



ELECTRIFICACIÓN Y  
ESTUDIOS  
FERROVIARIOS

ESTUDIO SOBRE IMPLMENTACION DE  
SUBESTACIONES REVERSIBLES EN REDES DE TRANVIAS

Jesús Montesinos Ortuño.  
Ingeniero Industrial

## **SUBESTACIONES REVERSIBLES**

Jesús Montesinos Ortuño  
Ingeniero Industrial

Albacete, 20/09/2014



## Índice

### Resumen

1. Introducción al análisis energético de los sistemas de electrificación ferroviaria
2. Características de la instalación objeto del estudio
  - 2.1. Trazado
  - 2.2. Catenaria
  - 2.3. Subestaciones de tracción
  - 2.4. Características de circulación
  - 2.5. Características de los trenes
3. Análisis energético del tranvía de Albacete
  - 3.1. Simulación fase 1. Sin regeneración.
  - 3.2. Simulación fase 2. Con regeneración
  - 3.3. Simulación fase 3. Con regeneración y subestaciones reversibles
4. Resumen final
5. Conclusiones



## **Resumen**

En este artículo, se analiza el funcionamiento, desde el punto de vista de la regeneración de energía por frenado, de un red típica de tranvías de 11 km de longitud con 20 paradas, distribuidas aproximadamente cada 500 m y con una frecuencia de circulación de 6 minutos.

Se representa mediante las correspondientes gráficas, que la aplicación del frenado por regeneración produce una disminución de consumo del orden del 40%, desaprovechándose aproximadamente un 6% que se quema en los bloques de resistencias de frenado de los tranvías.

Aumentar la eficiencia en la regeneración de energía mediante el frenado, pasaría por aprovechar el 6% que se quema, mediante la instalación de otros sistemas, como pueden ser subestaciones reversibles. Sin embargo dicho aprovechamiento no puede ser total, porque entrarían en juego las pérdidas por transporte de esta energía hasta los puntos de reversibilidad, así como las pérdidas en la propia subestación reversible.

Teniendo en cuenta que la eficiencia de los sistemas por frenado con recuperación, depende de múltiples parámetros, como son el trazado, las características de los trenes, las características de circulación (frecuencia, número y distancia entre paradas, aceleraciones, deceleraciones, etc), no todos los sistemas se comportan de igual forma, por lo que es necesario realizar una simulación previa de cada instalación que permita definir la necesidad la ubicación en su caso la potencia de las subestaciones reversibles.



## 1. Introducción al análisis energético de los sistemas de electrificación ferroviaria.

Se trata de aumentar la eficiencia de las instalaciones de electrificación ferroviaria. Esta frase junto con las cuestiones de fiabilidad de las instalaciones, mantenibilidad y aumento de prestaciones, condensa el objetivo de los trabajos de desarrollo de los sistemas de electrificación ferroviaria.

Cuestiones relacionadas con las características mecánicas y constructivas de la catenaria, evolucionan de tal forma que permiten bien un aumento de la velocidad en los trenes, o unos montajes mas sencillos para velocidades mas reducidas.

Por otra parte, los trenes que actualmente circulan tienen unas características de funcionamiento distintas de los que circulaban hace unos años, básicamente por la incorporación a los mismos de la electrónica de potencia, que permite recuperar parcialmente la energía que se produce durante el frenado de los trenes.

Aunque es necesario tener en cuenta, que existen todavía líneas donde los trenes que circulan no permiten la recuperación de energía en la frenada.

Uno de los partidas de gasto que tienen todas las administraciones ferroviarias, y bastante importante, es la originada por el consumo de la energía en la tracción de los trenes, por lo que su reducción tiene una enorme importancia en la cuenta de resultados.

En los últimos años, aparecen varios sistemas para reducir el consumo eléctrico de la tracción de los trenes, o lo que es lo mismo, aumentar la eficiencia energética de tracción, aunque en este estudio nos centramos exclusivamente en los sistemas de regeneración de energía en la frenada y en las subestaciones reversibles.

En la empresa **Electrificación y Estudios Ferroviarios S.L.**, en adelante **e2f**, mediante el programa de simulación **CECAT®**, hemos realizados estudios de eficiencia energética en redes de distintos tipos, como pueden ser redes de cercanías, metropolitanas, tranviarias, de alta velocidad, etc., analizando la diferencia entre cuando se considera o existe regeneración de energía por el frenado, y cuando o bien no existe o no se tiene en cuenta. También hemos analizado las redes considerando la existencia de equipamiento reversible en las subestaciones de tracción, que permitan en determinadas condiciones, tomar energía de la catenaria (tanto en corriente continua, como en corriente alterna) y enviarla a una red externa, (y hemos llegado a la conclusión, que no existe un comportamiento uniforme ni entre las distintas redes, ni entre ellas mismas, y es que existen multitud de parámetros que hacen que los resultados puedan ser totalmente diferentes de unas instalaciones a otras.

Así, no es comparable la eficiencia energética que se puede obtener en una red de metropolitano, con frecuencias de trenes del orden de 2-3 minutos, con una red de tranvías con frecuencias de 10 minutos, o una red de cercanías o una línea de trenes convencionales con frecuencias de trenes de 30 minutos, o una red de alta velocidad en corriente alterna. A modo de ejemplo, para un mismo tipo de tren, la modificación de la curva de potencia, mediante el sistema ATO, nos permite modificar los esfuerzos de tracción, y por tanto afecta al funcionamiento global de la línea.



En todos los casos es necesario realizar un estudio detallado para cada uno de los casos, donde se tengan en cuenta las características eléctricas del circuito, vía única o vía doble, y en el caso de vía doble con las dos vías eléctricamente unidas o separadas, con los carriles de ambas vías también unidos o separados, así como la distribución y distancia entre subestaciones, las características de la catenaria, frecuencia de los trenes, aceleraciones y deceleraciones máximas, distancia entre paradas, así como las características del tren como puedan ser curvas de potencia, potencia de frenado eléctrico, potencia bloque resistencias de frenado, etc.

Los cálculos de simulación se han realizado con el programa **CECAT** desarrollado por la empresa **Electrificación y Estudios Ferroviarios S.L.**, **e2f**, que permite el dimensionamiento eléctrico de catenarias y subestaciones tanto en corriente continua como en corriente alterna (1x25 y 2x25 kV). Este software realiza los cálculos teniendo en cuenta el frenado por recuperación de los trenes, obteniendo los valores de las distintas energías, total regenerada, quemada en los bloques de resistencias de frenado de los trenes, consumidas por los servicios auxiliares de los trenes, e incluso aquella energía del frenado que no puede producirse, así como la devuelta a la línea de alterna en las subestaciones reversibles, etc., y las variaciones de consumo de potencia en función de la tensión.

Mas información sobre este programa, se puede obtener en la dirección, [http://www.e2f.es/pdf/ES\\_CeCat.pdf](http://www.e2f.es/pdf/ES_CeCat.pdf), o directamente en la página web, [www.e2f.es](http://www.e2f.es)

En este estudio, se van a analizar, los consumos que se producen en un sistema tranviario, de nuevo diseño en la ciudad de Albacete, cuyas características y funcionamiento se indican a continuación.



## 2. Características de la instalación objeto del estudio.

### 2.1. Trazado.

El trazado de la línea tranviaria tiene una longitud de 10,8 km con rampas y pendientes suaves que no exceden del 2-3 por mil, vía doble, con carril de 54 kg/m.l. estando unidas las vías entre si, a intervalos aproximados de 500 m.

Las paradas del tranvía de Albacete se distribuirán a lo largo de la traza, situadas unas de otras a distancias aproximadas de 500 m, de acuerdo con la siguiente tabla:

<b>Paradas</b>	<b>PK</b>
<i>Santa Isabel</i>	0+580
<i>Cruce Avda. Primera</i>	1+080
<i>Cruce Avda. Segunda</i>	1+500
<i>Cruce Avda. Tercera</i>	1+900
<i>Cruce Avda. Cuarta</i>	2+230
<i>Imagnalia</i>	2+940
<i>Los Llanos del Águila</i>	3+340
<i>Parque Bomberos</i>	3+690
<i>La Soledad</i>	4+060
<i>Fiesta del Árbol</i>	4+510
<i>Feria</i>	4+860
<i>Carretera Jaén</i>	5+253
<i>Hospital Perpetuo Socorro</i>	5+616
<i>Carrefour</i>	6+626
<i>Pedro La Mata</i>	7+062
<i>Parque Sur</i>	7+534
<i>El Corte Inglés-Avda. España</i>	8+334
<i>Puerta de Murcia</i>	9+128
<i>Hospital Provincial</i>	9+384
<i>Puerta de Valencia</i>	9+750

Tabla nº 1: Relación de parada con indicación de sus P.K.

### 2.2. Catenaria.

La catenaria está formada por un único hilo de contacto de Cu-Ag 0,1%, disponiendo de un feeder de acompañamiento a lo largo de todo el trazado formado por dos cables subterráneos de Aluminio, aislamiento 1,8/3kV, que se van conectando al hilo de contacto cada aproximadamente 300 m

Las catenarias de ambas vías se alimentan de forma independiente de las subestaciones de tracción, y no están unidas entre si a lo largo del trayecto.



### 2.3. Subestaciones de tracción.

La ubicación de las subestaciones de tracción, así como su potencia e impedancia conjunta transformador-rectificador, se indican en la siguiente tabla:

Subestación de Tracción	PK	POTENCIA [KVA]	Impedancia conjunto trafo-rect
<i>SER nº 1: Santa Isabel</i>	0+450	2x1250	0,0227
<i>SER nº 2: Llanos del Águila</i>	3+360	2x1250	0,0229
<i>SER nº 3: Carrefour</i>	6+700	2x1250	0,0232
<i>SER nº 4: Hospital Provincial</i>	9+400	2x1250	0,0234

Tabla nº 2: Relación de subestaciones de tracción (SER) con indicación de sus P.K.

### 2.4. Características de circulación.

Para el estudio la frecuencia de circulación de trenes que se ha considerado es de 6 minutos por vía.

La duración de la parada de los trenes en cada una de las estaciones es de 20 segundos.

La velocidad máxima de circulación es de 70 km/h.

La aceleración máxima considerada en el estudio es de  $1,0 \text{ m/s}^2$ , y el valor de deceleración (frenada) es de  $0,5 \text{ m/s}^2$ .



## 2.5. Características de los trenes.

	Vehículo de 206 plazas
Nº de módulos	5
Número de motores por bogie	2
Número de bogies tractores	4
Número de motores	8
Potencia nominal motor tracción a 1800 rpm	60 kW
Potencia máxima total	480 kW
Tensión de alimentación (Vcc catenaria)	750 V
Máximo esfuerzo tracción por bogie	35 KN
Esfuerzo total de tracción	140 KN
Aceleración máxima arranque	1,2 m/s <sup>2</sup>
Deceleración (frenado de servicio)	1,2 m/s <sup>2</sup>
Velocidad máxima	70 Km/h
Longitud del vehículo	32,366 m
Radio mínimo de curva	20m
Capacidad de viajeros:	
Sentados	52+4 pmr
De pie (3,5 p/m <sup>2</sup> )	154
Total	206
Peso vehículo en vacío	45,45 Tn
Peso vehículo en carga	62 Tn
Potencia servicios auxiliares	80 kW

Tabla nº 3: Características de los tranvías utilizados en la simulación





Para la realización de los cálculos se consideran además las siguientes características del tranvía:

Indeformable			
Masa total	Velocidad	Fuerza resistente	
64,2 t	70 km/h	374,62 daN	
Valores de resistencia al avance. Coeficientes específicos:			
A: daN/t	B: daN/[t.(km/h)]	C: daN/[t.(km/h) <sup>2</sup> ]	<input type="button" value="C Túneles"/> <input type="button" value="?"/>
2,538000000000	0,005800000000	0,000590000000	
Valores absolutos:			
162,945945 daN	0,3723745 daN/(km/h)	0,037879475 daN/(km/h) <sup>2</sup>	
Potencia	Consumo Aux.	Longitud	Rendimiento del Tren
480 kW	80 kW	33 m.	0,850
Aceleración	Deceleración	Acel. máx. no compensada	<input type="checkbox"/> Interoperable
1,200000 m/s <sup>2</sup>	1,200000 m/s <sup>2</sup>	0,650000 m/s <sup>2</sup>	Coef. de Adherencia
Masas giratorias	Masa en vacío	Masa de la carga	0,250
5,0 %	45 t	16 t	Potencia Reóstato
Cap. de almacenamiento	Coseno φ	Velocidad Fren.Elect.	1000 kW <input type="button" value="?"/>
0,000 kWh	0,000	5 km/h <input type="button" value="?"/>	Potencia Frenado Regenerativo
			1000 kW <input type="button" value="?"/>
Curva característica esfuerzo		Curva característica freno	
Tranvía Albacete esfuerz	<input type="button" value="Editar..."/>	Tranvía Albacete frenad	<input type="button" value="Editar..."/>
<input type="button" value="Nuevo"/>		<input type="button" value="Guardar como..."/>	
<input type="button" value="Guardar"/>		<input type="button" value="Borrar"/>	

Tabla nº 4: Características tranvía utilizada en el programa de simulación

Indicándose los valores de la resistencia al avance, el porcentaje de masas giratorias considerado, aceleración no compensada, rendimiento de los motores de tracción, la potencia máxima tanto de potencia regenerada como de freno eléctrico, así como la velocidad mínima (5 km/h) a la que se aplica dicho freno eléctrico. (No se considera el freno eléctrico para valores inferiores de velocidad), etc.



### **3. Análisis energético tranvía de Albacete**

El estudio de simulación se ha realizado teniendo en cuenta las siguiente fases:

**Fase 1:** Se realiza el balance energético de la instalación, considerando que los trenes circulan sin recuperación de energía por frenado.

En estas condiciones se obtienen los siguientes valores:

- Consumo de energía por la tracción de los trenes
- Consumo de energía por los servicios auxiliares de los trenes
- Pérdidas en las subestaciones de tracción
- Pérdidas en la catenaria.

Representándose el consumo total de energía en el total de las subestaciones de tracción, así como en cada una de ellas. Asimismo se representan los valores de tensión en el pantógrafo para cada uno de los trenes a lo largo de recorrido.

**Fase 2:** Se realiza el balance energético de la instalación, considerando que los trenes circulan con recuperación de energía por frenado.

En estas condiciones, se obtienen los siguiente valores:

- Consumo de energía por la tracción de los trenes
- Consumo de energía por los servicios auxiliares de los trenes
- Pérdidas en las subestaciones de tracción
- Pérdidas en la catenaria
- Energía máxima regenerada por los trenes
- Energía aprovechada por los trenes
- Energía no aprovechada (quemada en las resistencias de frenado de los trenes)

La comparación entre la fase 1 y la fase 2, nos permitirá determinar cual es la eficiencia de energía que se produce cuando los trenes utilizan o no el frenado con recuperación de energía, así como la energía que no es posible utilizar porque no existan otros trenes que estén consumiendo o que estén lo suficientemente cerca para consumir la energía que el que está generando.

**Fase 3:** Se realiza el balance energético de la instalación, considerando que los trenes circulan con recuperación de energía por frenado y que además en todas las subestaciones se dispone de inversor para revertir energía sobrante a otros sistemas externos de corriente alterna.

En estas condiciones, obtienen los siguientes valores:

- Consumo de energía por la tracción de los trenes
- Consumo de energía por los servicios auxiliares de los trenes
- Pérdidas en las subestaciones de tracción



- Pérdidas en la catenaria
- Energía máxima regenerada por los trenes
- Energía aprovechada por los trenes
- Energía no aprovechada (quemada en las resistencias de frenado de los trenes)
- Energía regenerada por los inversores de las subestaciones de tracción y enviada a una línea externa.

Mediante la comparación entre la fase 3 y la fase 2, nos permitirá analizar el aumento de eficiencia que puede existir cuando existen o no inversores en las subestaciones de tracción y por tanto establecer su viabilidad económica.

### 3.1. Simulación fase 1. Sin regeneración

Se realiza a continuación la simulación de la fase 1, donde no se tiene en cuenta la energía que producen los trenes en el frenado.

Se ha elegido el intervalo de tiempo entre el minuto 60 y el minuto 120 , en el que todos los trenes previstos están circulando y además los valores de los consumos y tensiones, ya se encuentran estabilizados.

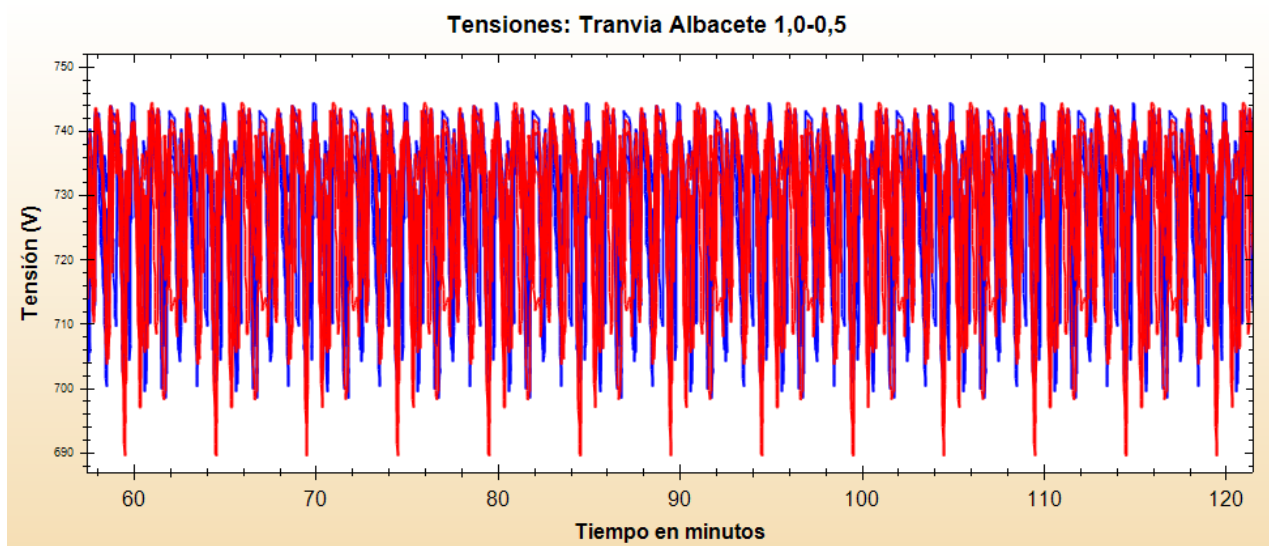


Figura nº 1. Tensión en el pantógrafo de los trenes.  
Circulación sin regeneración de energía por frenado.

En la figura nº 1 (tranvías ascendentes en rojo y descendentes en azul) se puede observar, para una tensión en vacío de 750 V, que el valor máximo de tensión en el pantógrafo de los tranvías es del orden de 744 V, y el valor mínimo llega a alcanzar los 690 V.

La potencia total en el conjunto de las subestaciones se representa por la siguiente gráfica

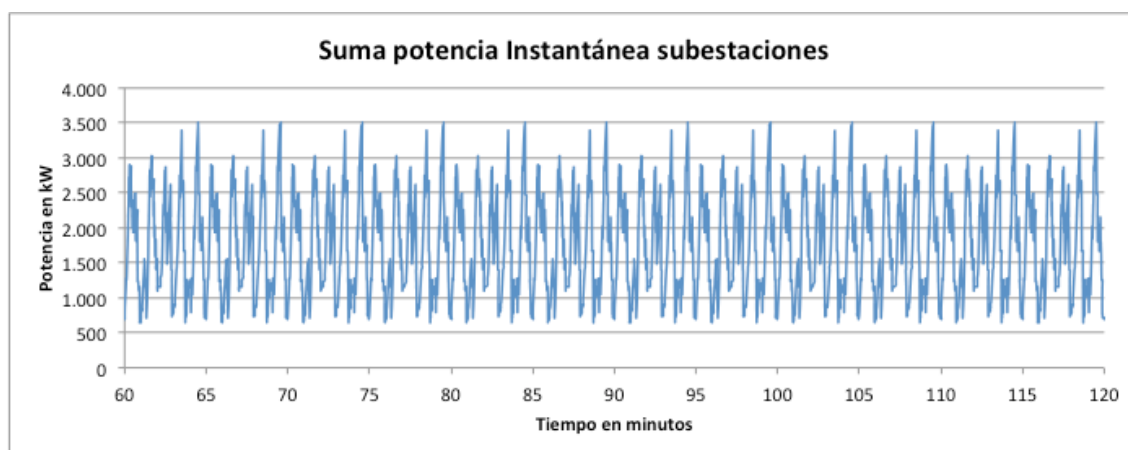


Figura nº 2. Suma total de potencias instantáneas en las SER.



La potencia instantánea de los trenes en cada una de las SER se indica en las siguientes gráficas:

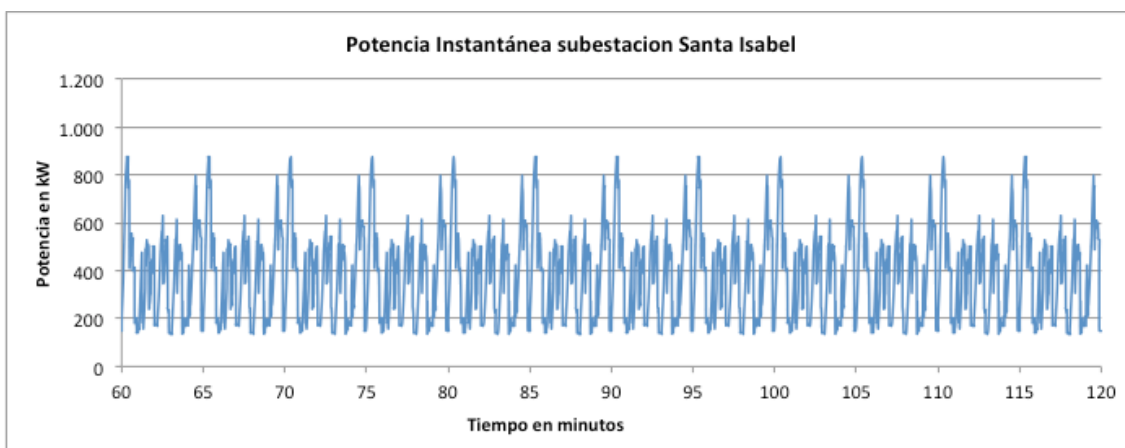


Figura nº 3. Potencia instantánea SER Santa Isabel

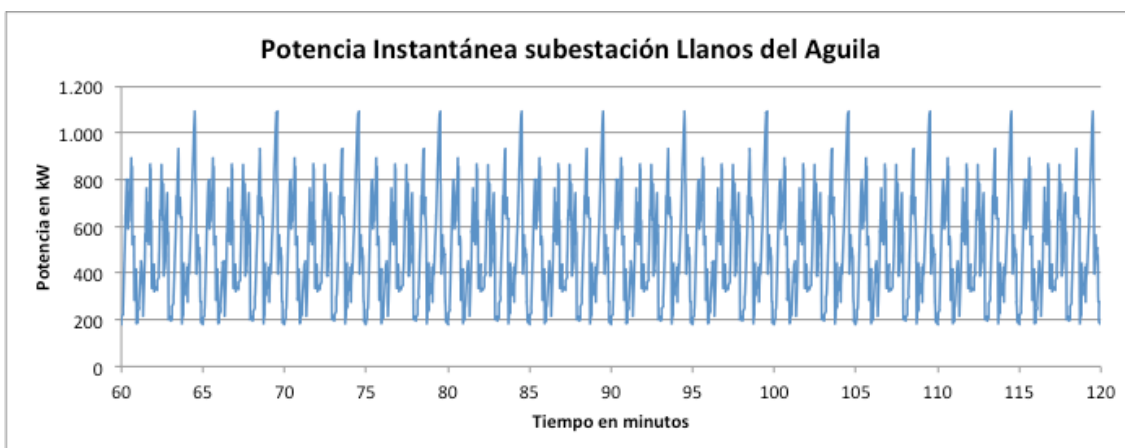


Figura nº 4. Potencia instantánea SER Llanos del Águila

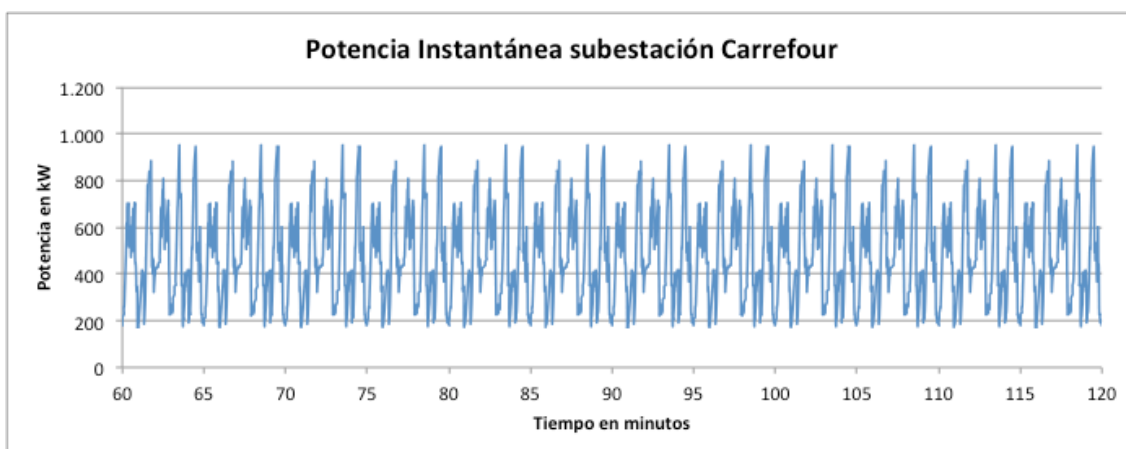


Figura nº 5. Potencia instantánea SER Carrefour

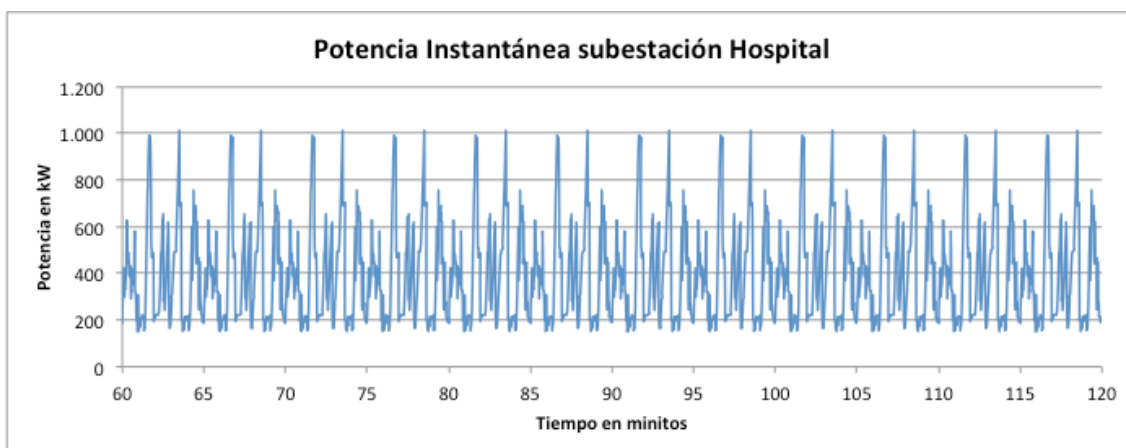


Figura nº 6. Potencia instantánea SER Hospital Provincial

	Energía Total Consumida [kWh]	Pérdidas en SER [kWh]	Pérdidas en catenaria [kWh]
SER Santa Isabel	386,87	7,81	
SER Llanos del Águila	494,52	6,60	
SER Carrefour	478,42	7,41	
SER Hospital	395,31	4,66	
Suma	1755,12	26,48	20,54

Tabla nº 5. Valores energía consumida y perdidas en las SER

Si representamos los distintos valores de energía consumida en el conjunto de las subestaciones de tracción, obtenemos la siguiente gráfica:

**Energía consumida en SS/EE  
( Sin regeneración por frenado)**

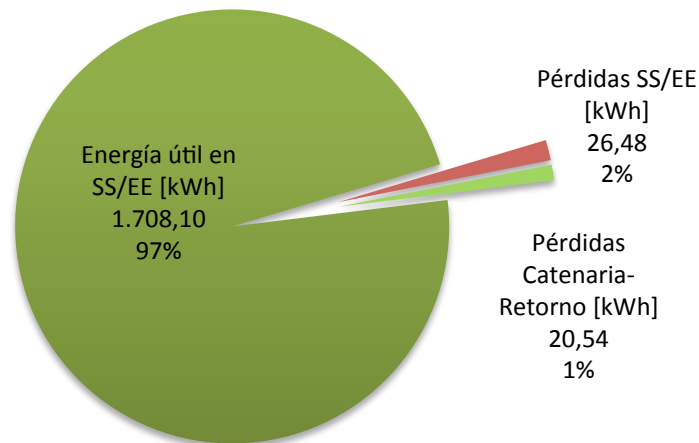


Figura nº 7. Energía consumida por las subestaciones de tracción, y distribución de la misma, considerando que los tranvías no generar energía en el frenado.

Donde la suma de todas las energías, la útil mas las correspondientes a las pérdidas se obtiene un total de 1755,12 kWh.

### 3.2. Simulación Fase 2. Con regeneración

En esta fase se realiza la simulación de funcionamiento de los trenes, considerando la capacidad de regeneración de energía en el proceso de frenado.

Los valores de tensión que se obtienen en el pantógrafo en esta fase, son los que se representan a continuación:

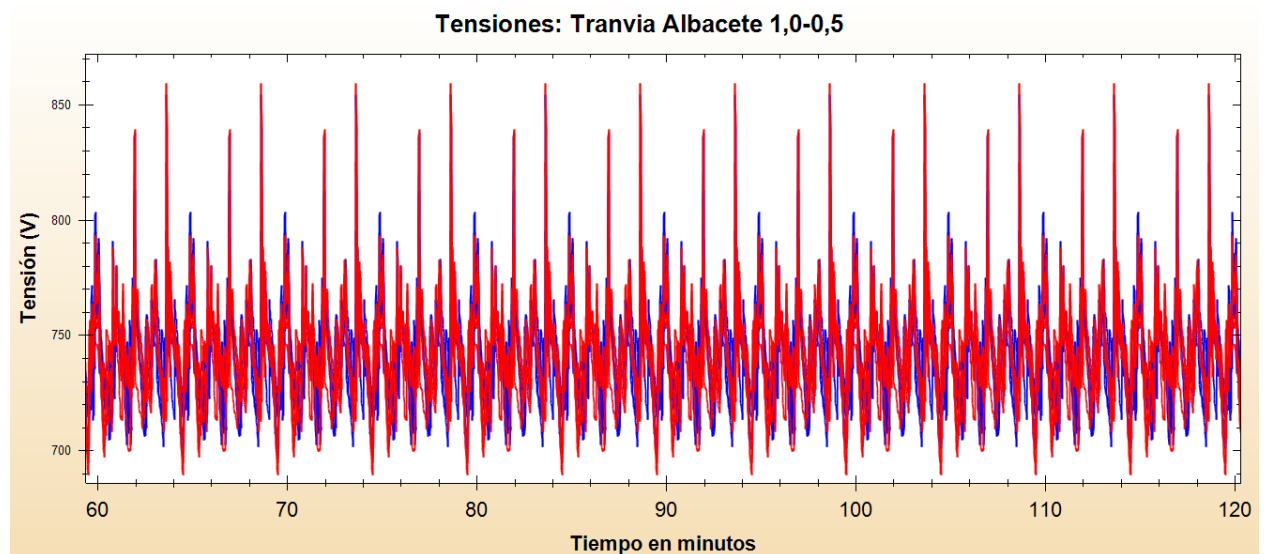


Figura nº 8 Tensión en el pantógrafo de los trenes.  
Circulación con regeneración de energía por frenado.

En el caso de circulación de los tranvías con regeneración de energía por frenado, (tranvías ascendentes en rojo y descendentes en azul) se puede observar, para una tensión en vacío de 750 V, que la tensión máxima que se alcanza en el pantógrafo, llega a alcanzar valores de 860 V, mientras que el valor mínimo, se queda en 690 V.

	Con regeneración de energía	Sin regeneración de energía
V máxima	860 V	744 V
V mínima	690 V	690 V

Tabla nº 6. Valores de Tensión máxima y mínima en los pantógrafos de los trenes con y sin regeneración por frenado

La diferencia de tensión máxima que se produce entre ambos casos (con y sin regeneración de energía por frenado) viene determinada porque los trenes que se encuentran frenando, se comportan como generadores de corriente, y esa corriente para ser consumida por otros tranvías, tiene que ser elevada de potencial, con respecto a la tensión nominal de las subestaciones de tracción.



El valor máximo de tensión en el tren “generador” se regula por el propio explotador del tren, y en cualquier caso no puede ser mayor que el valor indicado en la norma EN 50163, como  $V_{max1}$ , que en este caso le corresponde a 900 V.

Como criterio, se establece que cuando un tren se encuentra regenerando, el primer consumidor es el propio tren, mediante sus servicios auxiliares, si la energía generada excede de la consumida por los servicios auxiliares, entonces la enviará a otros trenes consumidores que puedan existir, mientras que la tensión en el pantógrafo del tren “generador” no exceda del valor  $V_{max1}$  indicado en la norma EN 50163, o un valor más restrictivo indicado por el explotador del tren. Si el tren “generador” aún dispone de energía generada, y se ha alcanzado el valor de  $V_{max1}$ , entonces la enviará a quemar en las resistencias de frenado del propio tren, hasta alcanzar el valor máximo de potencia quemada. Si aún así, quedara todavía energía de frenado disponible, esta no se podría utilizar y quedaría inutilizable para el freno eléctrico.

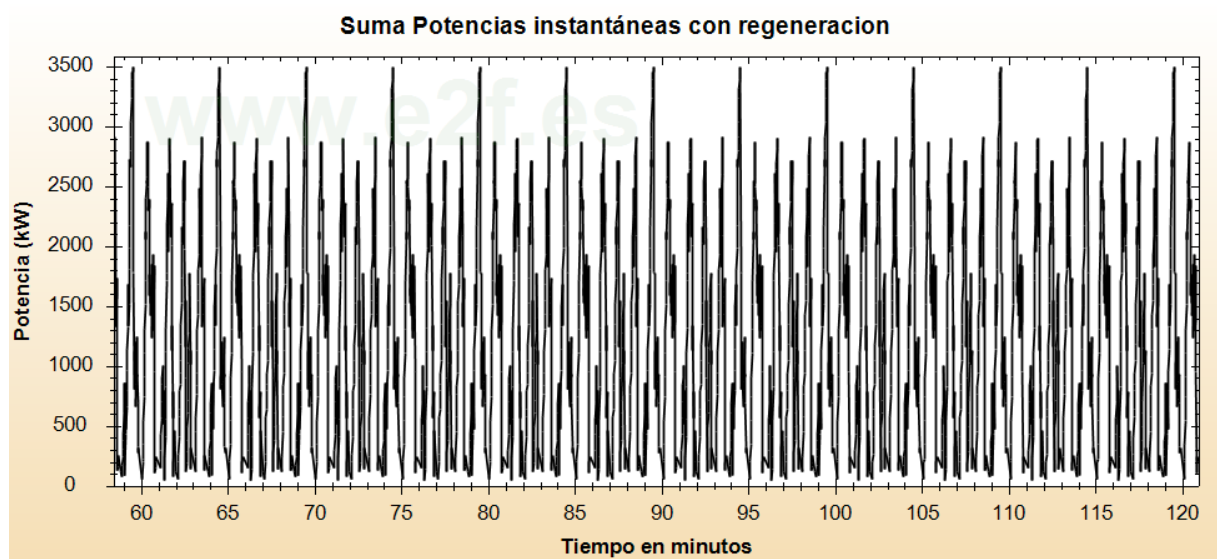


Figura nº 9. Suma total de potencias instantáneas en las SER.  
Caso de frenado con regeneración de energía

Si comparamos las potencias instantáneas de la figura nº 3 con la figura nº 9, observamos que las potencias máximas son aproximadamente del mismo valor, en el entorno de 3.500 kW, mientras que los valores mínimos en la figura nº 3, (sin regeneración) son del orden de 600 kW, y en la figura nº 9, llegan casi a valer cero. (El valor cero no llega a alcanzarse porque en las SER existen unas pérdidas en vacío de los transformadores que hay que tener en consideración)



	Sin regeneración		Con regeneración	
	Energía total consumida [kWh]	Pérdidas en subestaciones [kWh]	Energía total consumida [kWh]	Pérdidas en subestaciones [kWh]
SER Santa Isabel	386,87	7,81	240,38	4,40
SER Llanos del Águila	494,52	6,60	273,08	5,80
SER Carrefour	478,42	7,41	268,31	5,67
SER Hospital	395,31	4,66	255,45	5,38
Energía total aportada por las subestaciones	1755,12	26,48	1037,22	21,25

Tabla nº 7. Valores energía consumida y perdidas en las SER (con y sin regeneración de energía por frenado)

### Energía consumida en SS/EE ( Con regeneración por frenado)

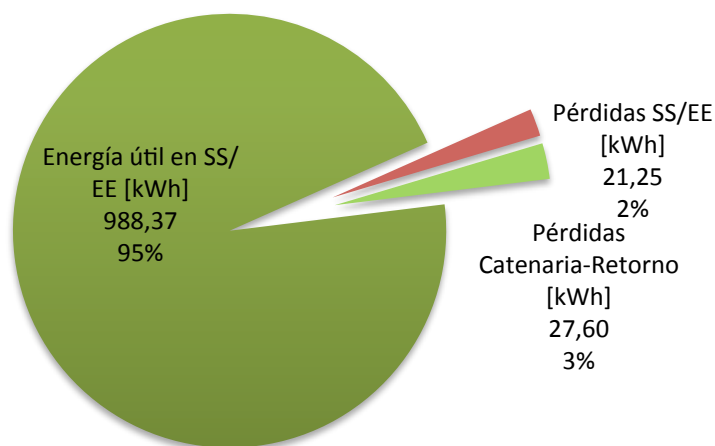


Figura nº 10. Energía consumida por las subestaciones de tracción, y distribución de la misma, en funcionamiento normal, es decir, considerando que los tranvías generan energía en el proceso de frenado.

En la tabla num. 7, se observa que la energía total consumida por las subestaciones ha pasado de 1755,12 kWh a 1037,22 kWh, lo que significa una disminución de consumo de 717,90 kWh, equivalente al 40,90 % de ahorro.

En este proceso de regeneración de energía debida al frenado, hay una parte que no puede ser aprovechada y tiene que ser enviada a los bloques de resistencias de frenado para transformarla en calor.

El valor de la energía que se quema en este estudio, es de 100,59 kWh, y se produce, en aquellas situaciones en que la energía generada es mayor que las necesidades de los consumos de los tranvías.

### Energía total regenerada

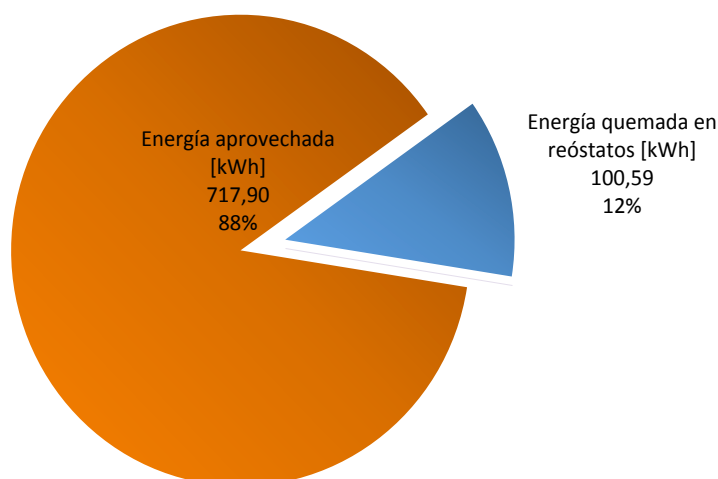


Figura nº 12. Descomposición del total de energía regenerada por los tranvías

Así entonces la energía que han generado los tranvías durante el proceso de frenado es igual a la suma de la diferencia entre los valores suministrados por la subestaciones en la fase 1 y la fase 2, incrementada con el valor de la energía que se ha enviado para quemar a los bloques de resistencias de frenado.

La posibles mejoras que se puedan implementar en la instalación, consistirán en aprovechar la energía que se envían a quemar, que suponen el 5,73% del total de consumo, (que es a su vez el 12% de la energía que se regenera en el proceso de frenado) aunque no toda esta energía se podrá aprovechar ya que al enviarla a otros sistemas como pueden ser Puntos de Consumo (convertidores de corriente continua a alterna, situados en un P.K. de la línea), o Inversores instalados en las subestaciones de tracción, ya que en principio, tendremos unas pérdidas por los rendimientos de dichos inversores, mas unas pérdidas en trasvasar la energía eléctrica desde los trenes “generadores” a las subestaciones donde está instalado el inversor.

Para el intervalo considerado en el presente estudio, entre el minuto 60 y el minuto 120, la energía que se envía a los bloque de resistencias de frenados se indica en la figura num. 13.

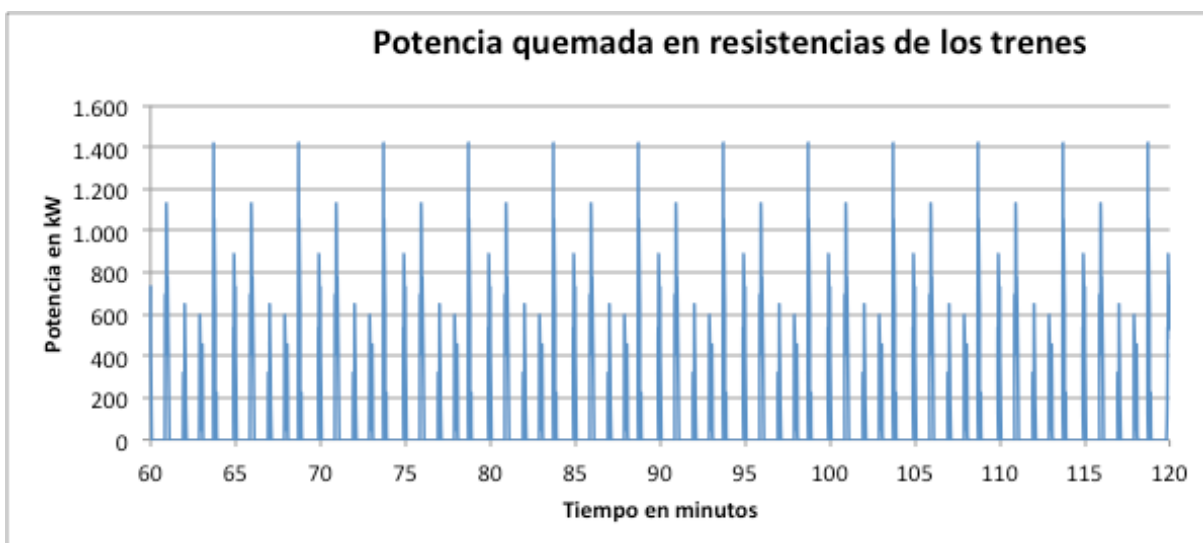


Figura nº 13. Potencia instantánea total quemada en las resistencia de los trenes entre el minuto 60 y el 120 (una hora)



Figura nº 14. Detalle de la potencia enviada al conjunto de los bloques de resistencias de frenado de los tranvías entre el minuto 70 y el minuto 80.

Distribución de potencia instantánea en cada una de las subestaciones de tracción:

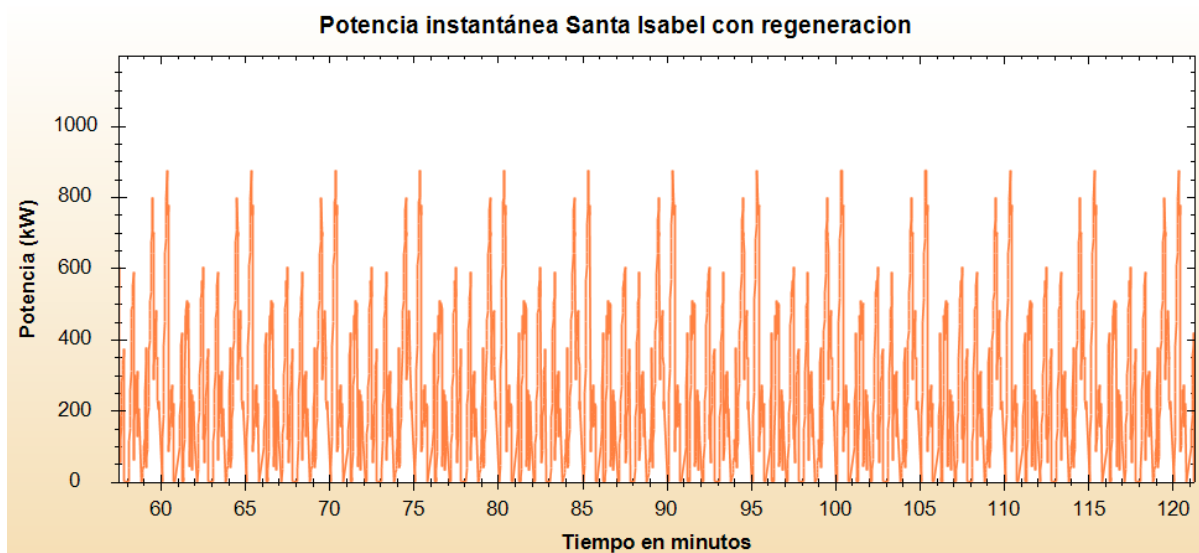


Figura nº 15. Potencia instantánea en la SER Santa Isabel cuando los trenes utilizan el frenado con regeneración de energía

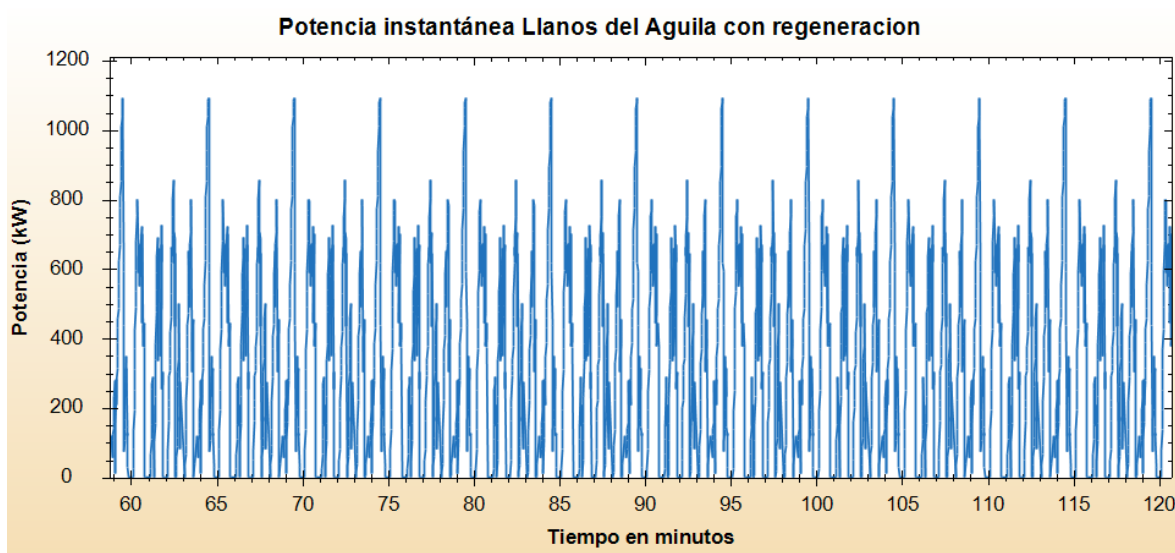


Figura nº 16. Potencia instantánea en la SER Llanos del Águila cuando los trenes utilizan el frenado con regeneración de energía

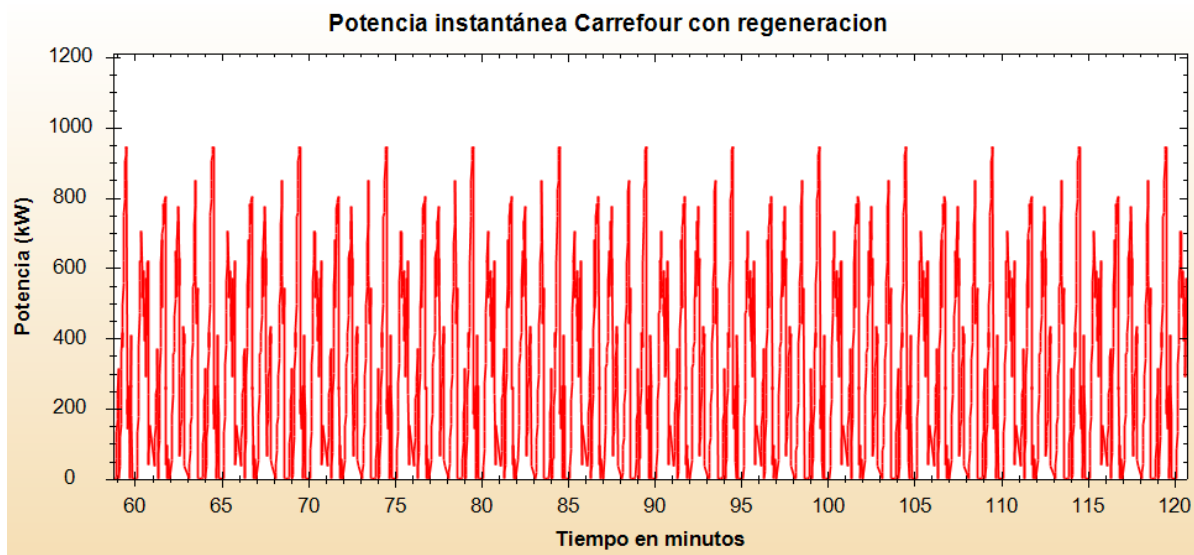


Figura nº 17. Potencia instantánea en la SER Carrefour cuando los trenes utilizan el frenado con regeneración de energía

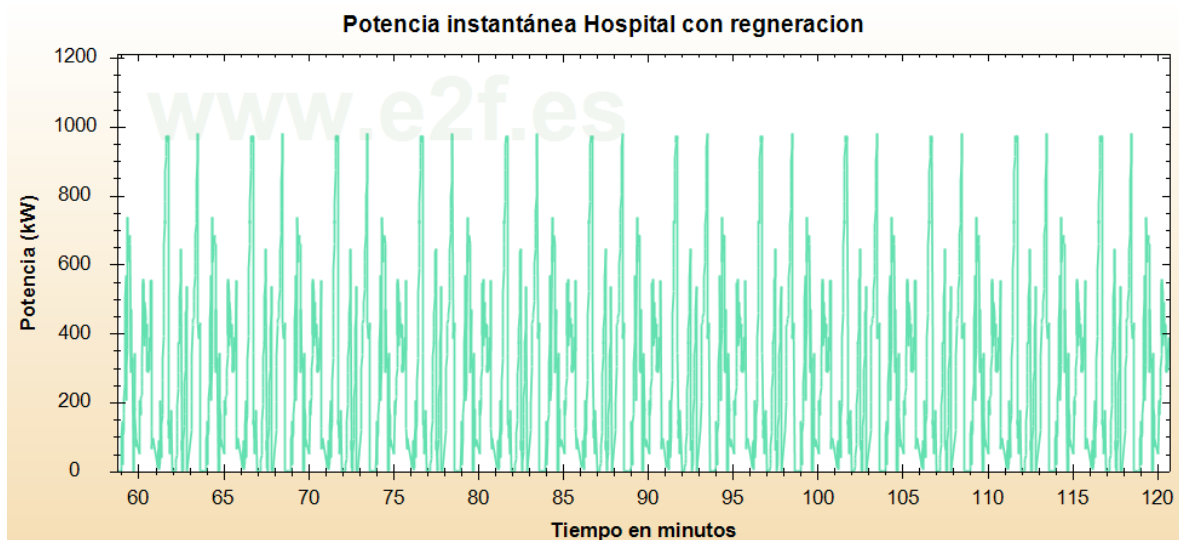


Figura nº 18. Potencia instantánea en la SER Hospital cuando los trenes utilizan el frenado con regeneración de energía



### 3.3. Simulación Fase 3. Con regeneración y subestaciones reversibles

En esta fase se realiza el análisis de la instalación considerando que los trenes circulan con recuperación de energía durante frenado y que además en todas las subestaciones se dispone de inversor para revertir la energía sobrante a otros sistemas externos de corriente alterna.

Para hacer el estudio de esta fase 3, consideramos que todas las subestaciones disponen de un inversor con inicialmente la potencia suficiente para convertir la corriente continua en alterna.

Mediante los sistemas electrónicos adecuados, podemos establecer que el inversor solamente funcionará como tal, cuando la tensión en sus bornes sea superior a un determinado valor que denominamos valor de referencia.

Sin este valor de referencia, el inversor funcionará como tal, pudiendo modificar únicamente su impedancia y por tanto el valor de corriente que circulará a través de él. Este proceso de funcionamiento consideramos que no es el adecuado, ya que puede recibir corriente de las subestaciones colaterales y de los propios trenes desde el mismo instante en que se inicie el frenado.

El criterio fundamental que debe presidir estas actuaciones es que la eficiencia energética consiste en reducir el consumo, pero no en aumentarlo aunque parte de la energía se devuelva, ya que hay una diferencia de costes entre la energía consumida y la energía devuelta, siendo evidentemente mayor el coste de la energía consumida que el ingreso por la misma energía devuelta, todo ello incluso sin tener en cuenta los rendimientos de su transformación.

En este estudio, y considerando los valores de tensión máximos que se producen en los trenes durante el proceso de frenado con regeneración de energía, se ha considerado como valor de tensión de referencia para el funcionamiento del inversor 800 V. Es decir, cuando el valor de la tensión en bornes del inversor supere los 800 V, entonces el inversor se comportará como tal, manteniéndose bloqueado mientras la tensión no supere dicho valor.

Los valores de tensión que se obtienen en el pantógrafo de los trenes en estas condiciones se representan en la figura nº 19

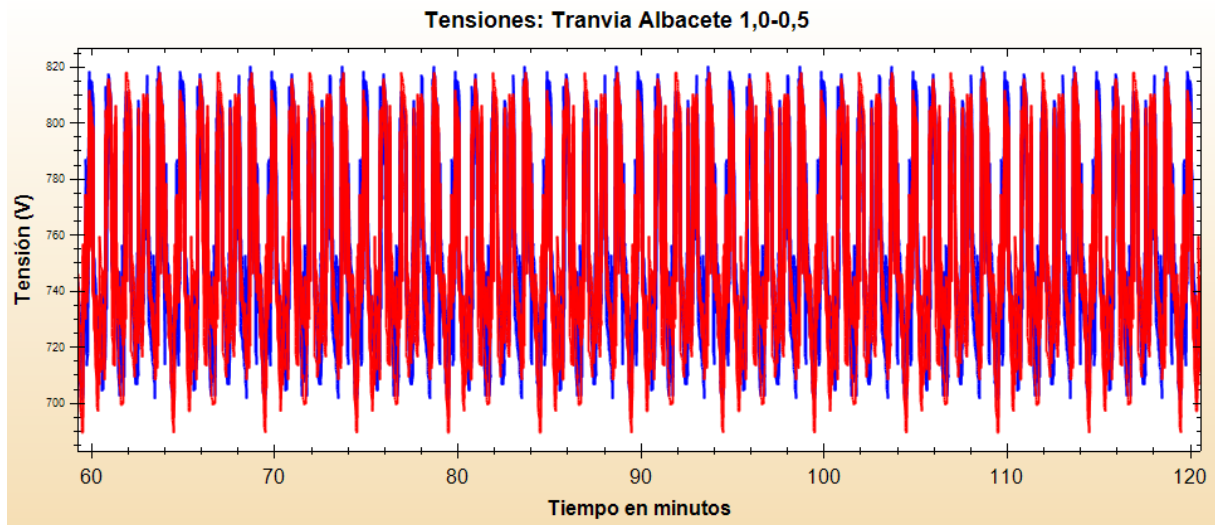


Figura nº 19. Valores de tensión en el pantógrafo de los trenes, en funcionamiento con frenado por recuperación y todas las SER reversibles.

Se puede observar que los valores de tensión máximos en el pantógrafo son del orden de 820 V, y los valores mínimos de tensión del orden de 690 V.

Si los comparamos con los valores obtenidos en las anteriores fases, se obtendrá:

	Con regeneración de energía + inversores	Con regeneración de energía	Sin regeneración de energía
V máxima	820 V	860 V	744 V
V mínima	690 V	690 V	690 V

Tabla nº 8. Valores de tensión en catenaria en distintas situaciones

El valor de tensión máximo de 820 V, se obtiene como consecuencia de haber establecido 800 V como valor de referencia en el inversor, y por tanto los 20 V de diferencia corresponden a los incrementos por caídas de tensión en la catenaria desde donde se encuentra el tren regenerando hasta el inversor situado en la subestación.

Mediante el software de simulación, podemos comprobar que en esta situación, a los bloques de resistencias de frenado de los trenes, no se envía ninguna energía.

Teóricamente, el valor de energía que se debería de enviar por los inversores a una red externa de corriente alterna sería la que correspondería en la fase 2 a la energía quemada en los bloques de resistencias de frenado de los tranvías, es decir, 100,52 kWh. Sin embargo como se puede observar en la tabla num. 9, no es así, ya que el consumo total de la instalación con regeneración pero sin subestaciones reversibles es menor que el consumo total con regeneración + reversibles, existiendo un incremento de 112,11 kWh.





Este dato consideramos que es muy importante, ya que se ha producido un incremento total en los consumos de la instalación, que en principio puede ir en contra de la eficiencia del sistema.

	Con regeneración sin rever		Con regeneración + rever	
	Energía total consumida [kWh]	Pérdidas en subestaciones [kWh]	Energía total consumida [kWh]	Pérdidas en subestaciones [kWh]
SER Santa Isabel	240,38	4,40	249,68	4,21
SER Llanos del Águila	273,08	5,80	320,18	6,99
SER Carrefour	268,31	5,67	302,23	6,31
SER Hospital	255,45	5,38	277,24	5,66
Energía total aportada por las subestaciones	1037,22	21,25	1149,33	23,17

Tabla nº 9. Valores Energía consumida y perdidas en las SER (con y sin regeneración de energía por frenado)

Este incremento en el consumo total de la instalación, se produce porque existen situaciones, en el proceso de frenado de los tranvías, donde parte de la energía que podría alimentar a otros tranvías, y que está a un valor superior a los 800 V de referencia, se desvía hacia la subestación en funcionamiento reversible y esta la envía hacia el exterior. Como consecuencia el tranvía, que tendría que recibir esa energía la tiene que tomar de la subestación mas cercana.

Es decir, en algunos casos, hemos cambiado el destino de la energía producida por la regeneración, y en lugar de enviarla a los tranvías, la enviamos hacia el exterior, y por tanto, esa misma energía, afectada de los rendimientos y pérdidas, se tiene que obtener de las subestaciones mas cercanas, no suponiendo por tanto un verdadero aprovechamiento energético, máxime cuando el precio de “venta” de dicha energía es menor que el precio de “compra” de la misma.

	Con regeneración y reversibles			
	Energía total consumida [kWh]	Pérdidas en subestaciones [kWh]	Energía total revertida [kWh]	Pérdidas en sub rever [kWh]
SER Santa Isabel	249,68	4,21	31,15	0,23
SER Llanos del Aguila	320,18	6,99	35,55	0,27
SER Carrefour	302,23	6,31	26,55	0,18
SER Hospital	277,24	5,66	35,64	0,32
Energía total aportada por las subestaciones	1149,33	23,17	128,89	0,98

Tabla nº 10. Valores Energía consumida y perdidas en las SER (con y sin regeneración de energía por frenado)



Si comparamos el consumo total que tienen las subestaciones, que por otra parte es la energía que se paga, tenemos lo siguiente:

Porcentaje de ahorro con los tranvías regenerando por frenado, pero sin subestaciones reversibles:  $(1755,12-1037,22)/1755,12 = 0,4090 \Rightarrow 40,90\%$

Porcentaje de ahorro con los tranvías regenerando por frenado y con subestaciones reversibles:  $(1755,12-1149,33)/1755,12=0,3452 \Rightarrow 34,52\%$

Así hemos pasado de consumir 1037,22 kWh cuando los tranvías están regenerando, a consumir 1149,33 kWh, cuando los tranvías están regenerando y además las subestaciones son reversibles, lo que supone un incremento de consumo en las subestaciones de  $1149,33-1037,22 = 112,11$  kWh.

Por otra parte la energía que enviamos al exterior, a través de la subestaciones reversibles, es de 128,89 kWh. Tenemos por tanto una disminución neta de potencia consumida de  $128,89-112,11 = 16,77$  kWh. Sin embargo esta disminución de energía neta, ha de estar afectada de la diferencia de precio entre el coste/venta de energía, por lo que a efectos económicos podría suponer pérdidas, sin contar los gastos referentes a la adquisición, financiación y costes de mantenimiento de las subestaciones reversibles.

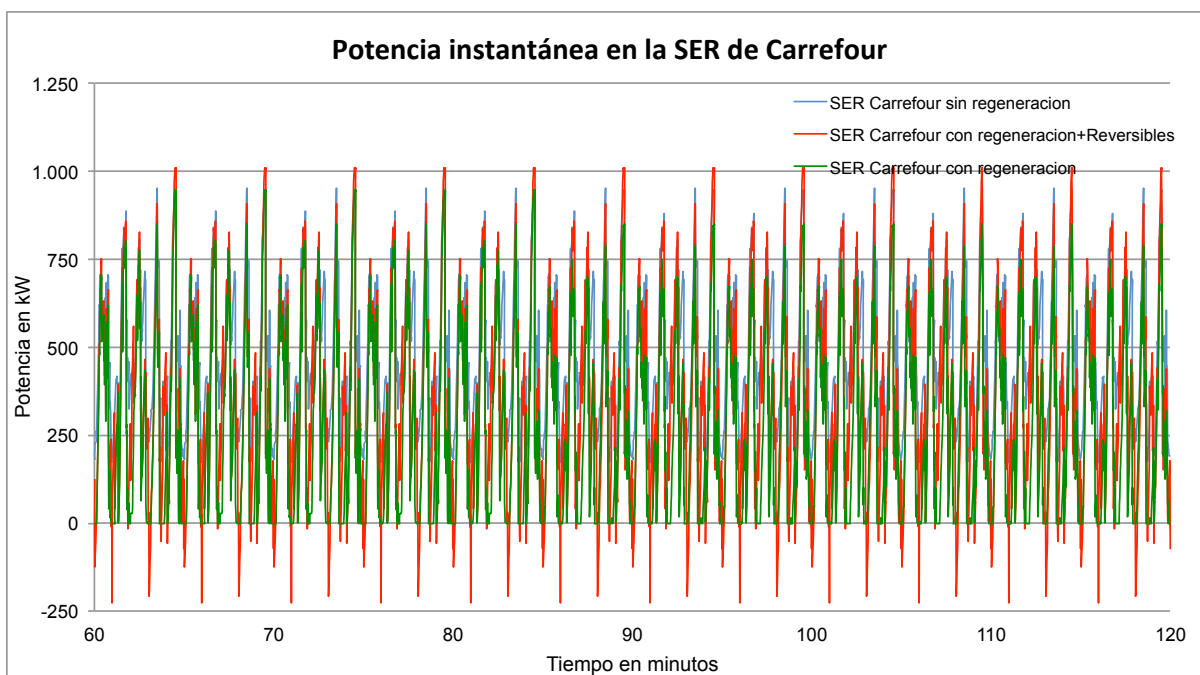


Figura nº 20. Comparación de potencias instantáneas en la subestación de Carrefour

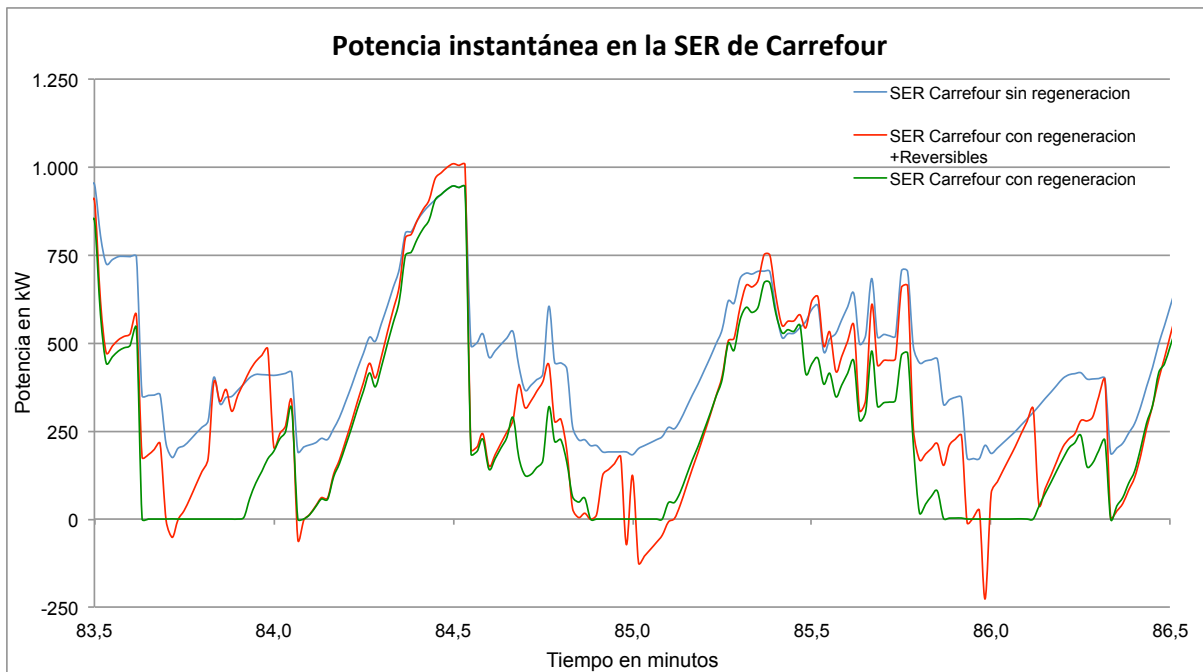


Figura nº 21. Detalle de potencias instantáneas en la subestación de Carrefour



#### **4. Resumen final:**

Hemos considerado una línea tipo de tranvías, de aproximadamente 11 km de longitud, con una frecuencia de circulación de 6 minutos por tranvía en cada dirección, con una distancia entre paradas del orden de 500 m.

Los resultados que hemos obtenido, nos indican que el frenado de los tranvías con regeneración de energía es altamente beneficioso y produce unas reducciones del consumo del orden del 40%.

Mediante otros análisis, hemos podido comprobar que las reducciones del consumo aumentan conforme reducimos la distancia entre paradas, siendo del orden del 45% del reducción para distancias medias del orden de 350 a 400 m.

De igual forma, conforme se aumenta la distancia entre paradas, la disminución del porcentaje de reducción de consumo, lleva implícito un aumento de la energía que se pierde en los bloques de resistencias de frenado de los trenes, y produce en el caso de existir subestaciones reversibles un aumento de la energía revertida a la red de corriente alterna.

Así, llegando a situaciones extremas, se puede decir, que en una situación de vía única, un tren de mercancías de gran tonelaje, obligado a frenar con cierta frecuencia para no sobrepasar la velocidad prefijada, producirá una gran energía de frenado, pero no podrá ser aprovechada por que o bien no existen otros trenes (vía única) o bien están situados a una gran distancia, por lo que en esa situación podría ser aconsejable la instalación de una subestación reversible en la zona de frenado.



## **5. Conclusiones:**

A partir del estudio realizado se llega a las siguientes conclusiones:

1º.- En criterio fundamental a tener en cuenta, consiste es diseñar la instalación para que consumir lo mínimo necesario para la explotación de los trenes. Es decir, no solamente es necesario cumplir la normativa respecto de las caídas de tensión, calentamiento de conductores, etc., sino que es necesario tener en consideración otras cuestiones como son las pérdidas que se producen tanto en la catenaria como en las subestaciones y que son una fuente de gasto improductivo.

2º.- Es necesario realizar un estudio previo de cada línea y en cada una de las condiciones de circulación (horas punta, horas valle, circulaciones actuales, circulaciones futuras, frecuencias, etc), que serán las que permitan definir los consumos necesarios para la tracción de los trenes, los consumos de los servicios auxiliares de los trenes, las pérdidas en la catenaria, las pérdidas en las subestaciones, las energías que se queman en los bloques de resistencias de frenado e incluso aquellas que no pueden ser generadas, y por tanto definir de forma clara las posibilidades de mejora de eficiencia. Es decir, debemos conocer las posibilidades de mejora de eficiencia de cada uno de los elementos que intervienen, para definir el plan de actuación.

3º.- No siempre toda la energía que se pierde (bien porque se quema en los bloques de resistencias de frenado o porque no puede producirse), se puede aprovechar totalmente. Ya que la energía se produce o puede producirse a lo largo de toda la línea), mientras que los equipos que la reciben, bien sean otros trenes o equipamientos que la conviertan de continua a alterna, tienen unas pérdidas tanto en el transporte, como en la propia conversión, por lo que es necesario determinar por una parte, la ubicación idónea de las subestaciones reversibles y por otro lado su potencia de evacuación.

4ª.- Por último, hay que tener en cuenta que no todos los programas existentes en el mercado, relativos al dimensionamiento eléctrico de las instalaciones de electrificación, disponen del proceso de cálculo para el control de la energía de frenado por recuperación ni del control de la energía que se puede revertir por las subestaciones.