

SILVIA:

una herramienta de diseño de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad

El diseño de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad es una labor compleja, que requiere del uso de herramientas informáticas específicas. Este artículo presenta la herramienta SILVIA desarrollada por el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la E.T.S. de Ingeniería de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid para la Sociedad Española de Montajes Industriales (SEMI). La herramienta SILVIA permite realizar la mayor parte de los cálculos necesarios para el diseño de estas instalaciones.



Eduardo Pilo de la Fuente

Ingeniero Industrial del ICAI (1997). Investigador en formación del Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la E.T.S. de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas. De 1998 a 2000 trabajó en el desarrollo de la herramienta SILVIA. Está concluyendo su tesis doctoral titulada "Optimización de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad".



Luis Rouco Rodríguez

Dr. Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid (1990). Es Profesor Propio Ordinario y Director del Departamento de Electrotecnia y Sistemas de la E.T.S. de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas. Desarrolla sus actividades de investigación en el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT).



Agustín Hernández Velilla

Dr. Ingeniero del ICAI, es Director General de SEMI y Director Técnico del Proyecto de la Línea Aérea de Contacto del FF.CC. de Alta Velocidad Madrid-Lleida, dentro de la UTE EUROASCE.

Introducción

El desarrollo comercial de las líneas de trenes de alta velocidad comienza en Francia a principios de los años 80 con la inauguración de la línea París-Lyon (en 1981 fue inaugurado el primer tramo Lyon-St. Florentin y en 1983 fue abierto el tramo París-Lyon). A los desarrollos acontecidos en Francia, han seguido los de Alemania, Italia, Bélgica, etc. Desde mediados de los 90, la Unión Europea trabaja en el desarrollo de redes de transporte trans-europeas, lo que ha supuesto un importante impulso a la construcción en el entorno europeo de ferrocarriles de alta velocidad.

En España, en 1992 se inauguró la primera línea de alta velocidad española, Madrid-Sevilla. Desde entonces los proyectos y obras de líneas de alta velocidad en España se multiplican: Madrid-Barcelona-Frontera Francesa, Madrid-Valladolid, Sevilla-Málaga, Madrid-Valencia, Madrid-Lisboa, etc. Se está produciendo una renovación de los ferrocarriles en la que las infraestructuras de alta velocidad pasan a jugar un papel central.

Una línea se entiende de alta velocidad cuando está diseñada para permitir la circulación al menos a 250 km/h, o 200 km/h para líneas acondicionadas. Sin embargo, las líneas construidas hasta ahora en España permiten velocidades de 300/350 km/h. Este nivel de exigencia en los requisitos afecta a cada una de las partes que componen la línea de alta velocidad: (I) la obra civil, (II) la electrificación y (III) el sistema de control y de señalización.

La electrificación es el conjunto de instalaciones necesarias para suministrar la energía eléctrica necesaria para asegurar el funcionamiento de la línea de ferrocarril. En general, podría afirmarse que lo que caracteriza la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad

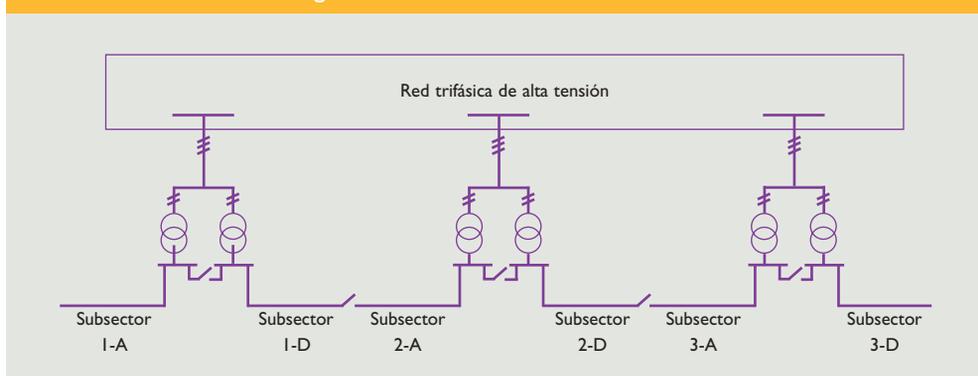
es el nivel de exigencia para el que se diseña. Como muestra de esto, para alcanzar velocidades de 350 km/h se usarán trenes cuyos consumos pueden exceder los 12 MW, con una periodicidad en ocasiones inferior a 15 minutos. Por ello, resulta importante contar con herramientas de diseño adecuadas que faciliten el estudio del problema en sus diferentes fases.

La herramienta SILVIA de Ayuda al Diseño de la Electrificación de Ferrocarriles de Alta Velocidad permite realizar la mayor parte de los cálculos necesarios para el diseño: (I) simulación del tráfico ferroviario, (II) cálculo de los parámetros de línea, (III) cálculo de tensiones, corrientes y potencias –instantáneas y medias–, (IV) determinación de desequilibrios introducidos en la red trifásica de alta tensión, (V) cálculo de las tensiones de paso y de contacto, y (VI) cálculo de las tensiones inducidas en líneas paralelas. Dicha herramienta ha sido desarrollada por el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la E.T.S. de Ingeniería de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid para la Sociedad Española de Montajes Industriales (SEMI) entre los años 1998 y 2000 con el apoyo del CDTI y del programa ATYCA de extinto Ministerio de Industria y Energía.

La electrificación de ferrocarriles de alta velocidad

En España, la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad se realiza a 25kV de corriente alterna monofásica. Como muestra la Figura 1, la electrificación está organizada en sectores eléctricamente independientes, separados entre sí por zonas sin alimentación denominadas zonas neutras. Cada uno de estos sectores está conectado a la red trifásica de alta tensión a través de una subestación de tracción.

Figura 1. Estructura de la electrificación



En caso de fallo de alguna de las subestaciones, se modifica la topología de la electrificación, haciéndose cargo de su alimentación las subestaciones adyacentes a ese sector.

Para el transporte de energía en cada uno de estos sectores hay dos sistemas de alimentación [1, 2]. En el sistema monotensión (ver Figura 2), conocido como 1x25kV, se emplea un único nivel de tensión, que es al que se alimenta el conjunto de trenes.

En el sistema bitensión (ver Figura 3), conocido como 2x25kV, se emplea un nivel de tensión superior para el transporte de la energía, utilizándose autotransformadores repartidos a lo largo de la línea para reducir el nivel de tensión que alimenta el material rodante.

El diseño de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad consiste en determinar

exactamente cada uno de los elementos que la componen:

- Subestaciones: número necesario, así como su tamaño y su localización. Se determinará además el sistema de alimentación (1x25kV o 2x25kV), y la conexión a la red trifásica de alta tensión.
- Zonas neutras: ubicación. Al tener una longitud suficientemente pequeña, se modelan como seccionadores.
- Autotransformadores (en caso de emplearse el sistema bitensión): número necesario, así como su tamaño y localización.
- Catenaria: número y tipo de conductores físicos a emplear:
- Sistema de puesta a tierra: especificación de las puestas a tierra en los postes, en las subestaciones y en los autotransformadores.

Para ello, ha de tenerse en cuenta que la electrificación debe permitir el funcionamiento de la línea en situaciones degradadas, como por ejemplo la pérdida de una de las subestaciones.

La electrificación debe satisfacer los siguientes criterios:

- La tensión en la catenaria debe estar dentro del rango establecido en la norma UIC-600 (ver Tabla 1).
- Los transformadores y autotransformadores han de dimensionarse para soportar las cargas demandadas por el tráfico esperado.
- Igualmente, los conductores empleados en la catenaria deben dimensionarse de forma que pueda soportar las corrientes que necesita el tráfico esperado.
- Los desequilibrios que la electrificación produce en la red trifásica de alta tensión han de estar en los límites admisibles.
- La electrificación no debe entrañar riesgos para las personas y las instalaciones cercanas. Las tensiones de paso y de contacto en puntos accesibles por las personas deben de estar por debajo de los límites establecidos. Lo mismo sucede con las tensiones inducidas en líneas paralelas.

Figura 2. Sistema monotensión 1x25kV

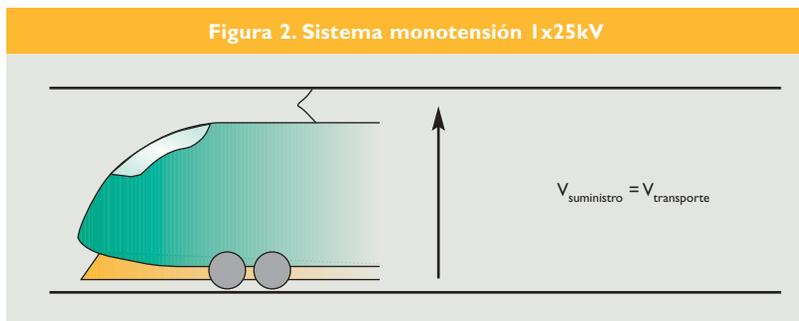


Figura 3. Sistema bitensión 2x25kV

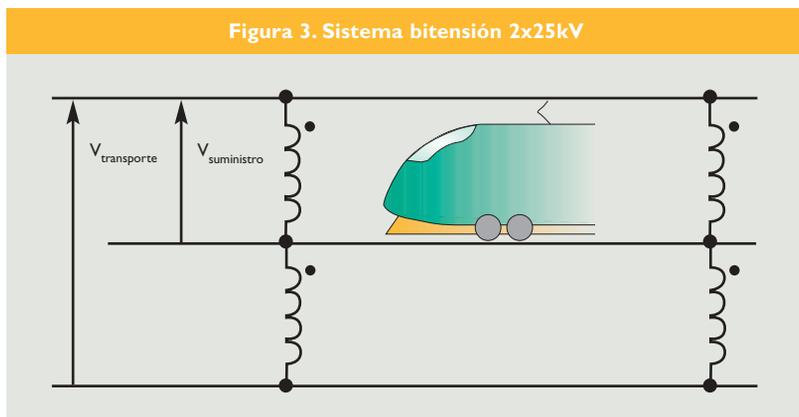


Tabla 1. Valores de tensión normalizados

	TENSIÓN					FRECUENCIA	
	Nominal	Mínima Instantánea	Mínima mantenida	Máxima mantenida	Máxima Instantánea	Nominal	Tolerancia
Corriente Continua	600		400	720	770		
	750		500	900	950		
	1500		1000	1800	1950		
	3000		2000	3600	3900		
Corriente Alterna	15000	11000	12000	17250	18000	16 2/3	16 1/6 a 17
	25000	17500	19000	27500	29000	50	49 a 51

La herramienta SILVIA de ayuda al diseño

La herramienta SILVIA permite realizar los estudios más habituales en el diseño de la electrificación [3]: (I) simulación del tráfico ferroviario, (II) cálculo de parámetros de línea de las catenarias, (III) cálculo de tensiones, corrientes y flujos de potencia, (IV) cálculo de desequilibrios producidos en la red de alta tensión, (V) cálculo de tensiones de paso y de contacto, y (VI) cálculo de tensiones inducidas en líneas paralelas.

Los módulos de cálculo han sido implantados en lenguaje C, para asegurar su portabilidad. Los datos se leen de ficheros de texto y los resultados se vuelcan en otros ficheros de texto.

La interfaz de usuario ha sido desarrollada en lenguaje C++, para la plataforma Windows. Además del sistema de ventanas para acceder a los diferentes módulos de cálculo, se han desarrollado (I) editores de archivos de datos y (II) visores de resultados.

Los editores permiten generar los diferentes archivos de datos a partir de un programa del tipo *hoja de cálculo*. Además de convertir la introducción de datos en algo muy intuitivo, esto facilita la interacción con los programas ofimáticos más habituales como puede ser Microsoft Excel.

Los visores de resultados permiten generar las gráficas más habituales a partir de los archivos de resultados numéricos, facilitando así la evaluación de los resultados obtenidos.

Para facilitar el estudio de múltiples escenarios, se ha implantado un lenguaje de marcos que permite especificar a la herramienta lotes de tareas que se ejecutan sin necesidad de intervención del usuario.

El simulador de tráfico

El *simulador de tráfico* permite calcular el movimiento de los trenes a lo largo de la línea, obteniéndose el consumo de potencia activa y reactiva de cada uno de los trenes en cada instante.

La simulación se realiza en dos tiempos: en primer lugar, se simula el movimiento de cada tipo de tren entre sus estaciones origen y destino [4], y en segundo lugar, se compone el tráfico basándose en un horario de salidas y en los movimientos de trenes calculados previamente.

Para la simulación del movimiento de cada tren se tienen en cuenta:

- Las características del material rodante (masa, fuerza de resistencia aerodinámica, fuerza de tracción máxima como función de la velocidad, fuerza de frenado máxima

Espacio en m	Tiempo en s	Veloc. en km/h	Potencia en kW	Puesta en kW	acc (m/s ²)
0.00	0.00	-0.00	800.00	302.00	0.0000
275.21	30.00	64.95	6706.33	278.28	0.3265
1101.00	60.00	129.35	11568.61	254.76	0.3340
1509.71	90.00	25.50	800.00	-400.00	0.3218
2537.41	120.00	30.75	800.00	-400.00	0.3224
4269.51	150.00	194.06	15457.36	231.13	0.3425
4943.11	180.00	120.00	800.00	-21.61	0.3329
6629.21	210.00	202.23	15877.74	228.14	0.3457
8434.11	240.00	248.43	18120.43	176.39	0.3692
10223.71	270.00	220.00	800.00	-14.92	0.3533
12057.00	300.00	220.00	4912.54	87.20	0.3533
14162.00	330.00	261.41	14863.34	164.62	0.3776
16240.40	360.00	255.97	14983.39	165.56	0.3740
18502.40	390.00	302.56	15243.51	146.08	0.3883
20878.30	420.00	275.00	11090.91	114.51	0.3822
23170.80	450.00	275.00	8676.94	87.65	0.3822
25657.10	480.00	320.05	15207.87	127.76	0.3900
28054.10	510.00	295.00	800.00	-43.16	0.3967
30536.40	540.00	294.02	15226.34	150.14	0.3964
33280.60	570.00	333.98	15113.23	131.22	0.3900
36049.20	600.00	325.89	18175.32	138.02	0.3900
38960.20	630.00	348.38	14948.22	124.27	0.3900
41736.30	660.00	339.96	15951.47	125.28	0.3900
44638.30	690.00	346.71	14970.40	125.06	0.3900
47533.80	720.00	348.05	14952.73	124.43	0.3900
50312.30	750.00	330.05	15144.71	132.99	0.3900
53065.30	780.00	324.77	15181.96	135.51	0.3900
55823.30	810.00	335.54	15096.79	130.29	0.3900
58626.30	840.00	341.90	15029.65	127.26	0.3900
61532.50	870.00	348.19	14950.81	124.36	0.3900
64445.20	900.00	349.99	7521.61	58.77	0.3900

Figura 4. Resultados de la simulación detallada del movimiento de cada tren

Identificador	Posición (en m)	P. Activa (en kW)	P. Reactiva (en kVAR)
1501	0.00	1600	1201
1541	100.00	800	1341
1521	100.00	800	1341
1481	100.00	800	1341
1471	31454.21	18481	11809
1-561	146099.88	1660	1165
1-631	164200.00	1660	1281
1451	164200.00	1660	1281
1-321	185954.61	18405	11198
1431	189256.65	15149	11290
1-401	107612.40	7242	11022
1421	151866.66	15067	12147
1-301	276591.41	16011	11707
1-471	1066370.77	800	1341
1401	1326242.98	15078	12149
1-501	1335145.90	14749	12102
1361	1345955.42	15104	12152
1391	1354752.24	15108	12153
1341	1403938.51	16121	1872
1-361	1441465.29	7837	13144
1-521	1453947.79	16888	1939
1261	1454794.33	18588	12052
1441	1519404.90	1660	1281
1491	1525189.51	1660	1281
1-451	1525189.51	1660	1281
1-391	1525189.51	1660	1281
1-461	1533008.83	735	1184
1461	1564745.87	18605	12201
1-491	1601000.00	1660	1281
1351	1603066.13	1660	1281
1281	1603066.13	800	1341
1311	1603066.13	800	1341
1-541	1603066.13	800	1341

Figura 5. Simulación de tráfico para cada instante

Figura 6. Configuración típica de la catenaria

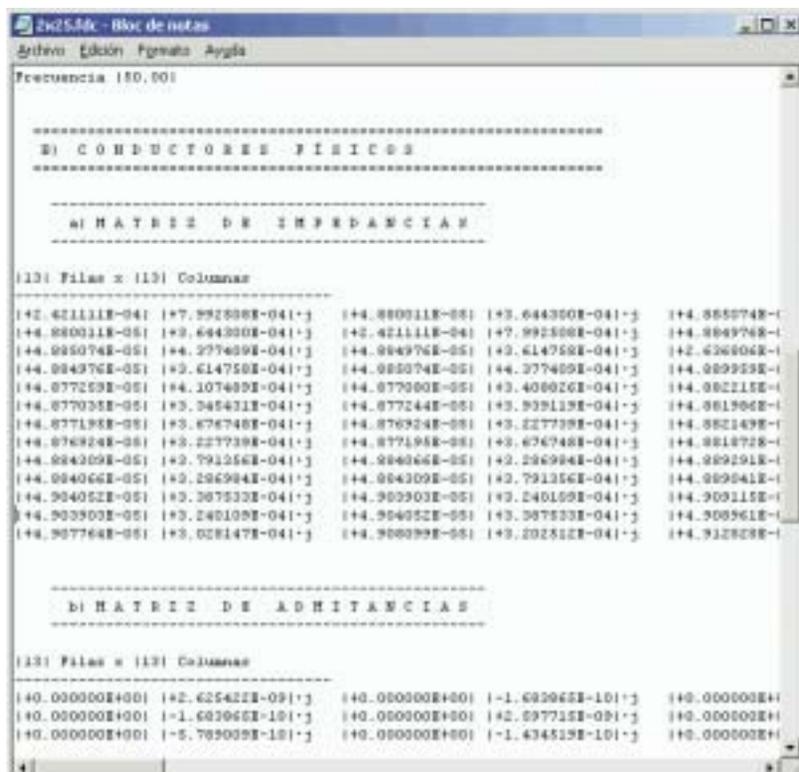
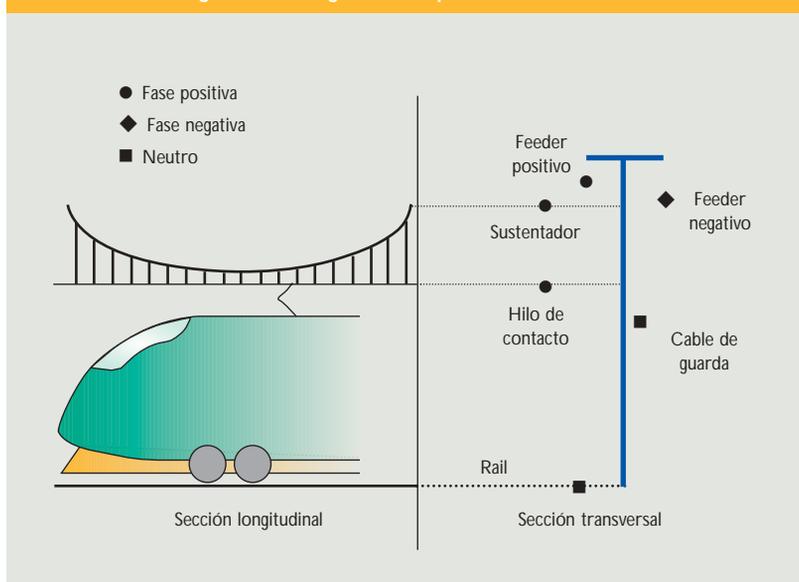


Figura 7. Parámetros de línea obtenidos

Tabla 2. Magnitudes calculadas por el módulo de flujo de cargas

Magnitudes instantáneas	Magnitudes medias
Tensiones en pantógrafo	Corrientes en conductores físicos
Tensiones a lo largo de la catenaria	Flujo de potencia en subestaciones (*)
	Flujo de potencia en autotransformadores (*)

(*) Estas potencias medias se calculan como medias cuadráticas y como medias aritméticas

como función de la velocidad, aceleración y deceleración máximas, el rendimiento del frenado regenerativo, etc.).

- El trazado por el que discurre la vía (pendientes, curvas, límites civiles de velocidad, coeficientes de efecto túnel, etc).

El simulador de movimiento realiza una integración numérica de la ecuación balance de fuerzas, calculando las magnitudes que caracterizan el movimiento del tren: posición, velocidad, aceleración, fuerza, potencia, factor de potencia, etc. La Figura 4 presenta los resultados de la simulación detallada del movimiento de un tren.

Para realizar la simulación, se supone que la conducción se realiza siempre a la máxima velocidad compatible con las restricciones de velocidad en cada punto de la línea, y de aceleraciones (o deceleraciones) máximas.

Para la composición del tráfico, se tienen en cuenta los movimientos de cada tren previamente calculados, y un horario de salida de cada uno de los trenes que van a circular por la línea a lo largo del día.

El resultado final del simulador de tráfico es un archivo en el que figuran, para cada instante, la lista de trenes que se encuentran circulando, especificando: posición, consumo de potencia activa, y de potencia reactiva (ver Figura 5).

Parámetros de línea

La Figura 6 muestra la configuración típica de la catenaria. Generalmente la fase positiva de la catenaria suele constar de: (I) hilo de contacto, que es el conductor en el que "toca" el pantógrafo, (II) sustentador, que es el conductor que sostiene mecánicamente el hilo de contacto a través de las péndolas, (III) feeder positivo, que es un conductor de refuerzo a los dos anteriores que se añade si es necesario. Como conductores de neutro, suelen estar: (I) uno de los raíles, que es dónde el tren inyecta la corriente, y (II) el cable de guarda, que es por el que circula el grueso de la corriente de neutro. Estos conductores van puestos a tierra cada cierta distancia. En los sistemas bitensión 2x25kV, se emplea un feeder negativo para transportar las corrientes de retorno.

Para definir una catenaria, basta con especificar una lista de conductores indicando las coordenadas de cada uno de ellos en el corte transversal de la catenaria

La catenaria de una línea de ferrocarril es una línea aérea particular [5], por la disposición

de los diferentes conductores y por los sistemas de alimentación empleados. Por ello, se hace necesario desarrollar un módulo que calcule los parámetros de línea de las catenarias [6]. Al ser una línea corta, se ha optado por un modelo en π determinándose las matrices de impedancias y de admittancias por unidad de longitud (ver Figura 7). Para ello se emplean las fórmulas de Carson que permiten incluir de forma aproximada el efecto del retorno de corrientes por tierra.

A continuación, se calculan matrices de conductores equivalentes, por reducción de la matriz de conductores físicos. Conceptualmente esto supone sustituir el conjunto de conductores físicos de cada fase por un único conductor por el que circula la corriente total, produciendo la misma caída de tensión. Dicha sustitución permite reducir drásticamente el tamaño de los problemas a manejar, mejorando notablemente los tiempos de cálculo.

Flujo de cargas

Para el diseño de la electrificación, el trabajo principal consiste en ubicar y dimensionar las subestaciones, los transformadores y los tramos de catenaria, así como en localizar las zonas neutras.

Para ello es necesario calcular las tensiones, corrientes y flujos de potencia necesarios para asegurar el funcionamiento de la línea [7-9]. El *flujo de cargas* permite obtener las tensiones en todos los nudos de cada sector; de forma que, en los nudos en los que se encuentre un tren, se satisfaga la condición de que la inyección de potencia es igual a la especificada. Se ha empleado el algoritmo de Newton-Raphson para la resolución numérica de dichas ecuaciones, aunque en determinadas redes radiales se emplean algoritmos específicos [10].

Para poder realizar estos cálculos es necesario disponer de:

- Los escenarios de consumo eléctrico que sean necesarios. Estos escenarios se generan con el simulador de tráfico.
- La configuración de la catenaria cuyo comportamiento se pretende estudiar.

El modelo adoptado para la subestación de tracción incluye la red de alta tensión y el transformador. La red de alta tensión se modela como un dipolo de Thevenin equivalente. Los transformadores se modelan como un transformador ideal en serie con su impedancia de cortocircuito.

Los autotransformadores también se modelan como un transformador ideal en serie con su impedancia de cortocircuito.

Aunque en la práctica, las zonas neutras tienen una longitud de unos cientos de metros, se han modelado como si fueran puntuales, por lo que sólo es necesario especificar su ubicación. Por último, la catenaria se especifica a tramos.

Los resultados que se obtienen pueden clasificarse como muestra la Tabla 2.

Una vez conocidas las tensiones en cada nudo, es posible calcular la corriente que circula por cada una de las ramas así como el flujo de potencia asociado.

Las magnitudes medias se calculan mediante una media móvil con un horizonte de tiempo que ha de especificar el usuario. Si se deseara calcular valores instantáneos, bastaría con especificar un horizonte de tiempo igual al paso de simulación.

La gráfica de tensiones en pantógrafo muestra la tensión que ve el tren seleccionado

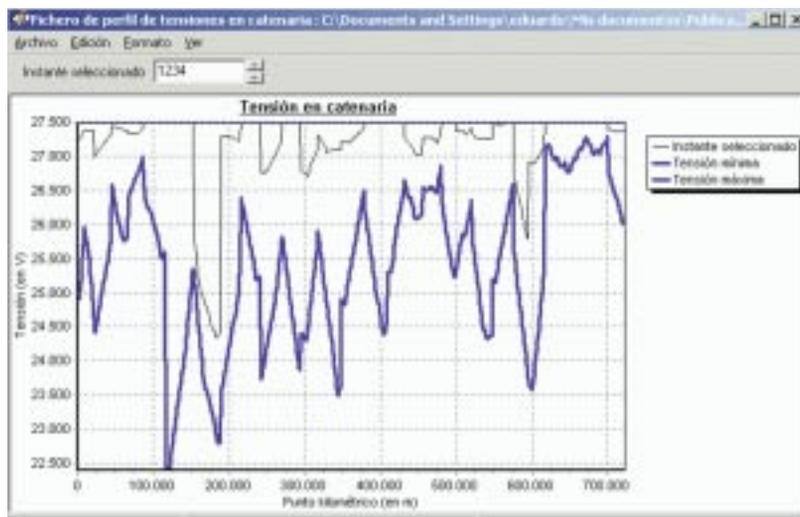


Figura 8. Tensiones en función de la catenaria

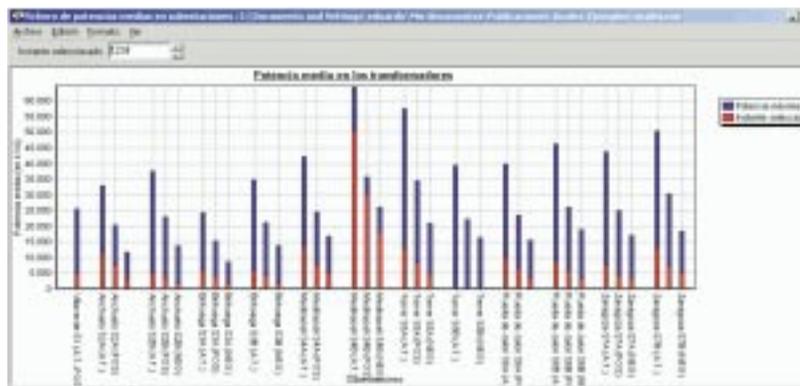


Figura 9. Flujo de potencia a través de las subestaciones

a lo largo del tiempo. Además, puede representarse una gráfica resumen que muestra la menor de las tensiones que ve en cada instante cualquiera de los trenes que en ese momento están en circulación.

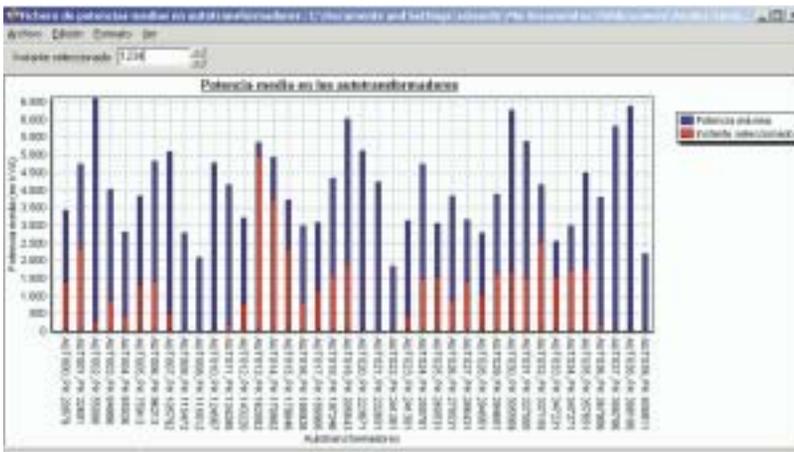


Figura 10. Flujo de potencia a través de los autotransformadores

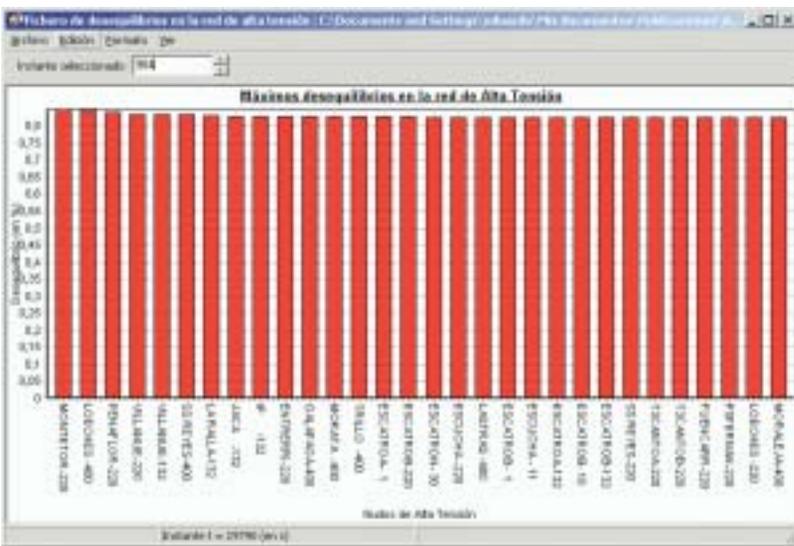


Figura 11. Desequilibrios en la red de alta tensión

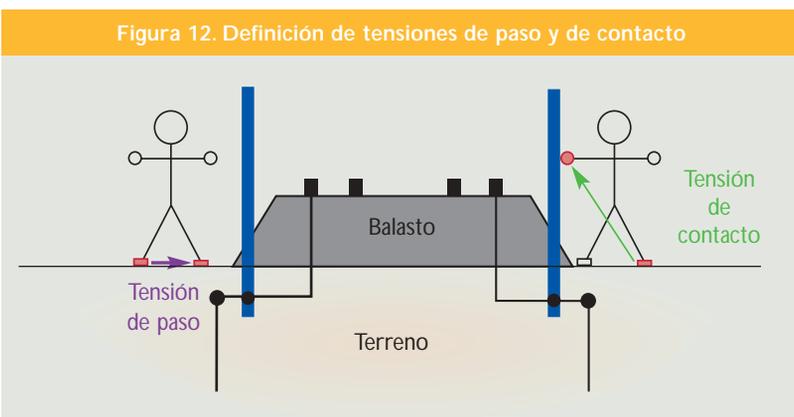


Figura 12. Definición de tensiones de paso y de contacto

La Figura 8 muestra la variación de tensiones a lo largo de la catenaria, representándose la tensión de la catenaria en el eje de las ordenadas, y el punto kilométrico en el eje de las abscisas. Además del perfil de tensiones en el instante deseado, se puede dibujar una gráfica resumen que muestra las tensiones mínimas y máximas en cada punto kilométrico, de entre todos los instantes simulados. Esta gráfica suele ser de gran utilidad para escoger los tramos de catenaria, así como para la posición de la subestaciones y de las zonas neutras.

La Figura 9 muestra los flujos de potencia en subestaciones a través de cada uno de los arrollamientos de los transformadores. Además de los valores medios calculados en cada instante, es posible representar los valores medios máximos de entre todos los instantes simulados. Esta gráfica es de gran utilidad para dimensionar los transformadores, así como para determinar la ubicación de las subestaciones.

La Figura 10 muestra los flujos de potencia a través de los autotransformadores. Esta gráfica se emplea para su dimensionado y localización.

La gráfica de corrientes medias cuadráticas en conductores físicos muestra la corriente media en el instante deseado en cada uno de los conductores que componen la catenaria. Además, se puede dibujar la corriente media en el instante en el que ésta es máxima.

Desequilibrios en la red trifásica de alta tensión

La alimentación de cada uno de los sectores que componen la catenaria se realiza en corriente alterna monofásica. Las subestaciones de tracción toman la energía de la red trifásica de alta tensión, entre dos de sus tres fases, lo que da lugar a la aparición de desequilibrios. Los desequilibrios en la red de alta tensión se cuantifican mediante la relación entre las componentes inversa y directa de las tensiones en todos los nodos, expresada como porcentaje [11].

El módulo de cálculo de desequilibrios en la red trifásica permite determinar el índice de desequilibrio de todos los nodos trifásicos de la red. Para ello, se resuelve, en componentes simétricas, una aproximación lineal de la red trifásica a la que se aplican las cargas desequilibradas correspondientes.

El modelado del circuito incluye:

- La descripción detallada de la red de alta tensión, que se suministra en formato PSS/E, un programa ampliamente utilizado en la industria eléctrica.
- Los consumos de potencia de cada una de las subestaciones, obtenidos mediante el módulo de *flujo de cargas* (ver epígrafe anterior).
- La descripción de la conexión de cada una de las subestaciones a la red trifásica de alta tensión, incluyendo: (I) impedancia de conexión, (II) fases entre las que se realiza la conexión, y (III) nudo de la red trifásica en el que se realiza la conexión.

El resultado que se obtiene es, para cada instante simulado, el conjunto de nudos con mayor desequilibrio de la red, ordenados de mayor a menor índice de desequilibrio (ver Figura 11).

Tensiones de paso y de contacto

Los trenes inyectan las corrientes de retorno en uno de los raíles. Estas corrientes se reparten entre el resto de conductores de neutro, que están puestos a tierra. Debido a las grandes corrientes que llegan a circular, en los alrededores de las puestas a tierra, pueden aparecer diferencias de potencial en el suelo que representen un peligro para las personas que puedan encontrarse allí [12].

El *módulo de cálculo de tensiones de neutro* permite determinar las tensiones en los conductores de neutro, así como las tensiones de paso y de contacto en las cercanías de las puestas a tierra, de forma que puedan tomarse las medidas adecuadas para que no supongan un peligro para nadie.

La Figura 12 muestra el modelo adoptado para las cercanías de la vía, así como lo que representan las tensiones de paso y de contacto:

Para realizar los cálculos se emplea una aproximación lineal del circuito a resolver. Para ello, es necesario disponer de:

- Un modelo detallado de las catenarias empleadas, que se obtiene con el módulo de *cálculo de parámetros de línea*. Incluye las matrices de impedancias y de admitancias de conductores físicos.
- Una descripción de las interconexiones entre conductores. Además de los puntos kilométricos en los que varios conductores físicos van unidos, se especifican las características geométricas de las puestas a tierra.

- La aproximación, mediante una impedancia equivalente, del consumo de los trenes que se obtiene con el módulo de *flujo de cargas*.

La Figura 13 muestra los resultados obtenidos: tensiones en los conductores de neutro, y tensiones de paso y de contacto. Además, es posible representar las tensiones máximas de entre todos los instantes simulados, lo que facilita la identificación de los peores casos.

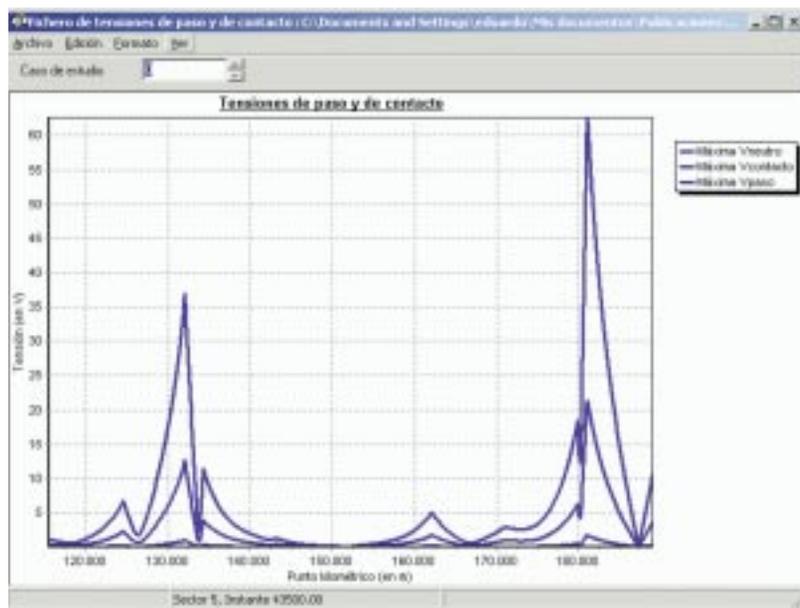


Figura 13. Tensiones de paso y de contacto

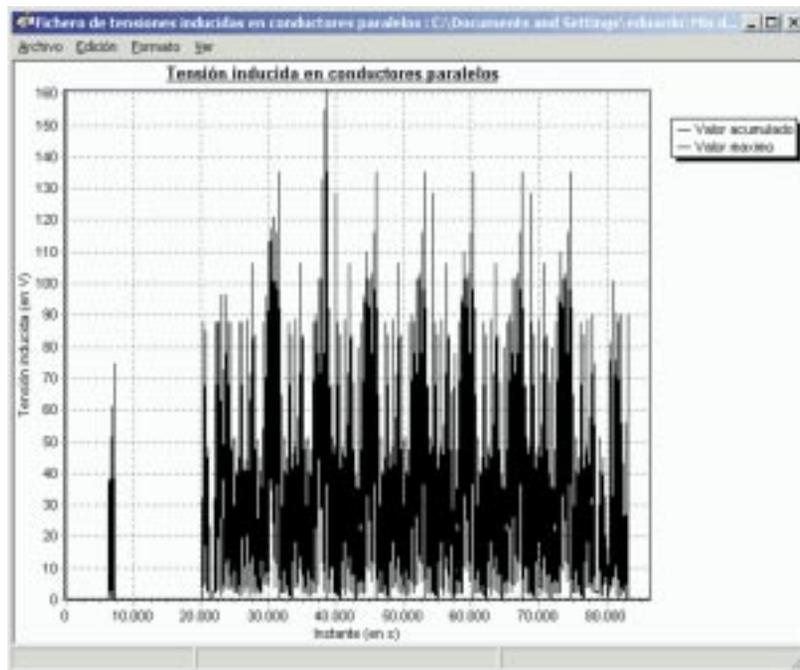


Figura 14. Tensiones inducidas en una línea paralela

Tensiones inducidas en líneas paralelas

Las elevadas corrientes que circulan en las líneas de alta velocidad, unido al hecho de que se trata de corrientes alternas, pueden dar lugar a la aparición de tensiones inducidas en otras líneas paralelas al ferrocarril. Si no se toman las precauciones necesarias, estas tensiones pueden dañar otras instalaciones o equipos. Por ello es necesario poder evaluar la magnitud de las mismas.

La tensión inducida por la línea de ferrocarril sobre una línea paralela dependerá de:

- El coeficiente de inducción mutua entre las dos líneas, que puede obtenerse con el módulo de *cálculo de los parámetros de línea*.
- La corriente en la línea de alta velocidad, que puede obtenerse con el módulo de *flujo de cargas*.

La herramienta SILVIA ha sido empleada por el consorcio EUROASCE para el diseño de la electrificación de la nueva línea de alta velocidad Madrid-Lleida

El paralelismo entre las líneas se ha aproximado como una lista de subtramos en los que la línea externa está a una distancia constante de la de alta velocidad, y la corriente en esta última es constante.

Los resultados que se obtienen corresponden a la tensión inducidas a lo largo del día en un conductor situado a 100 metros de la catenaria, y de 75km de longitud (ver Figura 14). Esta gráfica permite identificar los instantes en los que se producen las mayores tensiones inducidas, de cara a arbitrar las medidas pertinentes.

Conclusiones

El presente artículo ha presentado la herramienta SILVIA de Ayuda al Diseño de la Electrificación de Ferrocarriles de Alta Velocidad, que ha sido desarrollada por el IIT para la empresa SEMI. Dicha herramienta ha sido ampliamente utilizada por el consorcio EUROASCE (formado por las empresas SEMI, ELECNOR, COBRA y ADTRANZ), ganador del concurso para la adjudicación del proyecto y de la obra de gran parte de la obra de la catenaria de la línea Madrid-Zaragoza-Barcelona, actualmente en construcción hasta Lérida.

Como prolongación del trabajo expuesto, se desarrolla en la actualidad en el IIT la tesis doctoral "Optimización del diseño de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad" que pretende formalizar el problema del diseño de la electrificación, y aplicar técnicas para automatizar el proceso de diseño de forma que sea posible acometer su optimización. De este modo, sería posible encontrar distintas electrificaciones alternativas, que satisfaciendo los requisitos técnicos, fueran más económicas. ■

Notas

- [1] Roussel, H., "Power supply for the atlantic TGV high-speed line," presented at IEE International Conference on Main Railway Electrification, York, 1989.
- [2] J. Duncan Glover, A. Kusko, S. M. Peeran, "Train voltage analysis for AC railroad electrification," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-20, pp. 925-934, 1984.
- [3] E. Pilo, L. Rouco, A. Fernández, A. Hernández-Velilla, "A simulation tool for the design of the electrical supply system of high-speed railway lines," presented at IEEE PES Summer meeting 2000, Seattle, 2000.
- [4] Fernández, A., "Modelado, simulación y control de sistemas ferroviarios," in Departamento de Electrotecnia y Sistemas, ICAI. Madrid: Univ. Pontificia Comillas., 1997.
- [5] R. J. Hill, S. Brillante, P. J. Leonard, "Electromagnetic field modelling for transmission line distribute parameters of railway track," IEE Proceedings on Electrical Power Applications, vol. 146, pp. 53-59, 1999.
- [6] R. J. Hill, D. C. Carpenter, "Rail track distributed transmission line impedance and admittance: theoretical modeling and experimental results," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 42, pp. 225-241, 1993.
- [7] R. J. Hill, I. H. Cevik, "On-line simulation of voltage regulation in autotransformer-fed AC electric railroad traction networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 42, pp. 365-372, 1993.
- [8] B. Mellitt, C. J. Goodman, R. I. M. Arthunton, "Simulator for studying operational and power-supply conditions in rapid-transit railways," Proceedings IEE, vol. 125, 1978.
- [9] G. Cosulich, T. Ghiara, "MOTORS: a flexible traffic simulator to investigate rail and metrorail capability," presented at Railway operations, computers in railways IV, Southampton, 1995.
- [10] A. Gómez Exposito, E. Romero, "Reliable load flow technique for radial distribution networks," IEEE Transactions on Power Systems, pp. PE-344-PWRS-0-12-1996, 1997.
- [11] Mahn, U., "Rückwirkungen von einphasenbahnlasten im hocheleistungsverkehr auf das drehstromnetz (en Español: Repercusiones de las cargas de tracción monofásica de alto rendimiento sobre la red trifásica)," Elektrische Bahnen, traducido por la FFE, vol. July 1994, pp. 195-201, 1994.
- [12] Jacimovic, S. D., "Step and touch voltages and potential distribution on AC 25kV single-phase electrified railroads," IEEE, pp. 30-37, 1982.