



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

“Optimización en el Gerenciamiento de Transformadores de Distribución”

Autores: Ing. Víctor Villalba Saldivar; Ing. Ubaldo Fernández

Dpto. de Mediciones de Distribución- Dpto. de Estudios de Generación y Transmisión

Empresa: ANDE-PARAGUAY

Dirección: Complejo Boggiani - ANDE

Email: victor_villalba@ande.gov.py – ubaldo_fernandez@ande.gov.py

RESUMEN:

Este trabajo implementa y valida una metodología que permite gerenciar la ubicación de los transformadores de distribución instalados y disponibles en almacén, buscando la utilización óptima de estos activos desde el punto de vista de las carga de los mismos, dado que en muchos casos se verifica la existencia de transformadores muy sobrecargados y sub-cargados.

La metodología busca minimizar, utilizando un modelo de programación lineal entera mixta, una función de costo dependiente fundamentalmente del nivel de carga de los transformadores, considerándose además el costo asociado a eventuales traslado o reubicaciones de los mismos.

PALABRAS CLAVES

Transformadores de Distribución, Gerenciamiento de transformadores de distribución, Gestión de Cargas de Transformadores de Distribución.

1. INTRODUCCION

Uno de los problemas que las empresas distribuidoras de energía eléctrica deben enfrentar es el gerenciamiento de las cargas de sus transformadores de distribución, esto es, deben poder controlar el factor de utilización (**fu**) de sus transformadores, a fin de minimizar su operación en sobrecarga y/o sub-carga. Las normas técnicas especializadas indican que los transformadores de distribución, debido a los ciclos de carga pueden operar un cierto tiempo por encima de su carga nominal con pérdidas mínimas de su vida útil [1]. Sin embargo la existencia de transformadores con factores de utilización muy elevados resultaría en una importante reducción de la vida útil de los transformadores, lo cual podría ser económicamente desfavorable. Por otro lado, transformadores con un bajo factor de utilización indica la existencia de equipos sub-utilizados, lo cual implica una operación económicamente no deseable.

Por ello, la idea central de este trabajo es proponer una metodología para el gerenciamiento de las cargas de los transformadores, mejorando la utilización de los que se encuentran sub y sobre-utilizados mediante la reubicación de los mismos en los sectores donde las capacidades sean más adecuadas a las cargas demandadas, y evitando en lo posible la aparición de transformadores sobrecargados.

El modelo se basa en el reaprovechamiento de los propios transformadores existentes ya instalados y de los que están disponibles en los depósitos como stock, dentro de las áreas atendidas por la empresa

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

distribuidora (ANDE en el caso de Paraguay), proponiendo una filosofía para la solución óptima del problema de reubicación y sustitución, buscando minimizar una función objetivo de costo total [2].

La metodología para la utilización óptima de los recursos del sistema de distribución, compuesto esencialmente por un elevado número de transformadores, busca:

- Minimizar averías por sobrecargas mediante una gestión en la carga de los equipos.
- Mejorar el tiempo de la vida útil del transformador.
- Optimización de la continuidad del servicio minimizando las interrupciones por fusibles operados y los kWh no facturados.
- Determinar eventuales movimientos de reubicación de los transformadores y minimización de los costos por montajes, desmontajes y energía no facturada por la interrupción asociada a dicho cambio.

El gerenciamiento del parque de transformadores de un sistema eléctrico de distribución, es una tarea compleja debido al elevado número de transformadores. Ante la inexistencia de alguna herramienta analítica, las empresas distribuidoras emplean muchas veces criterios empíricos, basados en las experiencias de su personal técnico, el cual establece un cuadro de decisión basado en el factor de utilización de los transformadores. Dicho factor (f_u) se define como la relación entre la demanda máxima (kVAS) registrado en el ciclo de carga y la potencia nominal del transformador (kVAT) [2], [4].

La tabla I describe un ejemplo de criterios y rangos de cargas tenidos en cuenta para el gerenciamiento.

Tabla I: Criterios de gerenciamiento de transformadores [2]

$z = \text{kVAS}/\text{kVAT}(\%)$	ANALISIS DE CARGAS
$z < 30$	Inaceptable
$30 \leq z < 70$	Subcargado
$70 \leq z \leq 125$	Deseable
$125 < z \leq 150$	Sobrecargado
$z > 150$	Inaceptable

Por ello, el trabajo busca implementar una metodología con un enfoque sistémico que pueda ser utilizado por empresa distribuidora (Caso ANDE) con vista a la optimización de su infraestructura de distribución.

2. FORMULACIÓN DEL MODELO

Como herramienta de programación computacional es utilizado el programa MatLab [3], en especial el Toolbox de optimización, que dispone de la función `binprog` mediante la cual se ejecuta el algoritmo de optimización utilizada para realizar la readecuación y solución del problema una vez definida la función objetivo y la matriz de restricciones.

El modelo desarrollado hará lo máximo para mejorar las capacidades instaladas utilizando lo mínimo de recurso necesario disponible en el almacén de la empresa, revisando y recalculando todas las posibilidades de la reubicación. El modelo busca la fuente menos costosa para cada demanda y coloca estas donde sean más efectivas en función de la relación de demanda y la capacidad instalada (D_j/P_i).

Para utilizar la función de optimización se debe tener definida la matriz de restricciones. La función de optimización se trata de la programación lineal (LP) y programación entera mixta (MIP), con la utilización de variables binarias.

El modelo desarrollado determinará si la demanda solicitada en un lugar será atendida por un transformador de reserva del depósito o mediante el traslado del transformador actualmente instalado en otro lugar. Los que no sean necesarios serán identificados como unidades que serán transferidas para el depósito, por tanto quedarán disponibles como reserva.

2.1 FUNCIÓN OBJETIVO

La “*función objetivo*” (1) está compuesta por el costo de utilización en un determinado punto de carga, asociado al f_u del transformador en dicho lugar, así como los eventuales costos de traslado de un lugar a otro, montaje; desmontaje y la energía interrumpida en dicho proceso, incluyendo la posibilidad de traslado al almacén. De igual forma, la función objetivo incluye el costo de utilización de un

transformador originalmente de reserva más los costos asociados de traslado y montaje. Dicha función es indicada a continuación.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} X_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} + \sum_{k=n+1}^m \sum_{j=1}^n \beta_{kj} X_{kj} + \sum_{k=n+1}^m \sum_{j=1}^n C_{kj} X_{kj} + \sum_{i=1}^n C_{i\ sa} X_{i\ sa} \quad (1)$$

2.2 DEFINICIÓN DE NOMENCLATURA

n	Número total de transformadores y demandas instalados.
n_{sa}	Número total de transformadores en depósito.
m = n + n_{sa}	Número total de transformadores disponibles.
P_i	Potencias nominales de los transformadores instalados.
P_k	Potencias nominales de los transformadores en depósito.
D_j	Demandas de los puntos de carga.
C_{ij}	Costo asociado al desmontaje del transformador i, traslado y montaje al punto de carga j.
C_{kj}	Costo asociado al traslado del transformador k del depósito al punto de carga j y montaje.
C_{i sa}	Costo asociado al desmontaje y traslado del transformador i hasta el depósito sa.
i = 1, ..., n	Índice de los transformadores instalados.
j = 1, ..., n	Índice de las demandas de los puntos de carga (Puesto de distribución).
k = n + 1, ..., m	Índice vinculado a la salida de los transformadores del depósito.
sa	Índice vinculado al retorno de los transformadores al depósito.
β_{ij}	β _{ij} = f(D _j /P _i) costo de utilización del transformador i en el punto de carga j y penalización.
β_{kj}	β _{kj} = f(D _j /P _k) costo de utilización del transformador k en el punto de carga j y penalización.

2.3 VARIABLES DE DECISIÓN BINARIAS

Para decidir cuales transformadores serán transferidos a otro lugar; se quedan en sus mismos lugares, o se van al depósito, se utilizan las siguientes variables de decisión:

X_{ij} = 1 Si el transformador P_i del campo es destinado al área D_j; **0** si no.

X_{kj} = 1 Si el transformador P_k del depósito es destinado al área D_j; **0** si no.

X_{i sa} = 1 Si el transformador P_i del campo es destinado al almacén sa; **0** si no.

2.4 RESTRICCIONES

Para que la optimización del gerenciamiento de transformadores de distribución sea aplicable, se definen las siguientes restricciones pertinentes:

$$\text{sujeto a } \sum_{j=1}^n X_{ij} + X_{i\ sa} = 1 \quad \text{para } i = 1, \dots, n; \quad sa = n + 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{kj} \leq 1 \quad \text{para } k = n + 1, \dots, m \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} + \sum_{k=n+1}^m X_{kj} = 1 \quad \text{para } j = 1, \dots, n \quad (4)$$

Para la restricción (2) el transformador del conjunto P_i solo puede ser transferido para una nueva demanda D_j (X_{ij}=1) o retirado de la operación y transferido al depósito (X_{isa}= 1). Sin embargo el

transformador de reserva que se encuentra en el deposito puede quedarse en su lugar o podrá ser destinados al área de demanda restricción (3) ($X_{kj} \leq 1$).

En la restricción (4) la demanda D_j puede ser abastecida mediante la transferencia de un transformador en uso o mediante la reserva del depósito, pero que debe ser atendido por algún transformador.

Para la función objetivo, las dos primeras expresiones representan los transformadores instalados en campo, el primero de ellos es el costo relacionado a una penalidad β asociada a la cargabilidad del transformador, aplicándose penalidad por sobrecarga y sub-carga. La segunda expresión esta relacionada con el costo del desmontaje y montaje del transformador P_i para atender la demanda D_j , así también los costos de la energía no facturadas durante los cambios. La tercera expresión es la que se relaciona con los transformadores de reserva y su utilización con las diferentes demandas D_j . La cuarta expresión se relaciona con el traslado y montaje de los transformadores desde el depósito hasta el punto de demanda D_j . La última expresión se relaciona con el costo de retiro de los transformadores que no son necesarios en el conjunto P_i que son dejados fuera de servicios y retirados para el deposito.

3. COSTO DE UTILIZACIÓN Y PENALIZACIÓN DE UN TRANSFORMADOR

El costo de utilización y penalización de un transformador operando por debajo de su capacidad nominal (5), puede ser calculado en función del costo del transformador y el factor de utilización, costo de pérdidas en vacío anuales y el costo de la energía que indefectiblemente la empresa distribuidora deberá hacerse cargo:

$$CAP_i = Ct_i / Fu_i + [Pvo_i + Pcc_i * Fu_i^2] * Ce * 12 \quad (5)$$

Donde: CAP : costo anual de utilización y penalización por sub-carga; Ct : costo anual equivalente del transformador; Pvo : pérdidas en vacío; Pcc : pérdidas en el cobre; Fu : factor de utilización; Ce : costo de la energía.

El costo anual correspondiente a la utilización y penalización por sobrecarga (6) será calculado para un año en función del costo equivalente del transformador, de la reducción de vida en años, el costo anual de pérdidas en vacío y en el cobre y del costo de la energía por años:

$$CAPv_i = Ct_i * Rva_i + [Pvo_i + Pcc_i * Fu_i^2] * Ce * 12 \quad (6)$$

Donde: $CAPv$: costo anual de utilización y penalización por encima de su nominal; Ct : costo anual equivalente de transformador; Rva : reducción de vida anual; Fu : factor de utilización; Pvo : perdidas en vacío; Pcc : perdidas en el cobre; Ce : costo de la energía.

En la Figura 1, se muestran los costos de utilización y penalización en función del factor de utilización. Éstas curvas son creadas a partir de las ecuaciones (5) y (6) y representan los costos de las penalizaciones por sub-carga y por sobrecarga.

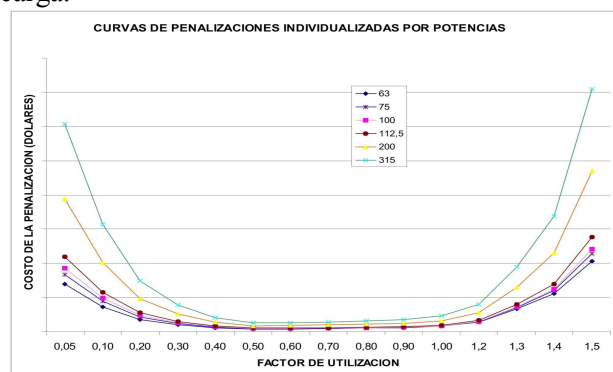


Figura 1: Curvas de utilización y penalización individualizadas

4. APLICACIÓN PRÁCTICA

Como ejemplo de aplicación práctica [2], a continuación se muestra el modelado de un sistema hipotético de pequeño porte, Figura 2. Este sistema hipotético esta constituido por 3(tres) transformadores instalados en el campo y 2 (dos) transformadores en stocks localizados en el almacén cuya posición geográfica se encuentra en la misma posición espacialmente de la demanda P2. Cada transformador instalado posee su correspondiente posición o coordenada geográfica.

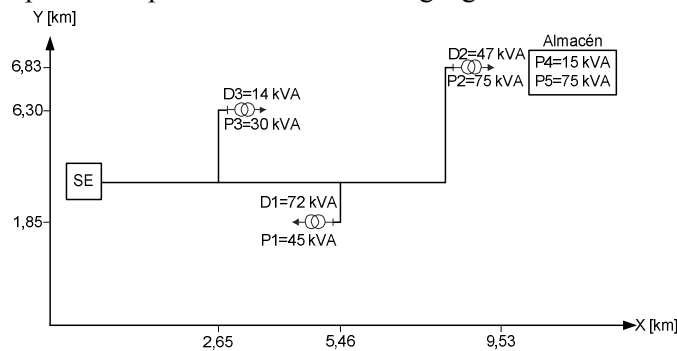


Figura 2: Plano espacial del ejemplo de aplicación práctica hipotética

Para poder llevar a cabo la readecuación de las cargas de los transformadores es necesario primero desarrollar la matriz de restricciones según el ítem 2.4, la cual se observa en la Figura 3 abajo.

TRANSFORMADORES																		
Xij	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
3	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
Xji	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5

DEMANDAS

Figura 3: Matriz de restricciones para el modelo hipotético

Los datos de las demandas y potencias correspondientes al ejemplo, se disponen en la tabla abajo.

Tabla II: Datos del ejemplo antes de correr el programa de optimización.

Datos del ejemplo de aplicación del sistema hipotético							
bus	idtrafo	Pkva	X	Y	DKva	fu	%
1	BP123	45	5,46	1,85	72	1.60	160.00
2	BP321	75	9,53	6,83	47	0.63	62.67
3	BP435	30	2,65	6,30	14	0.47	46.67
Almacén							
4	AL100	15	9,53	6,83			
5	AL200	75	9,53	6,83			

Tabla III: Resultados del ejemplo después de correr el programa propuesto.

Resultados del ejemplo de aplicación del sistema hipotético							
bus	idtrafo	Pkva	X	Y	DKva	fu	%
1	BP321	75	5,46	1,85	72	0.96	96.00
2	BP123	45	9,53	6,83	47	1.04	104.44
3	AL100	15	2,65	6,30	14	0.93	93.33
Almacén							
4	BP435	30	9,53	6,83			
5	AL200	75	9,53	6,83			

4.1 APLICACIÓN PRÁCTICA REAL

Para la aplicación del programa propuesto en un problema real, se ha considerado una zona del área metropolitana. El área Metropolitana comprende cerca de 22 Centro de Distribución, en las cuales aproximadamente se encuentran instalados 15.000 transformadores de distribución. La zona escogida para la aplicación práctica del sistema propuesto es la Zona Luque. Luque es una ciudad en constante crecimiento y donde más se verifican transformadores con cargas inadecuadas. En la Figura 4 se puede observar la zona correspondiente a la toma de muestra. Para aplicar la optimización es necesario que se tengan todos los datos de lectura del grupo de transformadores de distribución a los cuales se quiere gestionar sus cargas. En este caso definimos que si los porcentajes de cargas son menores a 0.70, son considerados sub-cargados y si son mayores de 1.25 están sobrecargados [2];[5], y para aquellos que no se encuentran dentro de esta franja, se encuentran con porcentajes de cargas correctos pero que igualmente son tenidos en cuenta para la solución del problema.

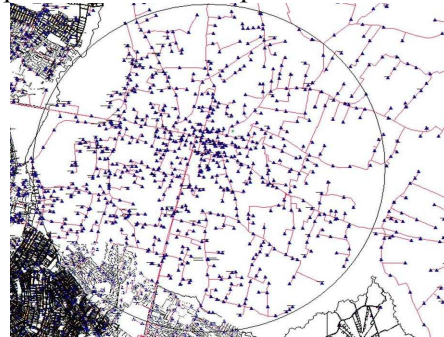


Figura 4: Área considerada como toma de muestra

La implementación del algoritmo propuesto con un sistema real, ha requerido previamente la realización de mediciones con registradores a 100 transformadores. De dichas mediciones 84 unidades tienen cargas inadecuadas y 16 unidades presentan cargas adecuadas, disponiéndose además de 20 transformadores de reserva en el almacén, tal como que se puede ver en la tabla IV.

Tabla IV: Cantidad de transformadores de reserva en almacén.

Stock en Almacen	
Potencia (kVA)	Cantidad
75	6
100	7
112.5	2
200	5
TOTAL	20

De acuerdo a la numeración de los índices de posición, del 1 al 100 indican los que se encuentran instalados en el campo, mientras que el índice correspondiente al almacén corresponde a la numeración 101. Los valores de las demandas máximas en las fases más cargadas son las consideradas para los cálculos por el programa desarrollado.

En la Tabla V se muestran los resultados de la reubicación propuesta, para el año base 7 transformadores fueron traídas del almacén para la readecuación de las cargas. Para la simulación de las futuras demandas en este trabajo son consideradas un crecimiento vegetativo del 7% anual y la proyección para un horizonte de 3 años.

En función de estas nuevas demandas fueron reubicados y readecuadas las cargas en su totalidad a los transformadores. El resultado de la optimización se observa en la Tabla VI, de las cuales 12 unidades fueron solicitadas del almacén, no habiendo necesidad de realizar alivio de cargas a ningún transformador.



IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

Tabla V: Resultado de la optimización para el año base.

Table with columns: Bus, ANDE, Trafo(KVA), ANDE, Trafo(KVA), Movimiento (Indi, Indf), Factor de Utilización (%), and numerical data for 51 buses.

Tabla VI: Resultado de la optimización para el año tres.

Table with columns: Bus, ANDE, Trafo(KVA), ANDE, Trafo(KVA), Movimiento (Indi, Indf), Factor de Utilización (%), and numerical data for 51 buses, including a 7% annual growth rate.

5. CONCLUSIONES

- El principal beneficio del Gerenciamiento de los Transformadores de Distribución es la Optimización del uso de las potencias instaladas, por lo tanto contribuye en gran medida para la reducción de averías por operación en sobrecargas.
- El objetivo de este trabajo fue la optimización de las cargas de los transformadores de distribución con la ayuda de un programa computacional, lo cual se ha logrado ampliamente, este hecho es evidenciado con los resultados conseguidos, dado que la solución obtenida de forma tradicional se basa apenas en soluciones aisladas y que implica una acentuada utilización necesariamente de los transformadores disponibles en el almacén. Con la metodología utilizada en este trabajo se utilizan los mismos transformadores instalados y en un menor grado los disponibles en el almacén. Con los resultados logrados los transformadores disponibles en el almacén después de la optimización de una zona se quedan liberados para ser considerado para optimización de otra zona y así sucesivamente con otras zonas, mejorando grandemente la disponibilidad de estos recursos del almacén.
- Una ventaja de la metodología es la posibilidad que, después de un análisis de sensibilidad de los parámetros adoptados se pueden en cualquier momento alterar estos parámetros: de selección; redefinir el horizonte de cargas proyectadas; redefinir la tasa de crecimiento vegetativo anual; redefinir los criterios de rangos para los límites inferiores y superiores para adecuación; todos conforme a las características eléctricas o condiciones del sistema de distribución en estudio. Para ampliar el alcance de la metodología se ha implementado el modelo de proyección de las demandas futuras que podrá ser considerado para mejorar la definición de la potencia nominal de los equipos a ser instalados, permitiendo así mejorar la política de instalación y operación del sistema de distribución.
- Se ha demostrado que se puede obtener un máximo beneficio con la aplicación de este programa, siendo una herramienta satisfactoria para solución del problema de readecuación y reubicación de las unidades transformadoras, la cual nos permite también evaluar las futuras necesidades para la adquisición de nuevos equipos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS; 1997. *Aplicação de Cargas em Transformadores de Potencia* - Procedimentos, NBR 5416. Rio de Janeiro.
- [2] FONT, Francisco; 2003. *Realocação a mínimo custo de transformadores de distribuição com carregamento inadequado*. Florianópolis. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [3] MANUAL DE USUARIO, MatLab 7.04, Enero 2005.
- [4] GIRALDO, Orlando; 2007. *Nueva Visión Sobre Carga Media Real de Transformadores de Distribución en Redes Latinoamericanas*. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- [5] ESPECIFICACIONES TECNICAS PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION; N° 04.14.14 REV. 1; 2007. *Administración Nacional de Energía Eléctrica- ANDE* -. Asunción, Paraguay.