



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA (IIT)**

**ANÁLISIS DEL REPARTO DE CARGA ENTRE SUBESTACIONES  
DE UNA RED METROPOLITANA FERROVIARIA**

**Proyecto Fin de Grado**

Directores: Prof. Dr. D. Álvaro Jesús López López  
Prof. Dr. D. Ramón Rodríguez Pecharromán  
Autor: D. Manuel Ángel Benedito Pallarés

**MADRID 2018**

## **AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO**

### ***1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.***

El autor D. Manuel Ángel Benedito Pallarés

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: ANÁLISIS DEL REPARTO DE CARGA ENTRE SUBESTACIONES DE UNA RED METROPOLITANA FERROVIARIA, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

### ***2º. Objeto y fines de la cesión.***

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

### ***3º. Condiciones de la cesión y acceso***

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

### ***4º. Derechos del autor.***

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

### ***5º. Deberes del autor.***

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.



**6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a Once de Julio de 2018

**ACEPTA**

Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:





Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
**“ANÁLISIS DEL REPARTO DE CARGA ENTRE SUBESTACIONES DE UNA  
RED METROPOLITANA FERROVIARIA”**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2017- 2018. es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Manuel Ángel Benedito Pallarés Fecha: 10/07/18

Autorizada la entrega del proyecto  
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: 

Fecha: 12 / 07 / 18



Fdo.: ÁLVARO LÓPEZ LÓPEZ Fecha: 11 / 07 / 18





## **ANÁLISIS DEL REPARTO DE CARGA ENTRE SUBESTACIONES DE UNA RED METROPOLITANA FERROVIARIA**

**AUTOR:** MANUEL ÁNGEL BENEDITO PALLARÉS

**DIRECTORES:** ÁLVARO JESÚS LÓPEZ LÓPEZ

RAMÓN RODRÍGUEZ PECHARROMÁN

**ENTIDAD COLABORADORA:** UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS ICAI

### **RESUMEN**

Este proyecto consiste en el análisis del reparto de carga entre las subestaciones en una red desequilibrada de metro. En una red equilibrada, el reparto de carga entre las subestaciones que la alimentan está balanceado entorno a la distribución geográfica y conexión de los elementos que conforman la propia red, pero en una red desequilibrada las reglas del juego cambian.

El objetivo de este proyecto es estudiar y analizar cómo afectan los desequilibrios que se dan en la red a este reparto de carga. No entra en los objetivos de este proyecto el desarrollo de ningún sistema o medida que atenúe o evite este impacto. Ese sería el siguiente paso.

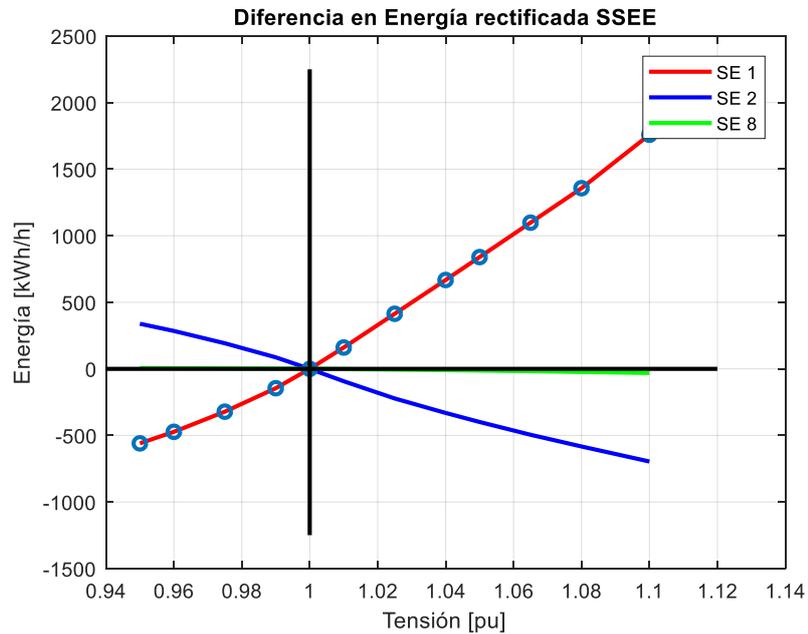
Es de sumo interés en la actualidad los estudios que se dedican a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas de transporte públicos. Aumentar la eficiencia de estos sistemas impacta de manera directa tanto en la factura pública de este servicio como en la sostenibilidad medio ambiental. En esta casa se han realizado numerosos estudios relacionados con este aspecto, analizando la viabilidad técnica y económica de implementar baterías en los trenes o de instalar subestaciones reversibles para devolver la energía regenerada durante el frenado.

Para realizar este proyecto se ha utilizado un simulador desarrollado íntegramente en la Universidad. El simulador tiene dos partes, una cuya función es determinar la estructura eléctrica de la red y establecer todos los datos necesarios para los futuros cálculos. La segunda parte resuelve el flujo de cargas con los datos de la primera parte siguiendo el método de Newton- Raphson.

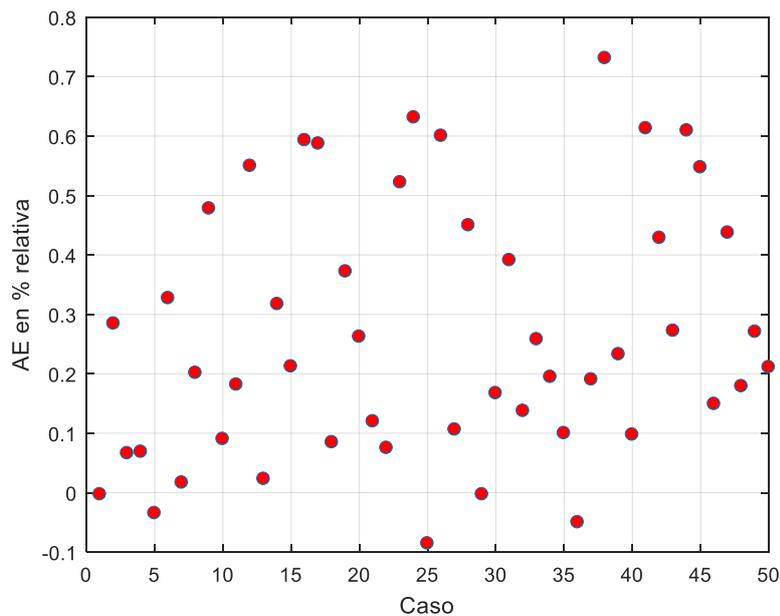
Este proyecto se ha dividido en dos partes, la primera se trata de dos casos de desequilibrio simplificado, es decir, con solo un punto de la red en desequilibrio, y la segunda representando un sistema real con perfiles de tensiones aleatorizados.

La primera parte permite vislumbrar las primeras conclusiones y determinar qué es lo que ocurre durante un desequilibrio. Lo que ocurre es que, a mayor tensión de desequilibrio, la red sufre mayores pérdidas, lo cual es totalmente contrario a lo

que ocurre en un sistema equilibrado. Al sufrir mayores pérdidas, la energía que pasa por las subestaciones es mayor.



En el caso realista se ha analizado el conjunto de situaciones para ver qué es lo que ocurre. El perfil de tensiones sigue una distribución normal alrededor de la tensión nominal para que se asemeje todo lo posible a un sistema real. Lo que ocurre es que la mayoría de los casos (el 90%) acaban rectificando una mayor energía que en el caso ideal, lo que significa que el reparto de carga no está equilibrado y que las pérdidas son mayores. La siguiente gráfica muestra qué porcentaje de energía se ha rectificado de más para cada caso:





Las conclusiones que se han obtenido de este análisis son que un sistema desequilibrado siempre va a ser menos eficiente que uno equilibrado por los motivos que se comentan y detallan en el proyecto. Medidas que se han pensado, pero no desarrollado, para atenuar o disipar este efecto son la implantación de transformadores con tomas en las subestaciones de tracción de la red o la instalación de rectificadores controlados mediante PWM. Estas medidas requieren una inversión y serían aplicables a medio plazo, pero son necesarios estudios sobre su viabilidad y rentabilidad.





## **ANALYSIS OF LOAD DISTRIBUTION BETWEEN SUBSTATIONS OF A RAILWAY METROPOLITAN NETWORK**

**AUTHOR:** MANUEL ÁNGEL BENEDITO PALLARÉS

**DIRECTORS:** ÁLVARO JESÚS LÓPEZ LÓPEZ

RAMÓN RODRÍGUEZ PECHARROMÁN

**SUPPORTIVE ENTITY:** UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS ICAI

### **ABSTRACT**

This project consists of the analysis of load sharing between substations in an unbalanced metro network. In a balanced network, the distribution of load between the substations that feed it is balanced around the geographic distribution and connection of the elements that make up the network itself, but in an unbalanced network the rules of the game change.

The objective of this project is to study and analyze how the imbalances that occur in the network affect this load sharing. The development of any system or measure that mitigates or avoids this impact does not fall within the objectives of this project. That would be the next step.

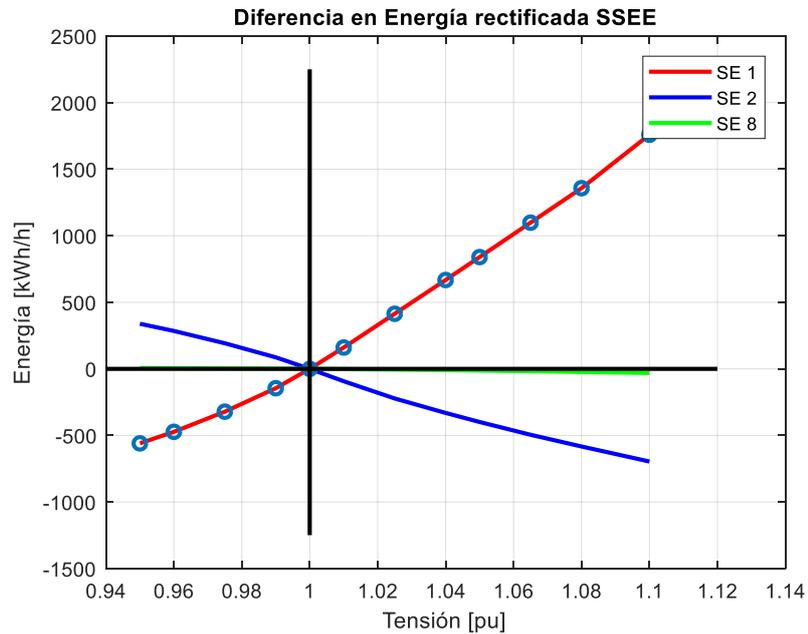
Studies that are dedicated to improving the efficiency and sustainability of public transport systems are of great interest at present. Increasing the efficiency of these systems directly impacts both the public bill for this service and environmental sustainability. In this house there have been numerous studies related to this aspect, analyzing the technical and economic feasibility of installing batteries in trains or installing reversible substations to return the regenerated energy during braking.

To carry out this project, a simulator developed entirely at the University has been used. The simulator has two parts, one whose function is to determine the electrical structure of the network and establish all the necessary data for future calculations. The second part solves the flow of charges with the data of the first part following the Newton-Raphson method.

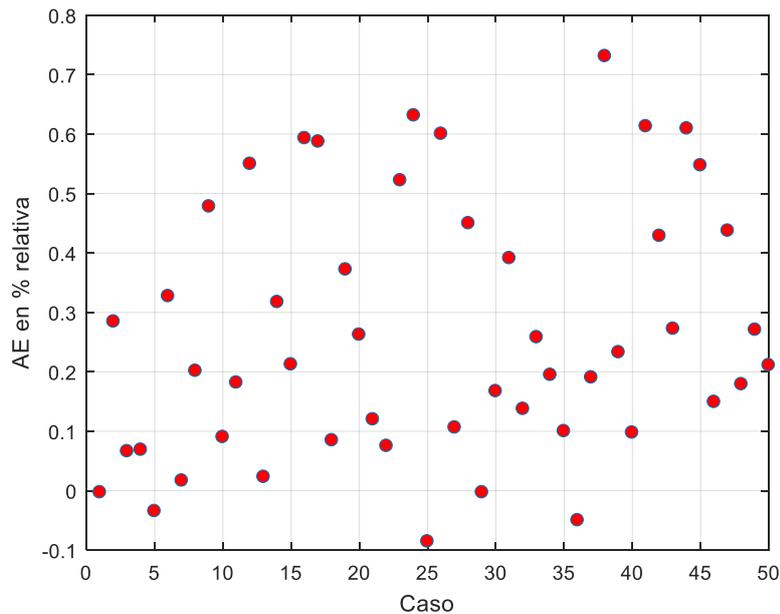
This project has been divided into two parts, the first is two cases of simplified imbalance, that is, with only one point of the network in imbalance, and the second representing a real system with profiles of randomized voltages.

The first part allows us to glimpse the first conclusions and determine what happens during an imbalance. What happens is that, the greater the unbalance voltage, the network suffers greater losses, which is totally contrary to what

happens in a balanced system. When suffering greater losses, the energy that passes through the substations is greater.



In the realistic case, the set of situations has been analyzed to see what is happening. The voltage profile follows a normal distribution around the nominal voltage so that it resembles as much as possible a real system. What happens is that most cases (90%) end up rectifying a greater energy than in the ideal case, which means that the load distribution is not balanced and that the losses are greater. The following graph shows what percentage of energy has been over-rectified for each case:





The conclusions that have been obtained from this analysis are that an unbalanced system will always be less efficient than a balanced system for the reasons discussed and detailed in the project. Measures that have been thought, but not developed, to attenuate or dissipate this effect are the implantation of transformers with taps in the traction substations of the network or the installation of rectifiers controlled by PWM. These measures require an investment and would be applicable in the medium term, but studies are needed on their viability and profitability.





UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA (IIT)

## ANÁLISIS DEL REPARTO DE CARGA ENTRE SUBESTACIONES DE UNA RED METROPOLITANA FERROVIARIA

### Proyecto Fin de Grado

Directores: Prof. Dr. D. Álvaro Jesús López López  
Prof. Dr. D. Ramón Rodríguez Pecharromán  
Autor: D. Manuel Ángel Benedito Pallarés

MADRID 2018





## Índice

1.- Introducción	21
2.- Objetivos	25
3.- Caso de estudio	27
4.- Estado del arte	31
5.- El Simulador	33
5.1.- Funcionamiento	33
5.2.- Aportaciones	37
6.- Caso simplificado	39
6.1.- Desequilibrio en Subestación 1	39
6.2.- Desequilibrio en Subestación 5	47
7.- Caso realista	55
8.- Conclusiones	61
9.- Trabajo Futuro	63
10.- Bibliografía	65





## Índice de Imágenes

1: Distribución normal de las tensiones de vacío .....	23
2: Esquema eléctrico de la red de metro <sup>2</sup> .....	27
3: Diagrama de Flujo de la energía consumida por el tren <sup>3</sup> .....	28
4: Diagrama de flujo de procesos del simulador en Excel <sup>6</sup> .....	35
5: Diagrama de flujo del proceso que sigue el simulador en MATLAB <sup>7</sup> .....	36
6: Esquema eléctrico de la red .....	37
7: Potencia instantánea por subestación .....	39
8: Potencia rectificada instantánea por subestación .....	40
9: Comparación de Energía Rectificada por subestación .....	42
10: Diferencia en Energía rectificada por subestación .....	43
11: Evolución de la diferencia en energía rectificada .....	44
12: Pérdidas por caso de desequilibrio .....	45
13: Evolución de las pérdidas con respecto a la tensión de vacío .....	46
14: Potencia instantánea en subestación .....	48
15: Energía rectificada total por subestación .....	50
16: Diferencia en la energía rectificada por subestación y desequilibrio .....	50
17: Evolución de la diferencia en Energía Rectificada .....	51
18: Pérdidas en catenaria y reostatos por caso de desequilibrio .....	52
19: Evolución de las pérdidas con la tensión de vacío .....	52
20: Distribución normal de tensiones de vacío .....	55
21: Distribución de los casos según la diferencia en energía rectificada total .....	56
22: Porcentaje de Energía rectificada de más por caso respecto al caso ideal .....	57
23: Relación entre pérdidas en catenaria y Energía rectificada relativas. ....	58
24: Relación entre pérdidas en reóstatos y Energía rectificada relativas. ....	59
25: Relación entre la diferencia en pérdidas de catenaria y en reóstatos .....	60





## 1.- INTRODUCCIÓN

Las redes metropolitanas ferroviarias son sistemas eléctricos imprescindibles en la vida moderna de las grandes ciudades. En un día típico laborable, el Metro de Madrid registra más de dos millones de viajes, jugando un papel vital en el transporte de muchas personas a sus puestos de trabajo. Por ende, el sistema de metro es objeto continuo de estudios para mejorar su sostenibilidad y eficiencia en el consumo de energía eléctrica tanto para abaratar la factura pública, como para reducir las emisiones derivadas de la generación de la energía consumida.

El aumento de la conciencia social sobre la contaminación y el cambio climático impulsan la necesidad de invertir en sistemas de transporte más limpios y sostenibles, que no generen residuos contaminantes, o que al menos, éstos sean mínimos o controlados. Es el caso de los sistemas ferroviarios metropolitanos, que, aunque sí generan contaminación derivada de la generación de la energía eléctrica que consumen, son más limpios que los transportes de motores de combustión.

Para ponernos en situación, el Metro de Madrid -sobre el cual está basado este proyecto- es un sistema con 294 kilómetros de red ferroviaria con una demanda anual de 584 millones de viajeros (2016) y para 2018 tiene planeada una inversión para la mejora del sistema de 126 millones de euros. El metro de Madrid, al igual que los de Barcelona, Valencia y otras capitales europeas es, en su mayoría, una red de doble vía con dos estaciones terminales, es decir, sus vías no son circulares, sino que tienen un principio y un fin, aunque existe la línea 6 que sí lo es.

El objetivo de este proyecto es estudiar y analizar, desde una perspectiva ingenieril, la eficiencia en el suministro eléctrico desde la Red (Corriente Alterna) hasta el sistema ferroviario (Corriente Continua). Para ello se ha utilizado un simulador en MATLAB que resuelve el flujo de cargas de la red ferroviaria mientras simula el movimiento de los trenes, que, simplificando, se tratan como cargas. Se entrará en más detalle sobre el simulador en el capítulo dedicado al mismo.

El esquema de suministro simplificado es el siguiente, se alimenta desde la red de distribución en corriente alterna, se transforma a la tensión requerida y se convierte en corriente continua mediante rectificadores de 12 pulsos. Una vez en corriente continua, la energía llega a la catenaria de la que se alimenta el tren, a una tensión nominal de 1500V.

El problema se encuentra en que pequeñas diferencias en la tensión de la red, que se deben a múltiples factores totalmente externos a la red ferroviaria e incorregibles desde nuestro punto de vista, causan desequilibrios en el reparto de cargas entre las subestaciones que están alimentando.

Estos desequilibrios en el reparto de la energía hacen que el sistema no actúe de la misma forma que cuando está en un estado equilibrado. Existen más pérdidas en el sistema, con la consecuente disminución de la eficiencia.

En este tipo de sistemas eléctricos se distinguen dos tipos de pérdidas; las pérdidas llamadas de catenaria, que son las pérdidas óhmicas derivadas del transporte de energía por la red, y las pérdidas en reóstatos, que son la energía que los trenes tienen que evacuar cuando frenan. Más adelante entraremos más en detalle en cómo funcionan.

### Caso de estudio

En este capítulo se detallará la situación que se ha estudiado mediante el simulador y se explicará cómo funcionan las pérdidas del sistema y cuáles son sus causas y cómo se pueden reducir. Se citarán diversos estudios sobre este aspecto, profundizando sobre todo en las pérdidas de reóstatos.

Eléctricamente, nuestro sistema está formado por 8 subestaciones y es el desequilibrio en las mismas el que vamos a estudiar. Un desequilibrio en una red eléctrica se da cuando existen puntos a la misma altura eléctrica no se encuentran a la misma tensión. Desequilibrios en la tensión de red se deben a multitud de factores, desde que distintas subestaciones pertenezcan a distintos distribuidores como a factores relacionados con la demanda o la generación.

Es muy raro tener un sistema equilibrado perfectamente. Lo normal es que existan pequeños desequilibrios en la red que distorsionen el equilibrio ideal. Tan raro como tener un sistema equilibrado perfectamente es tener un sistema con grandes desequilibrios. Un caso así implicaría un fallo grave en la red de distribución, por ejemplo, la pérdida de una línea por una falta, la caída de una torre o un apagón.

### El Simulador

Será un capítulo dedicado enteramente a explicar cómo funciona el simulador de MATLAB que se ha utilizado. Se detallará el modelado de la línea, el tren y de las pérdidas del sistema.

El simulador utiliza tres escenarios de tráfico distintos, con una frecuencia de tren cada 5,7 y 15 minutos, que son parecidos a los intervalos que se utilizan en la realidad, dependiendo del tipo de hora en la que nos encontramos. Para horas punta, los trenes tienen una frecuencia menor, de 5 minutos, para horas valle, tienen una frecuencia mayor, de 15 minutos, y para horas intermedias la frecuencia es de 7 minutos. Este sistema ha probado ser eficiente en el manejo de la demanda de trenes y es el que se utiliza en Metro de Madrid hoy en día.



### Caso Simplificado

En primera instancia se ha analizado un sistema eléctrico desequilibrado en un solo punto de la red y se ha analizado cómo ha afectado al reparto de carga entre el resto de las subestaciones en su estado ideal.

Es un caso simplificado porque es muy poco probable que se dé un solo desequilibrio en la red ya que todas las tensiones de todas las subestaciones suelen ser algo distintas a la nominal.

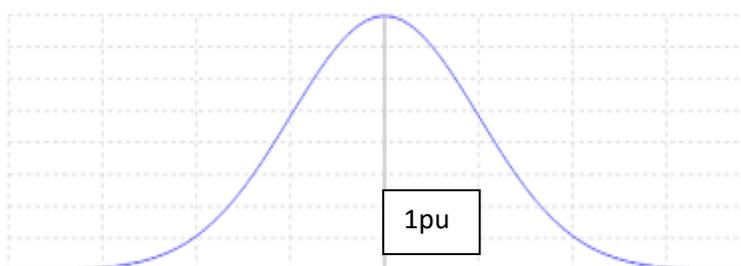
En este capítulo se analizarán dos situaciones de este tipo, con un solo desequilibrio en la red. Primero una situación con la subestación número 1 en desequilibrio. En este caso veremos cómo al estar en el extremo de la red afecta de una forma al reparto de carga del sistema. Después se desequilibrará la subestación número 5, que está en el centro de la red y se verá cómo afecta de forma diferente a cómo lo hacía el primer desequilibrio.

### Caso Realista

En este capítulo se da un paso más en el estudio y lo que se hace es analizar un sistema con tensiones aleatorizadas alrededor de la nominal, para intentar representar fielmente lo que ocurre en la realidad.

Se han simulado 50 casos con tensiones de vacío distribuidas según una normal alrededor de 1.00 pu, que es la media, y con una varianza de 0.05/3. Lo que se ha conseguido es que cada caso sea algo distinto al anterior y que podamos analizarlo como un conjunto y no caso por caso como en el anterior capítulo.

Se ha utilizado esta distribución de tensiones porque como ya hemos comentado antes, la inmensa mayoría de los desequilibrios que ocurren en la red son muy pequeños y no difieren más allá de  $\pm 0.03$  pu de la tensión nominal, aunque sí existan casos en los que haya desequilibrios mayores y también los analizaremos.



1: Distribución normal de las tensiones de vacío





## 2.- OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este estudio será comprobar y analizar cómo afecta la tensión de vacío (sin carga) de las mencionadas subestaciones de tracción del sistema metropolitano ferroviario al reparto de carga entre las mismas.

Para ello se comprobarán varios puntos:

- Influencia de la tensión de vacío unitaria del sistema en las pérdidas por reóstatos y de catenaria.
- Influencia de pequeños desequilibrios en el sistema en el reparto de carga y en las pérdidas tanto por reóstatos como de catenaria.
- Influencia de grandes desequilibrios en el reparto de cargas, correcto funcionamiento y pérdidas del sistema.

A pesar de que queda fuera de este proyecto implementar o desarrollar una forma de evitar o atenuar los efectos aquí descritos, sí pretende servir de base para futuros desarrollos de sistemas que mejoren esta situación y con ello la eficiencia del sector eléctrico metropolitano. Es por ello que se acotará el potencial de mejora, pero no se entrará en mayor detalle.

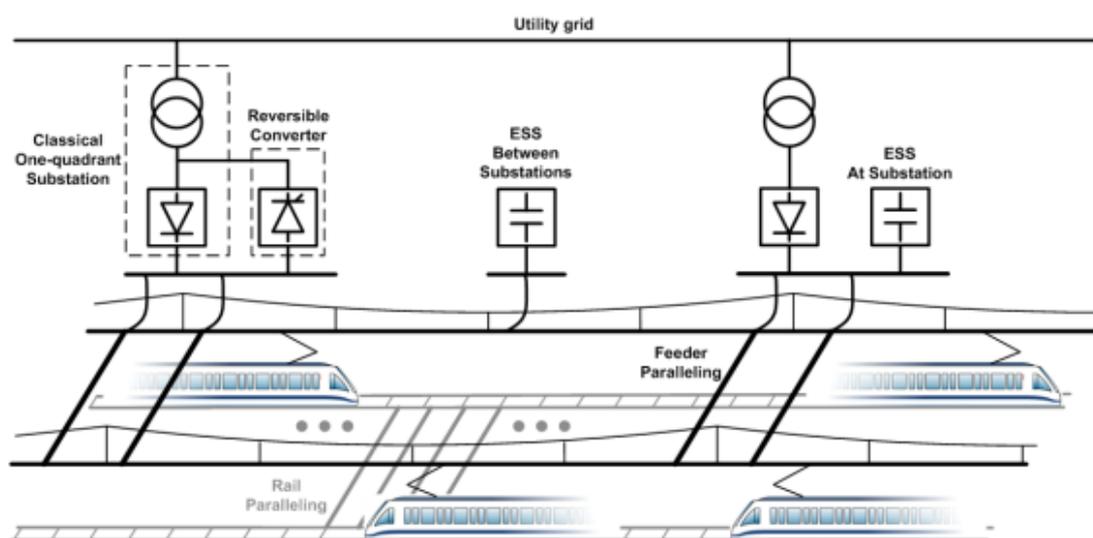


### 3.-CASO DE ESTUDIO

Para entender cómo se ha llevado a cabo este proyecto, lo primero es entender cómo funciona una red de metro y un tren en la misma. La energía llega a la red de metro desde la red eléctrica general de media tensión, normalmente a 20KV, primero pasa por unas subestaciones transformadoras (sobre las que basamos el análisis) que bajan la tensión hasta los valores adecuados para la rectificación, que se hace con electrónica de potencia y convierte la corriente alterna de la red en corriente continua, que es con la que funciona el tren, mediante rectificadores de doce pulsos.

Una vez llegados a este punto, el tren se alimenta directamente de un cable tendido a lo largo de la vía llamado catenaria. Es importante saber, que los trenes modernos cuentan con aparatos de electrónica de potencia que permiten que sean independientes de la tensión de la catenaria (Goodman,1998)<sup>1</sup>, y que la energía que reciben no dependa de este valor. Es decir, los trenes, eléctricamente hablando, se comportan como cargas móviles cuyo output de potencia es siempre el mismo en cierta posición y a una velocidad dada. Esto es posible porque los aparatos con los que van equipados los trenes regulan la entrada de corriente a los motores independientemente de la tensión de pantógrafo.

En la situación que vamos a analizar, el tren tiene un perfil de velocidad que se repite constantemente. Primero se encuentra parado en una estación, consume la energía necesaria para los sistemas auxiliares, después acelera, se pone a velocidad constante y por último frena hasta llegar a la siguiente estación y así de un extremo a otro de la línea.

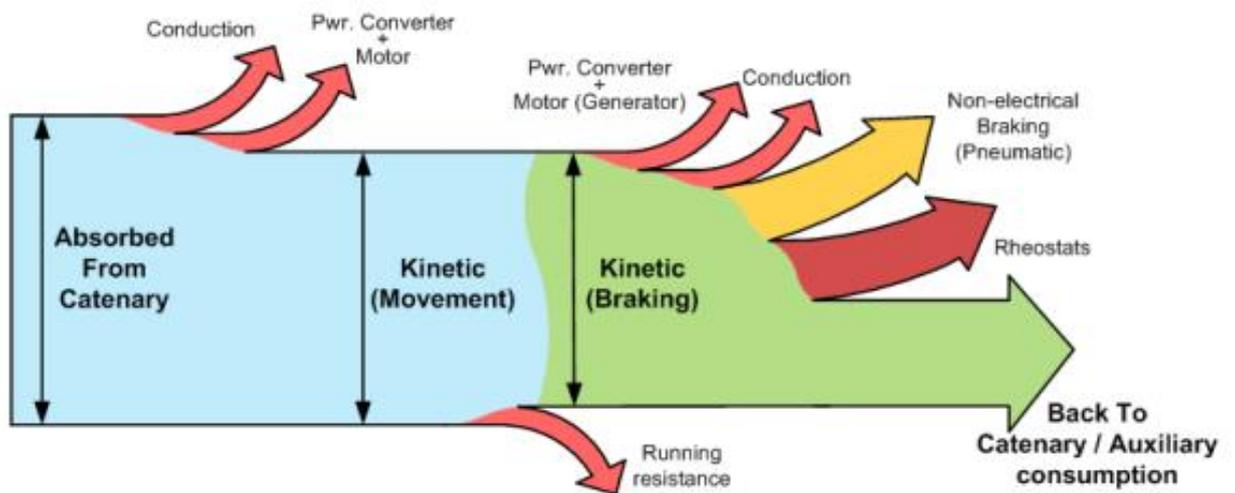


2: Esquema eléctrico de la red de metro<sup>2</sup>

En la imagen es un esquema eléctrico que recoge los principales elementos que tenemos en nuestra red. Se puede observar que hay un elemento que es un convertidor reversible. Este sería el aparato electrónico que nos permitiría devolver la energía sobrante de la red interna a la red de distribución general. Como se explicará más adelante, este aparato no está disponible en nuestra línea hoy en día.

De la energía que recibe el tren de la catenaria, alrededor del 85% se invierte en la tracción del mismo, la cual conlleva sus pérdidas por rozamiento como cualquier tipo de movimiento. Una vez en movimiento con velocidad constante, el tren consume sólo la energía necesaria para vencer la fricción y para alimentar los convertidores que manejan el motor. Al frenar, toda la energía que lleva el tren en forma de Energía cinética ( $E_K=mv^2/2$ ) se ha de transformar. La energía que puede ser regenerada y devuelta a la catenaria, que representa alrededor del 30% de la total que consume el tren, se utiliza en primera instancia para alimentar los sistemas de servicio del tren no relacionados con la tracción del mismo, comúnmente llamados servicios *auxiliares* (puertas, luces, etc...) y después se devuelve a la catenaria para que otro tren pueda usarla. Para que esto ocurra, la tensión del tren regenerador debe superar la de la propia catenaria.

El siguiente diagrama detalla de forma gráfica cómo se utiliza la energía que consume el tren desde la catenaria hasta que es regenerada:



3: Diagrama de Flujo de la energía consumida por el tren<sup>3</sup>

El problema viene cuando no hay un tren receptor de esta energía regenerada, que tiene que ser evacuada mediante reóstatos, que son unos disipadores de calor, sin poder ser aprovechada. El escenario ideal sería que esta energía que no se puede aprovechar por ningún otro usuario del sistema ferroviario, se devolviera a la red eléctrica, significando un ahorro directo en la factura de potencia.



Para que esto fuera posible, las SSEE implicadas deberían estar equipadas con sistemas reversibles AC/DC, lo cual no ocurre en la actualidad ya que estos circuitos son unidireccionales y cambiarlos requeriría una fuerte inversión, que aunque se rentabilizaría por sí misma por el ahorro que significa en la factura mensual de la energía, las administraciones públicas no lo consideran una prioridad y ahora mismo no hay prospecciones de que vaya a haber ningún cambio respecto a este tema en un futuro próximo.





#### 4.- ESTADO DE LA CUESTIÓN

En los sistemas metropolitanos ferroviarios el coste de la tracción llega a ser de dos tercios del coste total del sistema. Debido a ello, es natural que el énfasis de la mejora del sistema se ponga en este sentido, bien reduciendo las pérdidas y creando un sistema más eficiente, lo que conlleva menos consumo, o bien en la regeneración de parte de la energía consumida para poder ser utilizada de nuevo.

Respecto al primer punto, hay ya poco margen para la mejora ya que los materiales son los que son y sus límites físicos no van a cambiar. La curva de mejora de la eficiencia de cualquier sistema es bien conocida y sigue una ley logarítmica y no exponencial, es decir, cuánto mayor es la eficiencia de un sistema, mayor esfuerzo habrá que realizar para aumentarla. Cualquier mejora en este campo suele ser cara de implementar, con lo que lleva muchos años amortizar la inversión. Es por ello que hoy en día, la mayoría de los estudios enfocan el problema desde otra perspectiva distinta a esta.

La regeneración de energía se consigue, como ya hemos comentado, convirtiendo la energía cinética que lleva el tren en energía eléctrica mientras está frenando, en un proceso inverso al que se utiliza para acelerar el tren. Obviamente, este proceso tiene pérdidas y no se regenera toda la energía que se ha invertido en la aceleración, pero sí una buena parte que se devuelve a la red interna del sistema ferroviario para que pueda ser utilizada por otro tren para su tracción. A pesar de esto, hay situaciones en las que no es posible que esta energía sea utilizada de nuevo y se ha de evacuar mediante reóstatos, que la disipan en forma de calor.

Otra posibilidad sería la de devolver la energía regenerada a la red de distribución, afectando de forma directa en la factura de la electricidad. Pero esto hoy en día, no es técnicamente posible debido al tipo de subestaciones que hay instaladas en la red de metro de Madrid, aunque sí existe la tecnología para que esto fuera posible.

Ya en mayo de 2013, Metro de Madrid señala como una de las prioridades en pos de la eficiencia energética la instalación de 30 SSEE reversibles en régimen de *outsourcing* indicando que este gasto se amortizaría con el ahorro generado.

En la literatura hay muchos estudios sobre el impacto que una medida así podría generar, aunque en *Evaluation of the impact that the traffic model used in railway electrical simulation has on the assessment of the installation of a reversible substation* (D. Roch Dupré, A.P. Cucala, R.R. Pecharromán, A.J. López López, A. Fernández-Cardador, 2018) se analiza cómo en muchos de estos estudios se hacen demasiadas simplificaciones en el modelo, por lo que la precisión de los resultados no es la mejor. En este estudio también se propone el modelo que hay que usar a la hora de hacer simulaciones para sacar resultados del ahorro de energía que este tipo de medidas conllevarían.

Otro punto de interés para aumentar la eficiencia y sostenibilidad del sistema y que ha sido estudiado en esta escuela (*Analysis of the demand charge in DC railway systems and reduction of its economic impact with energy storage systems*, D. Roch Dupré, A.J. López López, R.R. Pecharromán, A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, 2017), es el de instalar elementos de almacenamiento de energía, como baterías, en los trenes. Esto permitiría reducir los costes por la demanda de carga, unos costes que no se han tratado mucho en la literatura pero que son muy importantes debido a la gran fluctuación de carga que caracteriza a los sistemas eléctricos ferroviarios.

Almacenando en estas baterías la energía regenerada durante el frenado, sería posible reducir los picos de potencia, que aumentan la factura. También evitaríamos las pérdidas de la energía que se disipa en los reóstatos, ya que se almacenaría. En el estudio que se ha citado, se entra en mucho detalle y se propone una solución a este problema.



## 5.- EL SIMULADOR

### 5.1.- Funcionamiento

Este capítulo está inspirado en la tesis doctoral del Dr. Álvaro Jesús López López, *Optimising the electrical infrastructure of mass transit systems to improve the use of regenerative braking*, 2016. Todo el conocimiento sobre el simulador expuesto aquí se basa en esta tesis y en el desarrollo diario del proyecto con su autor.

Antes de poder explicar cómo se ha llevado a cabo el proyecto, es necesario comprender el funcionamiento de la herramienta que se ha utilizado. Ésta es un simulador en MATLAB íntegramente desarrollado en el IIT (Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia Comillas) que modela al completo el sistema eléctrico de una red de metro. Dada la complejidad de las interacciones eléctricas, se ha utilizado un simulador multi-tren, que es lo común en este tipo de estudios.

Este proyecto no ha desarrollado el simulador ni ha aportado mejoras a la eficiencia o la precisión de los resultados que arroja, por lo que no se entrará en detalle en explicar el simulador. Pero sí es relevante comentar los principales aspectos y el funcionamiento de esta herramienta para entender cómo se ha llevado a cabo el presente proyecto. Los cambios que se han introducido se detallarán más adelante.

El simulador en Matlab realiza dos tareas, simula el movimiento de los trenes por un lado, y resuelve el sistema eléctrico por el otro. La primera parte consiste en calcular la posición y la demanda de energía de cada tren y en actualizarlas con el tiempo que dure la simulación. Para esto se basa en las propias características físicas del diseño de la vía en cuestión, y no será igual para todas las líneas, ni para todos los trenes, ya que dependen también del tipo de tren que se modele. La segunda tarea se trata de resolver el flujo de cargas del sistema eléctrico. Calcula las corrientes tensiones y potencias que salen y entran de cada nudo de la red.

El simulador tiene dos partes, una que está en Excel, que es la parte que tiene todos los datos de la red, el modelo, los valores de resistencia y de potencia de cada zona, etc. Este Excel genera para cada instante de la simulación una foto de cómo está el sistema y son estas fotos las que luego resuelve Matlab. Es importante comentar que no es banal saber el estado de cada elemento de la red en cada instante.

El modelo del tren que se ha utilizado es el que se suele usar en la literatura y que considera a los trenes como cargas independientes de la tensión de pantógrafo (Goodman 1998)<sup>4</sup>. Es importante saber también, que en la versión que se ha utilizado en este proyecto, el simulador no ha incorporado situaciones en las que haya ruido o los trenes se bloqueen unos a otros en algún punto como sí puede pasar, aunque raramente, en la realidad.

Sobre el modelo de la red de alimentación eléctrica, existen varios elementos a tener en cuenta. El primero es el transformador de las subestaciones de tracción, para los cuales se ha utilizado el modelo lineal tradicional. Otro elemento vital del sistema es el cable de alimentación de los trenes, y en sistemas ferroviarios DC se puede hacer de dos formas. La primera es mediante la ya mencionada catenaria y la segunda es mediante el llamado tercer rail. En este simulador se ha utilizado el modelo con tercer rail.

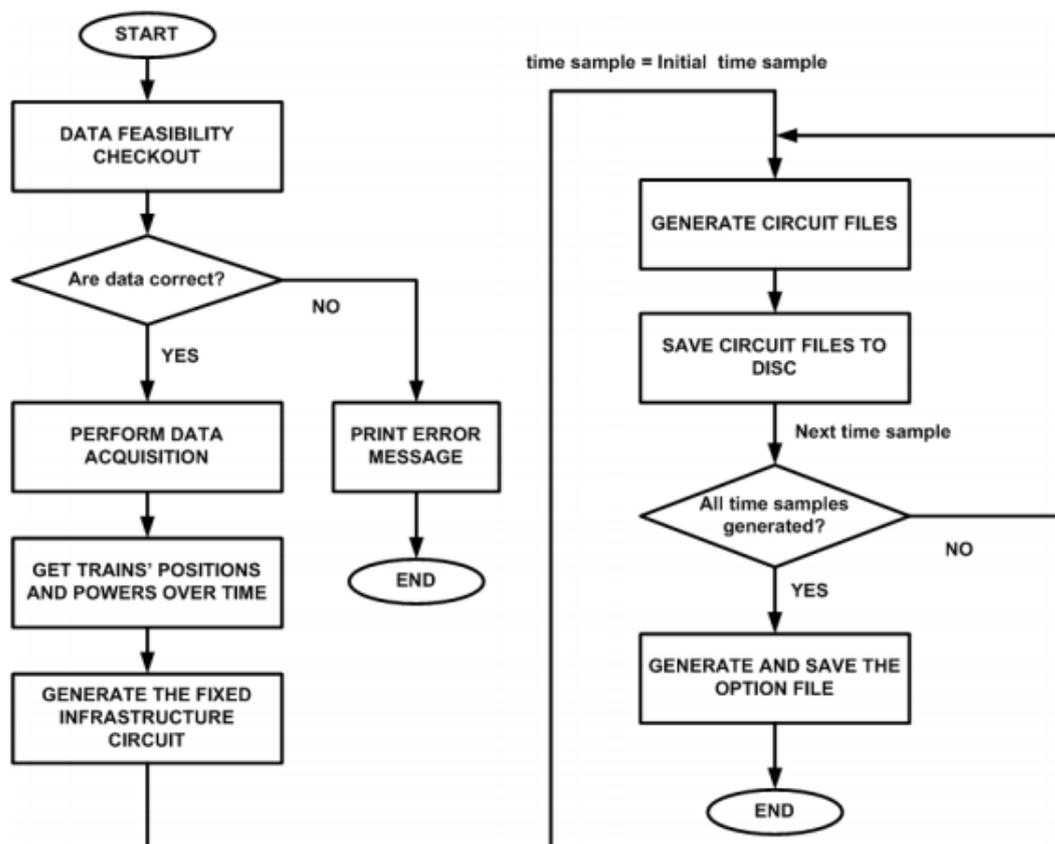
También hay que tener en cuenta la forma en la que se devuelve la corriente del tren a las subestaciones, que se suele hacer mediante los railes o el propio terreno. Esto suele dar problemas de tensión en el material y han de ser debidamente controlados.

Por último, la rectificación de la corriente alterna a corriente continua la hacen los rectificadores, que están formados por diodos no controlados. El modelo que se ha utilizado es el que está más extendido en la literatura y se presenta en (Seguier, Labrique, 1993)<sup>5</sup>. En este modelo se desprecian las pérdidas óhmicas que se pudieran dar en este elemento ya que son mínimas y no son el efecto dominante.

Una vez conocidas las bases sobre las que se asienta el simulador, se puede entender cómo funciona. Como ya hemos mencionado, el simulador tiene dos partes, una en Excel y otra en Matlab. La parte de Excel sirve de interfaz para introducir todos los datos de todos los elementos de la red. Estos datos incluyen la resistencia de cada elemento, su tensión y corriente nominales y las potencias a las que trabaja. También incluye qué tipo de nudos hay en la red y cuáles son las interacciones entre ellos.

Una vez establecidos los parámetros de la simulación, el Excel lo que hace es hacer una *snapshot* para cada instante y esta foto contiene todos los datos de la situación todos los elementos. Estas fotos son las que después analizará Matlab y con los datos que hay en ellas se resolverá el flujo de cargas en cada situación.

El diagrama de flujo que sigue el funcionamiento de la parte de Excel es el siguiente:

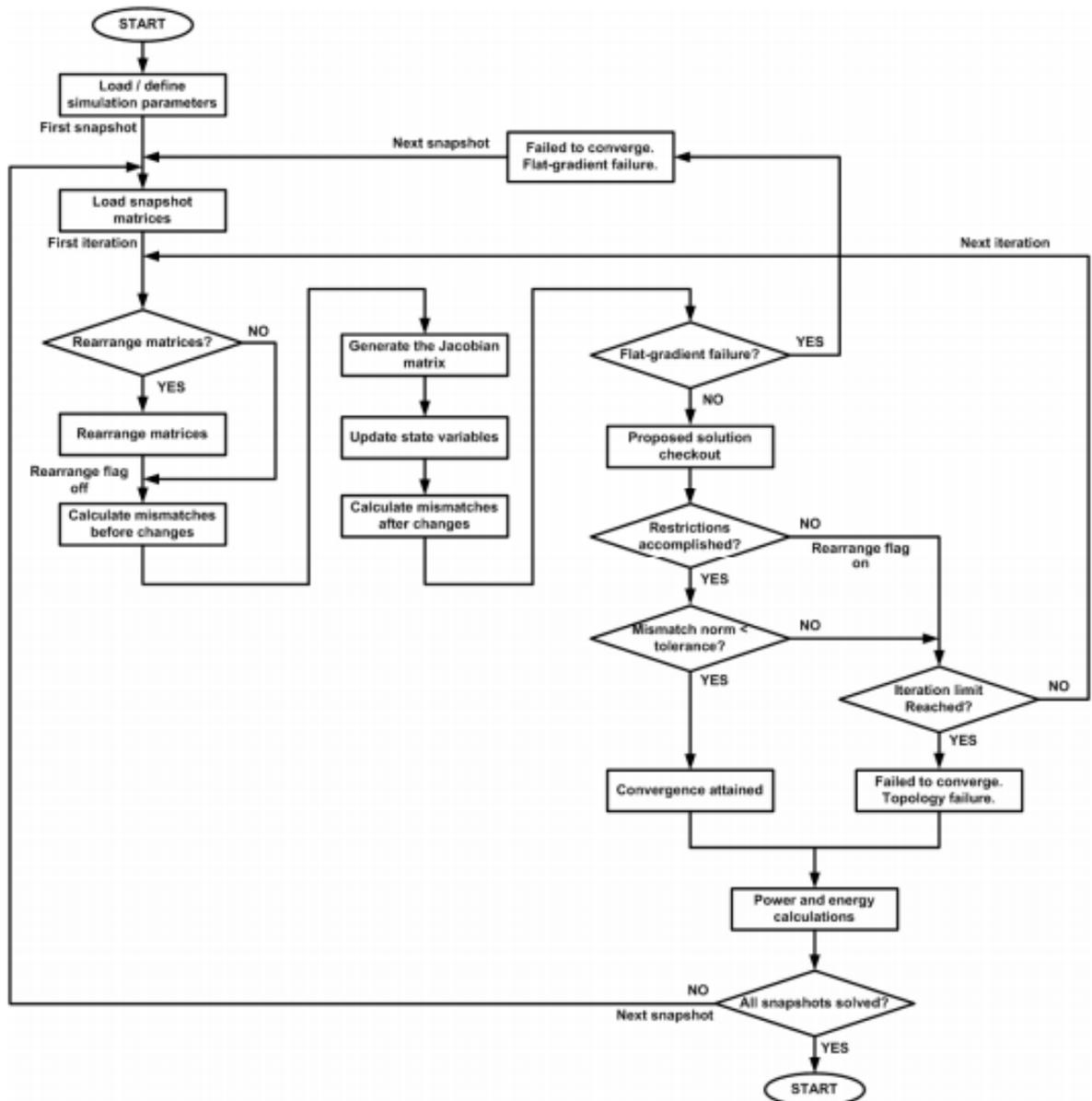


4: Diagrama de flujo de procesos del simulador en Excel<sup>6</sup>

Como se puede ver en el diagrama de flujo, el Excel verifica que los datos sean factibles y que puedan corresponder a un sistema real, sino lo son, el programa da error y termina el proceso. Después simula el movimiento de los trenes, dando su potencia y posición para cada instante y generando la estructura eléctrica fija después. Por último, genera todos los archivos, los llamados *snapshots*, y no para hasta terminar de crearlos todos.

Una vez en Matlab, el simulador lo que hace es resolver el flujo de cargas en cada situación. Hay distintas formas de resolver el flujo de cargas, y aquí se ha utilizado el método más común que es el de Newton-Raphson para iterar hasta dar con la solución del sistema o un punto suficientemente cercano a ella.

El diagrama de flujos del proceso de iteración para cada *snapshot* es el siguiente:



5: Diagrama de flujo del proceso que sigue el simulador en MATLAB 7

Como se puede ver en el diagrama, el proceso comienza con el programa cargando los archivos que contienen los datos. Primero reordena las matrices si es necesario, calcula los mismatches antes de comenzar los cálculos para generar la matriz Jacobiana que después necesitará. Actualiza los valores de las variables de estado y vuelve a calcular los mismatches. Con estos valores revisa que las restricciones se cumplan y que no haya habido ningún error de cálculos. Si se cumple todo esto, verifica que el valor de los mismatches sea lo suficientemente cercano a cero como para considerar que se ha conseguido la convergencia. Si se da esto, calcula los valores de potencia y energía de la simulación y pasa al

siguiente archivo. Si no sucede nada de esto, hace otra iteración hasta dar con la solución o un punto suficientemente cercano a ella. También hay una restricción sobre el número de iteraciones máximo que se pueden realizar para una misma foto, que son 100 iteraciones. Esto consigue que el tiempo de simulación no crezca exponencialmente para fotos o situaciones con datos erróneos o que no convergen.

## 5.2.- Aportaciones

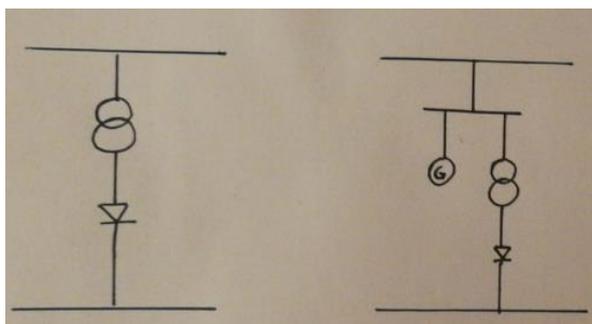
Por último, comentar los cambios que se han realizado al simulador ya existente para acondicionarlo al estudio de este proyecto.

El estudio de la tensión de vacío de las subestaciones de tracción de nuestra red hace necesario que esta tensión sea distinta, como ocurre en la realidad. La estructura eléctrica fija que estaba diseñada en Excel no permitía que esto fuera posible, ya que todas las subestaciones estaban conectadas a la red de distribución que actuaba como un nudo de tensión conocida, igual a la nominal, y que se tomaba como origen de ángulos del sistema, es decir, este nudo se tomaba como el slack.

El cambio más importante que se realizó fue incorporar un nudo PV en cada subestación y será la tensión de este nudo la que después se modifica y llamamos tensión de vacío de subestación. El resto de la infraestructura aguas abajo se dejó tal y como estaba. Lo que nos permite este cambio es poder establecer una tensión de vacío distinta para cada estación, algo que no era posible antes.

Aunque este cambio es fácil de explicar en cuanto al esquema eléctrico, hubo que realizar modificaciones en el código del simulador. Tanto a la estructura eléctrica fija que había en Excel, como en el código que resuelve el flujo de cargas en Matlab. Se cambió la forma en la que se obtenían los datos de los nudos, adecuando el código a la nueva estructura, y se cuidó que las matrices Jacobianas que permiten el cálculo de los mismatches en cada iteración se siguieran calculando de forma adecuada.

El esquema de la nueva estructura eléctrica comparada con la anterior es el siguiente:



6: Esquema eléctrico de la red



## 6.- CASO SIMPLIFICADO

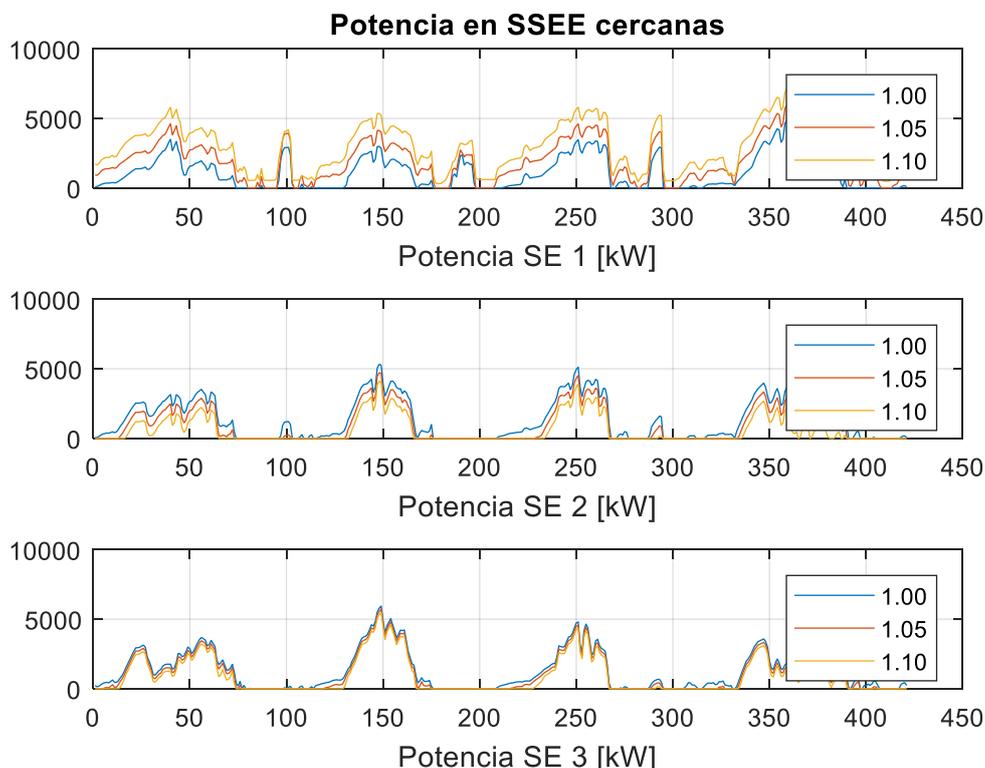
En este capítulo vamos a analizar el primer caso de desequilibrio en la tensión de vacío de las subestaciones de la red. Como ya se ha comentado previamente, primero se verán los resultados que provoca un desequilibrio en una subestación en un extremo de la red, y después cómo cambian estos para un desequilibrio en una subestación en el centro de la red.

En este caso simplificado se considerarán dos situaciones de desequilibrio, con 1.05pu y 1.10pu, y se compararán con el caso base. Se considerarán cuatro puntos en este análisis; la potencia rectificada, la diferencia en potencia rectificada respecto al caso base, y las pérdidas, tanto de reóstatos como en catenaria.

### 6.1.- Desequilibrio en SE 1

En este caso, el desequilibrio se va a provocar en la primera subestación de la red. El resto de las subestaciones estarán a tensión nominal, que es su estado ideal. Para analizar los resultados, habrá que compararlos con un caso considerado ideal, y éste obviamente será cuando se dispone de un sistema totalmente equilibrado.

Lo primero que vamos a comparar es la potencia rectificada por subestación en cada instante de la simulación. Los siguientes gráficos muestran esto para cada valor de desequilibrio:

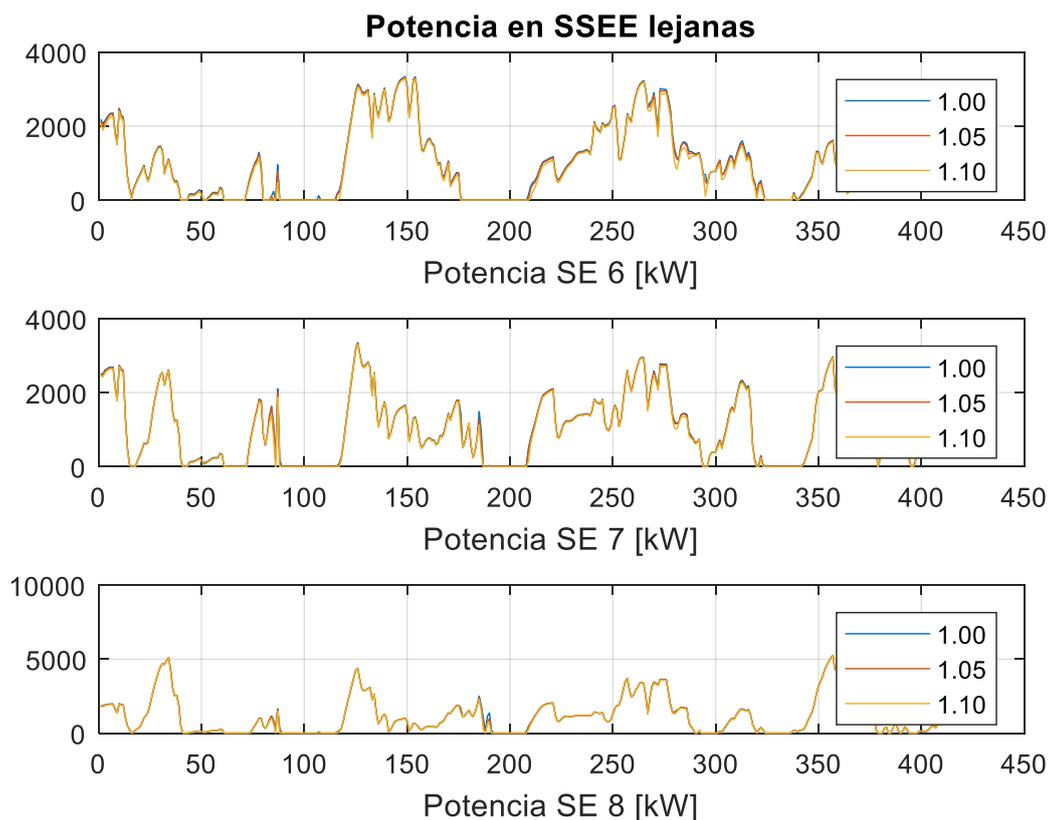


7: Potencia instantánea por subestación

Como se puede observar, la curva de potencia instantánea en la subestación de desequilibrio es distinta para los tres casos expuestos. También podemos ver que la potencia que rectifica la subestación desequilibrada es mayor, cuanto mayor es el desequilibrio. Se ahondará más en este aspecto más adelante.

Otro punto a destacar de estas curvas de potencia es cómo afecta el desequilibrio a la potencia que rectifican las subestaciones cercanas. Como el desequilibrio es en la subestación uno, las subestaciones más afectadas serán la dos y la tres. En el gráfico también están sus gráficas de potencia instantánea, y como se puede observar, ocurre lo contrario a la situación de la subestación numero uno.

En la subestación dos, la potencia rectificada instantánea es menor para cada caso de desequilibrio. En la tres en cambio, la diferencia es mínima entre los tres casos, por lo que se puede empezar a esbozar las primeras conclusiones de este análisis. Si se comprobaran las mismas gráficas para subestaciones aún más lejanas, se vería que son exactamente iguales para los tres casos.

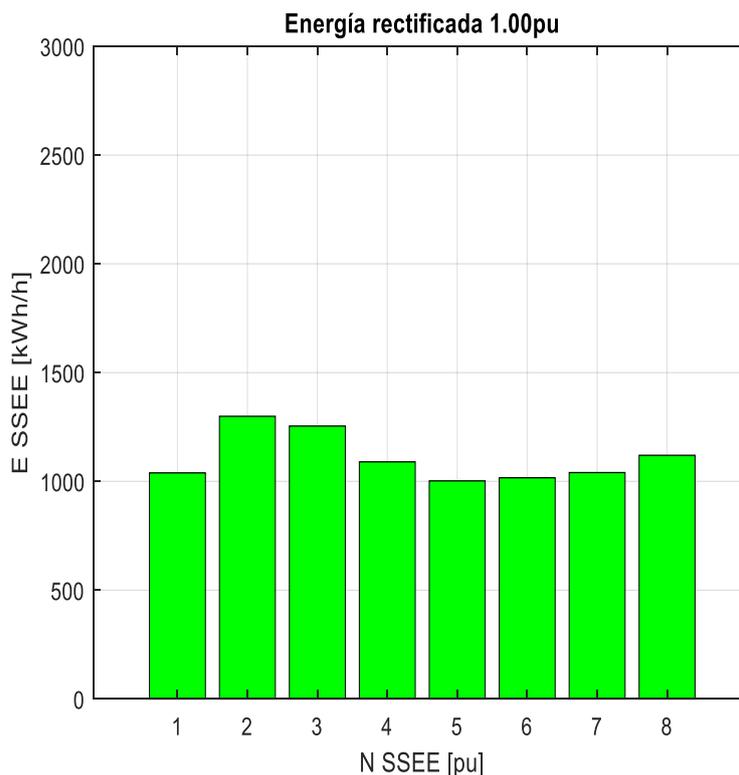


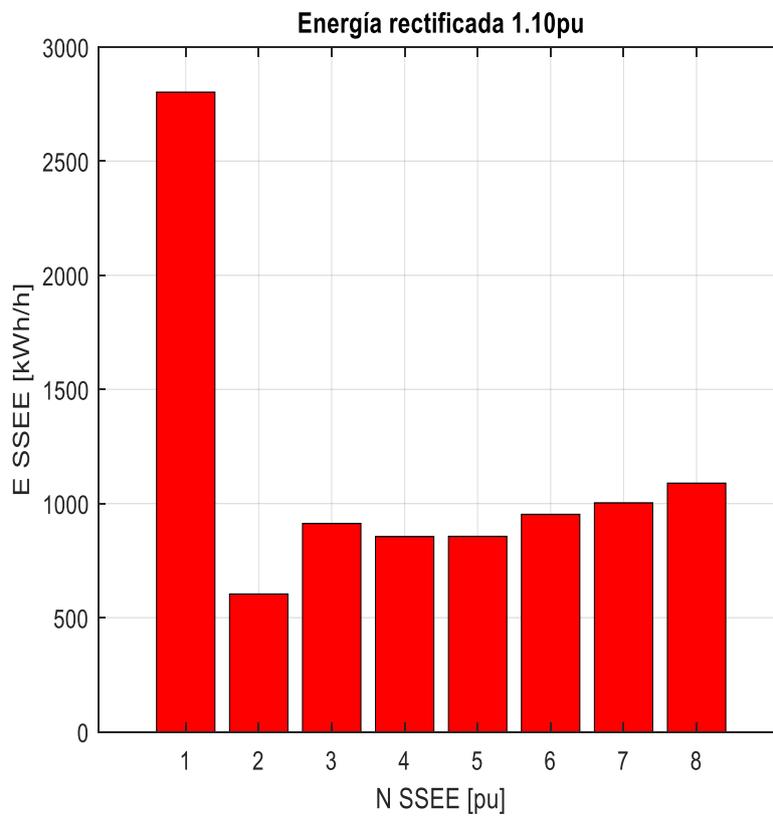
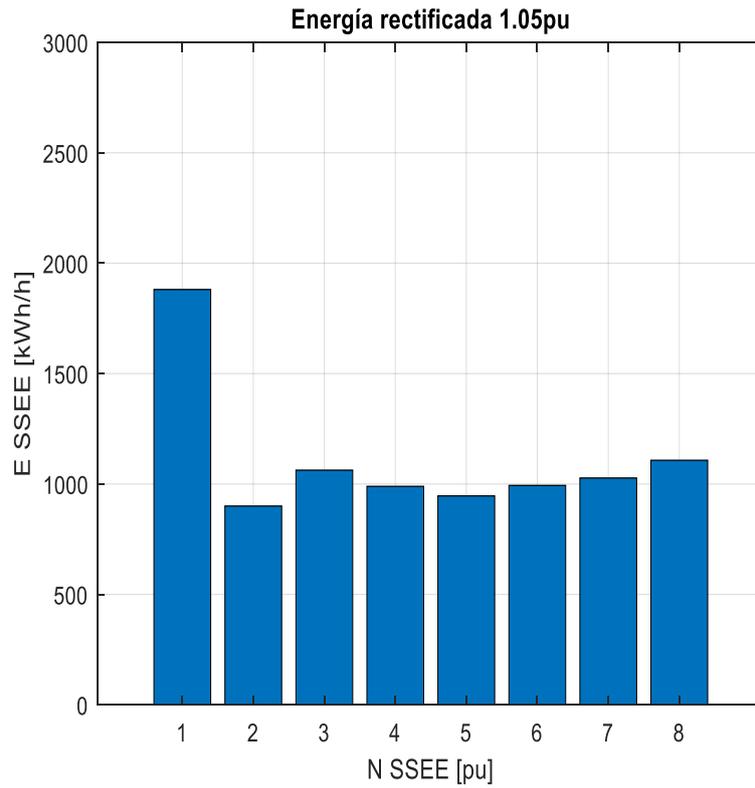
8: Potencia rectificada instantánea por subestación



Para analizar mejor cómo varía la potencia rectificada en cada subestación, mejor que ver la curva de la potencia instantánea es ver cómo variará el total de toda una simulación de un caso a otro. Para ello se integra la curva y se pasan los valores instantáneos de potencia a Energía. Por lo que a partir de ahora hablaremos de energía rectificada.

Los siguientes diagramas de barras muestran el total de energía rectificada por subestación, en cada subestación:





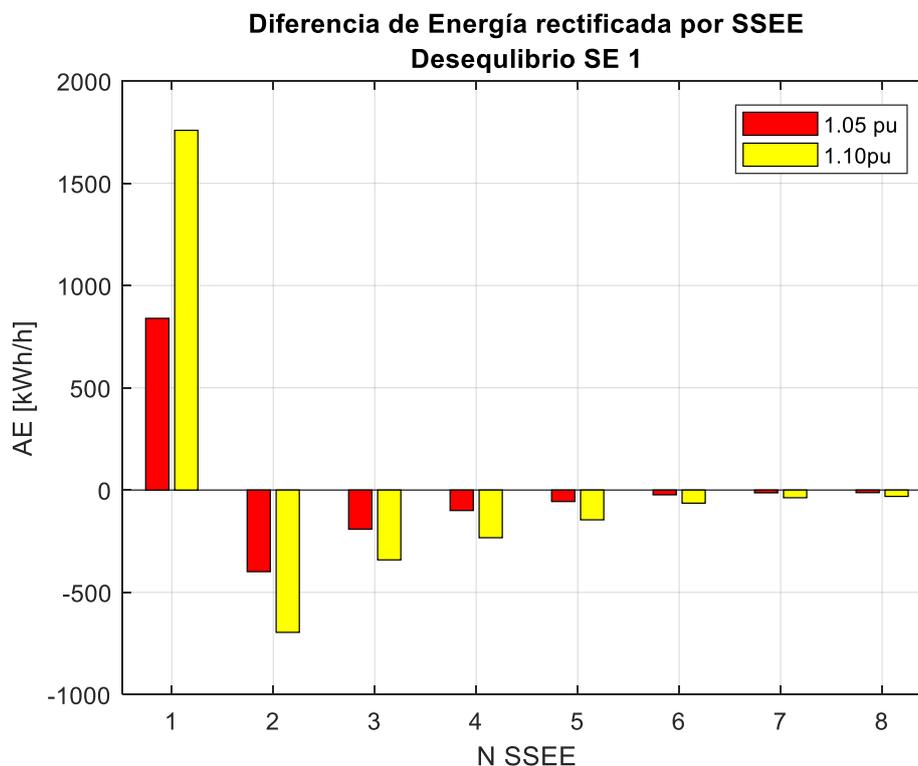
*9: Comparación de Energía Rectificada por subestación*

Estos diagramas ya arrojan luz sobre lo que ocurre en un desequilibrio en la red. Cuando la tensión de una subestación es mayor a las demás, esta subestación lo que hace es intentar dar más carga de la que le correspondería en el caso base, es decir, la subestación toma el mando del reparto de carga, alimentando trenes que por distancia no deberían ser alimentados por ella.

También es notable la diferencia entre los dos casos de desequilibrio. Mientras que para un desequilibrio de 1.05 pu, la subestación número uno rectifica un total de aproximadamente 1900kWh/h, en el desequilibrio de 1.10pu llega hasta los 2750kWh/h. Relativamente, se rectifica casi un 90% y un 175% más que en el caso base, una diferencia enorme.

Como en este caso el desequilibrio es en la subestación número uno, la diferencia en energía la absorbe de las subestaciones más cercanas, es decir, la dos y la tres. Se puede observar que la energía de estas dos subestaciones es menor comparada con el caso base, pero que a medida que nos alejamos de la subestación número 1, la energía que rectifican las subestaciones es prácticamente igual.

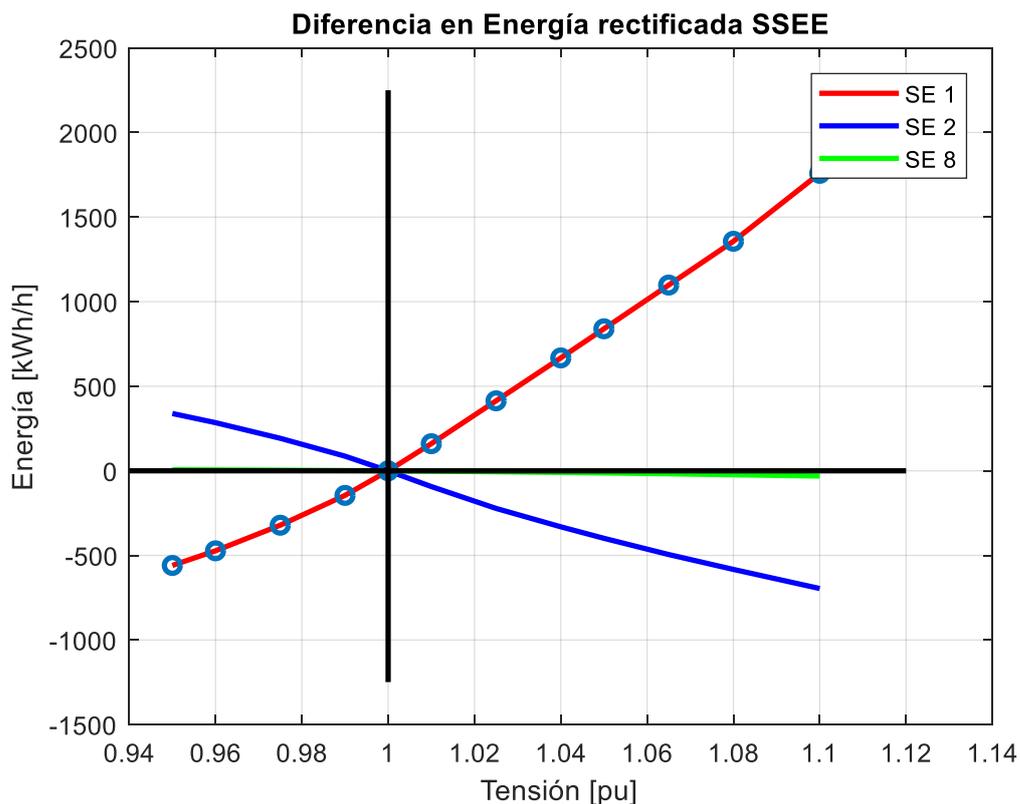
Se ilustra mejor esta diferencia en el siguiente diagrama:



10: Diferencia en Energía rectificada por subestación

En estos diagramas de barras se ve la diferencia en valores reales respecto al caso base. La diferencia entre un caso y otro es de aproximadamente el doble, lo que hace pensar que la diferencia en energía rectificada tenga una relación lineal con el valor de la tensión que cambia, ya que la diferencia de tensión es del doble de un caso a otro. Se analizará este aspecto más tranquilamente en adelante.

Para estudiar la linealidad de la diferencia en energía rectificada con respecto a la tensión de vacío de las subestaciones se ha confeccionado este gráfico:



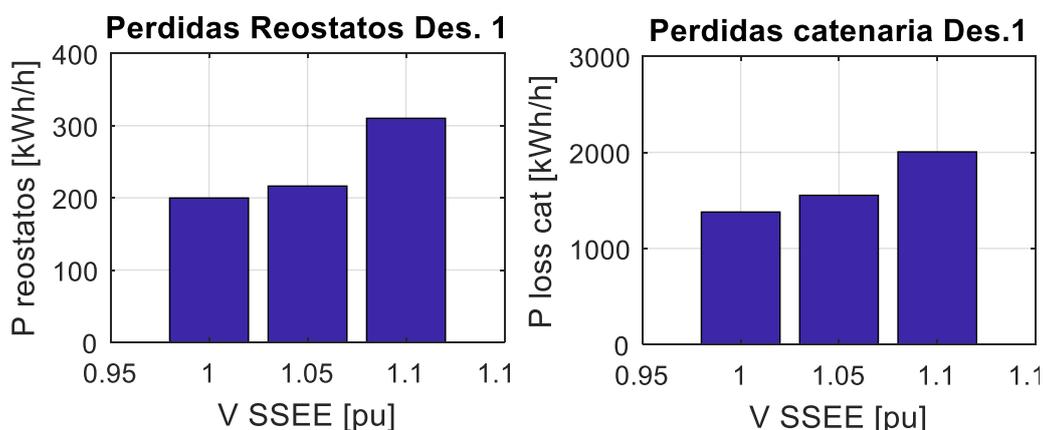
II: Evolución de la diferencia en energía rectificada

Tal y como se puede observar, la diferencia en energía rectificada podría parecer que evoluciona linealmente con la tensión de vacío, pero no es así. Aunque el sistema puede ser lineal en la zona de interés de nuestro estudio, se trata realmente de una curva de radio más amplio.

En este gráfico también es notable cómo evolucionan el resto de las subestaciones para cualquier desequilibrio en la subestación 1. La curva azul es la subestación 2, que es la inmediatamente adyacente a la 1, y vemos como cuando la variación en energía es negativa, su energía rectificada sube, y baja cuando la energía de la 1 es mayor que en el caso base. Tal y como se había mencionado anteriormente.

Por otro lado, la curva verde representa la evolución de la energía rectificada de la subestación 8 para todos los casos de desequilibrio en la 1. Como se puede ver, es una curva sin apenas pendiente, por lo que lo que pase en la 1, se diluye en la red y la 8 apenas lo nota.

Por último, las pérdidas, tanto en catenaria como reóstatos. En el siguiente diagrama de barras se puede ver cómo varían para cada caso de desequilibrio en valores absolutos:



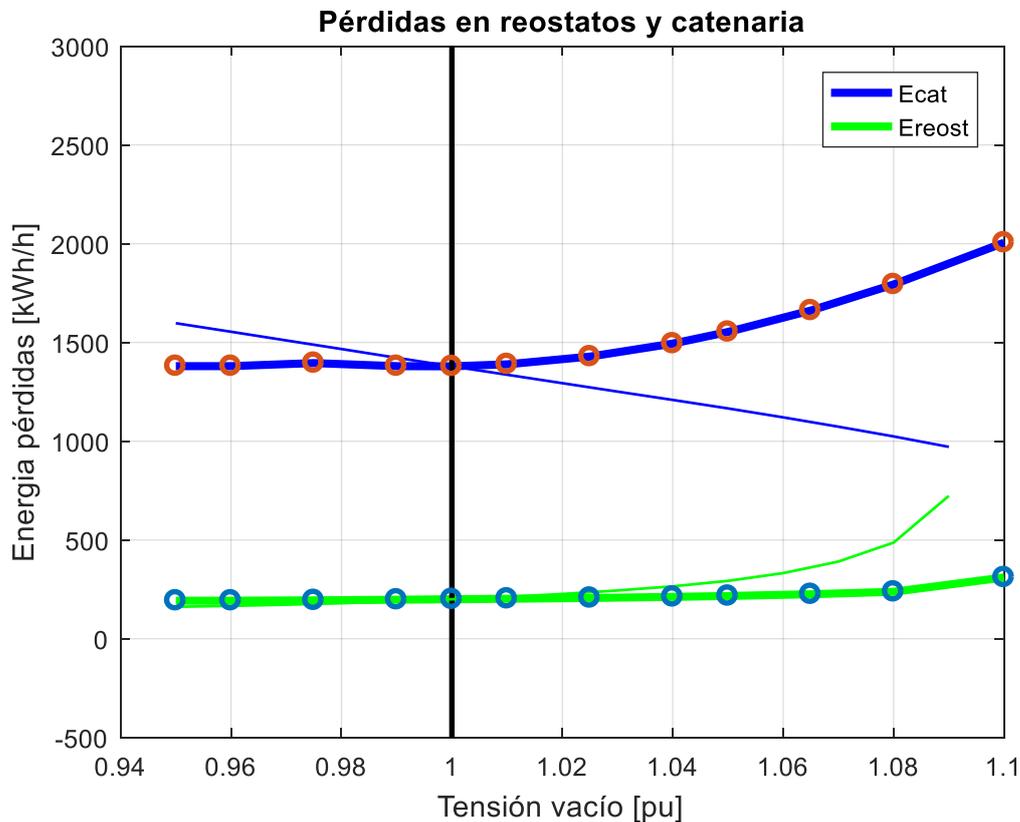
12: Pérdidas por caso de desequilibrio

En estos diagramas se observa que las pérdidas son mayores tanto en catenaria como en reóstatos para una tensión de desequilibrio mayor.

Las pérdidas en reóstatos son mayores porque al subir la tensión de un punto de alimentación de la red, más puntos conseguirán llegar al mínimo de tensión requerido para entrar en modo reóstatos. Como se ha explicado ya anteriormente, para que se dé una situación donde se disipa energía en los reóstatos deben ocurrir varias cosas, primero que el tren esté regenerando energía, segundo, que esta energía no sea aprovechable inmediatamente por otro tren de la red, y tercero que la tensión de este tren sea mayor a la de la propia catenaria.

Las pérdidas en catenaria también aumentan con el desequilibrio. En un sistema totalmente equilibrado las pérdidas en catenaria y en reóstatos evolucionan de manera inversa, cuando sube una baja la otra. Pero en un sistema desequilibrado no ocurre esto. Esto se puede deber a que la energía con la que se alimenta el tren tiene que viajar más distancia física, ocasionando mayores pérdidas en este aspecto. La energía tiene que viajar más porque, como ya se ha mencionado, las subestaciones en desequilibrio toman el mando y alimentan cargas que están más lejos.

Se ha realizado un estudio posterior para ver cómo evolucionan las pérdidas tanto en catenaria como en reóstatos para comprobar la linealidad de estas con la tensión de vacío. Los resultados son los siguientes:



13: Evolución de las pérdidas con respecto a la tensión de vacío

Aunque las curvas podrían parecer lineales en la zona de interés, se ve claramente que no lo son, como cabría esperar de un sistema no lineal. Es interesante cómo las pérdidas en reóstatos son prácticamente estables en toda la región de interés menos en el último tramo que suben. Esto se debe a que la tensión límite de reóstatos es 1800 V, lo que son 1.091 pu, por lo que al traspasar esa tensión límite, suben los puntos con reóstatos mucho más.

También se han representado en la gráfica la evolución de ambas pérdidas en un sistema equilibrado a esa tensión mediante las curvas del mismo color, pero más finas. Como se puede ver, la evolución lleva una dinámica totalmente contraria a la que se da en un sistema desequilibrado. Las pérdidas en catenaria bajan cuanto mayor es la tensión de vacío y las pérdidas en reóstatos suben, teniendo una relación inversa. Esta dinámica no se da en un sistema desequilibrado por los factores que se han explicado anteriormente.



Las principales conclusiones que se pueden extraer de este primer caso simplificado son, en primer lugar, que en una red desequilibrio importa dónde se da el desequilibrio, ya que su efecto se va diluyendo a medida que nos alejamos de él. En segundo lugar, que tanto las pérdidas en catenaria como en reóstatos aumentan, las segundas tal y como estaba previsto pero las primeras contrarias a la lógica que teníamos previa a este análisis. También cuanto mayor sea el desequilibrio, mayores son las pérdidas y mayores son las diferencias de energía rectificada por subestación. Veremos si estas conclusiones son extrapolables a los siguientes casos.

## 6.2.- Desequilibrio en SE 5

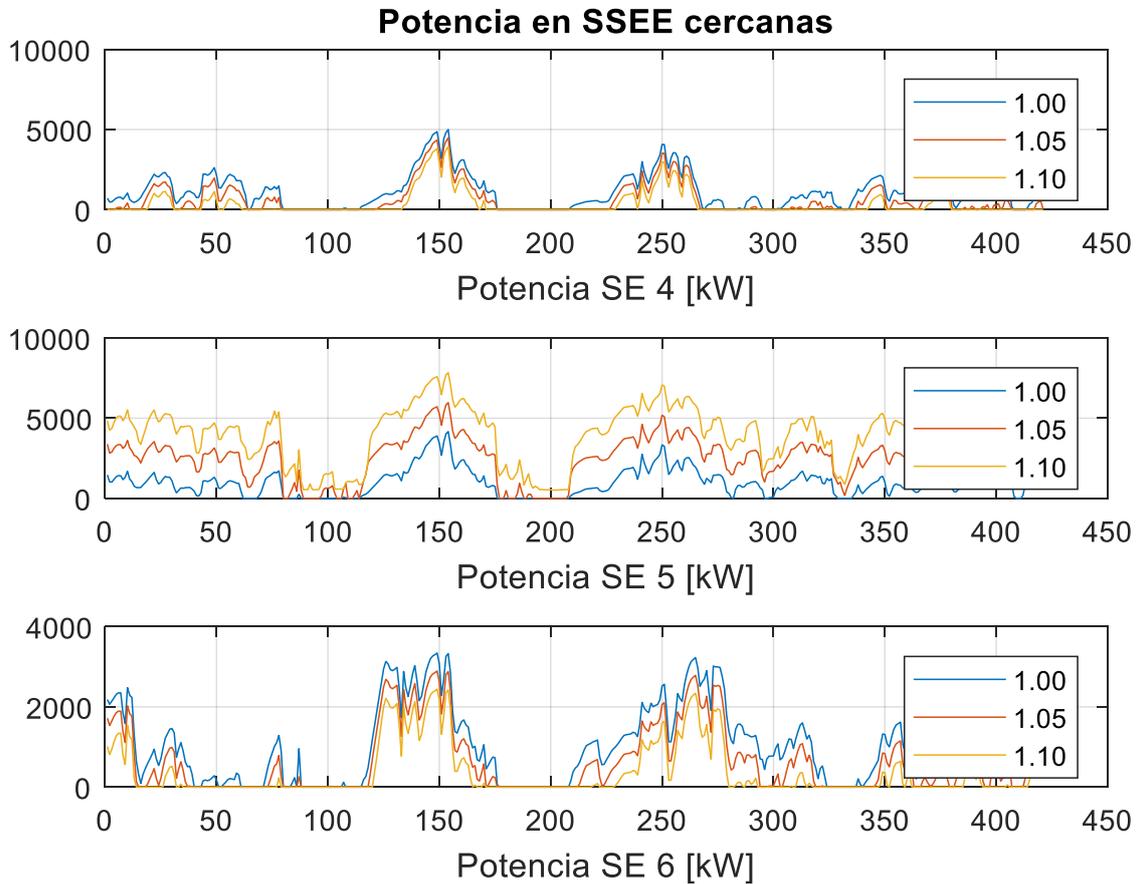
El siguiente caso a analizar es un desequilibrio simple de la subestación número 5 de la red metropolitana. En primera instancia se ha analizado una subestación que se encontraba en un extremo de la red, y ahora se procederá con una que está en el centro de la misma.

Sabiendo cómo ha afectado el desequilibrio en la subestación número 1 a las subestaciones adyacentes, es de esperar que ocurra algo similar en este caso, pero con un impacto mayor ya que al estar en el centro de la red, serán más las subestaciones afectadas a ambos lados. Se podría pensar cómo si fuera una piedra que cae en el agua y genera ondas de impacto, si la piedra cae en el centro, las ondas se expandirán en todas las direcciones.

Tal y como muestra el siguiente gráfico, las curvas de potencia se ven alteradas por el desequilibrio. En el caso de la subestación 5, la potencia instantánea es mayor por lo general a medida que subimos la tensión de vacío. Pasa lo contrario para las subestaciones 4 y 6, sus curvas de potencia están por lo general por debajo de la curva del caso base.

Esto concuerda perfectamente con lo que se había observado en el primer caso; la potencia de la subestación en desequilibrio aumenta, mientras que las potencias de las subestaciones de su alrededor bajan, y es debido al fenómeno explicado anteriormente. La subestación 5 toma el mando e intenta alimentar toda la energía que puede incluso cuando no debería.

Se utilizará un análisis análogo al primer caso, pero cuidando los detalles de este nuevo. El siguiente gráfico muestra la potencia instantánea de las subestaciones 4, 5 y 6:

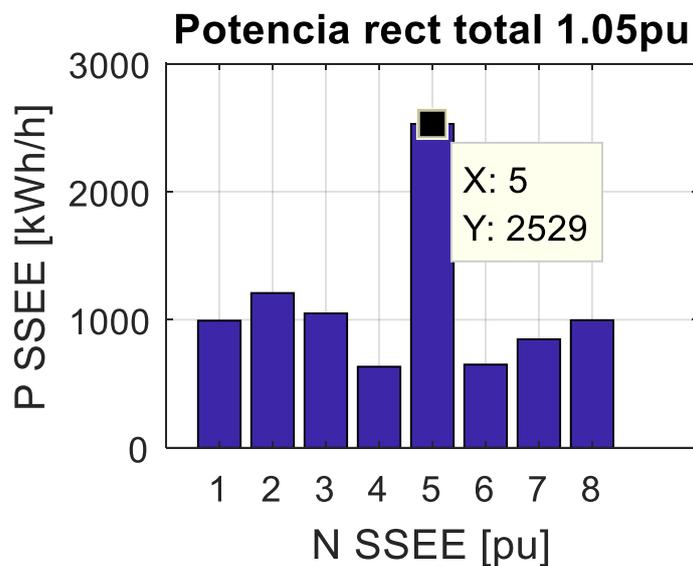
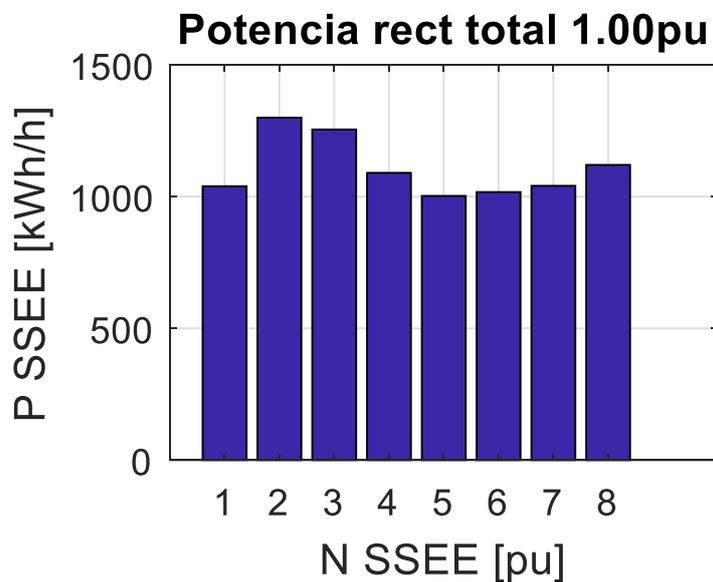


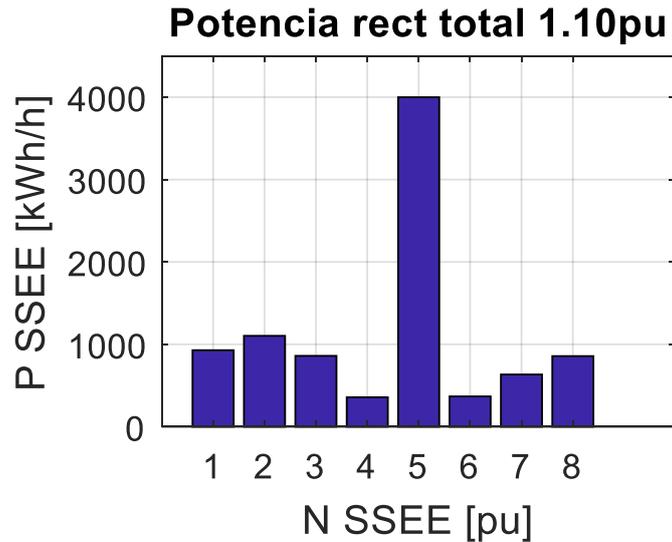
14: Potencia instantánea en subestación

En cuanto a subestaciones lejanas, ocurre lo mismo que en el primer caso, las curvas de potencia apenas se ven afectadas, ya que el efecto del desequilibrio se habría diluido en la red.



Para poner números, en los siguientes diagramas se puede observar la evolución de la energía rectificada, en kWh/h, según los casos de desequilibrio:

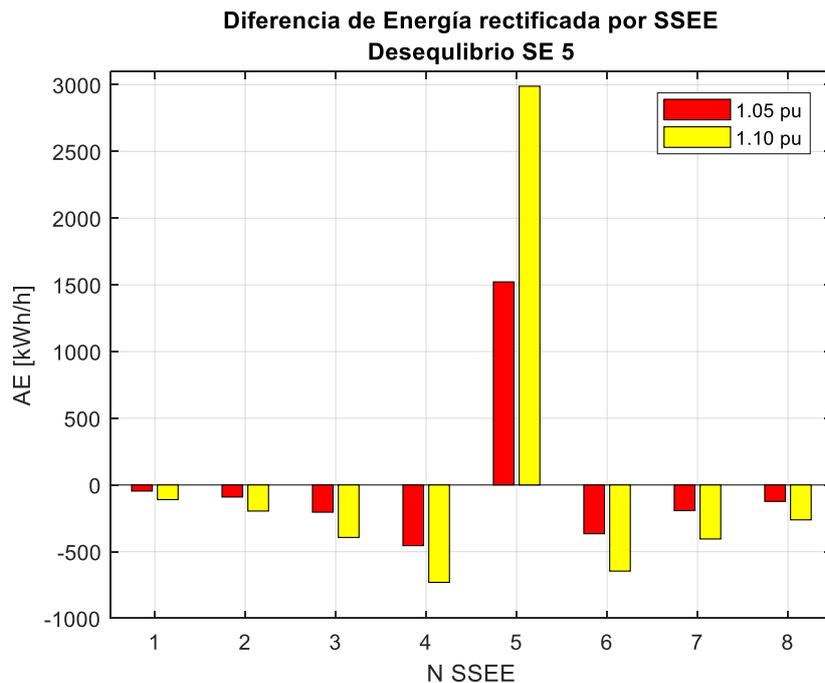




15: Energía rectificada total por subestación

Tal y como ocurría en el caso anterior, la energía que rectifica la subestación de desequilibrio es mayor que en el caso base. Si en el primer caso había una diferencia de hasta un 90% en el caso de 1.05pu, la diferencia para este mismo desequilibrio es de más de un 150%. Pasa de alrededor de 1000 kWh/h a 2500 kWh/h, y llega hasta los 4000 kWh/h en el caso de 1.10pu.

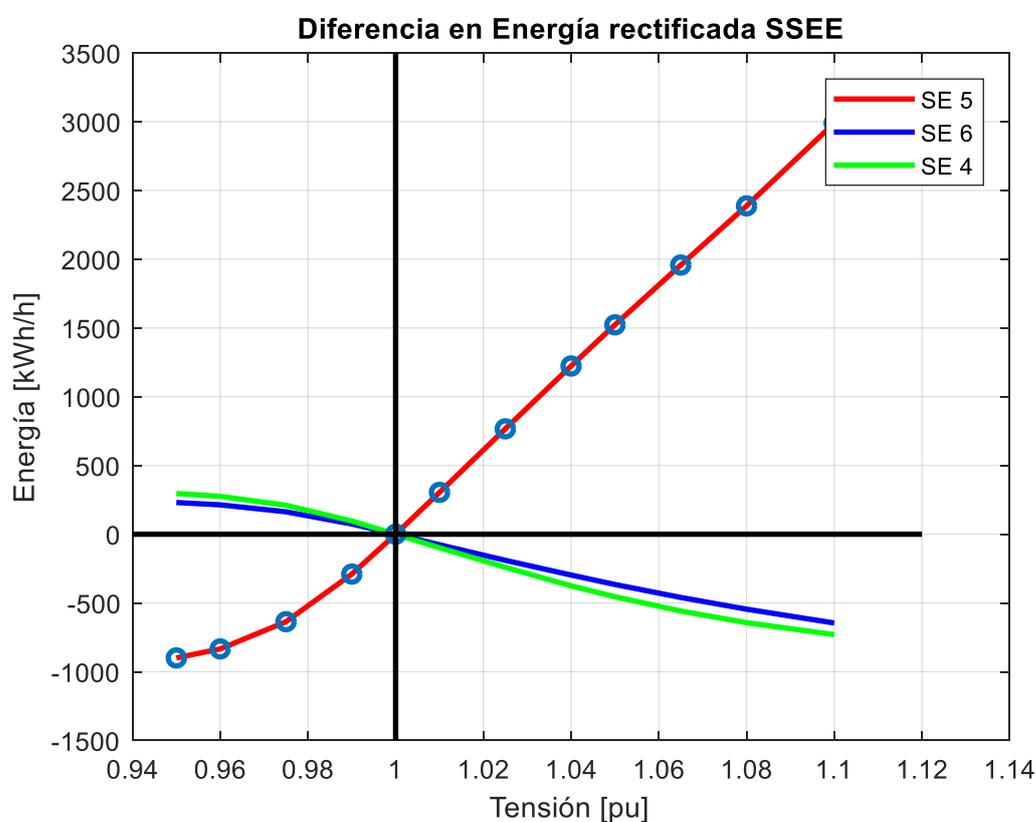
Esta diferencia enorme se debe a que, al estar en el centro de la red, la subestación 5 al tomar el mando tiene más subestaciones cercanas de las que “chupar” energía, alimenta más cargas que debieran corresponder a estas otras subestaciones y por lo tanto su energía total rectificada se multiplica. Relativamente se puede ver mejor en los siguientes diagramas:



16: Diferencia en la energía rectificada por subestación y desequilibrio

Estos diagramas de barras son similares a los que ya se han comentado en el primer caso de desequilibrio simplificado. La única subestación que aumenta la cantidad de energía rectificada respecto al caso base es la subestación número 5, y es a costa de las demás subestaciones, que ven como disminuye la energía que rectifican. Es incluso más aclarativo este diagrama que los anteriores, ya que vemos la magnitud del impacto que tiene un desequilibrio en nuestra red, al impactar mayormente en todas las subestaciones.

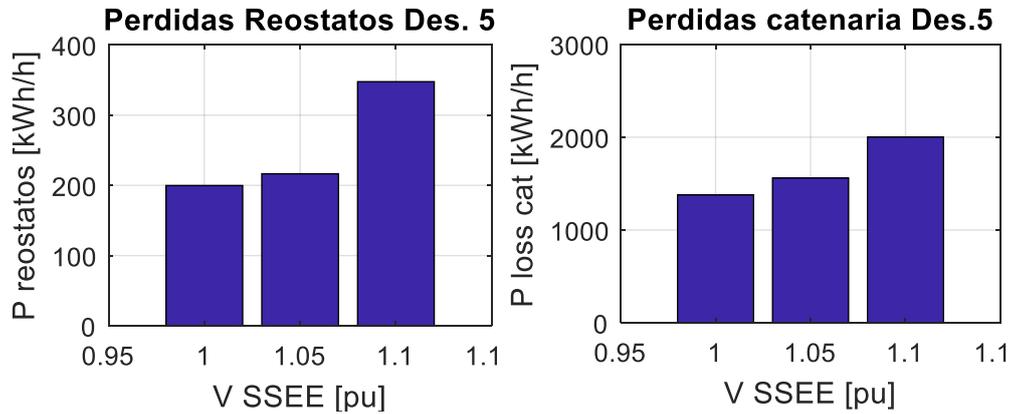
Para estudiar la linealidad en este caso de la evolución de la diferencia de energía rectificada respecto al caso base, se ha confeccionado el siguiente gráfico:



17: Evolución de la diferencia en Energía Rectificada

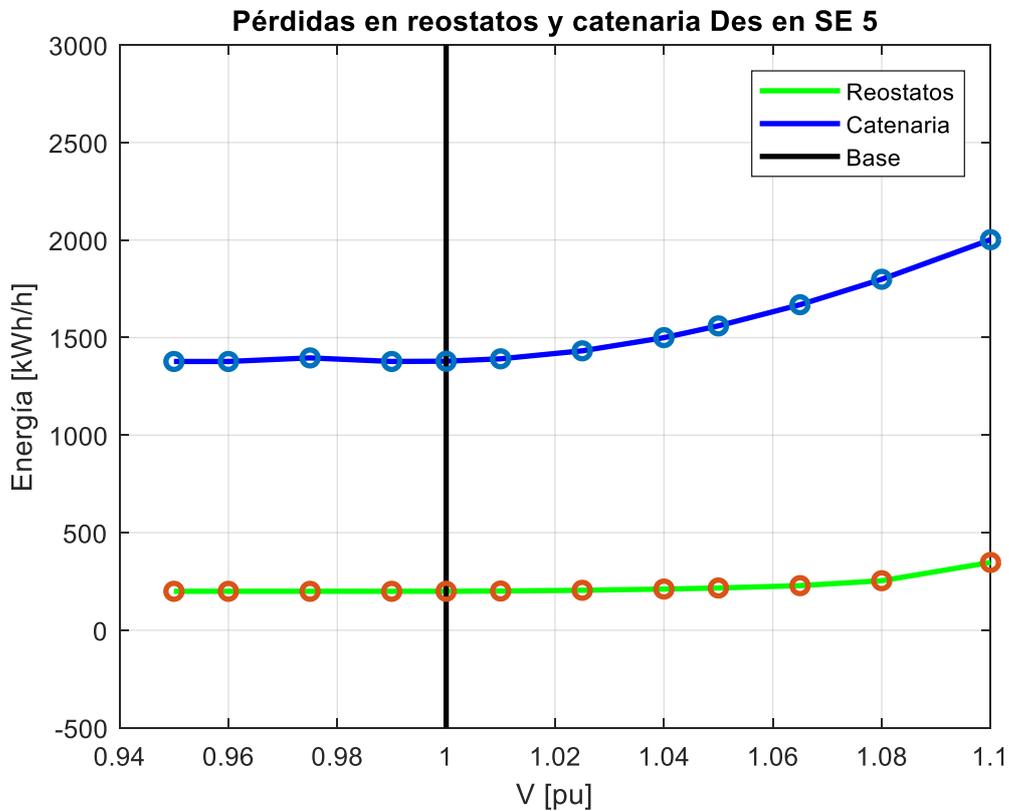
Esta gráfica aporta las mismas conclusiones que en el primer caso, con el desequilibrio en la SE 1. Es interesante observar cómo las subestaciones 4 y 6 tienen una curva prácticamente calcada, ya que son las dos adyacentes a la 5. También notar la diferencia en la pendiente de estas dos con la 2 en el primer caso, mientras que allí la 2 era la que recibía el mayor impacto del desequilibrio, aquí se lo reparten entre dos, y aunque el total de diferencia de energía es mayor, individualmente pierden menos.

Las pérdidas en este caso evolucionan de manera casi igual que en el caso anterior. Aumentan para los dos tipos de pérdidas de forma escalada. Que los números sean tan similares hace pensar que, en cuanto a las pérdidas, el resultado es el mismo sin importar dónde se da el desequilibrio, sino cómo y de qué magnitud es éste.



18: Pérdidas en catenaria y reostatos por caso de desequilibrio

Para estudiar la linealidad, se ha comprobado con un gráfico similar al del caso anterior:



19: Evolución de las pérdidas con la tensión de vacío



En este caso ocurre de igual forma que en el anterior, las pérdidas no son lineales con la tensión de vacío, que es lo que se espera de un sistema no lineal como éste.

En un sistema eléctrico las pérdidas óhmicas por conducción de la corriente depende de la intensidad al cuadrado, por lo que no tendría sentido que las pérdidas de catenaria fueran lineales con la tensión.

Por otro lado, aunque las pérdidas en reóstatos sí dependen en cierta medida de la tensión de vacío, ya que para que haya reóstatos se debe alcanzar cierta tensión, no dependen linealmente, ya que la tensión de vacío no es el elemento dominante.

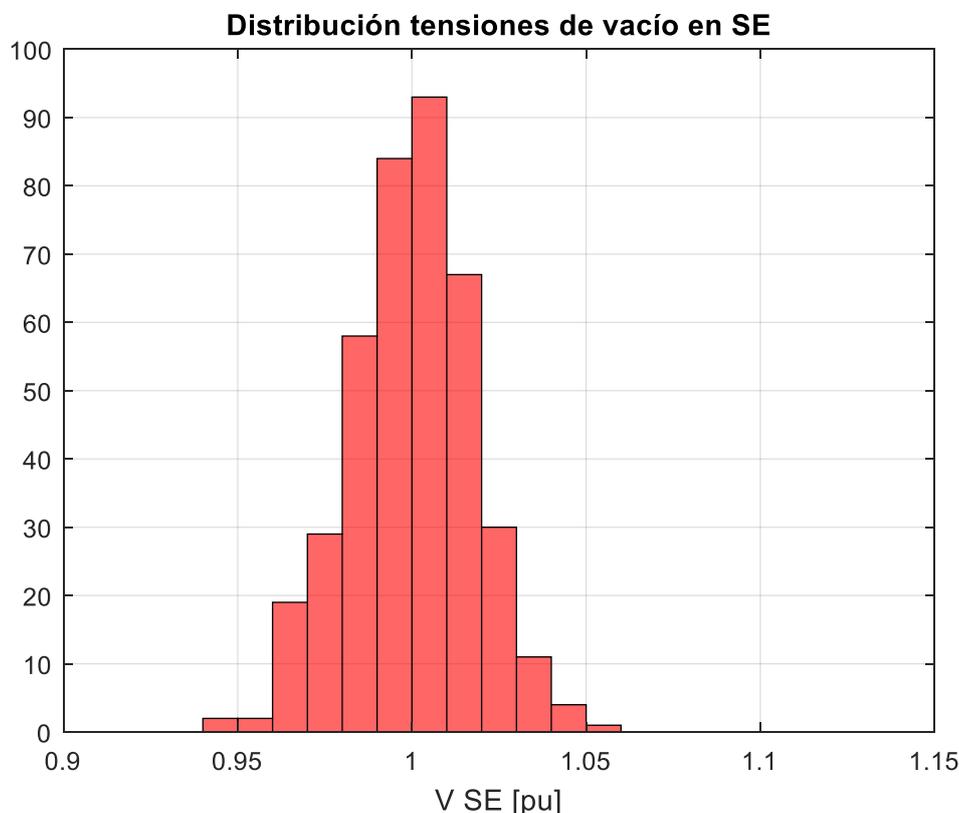


## 7.- CASO REALISTA

El caso simplificado está bien para conocer *grosso modo* qué es lo que ocurre en una red eléctrica cuando existe un desequilibrio, pero no es un enfoque que concuerde con lo que ocurre en la realidad, como indica su nombre, es simplificado, y la realidad es mucho más compleja.

En la realidad ni hay desequilibrios de una sola subestación ni existen desequilibrios de 0.10 pu (sí que los puede haber, pero el 99% de los casos no son así por lo que no tiene sentido dedicar un estudio al 1% de casos extraordinarios). Lo que ocurre es que la red de distribución general no tiene una tensión igual en todos sus puntos y puede diferir algo de la nominal, por lo que cada subestación tendrá una tensión algo distinta, alrededor de la nominal, con una diferencia de 2 o 3 centésimas por unidad (0.02 o 0.03 pu). Como ya se ha comentado antes, esto se puede deber a multitud de factores, desde pequeñas averías a la demanda de ese preciso instante.

Para representar lo que ocurre en la realidad lo que se ha realizado en este estudio es crear 50 casos de tensiones de vacío de subestación totalmente aleatorizados mediante el comando “rng” en Matlab. Esta serie de números siguen una ley de distribución normal alrededor de la tensión nominal, 1 pu, y con una varianza de 0.05/3. La distribución que se ha obtenido es la siguiente:

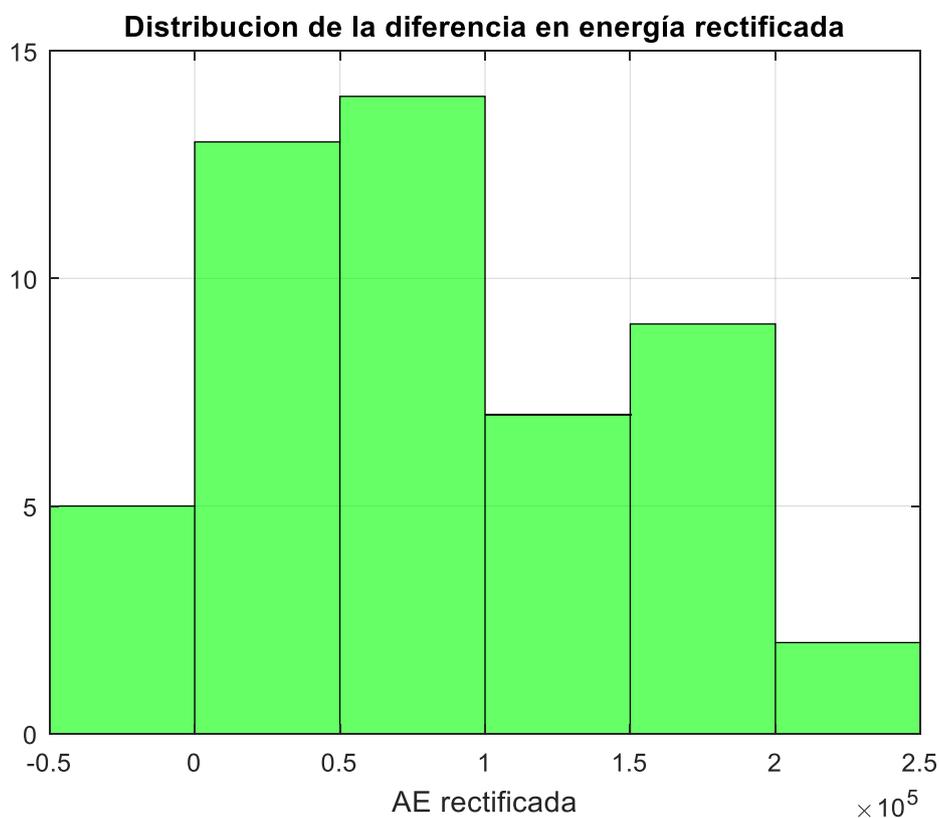


20: Distribución normal de tensiones de vacío

En este histograma se representa la distribución de las 400 tensiones de vacío que se han estudiado (50 casos con 8 subestaciones). Para este caso, se analizará la muestra en su conjunto, y no individualmente como se hizo en el capítulo anterior, aunque se entrará en detalle en ciertos casos singulares.

Lo primero que se va a analizar es cómo han sido estos 50 casos. Para poder analizar si ha habido un gran desequilibrio o uno pequeño en ellos, se puede evaluar echando un ojo a la distribución de la diferencia en energía rectificada total. Como ya se ha comentado, cuanto mayor es un desequilibrio, mayor será la energía que rectifican las subestaciones porque tendrá que hacer frente a más pérdidas.

Para ello se ha elaborado el siguiente histograma, que muestra cómo se distribuyen los casos según la energía rectificada de más, o de menos, respecto al caso ideal:

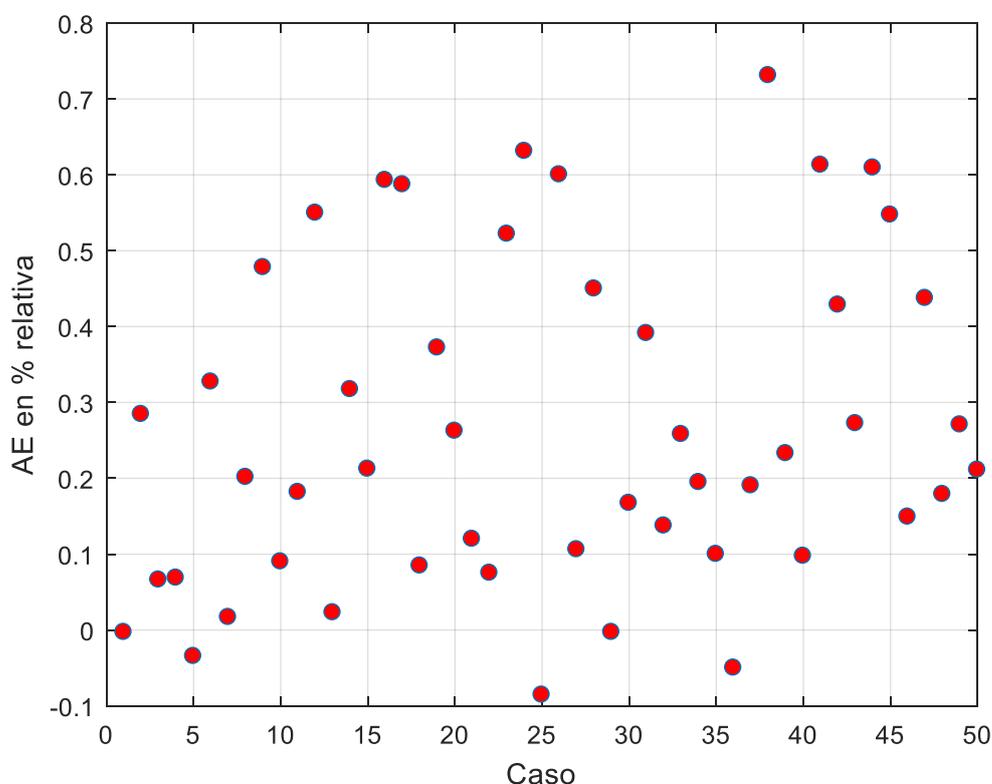


21: Distribución de los casos según la diferencia en energía rectificada total

Tal y como se puede observar, tan sólo existen 5 casos, de 50, que han rectificado menos energía en sus subestaciones que en el caso considerado ideal. Estos casos son singulares, ya que para que esto ocurra el sistema tiene que estar más o menos equilibrado y a una tensión algo menor que la nominal. Aunque la tensión fuera menor que la nominal, pero el sistema no estuviera equilibrado, la energía rectificada seguiría siendo mayor que en el caso ideal.

También es notable que un 90% de los casos (45/50) tengan una mayor cantidad de energía rectificada que el caso equilibrado ideal. Esta es una nueva evidencia de que un desequilibrio, aunque sea pequeño, causa que las pérdidas aumenten, y que, por ende, la energía que necesita la red para realizar exactamente el mismo trabajo aumente.

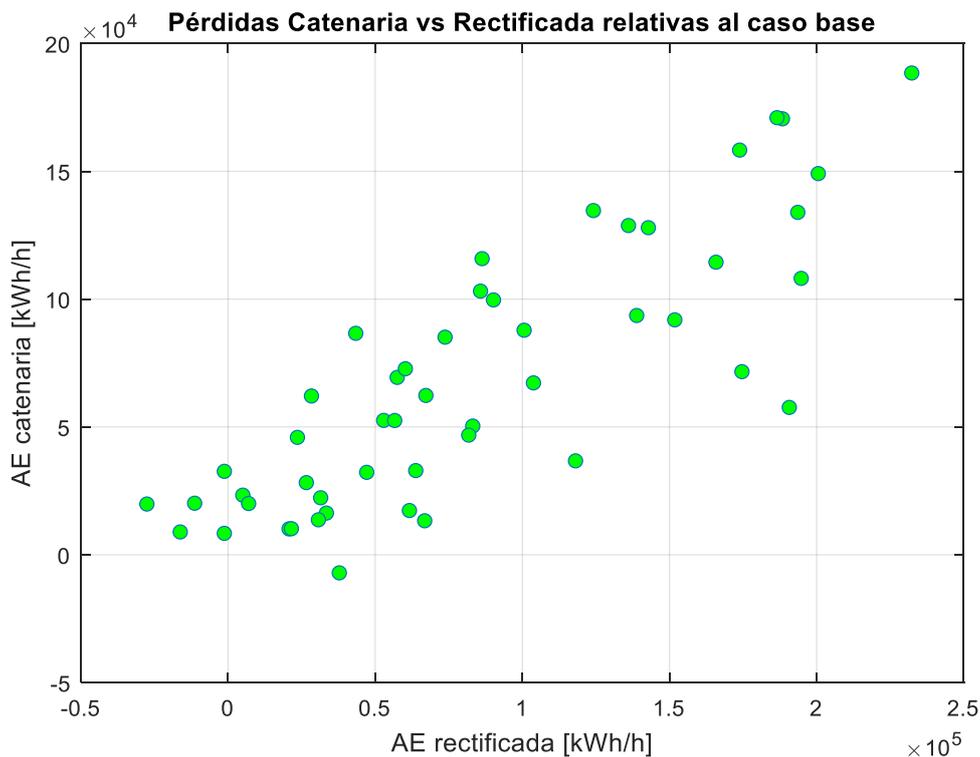
En el siguiente diagrama de puntos, se representa para cada caso cuánta energía de más, o de menos, se ha rectificado, pero esta vez en porcentaje respecto al caso ideal equilibrado. Esto aporta la perspectiva que quizá se pierde al hablar de números sin saber si es mucha o poca la diferencia.



22: Porcentaje de Energía rectificada de más por caso respecto al caso ideal

Tal y como se puede observar, todos los casos se mueven dentro de un margen pequeño, alrededor de una diferencia del 0.5% por encima. Relativamente es poca diferencia, pero al pasar esa energía de más, que no se invierte en absolutamente nada “útil” y que simplemente se pierde por los desequilibrios del sistema, a euros, se convertiría en una gran cantidad de dinero anualmente.

Otro de los principales puntos que se tratarán es cómo han evolucionado las pérdidas en esta muestra. El siguiente diagrama de puntos muestra la relación entre la diferencia en energía rectificada y la diferencia en pérdidas en catenaria, la diferencia siempre respecto al caso base equilibrado. En ambos casos, la energía es del total de todas las subestaciones y normalizada.



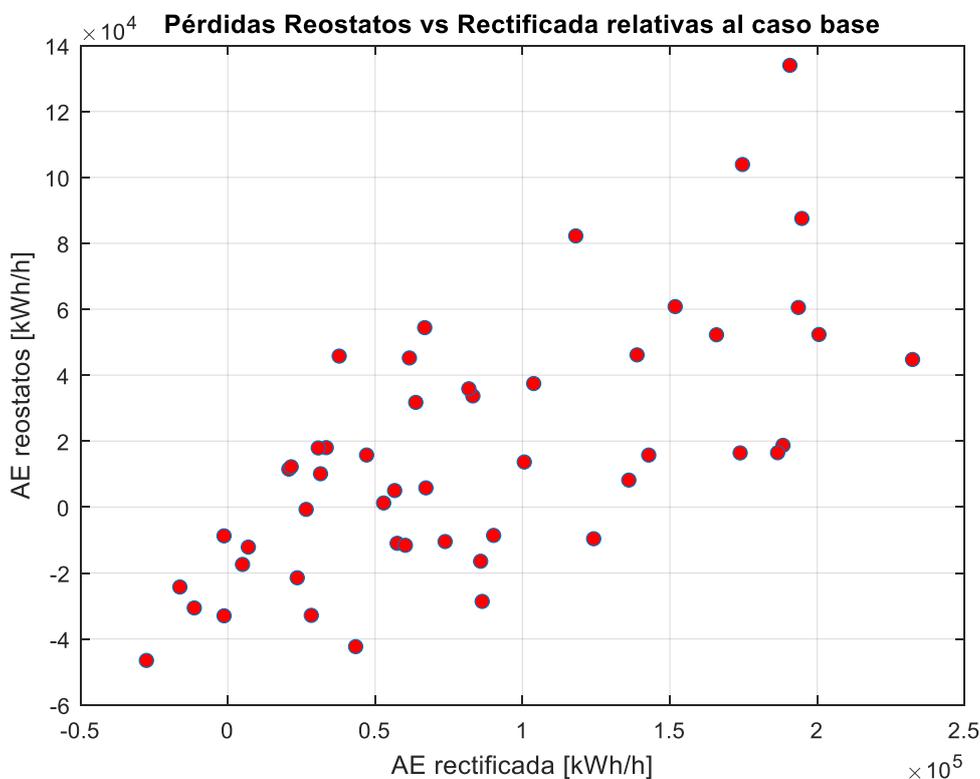
23: Relación entre pérdidas en catenaria y Energía rectificada relativas.

Tal y como se puede observar, existe una relación entre la diferencia de energía rectificada y la diferencia en pérdidas de catenaria. Tal y cómo habíamos visto en los casos simplificados, un mayor desequilibrio implica más energía rectificada. Por lo tanto, los puntos más hacia la derecha, que tienen una mayor diferencia positiva de energía rectificada, son aquellos con una red más desequilibrada que aquellos que están en el centro. Estos puntos que están más hacia la derecha tienen pérdidas en catenaria más altas que aquellos que están en el centro, ya que su desequilibrio es mayor.

Es cuanto menos notorio que en todo el gráfico sólo se encuentre un caso, de los cincuenta, que tenga menos pérdidas en catenaria que el caso ideal. Esto se puede deber a que, como ya se ha comentado, que el simple hecho de que haya un desequilibrio, sin importar mucho si es un gran desequilibrio o uno pequeño, hace que las pérdidas por conducción aumenten.

Como ya se había comentado, las pérdidas en catenaria aumentan en una red desequilibrada porque al haber subestaciones que toman el mando, al ser su tensión de vacío mayor que aquella de las subestaciones adyacentes, alimenta cargas (trenes) que están más lejos y, por lo tanto, generan más pérdidas en este campo.

En cuanto a las pérdidas en reóstatos, se ha confeccionado un diagrama similar al anterior, relacionando estas pérdidas con la diferencia de energía rectificada:



24: Relación entre pérdidas en reóstatos y Energía rectificada relativas.

Como se puede observar, la relación en este diagrama de puntos es similar a la que ya se había encontrado en cuanto a las pérdidas de catenaria.

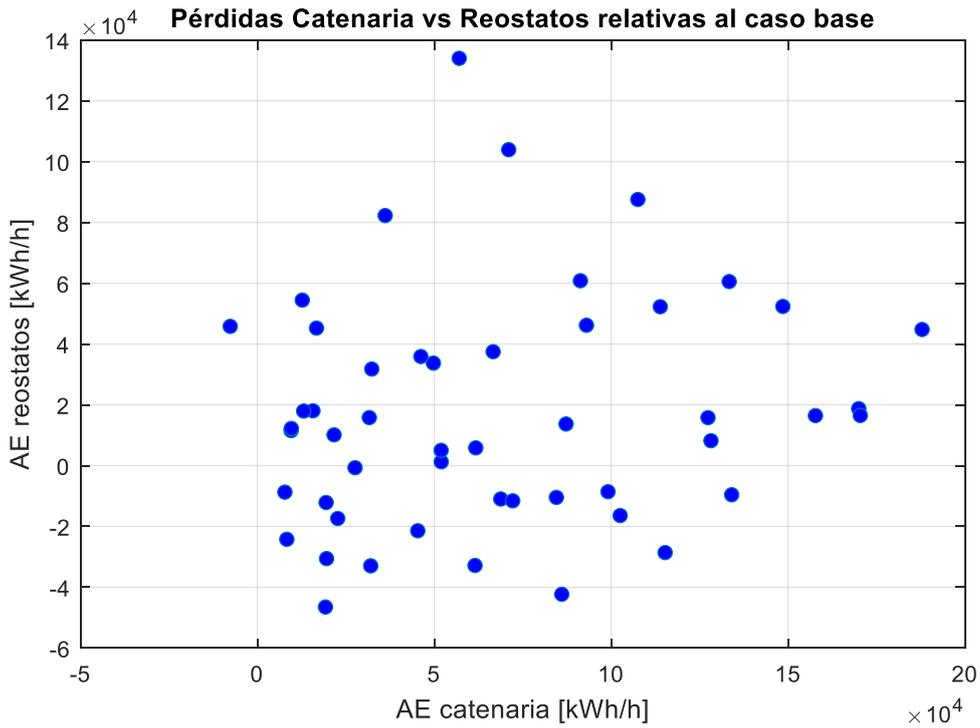
El primer detalle de este diagrama de puntos sobre los que se diferencia respecto al de catenaria, es la cantidad de puntos que se encuentran por debajo de la línea del 0, es decir, que tienen menos pérdidas por reóstatos que el caso ideal. En concreto son 17 puntos los que están por debajo, en contraposición del único caso que había por debajo en las pérdidas de catenaria.

La relación parece más débil en este caso. Esto se puede dar debido a que para que las pérdidas en reóstatos suban, la tensión debe llegar al mínimo que es la tensión de catenaria. Por lo que, que haya una mayor diferencia en energía rectificada, y por lo tanto un mayor desequilibrio, no significa necesariamente que haya más puntos con esta tensión, por lo que las pérdidas en reóstatos no suben.

Como curiosidad, o demostración, ya que no tiene realmente ningún enfoque analítico que nos interese, se ha comprobado la energía regenerada por el sistema en todos los casos. Ésta ha de ser la misma ya que la energía regenerada por el

sistema es independiente de la tensión de vacío y depende completamente del perfil de velocidad que utilizan los trenes y de la topología de la red.

En el siguiente diagrama de puntos se han combinado los dos anteriores, representando las pérdidas en catenaria vs las pérdidas en reóstatos, ambas relativas al caso ideal. Tal y como se observa, no hay ninguna relación directa entre ambas. Grandes pérdidas en reóstatos no significan que existan grandes pérdidas en catenaria o pocas, lo que daría lugar a una relación inversa.



25: Relación entre la diferencia en pérdidas de catenaria y en reóstatos



## 8.- CONCLUSIONES

El principal objetivo de este proyecto era analizar y estudiar el impacto de los desequilibrios en una red metropolitana ferroviaria en el reparto de carga entre las subestaciones de tracción que conforman la red.

En el primer capítulo de análisis se llevó a cabo un estudio sobre los desequilibrios simples, es decir, cuando tan sólo una subestación, de las 8 que forman nuestra red, está en desequilibrio. Este capítulo permitió vislumbrar las primeras conclusiones de este estudio. Como se observó, cuando una subestación se encuentra con una tensión de vacío mayor a las que tiene alrededor, lo que hace es tomar el mando del reparto de carga, o al menos intentarlo, y se lleva toda la potencia posible de las subestaciones cercanas, alimentando cargas que están más lejos de lo recomendable y que no deberían alimentarse de esa subestación.

Este fenómeno hace que la energía tenga que viajar mucho más de lo que debería y hace aumentar las pérdidas por su transporte, llamadas pérdidas de catenaria. En un sistema equilibrado, las pérdidas en catenaria evolucionan de manera inversamente proporcional al aumento de la tensión, pero en un sistema desequilibrado aumentan con la tensión de forma no lineal tal y como y se muestra en la figura 12 de este proyecto.

Aparte de las pérdidas en catenaria, son de suma importancia en estos sistemas las pérdidas en reóstatos, que son la energía disipada en forma de calor cuando un tren está frenando y la energía que regenera no puede ser absorbida por el sistema. Estas pérdidas también aumentan en un sistema desequilibrado, pero de manera menos marcada que en un sistema equilibrado. Como se muestra también en la figura 12 de este proyecto, las pérdidas por reóstatos en un sistema equilibrado aumentan con la tensión con una pendiente mayor que cuando el sistema está desequilibrado. Existe un despunte en estas pérdidas cuando la tensión de desequilibrio alcanza el valor límite de tensión (1.091 pu) para que se activen los sistemas de reóstatos.

La evolución de las pérdidas en el sistema desequilibrado pueden parecer lineales en la zona de interés, pero no lo son, algo lógico ya que se trata de un sistema no lineal. Por otro lado, la diferencia en energía rectificada con respecto al caso ideal equilibrado evoluciona de forma proporcional al desequilibrio como ya se viera en este capítulo, pero como se muestra en las figuras 10 y 16 de este proyecto, se comportan de manera más o menos lineal en nuestra zona de interés, pero se trata en realidad de una curva.

En el siguiente capítulo, en el que estudiamos 50 casos con tensiones de vacío aleatorizadas que siguen una distribución normal, se tuvo que emplear otro enfoque distinto al anterior capítulo, ya que no era útil o práctico estudiar casos individuales. Se estudió como un conjunto de forma que se observa que es lo que

ocurre en el mayor porcentaje de ocasiones y qué escenarios merecen la pena estudiar en mayor profundidad según su probabilidad de darse.

Tal y como se observó en ese capítulo, el 90% de los casos acaban rectificando más energía que el caso ideal, tan sólo 5 de los 50 requirieron menor energía para realizar el mismo trabajo de tracción. Este punto es notable. Ya que las tensiones de vacío siguen una distribución normal alrededor de la tensión nominal, los desequilibrios son en su mayoría muy pequeños y tanto por encima como por debajo de la nominal. Por lo que invita a pensar, que al final, la energía rectificada total se debiera acercar al sistema equilibrado, tanto por encima como por debajo. Pero en realidad lo que ocurre es distinto, lo que lleva a la conclusión de que los desequilibrios, sean grandes o pequeños y se den donde se den, causan que el sistema requiera una mayor cantidad de energía para funcionar.

En este capítulo, en el estudio de las pérdidas de catenaria se observó que sólo un caso de los 50 tenía pérdidas en catenaria menores que en el caso ideal equilibrado. Un aspecto que reafirma la conclusión sobre este tema obtenida en el capítulo de casos simplificados. Sea donde sea el desequilibrio, va a causar que la energía viaje más de lo que lo haría idealmente, ya que las subestaciones alimentarán cargas más lejanas, haciendo que las pérdidas aumenten.

También en la figura 21 se observó la relación entre las pérdidas de catenaria y la energía rectificada y tienen una relación similar a una proporcional, lo que es lógico. Si las pérdidas aumentan, la energía que tendrá que rectificar el sistema aumentarán para suplir estas pérdidas.

Por último, en cuanto a las pérdidas en reóstatos, lo que se puede decir es que no evolucionan de la misma forma que las de catenaria. Hay un mayor porcentaje de casos que tienen menos pérdidas por reóstatos que el caso ideal equilibrado. Esto se puede deber a un factor: que en algunos de estos casos la tensión sea menor y que menos puntos alcancen la tensión mínima para entrar en reóstatos.

Las situaciones en las que un tren puede generar pérdidas en reóstatos vienen dadas por la topografía y naturaleza de la red y su recorrido. Hay un número finito de ocasiones en las que el tren frenará y regenerará energía y estas situaciones son exactamente las mismas para todas las simulaciones realizadas, ya que se trabaja con la misma línea. El único factor que cambia de caso a caso es el perfil de tensiones de vacío, que influirá de manera directa en cuántos puntos a lo largo del trayecto que cumplan los dos requisitos: alcanzar la tensión mínima (la de catenaria) y estar frenando y regenerando energía.



## 9.- TRABAJO FUTURO

El principal objetivo de este proyecto era estudiar y acotar el potencial de mejora frente a los desequilibrios que ocurren en una red metropolitana ferroviaria debidos a distintos factores. Una vez delimitados y estudiados los efectos que devienen por estos fenómenos, el paso lógico es desarrollar e implantar sistemas, bien electrónicos bien de otra naturaleza, para atenuar o disipar el impacto causado. Aunque no entra en los objetivos ni en el desarrollo de este proyecto el estudio de estos sistemas, sí se ha creído conveniente mencionar algunas de las posibles medidas a implementar.

Tal y cómo hemos visto, los desequilibrios generan millones de euros en pérdidas a largo plazo como consecuencia del aumento de la energía requerida para hacer funcionar la red de metro. Es de suma importancia mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de estos sistemas públicos, tanto por ética medio ambiental como para el bolsillo del contribuyente. A lo largo de la realización de este proyecto, se han pensado dos formas que podrían ser implantadas a medio plazo.

La primera es una medida operacional, que sería la implantación de transformadores con las tomas adecuadas en las SSEE de tracción a lo largo de la red. Esta medida permitiría mantener artificialmente la tensión de ese nudo en la tensión nominal, cambiando las tomas siempre que fuera necesario.

Aunque es una medida que en principio no supone una gran inversión de implementación, y que la tecnología requerida ya está disponible, se han realizado estudios sobre cómo afectan estos cambios a la vida útil de los transformadores. Los cambios de toma se han de realizar en régimen dinámico, es decir, no se puede desconectar la subestación para cambiar de toma. Esto hace que al desconectarse puedan saltar arcos eléctricos, lo que genera dos problemas.

El primero es que el material de la toma se desgasta y tendría una vida útil reducida, requeriría mantenimiento, lo que aumenta el coste, tanto logístico como material de esta medida. Por otro lado, las chispas generadas por los arcos eléctricos son un peligro para el aceite que rodea al transformador en la mayoría de los casos. Se tendrían que implantar medidas adicionales de seguridad para evitar y controlar posibles incendios. De darse un incendio en un transformador, la subestación debería ser desconectada, generando el mismo efecto que se ha intentado evitar. Una medida de seguridad sería cambiar el aceite que rodea los transformadores por gas inerte, pero es más caro, lo que elevaría también los costes.

Otra medida de control de desequilibrios sería hacer uso de la electrónica de potencia. Mediante rectificadores controlados (utilizando inversores con modulación de PWM) se podría mejorar el equilibrio de tensión entre las subestaciones con lo que equilibraría el reparto de carga entre ellas. También el

uso de estos inversores mejoraría las pérdidas en reóstatos ya que se modelaría de forma inteligente las curvas de velocidad y potencia de los trenes.

El principal problema de esta medida es el coste de inversión requerido en comparación con otras posibilidades. Actualmente, los inversores de este tipo en el mercado cuestan cientos de euros y habría que poner muchos a lo largo de toda la red. Otro obstáculo tecnológico de esta medida es que los convertidores de este tipo son menos robustos que los que se utilizan en la actualidad.

Proyectos futuros deberán estudiar la viabilidad, económica y tecnológica de estas y otras medidas para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la red, como se puede denotar, no es trivial elegir una solución ya que todas tienen sus ventajas y desventajas.



## 10.- BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1: GOODMAN, C.J., SIU, L.K. and HO, T.K., 1998. *A review of simulation models for railway systems, International Conference on Developments in Mass Transit Systems, 20-23 April 1998, IEEE, pp. 80-85.*

2: Dr. Álvaro Jesús López López, *Optimising the electrical infrastructure of mass transit systems to improve the use of regenerative braking, 2016. P 7.*

3: Dr. Álvaro Jesús López López, *Optimising the electrical infrastructure of mass transit systems to improve the use of regenerative braking, 2016. P 19.*

4: GOODMAN, C.J., SIU, L.K. and HO, T.K., 1998. *A review of simulation models for railway systems, International Conference on Developments in Mass Transit Systems, 20-23 April 1998, IEEE, pp. 80-85.*

5: SEGUIER, G. and LABRIQUE, F., 1993. *Power Electronic Converters. AC/DC Conversion. English edn. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.*

6: Dr. Álvaro Jesús López López, *Optimising the electrical infrastructure of mass transit systems to improve the use of regenerative braking, 2016. P 39.*

7: Dr. Álvaro Jesús López López, *Optimising the electrical infrastructure of mass transit systems to improve the use of regenerative braking, 2016. P 50.*

*Evaluation of the impact that the traffic model used in railway electrical simulation has on the assessment of the installation of a reversible substation D. Roch Dupré, A.P. Cucala, R.R. Pecharromán, A.J. López López, A. Fernández-Cardador, 2018.*

*Analysis of the demand charge in DC railway systems and reduction of its economic impact with energy storage systems, D. Roch Dupré, A.J. López López, R.R. Pecharromán, A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, 2017.*



