Conductores de Líneas Eléctricas. Estudio de costes

Determinación de la magnitud más económica y de la relación óptima entre las magnitudes de una serie normalizada.

Por Francisco CASARIEGO, I. I.

GENERALIDADES

Cuando se trata de determinar la sección más económica de una línea eléctrica, o el diámetro de la tubería de una central hidráulica, o la potencia de una máquina, o el grado de robustez de una construcción, es decir, la **magnitud** de algo cuyo coste total se compone de dos sumandos, el coste de establecimiento y el coste de explotación, que varían inversamente, se suele plantear el problema suponiendo constante la intensidad que ha de circular por la línea, el caudal que ha de pasar por la tubería, el trabajo que ha de realizar la máquina, etc., es decir, la necesidad a cubrir, o sea el **servicio**, y variando entonces la sección de los conductores de la línea, el diámetro de la tubería, etc., es decir la **magnitud**, se llega a determinar el valor de ésta que hace mínimo el coste total.

Este sistema, que es el más usual y en el que están basadas fórmulas tan clásicas como la de Lord Kelvin, la de Bondschu, la de Scott y otras, aunque permite determinar la **magnitud**, sección, diámetro, etc., más económica, <u>no es el método más correcto ya que en él se toma como constante el **servicio**, que en general crece con el tiempo, y como variable la **magnitud** de la cosa, la cual sin duda será constante una vez elegida</u>.

Este método sirve indudablemente para calcular la **magnitud** más económica para realizar el **servicio** previsto, pero no nos permite conocer lo que sucederá cuando ese **servicio** varíe.

Si nos fijamos además, en que al plantear cualquier problema nos vemos obligados a *estimar* coeficientes que oscilan entre amplios márgenes y cuyos valores reales no podemos conocer *a priori*, comprenderemos que todos los procedimientos de cálculo como el descrito, que nos dan como resultado *un solo número*, no son buenos procedimientos. Y, sobre todo, si son también como éste, susceptibles de resolverse matemáticamente, ya que en la mayoría de los casos, <u>el calculista se olvida de las estimaciones y simplificaciones que hizo al plantear el problema y toma como inamovible el resultado final con todos sus decimales</u>.

LAS CURVAS DE COSTES ESPECIFICOS

Si en vez de operar de la manera indicada tomamos como *constantes* una serie de **magnitudes**, F1, F2, F3,... Fn, y establecemos para cada una de ellas la ecuación del coste total por unidad de **servicio** C1/I, C2/I, C3/I, ... Cn/I, o sea el coste específico en función del **servicio** I, obtendremos una serie de curvas que nos permiten ver el problema en toda su extensión.

MAGNITUD MAS ECONOMICA

Supongamos, para aclarar lo expuesto, que tratamos de determinar la línea eléctrica más económica para un transporte de energía determinado empleando el procedimiento clásico (usual), que es en el que considera fijo el **servicio**.

La **magnitud** de la línea vendrá dada por la sección de sus conductores, por la calidad de su aislamiento y por su capacidad para resistir las solicitaciones más desfavorables. Y su coste de establecimiento CF será mayor a medida que aumentemos estas características.

Sin embargo su coste de explotación VC será menor al aumentar aquéllas, pues las pérdidas de energía disminuyen cuando la sección de los conductores es mayor, y los gastos de mantenimiento serán también probablemente menores al dar más calidad a su aislamiento y mayor resistencia a sus estructuras de apoyo.

Estimando los precios de los componentes de las diferentes líneas: el precio del dinero invertido; el periodo de amortización; el precio medio de la energía de pérdidas; y la intensidad media cuadrática correspondiente al transporte previsto, podemos representar las curvas de los costes anuales de establecimiento FC (costes fijos), y de explotación VC (costes variables) en función de la sección Fn de los conductores de cada línea.

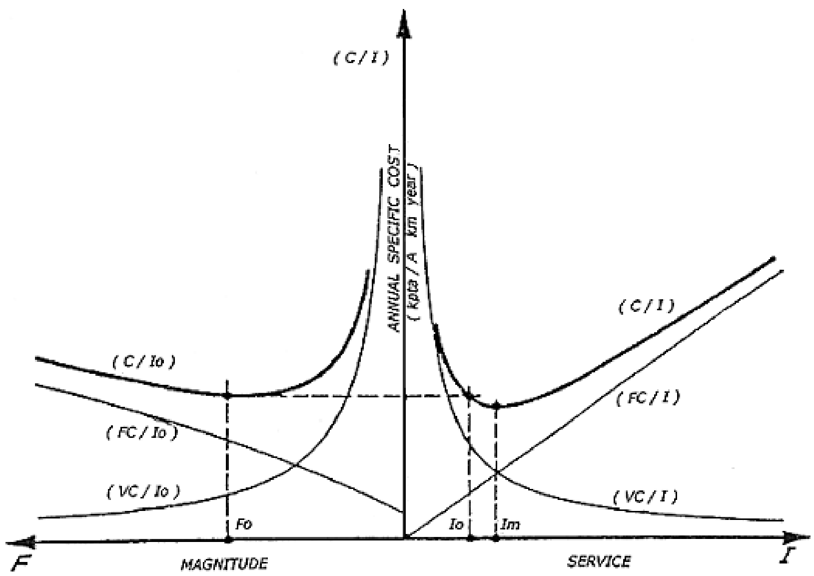

Figure 1

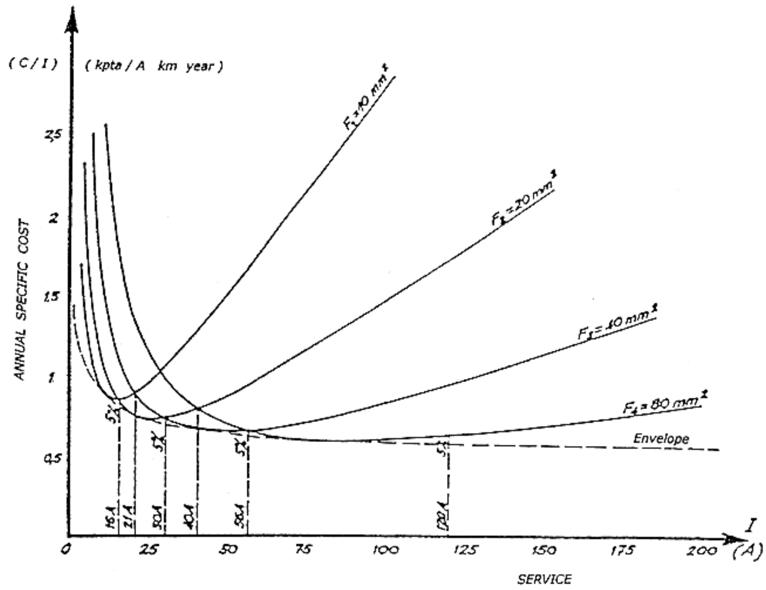

Figure 2

Estas curvas son análogas a las FC/Io y VC/Io (figura 1, lado izquierdo), ya que, como en este procedimiento se considera constante la intensidad media cuadrática Io, el dividir por este valor sólo supone un cambio de escala de ordenadas pero no altera la situación del valor mínimo de la función suma y, por lo tanto, del valor de la **magnitud** más económica.

Dicha curva de costes C/Io, tiene un mínimo para el valor Fo que es, por lo tanto, la **magnitud** de la sección más económica que resuelve el problema.

Si hacemos la representación de la curva de *coste específico* C/I correspondiente a la línea de sección de conductores Fo (figura 1, lado derecho), podremos observar que el mínimo de C/Io=f (F) no se corresponde con el mínimo de C/I, es decir que la línea más económica para una intensidad media cuadrática Io dada, tiene un funcionamiento más económico todavía con una intensidad mayor Im.

O, expresado de un modo más abstracto y general, la cosa de **magnitud** más económica para un **servicio** dado, da en general un resultado aún más económico cuando el **servicio** alcanza un cierto valor superior. Claro es que, lógicamente, para este valor superior del **servicio** existe otra cosa, de **magnitud** también superior, que da un resultado todavía más económico, y así sucesivamente.

Todo esto puede quizá quedar más claro observando que estas dos representaciones, la de la izquierda y la de la derecha, son las intersecciones de la *superficie* C/I=f (I, F) con los planos I=constante y F=constante. Y, naturalmente, los valores mínimos de esas dos intersecciones no tienen por qué coincidir.

La representación de la derecha, que es la que nosotros propugnamos, nos permite conocer el coste anual en función de la intensidad media cuadrática cualquiera que sea esta. Y si presuponemos una determinada ley de crecimiento, podemos analizar el resultado económico en un periodo determinado, y deducir, representando las curvas C/I=f (I) correspondientes a varias líneas de secciones diferentes, cual es la más económica durante ese periodo, que es el problema que generalmente se nos presenta.

RELACION OPTIMA ENTRE LAS MAGNITUDES DE UNA SERIE NORMALIZADA

Veamos ahora la aplicación de este sistema de costes específicos a la determinación de la relación que debe existir entre cada dos **magnitudes** consecutivas correspondientes a una serie normalizada.

En el ejemplo que estamos explicando, de secciones de conductores de líneas eléctricas trifásicas, la fórmula general del Coste Específico Anual de cada Línea, es:

<u>Cen = T x (Cn/I) x 0.01 + 3 x 8760 x 0.001 x R x P x (I/Fn)</u>

En la que las variables son:

Cen = **C / I** = Coste Específico Anual (kpta / A km año)

T = Anualidad de amortización, intereses y gastos (%)

Cn = Coste total de construcción de la línea n (kpta / km)

I = Intensidad media cuadrática por cada conductor (A)

R = Resistividad de los conductores (Ohm mm^2 / km)

P = Coste de la energía de pérdidas (pta / kWh)

Fn = Sección de cada conductor de la línea **n** (mm^2)

Y las constantes:

0.01, factor para pasar la anualidad de % a tanto por unidad

3, número de conductores de cada línea **Ln**

8760, las horas totales de un año

0.001, factor para pasar de Wh a kWh

Fijamos como menor sección, **F1** la mínima reglamentaria de **10** mm^2 , y como secciones sucesivas las de **20**, **40** y **80** mm^2, o sea, cuatro secciones en progresión geométrica de razón 2.

Los costes de construcción **Cn** de estas cuatro líneas los estimamos en:

38, **58**, **92** y **155** kpta / km respectivamente. (1963 !)

La anualidad **T** la fijamos en el **17**%

El precio medio **P** de la energía de pérdidas en **0.60** pta / kWh

Y la resistividad **R** del cobre, **17.8** Ohm mm^2 / km

Con estos datos se obtienen las curvas de la figura 2, a la vista de las cuales podemos deducir que hasta 16 A de intensidad media cuadrática, la línea más económica es la de 10 mm²; entre 16 y 30 A, la de 20 mm²; de 30 a 56 A, la de 40 mm², y desde 56 A en adelante, la de 80 mm² resulta ser más económica que las anteriores.

Posiblemente parezca extraño, pero la realidad es que con esta serie de sólo cuatro secciones, queda cubierto el campo de intensidades hasta 120 A, con incrementos máximos *teóricos* de coste, con relación a la envolvente de todas las curvas posibles, del 5% únicamente en los puntos correspondientes a 16, 30, 56 y 120 A (obsérvese la constancia del incremento al haber elegido una progresión geométrica).

¿Sería económico disminuir la razón de la progresión para reducir estos incrementos *teóricos*, disponiendo de un mayor número de secciones?

En un caso concreto, por ejemplo, el de una empresa distribuidora de energía eléctrica, no resultará difícil comparar el coste total que pueden acarrearle estos *aleatorios* incrementos, con el coste cierto de las inmovilizaciones necesarias para mantener un mayor número de secciones en sus almacenes.

Es muy posible que aún esta serie resulte menos económica que otra de mayor intervalo, por ejemplo de 10, 30 y 90 mm² (progresión de razón 3) o quizá de 10, 40 y 160 (de razón 4), con la cual, los incrementos *teóricos* máximos, con relación a la envolvente, serían del orden del 15%.

No debemos olvidar, además, que estas curvas se obtuvieron dando a cada uno de los coeficientes un valor numérico fijo más o menos próximo a su valor real.

Si en vez de hacerlo así hubiésemos partido de una lista de valores probables para cada coeficiente y fijando cada serie de estos haciendo todas las combinaciones posibles, cada curva tendría una infinidad de variantes y su representación gráfica sería equivalente a haberlas trazado con una brocha en vez de con un lápiz afilado.

Entonces, los puntos de intersección ya no serían tan precisos, ni los costes tampoco, y veríamos todavía más clara la inutilidad de disponer de muchas secciones.

Estudiando el caso de cables eléctricos subterráneos, se deduce la necesidad de un mayor intervalo en las series de secciones, ya que la disminución de su número por medio de una normalización a escala nacional, se traduciría en una indudable reducción de precios y en una disponibilidad que actualmente no existe.

¿No sería preferible que hubiese en los almacenes un reducido número de secciones en vez de haber tantas diferentes pero sólo en los catálogos?

CONCLUSIONES

De lo anteriormente expuesto se pueden sacar las siguientes conclusiones:

1) Cuando se trate de determinar la **magnitud** más económica de algo cuyos costes de establecimiento y de explotación varíen en sentido inverso, como es normal que suceda, debe analizarse el problema por medio de las curvas de costes

específicos, ya que este sistema permite conocer el resultado económico correspondiente a un periodo de tiempo cualquiera, aunque varíe la magnitud del **servicio** como casi siempre ocurre.

2) Con las curvas de *costes específicos* se puede determinar la relación que debe haber entre dos términos consecutivos de una serie de **magnitudes** de una normalización para obtener el máximo rendimiento económico.

3) Este intervalo más económico es, en general, mucho mayor de lo que a primera vista puede parecer. Y en particular, en una normalización de conductores de líneas eléctricas, puede asegurarse que la serie óptima de secciones deberá ser una progresión geométrica de razón 2 ó 3.

Francisco CASARIEGO
Doctor Ingeniero Industrial
Oviedo, Asturias
nigro@telecable.es