

# Instalación óptima de reguladores de tensión en sistemas de distribución usando la técnica de enfriamiento simulado

Optimal installation of tension regulators in distribution systems using the simulated annealing technique

YOV STEVEN RESTREPO GRISALES

Ingeniero Electricista de la Universidad Tecnológica de Pereira, candidato a Magíster en Ingeniería Eléctrica, línea de planeamiento eléctrico de la misma universidad.

MAURICIO GRANADA ECHEVERRI

Ingeniero Electricista y Magíster en Ingeniería Eléctrica en la línea de planeamiento eléctrico de la Universidad Tecnológica de Pereira, profesor de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la misma universidad. Director del grupo de Desarrollo en Investigación Operativa (DINOP).

magra@utp.edu.co

RAMON ALFONSO GALLEGO RENDÓN

Ingeniero Electricista de la Universidad Tecnológica de Pereira, M.Sc. en Potencia Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia y Ph.D de la Universidad UNICAMP (Brasil). Profesor de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Director del grupo de investigación en Planeamiento Eléctrico (GPE).

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de recepción: 15 de septiembre de 2006

Fecha de aceptación: 30 de abril de 2007

**Palabras clave:** ubicación óptima de reguladores, enfriamiento simulado, perfil de tensión, optimización combinatoria, reducción de pérdidas.

**Key words:** optimal regulators placement, simulated annealing, tension profile, combinatorial optimization, losses reduction.

## RESUMEN

El problema de instalación óptima de reguladores de tensión que se propone en este artículo comprende la determinación de la ubicación y la cantidad

de reguladores que deben instalarse en un sistema de distribución, con el propósito de mejorar el perfil de tensión y reducir las pérdidas de energía. También se considera la posición óptima del *tap* en

cada regulador, de forma que el perfil de tensión se encuentre dentro de unos límites preestablecidos. La solución encontrada debe ser factible desde el punto de vista económico; por tal motivo, el modelo matemático debe considerar los costos de instalación de reguladores y de pérdidas de energía, de acuerdo con una discretización de la curva de carga. La técnica de optimización usada es conocida con el nombre de enfriamiento simulado.

#### ABSTRACT

In this paper, the optimum voltage regulators placement problem pretends to determine the location

and size of regulators which have to be installed in a distribution system in order to improve the tension profile and reduce the energy losses. The optimal *tap* position in each regulator is considered also, so that the tension profile is in pre-established limits. The found solution must be feasible; for that, mathematical model must consider the costs of voltage regulators installation and energy losses, according to a discretization of the load curve. The optimization technique used is well-known with the name of simulated annealing.

\* \* \*

## 1. Introducción

En la operación de sistemas de distribución de energía eléctrica se producen efectos indeseables que ocasionan costos significativos para las empresas del sector; entre ellos, los que requieren de mayor atención son: las pérdidas de energía que ocurren en las líneas de distribución y la caída de tensión que se acumula nodo tras nodo a lo largo del alimentador. Debido a estas inevitables características de tales sistemas se hace necesario definir estrategias para reducir las pérdidas de energía y mejorar el perfil de tensión de la red, pues ello compromete los intereses económicos de las empresas y la calidad del servicio exigida por los usuarios y las entidades que regulan la actividad de distribución de energía eléctrica.

En general, en la literatura especializada se aborda el tema de la ubicación de reguladores de tensión y, de igual forma, se considera sólo el objetivo de mejorar el perfil de tensión, como se muestra en [1] y [2]. En este trabajo se propone una metodología que permite reducir la inversión y los costos de operación del sistema; entre estos últimos se encuentran los costos asociados con las pérdidas técnicas de energía y los inadecuados perfiles de tensión. La metodología de solución propuesta explora la posibilidad de instalar reguladores de tensión en los alimentadores primarios de un sistema de distribución existente.

## 2. Instalación óptima de reguladores

El problema que se aborda en este artículo es la determinación del lugar de ubicación y de la cantidad de Reguladores de Tensión (RT) que se deben conectar al alimentador de distribución, para minimizar las pérdidas de energía y la inversión. También se debe determinar la posición del *tap* de cada RT, para garantizar que la tensión en todos los nodos (perfil de tensión) se encuentre dentro de unos límites máximos y mínimos preestablecidos. En el proceso de búsqueda de un perfil de tensión adecuado se privilegian las soluciones que producen una reducción importante en lo que se refiere a las pérdidas del alimentador para unas condiciones de carga dadas. En condiciones iniciales se asume que no existen RT conectados al sistema eléctrico.

Un RT es un auto-transformador con *taps* en uno de sus devanados, que permite variar el voltaje entregado y puede ser operado bajo carga. Comúnmente se emplea el modelo del regulador monofásico, que puede aplicarse a sistemas monofásicos en forma directa o a sistemas trifásicos conectando varias unidades que conformen un banco trifásico [3].

La mayoría de reguladores se diseñan para corregir el voltaje de línea en  $\pm 10\%$  en 32 pasos, 16 hacia arriba y 16 hacia abajo; así, cada paso representa  $10/16\%$  ó  $5/8\%$  ( $0,625\%$ , con base en  $120:0,75$  Voltios por *tap*), de cambio de voltaje por paso.

Cada regulador de voltaje está equipado con los controles y accesorios necesarios para que los *taps* sean cambiados bajo carga y en forma automática para mantener el voltaje en el centro de carga o el nivel de regulación en un voltaje predeterminado con cierto nivel de tolerancia.

El regulador es un auto-transformador con varias derivaciones en el bobinado. Algunos valores típicos del rango de regulación son:  $\pm 5\%$ ;  $\pm 6,65\%$ ;  $\pm 7,5\%$ ;  $\pm 8,75\%$ ;  $\pm 10\%$ .

### 3. Modelo matemático

La solución encontrada mediante un algoritmo de optimización debe ser factible desde el punto de vista económico. En consecuencia, el modelo matemático debe considerar la inversión en la instalación de los reguladores de tensión y el costo de las pérdidas de energía, de acuerdo con una discretización de la curva de carga (ver gráfica 1). De esta forma, la solución sólo se acepta si se define una relación adecuada entre costo y beneficio.

El modelo debe entregar una solución que permita mantener los voltajes del sistema dentro de un rango específico ( $V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$ ,  $i=1, 2, \dots, \# \text{ nodos}$ ), y considerar que el costo de instalación de los reguladores debe ser recuperado a través de ahorro asociado con la disminución de las pérdidas de energía eléctrica.

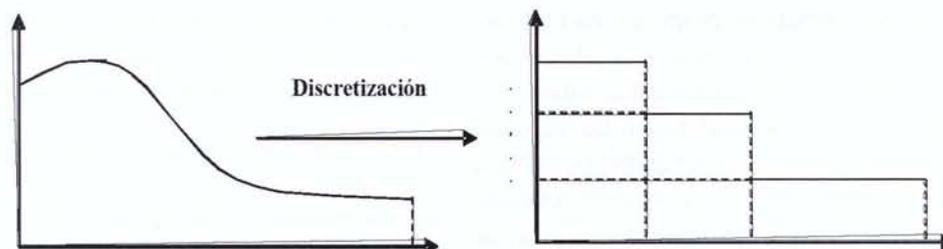
El modelo matemático está conformado por una función objetivo que representa los costos totales,

en este caso el costo de pérdidas de energía del sistema, la inversión por colocación de los reguladores de tensión y una componente que indica, en unidades monetarias, el mejoramiento del perfil de tensión del sistema de distribución [4] [5] [6].

La inversión incluye todos los costos y gastos de instalación de los reguladores de tensión necesarios para el cumplimiento de los objetivos, entre ellos:

- Regulador de tensión instalado.
- Mano de obra requerida para la instalación.
- Equipos complementarios requeridos para el buen funcionamiento de los reguladores (transformadores de potencial y de corriente).
- Costo de interrupción del servicio debido a la instalación del equipo. Este último varía de acuerdo con el sector donde se haga la interrupción (residencial, comercial e industrial); por tanto, se puede emplear un costo que represente la combinación de cargas afectada por la interrupción.

Para el cálculo del costo de las pérdidas de energía del sistema se consideran variaciones de carga del sistema durante un tiempo determinado  $T$  ( $T = 8.760$  horas). Las variaciones de carga se aproximan por medio de niveles discretos; esto es, las cargas del sistema varían en forma proporcional al nivel discreto de carga en donde se encuentren. Éstas se representan por medio de la curva de duración de carga; el esquema de discretización se presenta en la gráfica 1.



Gráfica 1. Discretización por niveles de carga

Cada nivel  $L$  representa un porcentaje del nivel de carga máxima ( $L_{nv}$ ). Además, el modelo matemático debe considerar restricciones que garanticen la buena operación del sistema, a saber:

- Restricción del balance de potencia nodal: el flujo de corrientes por las líneas y los voltajes en los nodos deben cumplir las leyes eléctricas.
- Restricción de la magnitud voltaje: cuando los sistemas de distribución están bien diseñados, los cambios en las condiciones desbalanceadas

de carga y demanda causan cambios mínimos en el perfil de tensión del sistema. En consecuencia, la restricción de magnitud de voltaje se considera independiente del nivel carga  $j$ .

- Restricción de la cantidad de reguladores de tensión por ubicar en el sistema.
- Restricción de la capacidad de carga del regulador de tensión.

Un modelo que incluye todas las condiciones anteriores se presenta a continuación.

$$\min C_E * \sum_{t=1}^{N_t} T_t \sum_{i=1}^{N-1} R_i \frac{P_{it}^2 + Q_{it}^2}{V_{it}^2} + C_L * P_L + \alpha * \sum_{k=1}^N \delta_k * \Delta V_k + \sum_{k=1}^N C_{RTPk} * VR_k \quad (1)$$

S.A.

$$\begin{aligned} V_{\min} &\leq V_k \leq V_{\max} ; k=1,2,3, \dots, N \\ P_{D(kt)} &= f_p(V_{kt}, \theta_{kt}, \beta) \\ Q_{D(kt)} &= f_q(V_{kt}, \theta_{kt}, \beta) \\ \sum_{k=1}^N VR_k &\leq RT_{disp} \\ 1 &\leq TAPRT_k \leq 16 \\ CAPVR_k &\leq CAP_{\max disp} \end{aligned} \quad (2)$$

En (1) y (2):

- $C_{TOTAL}$ : costo total
- $CE$ : costo de la energía (\$/kWh)
- $C_L$ : coeficiente de dimensionalidad ( $\$/kW$ ).
- $C_{RTPk}$ : costo de instalación del regulador de tensión de capacidad  $P$  instalado en la barra  $k$ .
- $N$ : número total de nodos del sistema
- $N-1$ : número total de segmentos del sistema.
- $\beta$ : otros parámetros de flujo de carga
- $N_t$ : número de niveles de la curva discretizada de carga.
- $T_t$ : horas de duración del nivel de carga  $t$ .
- $P_{it}$ : flujo de potencia activa por la línea  $i$  en el nivel de carga  $t$  ( $kW$ )
- $Q_{it}$ : flujo de potencia reactiva por la línea  $i$  en el nivel de carga  $t$  ( $kVAR$ ).
- $P_E$ : pérdidas de potencia en el nivel de carga pico ( $kW$ ).
- $\Delta V_k$ : desviación de la magnitud de voltaje en la barra  $i$ , con respecto al voltaje medio ( $V_{medio}$ )
- $\alpha$ : constante de adaptación en  $\$/V$ , para contabilizar en la función objetivo el perfil de tensión en el sistema.

El término  $C_E * \sum_{t=1}^{N_t} T_t \sum_{l=1}^{N_l} R_{lt} \frac{P_{lt}^2 + Q_{lt}^2}{V_{lt}^2}$  de la función objetivo contabiliza el costo de las pérdidas de energía para cada periodo de la curva de carga. En (1) los costos de pérdidas de potencia son evaluados mediante la expresión  $C_L * P_L$ . Para medir el impacto del perfil de tensión en la función objetivo se utiliza la expresión  $\alpha * \sum_{k=1}^N \delta_k * \Delta V_k$ . Por último, el costo de instalación de los reguladores se calcula mediante la expresión  $\sum_{k=1}^N C_{RTKP} * VR_k$ .

Para complementar el planteamiento de los componentes del modelo matemático es conveniente realizar un análisis de sensibilidad que determina las barras candidatas para instalar reguladores de tensión [5] [6].

Inicialmente, se asume que el regulador de tensión proporcionará una regulación máxima del 10%. Por ende, mediante la predeterminación de la ubicación de los reguladores de tensión se puede disminuir el espacio de búsqueda del algoritmo de optimización y se puede obtener un ahorro significativo del tiempo computacional empleado para encontrar las soluciones óptimas.

$$P(\text{probabilidad de aceptar cambio de } i \text{ a } j) = \begin{cases} \exp\left(\frac{f(i)-f(j)}{T}\right) & \text{Si } f(j) > f(i) \\ 1 & \text{Si } f(j) \leq f(i) \end{cases} \quad (3)$$

El algoritmo depende de dos parámetros de control, la temperatura  $T$  y el número de cambios de estado,  $N_{kmax}$ , para cada nivel de temperatura. Luego de generar un estado inicial, los  $N_{kmax}$  cambios de estado son considerados de acuerdo con el criterio mostrado en (3). La temperatura  $T$  se reduce como resultado de un proceso de enfriamiento; el proceso se repite hasta alcanzar un criterio de convergencia apropiado. En este caso, los criterios usados son:

#### 4. Metodología de optimización: enfriamiento simulado

El problema se resuelve mediante la utilización de una técnica combinatoria que determina la cantidad y ubicación óptima de los reguladores de tensión, y la posición del *tap* para cada regulador instalado. La técnica de enfriamiento simulado (*Simulated An nealing*) simula el comportamiento natural del proceso físico del calentamiento de un sólido, seguido por su enfriamiento hasta lograr un estado cristalino con una estructura de mejor calidad. Durante este proceso la energía libre del sólido es minimizada; el enfriamiento se debe efectuar de tal modo que se garantice la conformación de estructuras de buena calidad; en términos matemáticos, esto quiere decir que se deben evitar convergencias prematuras [7].

A la optimización combinatoria *Simulated Annealing* se incorpora la simulación del proceso de recocido de sólidos, la cual, entre muchas soluciones, selecciona la de mínimo costo, para así establecer la correspondencia entre la función de costos y la energía libre, y entre la solución y los estados físicos (diagrama 1). Esta técnica combinatorial busca reducir al mínimo la función de costo ( $f(x)$ ), como un equivalente del estado de energía de un sistema físico. Alcanzar el equilibrio es equivalente a aceptar o rechazar en varias ocasiones cambios en los estados de energía  $i$  a  $j$ , de acuerdo con una probabilidad expresada en (3).

- Cuando la reducción de la función objetivo alcanza un valor predeterminado.
- Cuando los cambios en la energía considerada son suficientemente pequeños.
- Cuando la temperatura es suficientemente baja. En la práctica, los valores apropiados de  $T$ ,  $N_{kmax}$  y del proceso de enfriamiento pueden determinarse experimentalmente mediante un procedimiento de prueba y error.

En los procesos de optimización también reviste importancia evaluar la función objetivo, para lo cual es necesario encontrar las pérdidas de energía del sistema. En este caso esto se hace usando un flujo de carga monofásico que se encarga de probar las

condiciones técnicas del sistema para cada una de las características de instalación de los reguladores de tensión y brinda la información necesaria para que el algoritmo de optimización tome la decisión más adecuada.

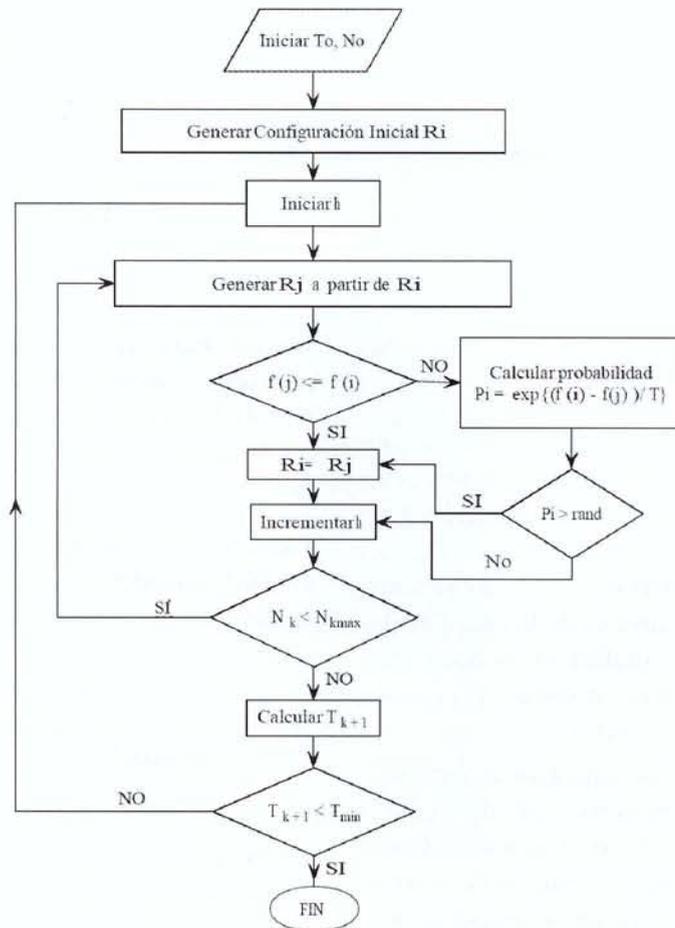


Diagrama 1. Diagrama de flujo del *Simulated Annealing*

### 5. Aplicación de la técnica *Simulated Annealing* a la solución del problema

El algoritmo de enfriamiento simulado toma una configuración cualquiera del sistema analizado, la cual contiene los nodos de ubicación preliminares de los reguladores de tensión y los *taps* correspondientes. Las características operativas del sistema para la configuración evaluada, necesarias para la valoración de la función objetivo, se obtienen por medio del flujo de carga.

Si se considera un modelo matemático monofásico, la adaptación del algoritmo combinatorial a la ubicación de reguladores de tensión en sistemas de distribución emplea la codificación que se ilustra en el diagrama 2.

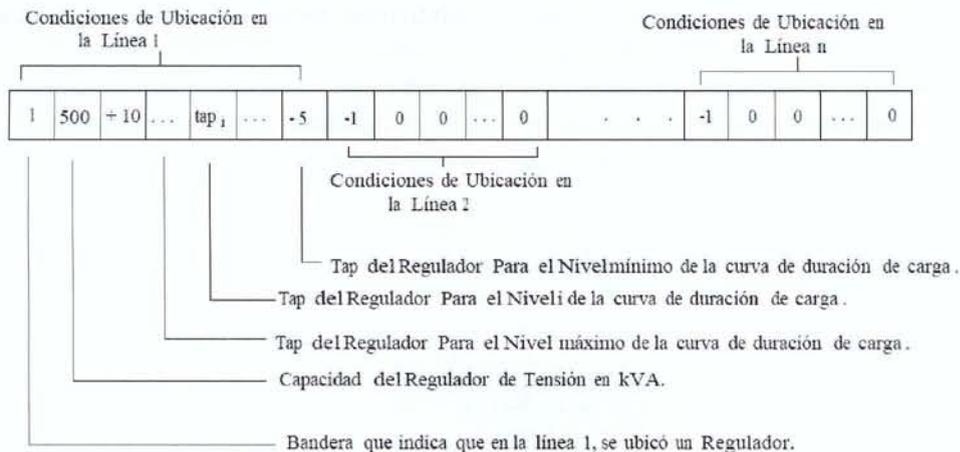


Diagrama 2. Codificación del problema

La codificación se realiza teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- El vector del diagrama 2 representa las condiciones de instalación de los reguladores de tensión en el sistema. El tamaño del vector de codificación es de  $numlíneas * (2 + numnivear)$ ;  $numlíneas$  es el número de líneas del sistema, y  $numnivear$  son los niveles de la curva de duración de carga (ver gráfica 1); es decir, para cada línea del sistema se reserva  $2 + numnivear$  posiciones dentro del vector.

La codificación del sitio de ubicación es representada por la línea que tiene como nodo de recibo la barra seleccionada para ubicar el regulador. Como se observará más adelante, la inclusión del modelo del regulador al flujo de carga es necesaria pues éste se instala en la línea inmediatamente anterior al nodo de ubicación. Dado que el sistema es radial, vale recordar que sólo existe una línea llegando a un nodo.

De los espacios reservados para cada línea (ver diagrama 2), el primero representa la bandera de instalación; ésta toma el valor de 1, cuando el regulador es instalado, y de -1, en el caso contrario. La siguiente casilla representa la capacidad nominal del regulador por instalar en este sitio, de acuerdo con capacidades comerciales; las demás casillas hacen parte del espacio reservado para la

línea 1. Para crear el vector de configuración es necesario conocer previamente el ordenamiento real de las líneas; es decir, se deben establecerse las líneas más cercanas al nodo de la subestación y las más alejadas.

Para seleccionar las barras candidatas para la ubicación del regulador de tensión, que al final determinan el segmento de línea donde éste debe ubicarse para efectos del flujo de carga, a medida que el proceso de optimización avanza se debe realizar una preclasificación de barras de acuerdo con los siguientes criterios (grupos):

- Barras entre 1 p.u y  $(Vref - 0,02)$ .
- Barras entre  $(Vref - 0,02)$  y  $Vmin$ .
- Barras con voltajes menores a  $Vmin$ .
- Barras con voltajes mayores a  $Vmax$ .
- Barras entre el voltaje de referencia  $Vref$  y  $Vmax$ .

La clasificación se debe hacer en la medida en que las condiciones de operación varíen. El proceso de selección es probabilístico; mayor posibilidad de selección se otorga a aquellas barras que se encuentren clasificadas dentro de los grupos de mayor importancia. Después de la preclasificación, el proceso de selección continúa verificando si existen violaciones al límite máximo de tensión (criterio 4), pues estas barras tienen la mayor probabilidad de ser seleccionadas.

En orden de probabilidad, para la selección continúa el criterio 5; nuevamente, se da prioridad a los nodos más cercanos a la fuente. Bajo la misma perspectiva, la siguiente prioridad en la clasificación se otorga al criterio 1; finalmente –y con igual probabilidad– se consideran los criterios 2 y 3.

Cuando no existen violaciones de tensión por encima del límite superior, las probabilidades de selección de barras son diferentes. En este caso se da prioridad al criterio 5 y luego, en su orden, a los

criterios 1, 2 y 3. La idea consiste en dar prioridad a las barras más cercanas al nodo fuente, aunque por el efecto aleatorio puede ser seleccionada cualquier barra del sistema.

En el diagrama 3 se muestran los bloques de implementación de la aplicación desarrollada. El flujo de carga radial empleado para evaluar las configuraciones es del tipo de barrido iterativo y, por tanto, aprovecha la característica radial del sistema de distribución [8].

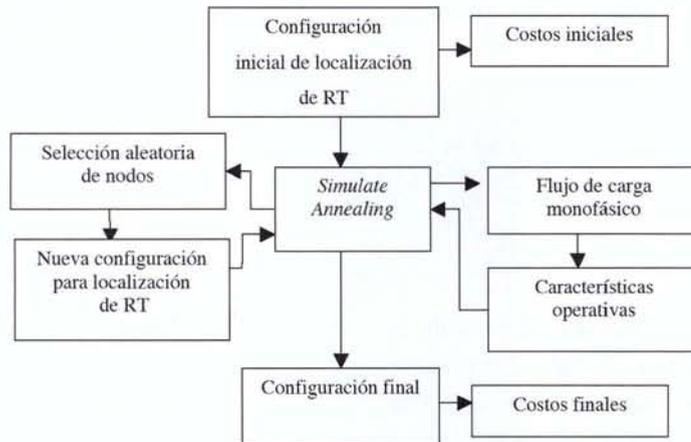


Diagrama 3. Diagrama de bloques

La figura 1 muestra el esquema monofásico de un regulador de tensión;  $t$  corresponde al  $tap$  del regulador,  $Y$  es la admitancia de cortocircuito del regulador de tensión,  $n_i$  es el nodo de entrada y  $n_{i+1}$  el nodo de salida. La conexión mostrada es aditiva y puede ser elevadora o reductora, de acuerdo con la conexión de devanados.

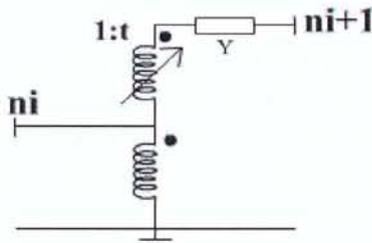


Figura 1. Regulador de tensión con conexión aditiva elevadora

Para sistemas balanceados de los que se puede realizar una representación monofásica, el regulador de tensión se representa a través de un modelo  $\pi$  [3], como lo muestra la figura 2; en esta figura,  $t$  es el valor del  $tap$  del regulador de tensión, con rango entre  $0,9 \leq t \leq 1,1$ , para un equipo con regulación máxima del 10%.  $V_{ni+1} = t \times V_{ni}$ ; el valor de la admitancia del regulador ( $Y$ ) es despreciable para el cálculo de la regulación de este equipo.

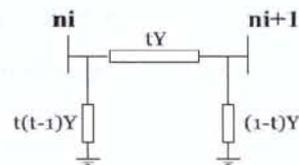


Figura 2. Modelo  $\pi$  del regulador de tensión

Cuando se considera la ubicación de un regulador de tensión en una barra de un sistema de distribución se asume que el regulador se encuentra situado al final del tramo inmediatamente anterior a la barra de ubicación; en otras palabras, aparece una barra ficticia antes de la barra de ubicación del regulador.

En la deducción de las ecuaciones utilizadas para la incorporación del regulador de tensión en el algoritmo del flujo de carga se considera la ubicación en la barra  $j$  del sistema de distribución mostrado en la figura 3; en ésta  $Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1}$  corresponden a las admitancias de las líneas.

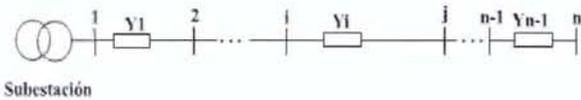


Figura 3. Sistema de distribución

Si se inserta el regulador de tensión al final de la línea inmediatamente anterior a la barra  $j$ , el sistema de distribución puede ser representado como se muestra en la figura 4.

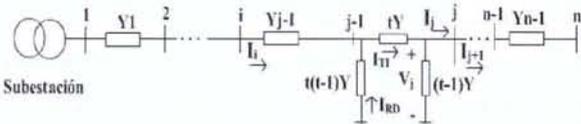


Figura 4. Sistema de distribución con regulador de tensión

La corriente  $I_i$  que parte del nodo  $i$  puede expresarse en función de la corriente del nodo  $j$  como:

$$I_i = t * I_j \tag{4}$$

Partiendo del voltaje conocido en el nodo  $i$ , para el cálculo del voltaje en el nodo  $j$  se debe llevar a cabo el siguiente procedimiento:

- Cálculo del voltaje en el nodo ficticio  $j-1$ :

$$V_{j-1} = V_i - \frac{I_i}{Y_{j-1}} \tag{5}$$

- Cálculo del voltaje en el nodo  $j$ :

$$V_j = t * V_{j-1} - \frac{I_j}{Y} \tag{6}$$

Después de obtener los voltajes  $V_{j-1}$  y  $V_j$  se puede encontrar el valor de las pérdidas en las ramas en derivación (*shunt*) y serie del regulador, utilizando las siguientes expresiones:

- Pérdidas en la rama *shunt* (izquierda):

$$S_{\text{pérdidas}} = \|V_{j-1}\|^2 * (t^2 - t) * Y \tag{7}$$

- Pérdidas en la rama serie:

$$S_{\text{pérdidas}} = \|V_{j-1} - V_j\|^2 * (t^2 - t) * Y \tag{8}$$

- Pérdidas en la rama *shunt* (derecha):

$$S_{\text{pérdidas}} = \|V_j\|^2 * (t - 1) * Y \tag{9}$$

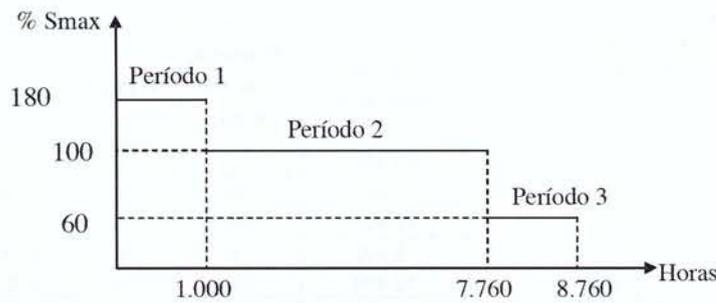
## 6. Ejemplo de prueba para la ubicación de reguladores de tensión

A continuación se presentan los resultados de la instalación de reguladores de tensión para el sistema IEEE de 33 nodos [1] [9]. Para el caso de prueba evaluado se tomaron los siguientes parámetros:

Costo de energía	100 \$/kWh
Costo de potencia pico	0 \$/kW

Tabla 1. Costos asumidos

El ejercicio se resolvió bajo el supuesto de que la red de distribución se encuentra en condiciones balanceadas, lo que permite realizar una representación monofásica. En este caso, el modelo de carga utilizado es el de potencia constante; asimismo, la curva de carga utilizada se muestra en la gráfica 2.



Gráfica 2. Curva de carga

Inicialmente, este sistema de prueba no tiene ningún regulador instalado; los parámetros de la red se presentan en la tabla 2. El conjunto de reguladores de tensión considerados para instalarse en el sistema y sus parámetros respectivos se muestran en la tabla 5. Las condiciones del sistema, magnitud de

voltaje en las barras del sistema y pérdidas en las líneas, sin instalación de reguladores se presentan en la tabla 2 y tabla 3. En la tabla 6 se muestran las pérdidas de energía para cada periodo de la curva de carga utilizada (ver gráfica 2).

Línea	Nodo envío	Nodo recibo	Parámetros (Ohmios)		P (kW)	Q (kVAR)
			Resist	React		
1	1	2	0,0922	0,0477	100	60
2	2	3	0,4930	0,2511	90	40
3	3	4	0,3660	0,1864	120	80
4	4	5	0,3811	0,1941	60	30
5	5	6	0,8190	0,7070	60	20
6	6	7	0,1872	0,6188	200	100
7	7	8	1,7114	1,2351	200	100
8	8	9	1,0300	0,7400	60	20
9	9	10	1,0400	0,7400	60	20
10	10	11	0,1966	0,0650	45	30
11	11	12	0,3744	0,1238	60	35
12	12	13	1,4680	1,1550	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	120	80
14	14	15	0,5910	0,5260	60	10
15	15	16	0,7463	0,4500	60	20
16	16	17	1,2890	1,7210	60	20
17	17	18	0,7320	0,5740	90	40
18	2	19	0,1640	0,1565	90	40
19	19	20	1,5042	1,3554	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	90	40
22	3	23	0,4512	0,3083	90	50
23	23	24	0,8980	0,7091	420	200
24	24	25	0,8960	0,7011	420	200
25	6	26	0,2030	0,1034	60	25
26	26	27	0,2842	0,1447	60	25
27	27	28	1,0590	0,9337	60	20
28	28	29	0,8042	0,7006	120	70
29	29	30	0,5075	0,2585	200	600
30	30	31	0,9744	0,9630	150	70
31	31	32	0,3105	0,3619	210	100
32	32	33	0,3410	0,5302	60	40
No. Nodos			33			
Nodo slack			1			
Voltaje (V)			12.660			

Tabla 2. Parámetros de la red

Barra	Tensión en p.u. para cada periodo (P) de la curva de carga		
	P_1	P_2	P_3
1	1	1	1
2	0,9943	0,997	0,9982
3	0,9671	0,9828	0,99
4	0,9524	0,9753	0,9856
5	0,9379	0,9679	0,9813
6	0,902	0,9495	0,9706
7	0,8988	0,9478	0,9697
8	0,8717	0,9341	0,9617
9	0,8591	0,9277	0,9581
10	0,8474	0,9218	0,9546
11	0,8456	0,9209	0,9541
12	0,8424	0,9193	0,9532
13	0,8303	0,9132	0,9497
14	0,8268	0,9115	0,9487
15	0,824	0,9101	0,9479
16	0,8212	0,9087	0,9471
17	0,818	0,9071	0,9461
18	0,8168	0,9065	0,9458
19	0,9934	0,9965	0,9979
20	0,987	0,993	0,9958
21	0,986	0,9924	0,9955
22	0,9851	0,9919	0,9952
23	0,9603	0,9792	0,9878
24	0,9482	0,9726	0,9839
25	0,9421	0,9693	0,982
26	0,8982	0,9476	0,9695
27	0,8932	0,945	0,968
28	0,8712	0,9337	0,9615
29	0,8552	0,9256	0,9568
30	0,8482	0,922	0,9547
31	0,8414	0,9186	0,9527
32	0,84	0,9178	0,9523
33	0,8396	0,9177	0,9522

Tabla 3. Perfil de tensión inicial

Barra	Tensión en p.u. para cada período (P) de la curva de carga		
	P_1	P_2	P_3
1	1	1	1
2	1,0477	1,0485	1,0454
3	1,0223	1,035	1,0375
4	1,0088	1,0279	1,0334
5	0,9953	1,0209	1,0293
6	1,0478	1,045	1,0495
7	1,045	1,0435	1,0486
8	1,0222	1,0311	1,0413
9	1,0116	1,0253	1,0379
10	1,0018	1,02	1,0348
11	1,0002	1,0192	1,0343
12	0,9975	1,0177	1,0334
13	0,9874	1,0123	1,0302
14	0,9845	1,0107	1,0293
15	0,9821	1,0094	1,0285
16	0,9798	1,0082	1,0278
17	0,9772	1,0067	1,0269
18	0,9761	1,0062	1,0266
19	1,0468	1,048	1,0451
20	1,0408	1,0446	1,0431
21	1,0398	1,0441	1,0428
22	1,0389	1,0436	1,0425
23	1,0159	1,0316	1,0355
24	1,0045	1,0253	1,0318
25	0,9988	1,0222	1,0299
26	1,0446	1,0432	1,0485
27	1,0403	1,0409	1,0471
28	1,0217	1,0308	1,0411
29	1,0082	1,0234	1,0367
30	1,0023	1,0202	1,0348
31	0,9965	1,017	1,033
32	0,9953	1,0164	1,0326
33	0,995	1,0162	1,0325

Tabla 4. Perfil de tensión final

Las barras resaltadas en la tabla 3 son las que violan los límites de tensión preestablecidos. En este caso se tomó como voltaje límite inferior 0,95 p.u y voltaje límite superior 1,05 p.u. Las gráficas 3, 4 y 5 muestran los perfiles de tensión antes (línea punteada) y después (línea continua) de la instalación de los reguladores de tensión, para cada nivel de la curva de carga; las pérdidas de energía iniciales de cada periodo de carga se muestran en la tabla 6; el costo inicial de las pérdidas de energía sin reguladores es de \$228.342.528,56. La ejecución del algoritmo de optimización generó los resultados

Tensión nominal (V)	Potencia nominal (kVA)	R (p.u.)	X (p.u.)	Costo anualizado del regulador de tensión (\$)
13.800	72	0	0,0005	2.537.771
13.800	144	0	0,0005	4.441.100
13.800	288	0	0,0005	6.09.0651
13.800	333	0	0,001	8.120.869
13.800	416	0	0,001	9.516.643
13.800	432	0	0,001	9.516.643
13.800	500	0	0,001	9.89.7309
13.800	576	0	0,001	10.785.529
13.800	667	0	0,001	11.039.306
13.800	720	0	0,001	11.419.972
13.800	833	0	0,001	12.054.414

Tabla 5. Reguladores a instalar en la red

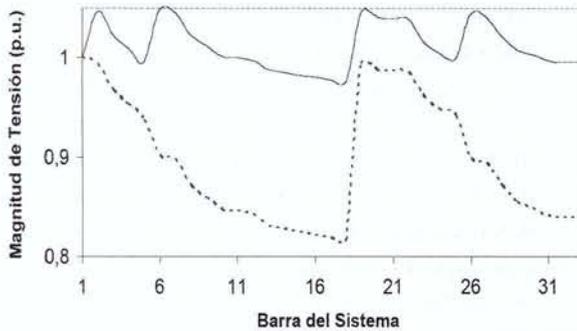
mostrados en la tabla 7. Los perfiles de tensión correspondientes a la propuesta de ubicación del regulador de tensión aparecen en la tabla 4; cuando se comparan los perfiles finales (después de insertar los reguladores), con los iniciales (tablas 3 y 4), se aprecia que la colocación de los reguladores no genera violaciones en los límites de tensión ( $V_{min}=0,95$  y  $V_{max}=1,05$ ) durante todo el periodo de estudio. Una comparación de pérdidas finales e iniciales y el mejoramiento en pérdidas consecuente se observan en la tabla 8.

Periodo	Pérdidas de energía (kW-h)
1	791088,4119
2	1421195,796
3	71141,0777

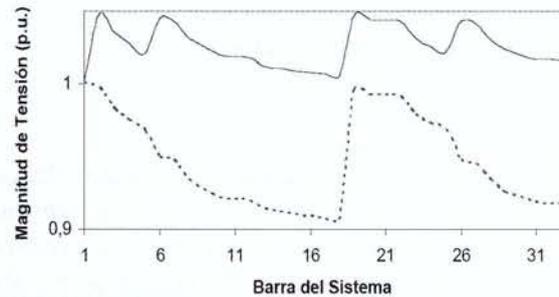
Tabla 6. Pérdidas de energía

Nodo	Cap. Nom. (kVA)	Posición Tap	Período Curva de Carga
2	1000	+10	1
		+9	2
		+8	3
6	576	+15	1
		+7	2
		+5	3

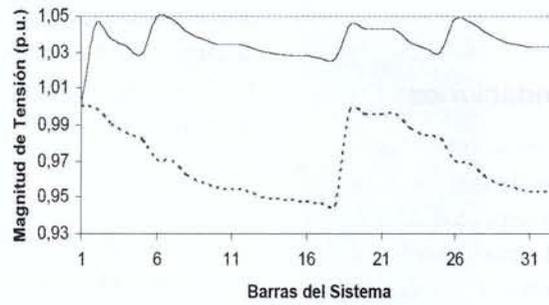
Tabla 7. Ubicación del regulador



Gráfica 3. Perfil de tensión para el nivel de carga máxima



Gráfica 4. Perfil de tensión para el nivel de carga media



Gráfica 5. Perfil de tensión para el nivel de carga mínima

Periodo	Pérdidas finales de energía (kW-h)	Pérdidas iniciales de energía (kW-h)	Reducción de pérdidas (%)
1	653.945,6	791.088,4	17,3
2	1.246.646	1.421.195,8	12,3
3	63.767,4	71.141,1	10,4

Tabla 8. Comparación pérdidas de energía

El costo inicial de la red, incluyendo las pérdidas iniciales y el costo inicial del perfil de voltajes, sin instalar reguladores de tensión es de \$403.916.691,8, de los cuales el costo de pérdidas iniciales es de \$228.342.528,56 y el asociado a la penalización por un perfil de tensión deficiente (costo inicial del perfil de voltajes) es de \$175.574.163,24. Se puede notar que este último costo es muy alto debido a los deficientes perfiles de tensión en cada nivel de carga

registrado en las gráficas 2, 3 y 4 en línea punteada; este costo se calcula como  $F_{penalizacion} * \$/kWh (\$/V)$ , asumiendo  $F_{penalizacion} = 100.000$ .

El costo de la red después de la instalación de los reguladores es de: \$232.897.406,9, incluyendo los costos de pérdidas finales (\$196.495.839,44) y por perfil de voltajes (\$2.830.015,463). Este último es bastante bajo dado que los reguladores mejoran

ostensiblemente el perfil de tensión y, por tanto, la penalización por este concepto disminuye drásticamente. La inversión realizada en el sistema por concepto de ubicación de reguladores es de \$33.631.492; como consecuencia, el porcentaje de reducción en el costo total es del 42%.

En este caso se considera que la franja de voltajes nodales que definen un adecuado perfil de tensión está comprendida entre 0,95 y 1,05 p.u. La reducción en las pérdidas del sistema cuando se instala el regulador de tensión es bastante alta debido al mejoramiento del perfil de tensión, dado que se penalizó fuertemente la violación a esta restricción; también debido al modelo de carga utilizado, en este caso potencia constante.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

- El modelo propuesto para la ubicación de reguladores de tensión en sistemas de distribución de energía eléctrica considera aspectos de importancia para las empresas de distribución de energía eléctrica: inversión, costos de operación (pérdidas de energía) y un componente que representa el costo de tener perfiles de tensión deficientes en la red de distribución.
- La técnica combinatoria utilizada permitió encontrar una solución que satisface los requerimientos de reducción de pérdidas y de mejoramiento del perfil de tensión.
- Es necesario verificar el comportamiento de la metodología realizando pruebas con sistemas que permitan mezclar modelos de cargas de impedancia constante y de corriente e impedancia constante. La estrategia de elevar tensiones en barras no sería tan conveniente en sistemas en los que abundan las cargas modeladas como impedancia constantes, por ejemplo alimentadores que suministran energía eléctrica a cargas residenciales; también se debe tener en cuenta que la ubicación de reguladores de tensión en sistemas de distribución es aconsejable cuando las cargas se pueden modelar como potencia constante.
- Para un estudio más detallado se debe incluir un análisis trifásico de los sistemas de distribución (de naturaleza desbalanceada) y cargas modeladas como impedancia constante y corriente constante. El modelo de la carga influye directamente sobre los resultados de cada etapa; por tanto, es fundamental tener información detallada acerca del comportamiento de la carga con respecto a cambios en el nivel de tensión, lo cual define un modelo de potencia, impedancia o corriente constante.
- En la mayoría de casos las cargas se presentan en forma combinada y reúnen características de los tres modelos anteriores; la combinación de cargas puede ser modelada si se asigna un porcentaje de la carga total a cada uno de los modelos anteriores. La corriente de línea total que entra a la carga es la suma de las tres componentes.
- La metodología de ubicación óptima de reguladores puede ser integrada con otras, por ejemplo con la ubicación óptima de condensadores, mediante una configuración única que permita realizar una búsqueda simultánea (posición y cantidad de reactivos inyectados, y posición y ubicación del *tap* de los reguladores). En la combinación resultante de las metodologías a cada una de ellas se asignaría un objetivo específico; por ejemplo, los condensadores se ubicarían, con el fin de reducir pérdidas, y los reguladores de tensión tendrían como propósito mejorar los perfiles de tensión. En consecuencia, el espacio de soluciones del problema conjunto es mucho mayor que el de cada problema individual; entonces, se hace necesario emplear técnicas eficientes que permitan obtener soluciones de mejor calidad que las obtenidas a partir del uso de una metodología independiente.
- El modelamiento de auto-transformadores trifásicos y estos mismos utilizados como reguladores de tensión se puede realizar a partir de modelos de transformadores convencionales, obteniéndose una *Ybus* o en forma circuital.

## Referencias bibliográficas

- [1] Safigianni and Salis, G. (May 2000). "Optimum Voltaje Regulator Placement in a Radial Power, Distribution Network". *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.15 (2), pp. 879-886.
- [2] Souza, B., Almeida, A., Alves, H., Cavalcanti, C. (Noviembre de 1985). "Localizacao e Ajustes Ótimos de Bancos de Reguladores Automáticos em Redes de Distribuicao Utilizando Algoritmos Genéticos, PartI11: The Numerical Results". *IEEE Trans. On PAS*, Vol. 104 (11), pp. 3278-3283.
- [3] Kersting, William H. (2000). *Distribution System Modeling and Analysis*. CRC Press LLC. New York.
- [4] Kagan, N., De Oliveira, C. C. B., Méffe, A. *Alocação de Bancos de Capacitores e reguladores de tensão em redes de distribuição*. University of São Paulo. Brazil. Department of Electrical Engineering.
- [5] Grainger, J. J. and Cinvalar S.(Noviembre de 1985). "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltaje Regulators, Part I: The Overall Problem". *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 104 (11), pp. 3278-3283.
- [6] Grainger, J. J. and Cinvalar S.(Noviembre de 1985). "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltaje Regulators, Part II: The Solution Method". *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 104 (11), pp. 3278-3283.
- [7] Aarts, E., Korst, J. (1990). *Simulated Annealing and Boltzmann Machines*. John Wiley & Sons, New York.
- [8] Ruiz, A., Granada, M., Gallego, R. A. (2004). *Flujo de carga trifásico para sistemas radiales de distribución*. Scientia et Technique. V.23, Pereira.
- [9] Glamocanin, V. and Filipovic, V. (Oct. 1993). "Open Loop Distribution System Design". *IEEE Trans, Power Delivery*, Vol. 8 (4), pp 1900-1906.
- [10] Gallego, R., Monticelli, A. and Romero, R. (2001). "Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16 (4).
- [11] Baran, M. E., WU, F. F. (January 1989). "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution System". *IEEE Transaction on Power Delivery*. Vol. (1), pp 725-734.
- [12] Cinvalar, S. and Grainger, J. J. (November 1985). "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and voltaje Regulators, PartIII: The Numerical Results". *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 104 (11), pp. 3278-3283.
- [13] Fusco, G. and Russo, M.. (October 2006). "System Modeling for Nodal Voltage Regulator Design". *Advances in Industrial Control*, Springer London, Vol. 3 (2), pp. 11-25.
- [14] Tamai, Y., Srianthumrong, S., Akagi, H.(August 2005). *Comparisons between a Hybrid Shunt Active Filter and a Pure Shunt Active Filter*: Tokyo Institute of Technology, Japan, Vol. 153 (2) , pp. 61-70.
- [15] Ghose, T., Goswami, S. K., Basu, S. K. (April 1999). "Solving Capacitor Placement Problems in Distribution Systems Using Genetic Algorithms". *Electric Machines & Power Systems*, Vol. 27 (4), Taylor & Francis, pp. 429-441.
- [16] Granada, M., Gallego, R. A., Ríos, C. A. (2006). "Planeamiento de condensadores en sistemas de distribución usando entrenamiento neuronal". *Revista Tecnura*, Universidad Distrital, Vol. 9 (18), pp. 47-56.
- [17] Granada, M., Gallego, R. A., Peñuela, C. A. (2006). "Optimal Capacitor Placement and Sizing using ANT Colony System". *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, Vol. 2 (8), Universidad de Pamplona, pp. 61-67.
- [18] Granada, M., Gallego, R. A., Escobar Z. A. H. (2006). "Reducción de pérdidas técnicas usando medidas correctivas por etapas - Fase I". *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, Vol. 1 (7), pp. 70-77, Universidad de Pamplona.