

OPERACIÓN DE TAPS EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN PARA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS

RESUMEN

El presente artículo muestra una metodología que busca disminuir las pérdidas de tipo técnico en los ramales secundarios de los sistemas de distribución en sistemas trifásicos equilibrados. Su aplicación en sistemas desbalanceados conserva la misma lógica.

Se considera el transformador con cambiador de derivaciones y distintos tipos de carga. Para la asignación del *Tap* óptimo se usan reglas difusas que consiguen minimizar las pérdidas sin violar los límites de tensión. Se presentan resultados sobre un sistema de prueba donde se mejoran los valores de pérdidas cuyo costo se reduce al pago de personal que efectúe las modificaciones del *Tap*.

PALABRAS CLAVES: sistemas de distribución secundarios, pérdidas.

ABSTRACT

This paper shows a methodology for reduce technical losses on secondary systems. The Tap is included in the trafo model. In the Tap assignation Fuzzy Logic is used to get losses diminution whitout limits violation. A test system shows the advantage of the methodology in a better value of energy losses which is reached with low cost.

KEYWORDS: *Distribution systems, technical losses.*

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia los sistemas de distribución son responsables del mayor porcentaje de las pérdidas técnicas. Las metodologías empleadas de manera tradicional dan soluciones parciales en niveles de alta tensión descuidando el problema en baja tensión [1],[2].

En los niveles bajos de voltaje se plantea tan solo el cambio de acometidas para el control de pérdidas y el *Tap* pocas veces se ha considerado como variable para control de ellas. Tan solo [6] analiza esta posibilidad y su aplicación se efectúa a niveles de alta tensión y en sistemas automatizados, caso contrario a las posibilidades regionales.

Dado que el *Tap* (relación de espiras) controla los niveles de tensión en el secundario y estos niveles de tensión determinan corrientes; es posible establecer su relación con los estados de pérdidas. Es así como mediante la articulación de modelos adecuados de la carga y del transformador de distribución y de la carga se consigue modelar el comportamiento general de las

En el numeral 2 se presenta el modelamiento general del problema y algunas consideraciones a tener en cuenta para facilitar su tratamiento.

En el numeral 3 se analiza el sistema secundario, nivel de baja tensión y se obtienen algunas expresiones e informaciones claves para el estudio del problema. Aquí toma gran importancia el hecho que el problema pueda

ALEXANDER MOLINA C

Ingeniero Electricista
Profesor
Universidad Tecnológica de Pereira
almo@utp.edu.co

DARIO ELIECER RODAS

Ingeniero Electricista
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
drodas@utp.edu.co

DIEGO GONZALEZ

Ingeniero Electricista
Profesor
Universidad Tecnológica de Pereira
diegogo@utp.edu.co

ser reformulado abandonando su solución mediante técnicas de optimización y a cambio se emplee reglas difusas.

En la sección 4 se presenta la metodología con su respectivo flujograma y en 5 se exponen de algunos resultados particulares.

2. MODELAMIENTO DEL PROBLEMA

En las ecuaciones 1 y 2 se presentan la función objetivo y las restricciones del problema respectivamente. Se inicia con la formulación clásica como un problema de optimización para luego justificar el uso de un modelo desacoplado.

2.1 Función objetivo

$$\min k \sum_{T_m=T_1}^{T_n} h_{T_m} \sum_{l=1}^w \left(\sum_{i=1}^{vl} R_i^l \left(I_{(V_l)_{i-t}}^l \right)^2 \right) + \mathbf{O}(\text{Mov}) \quad (1)$$

Esta incluye el costo de las pérdidas y el costo de mover los *Taps* en $\mathbf{O}(\text{movimientos})$. La suma se realiza para los T_n períodos, en los w transformadores que alimentan ramales secundarios y para los vl tramos de conductor de cada ramal secundario.

k es la constante \$/kWh. Se considera invariable para todos los intervalos de la curva de carga de un mismo año. h_{T_m} es el ancho en horas de cada intervalo T_m que compone la curva de carga anual discretizada.

$R_i^l, (I^{(V_l)}_{i-T})^2$ son los valores de Resistencia y corrientes, respectivamente, asociados a la línea i -ésima, del ramal l -ésimo en cada intervalo T_m de la curva de carga

2.2 Restricciones

$$\sum_{i=1}^{vl} S_{nodoi^l-Tm} = D_{nodoi^l-Tm}$$

$$V_{min} < |V_i^l| < V_{max}$$

$$V_{slack_l} = \frac{V_{prim_l}}{Tap_l}$$

$$Mover_l \in [0,1] \tag{2}$$

$Tap_{lmin} \leq Tap_l \leq Tap_{lmax}$
 $Tap_l = \{Tap_{lmin}, \dots, 1-paso, 1, 1+paso, \dots, Tap_{lmax}\}$
 $\sum_{i=1}^{vl} S_{nodoi^l-Tm} = D_{nodoi^l-Tm}$ -- Considera primera y segunda ley de Kirchhoff. El cumplimiento de estas restricciones las garantiza el flujo de carga. La suma de las potencias que "llegan" al nodo i -ésimo del ramal l -ésimo es igual a la demanda de dicho nodo.

$V_{min} < |V_i^l| < V_{max}$ -- Tiene en cuenta el cumplimiento de las restricciones de voltaje para cualquier nodo.

$V_{slack_l} = \frac{V_{prim_l}}{Tap_l}$ -- Aquí se relacionan los voltajes en

primario y secundario con el valor de Tap .

$Mover_l \in [0,1]$ -- Considera la posibilidad de mover o no el Tap del transformador l -ésimo. 0 no se mueve; 1, si permite mover. Esto para incluir transformadores en los que no se puedan cambiar las posiciones.

$Tap_l = \{Tap_{lmin}, \dots, 0.975, 1, 1.025, \dots, Tap_{lmax}\}$ -- Considera el movimiento de los $Taps$ dentro de un rango especificado, al igual que se obliga a que ellos tomen un valor discreto determinado por el paso que se establezca por norma técnica [10].

2.3 Característica del modelo

En los sistemas de distribución el número de transformadores que alimentan ramales secundarios es grande, con las consiguientes consecuencias para el espacio de soluciones. Adicionalmente la variable principal de este problema, el Tap , es discreta.

Los términos de la función objetivo se componen de las pérdidas en cada uno de los ramales secundarios. Dichas pérdidas dependen del valor de los voltajes en secundario de los transformadores y éstos a su vez dependen del voltaje entregado por el flujo en el lado de alta tensión.

El espacio de soluciones tiene crecimiento No-Polinomial determinado por las posibles combinaciones del número

de $Taps$ y el número de transformadores donde es posible moverlo, es decir, $(\#Posiciones_Tap)^{\wedge(w)}$

Al momento de efectuar los flujos de carga en los niveles secundarios se observa que los cambios en las pérdidas no superan el 3% de las iniciales, de manera que los voltajes aguas arriba no sufren mayor modificación. En general no se presentan cambios substanciales en el estado del sistema al mover el Tap y esto puede verificarse analizando el Jacobiano de los sistemas de distribución [4].

Con base en lo anterior se propone desacoplar el ramal secundario del primario de manera que la función objetivo se puede presentar como la suma de los mínimos de cada subproblema. Esto porque el estado en cada ramal depende sólo del voltaje que tenga en su lado primario y este valor es entregado por el flujo de carga como condición inicial.

$$\min k \sum_{T_m=T_1}^{T_n} h_{Tm} \sum_{l=1}^w \left(\sum_{i=1}^{vl} R_i^l (I^{(V_l)}_{i-T})^2 \right) = \sum_{T_m=T_1}^{T_n} h_{Tm} \sum_{l=1}^w \left(\min \left(\sum_{i=1}^{vl} R_i^l (I^{(V_l)}_{i-T})^2 \right) \right) \tag{3}$$

Con las anteriores consideraciones y teniendo en cuenta la ecuación 3, se plantea que "el mínimo de la suma de las pérdidas en todos los ramales es igual a la suma de las mínimas pérdidas en cada uno de ellos", permitiendo estudiar cada problema de manera separada.

3. ANÁLISIS DEL SISTEMA SECUNDARIO

3.1 Modelo del transformador

El modelo del transformador se presenta a continuación para el caso monofásico. Figura 1. Las variaciones en las espiras del secundario son nulas. Este modelo del transformador en pu se toma de [7] y permite integrarlo al flujo de carga. Las variaciones en el Tap no tienen mayor influencia en las pérdidas del mismo ni en el flujo de reactivos [8].

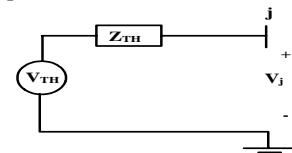


Figura 1. Modelo equivalente del transformador, con tap, usado como slack del ramal secundario.

	V_{TH}	Z_{TH}
p.u.	$\frac{V_{prim}}{Tap}$	Z_{lpu}

Tabla 1. Valores sin variación de espiras en baja.

3.2 Modelo de las cargas

$$S_i = P_n \left(\frac{V_i}{V_n} \right)^\alpha + j Q_n \left(\frac{V_i}{V_n} \right)^\beta \tag{4}$$

El modelo utilizado por la mayoría de analistas en las empresas distribuidoras es el de modelo de carga tipo potencia constante. En esta ocasión los modelos que incluyen cargas tipo impedancia constante, potencia constante y corriente constante se incluyen de manera que se vean los cambios que se presentan en diferentes estados de voltaje. Los subíndices i y n indican estados generales y nominales respectivamente. Se optó por el modelo exponencial, ecuación 3, y una generalización mayor se hizo pues se consideró, para los casos de prueba, variación en igual sentido de la potencia activa y reactiva, es decir, se asumen cargas con valores $\alpha = \beta$ [1].

3.3 Modelo de las líneas

Las líneas se modelan de acuerdo a lo planteado en [5].

3.4 Modelo matemático de las pérdidas

Se estudia el modelo del sistema que se presenta en la figura 2 donde se denomina P_L al valor de las pérdidas del sistema. El subíndice n indica valor nominal y el subíndice i indica otro estado.

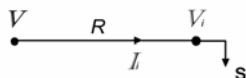


Figura 2. Sistema de dos nodos.

En la ecuación 8 se determina el comportamiento del valor de pérdidas para distintos valores de α . En un valor de $\alpha=1$ las pérdidas permanecen constantes pues el exponente de V_i se hace cero. Con un valor de $\alpha > 1$ si V_i crece, crece PL . En el caso en el que $\alpha < 1$ el exponente de V_i se hace negativo, lo que hace que el comportamiento de las pérdidas tengan relación inversa con el voltaje.

$$P_L = RI_i^2$$

$$P_L = R \left(\frac{S_i}{V_i} \right)^2 = R \left(\frac{S_n \left(\frac{V_i}{V_n} \right)}{V_i} \right)^2 \quad (5)$$

$$P_L = R * S_n^2 \frac{\left(\frac{V_i}{V_n} \right)^{2\alpha}}{V_i^2} \quad (6)$$

$$P_L = \frac{R * S_n^2}{V_n^{2\alpha}} V_i^{2(\alpha-1)} \quad (7)$$

Ahora, suponiendo una caída despreciable entre V y V_i , es decir; $V \approx V_i$ se tiene:

$$P_L = \frac{R * P_n^2}{V_n^{2\alpha}} V_i^{2(\alpha-1)} \quad (8)$$

La anterior expresión muestra la relación existente entre el voltaje que alimenta los ramales, el modelo de carga y las pérdidas. La figura 3 ilustra relaciones entre pérdidas y voltajes para distintos valores de α .

El posible espacio de soluciones de un sistema de distribución con dos transformadores, alimentando cada uno a un sistema secundario, se puede representar por la figura 5. En cada uno de los ejes horizontales se encuentra la variación del *Tap* de cada ramal y en el eje vertical se presentan los valores de pérdidas.

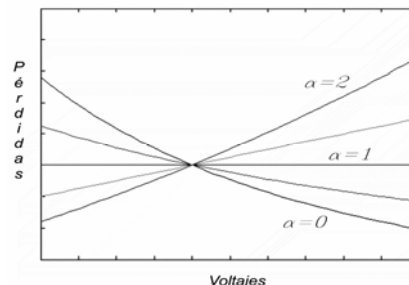


Figura 3. Valores de pérdidas normalizados para diferentes valores de α

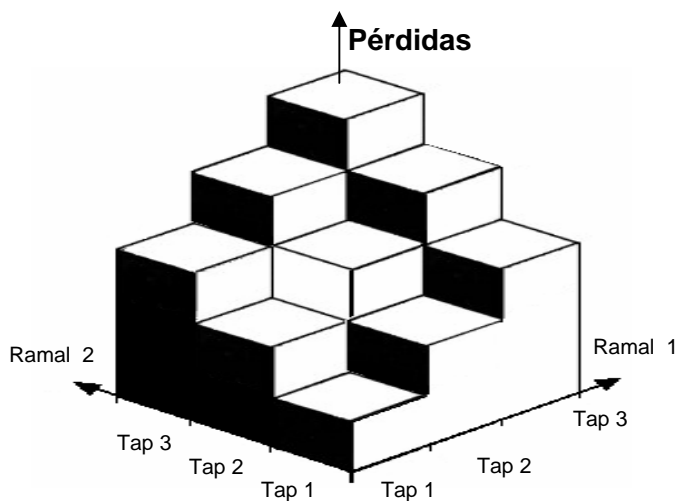


Figura 4. Espacio de soluciones para sistema de 2 ramales.

Aunque se aprecia que los cambios en las pérdidas obedecen a la formulación planteada en la ecuación 8, se realizan ensayos sobre un sistema de prueba para confirmar lo planteado.

3.5 Sistema de prueba

Se estudia un caso que valida la ecuación 8 y permite apuntar elementos para la obtención de la política de manejo de *Taps*. Se genera un sistema de prueba secundario que es alimentado por una señal de voltaje de 120 Voltios. Este mismo voltaje se establece como voltaje nominal. El sistema de prueba tiene una carga de 41 kW distribuida de manera uniforme en sus nodos y valores de impedancia de líneas de $Z=1,017+j0,097125$ (Ohm/km). Los tramos que unen los nodos tienen una longitud de 5 metros. Para la impedancia de cortocircuito del transformador se usó un valor típico de $Z_t=0,0138+j0,02785$ referidas al lado de baja tensión. La topología se presenta en la figura 5.

Nótese en la tabla 2 que para el caso en el que el valor del exponente es de 0.5, se mudan las pérdidas desde un valor de 1,1812 kW hasta 0,9894. En el caso del valor del exponente 1.5 se encuentran pérdidas de 0,94706 kW en 114 V y a 126 V se encuentran pérdidas de valor de 1,0483 kW. Cuando el exponente es igual a 1 las pérdidas permanecen constantes. Esto ya había sido visto desde la aparición del término $(\alpha - 1)$ en la ecuación 7 y 8.

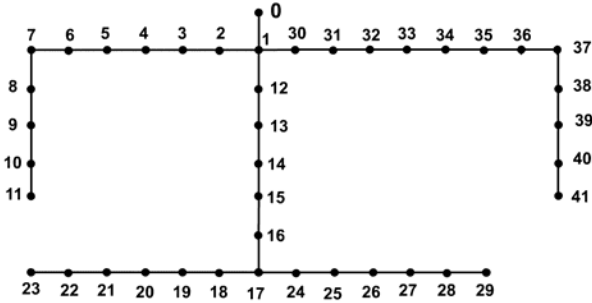


Figura 5. Sistema de prueba de 42 nodos.

α	Voltaje				
	114	117	120	123	126
0	1,2260	1,1594	1,0982	1,0118	0,9708
0,5	1,1812	1,1209	1,0623	1,0351	0,9894
1	1,0289	1,0289	1,0289	1,0289	1,0289
1,5	0,9470	0,9724	0,9977	1,0230	1,0483
2	0,8740	0,9206	0,9684	1,0175	1,0677

Tabla 2. Pérdidas en kW en el sistema de 32 nodos.

3.6 Política operativa de taps

Ayudados de los resultados del sistema de prueba, tabla 2 y de la ecuación 8 se puede afirmar que para cada ramal es posible encontrar un valor de Tap que minimice las pérdidas y a su vez cumpla con los límites de voltaje. De aquí se desprende que la reducción de pérdidas se puede obtener identificando el tipo de carga en cada ramal y asignando un valor de Tap adecuado que permita cumplir restricciones de voltaje.

3.6.1 Carga tipo corriente constante, exponente igual a 1

En las cargas modeladas con exponente 1, el valor de las pérdidas permanece constante a pesar de los cambios en el nivel de tensión. Se concluye que en las cargas de tipo corriente constante se puede variar el voltaje, el Tap, de manera que se cumpla con las restricciones de voltaje y en ningún caso tales movimientos afectarán las pérdidas [1],[5].

3.6.2. Carga tipo impedancia constante o exponente mayor que 1

Se puede afirmar que para cargas con valor de exponente mayor que 1, las pérdidas mínimas en ramales secundarios se presentan cuando el valor del voltaje se ubica en su valor mínimo, es decir, cuando el Tap está en su máximo. Dicho valor mínimo de voltaje está restringido por los límites de regulación.

3.6.3. Carga tipo potencia constante o exponente menor que 1

Para las cargas modeladas como potencia constante o en general con valor de exponente menor que 1, las pérdidas mínimas se presentan cuando el valor de voltaje se ubica en su valor máximo. Al igual que para los demás tipos de carga, los valores de voltaje están restringidos.

3.6.4. Ubicación de tap

Para la aplicación de la política de manejo de Tap se construye un sistema de inferencia difuso que represente las reglas lingüísticas mencionadas en los numerales 3.6.1 a 3.6.3. Esta función tiene como entradas el tipo de carga que domina el ramal secundario, figura 6 y el valor del voltaje en el lado primario del transformador, figura 7. El tipo de carga de cada ramal se puede determinar a través de una ponderación de los tipos de carga que a él pertenezcan.

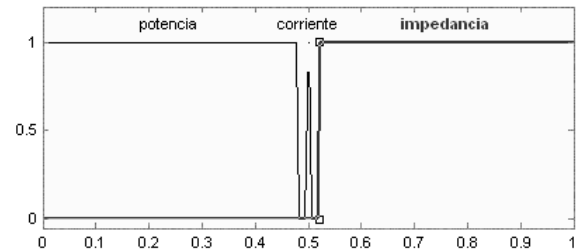


Figura 6. Función de Inferencia de la entrada del modelo de carga (exponente).

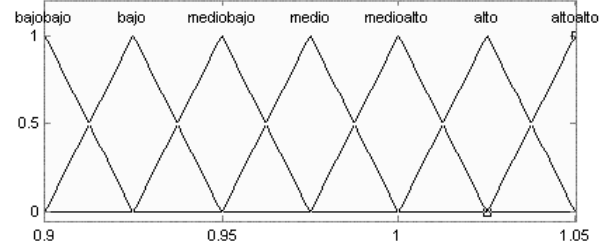


Figura 7. Función de inferencia para la entrada de voltaje.

En el sistema difuso que se menciona, el tipo de carga permite establecer en que dirección se debe mover el Tap, es decir, si en dirección del aumento de voltaje o al contrario. Aparte de dicha dirección, es necesario establecer qué tan grande debe ser dicho avance. Lo anterior porque no se puede asignar el mismo Tap a dos transformadores que, aunque estén alimentando el mismo tipo de carga, presenten voltajes primarios diferentes. Es decir; cada cierto de intervalo de voltajes en el primario y cada uno de los tipos de carga requiere una posición de Tap diferente que se asigna con el sistema de inferencia difuso.

Dos ejemplos de reglas del sistema pueden ser las siguientes:

$$1. \quad \text{If}(\text{exponente} > 1) \text{ and } (\text{Voltaje} = \text{bajo}) \text{ then } t_{\alpha} = 1$$

2. *If(exponente > 1) and (Voltaje = alto) then $t_{\alpha} = 1.025$*

Nótese que las anteriores reglas, aún teniendo exponentes de la misma característica, el hecho que el voltaje en primario sea diferente cambia el valor de *Tap* a asignar. Mientras la regla 1 mantiene el voltaje bajo, asignando un valor de 1 al *Tap*, en la regla 2 dado que el voltaje se encuentra en valor alto y que la carga es de tipo impedancia constante, asigna un *Tap* de 1.025, para disminuir su voltaje y de esta manera bajar las pérdidas.

4. METODOLOGÍA

Con los anteriores elementos presentados y ayudados del análisis eléctrico del problema, se abandona la idea de solucionar el modelo a través de una metodología de optimización y se busca la solución a través de reglas. Dado que es posible obtener para cada ramal secundario un estado de pérdidas mínimo basado en una posición de *Tap* se replantea la estrategia

En primera instancia se determina el estado del sistema a nivel de alta tensión. En esta primera etapa se concentran las cargas, junto con el valor de pérdidas iniciales, en los nodos primarios de los transformadores. Estas condiciones permiten aplicar las reglas generales de asignación de *Tap* de 3.6.4. Una vez se cuenta con los voltajes en los nodos primarios y ayudado de la información que describe el tipo de carga que cada uno de los transformadores alimenta, se ubica la nueva variable del transformador. Con la nueva posición de *Tap* se ejecutan los flujos de carga en los ramales secundarios para verificar el cumplimiento de las restricciones. En caso de violarse alguna, entra en funcionamiento una nueva etapa de corrección que actúa como se muestra.

- *If ($V_{\text{mínimo_ramal1}} < V_{\text{mínimo}}$) then $t_{\alpha} = t_{\alpha} - \text{paso_tap}$*
- *If ($V_{\text{máximo_ramal1}} > V_{\text{máximo}}$) then $t_{\alpha} = t_{\alpha} + \text{paso_tap}$*

En la figura 8 se presentan el estado inicial en 1. En el proceso de asignación de tap es posible que se viole la restricción ubicando el voltaje en el punto 2. Al corregir el *Tap*, el voltaje regresa a la región factible. A diferencia del Flujo de Potencia Óptimo [9], que fija el voltaje en el límite aprovechando la continuidad de las variables, esta corrección lleva al cumplimiento pero no lo fija en la frontera.

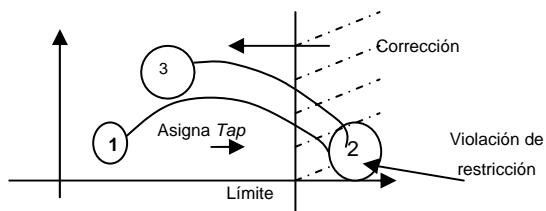


Figura 8. Corrección de las restricciones

El criterio de parada del algoritmo es el cumplimiento de las restricciones dado que las políticas siempre ubican el

Tap en un valor tal que en los ramales se presenten las mínimas pérdidas.

La metodología supone conocimiento pleno de la información que se requiere de cada uno de los ramales secundarios. Su flujograma se presenta en la figura 9.

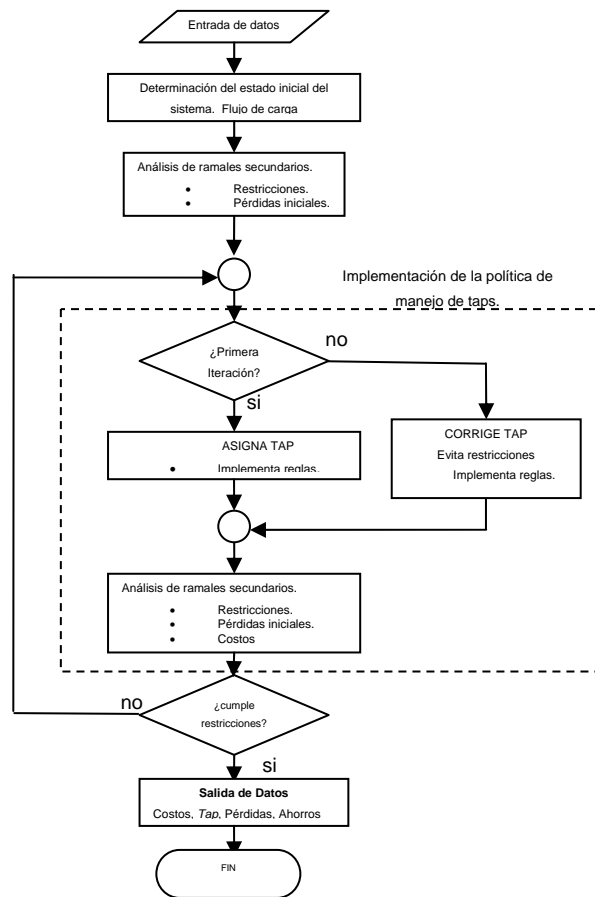


Figura 9. Flujograma de la metodología

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

El sistema IEEE de 33 nodos modificado se muestra a continuación. Los ramales secundarios con su respectivo transformador se conectan en cada uno de los nodos del sistema. El tipo de carga usado para esta prueba, en todos los nodos, tiene exponente menor que 1. En otros casos estudiados, que no se referencian aquí, se logró reducir los niveles de pérdidas.

Para el caso de prueba se usa variaciones en el *Tap* de 2.5% dado que son transformadores usados a niveles de 13200 v. Para transformadores en niveles de tensión superiores las variaciones son generalmente de 1.25%.

La tabla 3 muestra cómo se cambia el nivel de pérdidas para un período de 1 año, con curva de carga discretizada en 3 bloques y valor de 75\$ kWh. En la tabla 4 se nota que los valores de *Tap* en los transformadores toma valores bajos. Esto es coherente con la necesidad de la carga de tipo potencia constante, dado que un valor bajo

de *Tap* hace que los valores de voltaje sean altos con la consiguiente reducción de corriente por las líneas.

El ejercicio se repitió para el mismo sistema adicionando restricciones de movimiento en los nodos 2, 5, 8, 10, 13-18, 22, 25, 28 y 33. En esta ocasión los ahorros fueron menos favorables.

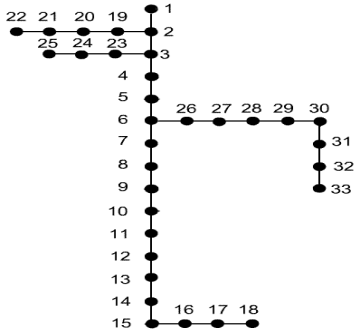


Figura 12. Sistemas de 33 nodos

Pérdidas Ini	Pérdidas fin	Ahorro%	Ahorro
735426,143 kWh	587635,6133 kWh	20,09	10345337,07 \$

Tabla 3. Ahorros en el sistema

Nod	Tap Ini	Tap Fi	Mov	Nod	Tap Ini	Tap Fi	Mov
2	1,05	0,9	1	18	0,95	0,95	1
3	1,05	0,9	1	19	0,95	0,9	1
4	0,9	0,9	1	20	0,975	0,9	1
5	0,95	0,9	1	21	1,025	0,9	1
6	0,925	0,9	1	22	1,025	0,9	1
7	1,025	0,9	1	23	1	0,9	1
8	1,025	0,9	1	24	1	0,9	1
9	1,05	0,9	1	25	1,05	0,9	1
10	1	0,9	1	26	1,025	0,9	1
11	1	0,9	1	27	1,05	0,9	1
12	1,05	0,9	1	28	1,025	0,9	1
13	1	0,9	1	29	0,9	0,9	1
14	1	0,95	1	30	0,9	0,9	1
15	1,05	0,975	1	31	1,025	0,9	1
16	1	0,95	1	32	1	0,9	1
17	0,9	0,95	1	33	1	0,9	1

Tabla 4. Resultados del empleo de la metodología.

Pérdidas Ini	Pérdidas fin	Ahorro %	Ahorro dinero
735426,143 kWh	656388,4686 kWh	10,75	5532637,206 \$

Tabla 5. Ahorros con restricción en algunos trafos.

Se implementó esta metodología junto con otras que se aplican para corregir pérdidas a nivel primario como inyección de reactivos, mostrando ser compatibles y complementarias ya que los ahorros hechos en alta tensión se pueden sumar con los hechos en baja tensión. Un elemento adicional es que se corrigen las violaciones de los voltajes en los secundarios de los transformadores.

Generalmente los cambiadores de derivación pueden moverse sin problemas aún en transformadores antiguos. Por otro lado los transformadores de distribución actuales incluyen la variación del *Tap*, lo que no implica costos adicionales a la empresa que opera la red.

6. CONCLUSIONES

La metodología planteada mostró ser capaz de reducir las pérdidas técnicas en los ramales de prueba secundarios estudiados. La restricción de movimiento de *Tap* que se puede presentar en transformadores defectuosos evita que las pérdidas disminuyan su valor .

El movimiento de *Tap* en transformadores de distribución se debe manejar de manera cuidadosa y planeada y no permitir su movimiento a discreción de los miembros de cuadrillas en los sistemas de distribución reales.

La metodología se implementó suponiendo sistemas balanceados. A nivel de 120 V los sistemas tienen un alto desbalance pero la lógica que propone la metodología sigue siendo válida porque a pesar de las diferencias de voltaje de las fases, la tendencia para mover el *Tap* es igual para ellas. Por otro lado, no existe *Tap* para cada fase.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE Task Force on Load Representation. “Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1. February 1995.
- [2] Garcés A., “Reconfiguración de Alimentadores primarios usando una técnica combinatorial bajo un modelamiento trifásico”, Trabajo de grado Magister en Ingeniería eléctrica. UTP. PIE. 2005.
- [3] Turan G. “Electric Power Distribution system”. Editorial Mc-Graw Hill. 1986.
- [4] Grainger, J., Stevenson W. “Análisis de Sistemas de Potencia”. Editorial Mc-Graw Hill. 1996
- [5] Rodas D. “Modelamiento de cargas en sistemas de distribución ”. Scientia et Técnica. N° 7 Mayo de 1998.
- [6] Augugliaro A, *et al.* “Voltaje regulation and power losses minimization in automated distribution networks by an evolutionary multiobjective approach”, IEEE transactions on systems. Vol 19. N°3. August 2004.
- [7] Rodas D, *et al.* “Transformador monofásico de distribución y de potencia, modelamiento con TAPS”, Scientia et Técnica. N° 30. 2005.
- [8] Molina A., “Política operativa de transformadores de distribución”, Trabajo de grado Magister en Ingeniería eléctrica. UTP. PIE. 2005.
- [9] Tinney W., Dommel H. “Optimal power flow solutions”. IEEE trans. Power App. Sist. Vol Pass-87. Oct. 1968.
- [10] NTC 737 Transformadores “Especificaciones de devanados y sus derivaciones”. NTC 2003.