

# Software ABCD para análisis y simulación de líneas aéreas de transporte de energía eléctrica ante una curva de carga

David Nieto-Sandoval González-Nicolás

*Software ABCD for the analysis and simulation of overhead power transmission lines in the presence of a load curve*

## RESUMEN

Los parámetros característicos de las líneas aéreas de alta tensión dependen de factores constructivos, ambientales y de carga, que repercuten en los valores de regulación, potencia y, en definitiva, en la cantidad de energía que transportar, acondicionada por un marco legal que asegura la calidad del servicio. Como quiera que estos factores son variables a lo largo de la longitud de la línea, la herramienta informática ABCD se ha concebido para permitir al usuario realizar un análisis profundo de líneas aéreas trifásicas de transmisión de energía eléctrica. Este software de carácter académico y de libre distribución, desarrollado en C/C++ para plataformas Win32, presenta una interfaz con cuatro pestañas; dos de ellas de entrada de datos y dos de resultados en las que el usuario puede obtener los valores de los parámetros más característicos de la línea, así como la distribución de los valores de tensión, corriente y ángulo a lo largo de la longitud de la misma.

## ABSTRACT

*The characteristic parameters of overhead high-voltage power lines depend on constructional, environmental and load factors, which effect the values of regulation, output, and specifically the quantity of power transported, within the legal limitations which assure the quality of the service provided. Since these factors are variable over the length of the power line, the software tool ABCD has been conceived in order to permit the user to carry out an in depth analysis of triphasic overhead power transmission lines. This free software, which is academic in nature and developed in C/C++ for Win 32 platforms, displays an interface with 4 tabs; two of these for data entry, and two for results where the user can obtain the values of the most characteristic parameters of the power line, as well as the values of voltage, current and angle over the length of the power line.*

## Palabras clave

Software, alta tensión, líneas eléctricas, diseño, simulación.

## Keywords

*Software, high voltage, power lines, design, simulation*



Foto: Pictelia

Los parámetros de la línea aérea de alta tensión no solo dependen de la impedancia y admitancia que pueda presentar, sino que también depende de la longitud. Dos líneas de idénticas características constructivas pero de diferentes longitudes poseen parámetros distintos que repercuten en valores de caídas de tensión, pérdidas de potencia, tensión, corriente, etcétera distintas para unos mismos estados de carga.

Existe una amplia gama de programas informáticos dedicados al cálculo eléctrico de líneas de transporte, pero no se paran a realizar un análisis “interno” o a lo largo de la línea. Tras unos valores iniciales de potencia, tensión, datos topográficos y morfológicos se comienza el estudio de los parámetros considerándose constantes a lo largo del tiempo y la longitud de la línea.

Sin embargo, la energía en las líneas no es constante; existen curvas de carga que recogen el hecho que dependiendo de la estación, hora, lugar o hábitos de consumo, toman diversas geométricas.

También, en el caso de líneas muy largas o con cargas extremas podemos encontrar que las tensiones, corrientes u otros parámetros tomen valores máximos o mínimos respecto los terminales de conexión de la línea.

### Descripción de la interfaz

ABCD dispone de cuatro pestañas de las cuales las denominadas “características” y “curva de carga” son de entrada de datos.

En “características” (figura 1) vemos agrupados los datos de entrega en seis bloques. En los “datos eléctricos” elegimos el conductor (nomenclatura UNE-EN 50182:2001) y la tensión normalizada según el Real Decreto 223/2008. Las “características de los aisladores” pueden obviarse en caso de no conocer ni el número de aisladores por fase, ni las pérdidas unitarias por aislador; en este caso, se toma por defecto un valor de  $10^{-8}$  S/km. Los “datos del entorno” son los valores de altitud y temperatura media en la que la línea está enclavada, así como su longitud y coeficiente meteorológico (mt). “Datos estructurales” es la configuración del conductor pudiendo elegir entre simplex, dúplex, tríplex y cuádruplex, marcando la distancia entre conductores (d) en milímetros y tomando un coeficiente del conductor (mc) que ronda entre 0,83 y 0,87. En este bloque definimos la posición de las fases mediante un sistema de ejes cartesianos donde la referencia la tomamos en la parte superior del apoyo. Con las “unidades base” fijadas y los valores de “potencia de cortocircuito” concluimos la entrada de datos.

Todos estos datos se pueden guardar en un fichero de extensión \*.cel, para poder utilizarlos en otro momento.

En el apartado de “parámetros” (figura 2) visualizamos los valores característicos que va a tener nuestra línea según los datos de entrada de la pestaña anterior (características). Se calculan el valor del radio geométrico de la fase, la distancia geométrica del circuito, la inducción, la capacidad y la conductancia por fase. A partir de estos se computan los valores de resistencia, reactancia, conductancia y susceptancia por fase en unidades parciales y totales. Ya con los valores de impedancia y admitancia del modelo de la línea calculamos los parámetros A, B, C y D correspondientes.

Podemos ver los resultados en valores ingenieriles y por unidad. Si queremos ver los valores de impedancia y admitancia en formato módulo argumental, se debe hacer doble clic sobre la casilla. Si se realiza un nuevo doble clic volverá a la forma rectangular. Los parámetros de la línea vendrán influidos por el modelo elegido. Si cambiamos de modelo, podemos evaluar la diferencia existente reflejada en los parámetros.

También, se puede calcular el *efecto corona*, la perditancia y la conductancia asociada a dicho efecto en caso de producirse.

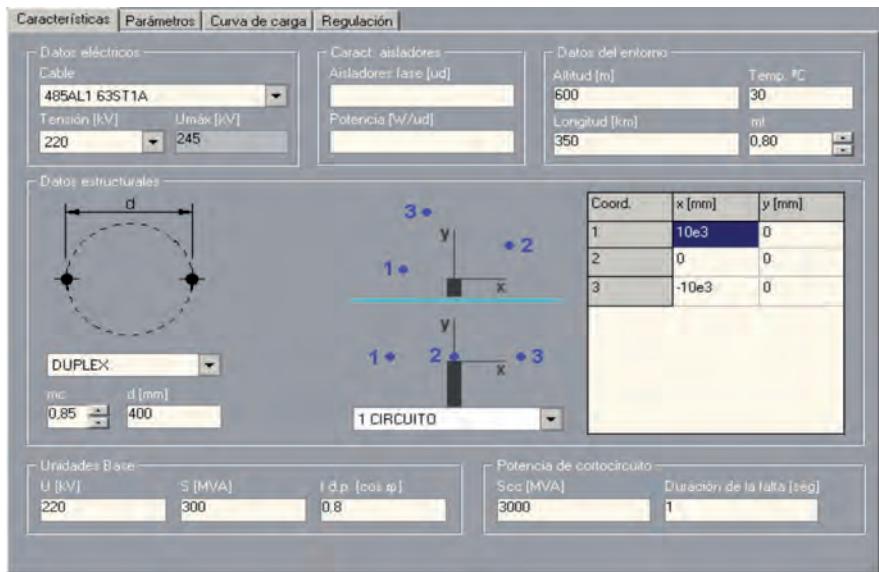


Figura 1. Pestaña características del programa ABCD 2.0

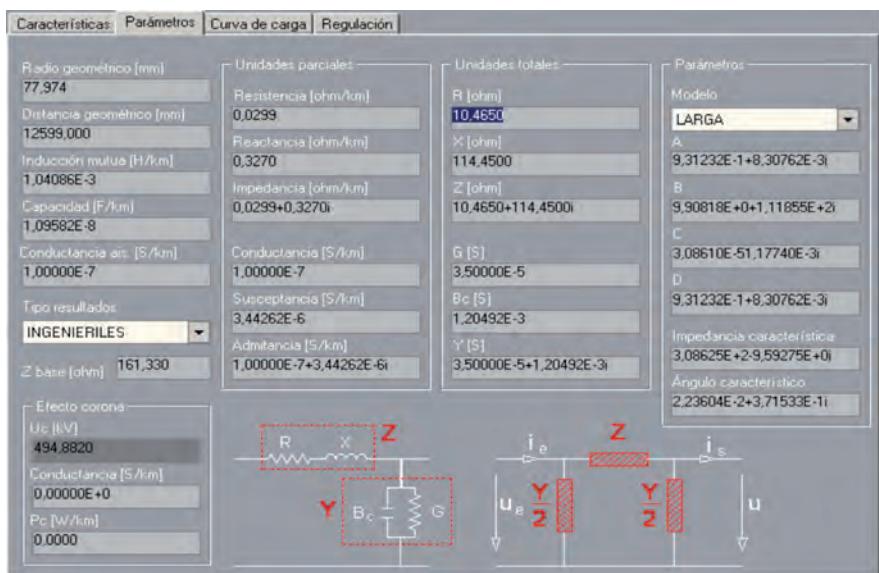
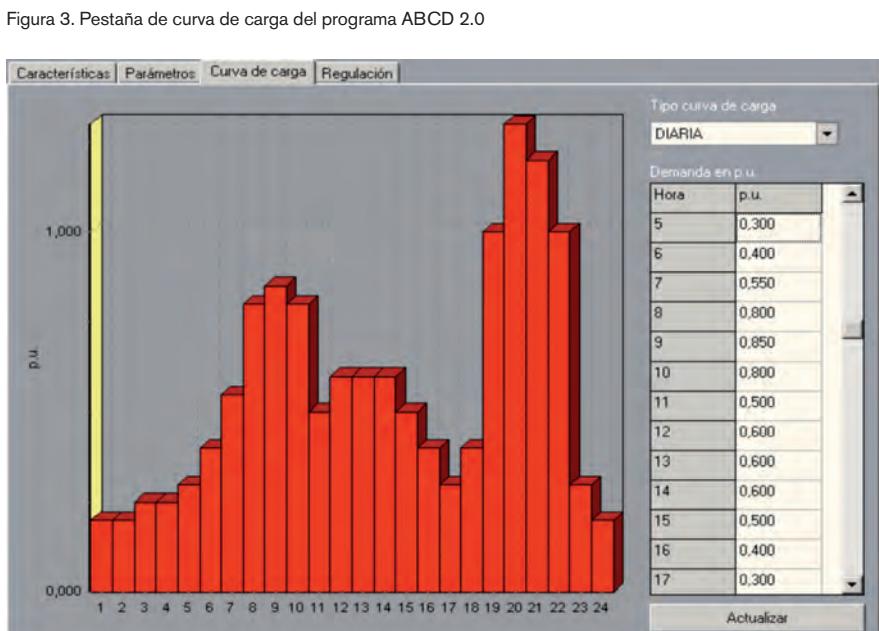


Figura 2. Pestaña de parámetros del programa ABCD 2.0



En esta pestaña podemos despreciar los efectos resistivos, inductivos, susceptivos o conductivos para el modelo de red elegido pulsando sobre el elemento correspondiente. Esta propiedad ayuda a comprender qué efectos despreciamos en los modelos de inferior longitud sobre uno de mayor longitud.

En la sección “curva de carga” (figura 3) podemos elegir entre cuatro períodos de tiempo. La curva diaria evalúa la demanda durante un día en escalas de 1 hora; la curva semanal evalúa la demanda durante una semana en escalas de 1 día, la mensual analiza la demanda durante un mes a lo largo de 30 días; la estacional, la demanda durante un año en cada una de las estaciones y la anual, la demanda durante un año en escalas de 1 mes.

Para indicar la demanda, marcaremos en valores por unidad (definida la base en la pestaña características), la magnitud requerida por el sistema en el momento dado.

Todos estos datos se pueden guardar en un fichero de extensión \*.cce, para poder utilizarlos posteriormente.

Ya en la última pestaña, de regulación (figura 4), vemos las magnitudes de las tensiones, corrientes y potencias de entrada y salida para cada uno de los períodos de la curva de carga asignada a la línea. En caso de no introducir ninguna curva de carga, simularemos la línea en las condiciones de vacío y carga elegida la de la base.

En la figura 5 se pueden ver los valores de tensión, corriente y ángulo para un instante de carga y a cualquier longitud de la línea. De esta manera, podemos ver cómo en algunos casos, por ejemplo, la tensión a 90 km de la entrada tiene un valor máximo de 227 kV. Esto es debido a los efectos capacitivos acumulados a lo largo de la línea.

En los bloques de regulación y de corrientes, se muestran los valores globales de la línea dada la longitud, carga y configuración definidas anteriormente. También muestra los valores de potencia de entrada (generación) y salida (demanda). Se puede definir otra demanda concreta incluyendo sus datos en el bloque de potencia saliente (demanda). En caso de definir una carga capacitativa, indicaremos un factor de potencia negativo para indicárselo al software.

### Desarrollo matemático

La solución exacta de cualquier línea de transmisión y la que se requiera con un alto grado de exactitud que calcular debe considerar el hecho de que los paráme-

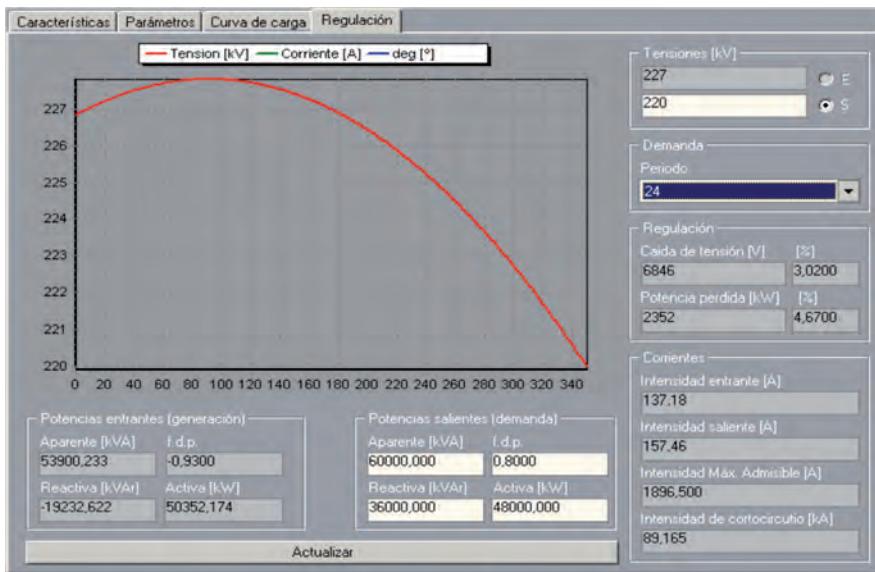


Figura 4. Pestaña de regulación del programa ABCD 2.0

etros de la línea están distribuidos. El desarrollo matemático deriva del estudio diferencial de la línea como la sucesión de elementos infinitesimales de impedancias y admitancias que recorren la longitud de línea (figura 6), verificándose

$$d\bar{V} = \bar{Z}_k \cdot \bar{I} dl \text{ y } d\bar{I} = \bar{Y}_k \cdot \bar{V} dl$$

La solución del sistema de ecuaciones diferenciales corresponde a la siguiente notación matricial, donde

$$\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}} \text{ y } \bar{Z}_e = \sqrt{\bar{Z} / \bar{Y}}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \bar{\gamma} & \bar{Z}_e \cdot \sinh \bar{\gamma} \\ \sinh \bar{\gamma} & \cosh \bar{\gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

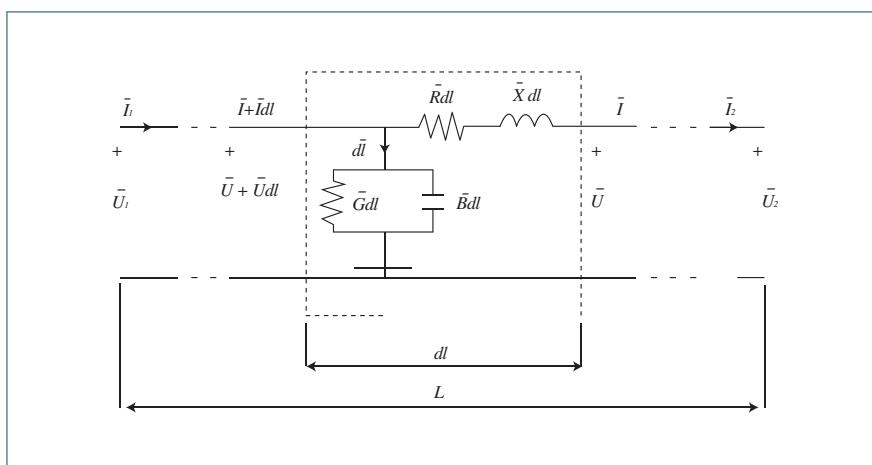
Desarrollando los anteriores modelos en series convergentes obtenemos los de

corta (líneas menores de 100 km), media (entre 100 y 200 km) y larga longitud (superiores a 200 km).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & \bar{Z} \\ \bar{Y} & 1 \end{bmatrix}_{\text{Corto}} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2} & \bar{Z} \\ \bar{Y} \left( 1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{4} \right) & 1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2} \end{bmatrix}_{\text{Media}} \\ &\rightarrow \begin{bmatrix} 1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2} & \bar{Z} \left( 1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{6} \right) \\ \bar{Y} \left( 1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{6} \right) & 1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2} \end{bmatrix}_{\text{Larga}} \end{aligned}$$

Los valores de  $\bar{A}$  e  $\bar{B}$  corresponden a los valores de  $\bar{Z}$  e  $\bar{Y}$  multiplicados por la distancia global de la línea. A esta matriz de parámetros A, B, C y D se le denomina también matriz de transmisión directa. Si subdividimos la línea en  $n$  elementos y concatenamos los resultados de cada

Figura 6. Monofásico equivalente de una línea de transmisión con parámetros distribuidos. / Fuente: "Sistemas de energía eléctrica" Fermín Barrero González, Thomson 2004



submatriz resultante comenzando por el extremo de la demanda (que es el dato del cual partimos), obtendremos los resultados de tensión y corriente para una longitud dada.

Simulamos en cierta manera el análisis diferencial en el que en vez de tener elementos diferenciales de la longitud de la línea, tenemos elementos de longitud igual a la global de la línea entre  $n$  particiones.

## Conclusiones

Con esta aplicación, no solo calculamos los parámetros, capacidad y caída de tensión de la línea; también podemos descubrir para un determinado momento de una curva de carga los valores de tensión, corriente o factor de potencia a una distancia del origen para así comprobar que la progresión de los parámetros son crecientes o decrecientes, o si en caso de existir algún máximo o mínimo entre los extremos poder debatir si los aislamientos en ese punto son los adecuados.

Mantenimiento preventivo, determinación de la eficiencia de la línea, valoración de puntos de conexión óptimos o estudios económicos detallados son otras posibilidades que plantea este software.

Esta herramienta se puede descargar desde el enlace: <http://www.abcdatos.com/programas/programa/v1065.html>

## Bibliografía

- Antonio Gómez Expósito. Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica. Mc Graw Hill. 2002.
- John J. Grainger y William D. Stevenson Jr. Análisis de sistemas de potencia. Mc. Graw Hill 1996.
- José Luis Tora Galván. Transporte de la energía eléctrica. UPCO 1997.
- Francisco Rodríguez Benito y Antonio Fayos Álvarez. El transporte de la energía eléctrica en alta tensión. UPV.
- Fermín Barrero González. Sistemas de energía eléctrica. Thomson 2004.
- Luis M. Checa. Líneas de transporte de energía. 3<sup>a</sup> ed., 1988.
- Gaudencio Zoppetti Júdez. Redes eléctricas de alta y baja tensión. 6<sup>a</sup> ed.
- Elías del Yerro Sánchez Monge. Apuntes de líneas aéreas de transporte y distribución de energía eléctrica. Madrid 1978.
- Prospectiva de generación eléctrica 2030. UNESA 2007.

---

**David Nieto-Sandoval González-Nicolás**  
david.nietosandoval@gmail.com  
Ingeniero técnico industrial. Actualmente está cursando el segundo ciclo de ingeniería industrial y compagina su formación con labores de investigación y desarrollo de software.