

# METODOLOGIA DE REUBICACION ÓPTIMA DE TRANSFORMADORES EN EL NIVEL DE TENSION I UTILIZANDO ALGORITMOS GENETICOS

CASO DE ESTUDIO EMPRESA DE ENERGIA DEL QUINDIO

**Alexander Molina Cabrera, Carlos Andrés Pulgarín, Ernesto Galeano Sánchez, Víctor Hugo Montoya Corrales**

Director Centro de Investigación	Subproceso Control y Protecciones	Investigador	Investigador
Universidad Tecnológica de Pereira	Empresa de Energía del Quindío	Centro de investigación en Electromagnetismo y Fenómenos eléctricos	Centro de investigación en Electromagnetismo y Fenómenos eléctricos
Pereira, Colombia	Armenia, Colombia	Pereira, Colombia	Pereira, Colombia
almo@utp.edu.co	capulgarin@edeq.com.co	ernestogaleano01@gmail.com	victorhmontoya@gmail.com
3146785142	321 815 6974	3187969687	3137632430

**(Resumen/Abstract)** — En este trabajo se construye un análisis de cargabilidad de los transformadores a partir de curvas modelo de demanda por tipo de usuario, y la información histórica de operación del circuito. A partir de esta información se construye entonces una metodología basada en algoritmos genéticos, para determinar la reubicación óptima y reemplazo de algunos de los transformadores del circuito, con el fin de reducir las pérdidas y elevar el nivel de reconocimiento del activo bajo el criterio técnico contemplado en la Resolución CREG 097 del 2008. La metodología construida, se implementa en el lenguaje MATLAB, y se ejecuta en un circuito perteneciente a la Empresa de Energía del Quindío (EDEQ S.A ESP).

**Palabras Claves:** Algoritmos Genéticos, Gestión óptima de activos, Reconocimiento de activos, Reducción de pérdidas en transformadores, Reubicación óptima, Transformadores de distribución,

## I. INTRODUCCIÓN

La gestión activos es una práctica cada día más generalizada dentro del área administrativa de las empresas, no importa cuál sea su naturaleza, los costos asociados a los activos empresariales son de una u otra forma transferidos al cliente, de tal forma que, su reducción se traduce en un factor de competitividad que permite brindar al cliente el mejor producto al mejor precio. El sector eléctrico no es ajeno a esta práctica, y como tal la implementación de los requerimientos establecidos en la resolución 097 de 2008 de la Comisión De Regulación En Energía y Gas (CREG), está orientada a estimular en las empresas de energía del país, mejores prácticas orientadas a la gestión de activos.

Las dinámicas sociales y económicas, unidas a la implementación de los criterios técnicos en el diseño del parque de transformadores de las empresas de energía,

permiten encontrar en el contexto actual escenarios donde el sobredimensionamiento de los equipos es generalizado, llevando a las empresas a presentar niveles de perdidas indeseados y propiciando el traslado de los sobrecostos de dimensionamiento hacia el cliente.

En este contexto la Empresa de Energía del Quindío S.A ESP, se propuso realizar el estudio para determinar una metodología de estimación de la cargabilidad de sus equipos de transformación y de reubicación óptima de transformadores en el nivel de tensión I, que le permita maximizar sus activos, bajo las disposiciones legales de la CREG.

## II. PRESENTACIÓN PROBLEMA

A partir de los criterios técnico-económicos dispuestos en la resolución CREG 097 de 2008, los cuales plantean que las empresas de energía podrán solo incorporar dentro de su tarifa en la prestación del servicio de energía, el rubro por reconocimiento de sus activos de transformación en el nivel de tensión I, teniendo en cuenta que el valor reconocido será función de la cargabilidad del equipo y contemplando que este reconocimiento será inferior al valor nominal del activo si la cargabilidad de éste, en su operación normal es inferior a un 40%. Ante este panorama las empresas de energía enfrentan los siguientes desafíos:

- El análisis de la cargabilidad de sus equipos de transformación en el nivel de tensión I, teniendo en cuenta que las herramientas de macro medición, permiten obtener valores acumulados de la energía servida para un periodo de tiempo, y contemplando que los macro medidores se encuentran instalados en un número limitado de equipos de transformación en cada circuito.
- Determinar la forma de reubicar y/o reemplazar los equipos de transformación con el fin de elevar el reconocimiento del activo según los criterios de la resolución CREG 097 de 2008, minimizar las pérdidas asociadas al sobredimensionamiento de los transformadores en el nivel de

tensión y minimizar la inversión final en los procesos de compra y reubicación de equipos de transformación.

En los estudios para la determinación de la cargabilidad de los transformadores en la bibliografía disponible sobresalen los siguientes trabajos realizados en el entorno regional y nacional. En ellos, es necesaria la disponibilidad de un conjunto extenso de información sobre la operación hora a hora de los transformadores y la característica de los usuarios conectados a estos. En [1] se usa un ajuste iterativo para calcular la cargabilidad de los transformadores, contemplando las diferencias entre los periodos de demanda con picos pronunciados y los periodos de demanda de niveles inferiores al 80% de la potencia instalada, en [6] se estudia un conjunto de transformadores dentro del sistema de distribución, con el fin de determinar estadísticamente una curva de carga esperada para cada tipo de transformador haciendo inferencias para aquellos de operación similar, en [7] a partir de un modelo básico de curvas de demanda para cada tipo de usuario del sistema, y teniendo en cuenta las macro mediciones disponibles, se determinan curvas de demanda por tipo de usuario y construye las curvas agregadas para los transformadores calibrando con un factor de corrección, utilizando la información del circuito radial. En general como criterio de cargabilidad en los trabajos mencionados se usa el criterio de eficiencia en pérdidas, el cual se alcanza con una cargabilidad entre el 50% y el 60%, según la NTC 818 Y NTC 819.

El problema de reubicación óptima de transformadores, no presenta antecedentes representativos, como si los tienen los estudios de dimensionamiento [4], ubicación y reconfiguración de nodos de carga en condiciones normales [2] y en contingencias [5]. Sin embargo dada la naturaleza del problema, puede observarse que existe una relación directa entre el problema de reubicación óptima de equipos y el problema de asignación generalizada. El problema de asignación generalizada parte de la necesidad de asignar determinados recursos a un grupo específico de tareas, contemplando costos asociados [14]; en este caso, el número de tareas son nodos específicos del sistema y los recursos son equipos de transformación con características determinadas y costos específicos asociados. Ahora bien la solución del problema de asignación generalizada por métodos determinísticos ha sido generalizada sin embargo, antes ciertas variaciones del problema se ha observado la ventaja en la utilización de heurísticas y meta heurísticas en la solución del problema [15].

### III. DESCRIPCION DE LA PROPUESTA

La propuesta se desarrolla mediante la ejecución sistemática de varias etapas en las que se inicia con el cálculo de cargabilidad basado en variables que entrega la misma empresa de distribución, para luego llegar a la determinación de los transformadores a reubicar tal como se ilustra en la Figura 1.

#### A. Cálculo de la cargabilidad de los transformadores del nivel de tensión I

Para la determinación de la cargabilidad de los equipos de transformación se construye una metodología híbrida a partir de la información recopilada en el estudio del estado del arte. Esta metodología esta descrita a continuación y se esquematiza según la Fig. 1.

A partir de un conjunto típico de curvas para los diferentes tipos de usuario presentes en el sistema, se realiza el proceso de agregación de curvas de usuario para cada transformador, este proceso se describe mediante la ecuación 1.

$$CTj = \sum_{i=0}^8 Ci * Dij \quad (1)$$

CTj, es la curva de carga del transformador j.

Ci, es la curva tipo del usuario tipo i.

Dij, es la demanda de los usuarios tipo i conectados al transformador j.

Una vez calculadas todas las curvas de carga de los transformadores, se realiza la agregación de curvas para la construcción de la curva calculada del alimentador, siguiendo la ecuación 2.

$$CAC = \sum_{j=1}^n CTj \quad (2)$$

Teniendo en cuenta la curva calculada del alimentador y la curva real del alimentador se calcula el vector de factores de corrección FC, a partir de la ecuación 3.

$$FC1k = \frac{Preal k}{Pcalculada k} \quad (3)$$

FC1k, es el factor de corrección para la hora k.

Preal k, es la potencia tomada de la curva real del alimentador en la hora k.

Organizan



Apoya



$P_{calculada k}$ , es la potencia tomada de la curva calculada del alimentador en la hora  $k$

$FC1$ , es un vector de 24 posiciones donde se encuentran los 24 factores de corrección para las diferentes horas del día.

Con los factores de corrección calculados, se corrigen las curvas de carga de los transformadores, utilizando la ecuación 4.

$$CT_{jk} = D_{jk} * FC1_k \quad (4)$$

$CT_{jk}$ , es el valor de la curva de carga del transformador  $j$  en la hora  $k$ .

$D_{jk}$ , es la demanda que registra la curva de carga del transformador  $j$  en la hora  $k$ , antes de la corrección.

Una vez modificadas las curvas de carga de los transformadores, se procede a determinar la desviación de la potencia suministrada de las curvas, respecto a las macro mediciones registradas por los transformadores que cuentan con equipos de macro medición confiable, para este fin se hace uso de la ecuación

$$FC2_j = \frac{M_j}{\sum_{k=1}^{24} D_{jk}} \quad (5)$$

$FC2_j$ , es la desviación porcentual de la potencia suministrada, calculada según la curva de carga del transformador  $j$ , respecto a la macro medición del transformador  $j$  (con macro medición confiable).

$M_j$ , es la macro medición del transformador  $j$ .

$D_{jk}$ , es la potencia suministrada por el transformador  $j$  en la hora  $k$ .

El análisis de las desviaciones porcentuales, a partir de las técnicas estadísticas, permite identificar que los datos describen una distribución normal, teniendo en cuenta las técnicas para identificación y eliminación de datos atípicos y las medidas de tendencia central es posible determinar una desviación porcentual media y la desviación estándar asociada a la misma, a partir de las cuales es posible construir el factor de corrección global para ajustar las curvas de carga de los transformadores. En el caso específico tratado, dada la distribución y las características de apilamiento de los datos, se recurrió a la media aritmética de las desviaciones porcentuales, como factor de corrección global, tal como puede observarse en la ecuación

$$FC2 = \frac{\sum_{j=1}^m FC2_j}{m} \quad (6)$$

$$CT_j = FC2 * CT_j \quad (7)$$

Una vez se han realizado las corrección se procede a verificar, si ambos factores de corrección tienen valores cercanos a 1, es decir si existe convergencia en el método de cálculo; en caso afirmativo, se procede a mostrar las diferentes curvas de carga de los transformadores, en caso negativo se regresa al paso 2 del procedimiento.

La cargabilidad de los transformadores será calculada a partir de las curvas de carga de los transformadores, siguiendo la ecuación (8)

$$fc_j = \frac{D_{promedio j}}{P_{nominal Transformador j}} \quad (8)$$

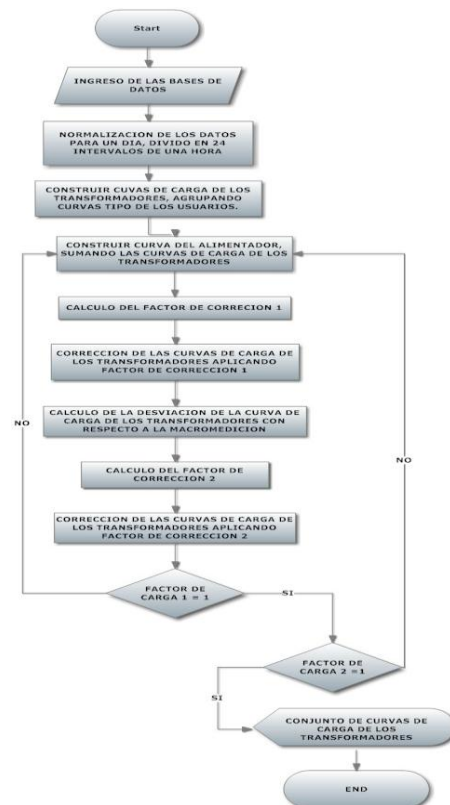


Figura 1. Diagrama de Flujo del proceso de cálculo de la cargabilidad de transformadores.

Donde la demanda promedio del transformador  $j$ , puede ser calculada utilizando la ecuación 9.

$$\left[ \frac{L_1^2 t_1 + L_2^2 t_2 + L_3^2 t_3 + \dots + L_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_N} \right]^{0.5} \quad (9)$$

### B. Modelo de reubicación óptima de transformadores

Se ha determinado que la función objetivo sea una función de beneficio o función económica de la cual se busca la maximización del beneficio neto. La función de beneficio está definida por la ecuación:

$$F = \sum_i \alpha + \sum_j \beta - \sum_k \gamma \quad (10)$$

El primer término se refiere a la sumatoria del aumento diferencial de la valoración como activo cuando la decisión de reubicación es tomada respecto de la valoración como activo en el estado actual del sistema, pasar del estado A al estado B del sistema. Esto es, de forma individual a cada unidad de transformación se le asigna un reconocimiento mayor como activo cuyas unidades son \$/kwh, este reconocimiento es mayor si la cargabilidad del equipo está por encima del 40%, una vez se ha realizado el proceso de reubicación. El valor de reconocimiento esta directamente ligado a la distribución del valor de la inversión en el activo en el tiempo contemplada como una anualidad según los criterios de la ingeniería económica.

El segundo término se refiere a la sumatoria del ahorro neto de energía eléctrica por la disminución de las pérdidas producidas según el traslado del punto de operación en el estado A de las unidades de transformación al punto de operación en el estado B en el rango óptimo de operación entre el 50% y 70%, criterio consignado en las normas NTC 818 y NTC 819.

El tercer término está relacionado con el costo total de reubicar las unidades de transformación sumado con el costo de adquirir equipos nuevos.

Se busca maximizar la función de beneficio, es decir el beneficio neto en un horizonte de tiempo dado, en nuestro caso es de 10 años. Tal beneficio se obtiene multiplicando el reconocimiento adicional en \$/kw-h multiplicado por la energía servida en una proyección de 10 años.

### C. Las restricciones

- Cargabilidad máxima permisible para el transformador, menor al 80%.

$$D_K / C_{ijk} \leq 80\% \quad (11)$$

- Inversión máxima permisible en compra de equipos nuevos, según criterios financieros establecidos por la entidad.

$$I \leq I_{max} \quad (12)$$

- Porcentaje de equipos con probabilidad de contaminación con PCB's, inferior a un criterio técnico-ambiental establecido por la entidad.

$$N_{PCB} / N_T \leq P_{minimo} \quad (13)$$

Donde  $N_{pcb}$  es el número de equipos con alta probabilidad de contaminación con PCB'S,  $N_T$  el número total de equipos del sistema y  $P_{mínimo}$ , el porcentaje mínimo establecido por la empresa de energía del QUINDIO.

### D. Variables de decisión

$C_{ijk}$  Capacidad de transformación del activo  $i$  del tipo  $j$  ubicado en el nodo  $k$ .

$A_{ij}$  Variable binaria que determina si el activo  $i$  del tipo  $j$  es nuevo o ya hace parte de la red.

### E. Datos del modelo

$D_K$  Demanda promedio del nodo  $k$ .

$CU_K$  Cargo por uso permitido para el equipo ubicado en el nodo  $k$  [\$/KW-h].

$\$/km_j$  Valor unitario por kilometro, del transporte de un activo del tipo  $j$ .

$CM_j$  Costo de montaje del transformador tipo  $j$ .

$CD_j$  Costo de desmontaje del transformador tipo  $j$ .

$CC_{Cij}$  Costo de compra del activo  $i$  del tipo  $j$  con cargabilidad  $C_{ijk}$ .

### F. Codificación de la solución

El modelo de codificación planteado parte de una codificación binaria que describe el valor de un índice asignado a cada uno de los equipos de transformación disponibles en el circuito de prueba dispuesto por la empresa de Energía Del Quindío (EDEQ); en la ubicación respectiva dentro de los nodos del sistema, a los cuales se les ha asignado

Organizan



Apoya



un índice también. El método de codificación y su relación con las fuentes de información puede visualizarse en la Fig. 2.

Este modelo representa el espacio de búsqueda replicar las características de la red de distribución, la información específica de cada uno de los equipos de transformación y la influencia de su ubicación en el cálculo de la valoración del activo.

### G. La función de adaptación

La función que mide la calidad de cada una de las soluciones candidata, está dada por la función econométrica a maximizar y representada en la ecuación (10). La influencia de las restricciones del modelo, y las limitaciones del espacio de búsqueda en cuanto a la codificación de las soluciones, es contemplada dentro de una función de penalización que se describe a continuación.

### H. La función de penalización

En aras de facilitar el desempeño del algoritmo genético, se hace necesario implementar una función que penalice aquellos individuos que representan condiciones de incumplimiento de las restricciones del problema de optimización. Adicionalmente la función de penalización permite contemplar restricciones técnicas en el proceso de reubicación, tales como incompatibilidades en el tipo de conexión y en la disponibilidad de fases.

El algoritmo genético, contempla el uso de tres operadores en cada una de las iteraciones del proceso:

- El operador de selección.
- El operador de cruce.
- El operador de mutación

Estos operadores son los responsables de la selección de los individuos de la población que van a reproducirse, la generación de las poblaciones hijas y la búsqueda de nuevos conjuntos de análisis en búsqueda del cumplimiento de la función objetivo. Los criterios contemplados en la vinculación de estos operadores en la metodología planteada en esta investigación, pueden observarse en la Tabla 1.

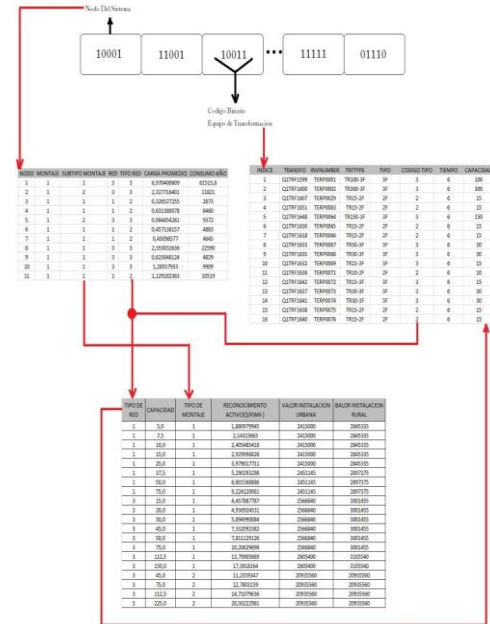


Figura 2: Modelo matemático y su relación con las fuentes de información del problema

TABLA I. PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA REUBICACIÓN ÓPTIMA DE TRANSFORMADORES

Parámetros de ejecución del algoritmo genético	Característica	Valor
Máximo número de iteraciones	Determinado por el usuario	1000
Población inicial	Determinada aleatoriamente	1000 individuos
Reproducción	Selección de individuos por torneo Binario	Probabilidad de reproducción: 80%
Entrecruzamiento	Múltiple variable	De 3 a 7 puntos de cruce ubicados aleatoriamente
Mutación	Múltiple variable	De 2 a 6 nuevos puntos aleatorios. Probabilidad de mutación: 10%

Organizan



Apoya



#### IV. RESULTADOS

##### A. Cálculo de la cargabilidad

La evolución del proceso de calibración de las curvas agregadas de los transformadores puede visualizarse en las Fig. 3 y 4.

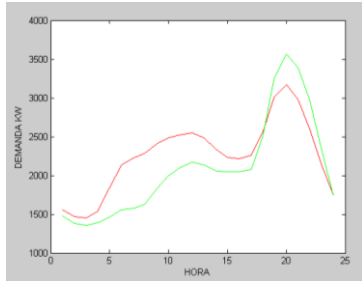


Figura 3: Relación de la curva original del alimentador (en verde) y la curva agregada de los transformadores (en rojo)

A partir del estudio se logró establecer que en el circuito es posible atender mayor demanda o por lo menos tener los activos necesarios para atender aparición de demanda furra.

Como resultado del proceso de análisis de la cargabilidad es posible observar una aproximación a la curva de demanda de los transformadores del circuito. Se presenta en la Fig. 6 las características de algunos transformadores.

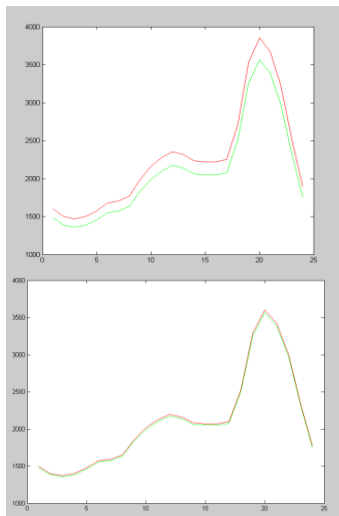


Figura 4: Evolución de la calibración de las curvas después de cuatro iteraciones.

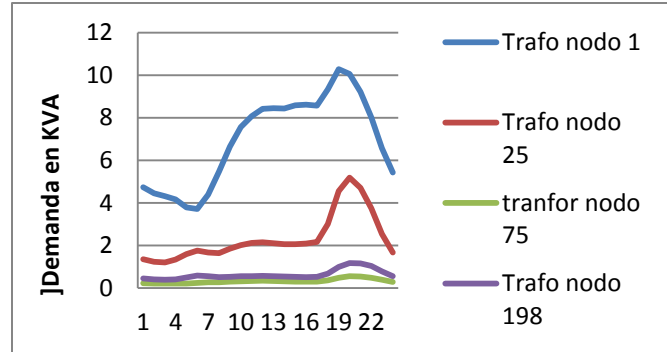


Figura 6: Curvas de Demanda diaria, transformadores circuito de prueba.

##### B. Reubicación óptima de transformadores

La configuración de equipo utilizada en la ejecución del algoritmo de reubicación, se muestra en la Figura 7..



Figura 7: Características técnicas del equipo para ejecución del algoritmo de reubicación óptima de transformadores.

Los resultados obtenidos para el método de reubicación fueron los siguientes:

TABLA II. RESULTADOS METODOLOGÍA DE REUBICACIÓN APLICADA AL CIRCUITO

CRITERIO	CANTIDAD	UNIDAD
Numero de nodos del circuito radial	198	unidades
Periodo de Análisis	10	Años
Inversión total en reubicación	\$ 187.623.540.00	Pesos m/c
Total ahorro en perdidas	\$37.450.320.00	Pesos m/c
Aumento en reconocimiento de activos	\$167.510.120.00	Pesos m/c
Numero de transformadores reubicados	19	unidades
Numero de transformadores nuevos	7	unidades

Organizan



Apoya



Numero de Transformadores con alta probabilidad de PCB's, retirados	1	unidades
Tiempo de ejecución del algoritmo	3287.54	segundos
Numero de iteraciones	521	iteraciones

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Gracias a la no linealidad del problema y el volumen de información que maneja, se observa que el uso de una metodología basada en algoritmos genéticos, es eficiente y permite hallar soluciones interesante con cortos tiempos de computo si se considera que este problema de ubicación optima de transformadores es un problema de explosión combinatorial.

- Analizando los resultados obtenidos por la metodología de cálculo de la cargabilidad de los transformadores pertenecientes al nivel de tensión I, planteada como parte del proyecto; puede observarse que además de un indicador de la cargabilidad de los equipos de transformación, permite observar las características de comportamiento de la demanda en cada uno de los transformadores, acercando el estudio a la realidad muy cercanas a la realidad y que replican en su conjunto el comportamiento general del circuito alimentador.

- A partir de los análisis de cargabilidad y reubicación optima realizados, es posible observar que el circuito analizado, perteneciente a la empresa de energía del Quindío, EDEQ; cuenta con una capacidad instalada, que supera con creces la demanda atendida por éste lo que sugiere que es posible hacer un uso mayor de éstos activos. Su condición de carga impide que el proceso óptimo de reubicación, provea resultados más atractivos desde el punto de vista financiero; sin embargo, abre la posibilidad de contemplar un futuro estudio que involucre a mas circuitos con el fin de generar una dinámica de mayor impacto financiero.

- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, puede observarse que la metodología de reubicación optima de transformadores planteada en este proyecto, permite encontrar grupos de soluciones económicamente eficientes y representativas que permitan implementar estrategias de gestión de activos de transformación bajo los requerimientos regulatorios que la CREG establece a través de su resolución 097 de 2011.

## VI. RECONOCIMIENTOS

Agradecemos al Ingeniero César Velasco, Gerente General y a la subgerencia de transmisión y distribución a cargo del

Ingeniero Luis A. Ortiz de la EDEQ por posibilitar los convenios con la UTP que permitieron el desarrollo del proyecto con la posterior obtención de resultados.

## VII. REFERENCIAS

- [1]. Lina Constanza Osorio M. Estudio De Cargabilidad En Transformadores De Distribución Monofásicos Y Trifásicos. CHEC, Colombia. 2009.
- [2]. Jorge Moreno, Member, IEEE, Rodrigo Moreno, Sebastian Mocarquer, Member, IEEE, Hugh Rudnick, Fellow, IEEE. Determinación De Un Parque Óptimo De Transformadores Para Una Empresa Modelo De Distribución. IEEE Magazine.
- [3]. Olga Lilibiana Sánchez, Jaime Velasco Medina y Carlos Arturo Lozano. Diseño De Una Aplicación Para Gestión De La Carga En Transformadores De Distribución. Revista Ingeniería e Investigación Vol. 26 No.3, Diciembre De 2006, pp. (85-92).
- [4]. Orlando Antonio Páez Riaño, Carlos Fernando Gómez Arbeláez. Dimensionamiento Tecno-económico De Transformadores De Distribución. Bogotá, Colombia. 2002.
- [5]. Orlando Giraldo. Nueva Visión Sobre Carga Media Real De Transformadores De Distribución En Redes Latinoamericanas. HJ International L.A. 2004.
- [6]. Lawrence C. Leung, Suresh K.Khator, Jackie Ponce. Optimal Transformer Allocation under Single-Contingency. Power Systems IEEE Transactions in (1996), Volume: 11, Issue: 2, Pages: 1046-1051.
- [7]. Luis Alfonso Gallego, Aislan Francisquini, Oscar Gómez Carmona, Antonio Padilha Fertrin. Estimación De Curvas De Demanda De Consumidores, Transformadores De Distribución Y Alimentadores Primarios En Sistemas De Distribución. Scientia et Technica No 35. Agosto de 2007.
- [8]. Diego F García, Fabio H Rodríguez. Evaluación De La Metodología Para La Selección De La Capacidad De Los Transformadores De Distribución A Partir De La Curva De Carga Diaria. Codensa. Bogotá. 2006.
- [9]. D G Colome, R Pringles. Modelo De Cargas De Subestaciones Transformadores Mt/Bt. Universidad Nacional De San Juan, Argentina. 2007
- [10]. Diario Oficial No. 41.433 de 11 de julio de 1994, ley 142 y 143 (servicios públicos domiciliarios).Colombia.
- [11]. CREG, Metodología para definir el índice de pérdidas reconocidas en la actividad de distribución, Octubre de 2002.
- [12]. Comisión de Regulación de Energía y Gas. CREG., Resolución 082 de 2002, 17 de diciembre de 2002.
- [13]. Comisión de Regulación de Energía y Gas. CREG., Resolución 097 de 2008, 26 de Septiembre de 2008.
- [14]. Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería Y Ciencia. Castillo Enrique, Conejo Antonio. 2002.
- [15]. Algoritmo memético aplicado al problema de asignación generalizada. Granada Echeverri Mauricio, Toro Ocampo Eliana Mirdedy, Romero Lázaro Rubén Augusto. Colombia, Tecnura ISSN: 0123-921X, 2005 vol: 8 fasc: 16 págs: 55 – 63.

Organizan



Apoya

