

IMPACTO DE LOS SISTEMAS FERROVIARIOS SOBRE LAS REDES ELÉCTRICAS DE POTENCIA: DESEQUILIBRIOS

Aller, J.M. Alves, R. Bueno, A. Cova, M.
Pesse, G. Ravelo, O. Rivas, R. Toledo, H.

Departamento de Conversión y Transporte de Energía, Grupo SIEP, Universidad Simón Bolívar
Apartado Postal 89000 – Caracas 1080-A, Venezuela. Tel: +58 212 9063722, e-mail: robert@usb.ve

RESUMEN

La alimentación eléctrica de los sistemas ferroviarios modernos se hace, en general, en corriente alterna monofásica. Desde el punto de vista del sistema eléctrico estas son cargas monofásicas o bifásicas (según la conexión de los transformadores en las S/E de tracción) que introducen fuertes desequilibrios de corrientes al sistema. En función de los niveles de cortocircuito de la red, estas corrientes desequilibradas pueden producir niveles apreciables de desequilibrios en los voltajes, que pueden afectar a otras cargas conectadas. En este trabajo se presenta una metodología de análisis para evaluar el desequilibrio introducido por los sistemas de tracción eléctrica en las redes de potencia, tanto en régimen permanente así como ante el arranque o el frenado de los trenes y su impacto sobre la red.

Palabras clave: tracción eléctrica, ferrocarriles, calidad de servicio eléctrico, desequilibrios.

I. INTRODUCCIÓN

La alimentación eléctrica de los sistemas ferroviarios modernos se hace en CA monofásica en niveles de tensión entre 20 y 35 kV. Esta tensión es rectificadora para luego, mediante un inversor trifásico controlado, alimentar las máquinas eléctricas de tracción (en general, motores de inducción) ubicadas en los vagones o en las locomotoras en el caso de los trenes de carga [1]. Las tensiones de las catenarias que alimentan las vías férreas de los trenes se obtienen de las redes trifásicas de suministro eléctrico. La operación de los sistemas ferroviarios puede tener un impacto sobre la calidad del servicio eléctrico de las redes de suministro y en particular sobre los motores de inducción o generadores en caso de existir este tipo de equipamiento en zonas eléctricamente cercanas al sistema ferroviario [2], [3].

II. NOMENCLATURA

Las abreviaturas y símbolos empleados en este trabajo son los siguientes:

CA	→ Corriente Alterna
NCC	→ Nivel de Cortocircuito
CSE	→ Calidad del Servicio Eléctrico
GS	→ Generador Sincrónico
MI	→ Motor de Inducción
S/E	→ Subestación Eléctrica
BT, MT, AT	→ Baja, media y alta tensión
USB	→ Universidad Simón Bolívar

III. DESEQUILIBRIOS O DESBALANCES

El desequilibrio (o desbalance) describe una situación donde los voltajes (o corrientes) de un sistema trifásico no son idénticos en magnitud y/o la diferencia de fase entre ellos no es 120° eléctricos. Las causas principales de desbalance son las cargas monofásicas (como trenes eléctricos y otras), líneas de transmisión no transpuestas o condiciones anormales de funcionamiento de los sistemas eléctricos trifásicos. Un MI funcionando con una fuente de tensión desequilibrada consumirá una corriente con un desequilibrio varias veces mayor al de la fuente de voltaje. Como resultado, las tres corrientes serán distintas y la máquina sufrirá un aumento de temperatura y una disminución de su vida útil, especialmente del aislamiento. Motores y generadores, especialmente los más grandes y costosos, son equipados con algún tipo de protección para detectar desequilibrios extremos. Si el desequilibrio de tensiones de la fuente es suficientemente grande, la protección monofásica puede responder a estar corrientes desequilibradas y desconectar la máquina.

A. Definición del desequilibrio

Sobre el desequilibrio de fases se han propuesto varias definiciones. En general la de "Edison Electric Institute Transmission and Distribution Committee" que consiste en que el desequilibrio de tensión es la razón entre el voltaje de secuencia negativa y el de secuencia positiva constituye la definición más empleada. Una definición equivalente puede emplearse para el desequilibrio de corrientes.

Las cargas que consuman corrientes desequilibradas podrán afectar al voltaje del sistema si el nivel de cortocircuito de la fuente es bajo en relación a la corriente de carga, o dicho de otra forma, si la relación de cortocircuito es baja:

$$\text{RELACIÓN DE CC} \rightarrow \text{RCC} = \frac{NCC_{\text{barra}}}{MVA_{\text{carga}}} \quad (1)$$

B. Caracterización del desequilibrio

El desequilibrio no posee una única forma de ser caracterizado. A continuación se describen algunas formas de cuantificarlo:

Según ANSI/NEMA MG-1:

$$\begin{aligned} &\text{Máxima desviación del promedio} \\ &\text{del voltaje de fase} \rightarrow V_D = V_{\max} - V_P \\ &V_P \rightarrow \text{Promedio del voltaje de fase} \end{aligned} \quad (2)$$

$FD_{\text{ANSI}}^{\%}$ → Factor de desequilibrio ANSI

$$FD_{\text{ANSI}}^{\%} = \frac{V_D}{V_P} \times 100 = \frac{V_{\max} - V_P}{V_P} \times 100$$

La definición (2) tiene la limitación de no considerar los desequilibrios debido a las diferencias de fase ya que solamente usa los módulos de las tensiones.

Según IEC:

$$\text{siendo} \rightarrow a = 1 \angle -120^\circ$$

Tensiones de secuencia negativa y positiva

$$\begin{aligned} |\vec{V}_-| &= |\vec{V}_a + a^2 \vec{V}_b + a \vec{V}_c| \\ |\vec{V}_+| &= |\vec{V}_a + a \vec{V}_b + a^2 \vec{V}_c| \end{aligned} \quad (3)$$

$FD_{\text{IEC}}^{\%}$ → Factor de desequilibrio IEC

$$FD_{\text{IEC}}^{\%} = \frac{|\vec{V}_-|}{|\vec{V}_+|} \times 100$$

En METREL (Modern Power Quality Measurement Techniques) [4], se define el factor mediante la siguiente expresión:

$FD_{\text{METREL}}^{\%}$ → Factor de desequilibrio METREL

$$FD_{\text{METREL}}^{\%} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{siendo} \rightarrow \beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}$$

C. Límites propuestos

En general, en sistemas de distribución (BT) de bajo voltaje se recomienda que no excederse el 5% de desequilibrio deben tomarse medidas correctivas. En media (MT) y alta tensión (AT) los desequilibrios de voltaje deben ser aún más restrictivos.

La relación presentada en la ecuación (2) no establece límites de desequilibrio, sugiere aplicar factores de "derrateo" para el dimensionamiento de motores cuando la fuente de alimentación presente desbalances mayores o iguales al 3%.

En países como Bélgica, Brasil, Italia, Alemania y Ecuador el desequilibrio se caracteriza en función del porcentaje de voltaje de secuencia negativa, tal como lo define IEC mediante la ecuación (3); sus límites son los siguientes [2], [3]:

- Bélgica (planificación):

$$\begin{aligned} FD_{\text{VOLTAJE-MT}} &< 2\% \\ FD_{\text{VOLTAJE-AT}} &< 1\%. \end{aligned}$$

- Brasil:

$$FD_{\text{VOLTAJE}} < 2\%$$

- Italia (planificación):

$$\begin{aligned} FD_{\text{VOLTAJE-MT}} &< 2\% \\ FD_{\text{VOLTAJE-AT}} &< 1\%. \end{aligned}$$

- Alemania:

$$FD_{\text{VOLTAJE}} < 2\%.$$

- Ecuador:

$$\begin{aligned} FD_{\text{VOLTAJE-AT}} &< 1\% (>90 \text{ kV}) \\ FD_{\text{CORRIENTE-AT}} &< 3\% (>90 \text{ kV}) \end{aligned}$$

- Guatemala:

$$\begin{aligned} FD_{\text{VOLTAJE-MT Y BT}} &< 3\% \\ FD_{\text{VOLTAJE-AT}} &< 1\%. \end{aligned}$$

En cuanto a la operación y especificación de motores (en BT), la Norma NEMA MG-1 de motores y generadores establece que "los motores polifásicos de CA deberán operar satisfactoriamente bajo condiciones de operación a carga nominal cuando el desequilibrio de tensión no exceda del 1%". La misma norma proporciona una curva de reducción de carga ("derrateo") para desequilibrios de tensión mayores al indicado.

- Derrateo al 90% con desequilibrios de voltajes de 3%
- Derrateo al 75% con desequilibrio de voltajes de 5%.

- No se recomienda la operación (especialmente de motores) con desequilibrios de tensión >5%.

La Norma ANSI C84.1 recomienda que "los sistemas de suministro eléctrico deberán estar diseñados y operar para limitar el desequilibrio máximo de tensión al 3 % cuando se mida en el medidor de la empresa eléctrica, bajo condiciones de vacío".

IV. SISTEMA ELÉCTRICO FERROVIARIO

A. Descripción del sistema de transformación

En general, los sistemas eléctricos ferroviarios se componen de dos sistemas monofásicos obtenidos del sistema trifásico de alimentación mediante la conexión de un transformador Scott (Figura No. 1 y Figura No. 2), a través de transformadores monofásicos o de una conexión en delta abierta.

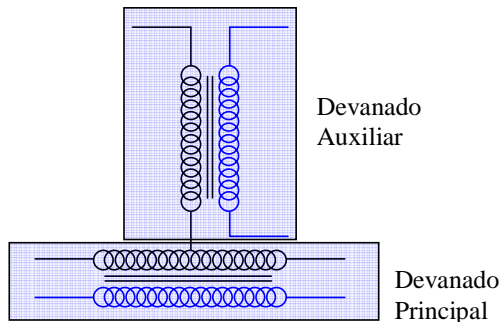


Figura No. 1: Devanados principal y auxiliar del transformador Scott

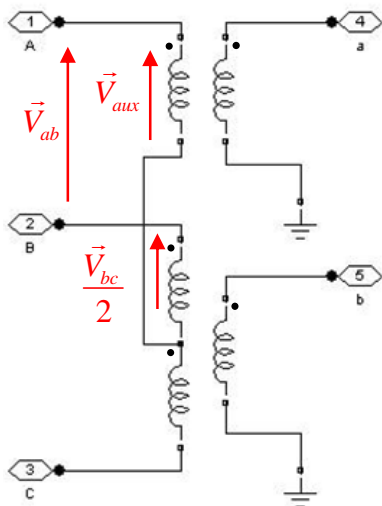


Figura No. 2: Conexión Scott y relación de voltajes.

La relación entre las tensiones de línea y la tensión del devanado del transformador (V_{aux}) se deduce mediante las siguientes expresiones (5), (6). Al alimentar el sistema de la Figura No. 2 con un sistema trifásico equilibrado de voltajes se obtiene un sistema bifásico equilibrado de tensiones en el

secundario del transformador, como se muestra en la Figura No. 3

$$\left. \begin{aligned} \vec{V}_{ab} &= V_{línea} \angle 0^\circ \\ \vec{V}_{bc} &= V_{línea} \angle -120^\circ \\ \vec{V}_{ca} &= V_{línea} \angle 120^\circ \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{tensiones de línea} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_{aux} &= \vec{V}_{ab} + \frac{\vec{V}_{bc}}{2} \\ \vec{V}_{aux} &= V_{línea} \angle 0^\circ + \frac{V_{línea}}{2} \angle -120^\circ \\ \vec{V}_{aux} &= V_{línea} \left(1 \angle 0^\circ + \frac{1}{2} \angle -120^\circ \right) \\ \vec{V}_{aux} &= \frac{\sqrt{3}}{2} V_{línea} \angle -30^\circ \end{aligned} \quad (6)$$

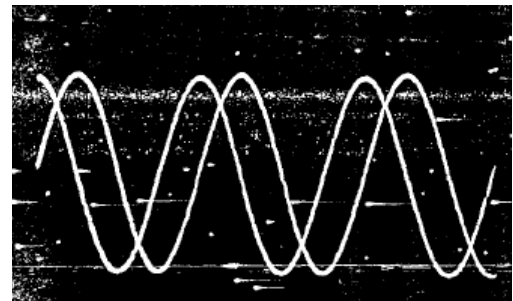


Figura No. 3: Tensiones en vacío medidas en el secundario de un transformador Scott.

La ventaja de usar el transformador en conexión Scott consiste en que, en condiciones de equilibrio bifásico en el secundario del transformador, el sistema no presenta desequilibrios en lado trifásico. Sin embargo, si las cargas monofásicas del transformador, que son independientes entre sí, no son iguales (o equilibradas), producen desequilibrios de tensión en el primario, debido a las caídas de tensión (desequilibradas) en el transformador. Si el NCC del sistema es bajo (o la RCC es baja) estas caídas de voltaje desequilibradas pueden producir importantes desequilibrios en las tensiones, que afecten la CSE del sistema y por ende la calidad del suministro eléctrico a otras cargas asociadas.

El efecto que tiene este desequilibrio sobre otras cargas que se encuentran conectadas en la propia S/E de tracción o en subestaciones cercanas, depende de la magnitud del desequilibrio, de la potencia consumida y del nivel de cortocircuito en las subestaciones que alimentan al sistema ferroviario.

El desequilibrio es variable ya que los trenes representan cargas altamente dinámicas, dado que la potencia consumida o regenerada depende de

numerosos factores, como son la pendiente, la velocidad, la carga de pasajeros, la distancia desde la subestación, etc. Por lo tanto, para el cálculo de los desequilibrios, es importante conocer la demanda del sistema ferroviario en las distintas posiciones.

B. Demanda del sistema ferroviario

Para evaluar las potencias requeridas o entregadas (regeneración) por los trenes en los diversos puntos de una línea (en este ejemplo de cálculo se usó el trayecto Caracas-Charallave), se deben conocer: el número y peso de los vehículos, los perfiles de la vía, la resistencia al rodado, las curvas de tracción y los itinerarios previstos.

Con el programa de cálculo "Train Performance" disponible en la USB se obtuvieron los valores de las distancias recorridas, velocidades, esfuerzo de tracción, potencias mecánica y eléctrica en función del tiempo y del recorrido para el ejemplo de cálculo usado (trayecto Caracas-Charallave).

Estos datos han permitido determinar las potencias eléctricas demandadas o regeneradas para cada posición de los trenes como se muestra en las siguientes figuras (Figura No. 4, Figura No. 5, Figura No. 6 y Figura No. 7).

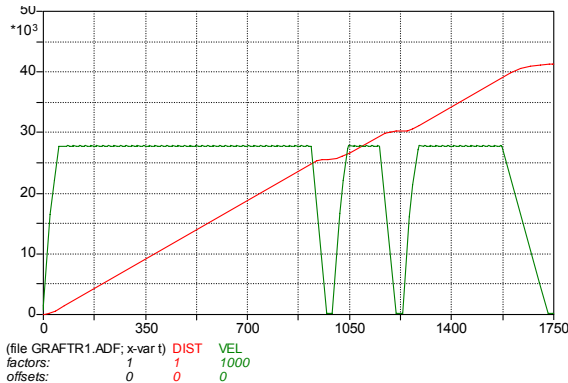


Figura No. 4: Velocidad vs. Distancia CCS-CUA

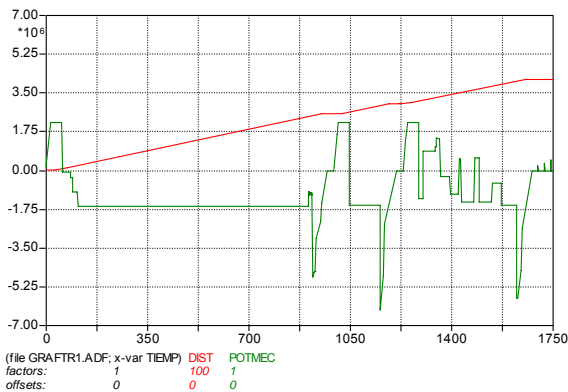


Figura No. 5: Potencia vs. Distancia CCS-CUA

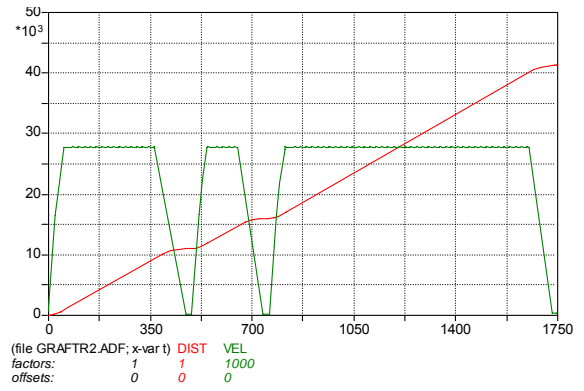


Figura No. 6: Velocidad vs. Distancia CUA- CCS

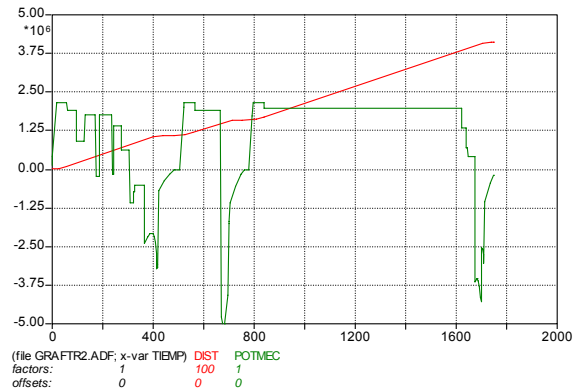


Figura No. 7: Potencia vs. Distancia CUA- CCS

Los resultados de potencia activa y reactiva se incorporaron al programa de flujo de carga bifásico-trifásico.

C. Impedancias equivalentes de las vías

El programa de flujo de carga bifásico-trifásico requiere como dato de entrada las impedancias de los circuitos de vía. Es necesario, por lo tanto, calcularlas en base a datos de las características de los conductores y a su disposición geométrica. La red de alimentación de las catenarias consiste en múltiples conductores prácticamente paralelos al hilo de contacto que le transmite la corriente al pantógrafo del tren. Estos conductores están conectados entre ellos a distancias regulares de manera que disminuya la impedancia del camino de las corrientes entre la S/E de tracción y los trenes. El camino de retorno a través de los rieles también tiene conductores en paralelo interconectados. En sistemas de vía doble, cada una de ellas tiene su propio sistema de alimentación de AT con la posibilidad de interconectarlos a intervalos mayores mediante interruptores, de manera de disminuir aún más la impedancia del lazo de las corrientes de tracción. Los circuitos de retorno por las vías y conductores anexos están normalmente interconectados permanentemente. Es necesario determinar las impedancias equivalentes entre los trenes y la S/E de tracción,

impedancias estas que dependen de la posición de los trenes y por lo tanto cambian en el tiempo.

Especial dificultad en estos cálculos tiene la determinación de la resistencia eléctrica de los rieles. Su elevada permeancia magnética hace que el efecto pelicular sea fundamental, ya que las distancias de penetración δ son del orden de los milímetros, lo que limita el área útil de conducción al contorno del riel o a los sectores mas alejados del centro. Para frecuencias armónicas sobre el kHz la resistencia de los rieles es varias veces mayor que a 60 Hz. La resistencia de los conductores de refuerzo de alimentación y de retorno, que son de cobre y aluminio-acero, aumentan menos con la frecuencia, debido a que son cilíndricos y de mucha menor dimensión respecto a las distancias de penetración.

La inductancia depende esencialmente de las distancias entre conductores. Si se tiene un plano de la ubicación de los conductores para cada sección de vía en que tengan diferente disposición, con las coordenadas de los conductores se pueden calcular las distancias y las inductancias propias y mutuas.

Conociendo la matriz de impedancias de los conductores correspondientes a cada frecuencia, se realiza el cálculo de las impedancias equivalentes para los haces de conductores de alimentación de cada vía y haces de retorno. La matriz de impedancias de rama se invierte a la matriz de admitancias de ramas y se suman todos los elementos de ella que correspondan a un grupo o a las mutuas entre dos grupos. Se obtuvo así la matriz de admitancias equivalente para los haces y por su inversión, la matriz de impedancias equivalente del sistema de ejemplo.

- Impedancia equivalente **TOTAL** para **DOS VÍAS**

$$0.286 \angle 72^\circ \Omega/\text{km}$$

- Impedancia equivalente **TOTAL** para **UNA VÍA**

$$0.344 \angle 71^\circ \Omega/\text{km}$$

V. FLUJO DE CARGA BIFÁSICO-TRIFÁSICO

Los flujos de carga de cada sistema de catenarias entregan los valores de las corrientes en los dos secundarios del transformador Scott. Estas corrientes fasoriales deben combinarse de manera de dar las correspondientes corrientes en las tres fases de sistema trifásico de alimentación. Como el flujo de carga en el sistema trifásico se realiza como un flujo monofásico para la malla de secuencia positiva, es necesario agregar un flujo para la malla de secuencia negativa, ya que las corrientes trifásicas están desequilibradas, incluso en el caso de cargas iguales

en ambos secundarios, si no tienen igual factor de potencia.

La transformación de corrientes bifásicas a trifásicas que realiza el transformador en Scott tiende a equilibrar las corrientes de frecuencia fundamental en el primario trifásico $I_{abc1} = [I_{a1} \ I_{b1} \ I_{c1}]$ combinando las dos corrientes bifásicas $I_{AB1} = [I_{A1} \ I_{B1}]$, según la transformación matricial escalar T_{bt} . Esta transformación mantiene el equilibrio y la secuencia de las corrientes. Si las corrientes bifásicas fundamentales son equilibradas y de secuencia positiva, es decir $I_{B1} = -j I_{A1}$, las corrientes I_{abc1} fundamentales forman un sistema equilibrado y simétrico. Es por lo tanto conveniente para la realización del flujo trifásico-bifásico trabajar con las mallas de secuencia en el lado trifásico. Para esto se combina en una sola matriz la transformación bifásica-rifásica con la transformación de componentes simétricas T_s . Esta matriz permite pasar directamente de las dos mallas bifásicas, **A** y **B**, a las mallas de secuencia **Positiva** y **Negativa**.

$$\begin{bmatrix} I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2/\sqrt{3} & 0 \\ -1/\sqrt{3} & 1 \\ -1/\sqrt{3} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \end{bmatrix} \quad (8)$$

La transformación directa de corrientes bifásicas a componentes simétricas trifásicas es la misma que la transformación a componentes simétricas bifásicas, debido a que las componentes simétricas son sistemas de fasores equilibrados y la transformación bifásica-trifásica mantiene la secuencia y el equilibrio. El modelo utilizado para resolver el flujo de carga bifásico-trifásico se muestra a continuación en la Figura No. 8. El sistema completo puede verse en los apéndices de este trabajo, en la Figura No. 9.

Las posiciones de los trenes y por consiguiente de las cargas de tracción, están calculadas en función de los itinerarios de operación para los diversos casos. Con esas posiciones se calcularon las distancias y las correspondientes impedancias de rama. Las potencias consumidas o regeneradas son las que corresponden a esas posiciones según los resultados del programa de simulación del comportamiento dinámico de los trenes. Los casos considerados para los flujos de carga bifásico-trifásico fueron los que corresponden a operación normal y a la operación (posible) que produce el máximo desequilibrio de corrientes en los transformadores Scott.

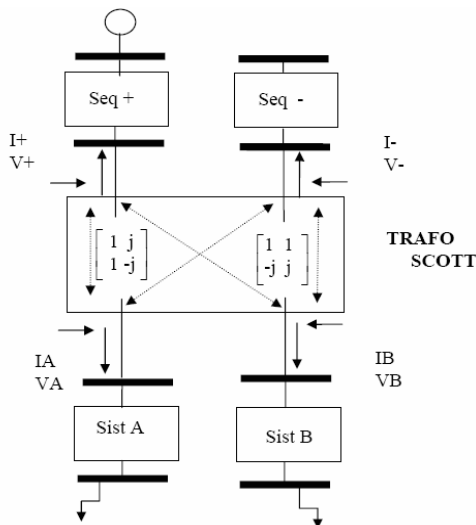


Figura No. 8: Conexión Scott y mallas de secuencia

VI. RESULTADOS

Los principales casos considerados fueron los que corresponden a la operación posible de máximo desequilibrio y de máxima regeneración. Los resultados para estas dos condiciones de funcionamiento pueden verse en la Tabla 1 y Tabla 2 respectivamente.

Máximo desequilibrio operativo

- En la línea trifásica
 $FD_{I-IEC} \% = 34,06\%$ (corrientes)
- En las barras del SISTEMA
 $FD_{V-IEC} \% = 0,57\%$ (voltajes)
- En las barras de la S/E de Tracción
 $FD_{V-IEC} \% = 1,71\%$ (voltajes)

Desequilibrio en regeneración

- En la línea trifásica
 $FD_{I-IEC} \% = 170\%$ (corrientes)
- En las barras del SISTEMA
 $FD_{V-IEC} \% = 0,20\%$ (voltajes)
- En las barras de la S/E de Tracción
 $FD_{V-IEC} \% = 0,60\%$ (voltajes)

VII. CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un modelo completo y detallado de un sistema eléctrico ferroviario que permite el análisis desequilibrado del sistema y el cálculo del impacto de la operación de los ferrocarriles sobre la red eléctrica asociada.

- Los desequilibrios de voltaje en las barras del sistema, calculados para las condiciones posibles de funcionamiento (más desfavorables) del sistema ferroviario tomado como ejemplo, no supera el límite de 1% tolerable según las recomendaciones internacionales consultadas). Esto es debido fundamentalmente al alto nivel de CC del sistema de alimentación (del orden de 2000 MVAcc, siendo la potencia del transformador Scott de 40 MVA).

- Los desequilibrios de voltaje en las barras de la S/E de tracción alcanza el valor de 1,71%, superando el valor recomendado. Como se sabe los desequilibrios de tensión pueden tener efectos indeseables, principalmente, sobre los motores de inducción o motores sincrónicos conectados a esa barra. Sin embargo, el valor de 1,71% obtenido ocurre para una condición extrema de funcionamiento que, en caso de producirse, será por cortos períodos de tiempo.

- El caso de regeneración extrema no presenta problemas en cuanto al grado de desequilibrio que produce y, adicionalmente, es un caso improbable. Los 5,749 MW y 0,22 MVA_r regenerados por los trenes son compensados en un gran parte por la potencia consumida por los servicios auxiliares, si estos están en plena actividad.

- Es conveniente destacar que a pesar de que el grado de desequilibrio de corrientes es extremo en algunas condiciones (>100%) su influencia sobre el desequilibrio de las tensiones es muy pequeño debido fundamentalmente a los altos NCC del sistema de CADAFE.

- Los desequilibrios máximos, se obtienen para condiciones de funcionamiento extremas, no previstas, del sistema.

- Una situación totalmente distinta podría presentarse en el caso de sistemas ferroviarios alimentados de barras con bajo NCC o mediante plantas de generación autónomas. Estas situaciones particulares deben ser analizadas con sumo cuidado.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Roberto Faure Benito. "La tracción eléctrica en la alta velocidad ferroviaria". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales Puertos. Madrid, 2004.
- [2] Arrillaga, J.; Watson, N.; Chen, S. "Power Quality Assessment". John Wiley & Sons. 2000.
- [3] Joint Working Group Cigré C4.07 / Cired, "Power Quality Indices and Objectives", Final WG Report, January 2004, Rev. March 2004.
- [4] METREL, Modern Power Quality Measurement Techniques, Metrel.

IX. ANEXOS

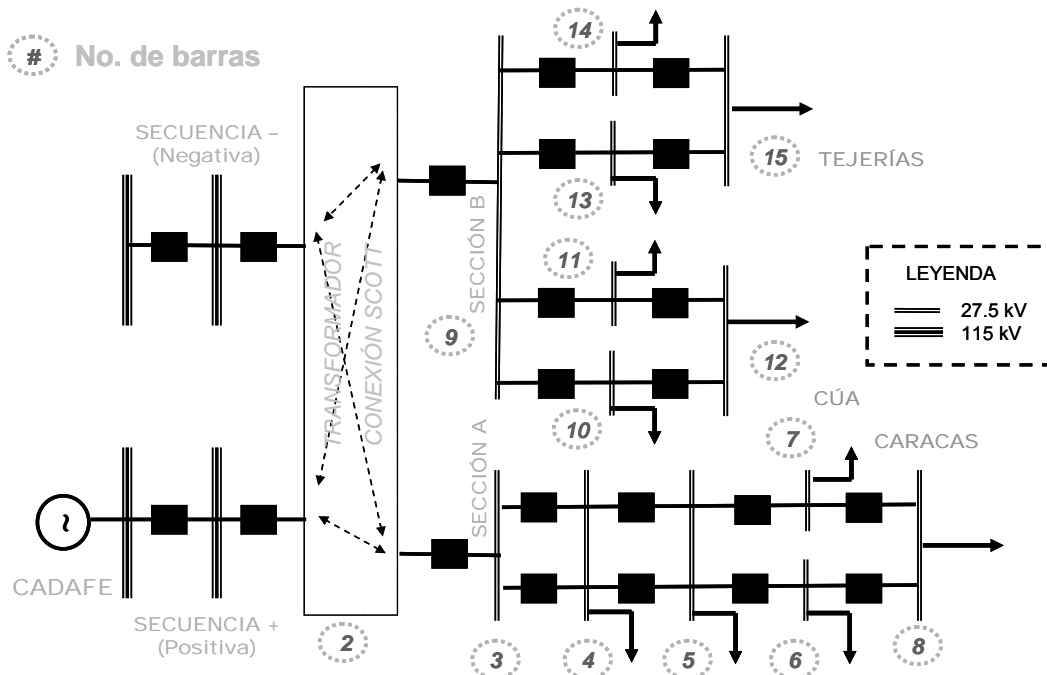


Figura No. 9: Mallas de secuencia utilizadas en el flujo de carga bifásico-trifásico

Tabla 1: Demandas y máximo desequilibrio operativo

CARACAS	No. Barra	V pu	kV	Delta °			
		3	0,9514	23,78	-11,8		
	5	0,8757	21,89	-17,9			
	8	0,8616	21,54	-18,6			
CHARALLAVE	No. Nexo	I pu	Amp	P MW	Q MVA	S MVA	
	2-3	3,015	1206	28,31	4,63	28,69	
	4-5	1,073	429	9,38	0,47	9,39	
	6-8	0,45	180	3,88	0,08	3,88	
CHARALLAVE CUA	No. Barra	V pu	kV	Delta °			
		10	0,9705	24,26	-7,2		
		12	0,9692	24,23	-7,4		
	No. Nexo	I pu	Amp	P MW	Q MVA	S MVA	
	9-10	0,457	183	4,43	0,17	4,43	
	11-12	0,239	96	2,32	0,05	2,32	
CHARALLAVE TEJERIAS	No. Barra	V pu	kV	Delta °			
		13	0,9674	24,19	-7,7		
		15	0,9646	24,11	-8,2		
	No. Nexo	I pu	Amp	P MW	Q MVA	S MVA	
	9-7	0,443	177	4,28	0,2	4,28	
	14-15	0,267	106	2,58	0,06	2,58	
BARRAS A y B	P _A MW	Q _A MVA	S _A MVA	P _B MW	Q _B MVA	S _B MVA	
	28,97	7,7	29,98	13,78	1,98	13,92	
SISTEMA TRIFASICO							
CORRIENTES LINEA 3Φ	I _a A	I _b A	I _c A	I _{pos} A	I _{neg} A	FD _{IEC} % (corriente)	
	173	105	117	138	47	34,06%	
TENSIONES IAFE	V _a kV	V _b kV	V _c kV	V _{pos} kV	V _{neg} kV	FD _{IEC} % (voltaje)	
	112,18	112,21	115,08	113,13	1,94	1,71%	
CADAPE	V _a kV	V _b kV	V _c kV	V _{pos} kV	V _{neg} kV	FD _{IEC} % (voltaje)	
	114,5	114,31	115,37	114,73	0,65	0,57%	

Tabla 2: Desequilibrios en condiciones extremas de regeneración

CARACAS CHARALLAVE	No. Barra	V pu	kV	Delta °		
	3	1,006	25,17	2,27		
	8	1,016	25,4	3,68		
	No. Nexo	I pu	Amp	P MW	Q MVar	S MVA
	2-3	0,592	236	-5,951	-0,363	5,96
	4-5	0,270	108	-2,721	-0,196	2,73
	6-8	0,0147	6	-0,112	-0,099	0,15
BARRAS A y B	P _A MW	Q _A MVar	S _A MVA	P _B MW	Q _B MVar	S _B MVA
	-5,749	-0,22	5,75	13,78	1,98	13,92
SISTEMA TRIFÁSICO						
CORRIENTES	I _a A	I _b A	I _c A	I _{pos} A	I _{neg} A	FD _{IEC} % (corriente)
LINEA 3Φ	33	16	16	10	17	170%
TENSIONES	V _a kV	V _b kV	V _c kV	V _{pos} kV	V _{neg} kV	FD _{IEC} % (voltaje)
IAFE	115,5	115,8	114,7	115,3	0,69	0,60%
CADAFE	115,1	115,3	114,9	115	0,23	0,20%