



APLICACIONES INDUSTRIALES

EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL CAMBIO DE CALIBRE DE LOS CONDUCTORES

Raúl Carvajal Pérez
Michel Zamora Arocha

Resumen/ Abstract

El presente trabajo brinda algunos criterios técnico- económicos para la evaluación de la mejora Cambio de Calibre de Conductores en circuitos de distribución. Se desarrollan cuatro criterios económicos: Valor Presente Neto (VPN), Razón Beneficio Costo (RBC), Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Método de los Costos Anuales. Esta mejora puede ser evaluada por cualquiera de los cuatro métodos con resultados similares desde el punto de vista cualitativo y se comprueba mediante un ejemplo. Además se presenta un software elaborado por los autores que permite evaluar económicamente la mejora Cambio de Calibre de Conductores en circuitos de distribución primaria por el Método de los Costos Anuales.

Palabras Claves – Distribución, Cambio de Calibre, Evaluación Económica, Mejoras.

This research paper approaches some technical and economic assessment criteria for the improvement: Conductors Optimization in distribution networks. It also comprises four economic criteria: Net Present Value, Cost – Benefit Analysis, Rate of Yield and the Method of Annual Costs. The above mentioned improvement can be assessed by any of these four methods and the same result will be obtained from a qualitative standpoint. This is proved by means of an example. A software developed by the authors is also been included. It allows to economically assess this improvement in primary distribution networks through the Method of Annual Costs.

Keywords – Distribution, Conductors Optimization, Economic Assessment, Improvements.

I. INTRODUCCIÓN

En los estudios de circuitos de distribución primaria y secundaria se evalúan varias mejoras; estas se clasifican en organizativas y técnicas según requieran de la realización o no de inversiones para su ejecución. Entre las mejoras técnicas se encuentra el cambio de calibre de los conductores que en muchas ocasiones es efectiva desde el punto de vista técnico y económico si se realiza con los calibres adecuados y se escogen los tramos del circuito para hacer el cambio de calibre de mayor efectividad. Es necesario realizar la evaluación de la demanda con la menor incertidumbre posible y utilizar métodos de evaluación correctos.

Los objetivos de este trabajo son: *“brindar criterios técnico-económicos para la evaluación de la mejora cambio de calibre de los conductores en los circuitos de distribución primaria y secundaria teniendo en cuenta el crecimiento de las cargas”* y *“presentar un software realizado en Borland Delphi que contiene una interfaz muy amigable y funciones que permiten evaluar económicamente la mejora cambio de calibre en cualquier circuito de distribución primaria por el Método de los Costos Anuales”*.

II. DESARROLLO

Los estudios de los circuitos de distribución se realizan para un período de vida útil de las mejoras de T_a años. Se considera que las cargas tendrán una razón de crecimiento natural o vegetativo r_v y con la información que puede brindar el organismo de planificación regional es posible conocer las nuevas cargas que se incorporen al circuito y el lugar donde serán ubicadas; estas se asocian a un nodo existente o de nueva incorporación al circuito. El criterio que se sigue es el de estimar la demanda a partir del método de crecimiento vegetativo como:

$$\text{Demanda}(t) = (1 + r_v) * \text{Demanda}(t-1) + \text{DemandaNueva}(t); \quad t=1, \dots, T_a$$

Si la información es correcta, la demanda en cada año tendrá bajo nivel de incertidumbre y servirá para la toma de decisiones sobre las mejoras que se evalúan en el estudio.

COSTOS DE INVERSIÓN Y REPRODUCCIÓN

El cambio de calibre de los conductores como tal, sólo requiere de inversiones en la compra de los nuevos conductores, pago de las labores de desmontaje y montaje y los costos por los daños causados por la energía dejada de servir durante la ejecución de la tarea. Esta última no se tendrá en cuenta en este trabajo. Los costos de desmontaje y montaje son realizados por brigadas con vehículos apropiados y de acuerdo a las normas existentes tendrán una magnitud:

$$K_{fijo} = K_{brigada} + K_{vehículos} \quad [\$/\text{km}]$$

Donde

K_{fijo} : Costos de montaje y desmontaje

$K_{brigada}$: Costos de los cargos de la brigada

$K_{vehículos}$: Costos de transportación según el tipo de vehículo

El costo de inversión de la mejora será:

$$K_{calibre}(j) = (K_{cond}(j) + K_{fijo}) * \text{Longitud} \quad [\$]$$

Donde

$K_{calibre}(j)$: Costo de la mejora para el Calibre(j) [\$]

$K_{cond}(j)$: Costo de los conductores [\$/km]

Longitud : Total de km de conductores a montar [km]

La reproducción simple o amortización se puede calcular por el método de amortización lineal y si se desprecia el valor de liquidación del conductor que se retira, se puede expresar simplemente como:

$$K_{\text{amortización}}(j) = K_{\text{calibre}}(j) * N_{\text{al}} \quad [\$ / a]$$

Donde

$K_{\text{amortización}}(j)$: Costo de amortización $[\$/a]$

N_{al} : Norma de amortización de los conductores $[1/a]$

Este costo de amortización es fijo para todos los años del periodo.

Si se utiliza el método de los Costos Anuales, se puede considerar una tasa de descuento ramal para la reproducción ampliada E_n $[1/a]$ y tener en cuenta el valor $E_n * K_{\text{calibre}}(j)$ en $[\$/a]$ como parte de los costos anuales fijos de la inversión

2.1. CRITERIO TÉCNICO

Para que la mejora sea efectiva debe cumplir con la restricción de caída de voltaje máxima tolerable al peor nodo del circuito según las normas de la empresa. Sea la matriz incidencia $A = \{a_{ij}\}$ una matriz cuadrada y sean $a_{ij} = (0,1)$ los coeficientes de la matriz de forma tal que $a_{ij} = 1$ si y solo si el nodo i se encuentra en la trayectoria de flujo desde la subestación al nodo j . Si se toma para la evaluación el criterio aproximado

$$\Delta U(i, t) = [R(i) * Pr(i, t) + X(i) * Qr(i, t)] * L(i) / (U_l);$$

$$\text{Para } i = 1, 2, \dots, N; \quad t = 1, 2, \dots, T_a$$

Donde:

$Pr(i, t)$: Potencia activa que circula por el tramo al nodo i

$Qr(i, t)$: Potencia reactiva que circula por el tramo al nodo i

$R(i)$, $X(i)$: Resistencia y reactancia del tramo al nodo i

$L(i)$: Longitud del tramo al nodo i

U_l : Voltaje del circuito

N : Número de nodos

T_a : Vida útil del proyecto $[a]$

Las potencias activa y reactiva que circulan por cada tramo se obtienen a partir del producto de la matriz incidencia por la matriz de las potencias activa y reactiva de demanda en cada nodo respectivamente:

$$Pr(i, t) = \sum_{j=1}^N a_{ij} * Pd(j, t) \quad [kW]$$

$$Qr(i, t) = \sum_{j=1}^N a_{ij} * Qd(j, t) \quad [kvar]$$

Transponiendo la matriz incidencia se puede obtener la caída de voltaje total a cada nodo del circuito. La misma está dada por la expresión:

$$\Delta U_{T(i, t)} = \sum_{j=1}^N a_{ij}^t * \Delta U(j, t) \quad [V]$$

Donde:

a_{ij}^t : Elementos de la matriz incidencia transpuesta

2.2. CRITERIOS ECONÓMICOS

Para la selección del calibre de los conductores se pueden seguir cuatro criterios económicos:

- Valor Presente Neto (VPN)
- Razón Beneficio Costo (RBC)
- Tasa Interna de Retorno (TIR) o Tasa de Rentabilidad
- Costos Anuales (Canual).

Para desarrollar los tres primeros criterios se deben identificar los elementos que representarán los Beneficios, los Costos y elegir el método de cálculo de cada uno de ellos. Los Beneficios estarán dados por la disminución de los costos debidos a las pérdidas de po-

tencia y energía y los Costos están compuestos por la inversión y reproducción simple o amortización lineal.

El beneficio en cada año para cada calibre en el tramo al nodo i será:

$$\text{Ben}(i,j,t) = K * (R_v(i) - R_n(j)) * L(i) * 10^{-3} * (Pr(i,t)^2 + Qr(i,t)^2) / U^2 * (C_p * T_e + K_{sen})$$

Para $i=1,2,...,N$; $j=1,2,...,NC$; $t=1,2,...,T_a$

Donde

$R_v(i)$ – Resistencia del calibre actual en el tramo al nodo i

(Ω/km)

$R_n(j)$ - Resistencia del conductor calibre(j) (W/km)

K : Constante que depende del tipo de tramo del circuito

C_p : Costo del kWh de las pérdidas de energía

T_e : Tiempo equivalente

K_{sen} : Costo del sistema eléctrico de potencia

NC : Número de calibres a evaluar

Para evaluar los beneficios y costos totales, si la inversión se realiza en un año n del período igual o diferente en cada tramo i del circuito. Los beneficios y costos comienzan a tener valor a partir de ese año.

Beneficios:

T_a

$$B(j,i,t) = \sum_{t=n}^{T_a} (\text{Beneficio}(j,i,t) / (1+r)^t)$$

Costos:

$$K(j,i,t) = K_{\text{calibre}}(j,i) / (1+r)^n + \sum_{t=n}^{T_a} (K_{\text{amortización}}(j,i) / (1+r)^t)$$

Donde

r : Tasa de descuento

Con esta información es posible aplicar cualesquiera de los tres primeros métodos.

El Valor Presente Neto en cada tramo del circuito se busca para el calibre que lo maximice por realizar la inversión en el año que produzca mayor acumulación de beneficios netos totales; es decir, se busca $\text{CalSel}(i)$ y $\text{AñoSel}(i)$ que brinde el mayor valor de:

$$\text{VPN}(\text{CalSel}(i), i, \text{AñoSel}(i)) = \text{Max}(B(j,i,t) - K(j,i,t)) > 0$$

De igual forma y con los mismos elementos se calcula la Razón Beneficio Costo

$$\text{RBC}(\text{CalSel}(i), i, \text{AñoSel}(i)) = \text{Max}(B(j,i,t) / K(j,i,t)) > 1$$

Para calcular la Tasa de Rentabilidad (TIR), se recomienda repetir el cálculo del VPN para el calibre seleccionado con el valor de la tasa de descuento r y si el VPN es mayor que cero, comenzar a aumentar esta por un proceso iterativo hasta que el VPN se encuentre en un entorno de Cero (0).

En los cálculos anteriores, generalmente, se tiene como resultado que en la mayoría de los tramos no es económico cambiar calibre. En aquellos donde resulta efectiva la mejora, no en todos, se selecciona el mismo calibre y año; es decir, el resultado teórico es heterogéneo y hay que ir a un proceso de normalización: El criterio práctico que se sugiere es el siguiente:

- Se evalúan todos los tramos seleccionados en el proceso inicial
- Se escoge un solo calibre para todos los tramos y el año de ejecución de la inversión que de conjunto resulte con VPN o RBC mayor; es decir:

Si Calibre(j_1); $j_1 = 1, \dots, NC1$ son los calibres seleccionados en los diferentes tramos y Nodo(k); $k = 1, \dots, N$ son los tramos que resultaron efectivos

Se determina el valor de t y de j_1 :

$t = 1, \dots, Ta$; $j_1 = 1, \dots, NC1$ que cumpla la condición

$$\text{Max} \left(\sum_{i=1}^N (B(j_1, i, t) - \text{Costo}(j_1, i, t)) \right)$$

obteniendo así el calibre que debe instalarse, los tramos donde se debe instalar y el año de ejecución de la inversión.

Para aplicar el Método de los Costos Anuales debe tenerse en cuenta que la tasa de interés del capital normada tiene un valor fijado por el banco; cualquier capital que se invierta en un proyecto no puede ignorar este valor. Si el capital es tomado para la inversión en una instalación, este deja de reproducirse y se puede decir que la instalación tiene un costo adicional a su costo propio igual o mayor al valor de reproducción que tendría si permaneciera en la situación que tenía cuando fue tomado para realizar la inversión.

Este método plantea que el costo anual adicional debido a la salida del capital para realizar el proyecto será:

$$K_{\text{reprod}} = E_n * K_i \quad (\$/a)$$

Donde

E_n : Norma de reproducción fijada [1/a]

K_i : Costo de inversión del proyecto [\$]

Este costo junto a los Costos propios de la instalación deben formar parte de los Costos anuales del proyecto. De aquí que el método de los Costos anuales plantea que :

$$K_{\text{anual Proyecto}} = K_{\text{propio Proyecto}} + K_{\text{reprod}} \quad (\$/a)$$

Los Costos propios del proyecto vienen igualmente dados por los costos de inversión y amortización.

El Método de los Costos Anuales sigue el mismo criterio práctico de escoger un solo calibre para todos los tramos y se selecciona aquel que minimice los costos anuales totales.

En este método también se determina el valor de t y de j_1 : $t = 1, \dots, Ta$; $j_1 = 1, \dots, NC1$; pero en este caso que cumpla la condición

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^N K_{\text{anual Proyecto}}(j_1, i, t) \right)$$

En el siguiente ejemplo se hace una evaluación económica por los cuatro métodos estudiados:

Ejemplo:

Un circuito tiene una demanda de 800 kW y un crecimiento del 2 %. Deben entrar 2 nuevas cargas con 50 y 100 kW en los años 4 y 8. Considere 10 años de vida útil y diga si se justifica pasar de calibre Cu6 actual a calibre Cu2.

Datos generales:

$R_6 = 3.56 \text{ ohm/km}$

$R_2 = 1.41 \text{ ohm/km}$

$K_{i2} = 15000 \text{ $/km}$

$r = 0.1$ (Tasa de descuento)

$Ta = 10$ (Vida útil)

$Te = 4000 \text{ h/a}$

$C_p = 0.07$

$Na = 0.06 \text{ 1/a}$ (Norma de amortización)

$K_{sen} = 80$

$L = 4.5 \text{ km}$

$Ul = 13.2 \text{ kV}$

Solución:

En la tabla 1 se muestra el pronóstico de demanda del circuito. Notar que las cargas nuevas entran en los años 4 y 8

Año	CrecVeget	DemNueva	Pronóstico
0	800.00		800.00
1	816.00		816.00
2	832.32		832.32
3	848.97		848.97
4	865.95	50.00	915.95
5	934.26		934.26
6	952.95		952.95
7	972.01		972.01
8	991.45	100.00	1,091.45
9	1,113.28		1,113.28
10	1,135.54		1,135.54

Tabla 1. Pronóstico de demanda

Los Beneficios estarán dados por la disminución del costo de las pérdidas al cambiar de calibre Cu6 a calibre Cu2. Suponiendo que todos los tramos del circuito son trifásicos:

$$\text{Beneficios} = (R6 - R2) * L * 10^{-3} / U1^2 * \text{Dem}^2 * (Cp * Te + Ksen)$$

Como el factor que decide la variación de los beneficios en el transcurso de la vida útil es la demanda, se puede sacar el resto como una constante **A** para facilitar los cálculos:

$$A = (R6 - R2) * L * 10^{-3} / U1^2 * (Cp * Te + Ksen)$$

Sustituyendo se obtiene que $A = 0.019989669$

Los costos de inversión y amortización serían respectivamente:

$$K_{inv} = K_i * L = 67500 \text{ [\$]}$$

$$K_a = K_i * L * Na = 4050 \text{ [$/a]}$$

El costo de inversión se tendría en cuenta solamente en el año en que se realiza la inversión y el costo de amortización durante toda la vida útil del proyecto.

Aplicando el primer método se puede comprobar que se justifica el cambio de calibre ya que para los 10 años de vida útil el VPN es igual a \$24 507.51.

Si se aplica el segundo método también se comprueba que se justifica el cambio ya que la RBC es igual a 1.254.

Se puede comprobar además que para una TIR de un 10 %, es decir, haciendo igual la TIR a la tasa bancaria (r), el capital se reembolsa en un tiempo menor que la

vida útil del proyecto, por lo que se deduce que: $TIR > r$. Con esto es suficiente para afirmar que se justifica el cambio de calibre.

Si se desea calcular la TIR se debe ir aumentando la tasa de descuento siguiendo un proceso iterativo hasta que el VPN sea aproximadamente igual a cero.

Como resultado se obtiene que con un TIR de 17.5 % anual se reembolsa el capital en los 10 años de vida útil y se gana en intereses mas de \$80,000 para crecimiento que permite hacer nuevas inversiones.

Si se aplica el Método de los Costos Anuales se debe tener en cuenta que los costos del calibre Cu6 están dados solamente por el costo de las pérdidas, mientras que los costos anuales para el nuevo calibre Cu2 están dados por el costo de las pérdidas y por el costo de reproducción:

$$\text{Canual (Cu6)} = K? P (\text{Cu6})$$

$$\text{Canual (Cu2)} = K_{reprod} (\text{Cu2}) + K? P (\text{Cu2})$$

Donde

$K?P$: Costo de las Pérdidas y se calcula de la siguiente forma:

$$K?P = R * L * 10^{-3} * \text{Dem}^2 / (U1)^2 * (Cp * Te + Ksen)$$

La Tabla 2 muestra el resultado de la evaluación económica siguiendo el método de los costos anuales.

Año	FacDes (1+r) ^t	Dem	Afectados por el Factor de Descuento		
			KΔP (Cu6)	KΔP (Cu2)	(En+Na)*ki (Cu2)
0	1	800.00	21,183.47	8,390.08	12,487.50
1	1.1	816.00	20,035.71	7,935.49	11,352.27
2	1.21	832.32	18,950.14	7,505.53	10,320.25
3	1.331	848.97	17,923.39	7,098.87	9,382.04
4	1.4641	915.95	18,966.44	7,511.99	8,529.13
5	1.61051	934.26	17,938.81	7,104.98	7,753.76
6	1.771561	952.95	16,966.85	6,720.02	7,048.87
7	1.948717	972.01	16,047.55	6,355.91	6,408.06
8	2.143589	1,091.45	18,394.27	7,285.37	5,825.51
9	2.357948	1,113.28	17,397.64	6,890.64	5,295.92
10	2.593742	1,135.54	16,455.00	6,517.29	4,814.47
		Canual (Cu6)	200,259.28	79,316.18	89,217.78
				Canual (Cu2)	168,533.96

Tabla 2. Aplicación del Método de los Costos Anuales

Como se puede observar, siguiendo este criterio también se justifica el cambio de calibre de Cu6 a Cu2 y la diferencia entre los costos anuales de ambos calibres en los 10 años de vida útil del proyecto es de 18.82 % a favor del calibre Cu2.

2.1. SOFTWARE PARA EVALUAR LA MEJORA CAMBIO DE CALIBRE EN CIRCUITOS DE DISTRIBUCIÓN PRIMARIA

El programa que se presenta fue elaborado por los autores y aún se encuentra en la fase de desarrollo. El mismo contiene una interfaz muy amigable y funciones que permiten evaluar económicamente la mejora cambio de calibre teniendo en cuenta el criterio de los costos anuales.

En la Figura 2.3.1 se muestra un circuito de 76 nodos, el cual fue objeto de estudio para validar el sistema de cálculo.

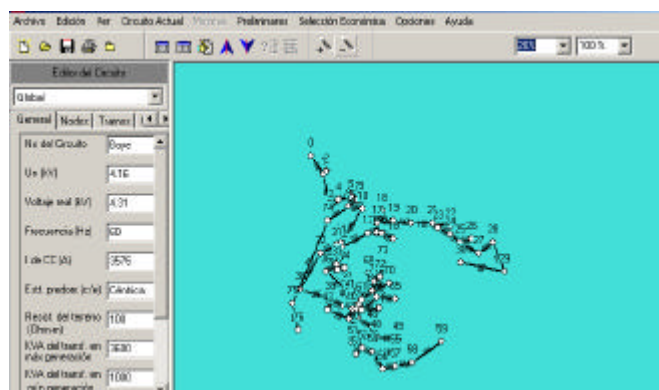


Figura 2.3.1. Circuito de 76 nodos

Para su ejecución en el menú “Mejoras” se debe hacer clic sobre la opción “Optimizar Calibre” y seguidamente se mostrará una ventana donde aparecerán tres páginas con sus respectivas solapas para pasar de una a otra (Figura 2.3.2). En la página de entrada de datos aparecerán todos los calibres existentes en la tabla de conductores, para que el usuario escoja aquellos que no se encuentran disponibles en su almacén. Además,

se tiene la ventaja de que se muestran todos los tramos del circuito que está siendo analizado para que decida cuáles no quiere evaluar



Figura 2.3.2. Ventana de Entrada de Datos

Después que se hayan seleccionado los calibres que no se encuentren en el almacén y los tramos en los que no se quiere ejecutar la mejora, se puede pasar a la página de resultados presionando sobre el botón «Aceptar» o simplemente pulsando sobre la solapa «Resultados».

En esta página el usuario tiene la opción de ver los resultados generales o por calibres que hayan sido económicos en el cálculo. El programa por defecto muestra los resultados generales (Figura 2.3.3).

Tramo	Conductor Nuevo	Conductor Viejo	% de Pérdida
8-1	Cu3/0	Cu1/0	8.277
1-2	Cu3/0	Cu1/0	8.398
3-4	Cu3/0	Cu1/0	8.128
4-5	Cu3/0	Cu1/0	8.115
5-7	Cu3/0	Cu1/0	8.676
7-9	Cu3/0	Cu1/0	8.088
9-10	Cu3/0	Cu0	8.678

Figura 2.3.3. Ventana de Resultados Generales

A través de la pequeña ventana (parte superior izquierda) se puede pasar a los resultados individuales para cada calibre que haya dado económico en el cálculo (Figura 2.3.4).

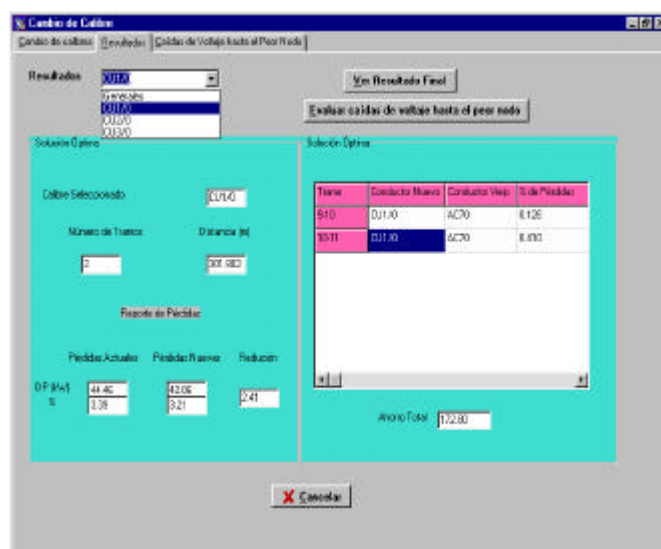


Fig. 2.3.4. Resultados por calibre

Además, mediante un botón se puede ver el resultado final, donde se le indica cual es el mejor calibre para realizar la inversión (Figura 2.3.5).

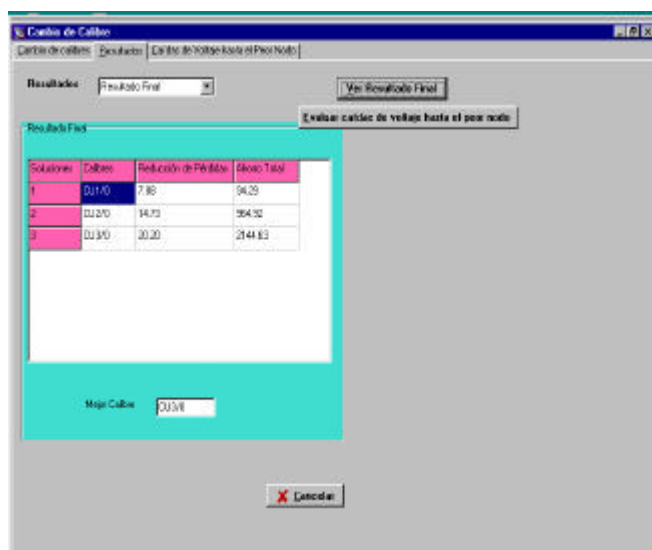


Figura 2.3.5. Ventana de Resultado Final

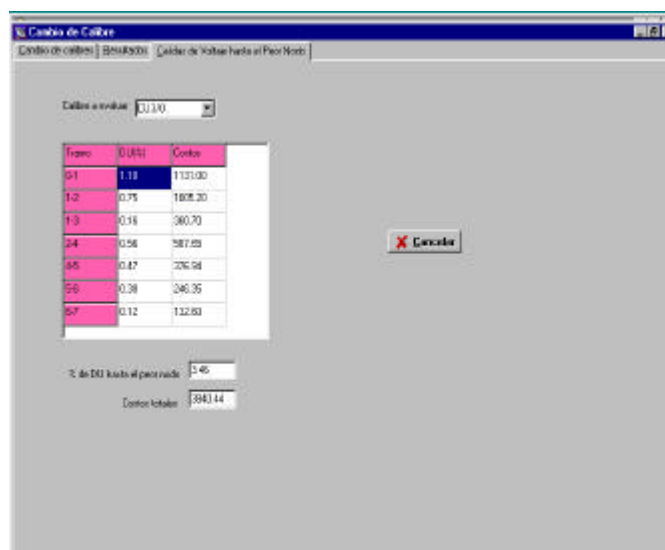


Figura 2.3.6. Caídas de Voltaje hasta el Peor Nodo

Mediante el botón “Evaluar caídas de voltaje hasta el peor nodo” o pulsando sobre la solapa “Caídas de voltaje hasta el peor nodo” se puede acceder a la tercera y última página, donde aparecerán los resultados del cambio de calibre para que la caída de voltaje hasta el peor nodo sea menor que la normada por la O.B.E. (Figura 2.3.6).

III. CONCLUSIONES

- 1.- La mejora Cambio de calibre de los conductores puede ser evaluada por cualquiera de los métodos enunciados en este trabajo con resultados similares desde el punto de vista cualitativo.
- 2.- Es muy importante contar con información fiable sobre el crecimiento de las cargas para que estos resultados sean aplicables.
- 3.- La evaluación económica del cambio de calibre se realiza de forma individual por tramos pero es necesario un proceso final de normalización para definir calibre uniforme para todos los tramos y año de ejecución de la inversión que también se desarrolla por los mismos métodos enunciados antes.
- 4.- A modo de recomendación continuar con el desarrollo del software para que permita la evaluación económica de esta mejora por cualquiera de los cuatro métodos expuestos en este trabajo.

AUTORES:**Raúl Carvajal Pérez**

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (ISPJAE), Ciudad de La Habana.

e-mail: rncp@cipel.cujae.edu.cu

Michel Zamora Arocha

Ingeniero Electricista, Profesor Instructor, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (ISPJAE), Ciudad de La Habana.

e-mail: mzamora03@cipel.cujae.edu.cu