una representación más exacta del problema. O sea:

$$P_e = \sum_{i=1}^n P_i + \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (10)$$

$$Q_e = \sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \quad (11)$$

Donde **P_i** y **Q_i** son las potencias activas y reactivas de las cargas y **ΔP_i** y **ΔQ_i**, las pérdidas.

A partir de estas expresiones se calcula el voltaje en el primer nodo (**V_k**) mediante la siguiente ecuación:

$$V_k = V_{k-1} - \frac{R_k P_k + X_k Q_k}{V_k} - j \frac{X_k P_k - R_k Q_k}{V_k} \quad (12)$$

Donde **P_k** y **Q_k** son las potencias que circulan por dicho tramo, que incluyen las pérdidas. [6] [12] [13]

2.2.2 Flujo de carga trifásico

Esta técnica, a diferencia de la anterior, toma en cuenta los desbalances en el circuito, Figura 2.2. Se realiza por fase para calcular los voltajes por fase (módulo y ángulo), así como las corrientes y las potencias que circulan por cada una. Las corrientes en cada nodo son desbalanceadas y dependen de la carga trifásica y monofásica, combinadas en cada carga y de la conexión de cada banco de transformadores.

Como es conocido, para cualquier circuito en todo momento, se cumple que:

$$I_a + I_b + I_c + I_n = 0 \quad (13)$$

Por lo que los voltajes inducidos (caídas de voltaje debido a las reactancias) en cada conductor del grupo, se expresan mediante el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +X_{aa} - X_{ab} - X_{ac} - X_{an} \\ -X_{ba} + X_{bb} - X_{bc} - X_{bn} \\ -X_{ca} - X_{cb} + X_{cc} - X_{cn} \\ -X_{na} - X_{nb} - X_{nc} + X_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

La evaluación de cada una de las ecuaciones del sistema, conduce a:

$$\Delta V_a = (IX)_a \angle \beta_a \quad (15)$$

$$\Delta V_b = (IX)_b \angle \beta_b \quad (16)$$

$$\Delta V_c = (IX)_c \angle \beta_c \quad (17)$$

$$\Delta V_n = (IX)_n \angle \beta_n \quad (18)$$

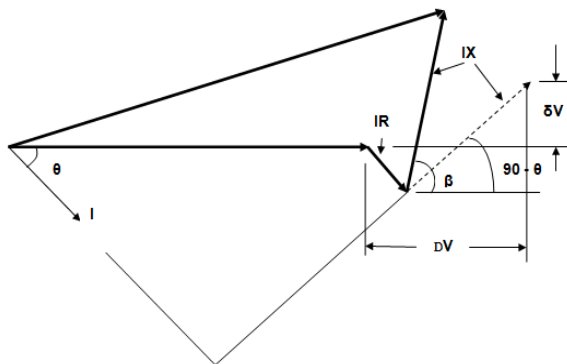


Figura 2.2 Diagrama fasorial de los voltajes en una línea asimétrica con corrientes desbalanceadas y simétricas balanceada (en trazos discontinuos)

Los voltajes que se calculan son por fase, por tanto, se determinan con respecto al neutro.

$$V_{ri} = V_{ei} - [(\Delta V_i - \Delta V_n) + j(\delta V_i - \delta V_n)] \quad (19)$$

Al desarrollar la ecuación anterior queda:

$$V_{ri} = V_{ei} - [(I_i R_i \cos \theta_i + (IX)_i \cos \beta_i) - (I_n R_n \cos \theta_n + (IX)_n \cos \beta_n)] - j[(I_i R_i \sin \theta_i + (IX)_i \sin \beta_i) - (I_n R_n \sin \theta_n + (IX)_n \sin \beta_n)] \quad (20)$$

Esta ecuación se emplea en el método de flujo de carga trifásico o desbalanceado para circuitos radiales para calcular los voltajes de fase a neutro de cada fase.

Las pérdidas de potencia en las líneas se calculan por las expresiones:

$$\Delta P = I_i^2 R_i \quad (21)$$

$$\Delta Q = I_i^2 X_i \quad (22)$$

Donde el término X_i tiene en cuenta las inductancias debido a las concatenaciones de flujo propias, de los otros conductores de fase y el neutro. [6] [12] [13] [14]

2.3 Efecto de los gráficos de carga

Los gráficos horarios, Figura 2.3, de potencia activa y reactiva, permiten realizar estudios de flujo de carga a cualquier hora del día y ayudan a determinar con gran precisión las pérdidas de energía, sin necesidad de recurrir a aproximaciones.

Estos influyen decisivamente en el análisis de los circuitos de distribución por sus características esenciales: el valor de demanda máxima de la potencia activa y reactiva, la hora en que ocurren y la energía asociada a los mismos.

De ellos se derivan los conocidos coeficientes o factores que de una forma simple, simplifican algunos cálculos en los circuitos (factor de demanda, diversidad, carga, pérdidas, capacidad y las horas equivalentes). [15] [16]

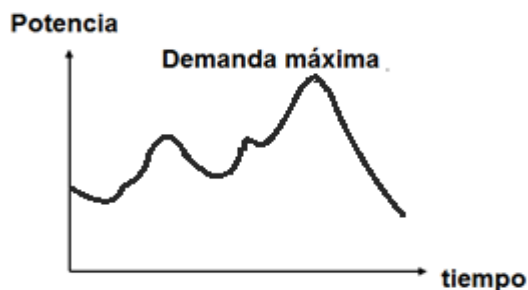


Figura 2.3 Gráfico de carga

RADIAL emplea gráficos horarios patrones con los que se pueden formar los de cada banco de transformadores; también posee la posibilidad de ajustar los gráficos horarios individuales de forma tal, que su suma más la de las pérdidas, coincida con el de la subestación que se ha obtenido por medición. [6]

2.4 Valoración de la cogeneración y la generación distribuida sobre los circuitos

La cogeneración y la generación distribuida permiten un mejor aprovechamiento de la energía primaria asociada a diversos procesos industriales o sociales, y habitualmente está estrechamente vinculada a plantas pequeñas que se localizan en el área de las redes de distribución, por lo que las mismas, con frecuencia se conectan a estas redes. El caso típico lo constituye la generación de los centrales azucareros; y algo similar ocurre con la incorporación de las pequeñas fuentes de energía renovable (eólica, fotovoltaica, hidráulica, etc.)

El efecto de estas fuente locales de generación, deben ser analizadas para evaluar su impacto en las redes de distribución. **RADIAL** permite llevar a cabo estas disertaciones.

2.5 El estado de carga de los transformadores de distribución para determinar si los mismos están sobre o subcargados para los diferentes tipos de banco

El estado de carga de los transformadores de distribución depende fundamentalmente del tipo de conexión, la distribución de las cargas (monofásicas, trifásicas o combinadas) que debe servir, las capacidades disponibles y los niveles de voltaje necesarios. [17] [18] [19]

Una de las mayores ventajas que se tiene en los sistemas de distribución es el hecho de contar con los transformadores monofásicos porque ante el crecimiento de la carga, se puede ampliar el banco sin necesidad de sustituirlos a todos, y cuando ocurre una avería en uno de ellos, con solo reemplazar la unidad dañada se restaura totalmente el servicio, aunque las corrientes en sus circuitos de alimentación son más desbalanceadas que cuando se usan los transformadores trifásicos.

Pueden estar conectados entre fase o de fase a neutro, típica para ofrecer sólo servicio monofásico; por ejemplo, en muchas áreas residenciales de edificaciones simples. Para este último caso se tiene que:

$$I_i = \frac{S}{V_{f_i}} \angle(\alpha_i + \theta) \quad (23)$$

$$I_n = \frac{S}{V_{f_i}} \angle(\alpha_i + \theta + 180) \quad (24)$$

Donde I_i : Corriente por la fase i (a, b, c)

S : Potencia monofásica demandada por la carga, kV.A

V_{f_i} : Voltaje de fase de la fase i (a, b, c), kV

α_i : Ángulo de fase del voltaje (0, -120, 120)

θ : Ángulo del factor de potencia (negativo para las cargas que demandan potencia reactiva)

I_n : Corriente por el neutro

Para cada banco de transformadores de dos o tres unidades, y en función de la proporción de carga monofásica y trifásica, cada transformador lleva una carga determinada. [13] [17]

RADIAL chequea el estado de carga de cada transformador del circuito, con lo que ofrece al usuario las condiciones de operación reales con que está trabajando.

2.6 Comportamiento de los circuitos para diferentes estados de carga y para distintas tensiones de operación de la subestación

Los circuitos eléctricos que componen un SEP están sometidos a constantes variaciones en su comportamiento. Esto es debido a diferentes estados de carga que existen a lo largo del día y las pequeñas variaciones de los voltajes de operación de las subestaciones. Cuando estos circuitos están trabajando en los horarios de máxima demanda (por lo general el horario pico), por ellos se transmite una mayor cantidad de corriente debido de que en ese horario es donde está el mayor número de cargas conectadas a la misma vez. Esto provoca que en ellos se produzcan las mayores pérdidas de energía y de potencia, caídas de voltajes más grandes y amplia circulación de armónicos debido a las cargas no lineales.

2.7 Análisis técnico económico de los calibres de los conductores de las líneas

Para seleccionar el calibre de un conductor a la hora de diseñar una línea eléctrica, se debe realizar con una serie de exigencias o medidas técnicas que no se pueden ignorar: la caída de voltaje permisible, las limitaciones de carácter mecánico, así como soportar las corrientes de cortocircuito, para que luego de cumplirse estas condiciones, se pueda llevar a cabo una evaluación económica, Figura 2.4, que permita escoger de entre un grupo de conductores que satisfacen estos requisitos, aquel que lo haga con los menores costos.

La operación de la selección del calibre de un conductor se hace por el método de los intervalos económicos de corriente, que consiste en determinar la corriente que produce los mismos gastos anuales para dos calibres consecutivos. [3]

Matemáticamente sería:

$$I_{j,j+1} = \sqrt{\frac{1000(K_{j+1} - K_j)}{3HeqCe(R_j - R_{j+1}) \sum_{k=0}^n \frac{I}{(1+i)^k}}}$$
(25)

- Donde:
- K_j : Costo de inversión del calibre j , pesos
 - K_{j+1} : Costo de inversión del calibre $j+1$, pesos
 - n : Número de años considerados
 - I : Corriente máxima, A
 - R_j : Resistencia de calibre j , Ω
 - R_{j+1} : Resistencia de calibre $j+1$, Ω
 - Heq: Tiempo equivalente, horas/año
 - Ce: Costo de la energía, pesos/kW.h

I: Tasa de descuento, p.u

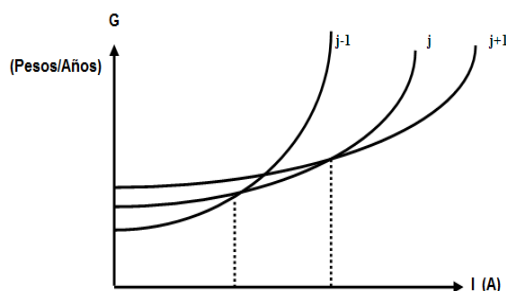


Figura 2.4 Gastos actualizados para una misma fecha de tres calibres consecutivos j-1, j y j+1

RADIAL realiza estas valoraciones cuando se quiere llevar a cabo un cambio de calibre en un circuito.

2.8 Valoración de los capacitores

En un circuito eléctrico las pérdidas producidas por la transferencia de potencia activa y reactiva son independientes.

$$\Delta P = \frac{P^2}{V^2} R + \frac{Q^2}{V^2} R \quad (26)$$

Debido a lo anteriormente planteado, los capacitores solo actúan sobre la potencia reactiva, con una capacidad que depende del voltaje al cuadrado ($Q = (V^2/X_c)$). Su mayor aplicación es en circuitos de distribución, en forma de pequeños bancos o en las subestaciones de transmisión. Estos dispositivos son fijos o se pueden controlar por voltaje, tiempo y demanda de reactivo, de forma que se desconecten automáticamente a las horas que pudieran afectar a los niveles máximos de voltajes permisibles, Figura 2.5.

[12]

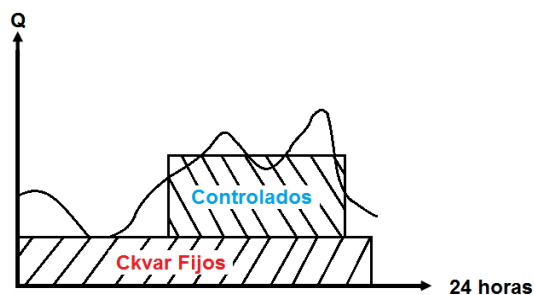


Figura 2.5 Variación de la potencia reactiva durante el día en un circuito radial

2.8.1 Ubicación óptima para máxima reducción de pérdidas de potencia y/o energía en las líneas.

Para realizar la ubicación óptima de los capacitores se considera el circuito balanceado.

La ubicación óptima de un capacitor es en aquel lugar donde la corriente o potencia reactiva del circuito sea igual a la mitad de la corriente o potencia capacitiva del banco que se ubica [13], y depende de la capacidad del banco, o sea, que cada banco tiene su propio lugar de ubicación óptima. Si se da el caso de la ubicación de un segundo banco de capacitores, el problema se vuelve más sencillo porque el circuito es más simple y reducido, ya que solo abarca desde la subestación hasta el punto donde la corriente reactiva se hizo cero por la acción del primer banco de capacitores.

En el caso del ahorro de energía producido por los bancos de capacitores, el proceso es similar, solo que en vez de potencia, se trabaja con energía [13] [12]. **RADIAL** tiene las opciones de ejecutar ambas posibilidades.

2.8.2 Selección óptima para máxima reducción de pérdidas de potencia y/o energía en las líneas

Los bancos de capacitores se instalan por primario y en bloques definidos. La selección óptima para máxima reducción de pérdidas de potencia y/o energía en las líneas se alcanza cuando cada carga trabaje a factor de potencia unitario, pero debido a limitaciones económicas y técnicas, esto no se puede lograr, ya que se requeriría de la instalación de condensadores pequeños de bajo voltaje. [12]

2.8.2.1 En el caso de los bancos fijos

Los bancos mencionados, generalmente se hacen con un solo tipo de vaso Q_v y la magnitud de potencia reactiva a instalar dependerá de su justificación económica, por resultar menos costosos y requerir un mantenimiento mínimo.

$$Q_c = 3kQ_v \quad k = 1, 2, 3... \quad (27)$$

2.8.2.2 En el caso de los bancos controlados

Los bancos solo están conectados a plena capacidad durante una parte del día. Cuando la demanda es mínima se desconectan, ya que el ahorro de energía se hace negativo y las pérdidas aumentan. Son más costosos pero a la vez eficientes, puesto que son utilizados en los circuitos con alta demanda de potencia reactiva.

2.8.2.3 Efecto sobre la tensión en los diferentes nodos de los circuitos a diferentes horas del día.

Los capacitores mejoran las condiciones de voltaje en los circuitos, pues reducen la transferencia de la potencia reactiva por las líneas y solo son efectivos en circuitos donde las reactancias son mayores que las

resistencias, es decir, la subida de voltaje producida por los capacitores depende de la magnitud de la corriente capacitiva (I_c) y de la reactancia de la línea (X) por donde circula; su influencia es mejor mientras más alejado se encuentre la fuente de alimentación.

2.9 Selección y ajuste de los dispositivos de protección.

Para hacer un estudio de selección y ajuste de los dispositivos de protección en un circuito de distribución, se tiene que tener en cuenta la configuración del circuito, los datos completos de las líneas, la ubicación y capacidad de todos los transformadores y la demanda máxima del circuito. Después, se determinan las corrientes de carga y de cortocircuito en los puntos y condiciones requeridos para los distintos dispositivos de protección y se seleccionan sus capacidades. Finalmente, cuando se tiene la ubicación definitiva de los dispositivos, se hace su coordinación. [3]

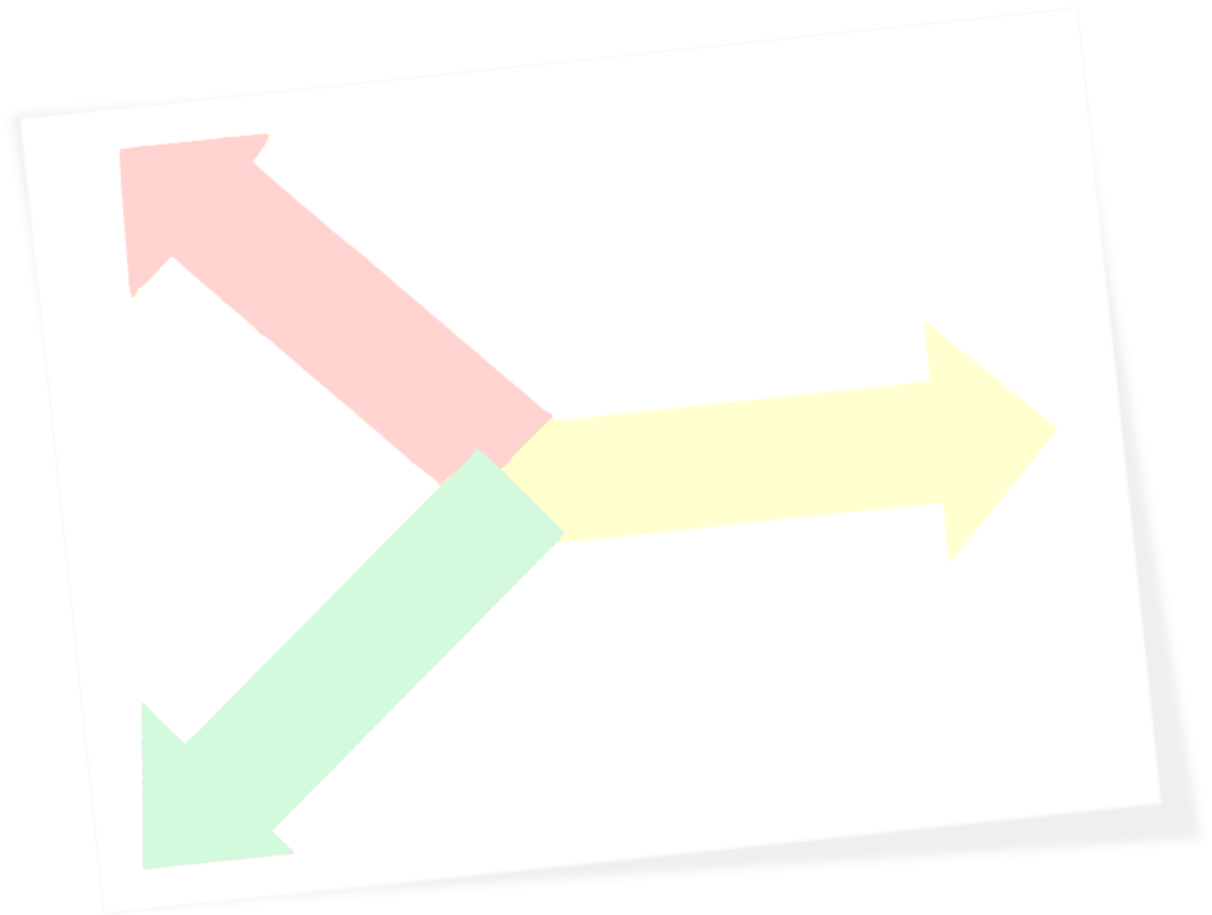
Para este caso, ***RADIAL 10.0*** halla las corrientes de cortocircuito en cada nodo del circuito de distribución, y para ello, parte de los niveles existentes por primario de la subestación de subtransmisión que se introducen como datos. Esta información se visualiza solo donde existen fusibles u otros dispositivos señalados en el diagrama monolineal del circuito, donde se realiza la coordinación de las protecciones de acuerdo con los dispositivos declarados.

2.10 Consideraciones finales del capítulo

El flujo de carga es el cálculo que se realiza para conocer las transferencias de potencia activa y reactiva, la tensión en los nodos y demás variables que describen el funcionamiento de un SEP, durante condiciones de estado estable. Los métodos de cálculo más usados en sistemas radiales son: el Método Escalonado, el Método Suma de Corrientes y el Método Suma de Potencias, ya que muestran mejores características de convergencia, rapidez

CAPÍTULO 2: PRINCIPALES CÁLCULOS RELACIONADOS CON LOS CIRCUITOS RADIALES DE DISTRIBUCIÓN PRIMARIA. EL *SOFTWARE RADIAL*.

y confiabilidad que los tradicionales. El *software RADIAL* permite a los usuarios la realización de varias tareas en el cálculo de los flujos de cargas (monofásicas y trifásicas), valorar la cogeneración y generación distribuida sobre los circuitos, entre otros estudios, que permiten conocer el comportamiento de los circuitos eléctricos para diferentes estados de carga.



CAPÍTULO 3: MANUAL DE
USUARIO DEL
RADIAL 10.0

CAPÍTULO 3: MANUAL DE USUARIO DEL *RADIAL* 10.0

El Manual de Usuario del *RADIAL* aparece en el Anexo 1. En este capítulo se hace una descripción simplificada del mismo con el fin de resaltar los aspectos más relevantes con el objetivo de conocer sus principales potencialidades.

3.1 Manual de Usuario

RADIAL es un *software* que posee un editor que simula un editor gráfico que permite dibujar el diagrama monolineal de un circuito, Figura 3.1, donde se destacan:

- Las líneas y sus nodos: Se incluyen ramales y sub ramales y si están o no conectados.
- El número de fases de las líneas: Solicita cuál o cuáles son estas, en caso de no ser trifásica.
- La conexión de los bancos de transformadores de cada nodo y si están o no conectados.
- Los dispositivos de conexión/desconexión.
- Los bancos de capacitores y si están o no conectados.
- La generación, si existiera (generación distribuida en la subtransmisión) con su gráfico horario y si están o no conectadas.

La información requerida para su uso se divide en dos grandes grupos:

- **General:** ofrecida en *RADIAL* por “defecto”, y que puede modificarse de acuerdo a los datos más convenientes que disponga el usuario.

- **Particular:** se vincula con los circuitos que se quieren analizar y se introduce a través de ventanas sobre el diagrama monolineal del circuito, el cual se edita de una forma simple, ágil y de fácil manipulación.

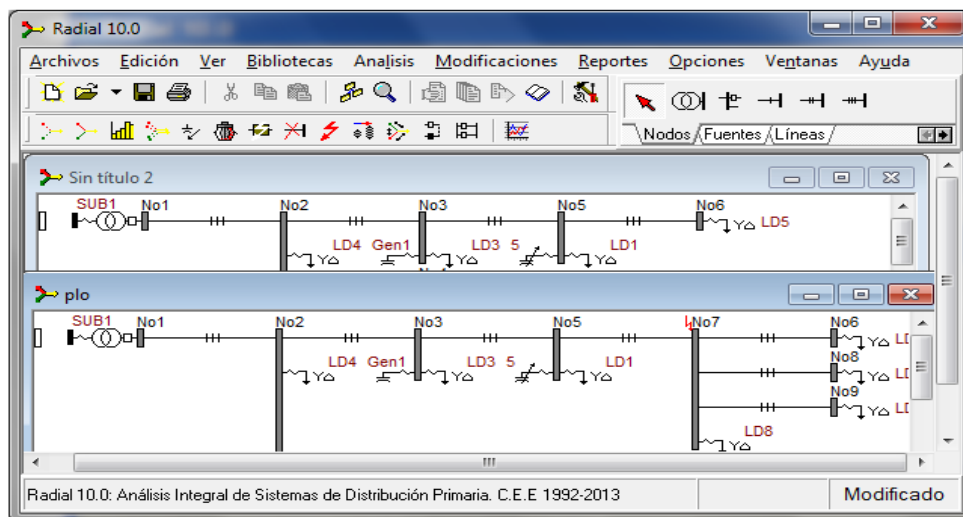


Figura 3.1 Ventana Principal de *RADIAL* 10.0

RADIAL brinda una amplia variedad de reportes gráficos, incluido el perfil de voltaje y de potencia reactiva, así como información numérica sobre el monolineal y código de colores para las condiciones de bajo voltaje y sobrecargas en líneas. Tiene potencialidades en estudios de análisis de variantes, y permite la creación de varios escenarios relativos a la misma base de datos donde altera la topología de esta.

3.2 Información de entrada

Dado el gran volumen de datos asociados a un circuito de distribución primaria, **RADIAL** simplifica la entrada de los mismos, para lo cual ha implementado algunas técnicas basadas en que numerosos elementos son comunes a todos los circuitos y por tanto se repiten, tales como los parámetros de líneas, transformadores y capacitores.

Los datos propios de cada circuito como las cargas, sin dudas el dato más difícil y el de mayor impacto en los resultados, requieren una selección y ajuste propios para cada circuito. En todos los casos, **RADIAL** hace una propuesta que el usuario puede modificar, si es su criterio, almacenando los datos en Bibliotecas.

3.3 Herramientas de *RADIAL*

3.3.1 Ventana de *RADIAL*

A continuación, Figura 3.2, se señalan las diferentes barras de herramientas que conforman la ventana principal, permitiendo organizar los comandos de una manera más sencilla para facilitar su uso.

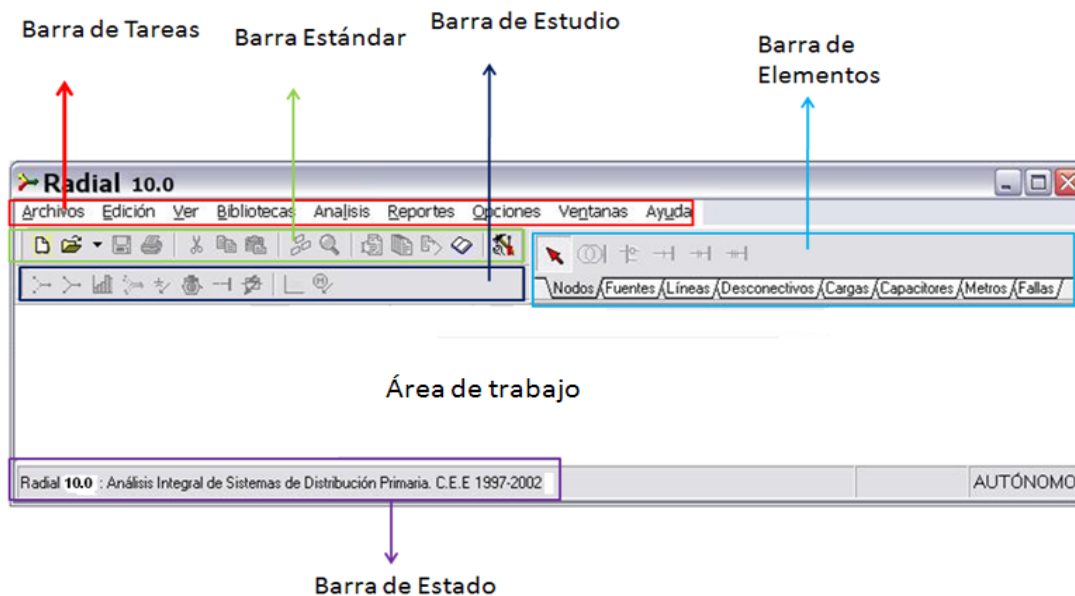


Figura 3.2 Barras de Herramientas

3.3.1.1 Barra de Tarea

Es aquella parte que consiente a acceder a los elementos necesarios para el trabajo con el *software*.

3.3.1.2 Barra Estándar

Este segmento incluye el acceso rápido a diferentes comandos de manipulación pertenecientes a los menús de Archivos, Edición, Reportes y Opciones, que se encuentran en la Barra de Tareas.

3.3.1.3 Barra de Estudios

Mediante esta barra se puede tener acceso rápido a los diferentes estudios que ejecuta *RADIAL*, así como borrar los resultados de estudios previos, los que se corresponden a las opciones del menú Análisis de la Barra de Tareas.

3.3.1.4 Barra de Elementos

Los elementos disponibles para editar un diagrama monolineal solo se hallan disponibles en esta barra. Los componentes que la disponen son los nodos, fuentes, líneas, desconectivos, cargas, capacitores y fallas.


3.3.2 Información mínima necesaria para cualquier análisis que se quiera realizar con este *software*

El primer paso para realizar el estudio de un circuito es la edición del diagrama monolineal donde se incorporan todos sus elementos apoyándose en los diferentes íconos de la Barra de Herramienta.

Por ejemplo:

- Líneas (Distancias, calibres y estructuras).
- Transformadores (Potencia, conexión, fases a las que está conectado cada transformador).
- Capacitores (Capacidad y modo de operación).
- Voltaje nominal y de operación.

3.3.3 Introducción de datos a los elementos del monolineal

Una vez conformado el diagrama monolineal del circuito, Figura 3.3, se le incorporan los datos de cada elemento en las ventanas correspondientes. La dirección a cada ventana se realiza con la ayuda del *cursor* de la Barra de Elementos: primero se hace *click* sobre el *cursor*  para pasar al modo de introducción de datos y posteriormente se hace doble *click* sobre el elemento del monolineal deseado con lo que aparece la ventana correspondiente.

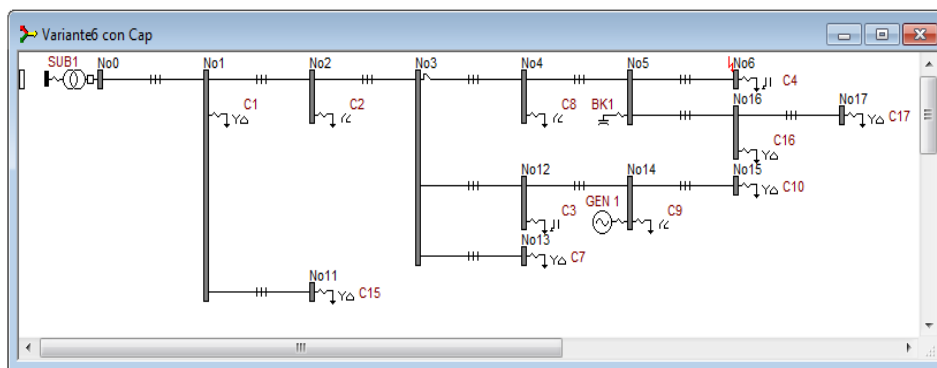


Figura 3.3 Ventana del Monolineal

3.4 Descripción de la Barra de Tareas

Esta barra incorpora muchos de los íconos y funciones de *Windows*.

- **Archivos:** Permite al usuario el trabajo con nuevos proyectos, Figura 3.4, además de crear, abrir, cerrar y guardar el monolineal. También permite configurar una impresora para imprimir el monolineal.



Figura 3.4 Opciones del menú Archivos

- **Edición:** Admite copiar, pegar, cortar, borrar, recodificar (cambiar el nombre), explorar o buscar los elementos del monolineal, Figura 3.5.



Figura 3.5 Opciones del menú Edición

- **Ver:** A partir de aquí, se escogen las Barras de Herramientas que se quieran mostrar en la ventana, Figura3.6.



Figura 3.6 Opciones del menú Ver

- **Bibliotecas:** Contiene todos los datos de los dispositivos o elementos con los que se trabajará en los proyectos, Figura 3.7. Si el usuario necesita trabajar con alguno que no se encuentre dentro de las opciones, deberá incluirlo en Bibliotecas a través del botón Insertar correspondiente.

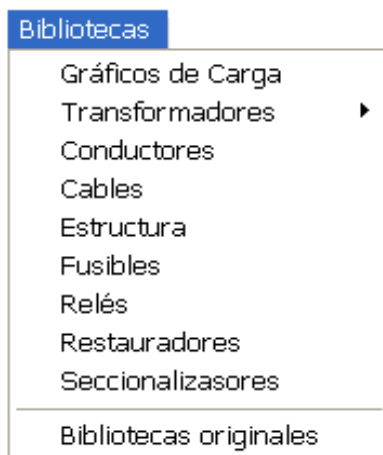


Figura 3.7 Opciones del menú Bibliotecas

Análisis: Por él, se obtienen los resultados de los estudios que propone el *RADIAL* al usuario, Figura 3.8, lo cual solo se puede hacer después de diseñar el monolineal.



Figura 3.8 Ventana de Análisis

Modificaciones: Permite modificar el calibre de los conductores, Figura 3.9, la estructura de las crucetas y dividir el circuito.

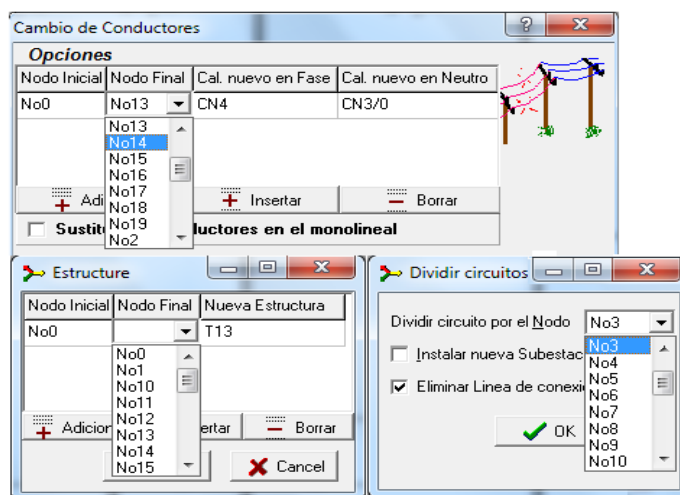


Figura 3.9 Cambio de los conductores, elegir la Estructura y división de los circuitos

Reportes: Aquí *RADIAL* le brinda al usuario de forma gráfica los perfiles de voltajes, corrientes de cortocircuito y de potencia reactiva. También mediante

Reportes, se puede abrir de forma directa los resultados del flujo de carga trifásico o abrir los reportes que estén guardados, Figura 3.10.



Figura 3.10 Opciones del menú Reportes

- **Opciones:** Permiten seleccionar y modificar escenarios de aplicación según las necesidades del usuario, Figura 3.11. *RADIAL* combina varias de ellas para su explotación. Entre las más útiles, está la relacionada con la representación de las cargas por potencia, corriente o impedancia constante, selección que se puede hacer para cada carga en particular, o para el circuito completo. Se dividen en dos grupos:
 - Para aplicaciones: Le permite al usuario cambiar los datos de los estudios que este ejecuta.
 - Las generales: Consisten en que se muestren o no los nombres de las etiquetas y las barras. También permite al usuario elegir los datos que desea mostrar en los nodos, líneas, así como las unidades de medida, los perfiles de voltaje, corriente y potencia, el color para las líneas sobrecargadas, los transformadores sobrecargados y subcargados. Además, en estas, el usuario debe poner el valor mínimo y máximo, así como el título de los gráficos de perfiles que aparecen en Reportes.

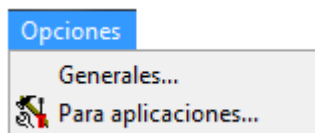


Figura 3.11 Ventana de Opciones.

- **Ventanas:** En el caso de tener más de un circuito abierto, los mismos se encuentran disponibles para realizar estudios o corridas independientes para cada uno de ellos según la opción que seleccione el usuario, Figura 3.12.

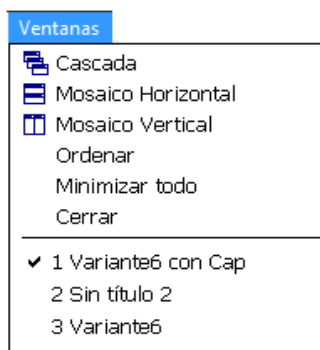


Figura 3.12 Opciones del menú Ventanas

- **Ayuda:** En esta se encuentra todo el contenido del manual de usuario de este *software*, Figura 3.13.

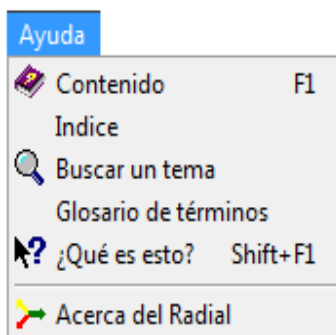


Figura 3.13 Ayuda del *RADIAL* 10.0

3.5 Resultados de los estudios que realiza *RADIAL* 10.0

Algunos resultados que ofrece *RADIAL* se ilustran a continuación por medio de diferentes ventanas de las aplicaciones más comunes de un circuito de 13.8 kV, del cual se muestra una parte en la Figura 3.14.

3.5.1 Flujo de Carga Monofásico

El estudio Flujo de Carga Monofásico le ofrece al usuario un reporte general, Figura 3.14, donde aparecen los valores de las potencias y energías totales de las cargas y de las pérdidas en las líneas y transformadores, el factor de potencia y el factor de carga, el número de iteraciones y la hora del análisis.

Concepto	Valor	U/M	Concepto	Valor	U/M
Potencia activa de las cargas	1853	kW	Energía activa de las cargas	27	MWh/día
Potencia reactiva de las cargas	1116	kvar	Energía reactiva de las cargas	15	Mvar.h/día
Pérdidas activas en líneas	20	kW	Pérdidas de energía activa en líneas	179	kWh/día
Pérdidas reactivas en líneas	31	kvar	Pérdidas de energía reactiva en líneas	287	kvar.h/día
Pérdidas de cobre en transformadores	29	kW	Pérdidas de energía de cobre en transformadores	320	kWh/día
Pérdidas de hierro en transformadores	9	kW	Pérdidas de energía de hierro en transformadores	222	kWh/día
Pérdidas reactiva en transformadores	48	kvar	Pérdidas de energía reactiva en transformadores	577	kvar.h/día
Pérdidas totales de potencia activa	58	kW	Pérdidas totales de energía activa	721	kWh/día
Pérdidas totales de potencia reactiva	80	kvar	Pérdidas totales de energía reactiva	864	kvar.h/día
% de pérdidas de potencia	3	%	% de pérdidas de energía	3	%
Factor de potencia del circuito	0.91		Factor de potencia medio pesado	0.96	
Potencia activa de cogeneración	0	kW	Energía activa de cogeneración	0	kWh/día
Potencia reactiva de cogeneración	0	kvar	Energía reactiva de cogeneración	0	kvar.h/día
Potencia reactiva en capacitores.	300	Ckvar			
Factor de carga del circuito	0.60				

Figura 3.14 Resultado del estudio de Flujo de Carga Monofásico

De igual forma, *RADIAL* muestra los resultados de los Nodos, Líneas y Cargas a los que se acceden desde los botones inferiores de la ventana.

3.5.2 Flujo de Carga Trifásico

En este estudio *RADIAL* le ofrece al usuario los valores de las variables del estudio anterior, Figura 3.15, considerando las cargas asociadas a cada fase.

Reporte de cargas

Nodo	Gráfico horario	Demanda			Conexión	Transformadores	
		P(kW)	Q(kvar)	E(kW.h/día)		Pérdidas (kW/kW.h/día)	
						Cu	Fe
No1	Industrial_1	60	40	648	Estrella Delta	1 / 9	0 / 10
No2	Mixta_R1	98	48	2296	Estrella Abierta	1 / 19	1 / 12
No4	Mixta_R1	84	44	1968	Estrella Abierta	1 / 24	0 / 11
No6	Residencial-1	54	25	1644	Fase-Neutro	0 / 10	0 / 9
No8	Industrial_1	105	70	1134	Estrella Delta	2 / 15	0 / 11
No22	Industrial_1	80	55	864	Estrella Delta	2 / 15	0 / 11

Figura 3.15 Resultado del estudio de Flujo de Carga Trifásico

3.5.3 Estudio de Capacitores

Antes de realizar este estudio el usuario debe recurrir a Opciones/Para Aplicaciones/Capacitores en la Barra de Tareas del *RADIAL* y especificar el valor de la capacidad máxima del banco y los datos económicos, y se dirige a utilizarlos para máxima reducción de pérdidas de potencia o energía. Este ejemplo se realizó ubicando un banco de 300 Ckvar, Figura 3.16.

Estudio para mínimas pérdidas de: **Potencia**

Banco (Ckvar)	Nodo	Inversiones (MP)	Ahorro: DE (MW.h/año)	Disminución de DP (kW)	Benef./Costo	VAN
300	No22	3.5	9.4	4	0.9	-0.5
T O T A L		3.5	9.4	4	0.9	-0.5

Figura 3.16 Resultado del estudio de la Ubicación de Capacitores

3.5.4 Estudio de Cargabilidad de los Transformadores

Para este, *RADIAL* realiza las valoraciones en función de los criterios de por ciento de sobrecarga y de subcarga que da el usuario en Opciones. Los resultados se muestran en la Figura 3.17.

Nodo(s)	Unidad(es) [kV.A]	Demanda [kV.A]	Tipo de Conexión	Fase(s)
TRANSFORMADORES SOBRECARGADOS				
No15	Transformador de Alumbrado (15)	35	Estrella Delta	B
No15	Transformador de Fuerza (10)	25	Estrella Delta	C
TRANSFORMADORES SUBCARGADOS				
No6	Transformador (167)	156	Fase-Neutro	C
No24	Transformador de Alumbrado (100)	90	Estrella Abierta	A

Figura 3.17 Resultado del estudio de la Cargabilidad de los Transformadores

3.5.5 Estudio del Análisis de las Corrientes de Fallas

Aquí *RADIAL* halla las corrientes de cortocircuito en cada nodo del circuito de distribución, partiendo de los niveles existentes por primario de la subestación de subtransmisión que se introducen como datos, Figura 3.18.

Corrientes de Corto-circuito de la subestación al punto de falla		
Lugar de la falla: Nodo: No20		
Tipo de la falla: Trifásica [ABC]		
Icc Fase A (A)	Icc Fase B (A)	Icc Fase C (A)
1582	1582	1582

Figura 3. 18 Resultado del estudio del Análisis de las Corrientes de Fallas

3.5.6 Estudio de Selección y Coordinación de dispositivos de protección

En este estudio *RADIAL*, después de haber calculado los niveles de cortocircuito en cada nodo, ejecuta la coordinación de las protecciones de acuerdo con los dispositivos declarados en el diagrama monolineal del circuito, Figura 3.19. Se puede hacer de dos formas: para todos los nodos o para los nodos con dispositivos de protección.

Nodo	Dispositivo	Selección	Icc 3f(A)	Icc 1f (A)	Icarga (A)
No0	Restaurador	DYT	1652	1697	90

Figura 3.19 Resultado del estudio de la Selección y Coordinación de los dispositivos de Protección

3.5.7 Cambio del calibre de los Conductores

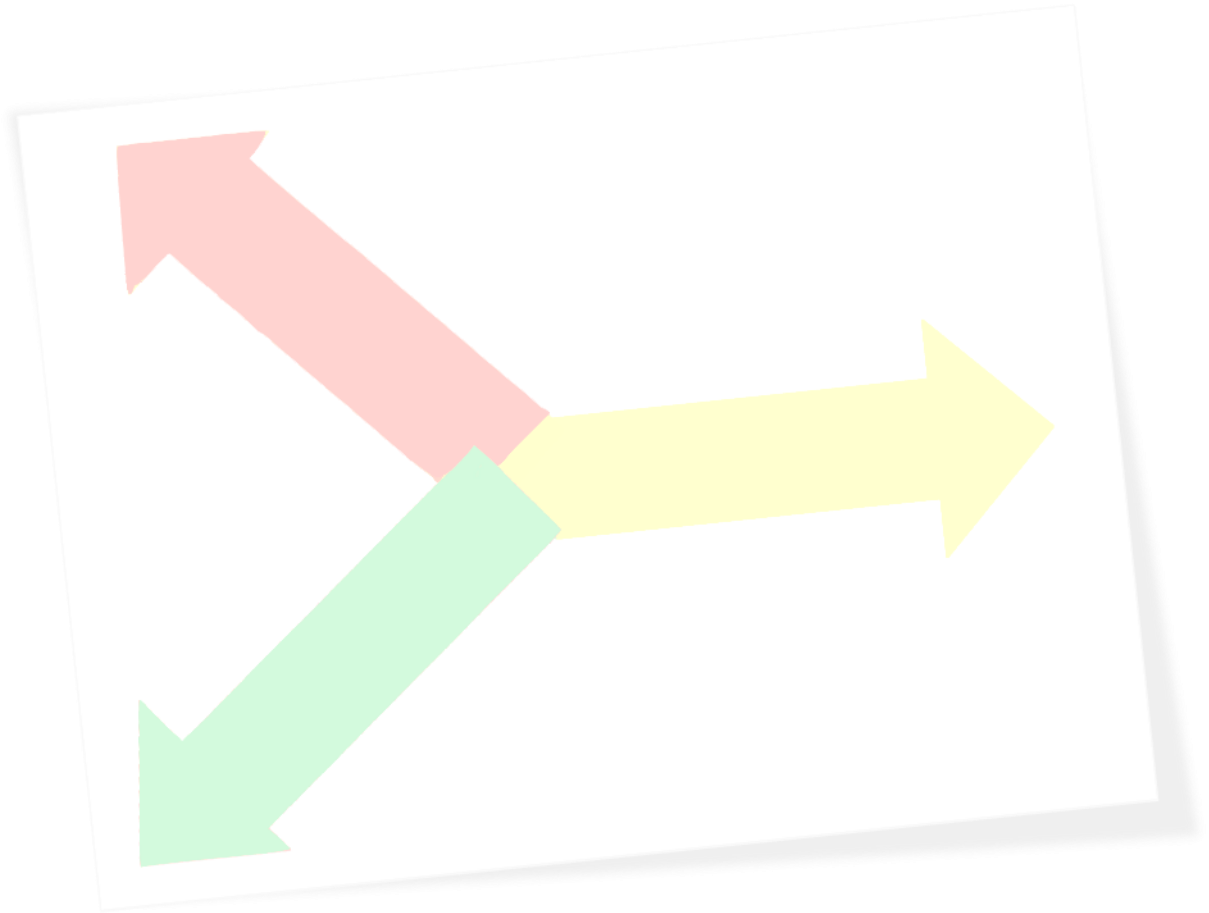
Antes de realizar este estudio el usuario debe ir a Opciones/Para Aplicaciones/Cambio de Conductores en la Barra de Tares del *RADIAL* y poner el valor del costo del cambio de calibre (pesos/km/conductor), el porcentaje de inversión y el tiempo del proyecto, Figura 3.20.

Nodo Inicial	Nodo Final	Cal. nuevo en Fase	Cal. nuevo en Neutro
No0	No1	A50	A50

Figura 3.20 Cambio del calibre de los Conductores

3.6 Consideraciones finales del capítulo

En el capítulo se han expuesto los aspectos fundamentales para el uso del *software RADIAL* especificando requerimientos, funcionalidades y forma de trabajar con el mismo. También se muestran los resultados de los estudios realizados mediante un ejemplo.

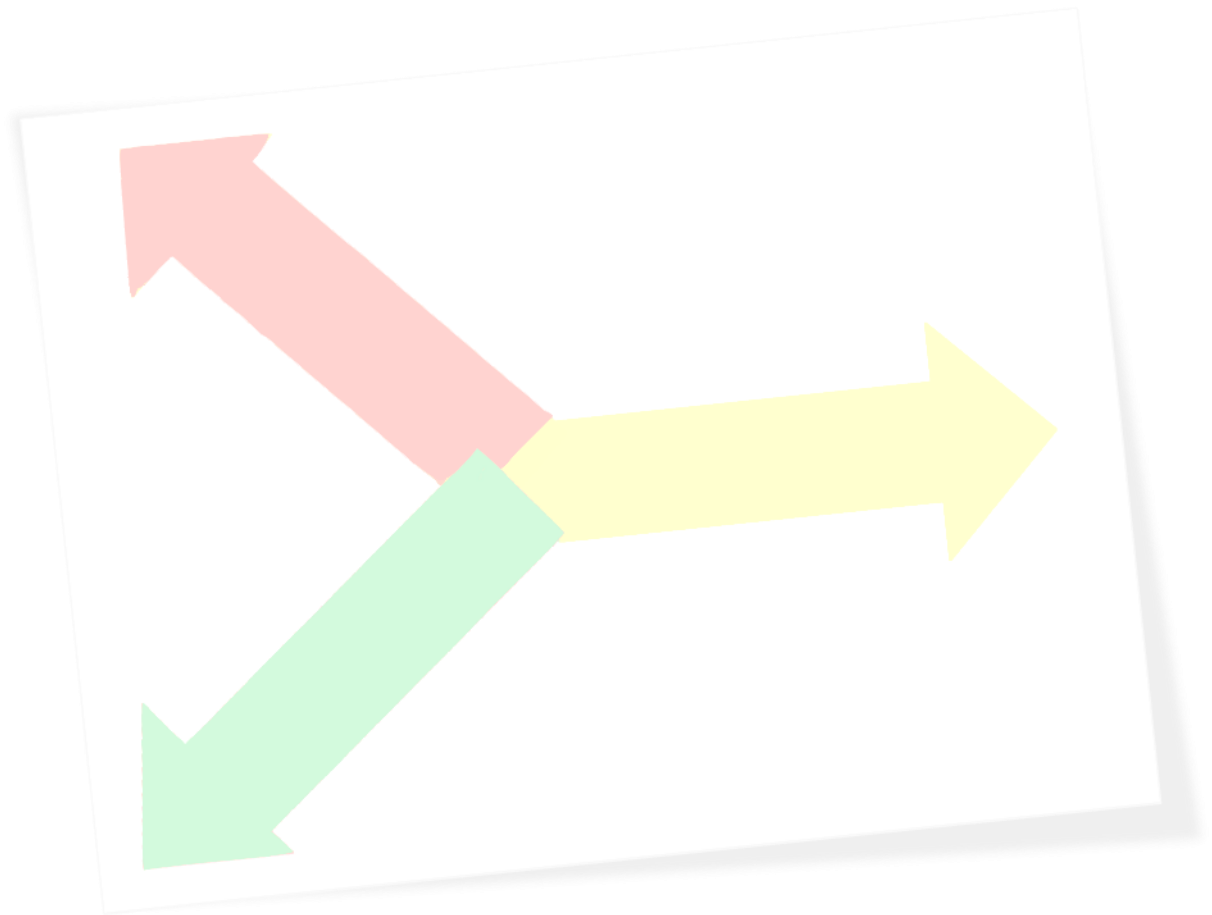


CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Con la realización del manual de usuario, conjuntamente con la tesis permite arribar a las siguientes conclusiones:

1. Se han revisado minuciosamente todas las exigencias necesarias para operar, de forma satisfactoria, un sistema de distribución y se considera que **RADIAL** es un *software* capaz de realizar las más importantes tareas en la edición de los circuitos.
2. Las amplias potencialidades de **RADIAL** obligan a una compleja interacción con los usuarios, a través de múltiples ventanas. Descansando en las posibilidades visuales de las figuras incluidas en el Manual de Usuario, se ha logrado la descripción de las potencialidades del *software* de forma fácil y comprensible.
3. El Manual de Usuario ha sido incorporado a **RADIAL** de forma profesional con la ayuda de *software Help and Manual*, constituyendo uno de los aspectos más relevantes del trabajo desarrollado, pues a partir de él, se pueden responder a las interrogantes que van surgiendo con el uso del *software*.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ramirez Castaño, S., *Redes de Distribución de Energía*, Universidad Nacional de Colombia.
2. De la Fé Dotres, S., *Ajuste de las derivaciones de los transformadores*, Departamento energético. 2004, Universidad de Oriente: Santiago de Cuba.
3. Casas Fernández, L.; Altuve Ferrer, H., *Aplicación de la computación en las redes de distribución*, Facultad Ingeniería Eléctrica. 1987, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara. p. 74.
4. Garcés Ruiz, A., *Flujo de Carga Trifásico para Sistemas Radiales de Distribución*.2004, Universidad Tecnológica de Pereira.
5. Muñoz Montecinos, C.M., *Flujo de potencia trifásico para sistemas de distribución*, Departamento de Ingeniería Eléctrica. 1989, Pontificia Universidad Católica de Chile: Santiago de Chile.
6. López Sarmiento, J.A., *Algoritmos de Flujo de Carga Monofásico y Trifásico para el RADIAL 9.0*, Departamento de Electroenergética. 2011, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Santa Clara, Villa Clara.
7. Rudnick, H., *Flujo de Potencia*, Departamento de Ingeniería Eléctrica. 1978, Universidad Católica de Chile: Santiago de Chile.
8. Grainger, J.J. and W.D.J. Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*. 1ra ed, ed. M.-H.I.D. MÉXICO. 1996, México: LITOGRAFICA INGRAMEX.
9. Vilcahuamán Sanabria, R.C., *Análisis interactivo grafico de Sistemas de Distribución Primaria*, Departamento de Ingeniería Eléctrica. 1993, Pontificia Universidad Católica de Chile: Santiago de Chile.

10. Mekhamer, S.F.; Soliman, M.A.; El-Hawary, M.E., Load flow solution of radial distribution feeders: a new contribution, *Electrical Power and Machines Engineering*; Department of Electrical and Computer Engineering. 2002, A Shams University; Dalhousie University, Cairo, Egypt; NS, Canada.
11. Hsiao-Dong, C.; Mesut, E. B., *On the Existence and Uniqueness of Load Flow .Solution for Radial Distribution Power Networks.* 1990, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS, VOL. 31, NO. 3.
12. Casas Fernández, L., *Sistemas Electroenergéticos*, ed. E.F. Varela. Vol. 1. 2006, La Habana, Ministerio de Educación Superior. 200.
13. Casas Fernández, L., *Conferencias sobre Redes de Distribución Primaria*, Centro de Estudios Electroenergéticos. 2011, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Santa Clara, Villa Clara.
14. Menengoy da Costa, V.; Lavorato de Olivera, M.; Rocha Guedes, M., *Developments in the analysis of unbalanced three-phase power flow solutions.*, Faculdade de Engenharia. 2007, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brazil.
15. Martínez Villavicencio, M., *Programas en MATLAB para la verificación de los estudios de flujo de carga monofásico y trifásico de la nueva versión del software RADIAL*, Departamento de Electroenergética. 2009, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas: Santa Clara, Villa Clara.
16. Gönan, T., *Electric Power Distribution System Engineering.* 1986., New York: McGraw Hill.
17. Hernández Maldonado, A.; Blázquez Maldonado, M.; Rovira Carralero, L.; Ramos Martínez, A.; Hernández Stuart, A., *Generalidades y explotación de transformadores de fuerza.*, Departamento de Electroenergética. 2005, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Santa Clara, Villa Clara.

18. Hernández Maldonado, A., *Acerca de los transformadores.*, Departamento de Electroenergética. 2004, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Santa Clara, Villa Clara.
19. Limonte, A., *Conferencias de transformadores*, Departamento de Electroenergética. 2011, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Santa Clara, Villa Clara.