



Evaluación De Índices De Confiabilidad Por Re planificación De Alimentador. Estudio de caso

Juan Carlos Delgado ^{a, b}, Roberto José Cabral ^{a, b}

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Energía Eléctrica (LIDEE), Oberá, Misiones, Argentina

e-mails: jcdelgado@prico.com.ar, robert_rjc@hotmail.com

Resumen

Este documento se desarrolla en el marco del trabajo de tesis de la Maestría en Ingeniería de la Energía perteneciente al Programa de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, UNaM. Se presenta el avance del estudio que tiene como objetivo analizar diferentes propuestas de reconfiguración de un alimentador del Sistema Eléctrico de Distribución de Media Tensión de la Cooperativa de Distribución de Energía Eléctrica del departamento de Libertador General San Martín de la Provincia de Misiones Arg. El estudio se basa en la determinación de la cantidad, ubicación y tipos de elementos de protección de sobre corriente con el fin de disminuir los índices de confiabilidad del sistema. Se utiliza un software de simulación para el desarrollo de las simulaciones de los escenarios propuestos y la cuantificación de los índices de confiabilidad.

Palabras Clave – Índices de Confiabilidad, Localización de Elementos de Protección, Planificación, Red de Distribución Eléctrica.

1. Introducción

En los últimos años la conciencia a nivel mundial sobre el calentamiento global y el cambio climático ha puesto el foco también sobre la manera en que se genera y se distribuye la energía, sumado a la creciente tasa de consumo se plantean las preocupaciones y requerimientos en cuanto a seguridad, calidad y confiabilidad del suministro.[1] En respuesta a estas cuestiones, las redes evolucionan hacia el concepto de Redes Inteligentes, con la integración de Tecnologías de la Información y de la Comunicación, la incorporación de Generación Distribuida de fuentes de energía alternativas; y planificación en vista de obtener una rápida respuesta a fallos y a cambios en los perfiles de consumo.[2]

El sistema eléctrico de distribución es la parte del sistema de potencia donde se da la mayor pérdida de energía y donde ocurren la mayor cantidad de fallas que interrumpen el servicio [3].

En una economía basada fuertemente en procesos industriales automatizados y dependientes de equipamientos electrónicos sensibles, se exige un alto nivel de disponibilidad del sistema eléctrico [4]. Indicadores de confiabilidad tales como SAIFI, SAIDI, MAIFI, ENS [5], son utilizados por las distribuidoras y los Entes reguladores, en la evaluación del desempeño de los Sistemas Eléctricos de Distribución de Energía y en el establecimiento de metas [6].

Esta realidad obliga a las líneas de Transmisión y redes de Distribución a adaptarse al nuevo escenario, en donde es necesario contar con un sistema flexible, orientado al usuario, atendiendo a la calidad del suministro, a la optimización del flujo de potencia, a la continuidad del servicio y a la

escalabilidad. Las líneas eléctricas de Transmisión y Distribución de nuestra provincia, en especial las segundas, se basan en redes radiales con comunicaciones parciales, con escaso o nulo intercambio de información; cuestión que sumado a que los consumidores son cada vez más exigentes con la calidad del servicio y el costo de la energía, lleva a considerar la sustentabilidad de la tecnología de red actual.

Los cortes en el suministro de la Energía Eléctrica generan diversos problemas en la sociedad actual. Pueden identificarse situaciones específicas de usuarios electro-dependientes, como pueden ser centros de salud o procesos industriales; que además de generar inquietud en la población, implican pérdidas económicas.

“Se ha estimado que cerca del 70% de las interrupciones del suministro eléctrico se debe a fallas en las redes primarias de distribución, por lo que las empresas de distribución están constantemente revisando sus índices de confiabilidad, asociados principalmente a la frecuencia y duración de las fallas. Para mejorar los índices de confiabilidad, las empresas distribuidoras deben invertir una gran cantidad de capital, por lo que es necesario realizar un balance entre confiabilidad y costos” [6].

2. Objetivos

2.1. Objetivo General:

Analizar distintos escenarios de reconfiguración de la topología del alimentador en estudio, con base en la determinación de la cantidad, las ubicaciones y tipos de elementos de protección y maniobra, para lograr mejorar los índices de confiabilidad del suministro de energía eléctrica. Se analizarán los escenarios propuestos considerando los elementos de protección de sobre corriente tradicionales, reconectores, seccionalizadores y fusibles.

2.2. Objetivos específicos:

Para simular los escenarios propuestos, se utiliza un programa informático, el cual requiere de la carga de los parámetros mecánicos, eléctricos y de perfiles de carga de la red en estudio, como también de las tasas de falla y los tiempos de reposición de cada elemento de la misma.

- Se simula el alimentador en estudio con la topología actual (Caso 1).
- Se simula el alimentador en estudio con una topología diferente, resultante de transferir parte de la carga a nuevos alimentadores, y sin modificar las ubicaciones ni los tipos de protecciones de sobre corriente de la red de su configuración original (Caso 2).
- Se simula el alimentador con la topología de transferencia de carga del punto anterior y con la utilización de un optimizador se analizarán nuevas ubicaciones de los elementos de protección por sobre corriente de la red (Caso 3).
- Se simula el alimentador con topología de transferencia de carga y con la relocalización de las protecciones por sobre corriente de la red en ubicaciones propuestas de manera heurística (Caso 4).

Cada caso de simulación propuesta se analiza dos estados de carga (media y máxima), y se determina la confiabilidad global del sistema eléctrico en estudio considerando los índices obtenidos mediante el tratamiento de resultados del software utilizado.

3. Estado del Arte y de la Práctica

Se denomina Redes de Distribución (RD) a la porción del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) destinado al suministro de energía eléctrica desde las barras secundarias de la subestación de sub-transmisión hasta el primario de los transformadores de distribución o barra de alimentación a los usuarios. El sistema está compuesto por un grupo de componentes interconectados que posibilitan el suministro de la energía eléctrica a través de una rama troncal o alimentador principal, sus ramales, sub-ramales y transformadores hasta la carga [7].

La distribución más comúnmente utilizada consiste de alimentadores troncales trifásicos con neutro múltiplemente aterrado, con derivaciones laterales trifásicas, monofásicas o bifásicas y es denominada distribución radial, este tipo de distribución es de más simple operación y más económica. La confiabilidad en la continuidad del servicio en alimentadores primarios radiales normalmente es baja; una falla en cualquier ubicación del alimentador primario causa un corte de energía para todos los consumidores, a menos que la falla pueda ser aislada de la fuente por un dispositivo de desconexión como un fusible, un seccionador o un reconectador [7].

Este trabajo estudia alimentadores con configuración del tipo radial, con conductores desnudos de aleación de aluminio montados sobre crucetas de madera y aisladores de porcelana de perno rígido o cadena, 3 conductores de fase y un neutro múltiplemente aterrado, con ramales y sub-ramales trifásicos, monofásicos con retorno por tierra. Se utiliza además en algunas zonas el sistema de montaje compacto con conductores de aluminio protegido.

El principal objetivo de la Planificación del RD consiste en proyectar y organizar el suministro eléctrico desde el punto donde se capta la energía en el sistema de transmisión, hasta los sitios de entrega al consumidor final (cargas) de una manera óptima desde el punto de vista económico y cumpliendo con restricciones o límites técnicos que garanticen parámetros de calidad y continuidad del servicio eléctrico, requerimientos de capacidad de la carga y consideraciones de tipo geográfico como ubicación de las cargas, entre otras [1].

La planificación presenta tres enfoques: 1)- Planificación de la expansión eléctrica; 2)- Planificación mediante el incremento y reforzamiento de la infraestructura eléctrica; y 3)- la Planificación Operacional [7].

1)- La Planificación de la expansión eléctrica también es conocida como “*Greenfield Planning*”, y parte del supuesto de que se dispone únicamente como datos de entrada a la carga y a todas las posibles rutas de la red, para desarrollar un esquema de distribución óptimo de abastecimiento eléctrico [1].

2)- La Planificación mediante el Incremento y Reforzamiento de la infraestructura eléctrica toma como entrada a las redes existentes para modificarlas en base a una tasa de crecimiento de la carga proyectada y lograr como resultado un sistema de distribución que pueda abastecer la previsión futura de la demanda [1].

3)- La Planificación Operacional consiste en una reconfiguración radial de las redes de distribución existentes con el objetivo de minimizar las pérdidas técnicas de energía y los costos operativos del sistema [1].

En general, la planificación del sistema de distribución es un procedimiento complejo debido al gran número de variables involucradas, y la difícil tarea de la presentación matemática de numerosos requisitos y las limitaciones especificadas por la configuración de los sistemas [7].

Modelos matemáticos son utilizados para representar y analizar los sistemas empleando técnicas de investigación operativa [7].

Algunas técnicas de investigación operativa utilizadas en planificación incluyen, el método “Política Alternativa”, mediante el cual se comparan algunas opciones alternativas y se elige el mejor; el método de “Descomposición”, en el que el problema se divide en varios pequeños y cada uno se resuelve por separado; los métodos de “Programación Lineal Entera Mixtos”, que linealizan las condiciones de restricción, el método de “Programación Cuadrática”; el método de “Programación Dinámica”; y el método de “Algoritmos Genéticos”; cada uno de éstos métodos con sus ventajas y desventajas [7].

Diversos investigadores ya han estudiado el problema de planificación de redes eléctricas, localización de protecciones y elementos de maniobra, donde se incorporan premisas de calidad de servicio y costos, utilizando algunos de los métodos antes nombrados.

Utilizando el método *PSO (Particle Swarm Optimization)*, se resuelve el problema de localización simultánea de interruptores y seccionadores, teniendo como función objetivo minimizar la energía no suministrada (*ECOST*) [8].

Mediante optimización por Colonia de Hormigas (*MACO*), para determinar la ubicación de reconectores, fusibles y seccionadores considerando índices de confiabilidad como *SAIFI* y *SAIDI* junto con los costos totales de los equipos [9].

Empleando una técnica denominada Proceso Analítico Jerárquico que considera la ubicación de equipos de maniobra controlados de forma remota [10].

En [11] los autores proponen la localización optimizada de equipos de maniobra en alimentadores de distribución, con el objetivo de minimizar diversos indicadores de continuidad de suministro eléctrico como el *SAIDI (System Average Interruption Duration Index)*, y la Energía No Suministrada (*ENS*). Las funciones objetivo se basan en los tiempos de localización de falla, conmutación y reparación, tasa de falla y carga instalada por tramo. La búsqueda de la solución fue empleando un Algoritmo Genético modificado.

Mediante el empleo de un algoritmo denominado *Simulated Annealing* en [12] procedieron a la búsqueda de soluciones, al problema de encontrar la cantidad y ubicaciones optimas de llaves de maniobra, con el objetivo de minimizar el costo estimado de la energía no suministrada a los consumidores debido a la ocurrencia de interrupciones (*ECOST*), más los costos de instalación y operación de los dispositivos. Las restricciones impuestas fueron relativas a la capacidad de reserva de los alimentadores y caída de tensión admisible.

Con enfoque multi-objetivo (máxima confiabilidad y mínimo costo) para la ubicación de seccionadores en redes radiales con presencia de Generación Distribuida [13] utiliza el algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas.

En [14] proponen dos enfoques. Optimización con objetivo único que consiste en la localización de dispositivos de protección y maniobra en los alimentadores con el fin de minimizar los indicadores de confiabilidad que consideran la ocurrencia de interrupciones permanentes, pre-definiendo el esquema de protección (coordinado o selectivo). Y el segundo enfoque busca

minimizar simultáneamente un indicador de confiabilidad que considera la ocurrencia de interrupciones permanentes y el indicador *MAIFI*, que considera la ocurrencia de interrupciones temporarias. De esa forma, además de localizar los elementos de protección y maniobra, el proceso de optimización busca definir el esquema de protección a ser empleado. Para la solución del problema de optimización con objetivo único se emplea un Algoritmo Genético Simple. Y para la solución de la optimización con doble objetivo, se obtiene un conjunto de soluciones empleando un Algoritmo Genético Multi-Objetivo.

Considerando el emplazamiento de seccionadores con control remoto en [15] se utiliza el método de Programación Lineal de Enteros Mixtos para modelar el problema. Considera los costos por afectación a clientes, las inversiones de capital de instalación, gastos anuales de operación y mantenimiento.

Utilizando el método de Programación Lineal de Enteros Mixtos en [16] se determina el número óptimo, el tipo y la ubicación de diferentes tipos de dispositivos simultáneamente, como interruptores, reconectadores, seccionadores, controlados de forma remota. Teniendo en cuenta los costos de interrupciones momentáneas y permanentes, como los costos de inversión y mantenimiento.

En [17] se analiza la ubicación óptima de elementos de protección y maniobra incluyendo la localización y tamaño de Fuentes de Generación Distribuida, para lo cual utiliza una formulación de Programación Lineal de Enteros Mixtos.

Y en [18] los autores utilizan un Algoritmo Genético para encontrar el número y localización ideal de reconectadores en redes radiales o anilladas minimizando el índice *SAIFI*, considerando además fuentes de generación distribuida.

En [19] se presenta un modelo matemático para la localización simultánea de elementos de protección y maniobra modelando la red como un problema de Programación de Enteros Mixtos (MIP), buscando minimizar las interrupciones en el suministro de energía eléctrica tanto permanente como de corta duración y considerando como restricción el costo de inversión en equipamiento; la veracidad del modelo propuesto es validado aplicándolo al sistema de prueba RBTS-bus4 y luego se aplica a un sistema real.

En [20] los autores proponen encontrar la ubicación y cantidades óptimas de reconectadores y seccionadores a ser ubicados en la red de distribución buscando minimizar las interrupciones a los clientes, mejorando la confiabilidad de la red y minimizando las inversiones en equipamiento; aplican para la resolución de los objetivos un algoritmo MOPSO (*Multi-Objective Particle Swarm Optimization*).

En [21] se utiliza un algoritmo *BPSO* (*Binary Particle Swarm Optimization*) para determinar la cantidad y ubicación de reconectadores y seccionadores en una red eléctrica de distribución, cuya función objetivo es minimizar el costo por energía no suministrada (ECOST) sumado a los costos por inversión y mantenimiento, y maximizar la rentabilidad en la inversión analizando las mejoras de los índices de confiabilidad *SAIDI* y *SAIFI*. Para la evaluación de los índices de confiabilidad y los análisis de falla utiliza el software Power Factory.

Los últimos trabajos en planificación de redes de distribución de energía eléctrica apuntan a optimizar la red, lograr mayor confiabilidad, considerando el aporte de fuentes de Generación

Distribuida, con una rápida respuesta a los fallos o cambios en los perfiles de consumo mediante comunicación inteligente entre los distintos dispositivos de la red.

De lo anterior expuesto en el estado del arte, éste trabajo plantea encontrar la mejor configuración de red, considerando la relocalización de elementos de protección y maniobra existentes, con la tecnología utilizada en la actualidad por la Cooperativa de Distribución de Energía Eléctrica del departamento de Libertador General San Martín de la Provincia de Misiones, sin perder de vista la implementación de tecnología de red avanzadas considerando su escalabilidad.

4. Procedimiento Metodológico

El área de estudio se enmarca en la zona de influencia del alimentador de media tensión en 13,2 kV denominado Salida 2 de la Cooperativa Luz y Fuerza de Libertador General San Martín en la ciudad de Puerto Rico, provincia de Misiones.

El crecimiento natural de la demanda lleva a la re planificación del sistema en estudio. Entre otras tareas ésta re planificación conducirá a la transferencia de carga del alimentador Salida 2, lo que conlleva a la modificación de su topología original.

En el presente estudio se analiza el estado actual del alimentador Salida 2, la cargabilidad de las líneas, tensión de los nodos, y obtención de los índices de confiabilidad. Se propone una opción de transferencia de carga, selección y localización de las protecciones por sobre corriente de la red, con el fin de mejorar sus índices globales de confiabilidad.

La metodología propuesta es implementada utilizando un programa informático, modelando en él los distintos escenarios de análisis.

4.1. Red Original

Se realiza el modelado de la red en el software con su topología original llamado Caso 1 (ver Fig. 1), en la que se localizan 1 reconectador (R), 1 seccionador (S), y seccionadores fusibles tipo *cut-out* (F); con el objeto de obtener los valores de cargabilidad de las líneas, transformadores y los índices de confiabilidad general del sistema para esta configuración.

4.2. Modelo de Red

El modelado de la red se realiza mediante la descripción topológica de tramos, siendo estos definidos por la longitud de red entre dos elementos de protección o maniobra consecutivos, donde las cargas dependientes del mismo tramo sufren las mismas consecuencias ante alguna contingencia. Cada elemento de la red está caracterizado por sus propios parámetros eléctricos, mecánicos y de confiabilidad (tasa de falla y tiempo de reparación). Estos datos comprenden aspectos técnicos y operativos, diagrama unifilar, estadísticas de falla de los equipos, parámetros eléctricos de cada elemento de red.

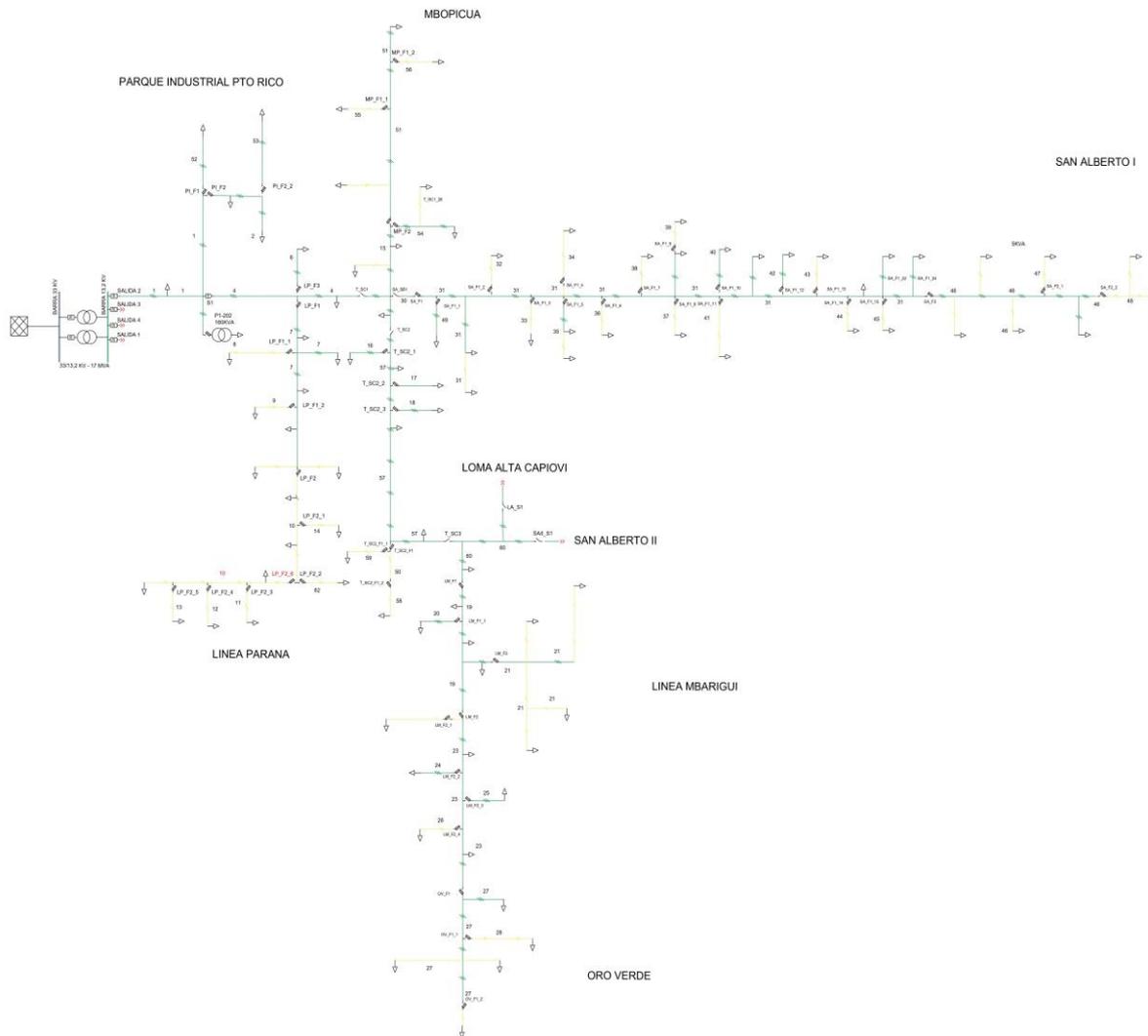


Fig. 1. Alimentador Salida 2 (S2). Topología original.

4.3. *Parámetros de elementos de la Red.*

La línea eléctrica ésta compuesta por varios tramos con diferentes secciones de cable, tipo de montaje, longitud entre nodos, tasas de falla y tiempos de reposición. Para la obtención de los parámetros tasa de falla y tiempos de reposición, se divide la red en zonas determinadas por las protecciones de sobre corriente aguas arriba de cada una de estas, y se analizan los reportes de fallas de la distribuidora. La descripción de la estructura de cada tramo determina la disposición geométrica espacial de los conductores.

Los datos característicos de los conductores obtenidos de catálogos de fabricantes son necesarios para que el software determine la matriz de impedancia por tramo.

Para el modelado de los transformadores se obtienen los datos característicos de los ensayos de vacío y corto circuito, los valores de tasa de falla y tiempo de reparación se obtienen del análisis del historial de mantenimiento provisto por la distribuidora.

Para el modelado de las cargas se utilizó el modelo ZIP, representado en las ecuaciones siguientes:

$$P = P_0.[P1.(V/V_0)^2 + P2.(V/V_0)^1 + P3] \quad (1)$$

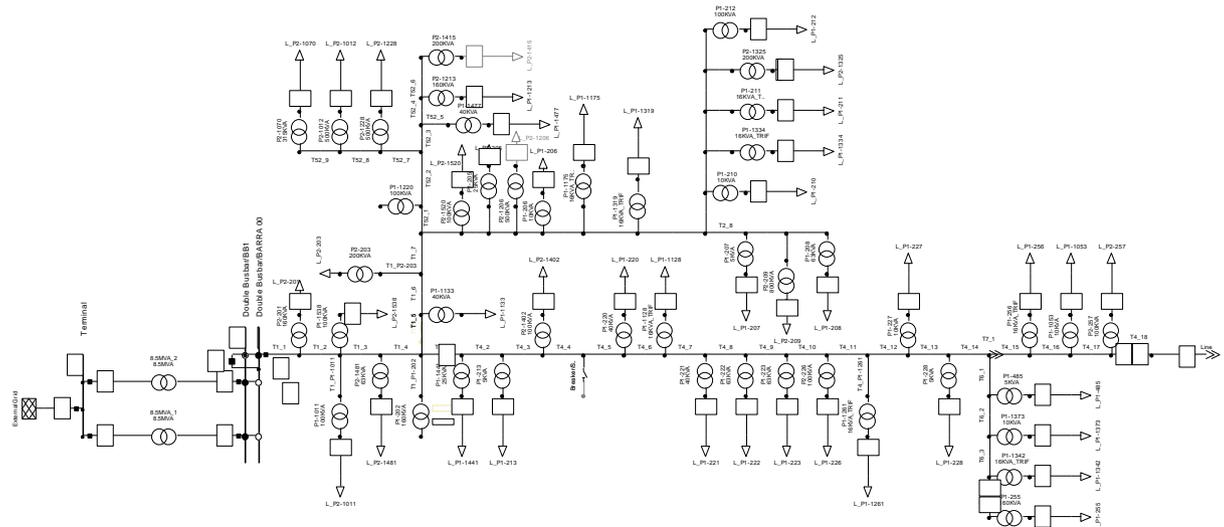
$$Q = Q_0.[Q1.(V/V_0)^2 + Q2.(V/V_0)^1 + Q3] \quad (2)$$

Dónde: P es la potencia activa en [kW]; Q es la potencia reactiva [kVAr]; V es la tensión en barra en kV, el sub-índice 0 denota valores nominales o de estado estable del sistema.

El modelo ZIP corresponde a una combinación lineal de los modelos de carga a potencia constante, corriente e impedancia constante. Los coeficientes $P1$, $P2$, $P3$ y $Q1$, $Q2$, $Q3$ representan la proporción de cada una de las componentes activa y reactiva.

Ante el desconocimiento de la composición de una carga se recomienda utilizar el modelo de corriente constante para la potencia activa. Y de impedancia constante para la potencia reactiva. De esta manera se tiene una mezcla de carga resistiva con motor [22]. Se utiliza esta recomendación para el modelado de cargas residenciales y comerciales; para las cargas industriales se utilizó el modelo a potencia constante.

En la figura 3 se muestra el diagrama unifilar de una parte de la red modelada en el software.



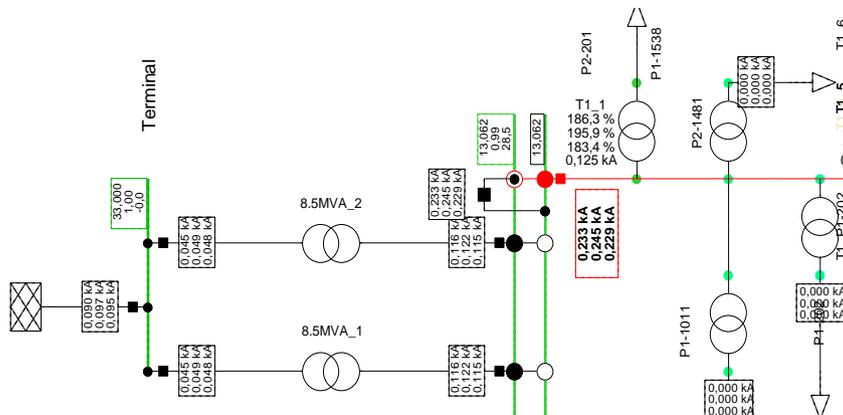


Fig. 4. Esquema unifilar. Flujo de carga en inicio de alimentador.

Puede verse también la tensión en pu en una de las fases y se identifica el nodo 104 con un valor de tensión de 0,83 pu, figura 5.

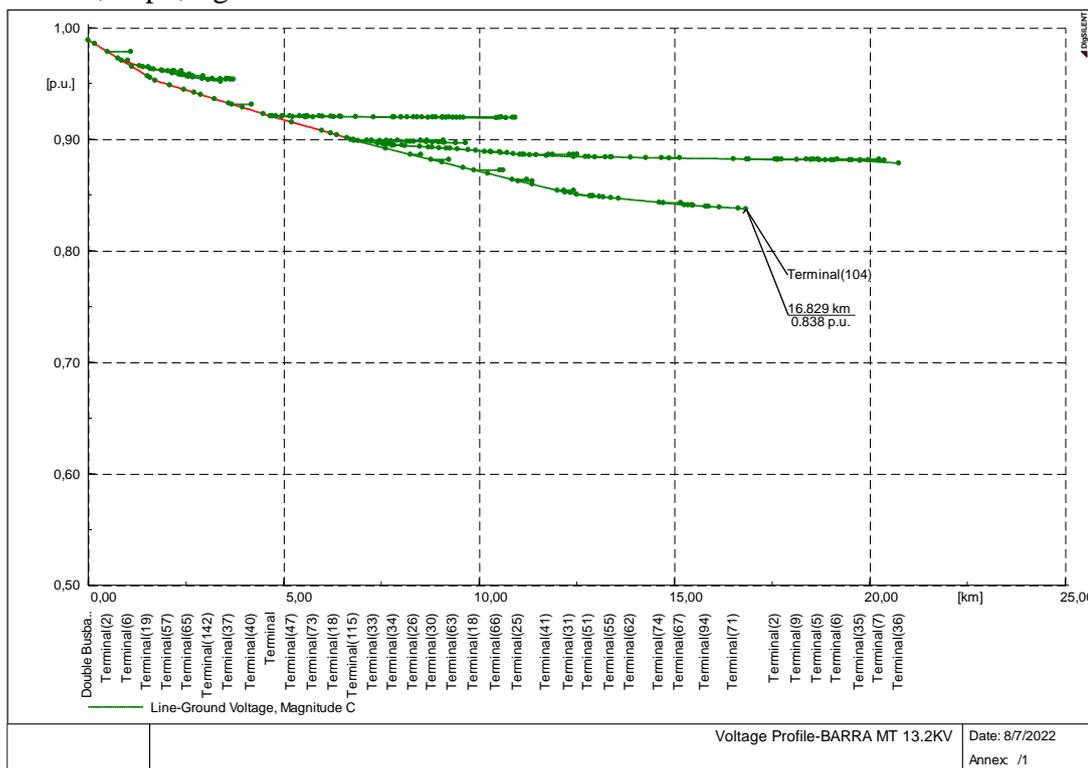


Fig. 5. Perfil de tensión, alimentador S2, fase T.

6. Referencias

- [1] Solís Intriago C., Planificación De Redes Eléctricas De Distribución En Zonas Urbanas Consolidadas Considerando Criterios De Confiabilidad, Esc. Politécnica Nacional, Ecuador, 2018.
- [2] Gomez, Víctor A.; Hernandez, Cesar - RIVAS, Edwin. Visión General, Características y Funcionalidades de la Red Eléctrica Inteligente (Smart Grid). Inf. tecnol. [Online]. 2018, vol.29, n.2 [citado 2018-07-20], pp.89-102. Disponible en: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-

- 07642018000200089&lng=pt&nrm=iso>. ISSN 0718-0764.
- [3] Short T., *Electric Power Distribution Handbook*. Boca Raton: CRC Press LCC, 2004.
 - [4] Dornelles Ferreira G., *Modelos Matemáticos Para Optimización De Confiabilidad De Sistemas Eléctricos De Distribuição Com Geração Distribuída*. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul Escola De Engenharia, 2013.
 - [5] IEEE Power and Energy Society, “IEEE guide for electric power distribution reliability indices,” IEEE Standard 1366 (2012).
 - [6] Billinton R., Allan R., *Reliability Evaluation of Power Systems*, 2nd ed. New York, NY, USA, Plenum, (1996).
 - [7] Gonen, T. *Electric Power Distribution System Engineering*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press LCC, 2008.
 - [8] Moradi A., Fotuhi-Firuzabad, Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle swarm optimization algorithm, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 1, 2008.
 - [9] Tippachon W, Rerkpreedapong D., Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization. Elsevier 2009.
 - [10] Bernardon D. P., et al., AHP decision-making algoritmo allocate remotely controlled switches in distribution networks, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, no. 3, pp.1884 -1892, 2011.
 - [11] Leventin G., Mazal S., Elmakis D., “Genetic Algoritmo for Optimal Sectionalizing in Radial Distribution Systems with alternative supply”, *Electric Power Systems Research* n°35, pp. 149-155, 1995.
 - [12] Billinton R., Jonnavithula S., “Optimal Switching Placement in Radial Distribution Systems”, *IEEE Power Transactions on Power Delivery*, vol. N°3, pp. 1 1996.
 - [13] Falaghi H., Haghifam M., Singh C., “Ant Colony Optimization.Based Method for Placement of Sectionalizing Switches in Distribution Networks Using a Fuzzy Multiobjective Approach”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, 2009.
 - [14] Dorneles Ferreira G., Cardozo G., *Optimização da confiabilidade de Sistemas de Distribuição de Energía Eléctrica: Uma Abordagem Considerando a Seleção e Alocação de Dispositivos de Proteção e Manobras*, Tesis de Maestría, Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria Brasil, 2009.
 - [15] Abiri-Jahromi A., Fotuhi-Firuzabad, Parvania M., “Optimized Sectionalizing Switch Placement Strategy in Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Delivery*, vol. 27, N°1, pp. 362-370, 2012.
 - [16] Popovic Z., Brbaklic B., Knezevic S., “A mixed integer Linear Programming Based Approach for Optimal Placement of Different Types of Automation Device in Distribution Networks”, *Electric Power Systems Research*, N°148, pp. 136-146, 2017.
 - [17] Lwin M., Dimitrov N., Santoso N., “Protective Device and Switch Allocation for Reliability Optimization with Distributed Generators”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018.
 - [18] Karpov A., Akimov D., “Integral Indicators Improvement (SAIFI) of Power Supply Reliability in Electric Distribution Systems Based on Reclosers Placement Optimization”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018.
 - [19] Izadi M., Safdarian A., Moeini-Aghaie M., & Lohtonen M. “Optimal Placement of Protective and Controlling Device in Electric Power Distribution Systems: A MIP Model”, *IEEE Access* 7, 2019.
 - [20] A. Zeinalzadeh, A. Estebarsari and A. Bahmanyar, "Multi-Objective Optimal Placement of Recloser and Sectionalizer in Electricity Distribution Feeders," 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Genova, Italy, 2019, pp. 1-4.
 - [21] Kumar, Nitish and Vasundhara Mahajan. “Reconfiguration of Distribution Network For Power Loss Minimization & Reliability Improvement using Binary Particle Swarm Optimization.” 2018 IEEE 8th Power India International Conference (PIICON) (2018): 1-6.
 - [22] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, “Load representation for dynamic performance analysis”, *IEEE Trans. PowerSyst.*, vol. 8, pp. 472-482, May 1993.