



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL
CENTRO DEL PERÚ**



**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS

**“ANÁLISIS TÉCNICO DE LA INTERCONEXIÓN ENTRE
EL ALIMENTADOR A4601, Y EL ALIMENTADOR A4605
PERTENECIENTES AL ELECTROCENTRO”**

Código CTI : 0303 0007: Uso eficiente de la energía en el sector industrial.

Código UNESCO : 3306 : Tecnologías Eléctricas.

3306.02 Aplicaciones Eléctricas.

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Presentado por:

BACH. Juan Raul Campos Huaman

Huancayo - diciembre

2 0 1 9

Asesor

Ing. Percy Cueva Rios

Dedicatoria

A Dios, a mis padres.

Agradecimientos

A mis docentes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y
Electrónica.

Índice

Asesor	I
Dedicatoria	II
Agradecimientos.....	III
Índice	IV
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas.....	IX
Resumen	X
Abstrac.....	XII
Introducción.....	13
Capítulo I Planteamiento del estudio.....	14
1.1. Caracterización del problema.	14
1.2. Formulación del problema	15
1.2.1. Formulación del problema	15
1.2.2. Formulación de los problemas específicos.	15
1.3. Objetivos de la investigación.....	15
1.3.1. Objetivo general.....	15
1.3.2. Objetivo específico.	15
1.4. Justificación del estudio.....	15
1.5. Limitaciones del estudio	16
Capítulo II Marco teórico.	17
2.1. Antecedentes.....	17
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	17

2.1.2.	Antecedentes nacionales.	18
2.2.	Bases teóricas.	18
2.2.1.	Sistemas de distribución.	18
2.2.1.1.	Tipos de sistemas de distribución.	20
2.2.1.1.1.	Sistema radial.	20
2.2.1.1.2.	Sistema anillo.	25
2.2.2.	Función de las redes eléctricas.	29
2.2.3.	Funciones de las interconexiones internacionales.	31
2.2.3.1.	Función de transmisión.	32
2.2.3.2.	Función de interconexión propiamente dicha.	32
2.2.3.3.	Función de integración de mercados.	33
2.2.3.4.	Función mixta.	34
2.2.4.	Integración eléctrica regional.	34
2.2.5.	Armonización de reglas.	35
2.2.6.	Simetrías mínimas.	36
2.2.6.1.	Transacciones de energía y de capacidad.	36
2.2.7.	Planificación del sistema de distribución.	38
2.2.8.	Reconfiguración y restauración de los sistemas de distribución.	39
2.2.9.	Fundamentos del análisis del sistema de distribución.	41
2.2.9.1.	Flujos de carga en alimentadores de distribución.	42
2.2.9.1.1.	Representación general de un componente.	42
2.2.9.1.2.	Modelo de red del sistema de distribución.	43
2.2.9.1.3.	Identificación de nodos y ramas.	45
2.2.9.1.4.	Matriz de incidencia.	46
2.2.9.1.5.	Parámetros inductivos de la red de la distribución primaria.	47
2.2.9.1.6.	Expresiones para las caídas del voltaje en RDU.	52
2.2.9.1.7.	Expresiones para las pérdidas de potencia activa RDU.	55

2.2.9.1.8.	Comparación entre las expresiones exactas y reducidas de caída de voltaje.	56
2.2.9.1.9.	Método de solución de flujos de potencia en RD.....	58
2.2.9.2.	Transferencia de carga entre alimentadores.	60
2.2.9.3.	Análisis de cortocircuito.....	61
2.2.9.3.1.	Método de solución de flujos de potencia en RD.....	62
2.2.10.	Protecciones de los sistemas de distribución.	63
2.2.10.1.	Diseño del sistema de protecciones.....	64
2.3.	Hipótesis.	65
2.3.1.	Hipótesis general.....	65
2.3.2.	Hipótesis específica.....	65
2.4.	Variables	65
Capítulo III Metodología de la investigación.		66
3.1.	Tipo de investigación.	66
3.2.	Nivel de investigación.....	66
3.3.	Métodos de investigación.	67
3.4.	Instrumentos de recopilación de datos	67
3.5.	Procedimiento de recopilación de datos.....	67
3.6.	Procedimiento de análisis de resultados.	67
Capítulo IV Resultados de la investigación.....		69
4.1.	Sistema eléctrico del valle de Yacus.....	69
4.2.	Flujo de potencia del sistema eléctrico	71
4.2.1.	Flujo de potencia del alimentador A4601	71
4.2.1.1.	Características de las redes primarias del alimentador A4601.....	71
4.2.1.2.	Flujo de carga del alimentador A4601.	75
4.2.1.3.	Flujo de potencia del alimentador A4605	77
4.2.1.4.	Características de las redes primarias del alimentador A4605.....	78

4.2.1.5. Flujo de carga del alimentador A4605.....	84
4.2.1.6. Perfil de tensión y cargabilidad de los principales puntos	88
4.3. Discusión de resultados de flujo de potencia.....	91
Conclusiones.....	92
Recomendaciones	93
Bibliografía.....	94
Anexos.....	95

Índice de Figuras

Figura 1: Estructura básica de un sistema eléctrico.....	19
Figura 2: Forma más simple del sistema de distribución radial.	21
Figura 3: Diagrama unifilar de un sistema de distribución radial aéreo.....	23
Figura 4: Diagrama unifilar de un sistema de distribución radial subterráneo.....	24
Figura 5: Sistema red o malla.....	28
Figura 6: Estructura típica de un sistema de suministro de electricidad.....	31
Figura 7: Incremento del costo marginal del sistema exportador.....	38
Figura 8: Modelo de representación general de componente del alimentador	43
Figura 9: Modelo de línea trifásica desequilibrada.....	44
Figura 10: Modelo trifásico aproximado de impedancias de fase	45
Figura 11: Alimentador radial de 8 nodos	46
Figura 12: Columna de ordenamiento de nodos y matriz de incidencia.....	47
Figura 13: Circuito trifásico de 4 hilos con neutro puesto a tierra	48
Figura 14: Modelo de impedancia simple para un ramal trifásico de 3 o 4 hilos.....	52
Figura 15: Sistema de 2 alimentadores radiales para transferencia de carga	61
Figura 16: Características del transformador ELECTROCENTRO - XAUXA.....	70

Índice de Tablas

Tabla 1 Tipo de intercambio.	36
Tabla 2 Columna de ordenamiento de nodos.	47
Tabla 3 Matriz de incidencia.....	47
Tabla 4 Expresiones para las caídas de voltaje en Voltios de circuitos trifásicos y monofásicos.	55
Tabla 5 Expresiones para las caídas de voltaje en % de circuitos trifásicos y monofásicos.	56
Tabla 6 Operalización de las variables X-Y.....	67
Tabla 7 Características de los conductores del alimentador A4601.....	73
Tabla 8 Características de los conductores del alimentador A4601.....	74
Tabla 9 Características de los conductores del alimentador A4601.....	75
Tabla 10 Características de los conductores del alimentador A4601.	76
Tabla 11 Características de los conductores del alimentador A4601.	77
Tabla 12 Flujo de carga del alimentador A4601.	77
Tabla 13 Flujo de carga del alimentador A4601.....	77
Tabla 14 Flujo de carga del alimentador A4601.	79
Tabla 15 Características de las redes primarias del alimentador A4605.....	80
Tabla 16 Características de las redes primarias del alimentador A4605.....	81
Tabla 17 Características de las redes primarias del alimentador A4605.....	82
Tabla 18 Características de las redes primarias del alimentador A4605.....	83
Tabla 19 Características de las redes primarias del alimentador A4605.....	84
Tabla 20 Características de las redes primarias del alimentador A4605.....	85
Tabla 21 Resultados de flujo de carga del alimentador A4605.....	86
Tabla 22 Resultados de flujo de carga del alimentador A4605.....	87

Tabla 23 Resultados de flujo de carga del alimentador A4605.	88
Tabla 24 Resultados de flujo de carga del alimentador A4605.	88
Tabla 25 Perfiles de tensión de los principales puntos del alimentador	89
Tabla 26 Perfiles de tensión de los principales puntos del alimentador	89
Tabla 27 Cargabilidad de las principales redes primarias del alimentador	90
Tabla 28 Perfil de tensión valle de yacus A4605.	91
Tabla 29 Perfiles de tensión de los principales puntos del alimentador	91
Tabla 30 Perfiles de tensión de los principales puntos del alimentador.	92
Tabla 31 Cargabilidad de las principales redes primarias del alimentador	93

Resumen

Los sistemas eléctricos en el Perú desde las redes locales y las redes aisladas hasta conformar el sistema interconectado nacional que abarca prácticamente la totalidad del país, que se da a consecuencia de la interconexión.

Los beneficios que proporciona la interconexión de sistemas eléctricos, nos brindan varios resultados dentro de los principales están:

- Mejor uso de recursos energéticos.
- Mejor aprovechamiento de la topología de las redes.
- Mejores índices de confiabilidad.
- Ampliar el mercado eléctrico, reducción de precios y aprovechamiento estacional y horario de la oferta y demanda de la energía eléctrica.

Los sistemas interconectados que brindan mayor seguridad al sistema eléctrico, ya que sirven como medios de respaldo para garantizar la seguridad y confiabilidad del suministro eléctrico, reducción inversiones en centrales eléctricas de reserva y evitar inversión en vano.

Por otro lado, se tiene que tener en consideración que las interconexiones eléctricas también introducen efectos negativos en los sistemas eléctricos, dentro de los cuales se encuentran los costos adicionales de modificar la infraestructura eléctrica de interconexión, el incremento de los costos marginales internos del exportador, modificaciones del mercado eléctrico, mayor explotación de los recursos energéticos no renovables y el impacto al medio ambiente.

En tanto ha quedado demostrado empíricamente que la integración de las diferentes redes eléctricas trae múltiples beneficios, estos beneficios son mutuos para todos los alimentadores que se interconectan.

Analizando las características sobre el trabajo de investigación para ver los volúmenes de transferencia de carga entre las redes eléctricas se recurre a las herramientas computacionales para realizar las simulaciones y análisis de la topología de la red. Para tener un análisis de los alimentadores se hace la simulación el software especializado DigSilent

Abstrac

Electrical systems in Peru from local networks and isolated networks to form the national interconnected system that covers practically the entire country, which occurs as a result of interconnection.

The benefits provided by the interconnection of electrical systems, give us several results within the main ones are:

- Better use of energy resources.
- Better use of network topology.
- Better reliability rates.
- Expand the electricity market, price reduction and seasonal and hourly use of the supply and demand of electricity.

The interconnected systems that provide greater security to the electrical system, as they serve as backup means to guarantee the security and reliability of the electricity supply, reduce investments in reserve power plants and avoid investment in vain.

On the other hand, it must be taken into account that electrical interconnections also introduce negative effects on electrical systems, which include the additional costs of modifying the interconnection electrical infrastructure, the increase in the exporter's internal marginal costs, modifications of the electricity market, greater exploitation of non-renewable energy resources and the impact on the environment.

While it has been empirically demonstrated that the integration of the different power networks brings multiple benefits, these benefits are mutual for all the interconnecting feeders.

Analyzing the characteristics on the research work to see the volumes of load transfer between the electrical networks, the computational tools are used to perform the simulations and analysis of the network topology. To have an analysis of the feeders, the simulation is done by specialized DigSilent software.

Introducción

El tema del proyecto de tesis se encuentra en la línea de investigación de pertenecientes a la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la UNCP. El tema es análisis de la interconexión entre el alimentador A4601 y el alimentador A4605, pertenecientes al Electrocentro, que pertenece a la sub línea de investigación de Distribución y a la línea general de investigación de Energía Eléctrica.

El proyecto de tesis tiene como fin el análisis técnico de la interconexión de alimentadores eléctricos en el valle de Yacus, Jauja. La investigación se modelará y simulará para realizar el análisis del sistema eléctrico y el comportamiento al interconectar los dos alimentadores, para interconectar dos sistemas eléctricos, como una ruta alterna de alimentación, mejorar los índices de confiabilidad del sistema eléctricos.

La presente tesis se encuentra dividida en los siguientes análisis:

- En el capítulo I se presenta el planteamiento del problema.
- En el capítulo II se presenta el marco teórico en la cual se hace un análisis del sistema eléctrico que corresponde básicamente identificando los parámetros eléctricos para realizar los estudios de la simulación para la interconexión.
- En el capítulo III se presenta la metodología de la investigación.
- En el capítulo IV se presenta los resultados y discusión de resultados de las simulaciones para la interconexión de los dos alimentadores, esto se realiza con la ayuda del software DigSilent Power Factory.

Finalmente se presenta las conclusiones, además se presenta las recomendaciones y su respectiva bibliografía de la tesis.

Capítulo I

Planteamiento del estudio

1.1. Caracterización del problema.

El presente trabajo surge con el fin de mantener la continuidad del servicio eléctrico en la ciudad de Jauja, abastecida por dos alimentadores A4601 y A4605, perteneciente a la concesionaria Electrocentro.

El sistema eléctrico del Valle de Yacus, se caracteriza por una población rural en crecimiento y por la presencia de pequeños negocios, siendo importante mantener el suministro eléctrico de forma continua, debido a las pérdidas que implica una salida de servicio del alimentador.

Por lo citado líneas arriba surge la necesidad de realizar el análisis técnico de la interconexión entre los dos alimentadores, para una transferencia de carga ente alimentadores, esto a partir del análisis de flujo de potencia bajo condiciones normales de operación y ante situaciones de transferencia de carga con el propósito de determinar la cantidad de carga que se puede transferir entre los alimentadores

Estos análisis se basan principalmente en los análisis de flujo de potencia, en condiciones normales y ante contingencias como: fallas (cortocircuitos), considerando la transferencia de carga, ya sea para reducir pérdidas o para el restablecimiento del servicio, a partir de una metodología que garantice la veracidad de los resultados.

1.2. Formulación del problema.

1.2.1. Formulación del problema.

¿Cómo realizar el análisis técnico de la interconexión entre el alimentador A4601 y el alimentador A4605, pertenecientes al Electrocentro?

1.2.2. Formulación de los problemas específicos.

¿Cómo modelar y simular la interconexión entre el alimentador A4601 y el alimentador A4605, pertenecientes al Electrocentro?

1.3. Objetivos de la investigación.

1.3.1. Objetivo general.

Realizar el análisis técnico de la interconexión entre el alimentador A4601 y el alimentador A4605, pertenecientes al Electrocentro.

1.3.2. Objetivo específico.

Modelar y simular la interconexión entre el alimentador A4601 y el alimentador A4605, pertenecientes al Electrocentro.

1.4. Justificación del estudio.

Práctica

En presente proyecto de tesis tiene justificación porque se realizará el análisis técnico de la interconexión entre el alimentador A4601 y el alimentador A4605, pertenecientes

al Electrocentro, para que se transfiera la carga ante posibles contingencias de operación.

Social

La presente tesis tiene justificación social porque el análisis de este tipo de interconexiones garantizara un servicio continuo de la energía eléctrica los consumidores finales o usuarios.

Metodológica

La presente tesis tiene justificación metodología porque se utilizará métodos de modelar y simular los sistemas eléctricos, para un análisis de interconexión entre dos alimentadores. Esta metodología servirá para replicar en los proyectos similares a esta investigación.

1.5. Limitaciones del estudio

La limitación fue del tipo económica, en esta instancia se manejó adecuadamente ese aspecto.

Capítulo II

Marco teórico.

2.1. Antecedentes.

2.1.1. Antecedentes internacionales.

Juan José MORA FLÓREZ (2007) en su tesis de título profesional de Doctor electricista titulada, **LOCALIZACIÓN DE FALTAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA USANDO MÉTODOS BASADOS EN EL MODELO Y MÉTODOS BASADOS EN EL CONOCIMIENTO.**

Los resultados de aplicación, demuestran que, con la combinación de los MCBC con los MBM, se puede reducir el problema de la múltiple estimación del sitio de falta. El MCBC determina la zona de falta, mientras que el MBM encuentra la distancia desde el punto de medida hasta la falta, integración en un esquema híbrido toma las mejores características de cada método. En este documento, lo que se conoce como híbrido es la combinación de los MBM y los MCBC de una forma complementaria. (Mora Florez, 2007,p.95)

2.1.2. Antecedentes nacionales.

Nathaly Mary, Espinoza Surco (2016) en su tesis de titulada, **MEJORAMIENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA CIUDAD DE PUERTO MALDONADO EN MEDIA TENSIÓN**, concluye lo siguiente:

En estos últimos años la ciudad de Puerto Maldonado, conectado a las redes de Electro Sur Este S.A.A. en un nivel de tensión de 138/10 kV., está recibiendo un incremento considerable de la demanda de energía eléctrica, pero en lo que respecta a ser confiable, suficiente y oportuno, el problema sigue existiendo. Así mismo los sistemas eléctricos han sufrido un cambio cualitativo debido al desarrollo tecnológico y los programas de conservación y uso eficiente de la energía, y la interconexión de diversos sistemas eléctricos, produciendo una serie de problemas en la calidad de energía eléctrica suministrada. (Espinoza,2016, p.105)

La incidencia energética en el desarrollo la ciudad de Puerto Maldonado se realiza con la finalidad de mejorar la calidad de servicio energético que brinda la empresa concesionaria, en este criterio se debe tener muy en cuenta el límite de cargabilidad de los alimentadores y sub estaciones.” (Espinoza Surco, 2016, p.108)

2.2. Bases teóricas.

2.2.1. Sistemas de distribución.

“Un sistema de distribución eléctrico o planta de distribución como comúnmente es llamado, es toda la parte del sistema eléctrico de potencia comprendida entre la planta eléctrica y los apagadores del consumidor.

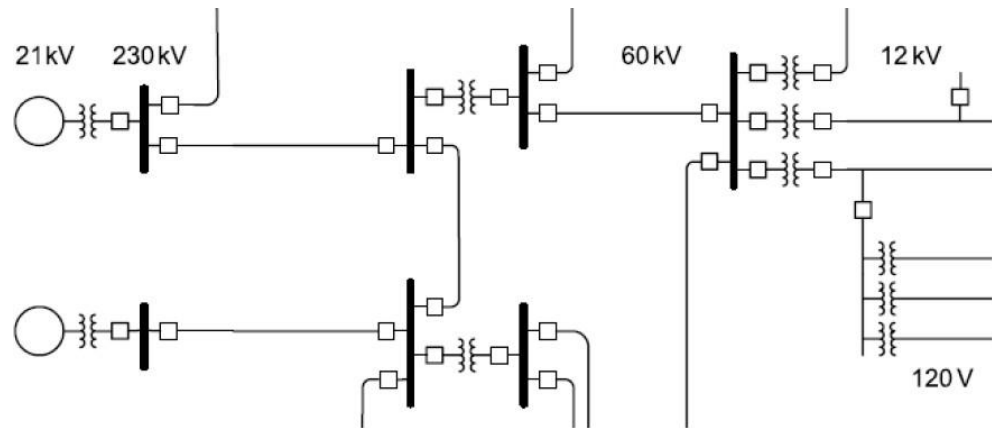


Figura 1: Estructura básica de un sistema eléctrico

El problema de la distribución es diseñar, construir, operar y mantener el sistema de distribución que proporcionará el adecuado servicio eléctrico al área de carga a considerarse, tomando en cuenta la mejor eficiencia en operación. Desafortunadamente, no cualquier tipo de sistema de distribución puede ser empleado económicamente hablando en todas las áreas por la diferencia en densidad de carga, por ejemplo: no aplica el mismo sistema para una zona industrial que una zona rural debido a la cantidad de carga consumida en cada uno de ellos; también, se consideran otros factores, como son: la planta de distribución existente, la topografía, etcétera.

Para diferentes áreas de carga o incluso para diferentes partes de la misma área de carga, el sistema de distribución más efectivo podría tomar diferentes formas. El sistema de distribución debe proveer servicio con un mínimo de variaciones de tensión y el mínimo de interrupciones, debe ser flexible para permitir expansiones en pequeños incrementos, así como para reconocer cambios en las condiciones de carga con un mínimo de modificaciones y gastos. Esta flexibilidad permite guardar la capacidad del sistema cercana los requerimientos actuales de carga y por lo tanto permite que el sistema use de manera más efectiva la infraestructura. Además y sobre todo elimina la necesidad para predecir la localización y magnitudes de las cargas futuras.

Los sistemas pueden ser por cableado subterráneo, cableado aéreo, cableado abierto de conductores soportado por postes o alguna combinación de estos.

2.2.1.1. Tipos de sistemas de distribución.

Existen tres tipos de sistemas básicos de distribución, los cuales son:

- Sistema radial
- Sistema anillo
- Sistema en malla o mallado

Estos tipos de sistemas, son los más comúnmente utilizados, por lo que en los siguientes temas se dará una explicación de su funcionalidad, características, ventajas, desventajas y particularidades que tiene cada uno de ellos.

Al utilizar un sistema de distribución este estará expuesto inevitablemente a un buen número de variables tanto técnicas como locales y ante todo una variable económica por lo que los sistemas de distribución no tienen una uniformidad, es decir, que un sistema eléctrico será una combinación de sistemas.

2.2.1.1.1. Sistema radial.

Es aquel que cuenta con una trayectoria entre la fuente y la carga, proporcionando el servicio de energía eléctrica.

Un sistema radial es aquel que tiene un simple camino sin regreso sobre el cual pasa la corriente, parte desde una subestación y se distribuye por forma de “rama”, como se ve en la siguiente figura.

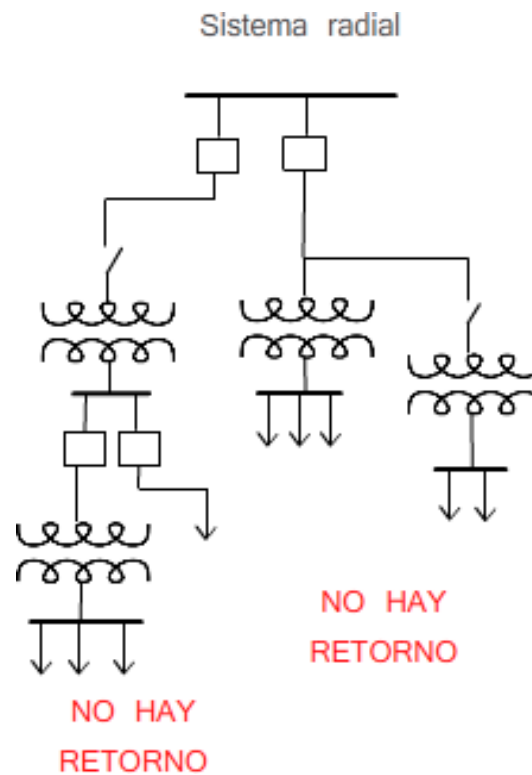


Figura 2: Forma más simple del sistema de distribución radial.

Este tipo de sistema de distribución tiene como característica básica, el que está conectado a un sólo juego de barras.

Existen diferentes tipos de arreglo sobre este sistema, la elección del arreglo está sujeta a las condiciones de la zona, demanda, confiabilidad de continuidad en el suministro de energía, costo económico y perspectiva a largo plazo.

Este tipo de sistema, es el más simple y el más económico debido a que es el arreglo que utiliza menor cantidad de equipo, sin embargo, tiene varias desventajas por su forma de operar:

- El mantenimiento de los interruptores se complica debido a que hay que dejar fuera parte de la red.

- Son los menos confiables ya que una falla sobre el alimentador primario principal afecta a la carga.

Este tipo de sistemas es instalado de manera aérea y/o subterránea. A continuación, se explicará cada una de estas formas ya que tienen características particulares.

Sistemas radiales aéreos

Los sistemas de distribución radiales aéreos se usan generalmente en las zonas urbanas, suburbanas y en las zonas rurales.

Los alimentadores primarios que parten de la subestación de distribución están constituidos por líneas aéreas sobre postes y alimentan los transformadores de distribución, que están también montados sobre postes. En regiones rurales, donde la densidad de carga es baja, se utiliza el sistema radial puro. En regiones urbanas, con mayor densidad de carga se utiliza también el sistema radial, sin embargo, presenta puntos de interconexión los cuales están abiertos, en caso de emergencia, se cierra para permitir pasar parte de la carga de un alimentador a otro, para que en caso de falla se pueda seccionar esta y mantener su operación al resto mientras se efectúa la reparación.

La principal razón de ser de los sistemas radiales aéreos radica en su diseño de pocos componentes, y por ende su bajo costo de instalación, aunque puede llegar a tener problemas de continuidad de servicio.

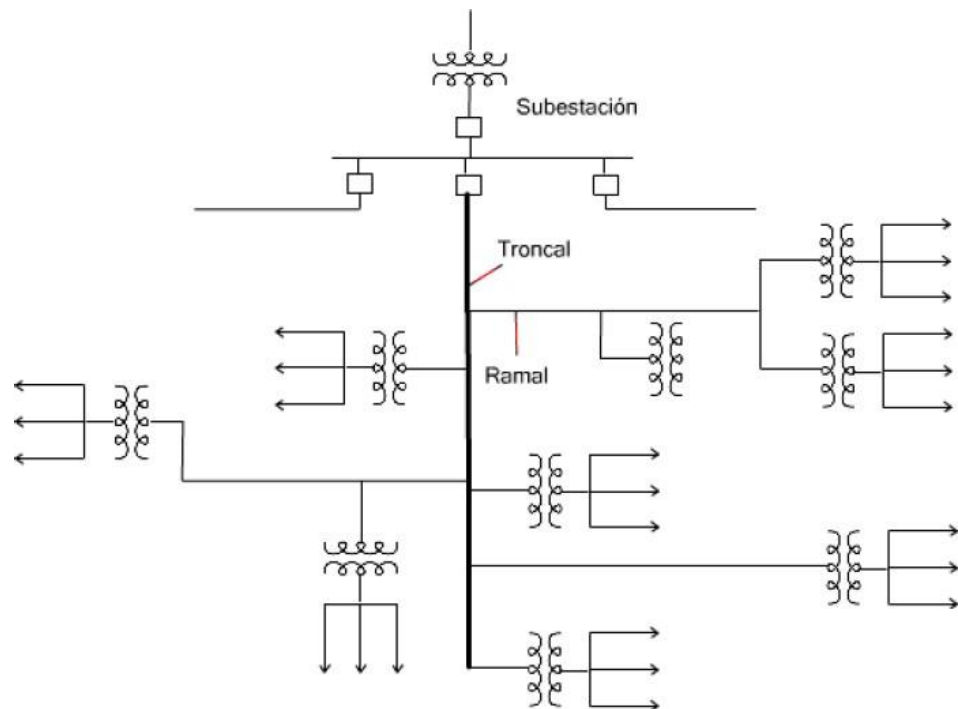


Figura 3: Diagrama unifilar de un sistema de distribución radial aéreo

Sistemas radiales subterráneos

La necesidad de líneas subterráneas en un área en particular es dictaminada por las condiciones locales. La elección del tipo de sistema depende sobre todo de la clase de servicio que se ofrecerá a los consumidores en relación al costo.

Los sistemas de distribución radiales subterráneos se usan en zonas urbanas de densidad de carga media y alta donde circulen líneas eléctricas con un importante número de circuitos dando así una mayor confiabilidad que si se cablearan de manera abierta.

Los sistemas de distribución subterráneos están menos expuestos a fallas que los aéreos, pero cuando se produce una falla es más difícil localizarla y su reparación lleva más tiempo. Por esta razón, para evitar interrupciones prolongadas y proporcionar flexibilidad a la operación, en el caso de los

sistemas radiales subterráneos se colocan seccionadores para permitir pasar la carga de un alimentador primario a otro. También se instalan seccionadores para poder conectar los circuitos secundarios, para que en caso de falla o de desconexión de un transformador, se puedan conectar sus circuitos secundarios a un transformador contiguo.

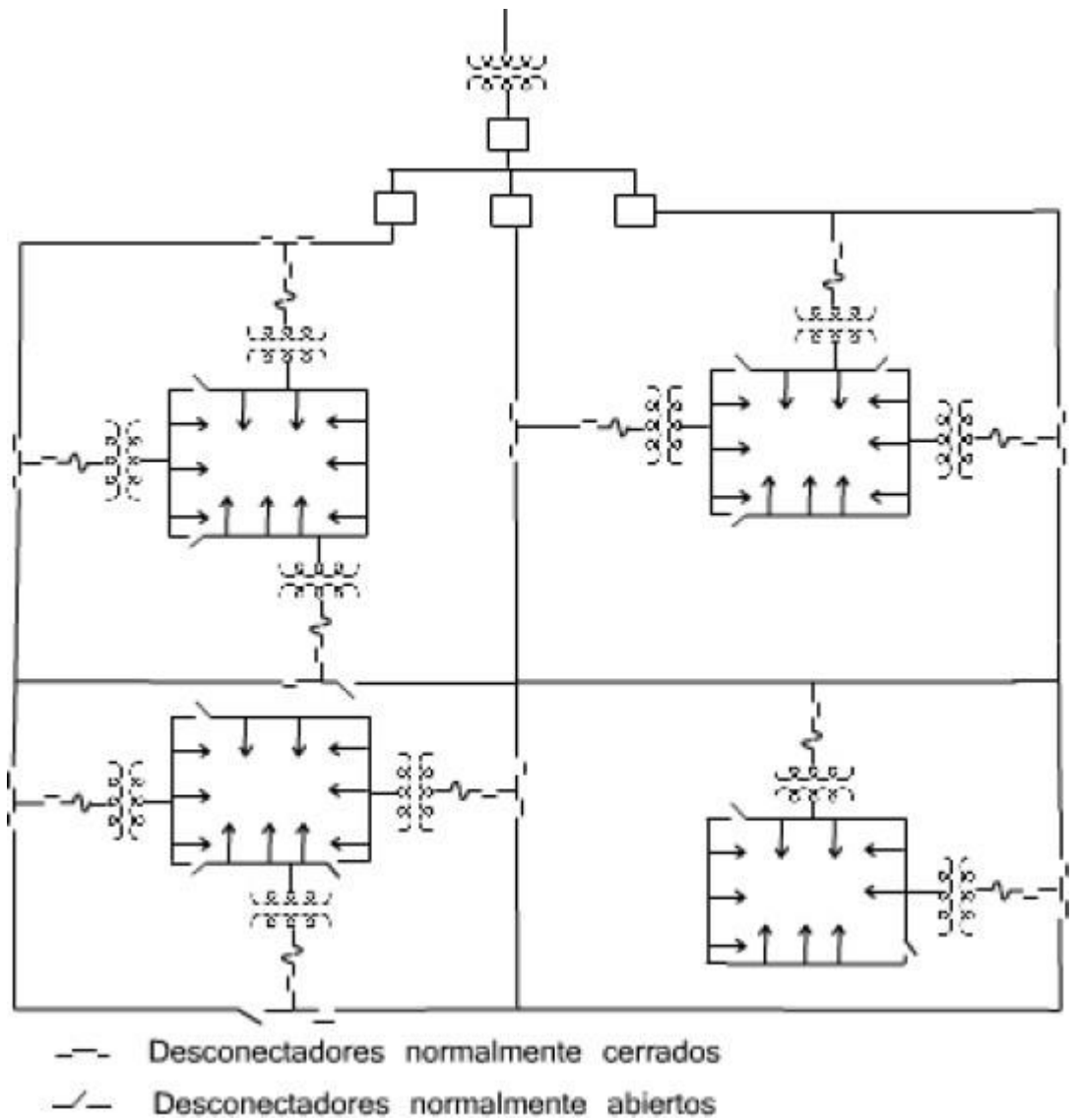


Figura 4: Diagrama unifilar de un sistema de distribución radial subterráneo

Existe la tendencia a realizar la distribución eléctrica de zonas residenciales suburbanas mediante instalaciones subterráneas.

Generalmente los alimentadores primarios consisten en cables subterráneos dispuestos formando un anillo, que funciona normalmente abierto, conectados a un alimentador aéreo próximo.

2.2.1.1.2. Sistema anillo.

Es aquel que cuenta con más de una trayectoria entre la fuente o fuentes y la carga para proporcionar el servicio de energía eléctrica.

Este sistema comienza en la estación central o subestación y hace un “ciclo” completo por el área a abastecer y regresa al punto de donde partió. Lo cual provoca que el área sea abastecida de ambos extremos, permitiendo aislar ciertas secciones en caso de alguna falla.

Este sistema es más utilizado para abastecer grandes masas de carga, desde pequeñas plantas industriales, medianas o grandes construcciones comerciales donde es de gran importancia la continuidad en el servicio.

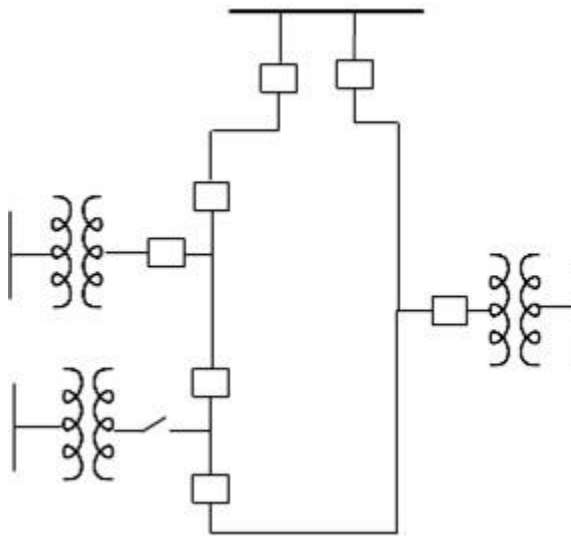


Figura 5: Sistema anillo

Cualquier variante del sistema en anillo, normalmente provee de dos caminos de alimentación a los transformadores de distribución o subestaciones secundarias. En general, la continuidad del servicio y la regulación de tensión que ofrece este sistema son mejor que la que nos da el sistema radial. La variación en la calidad del servicio que ofrecen ambos sistemas, depende de las formas particulares en que se comparen.

Regularmente, el sistema anillo tiene un costo inicial mayor y puede tener más problemas de crecimiento que el sistema radial, particularmente en las formas utilizadas para abastecer grandes cargas. Esto es principalmente porque dos circuitos deben ponerse en marcha por cada nueva subestación secundaria, para conectarla dentro del anillo. El añadir nuevas subestaciones en el alimentador del anillo obliga a instalar equipos que se puedan anidar en el mismo.

A continuación, mostramos las ventajas en operación de este sistema:

- Son los más confiables ya que cada carga en teoría se puede alimentar por dos trayectorias.
- Permiten la continuidad de servicio, aunque no exista el servicio en algún transformador de línea.
- Al salir de servicio cualquier circuito por motivo de una falla, se abren los dos interruptores adyacentes, se cierran los interruptores de enlace y queda restablecido el servicio instantáneamente. Si falla un transformador o una línea la carga se pasa al otro transformador o línea o se reparte entre los dos adyacentes.
- Si el mantenimiento se efectúa en uno de los interruptores normalmente cerrados, al dejarlo desenergizado, el alimentador respectivo se transfiere al circuito vecino, previo cierre automático del interruptor de amarre.

Sistema red o malla

Una forma de subtransmisión en red o en malla provee una mayor confiabilidad en el servicio que las formas de distribución radial o en anillo ya que se le da alimentación al sistema desde dos plantas y le permite a la potencia alimentar de cualquier planta de poder a cualquier subestación de distribución.

Este sistema es utilizado donde la energía eléctrica tiene que estar presente sin interrupciones, debido a que una falta de continuidad en un periodo de tiempo prolongado tendría grandes consecuencias, por ejemplo: en una fundidora.”

(Transmission and distribution, chapter 20 Distribution systems, 2008)

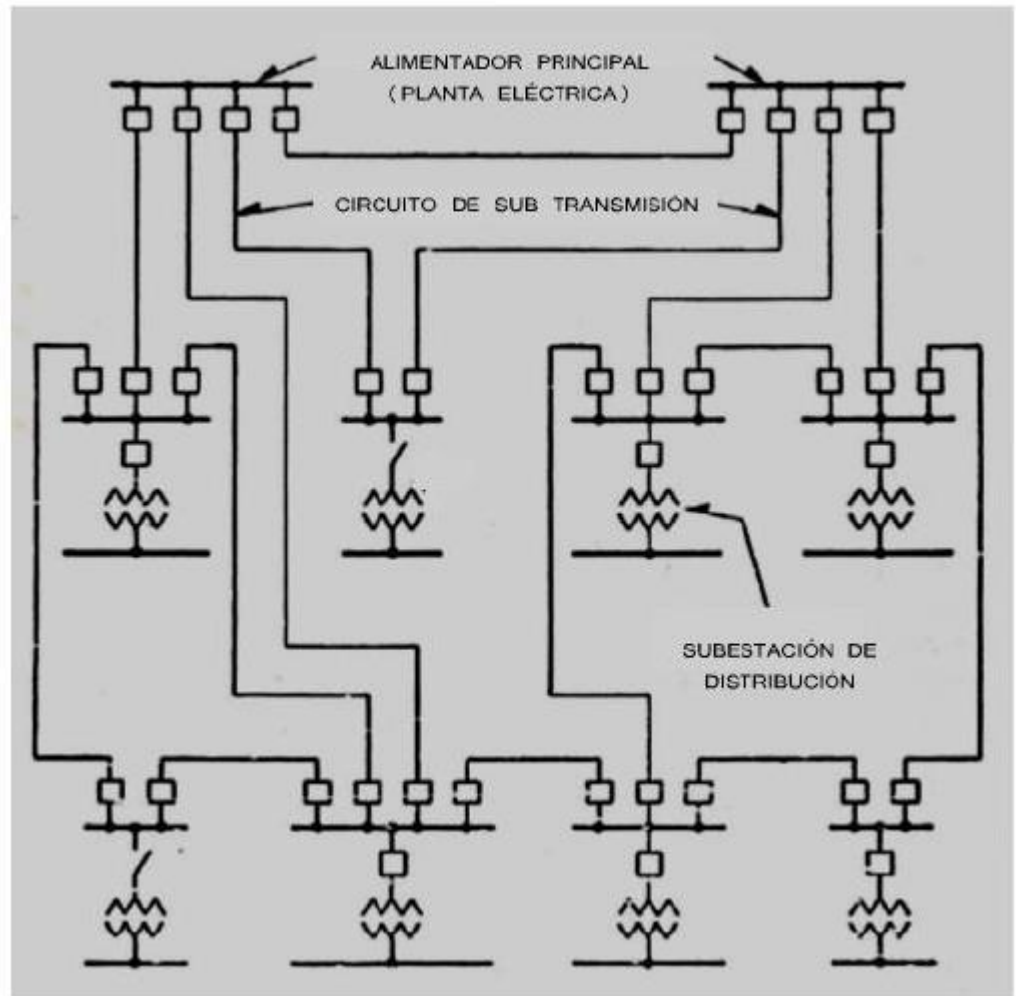


Figura 6: Sistema red o malla

2.2.2. Función de las redes eléctricas.

El grado de desarrollo y utilización de la energía para realizar trabajo es una medida del progreso industrial de una sociedad. El descubrimiento y explotación de fuentes de energía en la naturaleza, su conversión en otras formas más útiles y su transporte en sus variadas formas de un lugar a otro, son parte esencial de una economía industrial.

Su transformación en energía eléctrica es uno de los medios más efectivos y difundidos para facilitar su transporte y uso en las distintas aplicaciones industriales, urbanas y domésticas.

El único medio para transportar energía en forma de electricidad, son las líneas de transmisión. Comúnmente las fuentes de energía hidráulica, nuclear, gas, carbón u otras fuentes renovables están ubicadas lejos de las zonas urbano industriales, por lo que la generación de energía eléctrica, que se efectúa en el lugar de origen, debe ser transportada por líneas de transmisión hasta los centros de consumo donde finalmente se distribuye a los usuarios para su utilización en luz, calor, energía mecánica y otros usos.

Un sistema de suministro eléctrico se compone de tres partes principales: las centrales generadoras, las redes de transporte y las redes de distribución. Al conjunto de generadores y redes de transporte en alta o muy alta tensión se le denomina Sistema Eléctrico de Potencia, y de éste se derivan los sistemas o redes de distribución. Por lo tanto, esquemáticamente un sistema de suministro eléctrico se divide en: generación, sistema de transmisión, sistemas de subtransmisión y redes de distribución primaria y secundaria.

En las plantas o centrales de generación, la energía primaria (hidroenergía, combustibles fósiles o energías no convencionales) se transforma en energía eléctrica en corriente alterna.

Los sistemas de transmisión cumplen la función de transmitir grandes bloques de potencia y energía entre las centrales de generación y los centros de consumo, mediante líneas de transmisión en alta, muy alta y extra alta tensión

(mayor a 138 kV) y cuya extensión abarca por lo general todo el territorio de un país, constituyendo los Sistemas Eléctricos Nacionales (SEN).

Los sistemas de sub-transmisión están conformados también por líneas de transmisión, pero de menor tensión y en general abarcan sólo determinadas zonas geográficas, cumplen la función de repartir la energía del SEN a un número determinado de subestaciones de distribución y a grandes industrias. Los niveles de tensión varían típicamente entre 33 a 138 kV.

Finalmente, las redes de distribución primaria y secundaria tienen la función de distribuir o repartir la energía eléctrica a los usuarios finales, dentro de zonas urbanas o zonas geográficas más limitadas (incluido las redes rurales). Las redes primarias son en media tensión (entre 30 a 10 kV) y las redes secundarias en baja tensión (entre 110 a 380 Voltios). Dependiendo de las restricciones o normas urbanas pueden ser del tipo aéreo o subterráneo.

Los enlaces entre los sistemas de distinto nivel de tensión (voltaje) se efectúan mediante los transformadores de potencia, que permiten elevar o reducir la tensión. Los equipos de transformación, maniobra, medición, protección y control están ubicados en las subestaciones de potencia.

En la siguiente figura se aprecia el esquema de configuración típica de un sistema de suministro de energía eléctrica. (Aragon Castro, 2013,p.150)

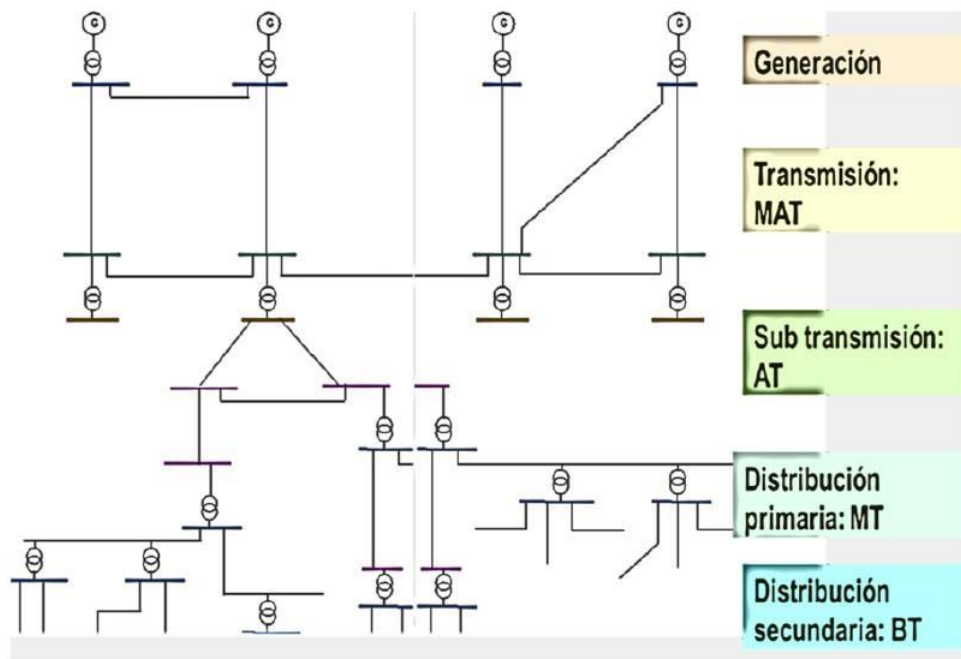


Figura 7: Estructura típica de un sistema de suministro de electricidad

“Un sistema eléctrico de potencia tiene por objetivo suministrar energía eléctrica a varias cargas en un área de servicio dada. La energía suministrada debe ser en la cantidad y lugar que sus usuarios lo demanden. Además de garantizar las condiciones de calidad y seguridad de suministro, la energía eléctrica debe ser del menor costo posible.” (Acosta Montoya, 2000, p.90)

2.2.3. Funciones de las interconexiones internacionales.

Las interconexiones internacionales son enlaces de transmisión que tienen como función vincular eléctricamente los sistemas eléctricos de dos o más países.

Un enlace internacional es un conjunto de líneas de transmisión y equipos asociados que conectan los sistemas eléctricos de dos países y que tienen como función exclusiva el transporte de energía para importación o exportación.

Según Ignacio Coral Martínez, las interconexiones permiten cumplir una o más de las siguientes funciones:

- Función de Transmisión
- Función de interconexión propiamente dicha
- Función de integración de mercados
- Función mixta.

2.2.3.1. Función de transmisión

La función de transmisión consiste en transportar la electricidad durante periodos largos de tiempo en una dirección determinada, una línea con esta función puede transmitir grandes cantidades de energía de un sistema a otro y eventualmente puede funcionar en sentido contrario.

Un caso típico es una línea que se construye para transportar el excedente de potencia de un país a otro y abastecer su demanda, o parte de ella, por un lapso específico de tiempo, o de manera permanente, dependiendo de la oportunidad en la cual el país deficitario pueda ampliar su propia generación o que le resulte económicamente más conveniente la importación. También se da este tipo de interconexión cuando se construye asociada a infraestructura de generación.

2.2.3.2. Función de interconexión propiamente dicha

Consiste en transportar electricidad en cualquiera de los dos sentidos, dependiendo de las circunstancias económicas y técnicas de los sistemas eléctricos que vincula. Estas condiciones pueden variar hora a hora, dependiendo de los precios horarios (precio Spot) de cada sistema.

Un enlace internacional que funciona como línea de interconexión puede producir varios beneficios tales como:

- Mejorar la confiabilidad de los sistemas que están interconectados, porque incrementa las opciones de suministro disponibles bajo condiciones de falta de generación o fallas en el sistema.
- Reducir los requerimientos de generación de reserva fría o rotante para mantener condiciones de operación apropiadas.
- Optimizar el uso de los recursos de generación más económicos existentes en los sistemas interconectados.
- Mejorar la calidad del servicio eléctrico, al permitir la aplicación de acciones complementarias de generación, tales como regulación (primaria o secundaria) de tensión y frecuencia.
- Corregir problemas de congestión en las líneas o transformadores, etc.

Sin embargo, la función de interconexión produce una interdependencia de los sistemas vinculados, que se manifiesta mediante exigencias de coordinación operativa o de despacho coordinado; en otros términos, pérdida de autonomía operativa.

2.2.3.3. *Función de integración de mercados*

Según la definición dada por Ignacio Coral: “Dos mercados tiene como efecto la modificación del número de agentes que intervienen en ellos, dependiendo de las reglas que gobiernen los mercados interconectados, puede promover la competencia” (Coral, 2002, p.153).

La función de integración de mercados produce resultados favorables en razón de que los mercados integrados puedan funcionar de una manera optimizada, distinta a cuando la interconexión no existía, además de permitir la competencia de un mayor número de agentes generadores o comercializadores de ambos países y de atraer inversionistas privados para la construcción de nuevas centrales destinados a un mercado de mayor magnitud.

2.2.3.4. *Función mixta*

Una interconexión internacional puede desarrollar funciones de interconexión propiamente dicha y de integración de mercados, de manera progresiva o simultánea, lo que se denomina función mixta.

Como indica Coral Martínez, puede tratarse de un enlace construido específicamente como apéndice de una planta de generación y que está destinado a exportar parte de su producción (función de transmisión); y que al vincular los sistemas eléctricos de los países, permite optimizar la energía hidráulica, empleando las condiciones de complementariedad hídrica (función de interconexión), y luego, mejorar la competencia en los mercados mayoristas e ambos países (función de integración)

“Por lo general la mayoría de interconexiones internacionales se orientan a una función mixta, no es muy frecuente encontrar a una interconexión cumpliendo sólo una función” (Coral Martínez, 2002,180).

2.2.4. Integración eléctrica regional.

La integración eléctrica regional es la integración de los sistemas eléctricos de varios países que conforman una región. Busca la complementación de los mismos con un entorno técnico, económico y regulatorio común, para lograr el mejor aprovechamiento en la explotación y el uso de los recursos energéticos.

Para que se desarrolle una integración eléctrica regional se deben cumplir las siguientes condiciones, en tres ámbitos o niveles:

- a) Integración física nacional: Las redes de transmisión de cada país deben estar configuradas a nivel nacional, es decir que no existan subsistemas separados o no conectados dentro del país.

- b) Integración física internacional: Esta condición se refiere a la construcción de enlaces de transmisión internacionales que permitan el transporte de energía eléctrica entre los distintos sistemas interconectados.

- c) c. Integración de mercados: Esta condición se refiere a la integración de los mercados eléctricos regionales, buscando un mismo o similar entorno económico, regulatorio y técnico, en el cual se realizan operaciones coordinadas entre los sistemas interconectados, con la finalidad de lograr eficiencia en la utilización de los recursos y de la infraestructura. Se amplía el mercado eléctrico para la participación de un mayor número de agentes y se propicia nuevas inversiones en generación y transmisión en los países con recursos energéticos más económicos, los que se hacen rentables al orientarse a un mercado ampliado.

2.2.5. Armonización de reglas.

La integración eléctrica es un concepto con contenido técnico preciso ya que implica el despacho conjunto – o al menos coordinado – de los recursos eléctricos. Sin embargo, no siempre se respeta ese contenido, ya que se tiende a hablar de integración cuando esa situación no está configurada.

Al analizar las interconexiones eléctricas internacionales, desde el punto de vista de su operación física, puede distinguirse varios niveles de coordinación entre los despachos, tal como se muestra en la tabla siguiente, donde también se registra el grado de armonización requerido en las reglas de los sistemas a interconectar. (Husson, 2004, p.160)

Tabla 1
Tipo de intercambio.

Tipo	Nivel de Coordinación	Grado de armonización
Integración Plena	Despacho conjunto de los Reglas únicas para todos recursos	los sistemas
Integración Parcial	Operación coordinada de los despachos, que intercambian ofertas spot	Armonización sólo en lo necesario para permitir intercambios spot
Intercambios programados por Contratos	El sistema importador lo despacha al convocarlo	Armonización sólo en lo necesario para permitir intercambios programados.
Intercambios de Excedentes	El sistema exportador lo despacha cuando está ante riesgo de vertimiento en sus centrales hidroeléctricas	Sin requerimientos de armonización de reglas

Nota: Fuente Propia

Armonizar reglas sólo en lo necesario para permitir un determinado tipo de intercambio es lo que se denomina comúnmente establecer simetrías mínimas.

2.2.6. Simetrías mínimas.

El análisis de las simetrías mínimas permite establecer que éstas pueden reducirse a tratar exclusivamente lo concerniente a las transacciones de energía y potencia, a peajes de transmisión y –como tema marginal– a las transacciones de servicios complementarios. Al respecto cabe hacer las siguientes consideraciones:

2.2.6.1. Transacciones de energía y de capacidad

Normalmente, el tratamiento dado a la exportación o importación de energía eléctrica corresponde a una demanda o una generación en frontera.

Una exportación realizada en esos términos será equivalente a una demanda en frontera en el sistema exportador y a una generación en frontera para el sistema importador. En tal caso, por ejemplo, le corresponderán: En el mercado exportador: todos los cargos establecidos para las demandas.

- En el mercado importador: todas las remuneraciones y cargos establecidos para las generaciones, inclusive cargos por capacidad y pagos por transporte y reservas.

Por su parte, las compras de energía asociadas al pago de capacidad o compras firmes, se implementan mediante contratos de largo plazo para garantizar el abastecimiento a la demanda y la inversión a la oferta. Deberá tenerse presente que compras de energía sin pago de capacidad, no promoverán la inversión en nueva generación destinada a la exportación en el sistema exportador.

Si un mercado importador no paga capacidad al exportador, entonces no correspondería remunerar en este último el costo marginal de la oferta correspondiente a demanda local más la exportación, ya que se estaría afectando el equilibrio entre oferta y demanda, y:

- se otorgaría renta a los generadores locales.
- se aumentaría el pago de los consumidores en el país exportador, sin beneficios para estos últimos, ya que no sería promovida la expansión de la oferta local por ese tipo de exportación.

En este tipo de situaciones corresponderá distinguir entre precio interno y precio de exportación y verificar que los intercambios entre sistemas tiendan a ser balanceados en el largo plazo. La figura siguiente muestra el incremento del costo marginal del sistema eléctrico en función del nivel de potencia despachado, inclusive exportación y los precios sancionados en ambos casos.

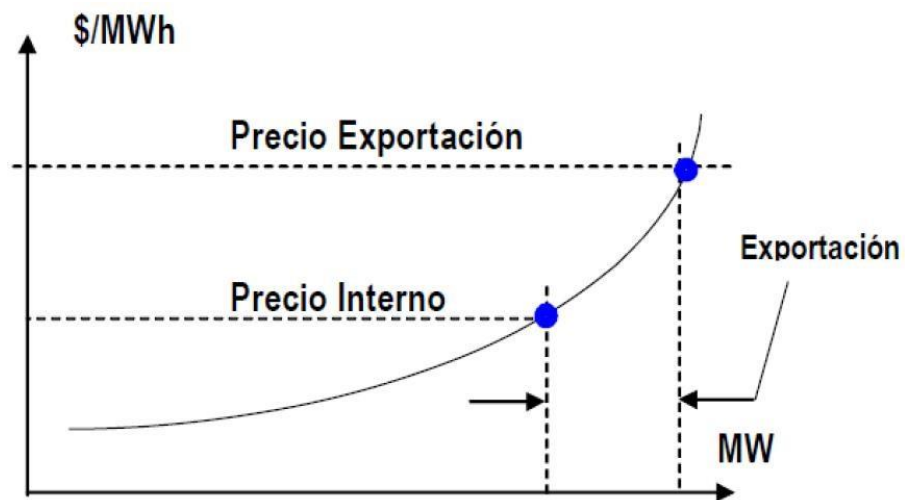


Figura 8: Incremento del costo marginal del sistema exportador

Debe entenderse que detrás de la decisión de pagar capacidad en los intercambios internacionales se encuentra el concepto de seguridad de

2.2.7. Planificación del sistema de distribución.

Los estudios de planificación de la operación de los sistemas de distribución son primordiales dentro de los objetivos de toda empresa distribuidora, pues permiten asegurar que la demanda sea cubierta de forma adecuada, cumpliendo con los requerimientos técnicos y económicos, aun cuando se presente un incremento de la misma en un determinado periodo.

Dentro de ellos un tema de vital importancia resulta el análisis de pérdidas de potencia y energía, las mismas que son inevitables para la operación del sistema de distribución, debido al gran número de elementos y al bajo nivel de voltaje que se maneja, sin embargo, es responsabilidad de la empresa mediante su departamento de planificación, ejecutar programas de control y reducción de pérdidas encaminadas a mejorar la eficiencia de operación del sistema, de tal manera que su costo generado no represente mayor repercusión para su estabilidad económica.

Es por ello, que el agente planificador debe tener muy en claro la operación de su sistema de distribución, identificando los puntos críticos y alternativas de operación bajo condiciones anormales que permitan mantener la continuidad, seguridad y calidad del suministro sin presentar afecciones a los usuarios, es aquí donde el concepto de *optimización* toma un papel fundamental dentro del proceso de planificación, pues comprende varios aspectos relacionados con la reducción de pérdidas de potencia y energía, disminución de la cargabilidad de alimentadores y conductores, balanceo de carga y mejoramiento del perfil de voltaje, para lo cual las principales soluciones de red son:

- Reconfiguración de alimentadores primarios.
- Balanceo de carga.
- Ubicación de banco de capacitores.

En nuestro caso nos enfocaremos en el primer y segundo punto, debido a las características de operación del sistema. (C. Araujo, 2006, p.103)

2.2.8. Reconfiguración y restauración de los sistemas de distribución.

Hace algunos años, los sistemas de distribución presentaban diseños de topologías rígidas con limitadas posibilidades de cambio de configuración, pero gracias a las mejoras logradas en dispositivos eléctricos, ha sido posible incluir un diseño más flexible y dinámico de las redes con posibilidad de reconfiguración de sus alimentadores para modificar la topología de las mismas, a fin de mejorar la confiabilidad del sistema.

Dichas mejoras suponen disponer de dispositivos de conmutación inteligentes como es el caso de interruptores automáticos (reconectores) ubicados de tal manera que brinden una mayor confiabilidad y flexibilidad a la red, siendo necesario considerar criterios de optimización para su ubicación en función del propósito que se busque ya sea para seccionar la carga de los alimentadores en partes iguales (en medida de lo posible) de modo que en caso de fallas no se pierda el suministro de toda la red o para permitir la transferencia de carga de

una o más secciones de red entre sistemas. Además, deben permitir su operación a distancia con el objetivo de garantizar una reconfiguración inmediata en caso de ser necesario, para lo cual se requiere contar con una adecuada infraestructura de comunicaciones.

Sin embargo, para obtener las bondades que dichos dispositivos automáticos brindan, es recomendable primeramente definir la topología óptima de la red mediante la cual el funcionamiento del sistema se realiza con la menor cantidad de pérdidas posibles, para posteriormente definir cuál es el objetivo que se persigue con la reconfiguración de los alimentadores, pudiendo definirse los siguientes:

- *Reconfiguración del alimentador para mejorar el funcionamiento del sistema:* reflejado en términos de reducción de las pérdidas técnicas del mismo, a fin de que su operación se lleve a cabo a un costo mínimo cumpliendo con una serie de restricciones como abastecimiento de carga, caídas de voltaje dentro de los límites permisibles, coordinación de los dispositivos de protección y manteniendo la configuración radial de la red. Dicha acción consiste en modificar la topología del mismo mediante el cierre de un interruptor de enlace y la apertura de un conmutador del alimentador para mantener el sentido radial de la red, el proceso de transferencia de carga se detiene en la medida en que las pérdidas no pueden ser reducidas.

- *Reconfiguración del alimentador para restauración del servicio ante fallas:* se puede llevar a cabo mediante la operación de interruptores de seccionamiento y enlace, que permiten restablecer el suministro de energía a la mayor cantidad posible de usuarios, i.e., transferir la carga de las áreas no afectadas del alimentador defectuoso, hacia alimentadores adyacentes que operan en condición normal. Sin embargo dicha reconfiguración está limitada por la capacidad de carga que puede ser transferida y abastecida por el alimentador vecino de

forma segura y cumpliendo con los requerimientos técnicos establecidos, por lo que se debe considerar que con una reconfiguración cambia no solo la topología sino también los flujos de carga, perfiles de voltaje y con ello los valores de corrientes de carga, razón por la cual la capacidad de los equipos de protección debe ser verificados para evitar actuaciones indeseadas de las mismas. (Gers, 2013, p.80)

2.2.9. Fundamentos del análisis del sistema de distribución.

El análisis del sistema de distribución es parte fundamental dentro de toda estrategia de planificación encaminada a la automatización de la distribución, el cual se centra en el análisis de la operación de los alimentadores primarios bajo condiciones normales y ante fallas (análisis de cortocircuitos) mediante la ejecución de flujos de carga, los cuales no deben limitarse únicamente al estudio de flujos de potencia y regulación de voltaje, sino también a la posibilidad de reconfiguración de los alimentadores para la transferencia de carga, cumpliendo con los requerimientos técnicos de operación, principalmente en términos de caída de voltaje en MV y BV, motivo por el cual el agente planificador debe efectuar un estudio detallado de flujos de potencia considerando los siguientes aspectos:

- Condiciones normales de operación.
- Cambios en el calibre del conductor y longitud de tramos.
- Reducción de pérdidas de potencia y energía.
- Mejora de los perfiles de voltaje.
- Balance de carga.
- Corrección del factor de potencia.
- Posibilidades de reconfiguración entre alimentadores.
- Ajuste y coordinación de las protecciones.

- Crecimiento de cargas futuras.

2.2.9.1. Flujos de carga en alimentadores de distribución.

El análisis de flujo de carga en un alimentador de distribución es similar a un sistema de transmisión, diferenciándose principalmente en el modelamiento de las líneas que pueden ser mediante componentes simétricos o por modelo de fase, los cuales deben ser considerados en función del tipo de enfoque que se dará al análisis.

Generalmente, los datos de los que se dispone para iniciar el análisis de flujos de potencia son los voltajes trifásicos en cabecera del alimentador, la potencia compleja de todas cargas (P y Q), factor de potencia en cabecera y el modelo de carga a emplear (potencia compleja constante, impedancia constante, corriente constante), y en base a ellos obtener:

- Distribución de carga en kW y kVAR en cada nodo.
- Voltajes en todos los nodos en magnitud y ángulo.
- Flujo de carga en cada tramo especificada en kW, kVAR, Amperios y factor de potencia.
- Pérdidas de potencia totales y por cada tramo.

Considerando la gran cantidad de datos para cada punto del sistema y la diversidad de los circuitos presentes en la red, es necesario un modelamiento adecuado de la misma, que conduzcan a la correcta aplicación de expresiones e interpretación de resultados. (W. H. Kersting - IEEE, 2011, p.120)

2.2.9.1.1. Representación general de un componente

Para agilizar el análisis de los sistemas de distribución se considera que todos los componentes de la red en especial los tramos (unión entre 2 nodos) pueden ser modelados por el

circuito de la Figura 2.1, identificando un nodo de inicio “i” y un nodo destino “k”, que facilite la ejecución de métodos de solución de flujos de carga.

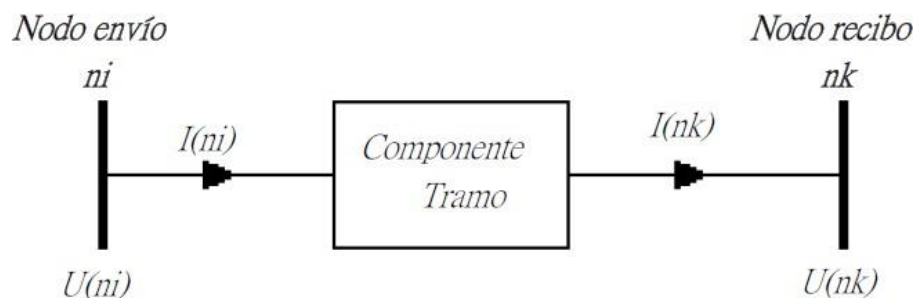


Figura 9: Modelo de representación general de componente del alimentador

Dicho modelo será de vital importancia para la correcta estructuración de la matriz de incidencia lógica que represente la topología de la red con ramales principales y derivaciones. (Kersting, 2012, p.101)

2.2.9.1.2. Modelo de red del sistema de distribución.

El modelo de red es parte fundamental para el análisis de flujos de carga en todo sistema, por lo que se puede distinguir dos tipos: (1) el equilibrado en cuyo caso se asumen el balance de carga entre sus fases con lo cual sus corrientes tienden a ser similares, y pueden ser resueltas empleando la representación monofásica mediante su resistencia y reactancia, a través de la componente de secuencia positiva ($Z1$), o mediante calculo manual empleando expresiones aproximadas en función del radio medio geométrico y la distancia de separación entre conductores.

Mientras que (2) el modelo desbalanceado, considera que la red está conformada por una, dos o tres fases y conductor de neutro,

conectados o no a tierra, demandando una representación de sus impedancias por fase como se muestra en la figura:

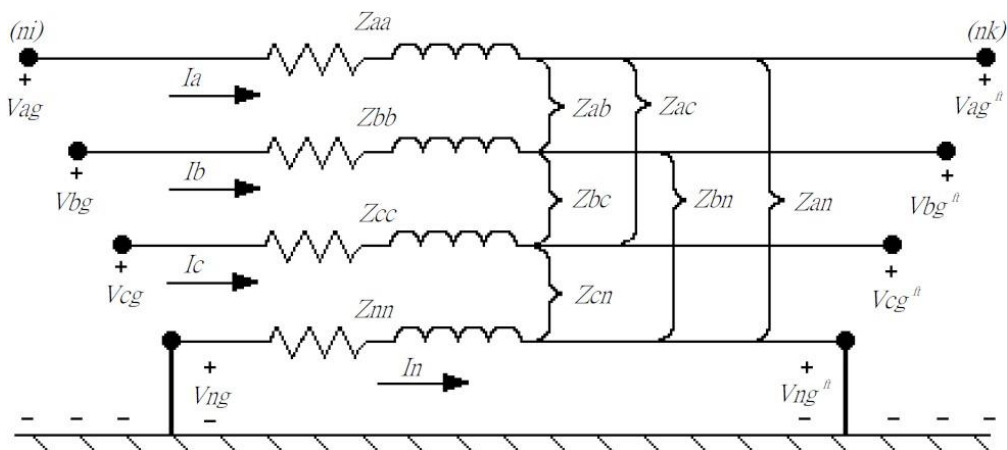


Figura 10: Modelo de línea trifásica desequilibrada.

Para lo cual existen dos métodos, el uno basado en las impedancias de fase y el otro en las componentes de secuencia, donde se desprecia el efecto de la admitancia en derivación por tener un valor muy pequeño que no influye en la determinación de las impedancias de fase.

Para el primer caso, la determinación de las impedancias de fase se lleva a cabo mediante las ecuaciones de Carson considerando el efecto de retorno por tierra y el acoplamiento mutuo entre fases, y si el circuito es de 4 o más hilos, se recurre al empleo de la reducción de Kron para obtener un arreglo matricial de 3x3 mostrado a continuación:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \Omega / km$$

Sin embargo, existen casos en los que los únicos datos de los que se disponen para un segmento de línea son las impedancias de secuencia positiva y cero (Z_1 y Z_0), siendo necesario aplicar el modelo aproximado de red presentado en la figura: (7-9)

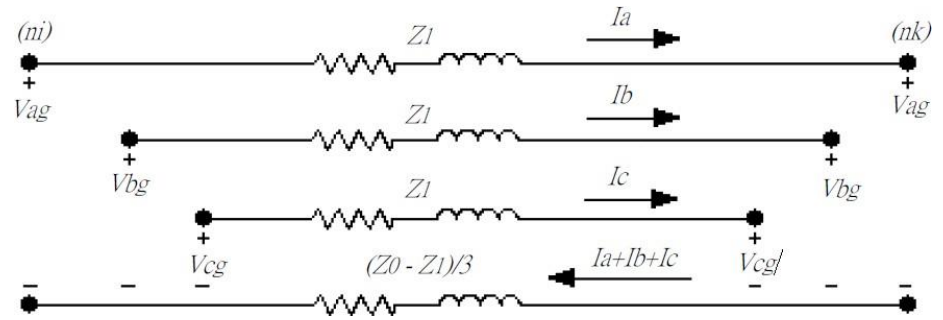


Figura 11: Modelo trifásico aproximado de impedancias de fase

2.2.9.1.3. Identificación de nodos y ramas.

Para efectuar cualquier programa de corrida de flujos de potencia, es necesario disponer de una estructura adecuada de los tramos de red mediante el empleo de una secuencia de ordenamiento lógico ascendente de los puntos del sistema conocidos como nodos, (unión de derivaciones de red o postes donde se encuentran ubicados transformadores de distribución), considerando la radialidad de los alimentadores, i.e., que cualquier derivación presenta el flujo en una sola dirección, con lo cual cada rama está asociada a la denominación de los respectivos nodos finales, que para mayor facilidad suelen ser asignados mediante números o letras, sin embargo, no puede haber repeticiones de nombres en los tramos de la red.

Luego de asignar la denominación a los nodos de la red, se puede identificar la ruta para llegar al origen desde cualquier punto extremo del alimentador, siendo necesario el empleo de un arreglo de 2 columnas que contienen en el lado izquierdo el nodo de origen y en el derecho el nodo final, y se va armando la secuencia de escalera enlazando los nombres de los nodos. (W. H. Kersting - IEEE, 2011, p.101)

2.2.9.1.4. Matriz de incidencia.

Una vez estructurado la lógica de ordenamiento de los nodos en columnas, es necesario definir la relación entre los mismos, mediante la determinación de una matriz topológica de “ $n \times n$ ” nodos que representen la conexión física existente entre cada punto partiendo de un determinado nodo “ i ”, para lo cual se recurre al empleo de la lógica binaria de unos y ceros, considerando que un “1” representa la conexión entre el nodo de interés y el siguiente, por el contrario, un “0” indica que no existe conexión física desde el nodo de análisis hacia adelante, es decir los tramos que queden detrás del nodo de análisis tendrán valor “0”, manteniéndose la secuencia ascendente.

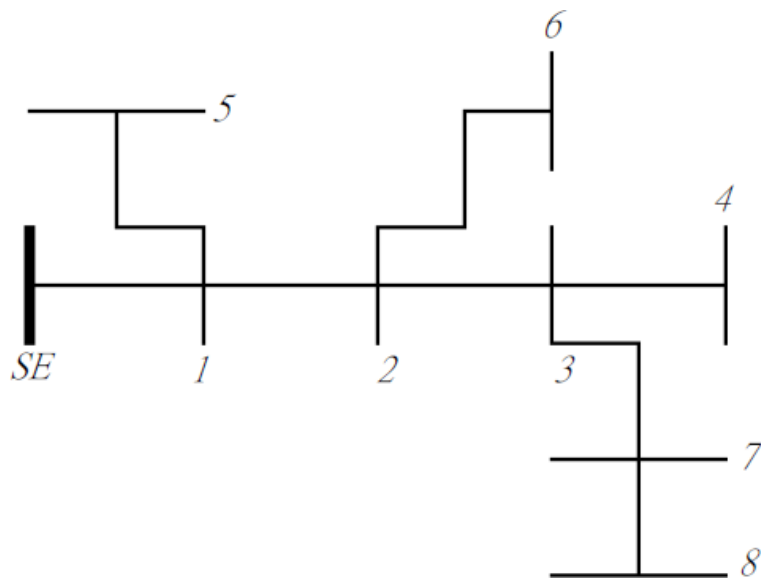


Figura 12: Alimentador radial de 8 nodos

Para ilustrar el concepto de nodos y ramas y la matriz de incidencia, consideremos el sistema mostrado en la Figura 2.4, el cual consta de 8 nodos que han sido enumerados en orden ascendente desde el nodo fuente hasta el final del troncal con sus respectivas ramificaciones.

La columna de ordenamiento y la matriz de incidencia se muestran a continuación:

Tabla 2
Columna de ordenamiento de nodos.

n_i	n_k
0	1
1	2
2	3
3	4
4	5
5	6
6	7
7	8

Tabla 3
Matriz de incidencia

mi/uk	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	1	1	1	0	1	1	1
3	0	0	1	1	0	0	1	1
4	0	0	0	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	1

Como se puede observar todos los nodos que están conectados desde el nodo de interés hacia adelante llevan el valor de “1”, respetando la secuencia de orden ascendente, llegándose a identificar una diagonal de unos y debajo de ella una matriz triangular de ceros que representan los tramos que quedan detrás

del nodo de interés.

2.2.9.1.5. *Parámetros inductivos de la red de la distribución primaria.*

Las redes de distribución de los alimentadores primarios están conformadas por diferentes circuitos que pueden ser trifásicos, monofásicos y bifásicos en sus configuraciones en delta (Δ) y estrella (Y), que presentan diferentes parámetros inductivos de sus líneas, los cuales deben ser determinados considerando los modelos de red antes descritos, (i.e., balanceado y desbalanceado) identificándose así los parámetros de fase y los de secuencia, de los cuales los más empleados son los componentes de secuencia, que en definitiva parten de la obtención de las impedancias de fase de las líneas.

Por lo tanto, se determinará los parámetros de fase para el modelo trifásico generalizado mediante la aplicación de las ecuaciones de Carson y reducción de Kron y en base a ellos se definirá el procedimiento para la obtención de las componentes de secuencia (Z_0 , Z_1 y Z_2). (Kersting, 2012, p.100)

- *Matriz de impedancia de fase.*

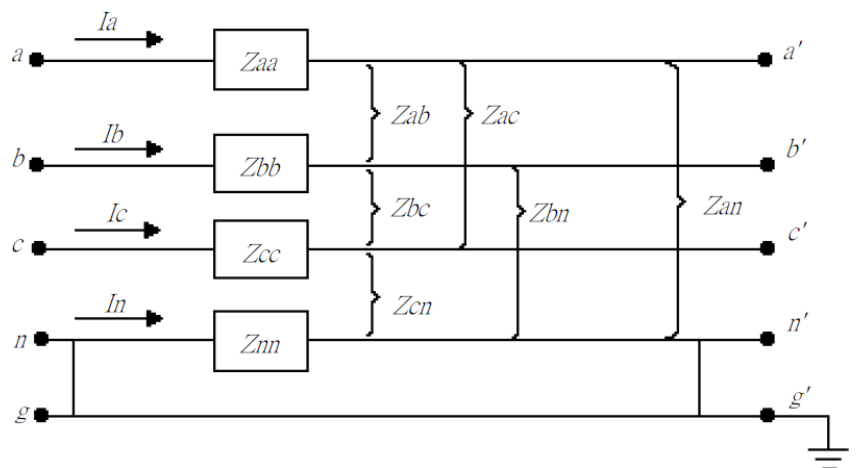


Figura 13: Circuito trifásico de 4 hilos con neutro puesto a tierra

Para el circuito trifásico de 4 hilos con conexión a tierra que se muestra en la figura anterior, los elementos de impedancia de fase propios y mutuos de las líneas pueden ser determinadas mediante la aplicación de las ecuaciones de Carson definidas en las siguientes expresiones. (Kersting, 2012, p.102)

$$Z_{ii} = (R_i + L) + jN \ln \left(\frac{S_{ii}}{RMG_i} \right) \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

$$Z_{ik} = L + jN \ln \left(\frac{S_{ik}}{D_{ik}} \right) \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

Donde:

- R_{ii} : Resistencia eléctrica del conductor “i” en Ω/km .
- RMG_i : Radio medio geométrico del conductor “i” en milímetros.
- S_{ik} : Distancia entre el conductor “i” y la imagen del conductor “k” en metros. D_{ik}
- D_{ik} : Distancia entre el conductor “i” y el “k” en metros.
- $L = \pi^2 10^{-4}$: Expresiones para simplificar la notación.
- $N = 4\pi 10^{-4}$: Expresiones para simplificar la notación.

Dichas expresiones conducen a un arreglo matricial de 4x4 como se muestra en la ecuación:

$$Z_{(primitiva)} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

En estos circuitos como el conductor de neutro está dispuesto junto con los conductores de fase y está conectado a tierra en varios puntos de la red, puede incluirse su efecto en los parámetros inductivos de fase, mediante la reducción de Kron, considerando al neutro como un cable protector colocado por debajo de los conductores reduciendo el tamaño de la matriz primitiva a una de orden 3, como se presentó en la ecuación que se mostrara.

De esta forma, dividiendo a la matriz primitiva de impedancias de fase de tamaño 4x4 en un arreglo de 2x2 definido como:

$$Z_{(primitiva)} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

Se desarrolla el concepto de reducción de Kron expresada mediante:

$$Z_{(abc)} = Z_{11} + \frac{1}{Z_{22}} (Z_{12})(Z_{21})$$

Donde:

- Z_{11} : Matriz de circuito trifásico sin neutro.
- Z_{22} : Impedancia propia del neutro.
- $(Z_{12}) = (Z_{21})$: Submatrices de los elementos mutuos entre el neutro y la fase.
- $\frac{1}{Z_{22}} (Z_{12})(Z_{21})$: Matriz de corrección que incluye el efecto del neutro en Z_{11} .

Llegando a obtener la matriz de impedancias de fase 3x3 que tienen incluido el efecto del retorno de las corrientes por tierra, el del conductor neutro y el de la resistencia de puesta a tierra.

Para un sistema trifásico de tres hilos en delta, la matriz de impedancias de fase se determina mediante la explicación anterior de las ecuaciones de Carson, pero sin la etapa de la reducción de Kron, debido a que no se dispone de neutro.

- *Matriz de secuencia positiva, negativa y cero.*

A partir de la matriz de impedancias de fase se determina las componentes de secuencia multiplicándola por las matrices de transformación S y S⁻¹.

$$Z_{(sec)} = S^{-1} \cdot Z_{abc} \cdot S$$

Donde:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad \text{..}S^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Siendo $a = 1 \angle 120^\circ$

Llegando a obtener la matriz de secuencia de tamaño 3x3:

$$Z_S = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

Llegando a obtener la matriz de secuencia de tamaño 3x3:

Los términos fuera de la diagonal representan el acoplamiento mutuo entre secuencias y los términos diagonales son las "impedancias de secuencia" denominadas:

- Z_{00} : impedancia de secuencia cero.
- Z_{11} : impedancia de secuencia positiva.
- Z_{22} : impedancia de secuencia negativa.

Para el caso de sistemas monofásicos y bifásicos el procedimiento es similar, pudiendo ser modelado mediante el esquema general de un circuito trifásico, construyendo una matriz de impedancia de 3x3, obtenida

ya sea mediante ecuaciones de Carson y reducción Kron para el caso de sistemas en estrella (Y) y únicamente mediante Carson para circuitos en delta (Δ), con la peculiaridad de que solo las fases físicamente presentes tendrán su valor de impedancia y los demás términos se remplazan con ceros para las fases ausentes.

2.2.9.1.6. *Expresiones para las caídas del voltaje en RDU.*

Con el objetivo de conocer el estado de operación de las redes de distribución, se determina los valores de caídas de voltaje en los diferentes puntos del sistema, las mismas que dan un indicativo de la calidad del suministro eléctrico que se está ofreciendo a los consumidores, para lo cual se debe considerar los diferentes tipos de circuitos que pueden existir en un alimentador primario y definir la expresión adecuada para cada caso.

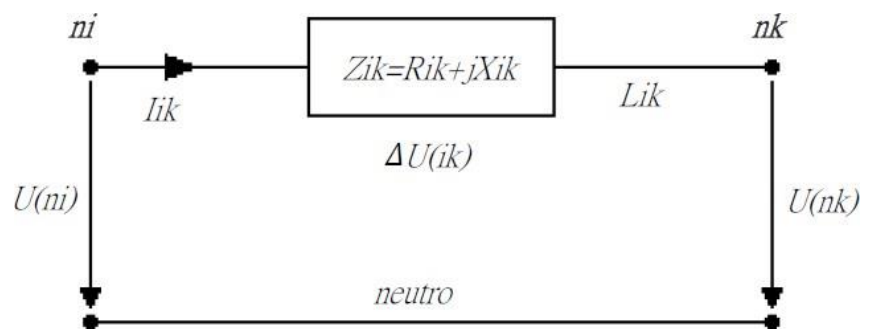


Figura 14: *Modelo de impedancia simple para un ramal trifásico de 3 o 4 hilos*

Para el caso de sistemas trifásicos en (Δ) y (Y), las expresiones se determinan en base al modelo de impedancia simple de la figura anterior, en donde:

- Z_{ik} : impedancia de secuencia positiva del ramal en Ω/km .

- $I_{ik} = I_{ik} \angle -\varphi$: corriente por el ramal para una carga con factor de potencia inductivo.
- L_{ik} : longitud del ramal en km.
- U_{ni} y U_{nk} tensiones en los postes “i” y “k”.

La expresión exacta para determinar la caída de voltaje en función de la demanda máxima es:

$$\Delta U_{ik} = I_k \cdot L_k \cdot Z_k = \frac{DM_{3\phi-ik}}{\sqrt{3}U_{nom}} (\cos \varphi - j \sin \varphi) (R_{ik} + jX_k) \cdot L_{ik}$$

Donde:

- $DM_{3\phi-ik}$: Demanda máxima trifásica en kVA que circula por el tramo “ik”.
- U_{nom} : Voltaje nominal línea a línea en kV.

Sin embargo, para alimentadores de longitud menor a 15km y niveles de voltaje de hasta 33kV, el ángulo entre las tensiones de envío y recibo (ángulo de potencia θ) tiene un valor muy pequeño de máximo 1 grado, permitiendo despreciar la parte imaginaria de la caída de voltaje, denominada componente transversal por estar desfasada 90° , obteniendo una expresión más reducida.

$$\Delta U_{3\phi} = \frac{DM_{3\phi-ik}}{\sqrt{3}U_{nom}} I_k (R_{ik} \cos \varphi - j X_k \sin \varphi) \quad (V \text{ al neutro})$$

Para determinar el cumplimiento de regulación de voltaje, es necesario expresar el valor de caída de voltaje en porcentaje con respecto al voltaje nominal del sistema mediante:

$$\% \Delta U_{3\phi} = \frac{DM_{3\phi-ik} L_{ik} (R_{ik} \cos \varphi - j X_k \sin \varphi)}{10. U_{nom}^2}$$

Considerando la componente imaginaria para la expresión exacta se tiene:

$$\begin{aligned} \% \Delta U_{3\phi} = & \frac{DM_{3\phi-ik}}{10. U_{nom}^2} L_{ik} [(R_{ik} \cos \varphi - X_k \sin \varphi) \\ & + j(X_{ik} \cos \varphi - R_{ik} \sin \varphi)] \end{aligned}$$

La determinación de las expresiones para el caso de circuitos monofásicos y bifásicos, donde los valores de caídas de voltaje en porcentaje y en voltios se expresan en función de la corriente circulante por el ramal (en términos de la demanda máxima) y el valor de impedancia de secuencia positiva del tramo (resistencia y reactancia), las mismas que se exponen en las siguientes tablas. (10)

Expresiones para caídas de voltaje Voltios de trifásicos y monofásicos.	Tabla 4	
	circuito	Caídas de voltaje en voltios
$3\phi \text{ en } (\Delta) \text{ y } (Y)$	$\Delta U_{3\phi-ik} = \frac{DM_{3\phi-ik}}{\sqrt{3}xV_{nom}} x L_{ik} (R_{ik} \cos \varphi + jX_{ik} \sin \varphi)$	las en circuitos
$1\phi L - L(\Delta)$	$\Delta U_{L-L} = 2x \frac{DM_{1\phi-ik}}{V_{ab-nom}} x L_{ik} (R_{ik} \cos \varphi + jX_{ik} \sin \varphi)$	
$1\phi L - N(Y)$	$\Delta U_{L-N} = \sqrt{3}x \frac{DM_{1\phi-ik}}{V_{nom}} x L_{ik} (R_{ik} \cos \varphi + jX_{ik} \sin \varphi)$	

Tabla 5
Expresiones para las caídas de voltaje en % de circuitos trifásicos y monofásicos.

Circuito	Caídas de voltaje en %
3ϕ en(Δ)y (Y)	$\% \Delta U_{3\phi-ik} = \frac{DM_{3\phi-ik}}{10xV_{nom}} x L_{ik} (R_{ik} \cos\phi + jX_{ik} \operatorname{sen}\phi)$
1ϕ L – L(Δ)	$\Delta U_{L-L} = 2x \frac{DM_{1\phi-ik}}{V_{ab-nom}^2} x L_{ik} (R_{ik} \cos\phi + jX_{ik} \operatorname{sen}\phi)$
1ϕ L – N(Y)	$\Delta U_{L-N} = 3x \frac{DM_{1\phi-ik}}{V_{ab-nom}^2} x L_{ik} (R_{ik} \cos\phi + jX_{ik} \operatorname{sen}\phi)$

2.2.9.1.7. Expresiones para las pérdidas de potencia activa RDU.

De igual manera se determina los valores de pérdidas de potencia activa en líneas para los diferentes tipos de circuitos, las cuales son proporcionales al cuadrado de la corriente circulante por el tramo (expresada en función del valor de demanda máxima) y de su resistencia.

- *Ramales trifásicos de 3 (Δ) y 4 hilos (Y)*

$$\Delta Pl_{(3\phi)} = 3 \left(\frac{DM_{3\phi-ik}}{\sqrt{3}U_{nom}} \right)^2 L_{ik} \cdot R_k \cdot 10^{-3} [kW]$$

$DM_{3\phi-ik}$: Demanda máxima trifásica en kVA que circula por el tramo “ik”.

- *Ramales monofásicos entre fases (Δ)*

$$\Delta Pl_{(L-L)} = 2 \left(\frac{DM_{1\phi-ik}}{U_{nom}} \right)^2 L_{ik} \cdot R_{ik} \cdot 10^{-3} [kW]$$

$DM_{1\phi-ik}$: Demanda máxima monofásica en kVA que circula por el tramo “ik”

- *Ramales monofásicos entre fase y neutro (Y)*

$$\Delta Pl_{(L-N)} = 3 \left(\frac{DM_{1\phi-ik}}{U_{nom}} \right)^2 L_{ik} \cdot R_{Eq} \cdot 10^{-3} [kW]$$

R_{Eq} : Resistencia equivalente monofásica incluida el efecto del neutro Ω/km . (10)

2.2.9.1.8. Comparación entre las expresiones exactas y reducidas de caída de voltaje.

Con el fin de determinar la diferencia entre emplear la formula reducida y la exacta de la caída de voltaje, tomaremos como ejemplo un alimentador trifásico de 4 hilos a un voltaje nominal de 22kV línea - línea, que alimenta una carga de 5000 kW, con un factor de potencia de 0,8, mediante conductores aéreos de Aluminio ACSR de 1/0 AWG para las fases y AWG #2 para el neutro, cuyo valor de impedancia de secuencia positiva obtenida mediante la metodología antes expuesta es: $0,377+j0,4514 \Omega/km$. Considerando la longitud del ramal de 1km.

Determinamos los valores necesarios para las expresiones:

$$S = \frac{P}{FP} = 6.25MVA \qquad Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 3.75MVAR$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0.8) = 0.6435 \qquad \sin \varphi = \sin(0.6435) = 0.6$$

6.25MVA

$$R_1 = 0.377\Omega/km$$

$$x_1 = 0.4514\Omega/km$$

- Solución mediante expresión exacta.

$$\Delta U_{3\phi-ik} = \frac{DM_{3\phi-ik}}{\sqrt{3}U_{nom}} I_k(R_{ik} \cos \varphi + X_k \sin \varphi) + j(X_{ik} \cos \varphi + R_{ik} \sin \varphi)$$

$$\Delta U_{3\phi} = \frac{6.25 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 22 \text{ kV}} 1 \text{ km} \cdot [(0.377 \times 0.8 + 0.4514 \times 0.6) + j(0.4514 \times 0.8 - 0.377 \times 0.6)]$$

$$\Delta U_{3\phi} = (0.0938915 + j0.0221295) \text{ kV al neutro}$$

El voltaje línea-neutro considerando la componente transversal de voltaje es:

$$U_{L-N_exacta} = 12.7 - (0.0938915 + j0.0221295) = (12.607834 \text{ kV} - j0.0018)$$

- Solución mediante expresión reducida.

$$\Delta U_{3\phi-ik} = \frac{DM_{3\phi-ik}}{\sqrt{3}U_{nom}} I_k(R_{ik} \cos \varphi + X_k \sin \varphi)$$

$$\Delta U_{3\phi} = \frac{6.25 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 22 \text{ kV}} 1 \text{ km} \cdot [(0.377 \times 0.8 + 0.4514 \times 0.6)]$$

$$\Delta U_{3\phi} = 0.0938914 \text{ al neutro}$$

Con lo cual el voltaje línea-neutro sin considerar la componente transversal de voltaje es:

$$U_{L-N_aprox} = 12.7 - (0.0938914) = 12.607814 \text{ kV}$$

Comparando ambos resultados tenemos una diferencia de

0,000019 kV que representa un porcentaje de error de 0,00015% que es despreciable. Dicho porcentaje suele ser

mucho menor debido a que las caídas de voltaje en las redes de distribución de los alimentadores primarios se calculan por tramos los cuales tienen longitudes de entre 100 a 800m con cargas menores a la empleada en el ejemplo, por lo tanto, se justifica el empleo de las expresiones reducidas para el cálculo de caídas de voltaje en los ramales de un alimentador de distribución.

2.2.9.1.9. *Método de solución de flujos de potencia en RD.*

El modelamiento de la red de distribución influye considerablemente en el método empleado

para la solución de los flujos de potencia, las expresiones para caídas de voltaje y pérdidas de potencias antes definidas requieren del conocimiento de la demanda en todos los nodos del sistema, lo cual es una tarea extremadamente compleja debido a la gran diversidad y dispersión de los bancos de transformadores que existen en la red, cuyas demandas son difíciles de obtener puesto que requiere un gran número de instrumentos registradores que deben ser ubicados en cada punto de carga, lo que supone una inversión económica fuerte, además de un elevado grado de complejidad en la instalación y monitoreo de dichos instrumentos de medida. Por tal motivo, se ha desarrollado métodos que permiten resolver los flujos de carga a partir de los valores de medición en cabecera del alimentador, los cuales deben ser registrados durante un periodo de tiempo considerable para que el análisis sea adecuado, tal es el caso del denominado “*Método de Advinson para solución de flujos de carga a partir del conocimiento de la carga total a servir*”, el cual permite obtener los parámetros de caída de voltaje y pérdidas de potencia por tramo, partiendo de los valores de medición (en kW, kVAR)

totales en cabecera del alimentador, y asume las siguientes suposiciones:

- El factor de potencia es uniforme en todo el alimentador.
- El factor de capacidad es uniforme para todos los transformadores del alimentador analizado e igual al medido en la subestación.
- El balance de carga entre las fases se encuentra dentro del rango máximo.
- El crecimiento de la demanda es uniforme para todo el circuito.

A pesar de dichas suposiciones, los programas desarrollados empleando dicho método brindan resultados acordes con la realidad, sobre todo en el caso de alimentadores urbanos, lo cual se ha comprobado en reiteradas ocasiones mediante mediciones realizadas en los circuitos analizados.

Con respecto al desbalance de carga máximo permitido entre fases, se establece un valor menor al 15%, obtenido en base a los valores de potencia activa de los perfiles de carga medidos en cabecera del alimentador, se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\%desb_carga = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}} \cdot 100 \leq 15\%$$

P_{max} y P_{min} corresponden a los valores modulares máximos y mínimos de potencia activa medidos en las 3 fases del alimentador.

Por lo tanto, considerando los aspectos antes mencionados, se define el método empleado para la determinación de la demanda

en cada nodo del sistema, en base al llamado factor de capacidad (F_{cap}) determinado por:

$$F_{cap} = \frac{\text{Demanda Maxima}}{\sum \text{capacidad instalada en transformadores}} = \frac{DM}{CIT}$$

Este factor es un indicativo del grado de aprovechamiento de la capacidad instalada de los transformadores y por ende de la red, y permite obtener la demanda máxima para cada nodo que tenga instalado un banco de transformadores, mediante la siguiente expresión:

$$DM_k = CIT \cdot F_{cap}$$

De este modo se resuelve la incertidumbre de las demandas en los puntos del sistema.

2.2.9.2. *Transferencia de carga entre alimentadores.*

Esta estrategia, como su nombre lo indica consiste en transferir carga desde un alimentador hacia otro cercano que presente mejores condiciones, con el objetivo ya sea de reducir pérdidas técnicas o para el restablecimiento del sistema ante fallas. Dicho análisis se basa en determinar la cantidad de potencia que puede ser transferida hacia el otro alimentador en un determinado instante de tiempo, sin que se viole con los requerimientos técnicos del mismo, la cantidad de potencia depende de la carga normal del alimentador, la capacidad instalada, circuitos y equipos disponibles en la red, por lo tanto es necesario involucrar el concepto de “incremento de la capacidad de transferencia, misma que consiste en inspeccionar la red para tener un mejor conocimiento de su operación y así poder determinar el incremento de carga que se podría llegar a soportar sin que se presenten complicaciones para el sistema. (Villacís, 2012, p.50)

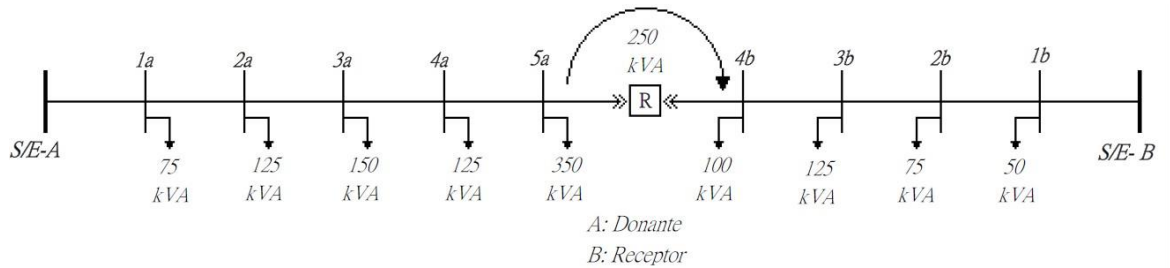


Figura 15: Sistema de 2 alimentadores radiales para transferencia de carga.

2.2.9.3. Análisis de cortocircuito.

Los estudios de cortocircuito son parte fundamental dentro de la planificación de los sistemas de distribución debido a que permiten efectuar una serie de análisis como el diseño del sistema de puesta a tierra, selección del calibre de los conductores, dimensionamiento de interruptores automáticos y definición de equipos de protección, para lo cual es necesario determinar las corrientes de fallas en los diferentes puntos del sistema, y en base a ellos efectuar la selección y ajuste de los dispositivos de protección ubicados en dichos puntos.

Un cortocircuito ocurre cuando dos puntos a diferente potencial entran en contacto, lo cual produce la circulación de elevadas corrientes hasta el punto de ocurrencia de la falla, denominadas “corrientes de cortocircuito” las cuales son mucho mayores a las corrientes de nominales en dicho nodo, pudiendo causar graves danos en equipos y en la estabilidad del sistema, si no son limitadas rápidamente.

Las fallas son caracterizadas por su duración y amplitud, la cual depende de la impedancia del sistema vista en el punto de falla, por lo que es necesario determinar el valor eficaz (rms-valor medio cuadrático) de dicha corriente bajo las peores condiciones de fallo, i.e., el cortocircuito trifásico simétrico en el lugar más próximo al equipo, y en base a ello determinar la capacidad de corte de los dispositivos de protección, así como para efectuar la coordinación de los mismos. (Paul , 2011, p.123)

2.2.9.3.1. Método de solución de flujos de potencia en RD.

Conocido también como el método de los MVA's debido a que las potencias de los equipos se manejan en dicha unidad, es un método simple que considera las reactancias de los transformadores y motores, pero en el caso de líneas se puede incluir el efecto de la resistencia y reactancia mediante el módulo de la impedancia de secuencia positiva (Z_1) y parte del concepto de potencia de cortocircuito, entendida como la capacidad del sistema para reaccionar ante una falla y se obtiene mediante el producto del voltaje nominal y la corriente de cortocircuito, la misma que es inversamente proporcional al impedancia obtenida en el punto de falla, siendo necesario reducir la red a un sistema de impedancia equivalente, mediante simplificaciones serie - paralelo considerando las expresiones adecuadas para la determinación de las potencias de cortocircuito en los diferentes elementos del sistema.

Para transformadores esta potencia viene dada en función de los MVA's del equipo y del valor de reactancia transitoria que puede estar expresada en porcentaje o en por unidad para lo cual se emplea las siguientes expresiones:

$$S_{CC(TR)} = \frac{MVA_{equipo}}{\%X_{equipo}} \quad - \quad S_{CC(TR)} = \frac{MVA_{equipo}}{X_{(pu)equipo}}$$

En el caso de las líneas dicha potencia depende del voltaje de línea en el nodo "k" (la cual debe incluir la caída de voltaje) y el módulo de la impedancia de la línea vista en el punto de falla.

$$S_{CC(LINEAS)} = \frac{(kV_{L-L} - \Delta U_k)^2}{|Z_1|\Omega}$$

Donde:

- kV_{L-L} : voltaje línea - línea vista en la barra "k" al final del tramo "ik".

- ΔU_k : caída de voltaje en el nodo “k”.
- $|Z_1|$: módulo de la impedancia de secuencia positiva en ohmios.

El procedimiento de reducción se basa en combinaciones serie y paralelo de forma análoga al análisis de circuitos resistivos. (Gómez, Mayo, 2012, p.145)

2.2.10. Protecciones de los sistemas de distribución.

Los sistemas de distribución están expuestos a diferentes fallas de origen internas (fallos en componentes y cortocircuitos) y externas (descargas atmosféricas), las cuales traen consigo consecuencias como deterioro del aislamiento de los equipos y partes del sistema, reducción del voltaje en elementos no fallados de la red y sobretensiones.

Estas anomalías pueden ser de tipo temporal o permanente, siendo necesario disponer de un sistema de protecciones robusto que permita la detección de dichas anomalías, limitando los danos a la porción más reducida de la red y en el menor tiempo posible, de manera que las áreas sanas no se vean afectadas y se mantenga la seguridad de los equipos del sistema así como del personal, teniendo en cuenta la premisa de brindar un servicio continuo, seguro y confiable, sin dejar de lado las restricciones técnicas y económicas dentro de su operación.

Para alcanzar dicho objetivo, el sistema de protección debe cumplir con los requerimientos de rapidez (actuar en el menor tiempo posible), selectividad (actuar cuando le corresponda), seguridad (no debe actuar ante situaciones para la cual no se pretende reaccionar), simplicidad (mínima cantidad de equipos y circuitos posibles) y economía (menor costo posible).(Andersson, 2008, p.95)

2.2.10.1. Diseño del sistema de protecciones.

Las protecciones de un sistema eléctrico tienen una gran limitación, debido a que su actuación se produce luego de que la perturbación tiene lugar, por lo que no pueden evitar su ocurrencia sino únicamente restringir sus efectos a una determinada área y reducir el tiempo de afección, lo cual se logra mediante la adecuada delimitación de las zonas de protección de tal manera que, cada área tenga su protección individual y en caso de que se presente una falla, dicha sección pueda ser aislada del resto del sistema sin afectar a las secciones libres de falla.

Además, se debe disponer de una protección de respaldo para garantizar el despeje de fallas permanentes en caso de que la protección primaria pudo despejarla, siendo necesario hacer ímpetu en el tiempo de actuación de los dispositivos para permitir una adecuada operación y selectividad de los mismos.

El diseño de los sistemas de protección se resume en dos procesos:

- Estudio de cortocircuitos del sistema de distribución para la determinación de las características de los dispositivos de protección requeridos.
- Coordinación de las protecciones del sistema, que se basa en el ajuste de los elementos de protección para cumplir con los requerimientos antes mencionados. (Castaño, 2003, p.101)

Hipótesis.

2.2.11. Hipótesis general.

Al realizar el análisis técnico de la interconexión entre el alimentador A4601 y el alimentador A4605, pertenecientes al Electrocentro, se podrá interconectar los alimentadores mencionados.

2.2.12. Hipótesis específica.

Al modelar y simular la interconexión entre el alimentador A4601 y el alimentador A4605, se tendrá alternativas para brindar un servicio eléctrico de calidad.

2.3. Variables

Relacionando las variables relevantes que intervienen en el presente problema objeto de estudio, que conllevarán a la explicación, demostración y probación de la formulada hipótesis, se han identificado las siguientes variables:

Tabla 6
Operalización de las variables X-Y

	Variable	Definición	Dimensión	Indicador
Variable Dependiente	Técnico de la interconexión entre alimentadores	Eléctricos a ser unidos por un punto en común	Tipos de sistemas eléctricos	Topología
Variable Independiente	Continuidad de la energía eléctrica.	Es una forma de ver que tipo de servicio que se le brinda a los usuarios.	Calidad de servicio eléctrico	SAIFI SAIDI

Capítulo III

Metodología de la investigación.

3.1. Tipo de investigación.

El tipo de investigación es aplicada debido a que se hace uso de los conocimientos de la ingeniería eléctrica, además de la utilización de los softwares relacionados a la carrera.

La investigación aplicada busca construir, actuar y modificar de acorde a los estudios realizados los sistemas eléctricos.

3.2. Nivel de investigación.

El nivel de investigación, tiene las características de un nivel analítico, ya que se analizó el sistema eléctrico de Yacus, ya también se describe todos los elementos del mencionado eléctrico, además que se agrega las mejoras con los conocimientos tecnológicos.

3.3. Métodos de investigación.

Los métodos de investigación según nuestro estudio y a las variables se enmarca a continuación:

El tema de nuestra investigación se enmarcará sobre la simulación de la interconexión de dos alimentadores del sistema eléctrico del valle de Yacus, a fin de garantizar la continuidad del servicio eléctricos, bajo los parámetros establecidos en las normas vigentes.

3.4. Instrumentos de recopilación de datos

El instrumento de recopilación es mediante la base de datos del Electrocentro, además de la simulación del sistema, además del GIS de la concesionaria mencionada.

3.5. Procedimiento de recopilación de datos.

El procedimiento de recolección de datos para nuestra investigación son los que presentamos a continuación:

Los principales datos son recopilados de la concesionaria, para realizar un diagrama unifilar del sistema eléctrico, lo más real posible.

Además de las fuentes ya mencionadas, también se recogerá información de textos especializados tales como: Normas eléctricas IEC, normas internacionales de la IEEE, los criterios de protecciones dadas por el COES, además de los criterios que se deben tener en cuenta para el sistema interconectado nacional y catálogos eléctricos.

3.6. Procedimiento de análisis de resultados.

Los procedimientos de análisis de los resultados se basaron en la simulación del sistema eléctrico de Yacus, para la ver la interconexión de los dos alimentadores.

Además, realizamos el modelamiento y la simulación del sistema eléctrico en el software DigSilent 15.1.

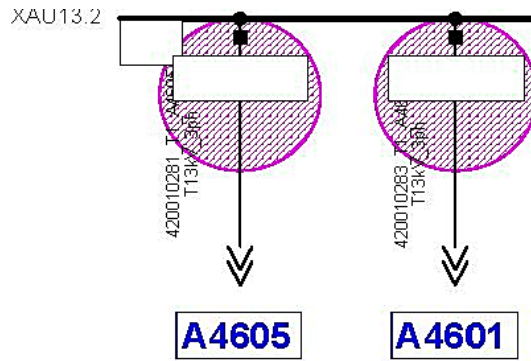
Capítulo IV

Resultados de la investigación.

4.1. Sistema eléctrico del valle de Yacus

El sistema eléctrico del valle de Yacus, esta ubicado en la provincia de Jauja, dentro de los distritos aledaños. Este sistema esta alimentado de la sub estación de SAUSA – ELECTROCENTRO -_JAUJA, funciona en 13.2 kV, a lo largo de sus instalaciones se presentan cargas monofásicas y trifásicas, los conductores que se usaron en el sistema eléctrico son conductores aéreos dentro de los cuales hay conductores AAAC (70mm², 50mm², 35mm² y 25mm²) y cables autoportantes, transformadores monofásicos y trifásicos.

Nuestro trabajo esta enfocado en dos alimentadores el alimentador A4601 y A4605.



El transformador del sistema eléctrico del valle de Yacus esta alimentado por el transformador de tres devanados SAUSA y las características se presentan a continuación, los cuales fueron recopilados del SEIN con las constantes actualizaciones del último proyecto de inversión.

3-Winding Transformer Type - ...P_Concep-Xauxa_2017(3)\Library\Equipment Type Library\ELC_JAUJA.TypTr3

Name: Read Only

Rated Power

HV-Side	<input type="text" value="7"/> MVA	Rated Voltage	HV-Side	<input type="text" value="60"/> kV
MV-Side	<input type="text" value="7"/> MVA		MV-Side	<input type="text" value="13.9"/> kV
LV-Side	<input type="text" value="3"/> MVA		LV-Side	<input type="text" value="10.75"/> kV

Vector Group

HV-Side	<input type="text" value="YN"/>	Phase Shift	<input type="text" value="0"/> *30deg
MV-Side	<input type="text" value="YN"/>	Phase Shift	<input type="text" value="0"/> *30deg
LV-Side	<input type="text" value="D"/>	Phase Shift	<input type="text" value="11"/> *30deg

Name: YN0yn0d11

Hint: The short-circuit voltages refer to the corresponding min. rated Powers
e.g. uk(HV-MV) is referred to the minimum of Sr(HV) and Sr(MV)

Positive Sequence Impedance

Short-Circuit Voltage uk		Copper Losses	
HV-MV	<input type="text" value="8"/> %	HV-MV	<input type="text" value="0"/> kW
MV-LV	<input type="text" value="1.401"/> %	MV-LV	<input type="text" value="0"/> kW
LV-HV	<input type="text" value="5.199"/> %	LV-HV	<input type="text" value="0"/> kW

Zero Sequence Impedance

Short-Circuit Voltage uk0		SHC-Voltage, Real Part	
HV-MV	<input type="text" value="8"/> %	HV-MV	<input type="text" value="0"/> %
MV-LV	<input type="text" value="1.401"/> %	MV-LV	<input type="text" value="0"/> %
LV-HV	<input type="text" value="5.199"/> %	LV-HV	<input type="text" value="0"/> %

Pocket Calculator

A tool that transforms commonly measured impedance values into equivalent star-impedances

Figura 16: Características del transformador ELECTROCENTRO - XAUXA

4.2. Flujo de potencia del sistema eléctrico

La concesionaria Electrocentro, es la encargada del suministro eléctrico a esta área del valle de Yacus, donde encontramos cargas monofásicas y trifásicas, a continuación, se muestran el flujo de potencia de los alimentadores A4601 y A4605 en un primer lugar funcionando independientemente, luego de hacer la interconexión se muestra el flujo de potencia de los dos alimentadores haciendo referencia a las principales líneas de alimentación.

4.2.1. Flujo de potencia del alimentador A4601

El análisis se realiza corriendo flujo de potencia en la zona comprendida por el alimentador A4601 sin considerar las nuevas configuraciones, registrándose los niveles de flujo de potencia en las líneas de transmisión, transformadores y perfiles de tensión de las barras presentes en la zona de influencia del Proyecto.

4.2.1.1. Características de las redes primarias del alimentador A4601.

Tabla 7
Características de los conductores del alimentador A4601.

Name	TypLne	Length km	Z1 (ohm)	phiz1 (deg)
A4601- L1	Aluminum-Steel AAAC 50mm2	0,345	0,4123347	56,01343
A4601- L2	Aluminum-Steel AAAC 50mm2	0,084	0,1004692	56,01343
A4601- L3	Aluminum-Steel AAAC 50mm2	1,345	1,607508	56,01343
A4601- L4	Aluminum-Steel AAAC 50mm2		0,8037539	56,01343

Tabla 8
Características de los conductores del alimentador A460.

Name		TypLne	Length km	Z1(ohm)	Phiz1 (deg)
A4601- L5	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.35625	0.4257804	56.01343
A4601- L6	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.226	0.2704079	56.01343
A4601- L7	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.1131	0.135204	56.01343
A4601- L8	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.0565	0.06760198	53.67485
A4601- L9	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.0565	0.06760198	56.01343
A4601- L10	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.1681	0.2009385	56.01343
A4601- L11	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.084	0.1004692	56.01343
A4601- L12	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	1.425	1.703122	56.01343
A4601- L13	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.7125	0.8515608	56.01343
A4601- L14	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.356	0.4257804	56.01343
A4601- L15	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	1.81	2.163263	56.01343
A4601- L16	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.4525	0.5408158	56.01343
A4601- L17	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.905	1.081632	56.01343

Tabla 9
Características de los conductores del alimentador A460.

Name		TypLne	Length km	Z1(ohm)	Phiz1 (deg)
A4601- L18	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.35625	0.4257804	56.01343
A4601- L19	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.345	0.4123347	56.01343
A4601- L20	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.69	0.8246695	56.01343
A4601- L21	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.197	0.3190953	53.67485
A4601- L22	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.284	0.4600156	53.67485
A4601- L23	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.265	0.4292399	53.67485
A4601- L24	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.283	0.4583958	53.67485
A4601- L25	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.7625	1.235077	53.67485
A4601- L26	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	1.525	2.470154	53.67485
A4601- L27	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.7625	1.235077	53.67485
A4601- L28	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.7625	1.235077	53.67485
A4601- L29	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.7625	1.235077	53.67485
A4601- L30	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.7625	1.235077	53.67485

Tabla 10
Características de los conductores del alimentador A4601.

Name		TypLne	Length km	Z1(ohm)	Phiz1 (deg)
A4601- L31	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.381	0.6175385	53.67485
A4601- L32	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.1906	0.3087693	53.67485
A4601- L33	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.19	0.3087693	53.67485
A4601- L34	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.61	0.9880617	53.67485
A4601- L35	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.643	0.858672	4.886083
A4601- L36	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.628	0.8385385	4.886083
A4601- L37	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.327	0.4366275	4.886083
A4601- L38	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.4845	0.6469297	4.886083
A4601- L39	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.242	0.32346490	4.886083
A4601- L40	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.121	0.1617324	4.886083
A4601- L41	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.178	0.2383425	4.886083
A4601- L42	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.1785	0.2383425	4.886083
A4601- L43	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.1785	0.238325	4.886083

Tabla 11
Características de los conductores del alimentador A4601.

Name		TypLne	Length km	Z1(ohm)	Phiz1 (deg)
A4601- L44	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.444	0.592852	4.886083
A4601- L45	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.316	0.4219397	4.886083
A4601- L46	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.6	0.8011514	4.886083
A4601- L47	Aluminium-Steel	AAAC 25mm2	0.414	0.5527945	4.886083

4.2.1.2. Flujo de carga del alimentador A4601

Tabla 12
Flujo de carga del alimentador A4601.

Name	Act.power (kW)	React.Pow (kVAR)	App.Pow. (kVA)	I(kA)	Pow.Fact
E412181	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412305	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412306	12.75	7.90174	15	0.0006508	0.85
E412307	12.75	7.90174	15	0.0006508	0.85
E412308	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412309	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412310	63.75001	39.5087	75	0.0032804	0.85

Tabla 13

Flujo de carga del alimentador A4601.

Name	Act.power (kW)	React.Pow (kVAR)	App.Pow. (kVA)	I(kA)	Pow.Fact
E412311	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412312	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412313	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412314	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412315	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412316	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412317	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412318	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412319	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412320	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412321	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412322	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412323	63.75001	39.5087	75	0.0032804	0.85
E412324	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412325	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412326	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412327	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85

Tabla 14

Flujo de carga del alimentador A4601.

Name	Act.power (kW)	React.Pow (kVAR)	App.Pow. (kVA)	I(kA)	Pow.Fact
E412328	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412329	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412335	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412336	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412337	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412338	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412339	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412340	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412341	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412342	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412343	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85

4.2.1.3. Flujo de potencia del alimentador A4605

El análisis se realiza corriendo flujo de potencia en la zona comprendida por el alimentador A4605 sin considerar las nuevas configuraciones, registrándose los niveles de flujo de potencia en las líneas de transmisión, transformadores y perfiles de tensión de las barras presentes en la zona de influencia del Proyecto.

Tabla 15
Características de las redes primarias del alimentador A4605.

Name	TypLne	Length km	Z1(ohm)	Phiz1 (deg)	
A4605- L1	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.23	0.1969289	55.074
A4605- L2	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.355	0.3039555	55.74
A4605- L3	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	3.069	2.627717	55.074
A4605- L4	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.8	0.9561384	56.013
A4605- L5	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	1.82	2.175215	56.013
A4605- L6	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.084	0.1003945	56.013
A4605- L7	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.7	0.8366211	56.013
A4605- L8	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.414	0.4956981	56.013
A4605- L9	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.414	0.4956981	56.013
A4605- L10	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.042	0.05019726	56.013
A4605- L11	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.9	1.075656	56.013

Tabla 16

Características de las redes primarias del alimentador A4605.

Name	TypLne	Length km	Z1(ohm)	Phiz1 (deg)	
A4605- L12	Aluminium-Steel	AAAC 5L0mm2	0.7	0.8366211	56.013
A4605- L13	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	1.038	1.240589	56.013
A4605- L14	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.1	0.1195173	56.013
A4605- L15	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.03	0.03585519	56.013
A4605- L16	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.129	0.1547752	56.013
A4605- L17	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.625	.012358	53.675
A4605- L18	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.435	0.7046013	53.675
A4605- L19	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.5	0.8098866	53.675
A4605- L20	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.5	0.8098866	53.675
A4605- L21	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.305	0.4940308	53.675
A4605- L22	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.4	0.6479093	53.675
A4605- L23	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	0.5	0.8098866	53.675
A4605- L24	Aluminium-Steel	AAAC 50mm2	1.515	2.453956	53.675

Tabla 17

Características de las redes primarias del alimentador A4605.

Name	TypLne	Length km	Z1(ohm)	Phiz1 (deg)	
A4605- L25	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.04	0.06479093	53.675
A4605- L26	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.395	0.6398104	53.675
A4605- L27	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.25	0.4049433	53.675
A4605- L28	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	1.522	2.465295	53.675
A4605- L29	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.5	0.895566	53.675
A4605- L30	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	1	1.619773	53.675
A4605- L31	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.25	0.4049433	53.675
A4605- L32	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.5	0.8098866	53.675
A4605- L33	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.159	0.25991635	53.675
A4605- L34	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.525	0.8503809	53.675
A4605- L35	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.625	1.012358	53.67
A4605- L36	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.625	1.012358	53.67
A4605- L37	Aluminium-Steel	AAAC 35mm2	0.725	1.174336	53.675

Tabla 18
Características de las redes primarias del alimentador A4605.

Name	TypLne	Length km	Z1(ohm)	Phiz1 (deg)	
A4605- L38	Aluminium- Steel	AAAC 35mm2	0.625	1.012358	53.675
A4605- L39	Aluminium- Steel	AAAC 35mm2	0.625	1.012358	53.675
A4605- L40	Aluminium- Steel	AAAC 35mm2	0.625	1.012358	53.675
A4605- L41	Aluminium- Steel	AAAC 35mm2	0.58	0.7744463	4.886
A4605- L42	Aluminium- Steel	AAAC 35mm2	0.58	0.7744463	4.886
A4605- L43	Aluminium- Steel	AAAC 35mm2	0.417	0.5568002	4.886
A4605- L44	Aluminium- Steel	AAAC 35mm2	0.417	0.5568002	4.886
A4605- L45	Aluminium- Steel	AAAC 35mm2	0.417	0.5568002	4.886
A4605- L46	Aluminium- Steel	AAAC 35mm2	0.41515	0.6028664	4.886
A4605- L49	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.4515	0.6028664	4.886
A4605- L50	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.4	0.5341009	4.886

Tabla 19

Características de las redes primarias del alimentador A4605.

Name	TypLne	Length km	Z1(ohm)	Phiz1 (deg)	
A4605- L51	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.56	0.7477413	4.886
A4605- L52	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.431	0.575938	4.886
A4605- L53	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.4	0.5341009	4.886
A4605- L54	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.445	0.5941873	4.886
A4605- L55	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.148	0.1976173	4.886
A4605- L56	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.549	0.7330535	4.886
A4605- L57	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.383	0.5114016	4.886
A4605- L58	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.585	0.7811226	4.886
A4605- L59	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.585	0.7811226	4.886
A4605- L60	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.6855	0.9153154	4.886
A4605- L61	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.2855	0.3812145	4.886
A4605- L62	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.4	0.5341009	4.886
A4605- L63	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.04	0.05341009	4.886

Tabla 20
Características de las redes primarias del alimentador A4605.

Name	TypLne	Length km	Z1(ohm)	Phiz1 (deg)	
A4605- L64	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.6525	0.8712521	4.886
A4605- L65	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.6125	0.8178419	4.886
A4605- L66	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.318	0.4246102	4.886
A4605- L67	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.852	1.137635	4.886
A4605- L68	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.358	0.4780204	4.886
A4605- L69	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.752	1.004777	4.886
A4605- L70	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.347	0.4633325	4.886
A4605- L71	Aluminium- Steel	AAAC 25mm2	0.1525	0.203626	4.886

4.2.1.5 Flujo de carga del alimentador A4605

Tabla 21

Resultados de flujo de carga del alimentador A4605.

Name	Act.power (kW)	React.Pow (kVAR)	App.Pow. (kVA)	I(kA)	Pow.Fact
E412154	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412182	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412183	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412184	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412185	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412186	31.875	31.875	37.5	0.0016402	0.85
E412187	31.875	31.875	37.5	0.0016402	0.85
E412196	31.875	31.875	37.5	0.0016402	0.85
E4122442	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412344	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412345	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412346	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412347	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85

Tabla 22

Resultados de flujo de carga del alimentador A4605.

Name	Act.power (kW)	React.Pow (kVAR)	App.Pow. (kVA)	I(kA)	Pow.Fact
E412348	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412350	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412351	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412352	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412353	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412354	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412355	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412356	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412357	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412358	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412360	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412361	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412362	63.75001	39.5087	75	0.0032804	0.85
E412363	42.5	26.33914	50	0.00218693	0.85

Tabla 23

Resultados de flujo de carga del alimentador A4605.

Name	Act.power (kW)	React.Pow (kVAR)	App.Pow. (kVA)	I(kA)	Pow.Fact
E412364	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412365	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412366	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412368	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412369	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412370	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412371	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412374	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412375	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412376	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412377	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412378	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412379	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412380	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85

Tabla 24

Resultados de flujo de carga del alimentador A4605.

Name	Act.Pow. (kW)	React.Pow. (kvar)	App.Pow. (kVA)	I (kA)	Pow.Fact.
E412381	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412382	21.25	13.16957	25	0.00109347	0.85
E412383	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412384	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412385	212.5	131.6957	250	0.01093466	0.85
E412386	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412391	85	52.67827	100	0.00437387	0.85
E412392	42.5	26.33914	50	0.00218693	0.85
E412393	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412394	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412395	136	84.28522	160	0.00699819	0.85
E412396	31.875	19.75435	37.5	0.0016402	0.85
E412441	12.75	7.90174	15	0.00065608	0.85
E412550	8.5	5.267826	10	0.00043739	0.85

1....

4.2.1.6 Perfil de tensión y cargabilidad de los principales puntos.

Análisis del alimentador A4601

Tabla 25
Perfiles de tensión de los principales puntos del alimentador

BARRAS	PERFIL DE TENSIÓN VALLE DE YACUS A4601				
	Tensión Nominal kV	SIN PROYECTO		CON PROYECTO	
		kV	p.u	kV	p.u
A4601 – XAUXA 13.2 kV	13.2	13.7	1.04	13.7	1.04
ATAURA 13.2 kV	13.2	13.7	1.04	13.7	1.04
HUAQUIAN 13.2Kv	13.2	13.7	1.03	13.6	1.03
MASMACHICCHE 13.2 kV	13.2	13.6	1.03	13.6	1.03
PUNTO DE INTERCONEXIÓN I404644 13.2 kV	13.2	13.5	1.02	13.3	1.01

Tabla 26
Perfiles de tensión de los principales puntos del alimentador

LÍNEA	VALLE DE YACUS A4601							
	Nivel de carga %	SIN PROYECTO			CON PROYECTO			
		Total MVA	Total MW	Total MVAR	Nivel de carga %	Total MVA	Total MW	Total MVAR
A4601- ATAURA	64.9%	1.92	1.64	1.01	78.9%	2.34	1.99	1.23
A4601- MASMA	31.2%	0.92	0.79	0.48	45.1%	1.33	1.13	0.70

Tabla 27

Cargabilidad de las principales redes primarias del alimentador

LÍNEA	VALE DE YACUS A4601							
	SIN PROYECTO				CON PROYECTO			
	Nivel de Carga %	Total MV A	Total MW	Total MVA R	Nivel de carga %	Total MV A	Total MW	Total MVA R
A4601-HUAQUIAN MASMA	35.9 %	0.45	0.38	0.23	69.1 %	0.85	0.72	0.45
A4601-MASMACHICHE	38.3 %	0.48	0.41	0.25	38.4 %	0.48	0.41	0.25
A4601 I404644 PUNTO DE INTERCONEXIÓN	0.0	0.0	0.0	0.0	32.8 %	0.40	0.34	0.21
A4601-FIN DE MASMACHICHE	20.9	0.21	0.18	0.11	20.9 %	0.21	0.18	0.11

Análisis del alimentador A4605

Tabla 28

Perfil de tensión valle de yacus a460.

BARRAS	PERFIL DE TENSIÓN VALLE DE YACUS A4605				
	Tensión Nominal	SIN PROYECTO		CON PROYECTO	
	kV	kV	p.u	kV	p.u
A4605 – XAUXA 13.2kV	13.2	13.7	1.04	13.07	1.04
HUERTAS 13.2 kV	13.2	13.3	1.01	13.4	1.02
HUASQUICHA 13.2 kV	13.2	13.3	1.01	13.4	1.01

Tabla 29

Perfiles de tensión de los principales puntos del alimentador

BARRAS	PERFIL DE TENSIÓN VALLE DE YACUS A4605				
	Tensión Nominal	SIN PROYECTO		CON PROYECTO	
	kV	kV	p.u	kV	p.u
PUNTO DE INTERCONEXIÓN I404647 13.2 kV	13.2	13.0	0.99	13.3	1.01
FIN DE LÍNEA CHUNAN 13.2 kV	13.2	12.9	0.98	13.0	0.99
FIN DE LÍNEA YAULI 13.2 kV	13.2	12.8	0.97	12.9	0.98

Tabla 30
Perfiles de tensión de los principales puntos del alimentador.

LÍNEA	VALLE DE YACUS 4605							
	SIN PROYECTO				CON PROYECTO			
	Nivel de carga %	Total MVA	Total MW	Total MVAR	Nivel de carga %	Total MVA	Total MW	Total MVAR
A4605-SAUSA	71.9%	2.08	1.76	1.10	57.3%	1.67	1.42	0.87
A4605-HUERTAS	87.9%	1.06	0.90	0.56	59.8%	0.93	0.79	0.49
A4605-HUASQUICHA	85.2%	0.83	0.70	0.43	78.3%	0.76	0.65	0.40
A4605 I404647 PUNTO DE INTERCONEXIÓN	0.0%	0.0	0.0	0.0	3.6%	0.04	0.04	0.03
A4605 LÍNEA HACIA CHUNAN	37.0%	0.19	0.16	0.10	36.8%	0.19	0.16	0.10

Tabla 31
Cargabilidad de las principales redes primarias del alimentador

LÍNEA	VALLE DE YACUS A4605							
	SIN PROYECTO				CON PROYECTO			
	Nivel de carga %	Total MVA	Total MW	Total MVAR	Nivel de carga %	Total MVA	Total MW	Total MVAR
A4601 – LÍNEA HACIA YAULI	41.1	0.39	0.33	0.21	40.9	0.39	0.33	0.21

4.3. Discusión de resultados de flujo de potencia.

A partir de los análisis del flujo de potencia del sistema eléctrico del valle de Yacus en las condiciones *sin proyecto* y considerando *con proyecto*, se puede observar que para ambas condiciones no se presentan subtensiones, ni sobretensiones en los puntos principales de nuestro sistema eléctrico.

De los resultados obtenidos para el sistema eléctrico, se puede observar que con las modificaciones que se realiza al sistema, este opera con normalidad y dentro de los límites permisibles de operación.

El sistema eléctrico del Valle de Yacus dentro de las condiciones de operación normal, se saca la conclusión que las modificaciones de las ultimas instalaciones, no afectan de manera negativa la operación del sistema eléctrico interconectado, puesto que los niveles de tensión en las barras de carga próximas al proyecto se encuentran dentro de los límites de operación permitidos y el flujo de potencias en las líneas no superan su capacidad nominal.

Conclusiones

1. La interconexión eléctrica entre el alimentador A4601 y el alimentador A4605, y la integración eléctrica ha quedado demostrado que aporta muchos beneficios a los sistemas eléctricos que están involucrados.
2. Se concluye que las nuevas instalaciones de la interconexión, solo se puede ser utilizado en determinadas ocasiones, debido a las restricciones técnicas, con equipamiento automatizado esta interconexión se haría remotamente en los momentos que se necesiten.
3. La falta de interconexiones en el sistema eléctrico acarrea costos en pérdidas, además estos costos son asumidos por la concesionaria, en este ámbito la interconexión es una opción para alimentar cargas, tenemos dos opciones para poder hacerlo. Además, con la interconexión se mantendría o mejoraría los índices de confiabilidad con la reducción del tiempo y las frecuencias de las interrupciones eléctricas.
4. El aumento de la demanda de energía eléctrica y las exigencias de las normas vigentes, además la constante supervisión del Osinerming, hacen necesaria la interconexión de las redes eléctricas, ya que estas aseguran su autoabastecimiento para periodos futuros, además que se puede exportar los excedentes de energía sin afectar el continuo consumo interno.
5. En la investigación se verifica que los beneficios por la reducción de pérdidas, se ve que tiene una incidencia positiva para el sistema eléctrico y la concesionaria Electrocentro.

Recomendaciones

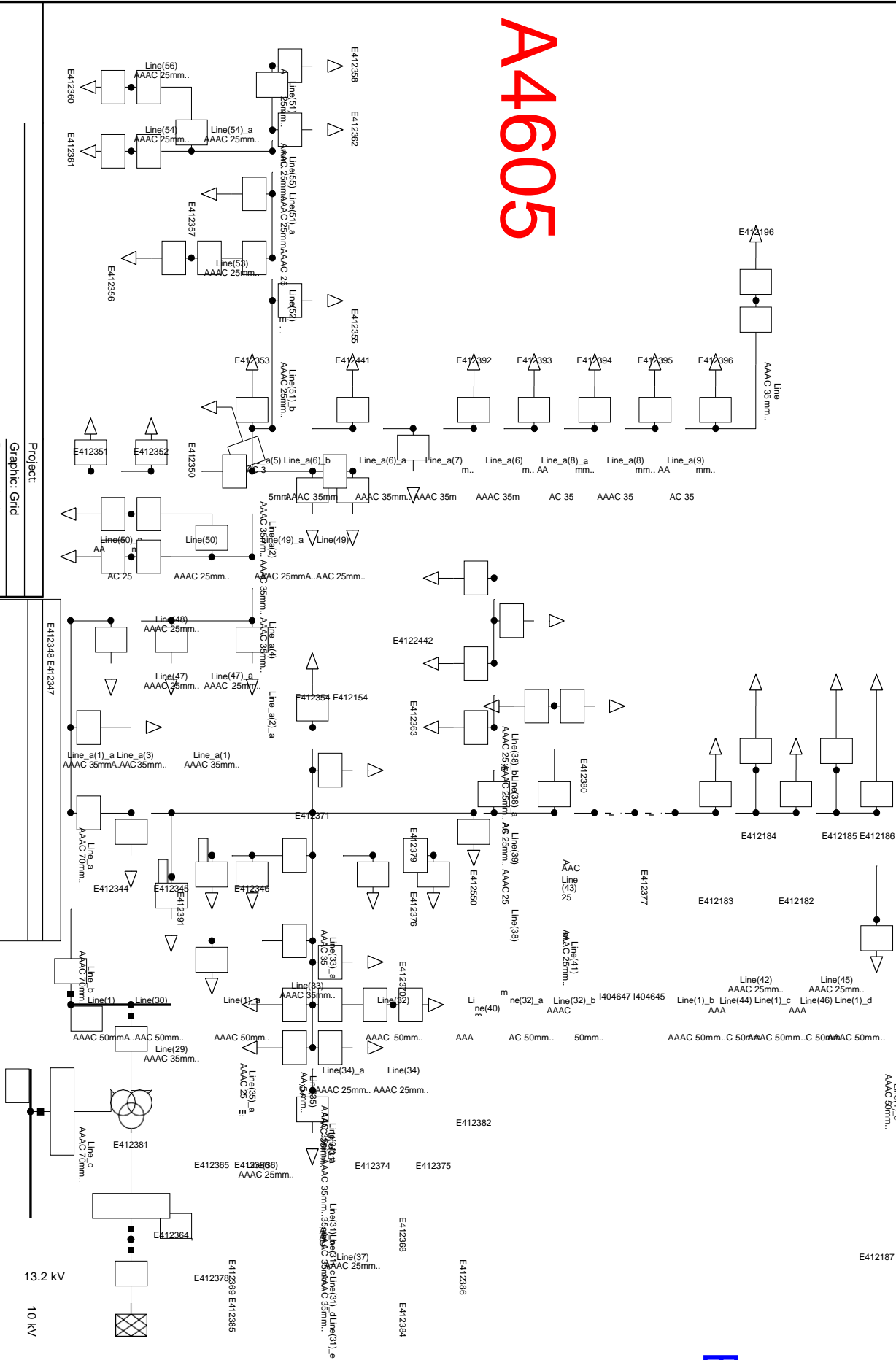
1. Se recomienda la instalación de equipos automatizados para realizar la interconexión remotamente, incluso esto podría realizar automáticamente ante la presencia de alguna falla en el sistema eléctrico.

Bibliografía

- Acosta Montoya, A. (2000). *Análisis de Sistemas de Potencia*. España.
- Andersson, G. (2008). *Modelling and analysis of electric power systems*.
- Aragon Castro, I. (2013). *El sistema eléctrico de interconexión Perú-Ecuador y su incidencia en los costos totales de energía eléctrica en el Perú*. Lima, Perú.
- C. Araujo, C. G. (2006). *Planificación en distribución para la transferencia de carga entre subestaciones adyacentes aplicado a las subestaciones 05 y 14, 12 y 15, de la Empresa Eléctrica regional Centro Sur C. A.*
- Castaño, S. R. (2003). *Protección de sistemas eléctricos*.
- CENACE-CND. (s.f.). *Acuerdo operativo Colombia-Ecuador*.
- Coral Martínez, I. (2002). *Ligazones Eléctricas Internacionales: Hacia una estrategia para impulsar su implantación*.
- Espinoza Surco, N. M. (2016). *Mejoramiento del sistema eléctrico de la ciudad de Puerto Maldonado en media tensión*.
- Espinoza Surco, N. M. (2016). *Mejoramiento del sistema eléctrico de la ciudad de Puerto Maldonado en media tensión*. Puerto Maldonado, Perú.
- Gers, J. (2013). *Distribution system analysis and automation, The Institution of Engineering and Technology*.
- Gómez, D. (Mayo, 2012). *Análisis de contingencias eléctricas en centros comerciales*.
- Husson, G. (2004). *Integración Eléctrica Regional. Reflexiones Generales y enseñanzas del nuevo mercado eléctrico andino*.
- Kersting, W. H. (2012). *Distribution system modeling and analysis*.
- Mora Florez, J. J. (2007). *Localización de Faltas en Sistemas de Distribución de*. Girona, España.
- P, S. A. (2011). *Electric distribution systems*.
- Villacís, B. V. (2012). *Análisis técnico de la operación del alimentador No2 de la S/E Otavalo,*.
- W. H. Kersting - IEEE. (2011). *The whys of distribution system analysis*.

Anexos

A4605



Factory 15.1.2

Project:
Graphic: Grid
Date: 10/20/2019
Annex:

SE XAUXA
ELC_JAUJA

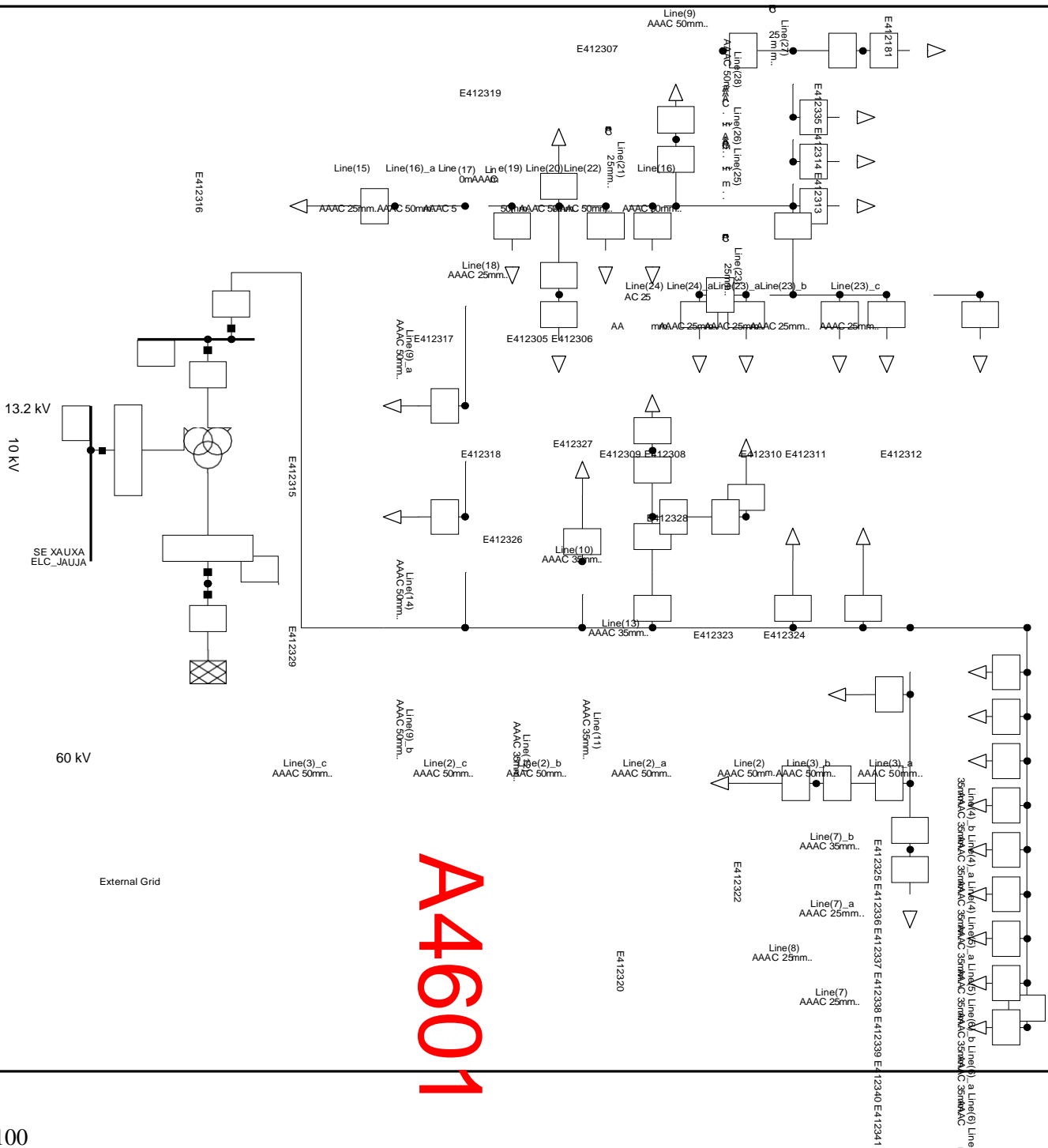
SIS
ELEC
DEL
YA

E412383

60 kV

External Grid

SISTEMA ELECTRICO DEL VALLE YACUS



A4601

13.2 kV
10 kV
SE XAUXA
ELC_JAUJA

60 kV

External Grid

E412321

WV

DigSILENT

Tesis Campos

por Percy Humberto Cueva Rios

Fecha de entrega: 15-nov-2019 11:32a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 1214517995

Nombre del archivo: TesisCampos.pdf (1.45M)

Total de palabras: 16014

Total de caracteres: 88557

Tesis Campos

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%	15%	0%	12%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	pt.scribd.com Fuente de Internet	7%
2	cybertesis.uni.edu.pe Fuente de Internet	5%
3	Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador Trabajo del estudiante	4%
4	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	3%
5	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1%
6	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante	<1%
8	www.dspace.espol.edu.ec Fuente de Internet	<1%

9	repositorio.uandina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
10	www.caei.com.ar Fuente de Internet	<1 %
11	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 15 words

Excluir bibliografía

Activo