

Resumen

El Proyecto Final de Carrera “Estudio de optimización de un sistema de tracción eléctrica.” se desarrolla en la sección eléctrica de la empresa “SENER Ingeniería y Sistemas” situada en Barcelona. El proyecto consiste en la realización de varios estudios para un mismo sistema de tracción eléctrica: un estudio eléctrico, un estudio de RAM y un estudio económico. A partir de los resultados obtenidos de forma independiente para cada uno de los estudios se realiza un análisis de conjunto de las conclusiones de cada uno de ellos.

El proyecto se ha acabado centrandose en un ejemplo de instalación de metro, concretamente ha tomado como base una línea de metro existente. Sin embargo, no pretende ser un estudio de esta línea de metro únicamente, sino que pretende generalizar de forma suficiente para abarcar cualquier tipo de instalación que se pueda diseñar para este medio de transporte.

Se han estudiado las tipologías de subestación eléctrica de tracción más frecuentes, y todos los estudios se han hecho con todas y cada una de las configuraciones consideradas “más habituales”.

El objetivo final es la obtención de la solución óptima considerando los tres parámetros: eléctrico, de fiabilidad y económico. Así pues, en función del nivel de redundancia de la instalación, del grado de disponibilidad que se requiera de ella o del horizonte económico al que se esté dispuesto a llegar, la solución puede ser una u otra y el objetivo del proyecto pretende dar esas pautas o indicaciones que permitan llegar a cada diseñador o instalador a su elección óptima.





Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. GLOSARIO	7
1.1. Definiciones generales	7
1.2. Abreviaturas, símbolos y siglas	11
2. PREFACIO	12
3. INTRODUCCIÓN	13
3.1. Objetivos del proyecto	13
3.2. Alcance del proyecto	14
4. ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DE LÍNEAS FERROVIARIAS	15
4.1. Subestaciones de tracción	15
4.2. Sistemas de electrificación	16
4.2.1. Catenaria	16
4.2.2. Configuración del sistema de metro	21
4.3. El circuito de retorno	21
5. ANÁLISIS DE SUBESTACIÓN	22
5.1. Análisis eléctrico	22
5.2. Análisis de RAM	25
5.2.1. Consideraciones	26
5.2.2. Listado de componentes	27
5.2.3. Tasas de fallo y reparabilidad	29
5.2.4. Estudio cualitativo: FMECA	30
5.2.5. Estudio cuantitativo: FTA	32
5.3. Análisis económico	36
5.3.1. Vías unidas	39
5.3.2. Vías separadas	42
5.3.3. Comparativa	45
5.4. Tipología subestación favorable	46
6. ANÁLISIS DE CONJUNTO	48
6.1. Análisis eléctrico	48
6.1.1. Criterios generales de la red de tracción	49
6.1.2. Datos de partida	51



6.1.3. Modelización.....	53
6.1.4. Resultados.....	57
6.2. Análisis RAM.....	74
6.2.1. Consideraciones.....	74
6.2.2. Resultados.....	75
6.3. Análisis económico	76
6.3.1. Vías unidas.....	77
6.3.2. Vías separadas	79
6.3.3. Comparativa	81
6.3.4. Comparación económica entre vías unidas y vías separadas	82
6.4. Análisis global	84
6.4.1. Vías unidas.....	84
6.4.2. Vías separadas	85
7. ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL.....	87
7.1. Situación preoperacional	87
7.1.1. Medio físico	87
7.1.2. Medio socioeconómico e institucional	88
7.1.3. Valoración y síntesis de la situación preoperacional	88
7.2. Situación durante la ejecución.....	88
7.2.1. Sobre el medio físico.....	88
7.2.2. Sobre la población.....	88
7.2.3. Fase de obras.....	89
7.3. Situación durante la explotación.....	89
7.4. Medidas preventivas y correctoras.....	89
7.4.1. Fase de ejecución	89
7.4.2. Fase de explotación	90
8. ESTUDIO DE SEGURIDAD Y SALUD.....	92
CONCLUSIONES.....	93
AGRADECIMIENTOS.....	95
BIBLIOGRAFÍA.....	96
Referencias bibliográficas	96
Bibliografía complementaria	96



ANEJOS

VOLUMEN I

ANEJO A: Estudio de Seguridad y Salud

ANEJO B: Simulación eléctrica

ANEJO C: Tipología de subestaciones

VOLUMEN II

ANEJO D: FMECA's



1. Glosario

1.1. Definiciones generales

Alta tensión: Tensión nominal superior a 30 kV.

Aparamenta eléctrica: Conjunto de aparatos de maniobra, de regulación, de seguridad o de control y los accesorios de canalización utilizados en las instalaciones eléctricas.

Aparatos de corte: Elementos destinados a asegurar la continuidad o discontinuidad de los circuitos eléctricos.

Baja tensión: Tensión nominal inferior a 1 kV.

Brazo de atirantado: Elemento que va unido a la ménsula y proporciona el descentramiento requerido al hilo de contacto, además permite un cierto juego vertical para que no suponga un punto duro al paso del pantógrafo.

Cables de retorno: Cables que se usan como refuerzo de los carriles para el paso de corriente. Debido a su menor impedancia, recogen la mayor parte de las corrientes de retorno, alejándolas de los carriles. De este modo es posible reducir las perturbaciones que dichas corrientes de retorno de tracción pueden producir en algunos sistemas de señalización que, para su funcionamiento, también emplean los carriles.

Cantón: Cada uno de los tramos de una extensión de línea separados mediante seccionamiento.

Carril: Cada una de las barras metálicas sobre las que se desplazan las ruedas de los trenes. Los carriles se disponen como una de las partes fundamentales de las vías ferroviarias y actúan como soporte, dispositivo de guiado y elemento conductor de la corriente eléctrica. Además de servir de punto de apoyo del tren, sirven de captadores de las corrientes que salen de los trenes.

Catenaria: Conjunto de conductores que se instalan a lo largo de la línea para realizar el transporte de la energía eléctrica.

Catenaria Rígida: Carril conductor formador por un perfil de aluminio, suministrado en barras de 10 o 12 m, en el que se inserta el hilo de contacto de cobre, del cual toma directamente la corriente el tren mediante los frotadores de los pantógrafos.



Corriente de puesta a tierra: Corriente total que se deriva a tierra a través de la puesta a tierra.

Corriente nominal: Corriente que la aparamenta puede soportar indefinidamente en condiciones nominales de empleo.

Disponibilidad: Porcentaje del tiempo en el que el sistema funciona correctamente.

Electrodo de tierra: Conductor, o conjunto de conductores enterrados, que sirven para establecer una conexión con tierra.

Feeder de acompañamiento: Conductor que se añade a la catenaria para aumentar la sección de ésta y así poder soportar grandes intensidades de corriente que pudieran aparecer en la alimentación del material móvil.

Feeder de alimentación: Conductor que permite alimentar a través de la subestación la catenaria. Parte del pórtico de feeders contenido en la subestación y se conecta a la catenaria por medio del feeder de acompañamiento, o bien a partir del sustentador.

Fiabilidad: Probabilidad de que un sistema funcione normalmente durante un periodo de tiempo.

Hilo de contacto: Conductor que tiene contacto directo con el pantógrafo.

Instalación de tierra: Conjunto formador por electrodos y líneas de tierra de una instalación eléctrica.

Interruptor automático: Aparato de conexión que protege la línea de defectos tales como el cortocircuito.

Mantenibilidad: Facilidad con la que un sistema puede ser modificado para corregir fallos.

Material móvil: Elementos que circulan por las vías como son los diferentes tipos de trenes, tanto de mercancías como de pasajeros.

Media tensión: Tensión nominal entre 1 y 30 kV.

Ménsulas: Conjunto de elementos unidos a cada poste de catenaria que sujetan el sustentador y proporcionan un determinado descentramiento a partir del brazo de atirantado al hilo de contacto.

Nivel de aislamiento: Propiedad de un elemento material de hacer frente a un determinado nivel de tensión.



Para materiales cuya tensión más elevada para el material sea menor que 300 kV, el nivel de aislamiento está definido por las tensiones nominales soportadas a los impulsos de tipo rayo y las tensiones nominales soportadas a frecuencia industrial de corta duración.

Para materiales cuya tensión más elevada para el material sea igual o mayor a 300 kV, el nivel de aislamiento está definido por las tensiones nominales soportadas a los impulsos de tipo maniobra o rayo.

Pantógrafo: *Mecanismo articulado que transmite la energía eléctrica a la locomotora procedente de la catenaria. Se sitúa en el techo de la unidad tractora y es regulable en altura de forma automática para poder alcanzar la catenaria independientemente de la altura a la que se encuentre el hilo conductor aéreo.*

Existen pantógrafos de diferentes tensiones eléctricas en función del metal de contacto con la catenaria y de la tensión a la que esté sometido, desde los más antiguos que eran de doble brazo hasta los más modernos “monobrazos”, adaptándolos para velocidades muy altas.

Péndola: *Conductor de cobre que une el sustentador tanto mecánica como eléctricamente con el hilo de contacto, y a su vez asegura la correcta horizontalidad del hilo.*

Poder de conexión: *Corriente máxima que un aparato es capaz de cerrar a una temperatura dada y en las condiciones prescritas de empleo y funcionamiento sin deteriorarse ni dar origen a manifestaciones externas excesivas.*

Poder de ruptura: *Intensidad máxima que un aparato es capaz de cortar en unas condiciones de empleo dadas.*

Potencia de cierre: *Valor máximo de la potencia que pueden soportar los contactos del relé en el momento de cierre de los mismos.*

Reenganche automático: *Secuencia de maniobras por las que, a continuación de una apertura, se cierra automáticamente un aparato mecánico de conexión después de un tiempo predeterminado.*

Resistencia de tierra: *Resistencia entre un conductor puesto a tierra y un punto de potencial cero.*

Seccionador: *Aparato mecánico de conexión que, por razones de seguridad, en posición abierto asegura una distancia de seccionamiento que satisface unas condiciones específicas de aislamiento. El seccionador es también capaz de soportar corrientes de paso, en las condiciones normales del circuito, así como durante un tiempo específico en condiciones anormales, tales como las de cortocircuito. Existen seccionadores en carga o en vacío, los*



primeros permiten abrir el circuito en tensión, los segundos sólo pueden abrir el circuito cuando éste está exento de tensión.

Sobretensión: *Tensión existente entre dos puntos de una instalación eléctrica, superior al valor máximo que puede existir entre ellos en servicio normal.*

Sustentador: *Conductor que soporta el peso del hilo de contacto y lo mantiene horizontal a través de las péndolas.*

Tensión: *Diferencia de potencial entre dos puntos. En los sistemas de corriente alterna se expresará por su valor eficaz, salvo indicación contraria.*

Tensión de paso: *Tensión que se deriva a tierra en caso de un defecto a tierra entre dos puntos del terreno separados un metro.*

Tensión nominal: *Tensión con la que se denomina un sistema o instalación y para el que se ha previsto su funcionamiento y aislamiento.*

Tensión permanente admisible: *Tensión máxima que puede soportar la bobina de un relé, o los contactos del mismo, en un tiempo específico.*

Tierra: *Masa conductora de la tierra en la que el potencial eléctrico en cada punto se toma, convencionalmente, igual a cero, o todo conductor unido a ella por una impedancia despreciable.*

Trolley: *Catenaria que carece de sustentador y únicamente dispone de hilo de contacto.*

Vano: *Distancia entre dos apoyos consecutivos de una línea eléctrica.*



1.2. Abreviaturas, símbolos y siglas

AT	Alta Tensión
BT	Baja Tensión
MT	Media Tensión
RAMS	Reliability (fiabilidad), Availability (disponibilidad), Maintainability (mantenibilidad) and Security (seguridad)
RAT	Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de Alta Tensión
SE	Subestación Eléctrica
SSAA	Servicios Auxiliares
Vcc	Tensión en Corriente Continua
Vca	Tensión en Corriente Alterna
V.S.	Vías separadas
V.U.	Vías unidas



2. Prefacio

SENER es una empresa de ingeniería en expansión con sedes en Barcelona, Bilbao, Madrid, Sevilla, Valencia, Abu Dhabi, Argel, Buenos Aires, Lisboa, México DF, Okayama (Japón), San Francisco y Varsovia. La sede de Barcelona, en la cual se ha desarrollado este proyecto, está especializada, entre otras, en electrificación y energía de sistemas ferroviarios.

Tradicionalmente, los sistemas de electrificación ferroviaria, se han diseñado teniendo en cuenta sólo criterios eléctricos y económicos. Sin embargo, como infraestructuras básicas que son, estos sistemas deben ofrecer una garantía de funcionamiento. Suponiendo que se hayan diseñado correctamente, los posibles fallos que pueden tener se deberán a fallos de sus propios componentes. En condiciones normales, la frecuencia de estos fallos y el tiempo necesario para solventarlos son de aleatoria naturaleza, por lo que la cuantificación del grado de fiabilidad no puede ser sino probabilística.

Para referirse a fiabilidad, se suele utilizar el acrónimo RAMS: Reliability, Availavility, Maintainability and Security. Desde hace algún tiempo, SENNER está incorporando RAMS en el diseño de los sistemas de electrificación ferroviaria, e intenta hacerlo no sólo para poder ofrecer garantías de funcionamiento a sus clientes, sino para diseñar sistemas que sean más fiables.

El Proyecto Final de Carrera intenta ser un ejercicio metodológico en el cual se estudia la optimización de sistemas de tracción eléctrica teniendo en cuenta criterios usados cotidianamente (eléctricos y económicos) junto con el pertinente estudio de RAMS, fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad. Cada vez que se afronta un determinado proyecto, el equipo de ingenieros encargado de realizarlo, se basa en su propia experiencia y conocimiento para proponer alternativas de diseño. El presente manual debería optimizar este proceso según un análisis de los antecedentes, la viabilidad eléctrica, el nivel de fiabilidad y el coste de la inversión de cada una de las opciones, por lo que debería permitir mejorar tiempo, calidad y coste en la fase de dimensionamiento de la electrificación del sistema ferroviario.



3. Introducción

3.1. Objetivos del proyecto

El Proyecto Final de Carrera cuenta con los cinco objetivos siguientes.

1. Definir las características básicas de la instalación a diseñar.

En primer lugar, se debe definir el sistema de tracción eléctrica y realizar un estudio de sus características básicas. En el caso de metro, se deben definir las características eléctricas, las subestaciones de tracción y el sistema de catenaria entre otros.

2. Realizar simulaciones eléctricas a fin de observar en casos reales el comportamiento de las alternativas.

Esta parte representa uno de los pilares del proyecto. Se utiliza el programa de simulaciones para sistemas de corriente continua STElec de SENER.

3. Análisis RAM.

Las diferentes alternativas objeto de estudio también se analizarán en términos de RAM haciendo un estudio comparativo de la disponibilidad de cada instalación.

4. Optimizar económicamente.

El valor económico de cada tipo de instalación estará compuesto: por un lado de los precios de los componentes que constituyen el sistema de electrificación y por otro lado por los costes de instalación y explotación, a fin de poder extraer conclusiones económicas sobre las alternativas planteadas.

5. Aplicación informática.

Como conclusión final se elabora una aplicación informática que a partir de unos datos estándar, proporcione datos de disponibilidad, número de subestaciones de la línea y coste total de la instalación entre otros. Así pues el usuario, con los resultados proporcionados por el programa podrá ofrecer la mejor solución según el coste, el grado de disponibilidad y la viabilidad eléctrica.



3.2. Alcance del proyecto

El proyecto se centra en el estudio de una línea de metro existente. Tratando las numerosas alternativas de alimentación de la línea se puede extrapolar el estudio a cualquier otra línea de metro de 1.500 Vcc. Dentro de este ámbito, se incluye la definición de toda la aparamenta eléctrica, con excepción de los sistemas de servicios auxiliares (SSAA) que se encargan de alimentar todos los servicios de la propia estación y de los dispositivos de control. Tampoco se toma en consideración la alimentación a talleres y cocheras en caso de que exista.



4. Alimentación eléctrica de líneas ferroviarias

Por sistema de suministro de energía de tracción entendemos el conjunto de elementos necesarios para suministrar, distribuir y transformar la energía eléctrica de la red, en energía eléctrica capaz de permitir la circulación segura e ininterrumpida del material móvil por las redes ferroviarias. Los elementos fundamentales que forman un sistema de suministro de energía de tracción son:

- Las subestaciones de tracción.
- Los sistemas de electrificación.
- El circuito de retorno.

4.1. Subestaciones de tracción

Las subestaciones de tracción reciben media tensión directamente de la acometida, en el caso de este proyecto se considera que la llegada de tensión a las subestaciones es infalible ya que su probabilidad de fallo va sujeta, con frecuencia, a motivos ajenos al diseño, que encarecen de forma considerable la solución final.

Hay distintos modos de recibir tensión en las subestaciones:

- Alimentación directa de compañía a cada subestación.

En el caso de la línea de metro estudiada, la compañía suministradora es quien se encarga de abastecer cada una de las subestaciones, que reciben independientemente suministro directo de compañía. La fiabilidad de este suministro irá condicionada al contrato que se firme con la compañía.

- Anillo de media tensión.

Otra manera es mediante la instalación de un anillo, que permita abastecer todas las subestaciones que se encuentran unidas al anillo de alimentación. Dicha red es alimentada por receptoras, instaladas por la propia red de metro que permite abastecer a todas las subestaciones de tracción.

En ambos casos, el suministro se realiza en corriente alterna por lo que uno de los objetivos principales de las subestaciones de tracción es transformar un determinado nivel de tensión a otro distinto, y realizar la conveniente rectificación de alterna a continua.



La arquitectura de la red de media tensión resulta de escoger el mejor compromiso entre diferentes factores: fiabilidad, tarifas eléctricas (inversamente proporcionales a los niveles de tensión) y costes de inversión (directamente proporcionales a los niveles de tensión).

La red proporciona la potencia eléctrica necesaria, que transformada y rectificada en unos niveles de tensión adecuados, permite alimentar el material móvil que circula por la línea. El suministro eléctrico a las subestaciones, generalmente se realiza a través de una red de media tensión, entre 10 y 30 kV aproximadamente. En el caso de la línea de metro estudiada la tensión es suministrada por compañía independientemente para cada subestación a 30 kV.

Posteriormente la tensión ya reducida y rectificada es distribuida a la catenaria mediante los feeders de alimentación. El circuito se cierra a través de los propios carriles conectados a través de un circuito de retorno hacia la misma subestación. Es muy importante que los niveles de tensión existentes en los carriles no superen un cierto valor establecido por normativa.

El circuito de retorno considerado se encuentra aislado de tierra y sólo cuando la tensión entre el carril y tierra, vigilado por la protección correspondiente instalada en la celda de retorno de la subestación (seccionador en posición normalmente abierto), supera un cierto valor, se conecta el carril a tierra hasta que la intensidad circulante disminuya por debajo de un umbral, momento en el cual el carril vuelve a aislarse de tierra.

4.2. Sistemas de electrificación

4.2.1. Catenaria

Los sistemas de electrificación para tranvía, metro y ferrocarril tienen diferencias notables, aunque en todos la intensidad proviene de la subestación alimentando la locomotora a través de la catenaria y cerrando el circuito a partir del retorno a la subestación a través de los carriles.

- Tranvía

En sistemas tranviarios, la catenaria es del tipo trolley de 1 o 2 hilos de contacto sin sustentador (ver Figura 4.1). El trolley debe ser ligero y con un bajo impacto visual, por lo que se integra en entornos urbanos. Para tranvías el hilo de contacto suele estar alimentado a una tensión de 750 Vcc.





Figura 4.1 Catenaria tranvía

- Ferrocarril

El caso del ferrocarril es ligeramente distinto al del tranvía: se dispone de 1 o 2 hilos de contacto, que cuelgan de un sustentador (ver Figura 4.2). Ambos conductores están unidos a través de unos cables de unión llamados péndolas. En este caso la alimentación se realiza a través del sustentador conectado eléctricamente al hilo de contacto. La catenaria para ferrocarril suele estar alimentada a una tensión de 3.000 Vcc. En el caso de las líneas de alta velocidad la alimentación es a 25 kVca.



Figura 4.2 Catenaria ferrocarril



- Metro

En el caso de metro, se observan notables diferencias respecto a los dos sistemas anteriores. El tipo de catenaria empleado normalmente es el de catenaria rígida (ver Figura 4.3).

El sistema de electrificación por catenaria rígida utiliza un perfil de aluminio en cuya parte inferior se fija el hilo de contacto (ver Figura 4.4). La tensión con la que se alimenta el hilo conductor para metro suele estar comprendida entre 1.200 y 1.500 Vcc.



Figura 4.3 Catenaria metro

Tanto el hilo de contacto como el perfil son montados sin fuerza de tracción. La sección del perfil suele ser de 2.000 mm^2 aproximadamente. El aluminio tiene una conductividad del 60 %, lo que equivale a una sección de 1.200 mm^2 de cobre aproximadamente (conductividad del 98 %), por lo que es posible prescindir de feeder de acompañamiento puesto que la sección ya es lo suficientemente elevada.

El carril conductor se suministra en barras de 10 o 12 metros, en él se inserta el hilo de contacto de cobre, del cual el tren toma directamente la corriente mediante los frotadores de sus pantógrafos.



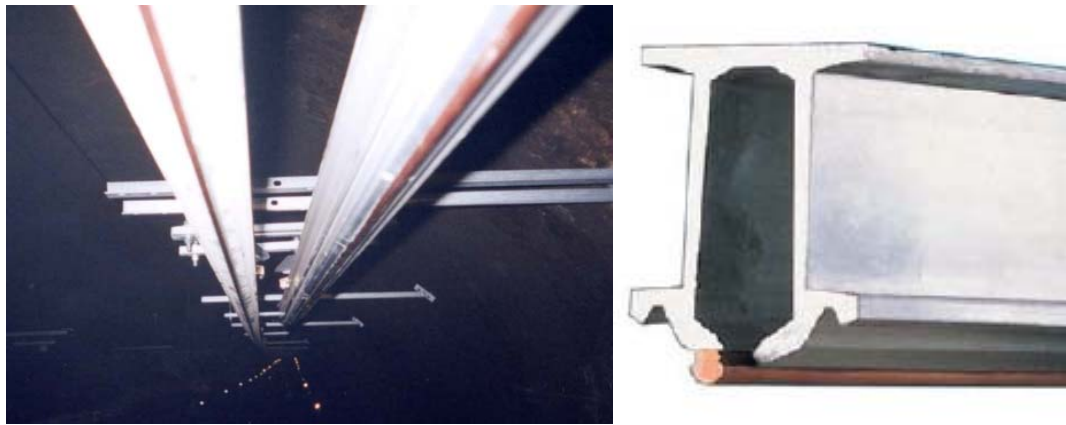


Figura 4.4 Perfil catenaria rígida

La catenaria rígida de metro, al igual que ocurre con la catenaria convencional (ferrocarril), se divide en tramos comprendidos entre 300 y 400 m.

Cada uno de los tramos en que se divide la traza de la catenaria rígida, se denomina cantón. El centro de cada cantón se estabiliza por medio de unos cables, que se fijan en sendas ménsulas. A este punto se le denomina punto fijo. Las partes de cada cantón que quedan a lado y lado del punto fijo, se denominan semicantones.

En estos extremos, las catenarias de un cantón y el siguiente se solapan formando lo que se denomina seccionamiento.

Las barras de carril conductor se unen mediante cuatro bridas sujetas con tornillos dinamométricos con dos cabezas hexagonales, una de ellas se rompe al apretar el tornillo y llegar al par de apriete, la otra sirve para aflojar y quitar el tornillo cuando sea necesario.

Los soportes empleados en la instalación de la catenaria rígida, son los siguientes:

- Ménsula para conjunto de suspensión en túnel.
- Ménsula para conjunto de suspensión en estación.
- Pórtico en zona de agujas, bretelles y túnel entre pantallas con losa a gran altura.

Cada seccionamiento de aire, está formado por dos barras finales de rampa que facilitan el paso suave de una catenaria a la otra. Las dos barras se superponen 3 m en condiciones normales y tienen sus ejes separados 20 cm. La zona curvada es de un metro como máximo. Por razones de seguridad, el hilo de contacto sobresale 10 cm por fuera del extremo de la barra de rampa fuera del carril conductor y se dobla hacia arriba (ver Figura 4.5).





Figura 4.5 Seccionamiento

En las zonas de agujas, diagonales y bretelles, se disponen unas barras de carril conductor tipo rampa para cubrir la electrificación de las vías desviadas (ver Figura 4.6). El paso del pantógrafo de la catenaria rígida de la vía principal a la vía desviada se efectúa, instalando una barra de rampa en el inicio de la aguja dirigida hacia la vida desviada, solapándola con el perfil de catenaria rígida de la vía principal en el punto de aguja.

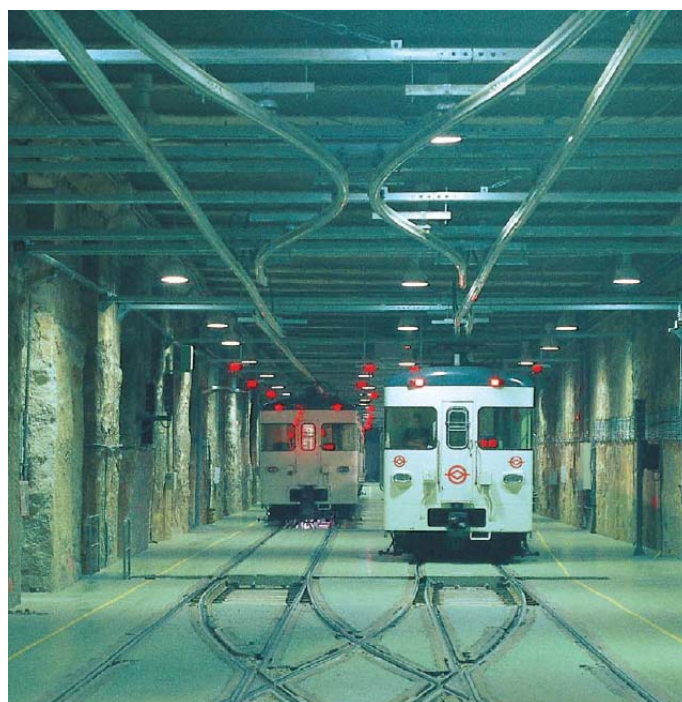


Figura 4.6 Bretelle



En rasgos generales se han detallado los elementos más importantes que constituyen la catenaria rígida y que sirven para hacerse un idea general de cómo es este tipo de sistema de electrificación, que como se ha podido comprobar, difiere en varios aspectos de los sistemas de tranvía y ferrocarril convencional.

4.2.2. Configuración del sistema de metro

Las distintas configuraciones de explotación de un sistema de metro que son un modelo general de alimentación desde las subestaciones de tracción, se detallan a continuación.

- Vías unidas con alimentación de 2 feeders.

Esta configuración de alimentación desde la subestación, alimenta desde una salida de feeder ambos sentidos a un lado de la subestación, y desde la otra salida alimenta el otro lado. La ventaja de este sistema, es que las pérdidas de potencia son menores, puesto que al estar conectadas entre si ambas catenarias y carriles existe una mayor sección de conducción y por tanto menor es la resistencia. El inconveniente es que en caso de fallo de una de las salidas, quedan interrumpidos ambos sentidos de circulación.

- Vías separadas con alimentación de 4 feeders.

Esta configuración de alimentación desde la subestación, alimenta desde cada salida de feeder un solo sentido a un lado de la subestación. La ventaja reside en que en caso de caída de una de las salidas de feeder, sólo queda interrumpido el servicio en el lado y sentido que alimentaba esa salida. El inconveniente es que la sección conductora es menor que en el caso anterior, y por tanto las pérdidas de potencia son mayores.

4.3. El circuito de retorno

Es necesario cerrar el circuito eléctrico y esto se consigue conectando los carriles directamente con el retorno de la subestación. Normalmente se suelen utilizar distintos conductores de la misma sección que conectan directamente con los carriles.

La longitud de estos conductores depende básicamente de la distancia existente entre los carriles y la subestación de tracción.

La conexión del negativo del rectificador a los carriles se realiza en coordinación con el retorno de señalización implantado en la línea.



5. Análisis de subestación

5.1. Análisis eléctrico

En el presente apartado se detallan los componentes eléctricos de los que consta la subestación que se pretende estudiar. En el modelo de subestación de tracción se ha considerado la siguiente aparamenta:

- Seccionador Media Tensión ($U_n = 36$ kV, $I_n = 630$ A).
- Interruptor automático Media Tensión ($U_n = 36$ kV, $I_n = 630$ A).
- Transformador de tracción del tipo seco encapsulado en resina epoxi, de 2.250 kVA de potencia y relación de transformación 30/1,295 kV.
- Rectificador de potencia de 2.000 kW, compuesto de diodos de tipo disco.
- Seccionador bipolar ($U_n = 2$ kV, $I_n = 4$ kA).
- Interruptor automático CC ($U_n = 2$ kV, $I_n = 3,6$ kA).
- Seccionador CC ($U_n = 2$ kV, $I_n = 4$ kA).
- Seccionadores de catenaria ($U_n = 3$ kV, $I_n = 3$ kA).
- Seccionadores de vía ($U_n = 2$ kV, $I_n = 4$ kA).

Normalmente las instalaciones son interiores, por lo que algunos de estos equipos van agrupados en celdas o cabinas.

- Cabinas MT: Seccionador e Interruptor MT.
- Cabina Rectificador: Rectificador y Seccionador bipolar
- Cabinas Feeder: Interruptor CC y Seccionador CC.
- Cabinas de retornos: Seccionadores CC.

Cada transformador se aísla en una sala a parte con paredes de hormigón a sus lados y una reja frontal que comunica con el resto de la estancia.



En cuanto a los seccionadores de catenaria, se encuentran ya fuera de la subestación de tracción, pero son objeto de estudio.

En la Figura 5.1 se puede apreciar un esquema unifilar de una tipología de subestación de tracción muy usual, con dos grupos de transformación-rectificación.

Los equipos y su nomenclatura para identificarlos en el plano son los siguientes:

Seccionador MT	SECCAXX
Interruptor automático MT	INTCAXX
Transformador de tracción	TX
Rectificador de potencia	RX
Seccionador bipolar	SECCCXX
Interruptor automático CC	INTCCXX
Seccionador CC	SECCCXX
Seccionadores de catenaria	SECCCXX
Seccionadores de vía	SECCCXXX



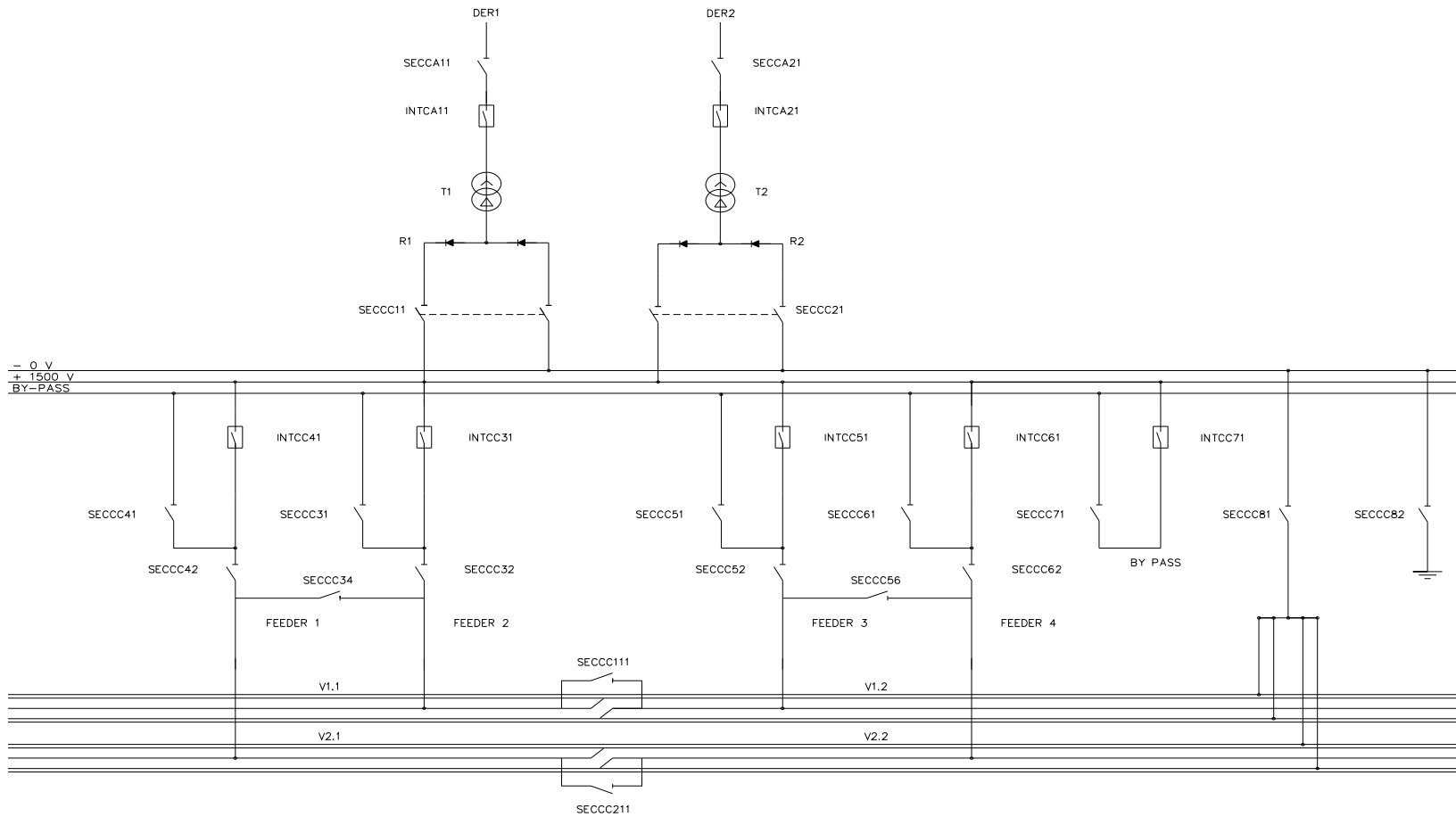


Figura 5.1 Unifilar 2 grupos transformación-rectificación

5.2. Análisis de RAM

El estudio de RAMS, acrónimo de reliability (fiabilidad), availability (disponibilidad), maintainability (mantenibilidad) y security (seguridad), se aplica a las distintas tipologías de subestación de tracción, detallando el valor individual de fiabilidad de cada uno de los componentes que la constituyen para extraer posteriormente la disponibilidad de un determinado conjunto según las tipologías de subestación.

En el presente proyecto se considerarán tres aspectos del ciclo RAMS: fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.

La fiabilidad y la disponibilidad hacen referencia a la capacidad de un sistema para operar correctamente. Esta capacidad depende, entre otros, de los factores siguientes:

- Todos los posibles modos de fallo en la aplicación específica y el entorno.
- La probabilidad de que suceda cada fallo o, alternativamente, ratio de suceso de cada uno (tasa de fallo).
- El efecto de un fallo en la funcionalidad del sistema.

La mantenibilidad se centra en las medidas a priori, o preventivas, para eliminar o disminuir las vulnerabilidades y amenazas en general; tiene como objetivo evitar cualquier tipo de fallo mediante la detección de los primeros síntomas de anomalía. De esta manera, se toman las medidas adecuadas para anticipar la resolución a un problema inminente, evitando así las posteriores medidas correctivas y caídas o degradaciones del funcionamiento del sistema. Entre los factores que afectan la mantenibilidad se pueden destacar los siguientes:

- Tiempo de realización del mantenimiento.
- Tiempo para la detección, identificación y localización de fallos.
- Tiempo para reestablecer un sistema en caso de fallo.
- Todos los modos de operación y mantenimiento requeridos durante todo el ciclo del sistema.

Los tres conceptos de RAM están relacionados y se estudian en conjunto. Esto da lugar al ciclo de RAM y a su utilización como herramienta para la mejora continua y la búsqueda de una óptima calidad. Los objetivos sólo pueden conseguirse mediante un control continuo de



los requisitos de fiabilidad y mantenibilidad, así como la realización de las actividades de operación y mantenimiento en el entorno del sistema.

El estudio está dividido en distintas partes:

- Consideraciones.
- Listado de componentes.
- Tasas de fallo y reparabilidad.
- Estudio cualitativo: FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Analysis).
- Estudio cuantitativo: FTA (Fault Tree Analysis).

Como resultado del estudio de análisis de fiabilidad se obtendrá un MTBF (mean time between failure) global para cada configuración, teniendo en cuenta, las relaciones funcionales entre los diferentes componentes de cada subsistema.

En definitiva, este estudio permite obtener, para cada tipología y configuración, la disponibilidad que posee cada subestación de tracción.

5.2.1. Consideraciones

5.2.1.1. Consideraciones generales

El cálculo de la fiabilidad del sistema se realizará teniendo en cuenta que:

- No se consideran los daños causados por terceras personas.
- Todos los fallos de los componentes se consideran independientes entre sí y de aparición aleatoria.
- Se considera que los sistemas funcionalmente relacionados con el presente estudio, funcionan correctamente.
- El estudio de fiabilidad se ha realizado desde un punto de vista conservador, es decir, que los resultados tienden a ser pesimistas.
- Se ha considerado que todos los elementos son reparables.
- Se ha considerado que la reparación de los equipos se realiza directamente sustituyendo el equipo por otro de iguales características.



5.2.1.2. Consideraciones eléctricas

En cuanto a las consideraciones eléctricas se pueden distinguir dos posibles fallos críticos que producen la interrupción del servicio.

- Fallo producido en un componente situado entre la entrada de línea de MT en alterna y la entrada, en continua, a las cabinas de feeder.

Cualquiera de las modalidades de fallo posibles que ocurran pueden desembocar en la interrupción del servicio, todo dependerá del nivel de redundancia de la subestación. Por tanto, si dispone de un único grupo de transformación-rectificación, un fallo crítico desencadenará directamente la interrupción del servicio, en cambio con dos o más grupos, un fallo crítico de uno de los grupos puede que no necesariamente desemboque en la interrupción del servicio.

- Fallo producido en un componente situado entre las cabinas de feeder y las vías.

Directamente el fallo de uno de los equipos de cualquiera de las salidas de feeder desemboca en la interrupción del servicio, únicamente pudiéndose evitar en caso de que la subestación en cuestión disponga de by-pass. La interrupción también puede ser ocasionada por un fallo en las celdas de retorno.

5.2.2. Listado de componentes

A continuación se detallan los componentes presentes en la subestación de tracción, que son los mismos para cada tipología de subestación de tracción y únicamente variarán en su cantidad. Las distintas subestaciones de tracción consideradas en el proyecto se encuentran en el Anejo C. Tipologías de Subestaciones. Los componentes y su nomenclatura son los siguientes:

Seccionador MT	SECCAXX
Interruptor automático MT	INTCAXX
Transformador de tracción	TX
Rectificador de potencia	RX
Seccionador bipolar	SECCCXX
Interruptor automático CC	INTCCXX
Seccionador CC	SECCCXX



Seccionadores de catenaria

SECCXX

Seccionadores de vía

SECCXXX

En referencia al análisis del Interruptor automático, tanto el que se encuentra en la parte de corriente alterna como en la parte de corriente continua, se ha dividido en tres componentes básicos:

- El disyuntor: formado por los dos contactos que permiten extinguir el arco que se genera entre ambas superficies cuando se realiza la apertura del circuito.
- El relé: encargado de accionar el interruptor cuando se detecta un defecto en el circuito.
- Transformador de intensidad o Shunt: realiza la medición de intensidad (el transformador de intensidad para la parte de corriente alterna y el shunt para la parte de corriente continua) que recorre el circuito en cada instante, y da la orden de actuar al relé cuando se produce un defecto.

En la Figura 5.2 y Figura 5.3 se muestra un esquema del interruptor automático.

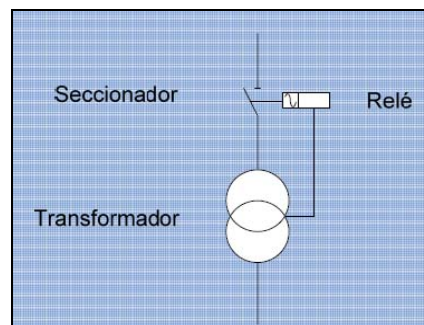


Figura 5.2 Interruptor CA

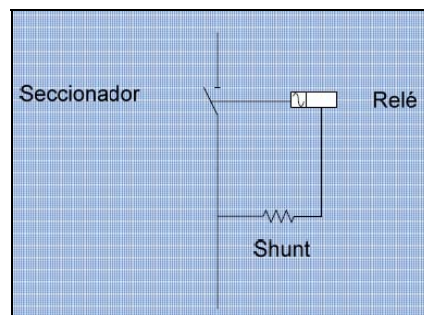


Figura 5.3 Interruptor CC



5.2.3. Tasas de fallo y reparabilidad

El ciclo de vida útil a considerar para el estudio de fiabilidad es de 25 años. Los fabricantes de los equipamientos electrotécnicos instalados cambian de catálogo aproximadamente cada 15 años y así de producto. Pueden suministrar piezas de recambio durante 10 años después del fin de la comercialización del equipamiento.

Las tasas de fallo y reparabilidad se han extraído de la publicación “Reliability Prediction of Electronic Equipment” (MIL-HDBK-217F) y de la publicación “IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Comercial Power Systems” (IEEE Std 493-2007).

Además de las tasas de fallo teóricas se dispone también de un manual de mantenimiento del cual se han extraído tasas de fallo y reparabilidad experimentales.

Las tasas empleadas en el estudio son las que se detallan en la Tabla 5.1.

Equipos		Teóricas				Experimentales	
		λ [fallos/h]	μ [rep./h]		λ [fallos/h]	μ [rep./h]	
Seccionador	-	6,96E-07	6,25E-01		1,20E-06	0,67	
Interruptor MT (CA)	Seccionador	6,96E-07	3,42E-07	6,25E-01	7,75E-03	7,26E-06	0,40
	Relé	2,28E-08		2,00E-01			
	Transf. Intensidad	6,74E-07		3,36E-03			
Transformador tracción	-	6,74E-07	3,36E-03		2,50E-05	0,63	
Rectificador	-	4,34E-06	2,56E-02		5,85E-05	0,31	
Interruptor salida feeder (CC)	Seccionador	6,96E-07	3,42E-07	6,25E-01	7,75E-03	5,20E-06	0,37
	Relé	2,28E-08		2,00E-01			
	Shunt	6,74E-07		3,36E-03			

Tabla 5.1 Tasas de fallo y reparabilidad

Como se puede observar en la tabla anterior las tasas teóricas son bastante similares a las experimentales, en el caso de las tasas de fallo teóricas, ofrecen datos más optimistas, es decir, menos probabilidad de fallo cada hora.



5.2.4. Estudio cualitativo: FMECA

El análisis cualitativo se ha realizado a través del FMECA (Failure Mode, Criticality, and Effect Analysis o Análisis de Modalidades, Efectos y Criticidad de Fallos).

El análisis se ha realizado desde un punto de vista funcional a nivel de cada componente que constituye la instalación. Sin embargo, es necesario un conocimiento del sistema global para poder interpretar el nivel de detalle exigido.

En la Tabla 5.2 se detalla el contenido de cada campo del FMECA que aplica a cada uno de los componentes objeto de estudio.

Campo	Descripción
Id	Número de referencia de línea de la FMECA.
LRU	Line Replaceable Unit (componente objeto del estudio).
Función	Descripción sintética de la función del componente.
Modalidad Operacional	Situación del componente respecto del sistema.
Modalidad de Fallo	Descripción de cómo puede fallar el componente.
Causa del Fallo	Descripción de la causa más probable relacionada a la modalidad de fallo objeto del estudio.
Efecto del Fallo	Descripción de las consecuencias (locales y a nivel de sistema) del fallo.
Detección	Medio para detectar el incorrecto funcionamiento.
Criticidad	Impacto del fallo sobre la seguridad y/o las prestaciones y afectación sobre el sistema.
Repartición	Asignación de las correspondientes tasas para cada tipo de fallo de cada componente.
Failrate (λ)	Tasa de fallo correspondiente a cada modalidad de fallo de cada componente.



Campo	Descripción
Repairrate (μ)	Tasa de reparabilidad correspondiente a cada componente, se considera que los componentes son sustituidos por otros de iguales características al producirse cualquier fallo.

Tabla 5.2 Descripción FMECA

Los porcentajes de fallo de las reparticiones de cada componente del FMECA han sido extraídos del documento MIL_HDBK_338B. Con estos porcentajes es posible asignar una tasa correcta, puesto que una modalidad de fallo no tiene porque ocurrir con la misma frecuencia que otra, es decir, un seccionador por ejemplo, con su respectiva tasa de fallo, tiene un 65 % de repartición para el fallo de apertura, 9,5 % para la posición de bloqueo en posición abierta, 9,5 % para la posición de bloqueo en cerrado y un 16 % de repartición por cortocircuito.

Es vital para el desarrollo posterior asignar correctamente la criticidad del sistema, concretamente en la subcolumna TOP EVENT, se categorizan las modalidades de fallo en función de su severidad en los cuatro niveles que se muestran en la Tabla 5.3.

Categoría	Definición
Crítico	El fallo produce una interrupción en el funcionamiento normal del componente de más de 2 horas.
Mayor	El fallo produce una interrupción en el funcionamiento normal del componente al que afecta entre 30 minutos y 2 horas.
Menor	El fallo produce una interrupción en el funcionamiento normal del componente al que afecta entre 15 y 30 minutos.
Transcurable	El fallo produce una interrupción en el funcionamiento normal del componente al que afecta menos de 15 minutos.

Tabla 5.3 Criticidad

Según los niveles de redundancia del sistema global, el fallo en un componente puede interrumpir o no el funcionamiento normal del sistema. Supondremos por tanto que, un fallo mayor de 2 horas en el sistema global, supone la caída de la subestación de tracción y por tanto la interrupción de la totalidad del servicio de metro.



5.2.5. Estudio cuantitativo: FTA

El estudio cuantitativo se realiza a través de la herramienta FTA (Fault Tree Analysis o Árbol de Fallos).

A través del estudio cualitativo realizado se obtiene la parte final del estudio que consiste en extraer la disponibilidad global del conjunto de componentes que forma cada tipología de subestación. Previamente, conviene estudiar como interaccionan todos los componentes entre sí, teniendo en cuenta la criticidad de cada modalidad de fallo. Para todas las tipologías de subestación se ha dividido el estudio en la parte de media tensión, parte de transformación-rectificación y parte de continua.

La modelización se realiza a través de puertas AND, OR y N/K básicamente:

- Puertas AND

Las puertas AND se utilizan cuando existen redundancias, de manera que necesariamente se debe producir un fallo crítico en todas las alternativas para que se produzca el fallo. También se utilizan cuando dos o más modalidades de fallo no críticas, si ocurren simultáneamente, desembocan en un fallo crítico que provoca la interrupción del sistema (ver Figura 5.4).

Este tipo de puertas, únicamente dan fallo cuando necesariamente todas las variantes que relaciona fallan.

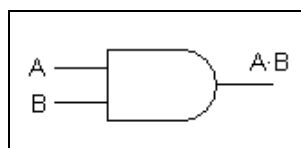


Figura 5.4 Puerta AND

- Puertas OR

Las puertas OR se utilizan cuando cualquier fallo de alguna de las modalidades de fallo que relaciona produce la interrupción del sistema. En este tipo de puertas se encuentran todos los fallos críticos de cada componente (ver Figura 5.5).

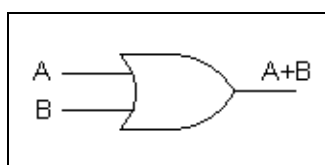


Figura 5.5 Puerta OR



- Puertas K/N

Las puertas K/N se utilizan para especificar a partir de qué número de fallos consecutivos se produce el fallo del sistema global. Esta tipología de puerta se utiliza sobretodo para tener en cuenta la redundancia de las subestaciones en el sistema global (redundancia N-1), es decir, se considera que a partir de la caída de la segunda subestación simultánea se produce un fallo global, esto se especifica introduciendo como $K = 2$, y como N el número total de subestaciones del sistema (ver Figura 5.6).

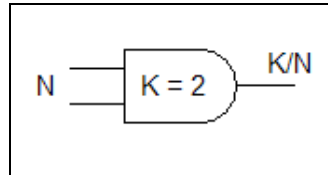


Figura 5.6 Puerta K/N



En la Figura 5.7 se muestra un ejemplo de cómo sería la estructura para el caso de un grupo transformador-rectificador, concretamente de la parte de media tensión, formada por el seccionador y el interruptor automático colocados en serie.

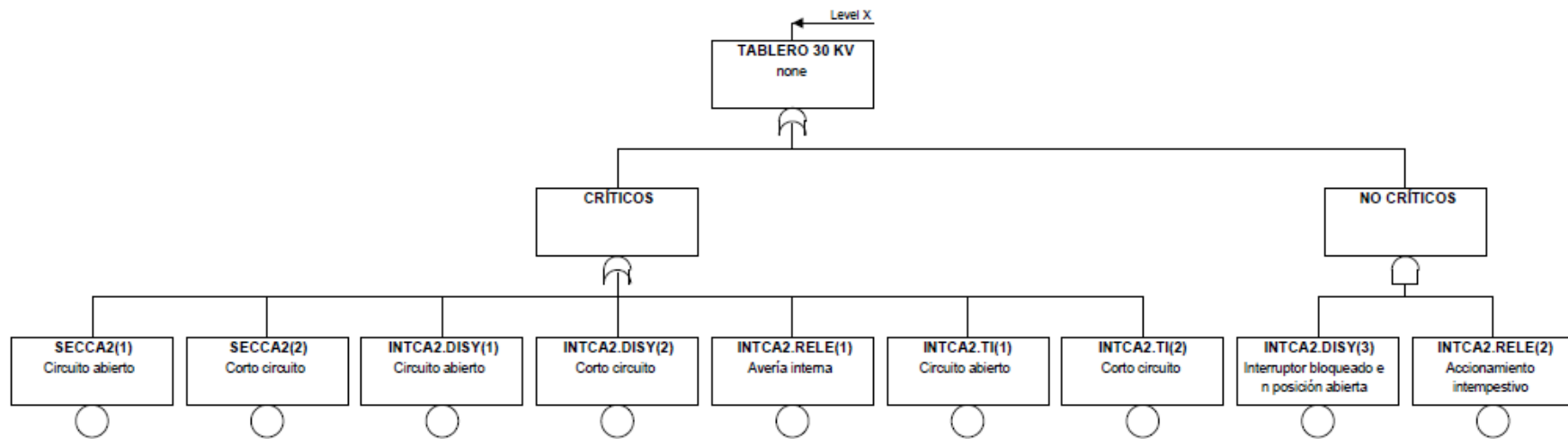


Figura 5.7 Parte MT

Como se ha comentado, la parte de CRÍTICOS unidos mediante una puerta OR, emite fallo en caso de que cualquiera de las modalidades de fallo caiga. La parte de NO CRÍTICOS, unidos mediante una puerta AND, emite fallo en caso de que ambos caigan simultáneamente. Tanto CRÍTICOS como NO CRÍTICOS van unidos mediante una puerta OR, de manera que cualquiera de las dos partes que falle desemboca en fallo del sistema.

Una vez se han realizado todos los esquemas con la relación entre componentes y se han implementado en un software que automáticamente, mediante las tasas de fallo y reparabilidad correspondientes para cada componente y su modalidad de fallo, se obtiene la disponibilidad de cada tipología de subestación de tracción.

El software empleado, STUDIO STARS, está preparado para desarrollar este tipo de estudio cuantitativo mediante Árbol de Fallos y ofrece de manera rápida y directa la disponibilidad del sistema introducido. La Figura 5.7 es una copia de pantalla directa del programa.

Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 5.4.

	Vías unidas				Vías separadas			
	SIN BP		CON BP		SIN BP		CON BP	
	Indisp.	% disp.	Indisp.	% disp.	Indisp.	% disp.	Indisp.	% disp.
1G	3,04E-02	96,960000	2,47E-02	97,530000	3,62E-02	96,380000	2,47E-02	97,530000
2G	6,41E-03	99,359000	5,08E-04	99,949200	1,23E-02	98,770000	5,27E-04	99,947300
3G	5,94E-03	99,406000	3,09E-05	99,996910	1,18E-02	98,820000	5,03E-05	99,994970

Tabla 5.4 Disponibilidades

5.3. Análisis económico

En el presente apartado se exponen los costes unitarios de la instalación de una subestación, que variará en función del número de grupos de transformación-rectificación y las salidas de feeder de las que disponga.

Toda la aparataje existente en la subestación y el precio considerado es el detallado en la Tabla 5.5 (todos los precios existentes no llevan incluido el I.V.A.).

CÓDIGO	UDS	RESUMEN	PRECIO [€]
01		Celdas blindadas en SF6. 30 kV, 1.250 A	
01.01	u	Celda de protección de transformador	
		Suministro y montaje de celda de protección de transformador, incluido transformadores de medida y protección, aparataje interna, gas SF6 y 3 conectores enchufables 18/30 kV 185 mm ² totalmente instalado.	26.456,76
02		Transformadores	
02.01	u	Transformador de tracción 2.250 kVA	
		Suministro y montaje de transformador de tracción 2.250 kVA, 30/1,295 kV, aislamiento seco, incluido protecciones.	42.199,60
02.02	u	Transformador de SSAA 100 kVA	
		Suministro y montaje de transformador de SSAA 100 kVA, 30/0,230 kV, aislamiento seco, incluido protecciones.	8.898,85
03		Rectificadores y celdas de 1.500 Vcc	
03.01	u	Protecciones para corriente continua	
		Suministro, montaje y conexionado de red de protecciones para la parte de corriente continua que se compone de una red de cableado de fibra óptica en bus para la recogida de datos de los equipos de corriente continua.	10.456,58
03.02	u	Celda de rectificador 2.000 kW	
		Suministro y montaje de celda de rectificador hexafásico 2.000 kW y seccionador, incluidos equipos de medida y aparataje interna.	72.974,64
03.03	u	Celda de salida de Feeder	
		Suministro y montaje de celdas de salida de Feeder 1.500 Vcc, 3.600 A, incluidos equipos de medida y aparataje interna.	40.653,26
03.04	u	Celda de By-pass	
		Suministro y montaje de celda de By-pass 1.500 Vcc, incluidos equipos de medida y aparataje interna.	37.147,70
03.05	u	Celda de retornos	
		Suministro y montaje de celda de retornos 1.500 Vcc, 3.600 A, incluidos equipos de medida y aparataje interna.	29.455,91
04		Seccionadores de catenaria	
04.01	u	Cuadro eléctrico para maniobra	
		Cuadro eléctrico para la maniobra de los seccionadores de catenaria, totalmente montado, puesto en marcha y dispuesto para su funcionamiento. Incluye la aparataje interna del armario y su conexionado.	6.416,33
04.02	u	Seccionador unipolar	
			4.185,68



CÓDIGO	UDS	RESUMEN	PRECIO [€]
		Unidad completa de seccionador unipolar de apertura en carga de 3 kV y 3 kA, de accionamiento manual y motorizado con corriente alterna 230 Vca, totalmente montado y dispuesto para su funcionamiento, incluyendo soportes, conexionado de cables de potencia entre subestación y cámara de seccionadores, bandejas y accesorios en general.	
04.03	u	Unidad completa de intervalo de descargas	
		Unidad completa de intervalo de descarga, situado en la cámara de seccionadores, totalmente montado y dispuesto para su funcionamiento, incluyendo soportes, conexionado de cables entre vías y cámara de seccionadores, bandejas y accesorios en general.	3.059,17
04.04	u	Unidad completa de detector de tensión en vías	
		Unidad completa de detector de tensión en vías, destinado al bloqueo de la maniobra de los seccionadores de puesta a tierra. Totalmente montado y dispuesto para su funcionamiento.	1.297,47
05		Cables de potencia A.T.	
05.01	m	Cables de Cu AFUMEX (XLPE) 18/30 kV 1x120 mm²	
		Suministro y montaje de cable de Cu AFUMEX H (XLPE) 18/30 kV 1x120 mm ² , para alimentación en MT de los transformadores.	41,30
05.02	m	Cables de Cu XLPE/LSF 1 1,8/3 kV 1x300 mm²	
		Suministro y montaje de cable de Cu XLPE/LSF 1 1,8/3 kV 1x300 mm ² para alimentación en MT de los transformadores.	28,74
06		Servicios auxiliares	
06.01	u	Cuadro de BT	
		Suministro y montaje de cuadro de BT 230 V, 160 A y subcuadros de Vcc, incluido cableado, canalizaciones y pequeño material para su perfecta ejecución. Se incluye también la puesta en marcha.	18.116,83
06.02	u	Rectificador-Baterías 110 Vcc	
		Suministro y montaje de conjunto rectificador-baterías 110 Vcc, 100 A, 180 min. Incluido cableado, canalizaciones y pequeño material necesario para su perfecta ejecución.	19.128,33
06.03	u	Ondulador estático de tensión	
		Suministro y montaje de ondulador estático de tensión 3.000 VA, 110 Vcc/230 Vca, incluido cableado, canalizaciones y pequeño material necesario para su ejecución. Se incluye también puesta en marcha.	1.898,03
06.04	u	Instalación iluminación y tomas de corriente	
		Suministro y montaje de la instalación de iluminación y tomas de corriente, incluido cableado, canalizaciones y pequeño material necesario para su ejecución. Se incluye también la puesta en marcha de la unidad.	15.153,31
06.05	u	Instalación ventilación y climatización	
		Suministro y montaje de instalación de ventilación forzada y climatización, incluido cableado, canalizaciones y pequeño material necesario para su perfecta ejecución. Incluye también la puesta en marcha.	26.466,66
06.06	u	Instalación detección incendios	
		Suministro y montaje de la instalación de detección de incendios, incluido cableado, canalizaciones y pequeño material necesario para su perfecta ejecución. Incluye también la puesta en marcha.	41.337,49
06.07	u	Armario de contadores	
		Suministro y montaje de armario de contadores para medida de propiedad. Incluido cableado, canalizaciones y pequeño material necesario para la ejecución. Incluye puesta en marcha.	8.345,75
06.08	u	Red de puesta a tierra	
			8.538,53



CÓDIGO	UDS	RESUMEN	PRECIO [€]
		Suministro y montaje de red de puesta a tierra. Incluye mediciones y pruebas.	
06.09	u	Cajas de seccionamiento de puesta a tierra	
		Suministro y montaje de cajas de seccionadores de puesta a tierra, platinas equipotenciales, cables y fijaciones. Incluye mediciones y pruebas.	4.938,85
07		Obra civil asociada	
07.01		Obra civil asociada	
		Obra civil asociada, incluyendo compartimentación y acabados.	108.952,86
08		Sistema de control distribuido	
08.01	u	Sistema de control distribuido	
		Suministro y montaje de cableado, relés de protección digital, PLC's, red de comunicaciones interna con protecciones MT y cuadro de protección contra defectos a estructuras entre otros.	225.399,77
09		Ingeniería, implantación y pruebas	
09.01		Ingeniería, implantación y pruebas	
		Ingeniería para el desarrollo, implementación y pruebas del sistema eléctrico y del sistema de control distribuido. Legalización de la instalación y elaboración de la documentación técnica del sistema de tracción (documentación de montaje, pruebas y puesta en servicio).	145.580,62
10		Catenaria	
10.01	m	Hilo de contacto 153 mm²	
		Suministro y montaje de un metro de hilo de contacto de Cu de 153 mm ² en la barra del perfil aéreo de contacto. Se incluyen desplazamientos, maquinaria, útiles y medios auxiliares.	9,79
10.02	m	Catenaria rígida 1.400 mm²	
		Suministro y montaje de un perfil por extrusión en aluminio aleado de forma casi rectangular, con una sección de 1.400 mm ² .	8,60

Tabla 5.5 Precios unitarios

En la Tabla 5.6 y Tabla 5.7 se exponen los presupuestos según cada tipología de subestación de tracción.



5.3.1. Vías unidas

CÓD.	UDS	RESUMEN	PRECIO [€]	1G+2F	1G+2F+Bp	2G+2F	2G+2F+Bp	3G+2F	3G+2F+Bp
01		Celdas blindadas en SF6. 30 kV, 1.250 A		79.370,28	79.370,28	105.827,04	105.827,04	132.283,80	132.283,80
01.01	u	Celda de protección de transformador	26.456,76	3	3	4	4	5	5
				79.370,28	79.370,28	105.827,04	105.827,04	132.283,80	132.283,80
02		Transformadores		59.997,30	59.997,30	102.196,90	102.196,90	144.396,50	144.396,50
02.01	u	Transformador de tracción 2.250 kVA	42.199,60	1	1	2	2	3	3
				42.199,60	42.199,60	84.399,20	84.399,20	126.598,80	126.598,80
02.02	u	Transformador de SSAA 100 kVA	8.898,85	2	2	2	2	2	2
				17.797,70	17.797,70	17.797,70	17.797,70	17.797,70	17.797,70
03		Rectificadores y celdas de 1.500 Vcc		194.193,65	231.341,35	267.168,29	304.315,99	340.142,93	377.290,63
03.01	u	Protecciones para corriente continua	10.456,58	1	1	1	1	1	1
				10.456,58	10.456,58	10.456,58	10.456,58	10.456,58	10.456,58
03.02	u	Celda de rectificador 2.000 kW	72.974,64	1	1	2	2	3	3
				72.974,64	72.974,64	145.949,28	145.949,28	218.923,92	218.923,92
03.03	u	Celda de salida de Feeder	40.653,26	2	2	2	2	2	2
				81.306,52	81.306,52	81.306,52	81.306,52	81.306,52	81.306,52
03.04	u	Celda de By-pass	37.147,70	0	1	0	1	0	1
				0,00	37.147,70	0,00	37.147,70	0,00	37.147,70
03.05	u	Celda de retornos	29.455,91	1	1	1	1	1	1
				29.455,91	29.455,91	29.455,91	29.455,91	29.455,91	29.455,91
04		Seccionadores de catenaria		24.627,48	24.627,48	24.627,48	24.627,48	24.627,48	24.627,48
04.01	u	Cuadro eléctrico para maniobra	6.416,33	1	1	1	1	1	1
				6.416,33	6.416,33	6.416,33	6.416,33	6.416,33	6.416,33
04.02	u	Seccionador unipolar	4.185,68	3	3	3	3	3	3
				12.557,04	12.557,04	12.557,04	12.557,04	12.557,04	12.557,04
04.03	u	Unidad completa de intervalo de descargas	3.059,17	1	1	1	1	1	1
				3.059,17	3.059,17	3.059,17	3.059,17	3.059,17	3.059,17
04.04	u	Unidad completa de detector de tensión en vías	1.297,47	2	2	2	2	2	2

CÓD.	UDS	RESUMEN	PRECIO [€]	1G+2F	1G+2F+Bp	2G+2F	2G+2F+Bp	3G+2F	3G+2F+Bp
09.01		Ingeniería, implantación y pruebas	145.580,62	1	1	1	1	1	1
				145.580,62	145.580,62	145.580,62	145.580,62	145.580,62	145.580,62
10		Catenaria		46.011,78	46.011,78	82.828,56	82.828,56	118.321,26	118.321,26
10.01	m	Hilo de contacto 153 mm ²	9,79	2.502,00	2.502,00	4.504,00	4.504,00	6.434,00	6.434,00
				24.494,58	24.494,58	44.094,16	44.094,16	62.988,86	62.988,86
10.02	m	Catenaria rígida 1.400 mm ²	8,60	2.502,00	2.502,00	4.504,00	4.504,00	6.434,00	6.434,00
				21.517,20	21.517,20	38.734,40	38.734,40	55.332,40	55.332,40
TOTAL				1.078.069	1.115.217	1.272.860	1.310.007	1.466.326	1.503.474

Tabla 5.6 Presupuesto V.U.

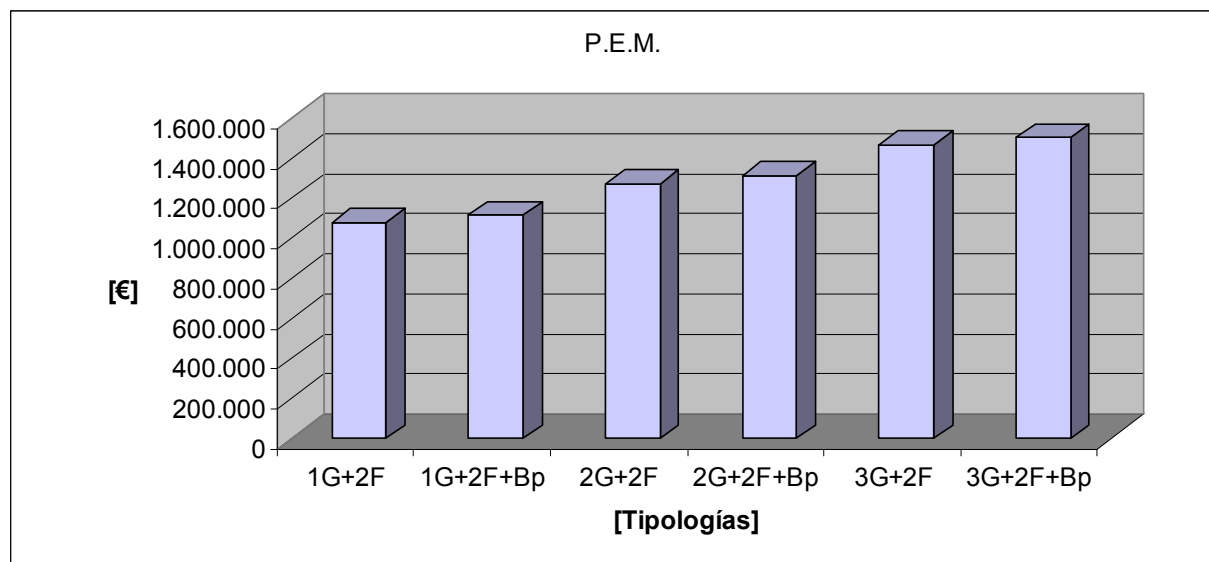


Figura 5.8 Presupuesto V.U.

CÓD.	UDS	RESUMEN	PRECIO [€]	1G+4F	1G+4F+Bp	2G+4F	2G+4F+Bp	3G+4F	3G+4F+Bp
04.04	u	Unidad completa de detector de tensión en vías	1.297,47	4	4	4	4	4	4
				5.189,88	5.189,88	5.189,88	5.189,88	5.189,88	5.189,88
05		Cables de potencia A.T.		30.883,20	30.883,20	30.883,20	30.883,20	30.883,20	30.883,20
05.01	m	Cables de Cu AFUMEX (XLPE) 18/30 kV 1x120 mm ²	41,30	372,00	372,00	372,00	372,00	372,00	372,00
				15.363,60	15.363,60	15.363,60	15.363,60	15.363,60	15.363,60
05.02	m	Cables de Cu XLPE/LSF 1 1,8/3 kV 1x300 mm ²	28,74	540,00	540,00	540,00	540,00	540,00	540,00
				15.519,60	15.519,60	15.519,60	15.519,60	15.519,60	15.519,60
06		Servicios auxiliares		163.052,11	163.052,11	163.052,11	163.052,11	163.052,11	163.052,11
06.01	u	Cuadro de BT	18.116,83	1	1	1	1	1	1
				18.116,83	18.116,83	18.116,83	18.116,83	18.116,83	18.116,83
06.02	u	Rectificador-Baterías 110 Vcc	19.128,33	2	2	2	2	2	2
				38.256,66	38.256,66	38.256,66	38.256,66	38.256,66	38.256,66
06.03	u	Ondulador estático de tensión	1.898,03	1	1	1	1	1	1
				1.898,03	1.898,03	1.898,03	1.898,03	1.898,03	1.898,03
06.04	u	Instalación iluminación y tomas de corriente	15.153,31	1	1	1	1	1	1
				15.153,31	15.153,31	15.153,31	15.153,31	15.153,31	15.153,31
06.05	u	Instalación ventilación y climatización	26.466,66	1	1	1	1	1	1
				26.466,66	26.466,66	26.466,66	26.466,66	26.466,66	26.466,66
06.06	u	Instalación detección incendios	41.337,49	1	1	1	1	1	1
				41.337,49	41.337,49	41.337,49	41.337,49	41.337,49	41.337,49
06.07	u	Armario de contadores	8.345,75	1	1	1	1	1	1
				8.345,75	8.345,75	8.345,75	8.345,75	8.345,75	8.345,75
06.08	u	Red de puesta a tierra	8.538,53	1	1	1	1	1	1
				8.538,53	8.538,53	8.538,53	8.538,53	8.538,53	8.538,53
06.09	u	Cajas de seccionamiento de puesta a tierra	4.938,85	1	1	1	1	1	1
				4.938,85	4.938,85	4.938,85	4.938,85	4.938,85	4.938,85
07		Obra civil asociada		108.952,86	108.952,86	125.295,79	125.295,79	141.638,72	141.638,72
07.01		Obra civil asociada	108.952,86	1,00	1,00	1,15	1,15	1,30	1,30
				108.952,86	108.952,86	125.295,79	125.295,79	141.638,72	141.638,72

CÓD.	UDS	RESUMEN	PRECIO [€]	1G+4F	1G+4F+Bp	2G+4F	2G+4F+Bp	3G+4F	3G+4F+Bp
08		Sistema de control distribuido		225.399,77	225.399,77	225.399,77	225.399,77	225.399,77	225.399,77
08.01	u	Sistema de control distribuido	225.399,77	1	1	1	1	1	1
				225.399,77	225.399,77	225.399,77	225.399,77	225.399,77	225.399,77
09		Ingeniería, implantación y pruebas		145.580,62	145.580,62	145.580,62	145.580,62	145.580,62	145.580,62
09.01		Ingeniería, implantación y pruebas	145.580,62	1	1	1	1	1	1
				145.580,62	145.580,62	145.580,62	145.580,62	145.580,62	145.580,62
10		Catenaria		46.011,78	46.011,78	82.828,56	82.828,56	118.321,26	118.321,26
10.01	m	Hilo de contacto 153 mm ²	9,79	2.502,00	2.502,00	4.504,00	4.504,00	6.434,00	6.434,00
				24.494,58	24.494,58	44.094,16	44.094,16	62.988,86	62.988,86
10.02	m	Catenaria rígida 1.400 mm ²	8,60	2.502,00	2.502,00	4.504,00	4.504,00	6.434,00	6.434,00
				21.517,20	21.517,20	38.734,40	38.734,40	55.332,40	55.332,40
TOTAL				1.184.003	1.221.151	1.378.794	1.415.941	1.572.260	1.609.408

Tabla 5.7 Presupuesto V.S.

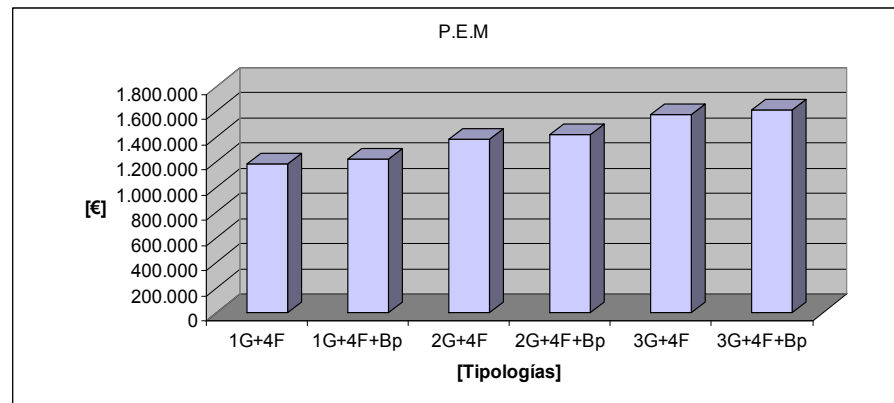


Figura 5.9 Presupuesto V.S.

5.3.3. Comparativa

Los precios presentados han sido considerados teniendo en cuenta vías separadas y vías unidas. En el precio se ha incluido todo lo que formaría parte de la subestación de tracción, y en cada presupuesto se ha considerado únicamente la catenaria equivalente a la mitad hacia un lado y otro de la subestación, pero se debe recordar que en las tipologías expuestas, tanto de 1, 2 o 3 grupos, no existen subestaciones en los extremos, por lo que posteriormente al realizar el balance total se deberán considerar los tramos de catenaria existentes en los extremos que no aparecerían reflejados al multiplicar directamente el presupuesto de una de las subestaciones por el número total existente en la línea.

Se debe tener en cuenta que estos presupuestos mostrados son presupuestos de ejecución de material, dónde únicamente se incluye el coste de los materiales y el de la mano de obra, pero que posteriormente se debe añadir un porcentaje de gastos generales, otro de beneficio industrial y el I.V.A. correspondiente.

En la Figura 5.10 se muestran los presupuestos de todas las alternativas estudiadas.

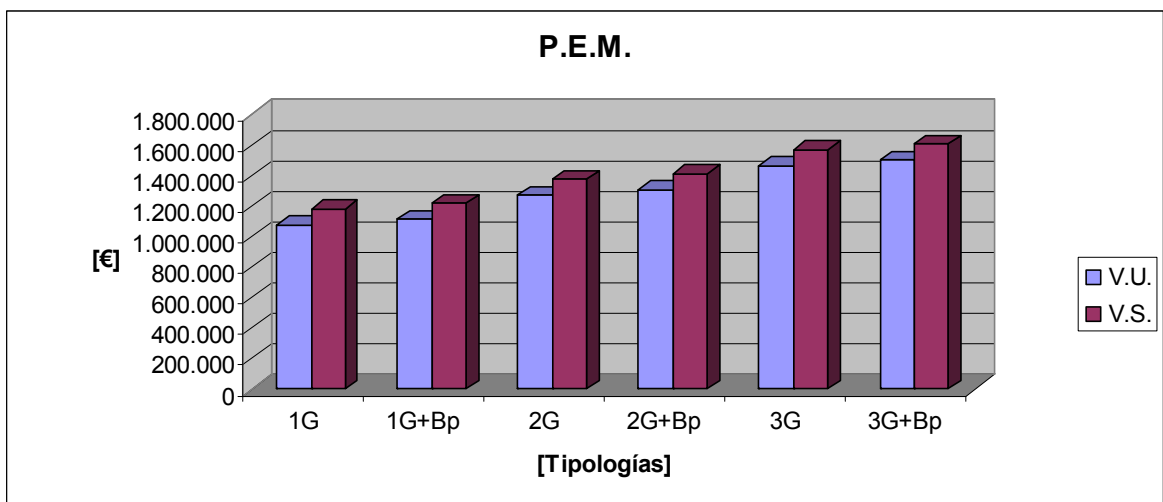


Figura 5.10 Presupuesto V.U. & V.S.

Como se puede observar el coste de vías unidas es inferior al de vías separadas, y ambas alternativas ven aumentado su coste con el número de grupos transformadores-rectificadores.

- Diferencia entre el coste de vías separadas y vías unidas

$$\Delta \text{coste} = \text{Vías separadas} - \text{Vías unidas} = 105.934 \text{ euros}$$



El instalar una tipología u otra, repercutirá sobretodo en el número de subestaciones de tracción que se prevea instalar en el global de la línea.

5.4. Tipología subestación favorable

En este primer apartado se ha analizado la subestación como único sistema de estudio. A partir de las diferentes opciones eléctricas se pueden obtener unas primeras conclusiones en cuanto al análisis de fiabilidad y al análisis económico se refiere.

Así pues, en el caso de Tipologías en Vías Unidas, se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 5.8 y en la Figura 5.11.

Tipología vías unidas	Disponibilidad [%]	Precio [€]
1G+2F	96,960000	1.078.069
1G+2F+BP	97,530000	1.115.217
2G+2F	99,359000	1.272.860
2G+2F+BP	99,949200	1.310.007
3G+2F	99,406000	1.466.326
3G+2F+BP	99,996910	1.503.474

Tabla 5.8 Comparativa Disponibilidad-Precio en V.U.

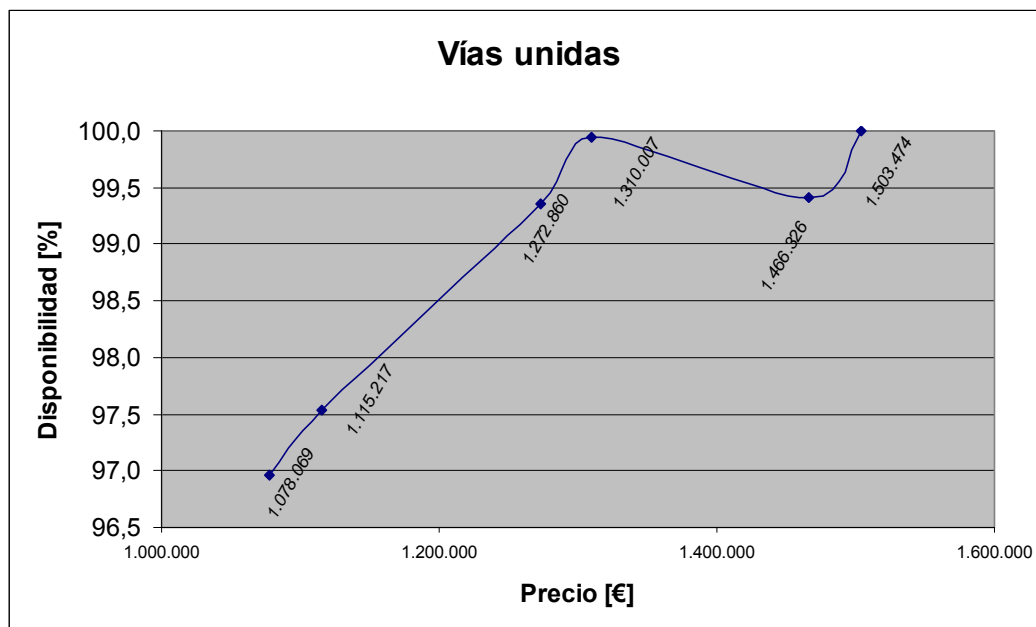


Figura 5.11 Comparativa Disponibilidad-Precio en V.U.

Igualmente, en el caso de Tipologías en Vías Separadas, se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 5.9 y en la Figura 5.12.



Tipología vías separadas	Disponibilidad [%]	Precio [€]
1G+4F	96,380000	1.184.003
1G+4F+BP	97,530000	1.221.151
2G+4F	98,770000	1.378.794
2G+4F+BP	99,947300	1.415.941
3G+4F	98,820000	1.572.260
3G+4F+BP	99,994970	1.609.408

Tabla 5.9 Comparativa Disponibilidad-Precio en V.S.

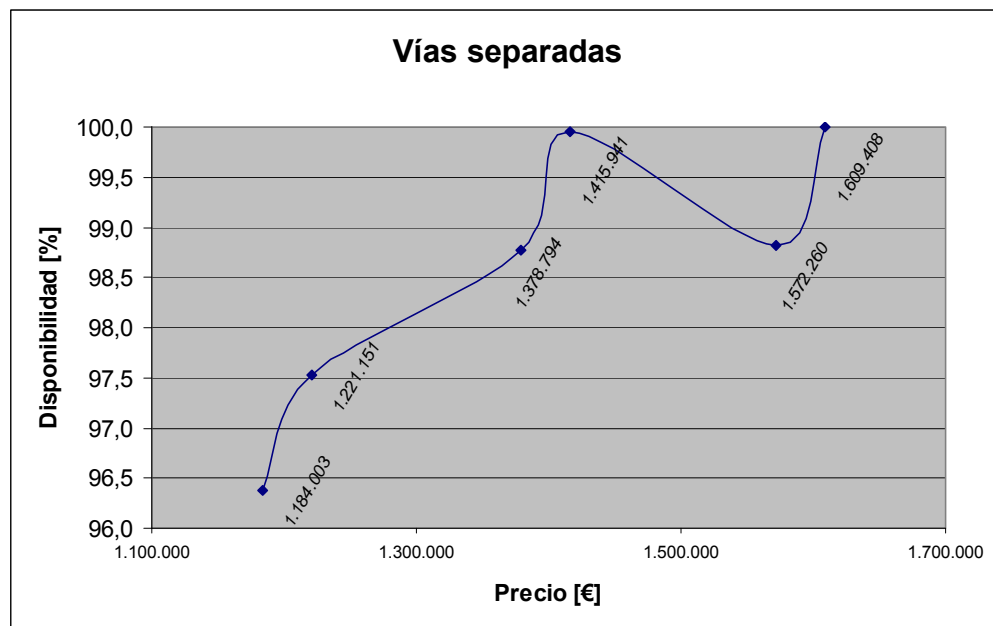


Figura 5.12 Comparativa Disponibilidad-Precio en V.S.

Para ambos escenarios, vías unidas y vías separadas, las conclusiones son las mismas:

La primera conclusión clara es que las tipologías con By-pass, aunque un poco más caras respecto a sus homónimas sin By-pass, aumentan en disponibilidad de forma significativa.

Por otro lado, y considerando la comparativa entre subestaciones de 1, 2 o 3 grupos, en disponibilidad son claramente mejores las soluciones de 2 y 3 grupos, pero también su precio aumenta significativamente. Anticipándose al análisis de conjunto, en el que se necesitarán más subestaciones de 1 grupo que de 2 y de 3, podría deducirse que analizando un precio global ambas soluciones se acercarían en precio, y no en cambio en disponibilidad, ya que a más subestaciones, peores índices de disponibilidad se obtienen. Sin embargo, llegado a este punto se decide analizar las 3 tipologías de subestación posibles: 1 grupo, 2 grupos y 3 grupos.



6. Análisis de conjunto

6.1. Análisis eléctrico

En el presente proyecto se considerarán dos aspectos eléctricos:

- Potencia: se estimará la potencia eléctrica suministrada por cada una de las subestaciones.
- Caídas de tensión: se estimarán las que se producen a lo largo de la catenaria (tensión catenaria-carril) así como las variaciones de tensión en los carriles (tensión carril-tierra).

Todas las simulaciones se realizarán modelando el sistema de tracción mediante el programa STElec. El software ha sido utilizado y sus resultados han sido posteriormente verificados de forma satisfactoria en el diseño y dimensionado de redes de tracción eléctrica.

El software de simulación se basa en la ejecución secuencial de los siguientes módulos:

- Simulación de marcha

Esta simulación tiene por objeto estudiar el comportamiento de un vehículo a lo largo de una línea en base a los parámetros de explotación que se hayan definido, obteniéndose resultados tales como: tiempos de recorrido, velocidades medias, etc.

- Simulación de flota

A partir de criterios de explotación, tales como horarios, frecuencias para las distintas franjas horarias, etc. el programa genera un “mapa de vehículos” que contiene la evolución temporal de los trenes a lo largo de la línea.

- Simulación eléctrica

A partir de todos los resultados de potencias eléctricas obtenidos, se realiza una superposición de todos ellos sobre la base de la red de suministro eléctrico modelizado (catenaria y carril, subestaciones, etc.) y se simula la circulación de corrientes por la catenaria y su demanda a las subestaciones de tracción.

Actualmente sólo se dispone de la simulación de marcha de una parte de la línea que contiene 10 estaciones (longitud 8,194 km). Para realizar un estudio más exhaustivo, lo que



se ha hecho es ampliar los datos hasta llegar a la totalidad de la línea que contiene 25 estaciones (longitud 22,519 km). La posición de cada estación se detalla en la Tabla 6.1.

Estaciones	PK [m]
Estación 1	0
Estación 2	1.665
Estación 3	2.766
Estación 4	3.386
Estación 5	4.106
Estación 6	4.966
Estación 7	6.131
Estación 8	6.944
Estación 9	7.382
Estación 10	8.194
Estación 11	9.859
Estación 12	10.960
Estación 13	11.580
Estación 14	12.300
Estación 15	13.160
Estación 16	14.325
Estación 17	15.138
Estación 18	15.576
Estación 19	16.388
Estación 20	18.053
Estación 21	19.154
Estación 22	19.774
Estación 23	20.494
Estación 24	21.354
Estación 25	22.519

Tabla 6.1 Situación estaciones

Cada línea objeto de simulación debe modelizarse. La modelización consiste en definir todos los parámetros necesarios para el estudio de la línea de una forma simplificada y permitir así un análisis lo más eficiente y ajustado posible.

6.1.1. Criterios generales de la red de tracción

6.1.1.1. Tensiones

Es importante establecer los límites de tensión que pueden tomar tanto la catenaria respecto el carril como la existente en los carriles respecto a tierra.



Tensión catenaria

La tensión nominal de la catenaria para la línea de metro estudiada es de 1.500 Vcc.

Según la norma CEI 60850 “Aplicaciones ferroviarias. Tensiones de alimentación de sistemas de tracción”, y la norma UIC 600 “Tracción eléctrica con la línea aérea de contacto”, los valores que caracterizan los niveles de tensión son:

- Tensión permanente base: $U_{\min} = 1.000 V$
- Tensión permanente máxima: $U_{\max} = 1.800 V$

Según los datos referentes al material móvil, la tensión nominal de los trenes (1.500 Vcc) permite una variación de 1.275 Vcc-1.800 Vcc en tracción manteniendo todas las prestaciones. A su vez, el vehículo permite una tensión inferior, hasta 1.000 Vcc, antes de que no actúen las protecciones y se desconecte de forma automática la unidad.

Finalmente, se tomarán como referencia las tensiones absolutas en la línea aérea de contacto sin considerarse los sistemas de regeneración de energía, permitiendo garantizar un margen de seguridad en el comportamiento de la red de tracción eléctrica.

Tensión carril

La tensión de los carriles debe mantenerse por debajo de un cierto valor establecido en la norma UNE EN 50122-1, “Aplicaciones de ferrocarriles. Instalaciones fijas. Parte 1: Medidas de protección relacionadas con la seguridad eléctrica y puesta a tierra”. Estos valores son los siguientes:

- En condiciones permanentes las tensiones admisibles no deben superar los 120 V, excepto en talleres y emplazamientos similares en los que el límite debe ser 60 V.

6.1.1.2. Potencias

Los grupos transformadores-rectificadores soportan regímenes de sobrecarga establecidos según normativa.

Transformadores

El régimen de sobrecarga de los transformadores de tracción viene determinado en la norma UNE EN 50329 “Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Transformadores de tracción.”, para clase VI (clase típica en las principales redes ferroviarias).

- 100 % de la potencia nominal permanentemente;



- 150 % de la potencia nominal durante 2 horas, partiendo de la potencia nominal y con un intervalo de 3 horas;
- 300% de la potencia nominal durante 1 minuto, partiendo de la potencia nominal y con un intervalo de 1.800 s.

Rectificadores

El régimen de los rectificadores viene determinado en la norma UNE EN 50328 “Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Convertidores electrónicos de potencia para subestaciones.”, para clase VI (clase típica en las principales redes ferroviarias).

- 100 % de la potencia nominal permanentemente;
- 150 % de la potencia nominal durante 2 horas, partiendo de la potencia nominal.
- 300 % de la potencia nominal durante 1 minuto, partiendo de la potencia nominal.

6.1.2. Datos de partida

6.1.2.1. Material móvil

El material móvil simulado corresponde a las unidades diseñadas y construidas para la línea de metro estudiada.

Las características generales más representativas son las siguientes:

Velocidad máxima:	80 km/h
Velocidad en régimen continuo:	25 km/h
Aceleración máxima:	1,15 m/s ²
Aceleración media máxima:	1,0 m/s ²
Deceleración máxima:	1,0 m/s ²
Tensión de alimentación nominal:	1.500 Vcc
Potencia nominal:	1.400 kW
Potencia máxima:	2.240 kW
Par nominal en el eje:	977 N·m



Par máximo en el eje:	1.865 N·m
Sección frontal:	10 m ²

La alimentación se realiza mediante línea aérea de contacto a una tensión nominal de 1.500 Vcc. Este material es capaz de soportar sobretensiones de 1.800 Vcc y funciona con todas las prestaciones hasta 1.275 Vcc. Con tensiones inferiores a 1.000 Vcc actúan las protecciones y la unidad se desconecta de forma automática.

6.1.2.2. Trazado

El trazado de base tomado para las simulaciones corresponde al de la línea de metro estudiada obtenida a partir de distinta documentación facilitada por SENER.

En toda la línea, el ancho de vía es métrico. El trazado no permite circular a una velocidad superior a los 80 km/h.

6.1.2.3. Línea Aérea de Contacto

La línea de tracción de la línea de metro estudiada está formada por la catenaria (circuito positivo) y por los carriles (circuito negativo).

La energía de tracción necesaria para la circulación de los trenes es transportada a través de la catenaria según el recorrido siguiente: acometida, subestación, catenaria, pantógrafo, motores de tracción del material móvil y carriles (retorno), siendo las ruedas de los coches motores quienes cierran el circuito eléctrico.

Catenaria

Para el estudio del trazado se ha contemplado catenaria rígida, con una sección de 1.400 mm² de Aluminio que agarra el hilo de contacto de 153 mm² de Cobre, con lo que se consigue una resistencia equivalente de 0,0117 Ω /km.

Feeders de acompañamiento de catenaria

No se ha considerado la utilización de feeders de acompañamiento en ningún punto del trazado, puesto que el uso de catenaria rígida ofrece una sección conductora lo suficientemente grande que no provoca caídas de tensión críticas como para necesitar un feeder de acompañamiento.



Carriles

Además de permitir la circulación del material móvil, los carriles constituyen también el circuito de retorno que se encuentra conectado al polo negativo de las subestaciones de tracción.

El carril dispuesto en todo el tramo es UIC 54 de acero soldado, con una sección de 6.934 mm^2 y peso de $54,43 \text{ kg/m}$. La resistencia de cada carril es de $0,016 \text{ } \Omega/\text{km}$, que a efectos de cálculo se consideran ambos carriles como 2 resistencias en paralelo.

6.1.2.4. Instalaciones fijas

Como instalaciones fijas se encuentran las subestaciones de tracción, cuyas características de la aparamenta ya han sido especificadas en el apartado 5.1.

6.1.3. Modelización

La línea se modela como un circuito eléctrico en el cual las subestaciones son fuentes de tensión, la catenaria y los retornos son resistencias variables y los vehículos son fuentes de corriente controlada dependiendo de la tensión de la catenaria cuyo valor va evolucionando en el tiempo dependiendo del pk en el que se encuentren. En la Figura 6.1 se puede observar el esquema eléctrico.

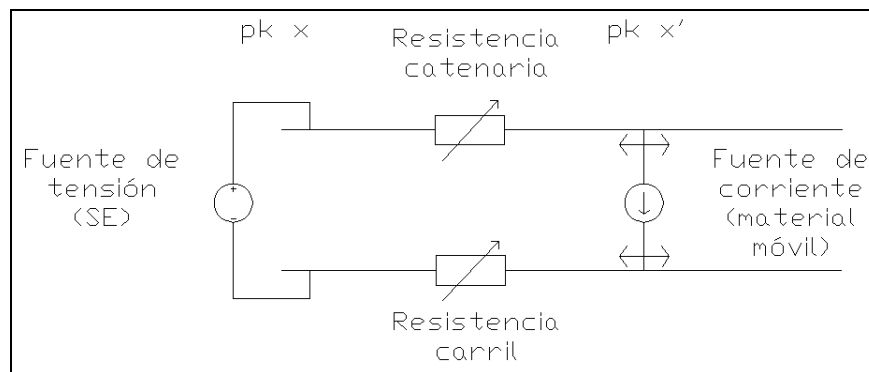


Figura 6.1 Esquema eléctrico

6.1.3.1. Configuraciones y tipologías de estudio

Las configuraciones y tipologías consideradas son:

- Vías unidas y vías separadas.



- 1, 2 y 3 grupos de transformación-rectificación por subestación.

Para cada configuración, vías unidas o vías separadas, cambia el número de subestaciones a lo largo de la línea en función de si éstas son de 1, 2 o 3 grupos ya que la potencia total consumida es la misma. Lo único que varía según sean vías unidas o vías separadas son las pérdidas en la línea. En el estudio se considerarán ambas configuraciones, vías unidas y vías separadas, y para cada una se analizará el caso de subestaciones con 1, 2 o 3 grupos. Aunque no parezcan soluciones comparables, al final del estudio se extraerá una conclusión común entre ambas.

En el siguiente apartado se determina el número de subestaciones que será equivalente en ambas configuraciones, según el tipo de subestaciones elegido (tipología de SE).

6.1.3.2. Cálculo del número de subestaciones

En el siguiente apartado se calculará el número de subestaciones de tracción (N) necesarias para cada una de las configuraciones.

Considerando:

Velocidad media en régimen continuo (v): 25 km/h

Recorrido total (d): 22,519 km

Frecuencia de paso (f): 5 min

Potencia tren (P_{tren}): 1.400 kW

Potencia 1 grupo transformador-rectificador (P_{grupo}): 2.000 kW

Igualmente se toma un nivel de redundancia N-1 para todas las tipologías de SE, lo que significa que el sistema global debe soportar la caída de una de las subestaciones y seguir funcionando con normalidad. Posteriormente se realizarán las simulaciones con el programa STElec para comprobar que éste opera correctamente teniendo en cuenta la situación de condiciones normales y degradadas.

Para la realización del cálculo se ha utilizado la combinación de las siguientes expresiones:

Tiempo en realizar el recorrido:

$$T = \frac{2 \cdot d}{v}$$



Número de trenes:
$$n^{\circ} \text{ trenes} = \frac{T}{f}$$

Potencia total:
$$P_{tot} = n^{\circ} \text{ trenes} \cdot P_{tren}$$

Número subestaciones:
$$N \geq \frac{P_{tot}}{P_{grupo}}$$

Expresión general número subestaciones con redundancia N-1:
$$N \geq \frac{2 \cdot d \cdot P_{tren}}{v \cdot f \cdot P_{grupo}} + 1$$

- Tipología de subestación con 1 grupo transformador-rectificador.

La potencia total de este tipo de subestación es de 2.000 kW.

$$N \geq \frac{2 \cdot 22,519 \text{ km} \cdot 1.400 \text{ kW}}{25 \text{ km/h} \cdot \frac{5}{60} \text{ h} \cdot 2.000 \text{ kW}} + 1 = 17$$

La distribución de las subestaciones se ha supuesto equidistante entre ellas sin instalar ninguna en los extremos de la línea. El punto kilométrico (pk) en el que se encuentra cada una de ellas se detalla en la Tabla 6.2.

Número SE	pk [km]
pk inicial	0,000
SE1	1,251
SE2	2,502
SE3	3,753
SE4	5,004
SE5	6,255
SE6	7,506
SE7	8,757
SE8	10,008
SE9	11,260
SE10	12,511
SE11	13,762
SE12	15,013
SE13	16,264
SE14	17,515
SE15	18,766
SE16	20,017
SE17	21,268



Número SE	pk [km]
pk final	22,519

Tabla 6.2 pk's subestaciones

- Tipología de subestación con 2 grupos transformador-rectificador.

La potencia total de este tipo de subestación es de 4.000 kW.

$$N \geq \frac{2 \cdot 22,519 \text{ km} \cdot 1.400 \text{ kW}}{25 \text{ km/h} \cdot \frac{5}{60} \text{ h} \cdot 4.000 \text{ kW}} + 1 = 9$$

La distribución de las subestaciones se ha supuesto equidistante entre ellas sin instalar ninguna en los extremos de la línea. El punto kilométrico (pk) en el que se encuentra cada una de ellas se detalla en la Tabla 6.3.

Número SE	pk [km]
pk inicial	0,000
SE1	2,252
SE2	4,504
SE3	6,756
SE4	9,008
SE5	11,260
SE6	13,511
SE7	15,763
SE8	18,015
SE9	20,267
pk final	22,519

Tabla 6.3 pk's subestaciones

- Tipología de subestación con 3 grupos transformador-rectificador.

La potencia total de este tipo de subestación es de 6.000 kW.

$$N \geq \frac{2 \cdot 22,519 \text{ km} \cdot 1.400 \text{ kW}}{25 \text{ km/h} \cdot \frac{5}{60} \text{ h} \cdot 6.000 \text{ kW}} + 1 = 6$$

La distribución de las subestaciones se ha supuesto equidistante entre ellas sin instalar ninguna en los extremos de la línea. El punto kilométrico (pk) en el que se encuentra cada una de ellas se detalla en la Tabla 6.4.



Número SE	pk [km]
pk inicial	0,000
SE1	3,217
SE2	6,434
SE3	9,651
SE4	12,868
SE5	16,085
SE6	19,302
pk final	22,519

Tabla 6.4 pk's subestaciones

6.1.4. Resultados

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos de la simulación eléctrica para cada tipología de subestación. La totalidad de los casos estudiados están recogidos en el Anejo B. Simulación eléctrica.

6.1.4.1. Vías unidas

- Tipología de subestaciones con 1 grupo de transformación-rectificación

Para el caso de funcionamiento normal los resultados son los mostrados en la Figura 6.2 y la Figura 6.3.

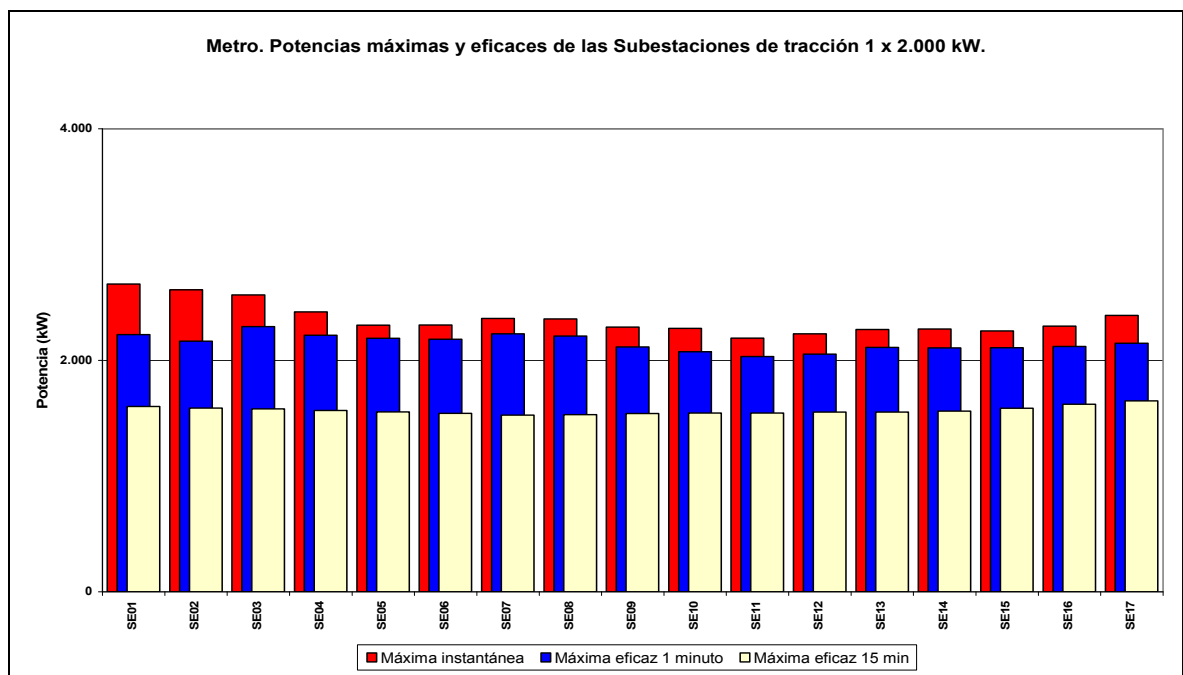


Figura 6.2 1G Caso funcionamiento normal. Potencias.



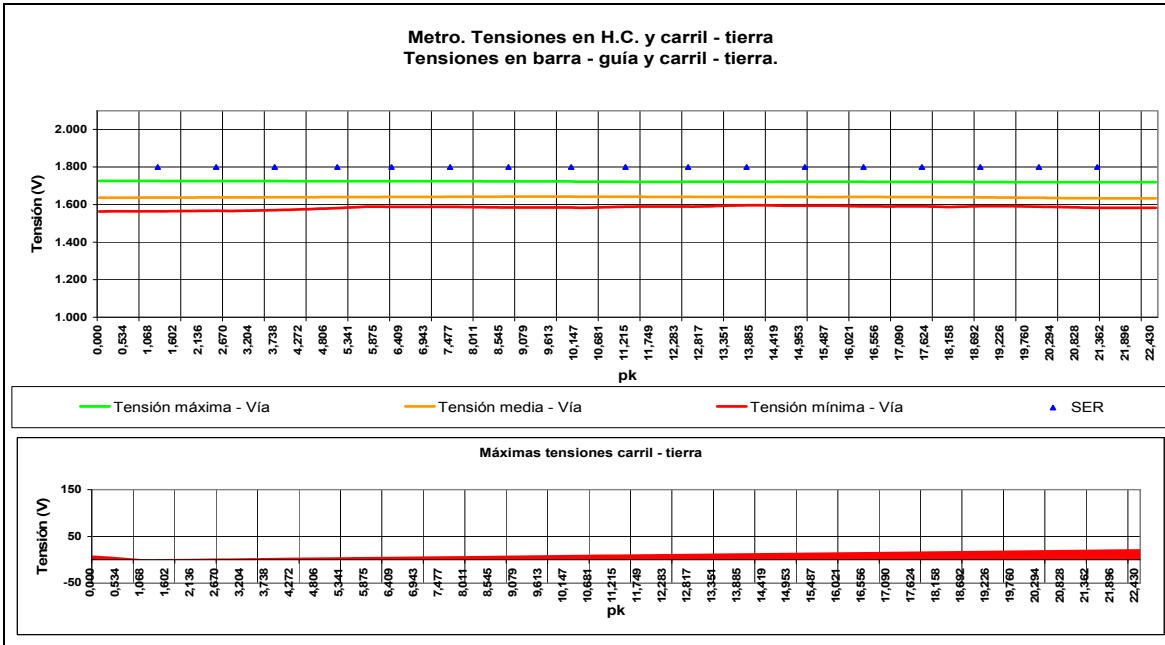


Figura 6.3 1G Caso funcionamiento normal. Tensiones.

Como se puede observar ninguna de las 17 subestaciones está trabajando por encima de su funcionamiento nominal. Como cabe esperar las subestaciones extremas son las que más potencia aportan puesto que no disponen en uno de sus lados de subestación colateral. En caso de degradado, es decir, caída de una subestación, la situación más desfavorable sería en el caso de que cayese cualquiera de las subestaciones de los extremos (ver Figura 6.4 y Figura 6.5).

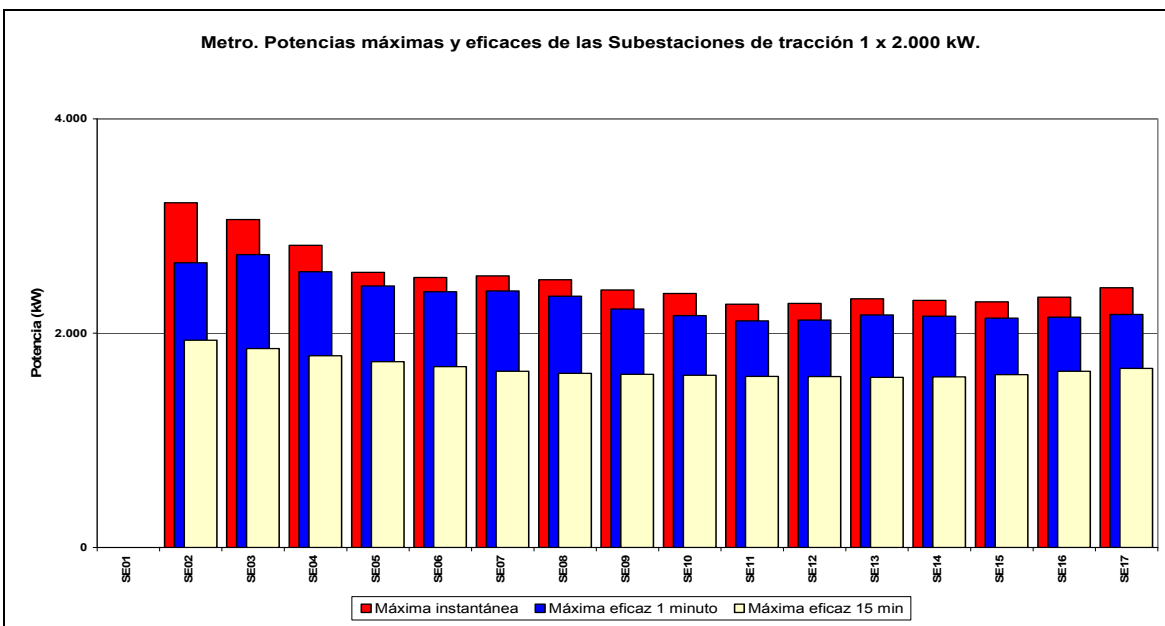


Figura 6.4 1G Caso funcionamiento degradado. Potencias.



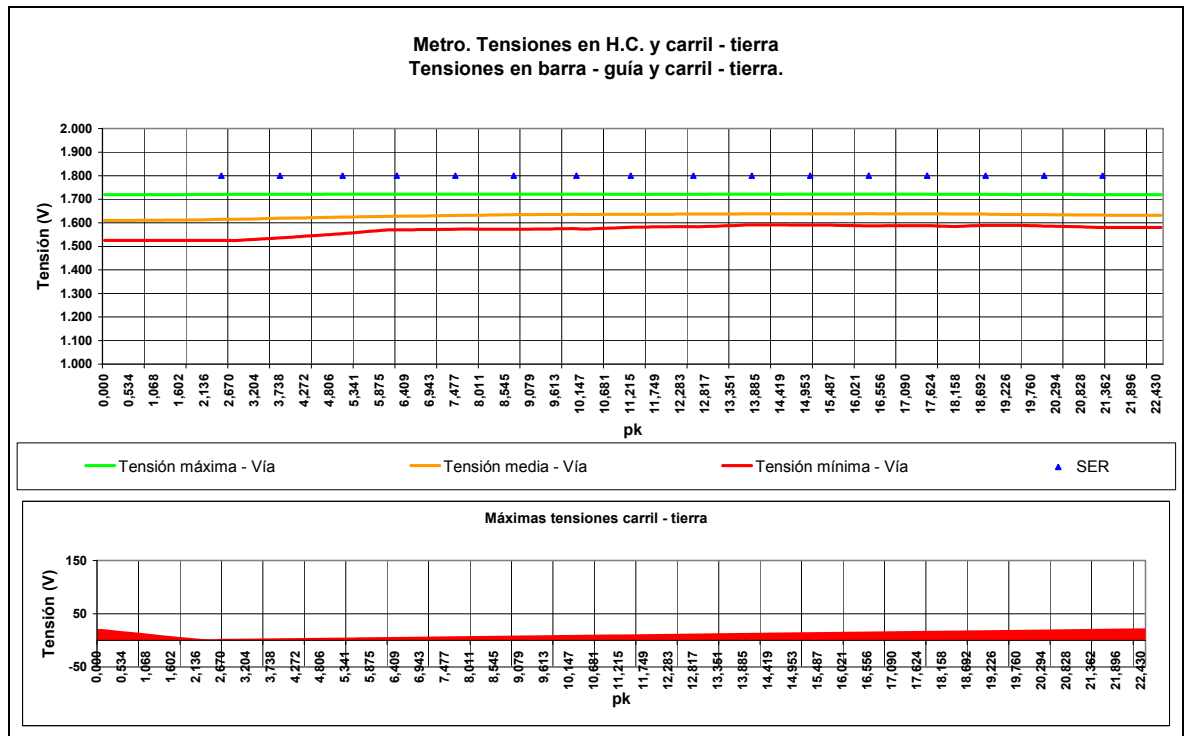


Figura 6.5 1G Caso funcionamiento degradado. Tensiones.

Como se puede observar en el caso anterior al caer la SE01, es la SE02 la que debe compensar la caída, de manera que aumenta la potencia suministrada, aunque en este caso se observa como tampoco se superan los valores de funcionamiento nominal. Por lo tanto se podría afirmar que cualquier caída de una subestación no altera el funcionamiento normal del conjunto. En cuanto a los niveles de tensión de catenaria, se mantienen en niveles correctos, aunque en el tramo de la SE01 se produce una ligera caída. Los niveles de tensión de carril también se mantienen en niveles adecuados y en ningún momento superan los 120 V.



- Tipología de subestaciones con 2 grupos de transformación-rectificación

Para el caso de funcionamiento normal los resultados son los mostrados en la Figura 6.6 y la Figura 6.7.

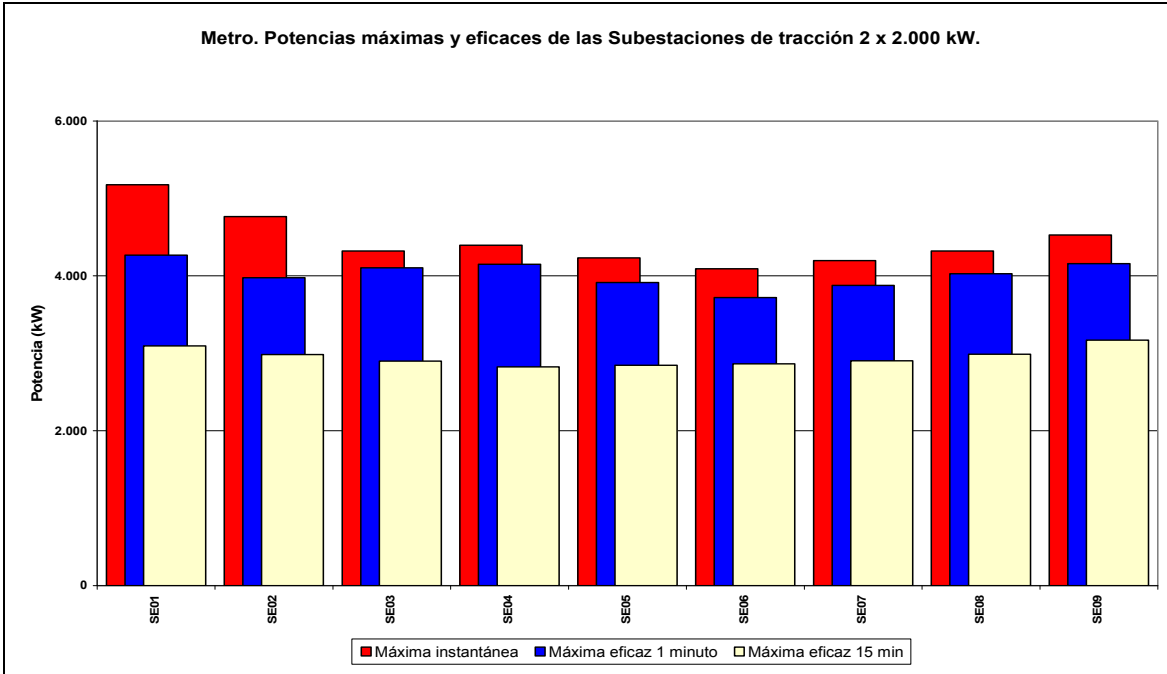


Figura 6.6 2G Caso funcionamiento normal. Potencias.

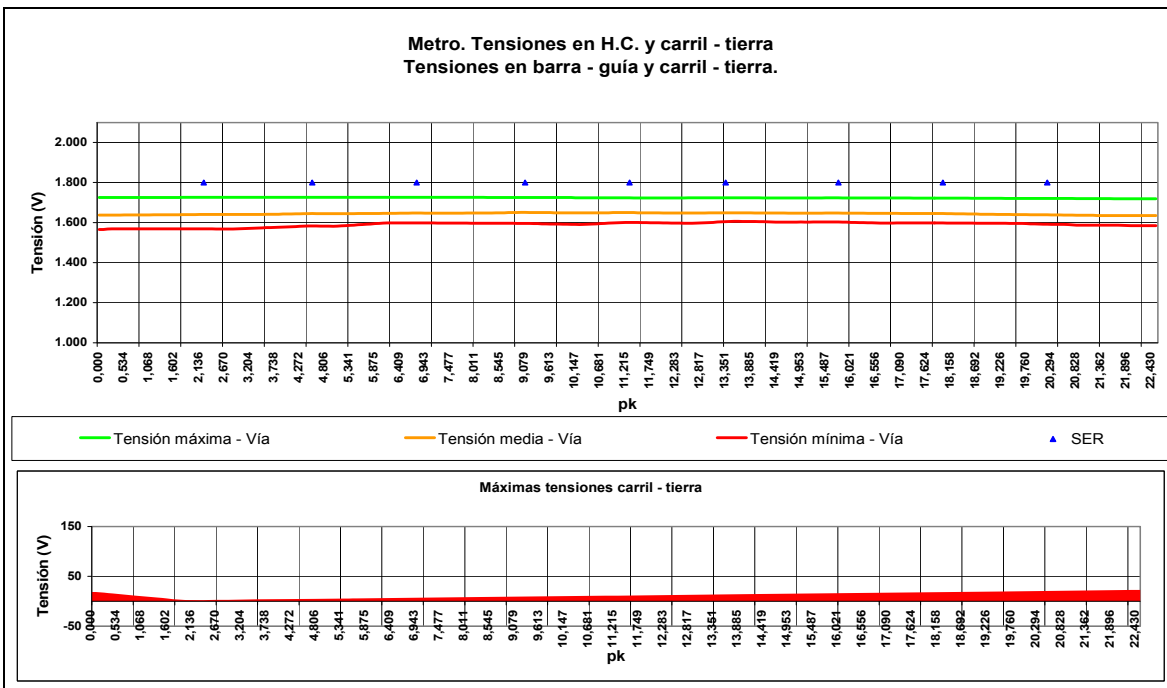


Figura 6.7 2G Caso funcionamiento normal. Tensiones.



Para el caso de 2 grupos de transformación rectificación funcionando en condiciones normales, se observa que ninguna de las subestaciones trabaja por encima de su funcionamiento nominal. De la misma manera que el caso anterior, la peor situación sería si cayese cualquiera de las subestaciones más extremas de la línea (Figura 6.8 y Figura 6.9).

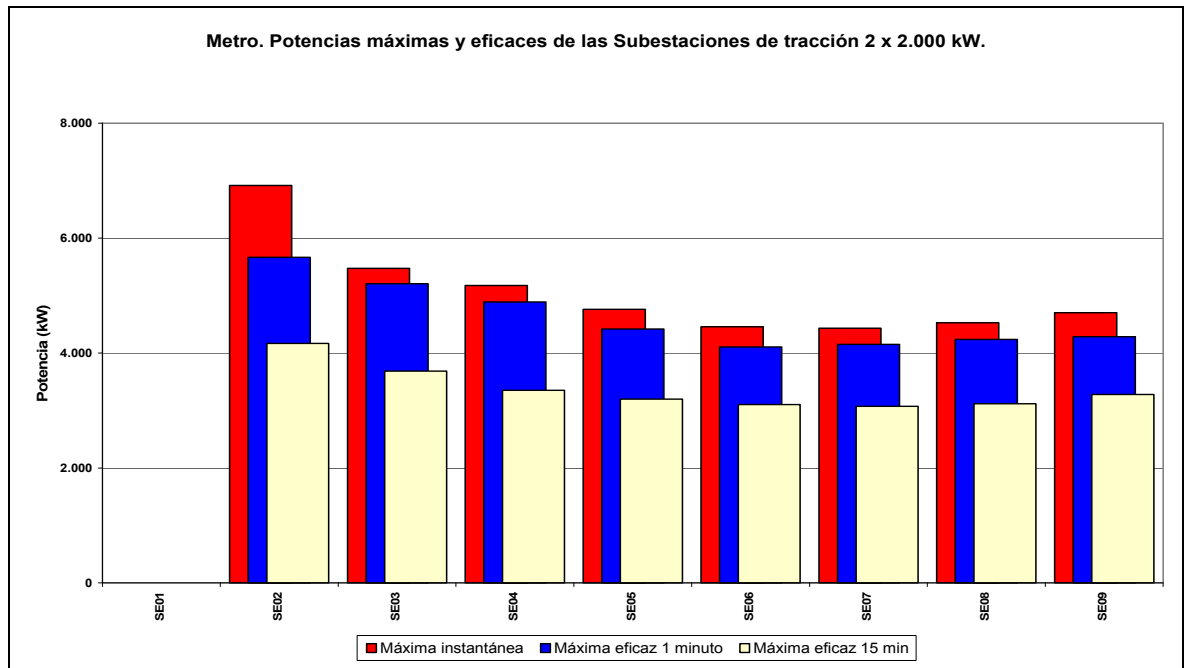


Figura 6.8 2G Caso funcionamiento degradado. Potencias.

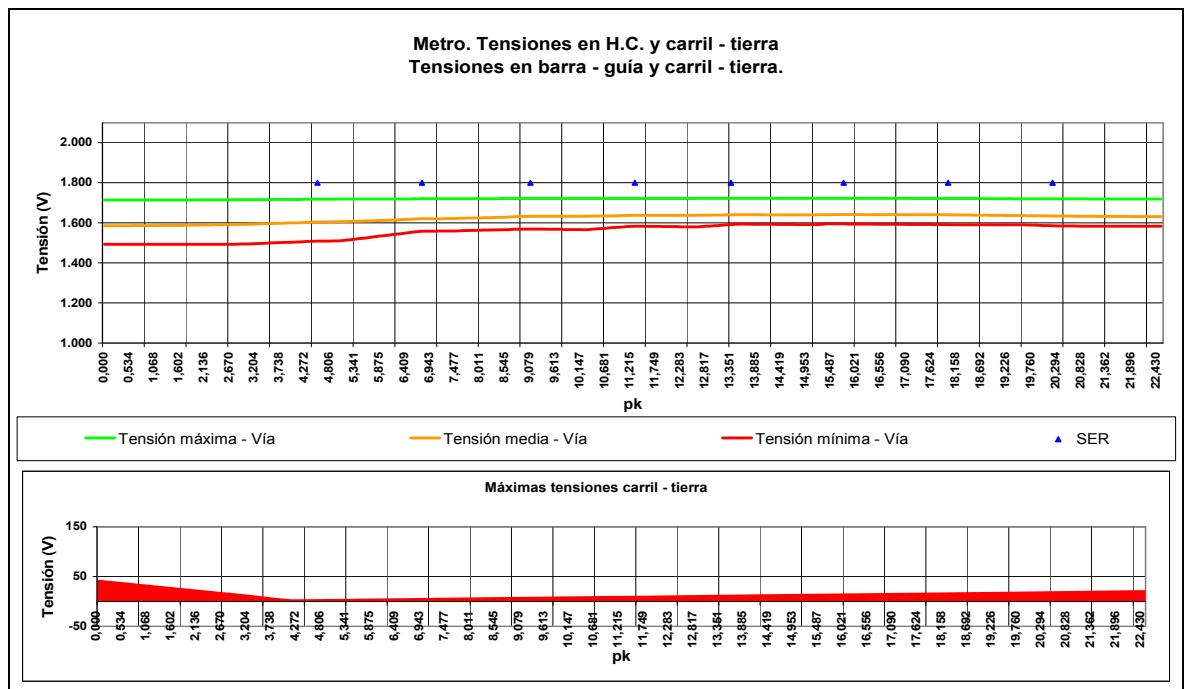


Figura 6.9 2G Caso funcionamiento degradado. Tensiones.



Simulando la caída de una de las subestaciones extremas, se observa cómo la colateral se encuentra ligeramente por encima de los valores nominales, esto significa que los grupos de esa misma subestación deberán trabajar por encima del 100 %. El hecho de que se superen los valores nominales obliga a establecer otra condición si se quiere continuar manteniendo un nivel de redundancia N-1. Según normativa vigente sobre transformadores y rectificadores ya expuesta en el apartado 6.1.1.2. Potencias, ambos equipos pueden trabajar durante 2 horas al 150 %, sin alterar sus prestaciones, por lo tanto, una nueva condición será que el sistema puede soportar la caída total de una subestación durante como máximo 2 horas, tiempo a partir del cual se empiezan a deteriorar permanentemente los equipos. Los niveles de tensión por el contrario se mantienen en rangos adecuados, entre los 1.000 y 1.800 V, y la tensión carril-tierra se mantiene también por debajo de los 120 V en todo el recorrido de la línea.

- Tipología de subestaciones con 3 grupos de transformación-rectificación

Para el caso de funcionamiento normal los resultados son los mostrados en la Figura 6.10 y la Figura 6.11.

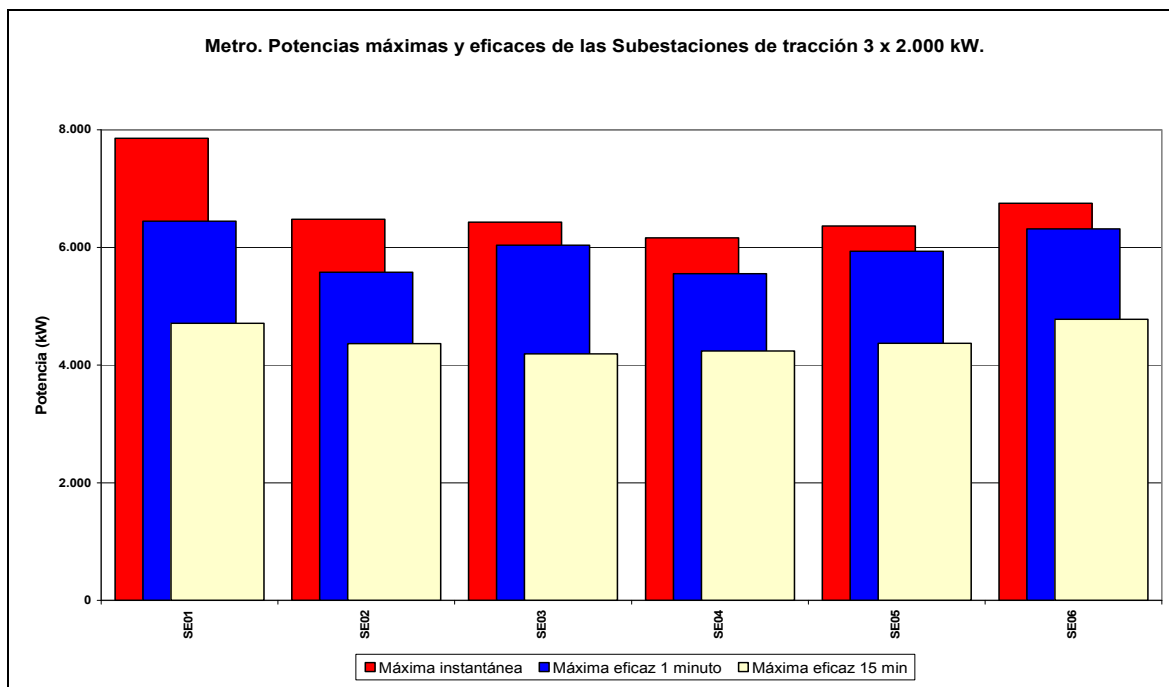


Figura 6.10 3G Caso funcionamiento normal. Potencias.



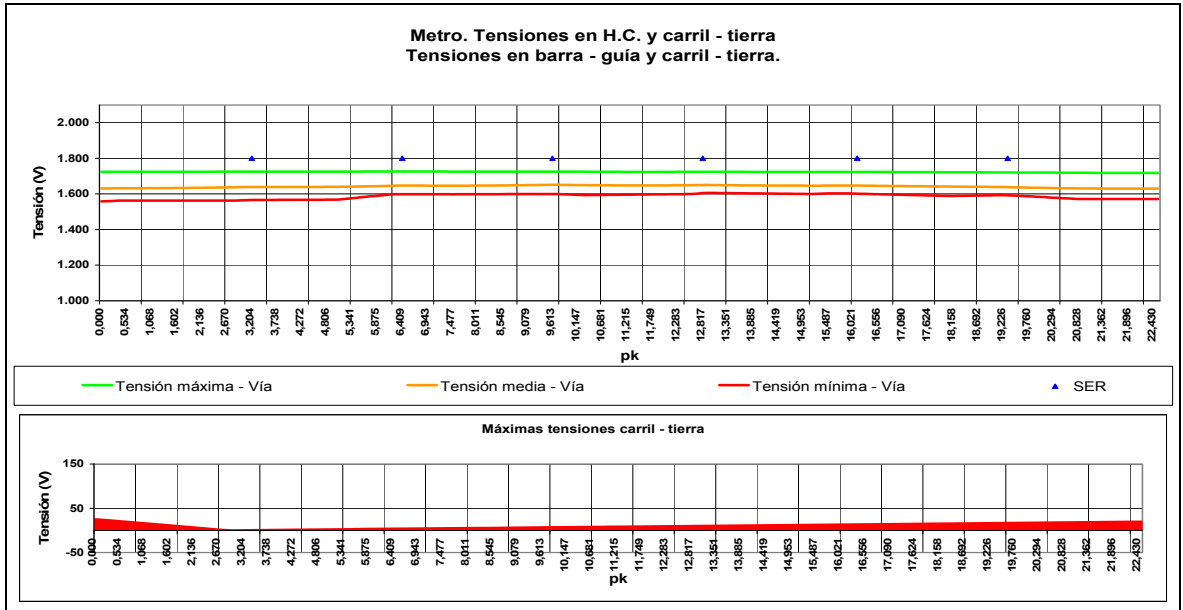


Figura 6.11 3G Caso funcionamiento normal. Tensiones.

Para el caso de 3 grupos de transformación-rectificación funcionando en condiciones normales, se observa que ninguna de las subestaciones trabaja por encima de su funcionamiento nominal. De la misma manera que el caso anterior, la peor situación sería si cayese cualquiera de las subestaciones más extremas de la línea (ver Figura 6.12 y Figura 6.13). Los niveles de tensión de catenaria y de carril-tierra son adecuados y están en rango según normativa vigente.

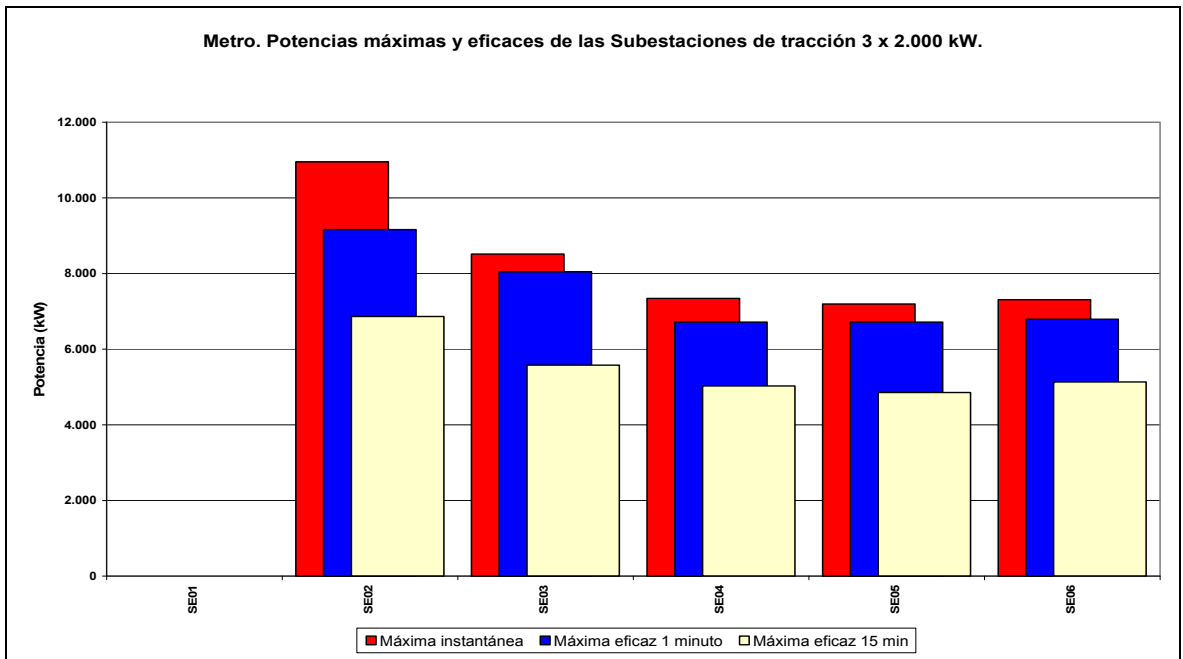


Figura 6.12 3G Caso funcionamiento degradado. Potencias.



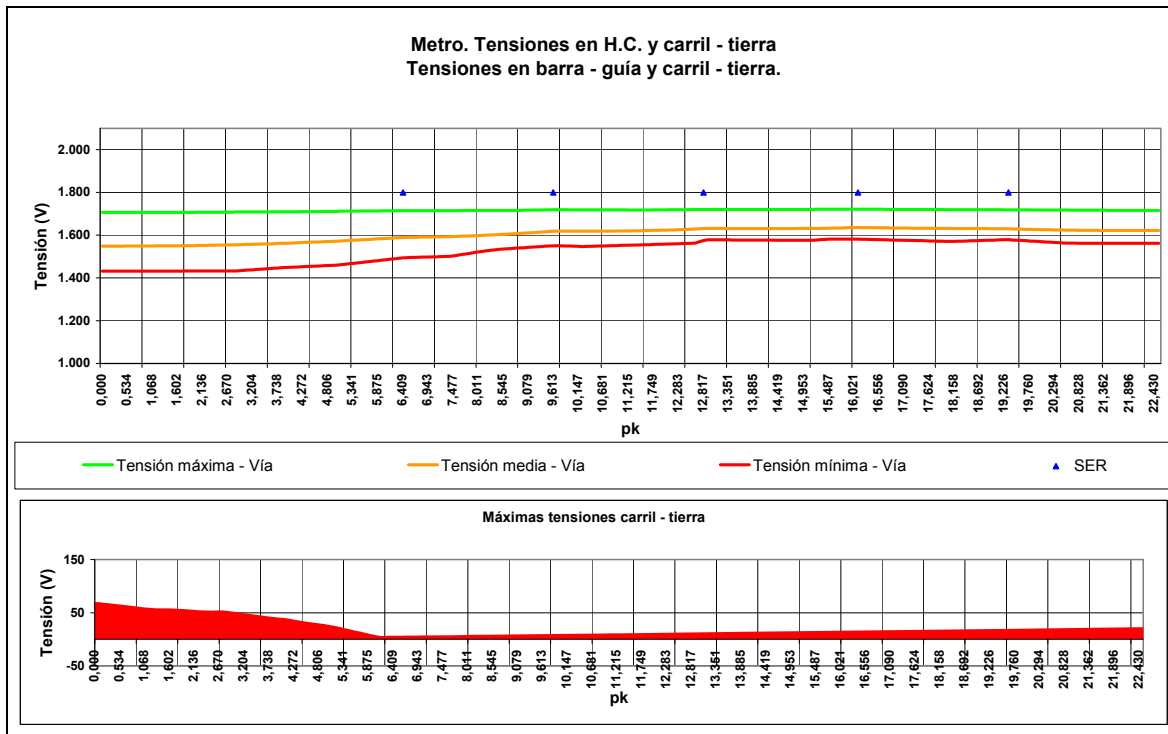


Figura 6.13 3G Caso funcionamiento degradado. Tensiones.

En el caso de que se produzca la caída de la subestación de unos de los extremos de la línea, se observa como la colateral debe suministrar unos valores de potencia por encima de sus nominales, en todo caso, mientras la caída no dure más de 2 horas, se podrán mantener sin problemas esos valores puesto que en ninguno de los casos se encuentra por encima del 150 %. Respecto a los niveles de tensión, para el caso de 3 grupos, las subestaciones se encuentran mucho más alejadas las unas de las otras que en el caso de otras tipologías, esto supone una mayor caída de tensión cuando se produce una situación degradada. Sin embargo, los niveles de tensión se encuentran entre los rangos permitidos. De la misma manera ocurre con la tensión carril-tierra en la zona que abarca la subestación caída, los valores aumentan notablemente, pero en ningún caso superan los 120 V que establece la normativa como límite.

Tal y como se ha mostrado en todos los casos se cumplen las restricciones impuestas por normativa, por tanto se acepta como válido el número de subestaciones calculado para cada tipología de subestación y también se corrobora que el sistema soporta la caída de una subestación cualquiera (puesto que se ha estudiado el caso más crítico), añadiendo una restricción como consecuencia de que las configuraciones de 2 y 3 grupos de transformación-rectificación han superado ligeramente los valores nominales, y es que la redundancia N-1 es válida siempre y cuando el degradado no se mantenga más de 2 horas.



6.1.4.2. Vías separadas

- Tipología de subestaciones con 1 grupo de transformación-rectificación

Para el caso de funcionamiento normal los resultados son los mostrados en la Figura 6.14 y la Figura 6.15.

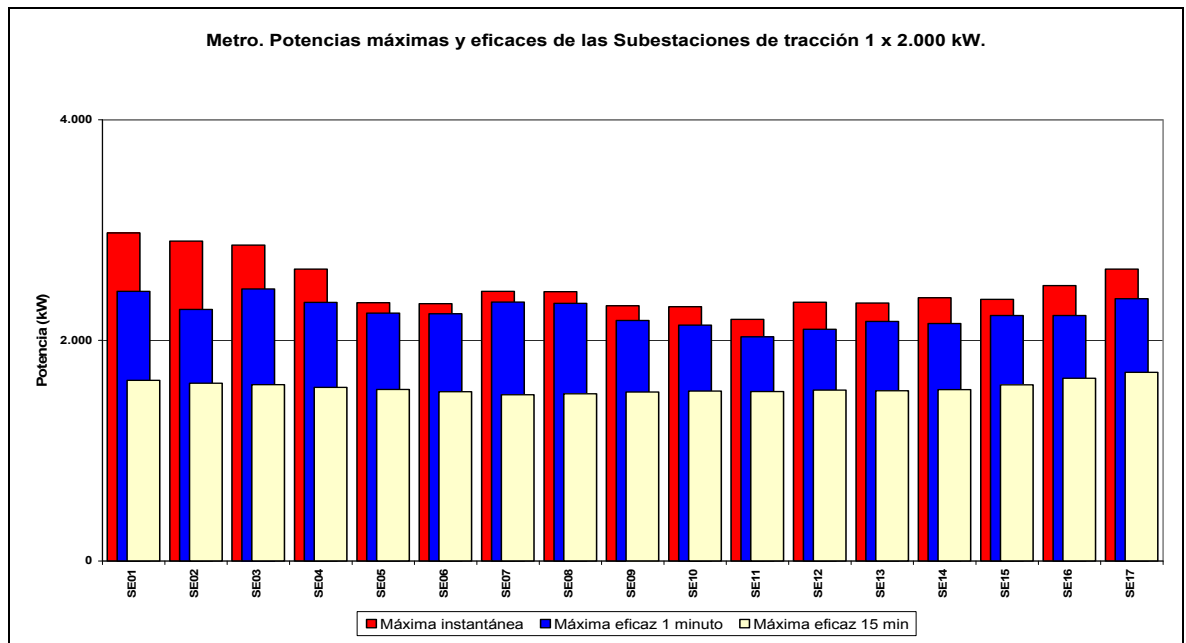


Figura 6.14 1G Caso funcionamiento normal. Potencias.

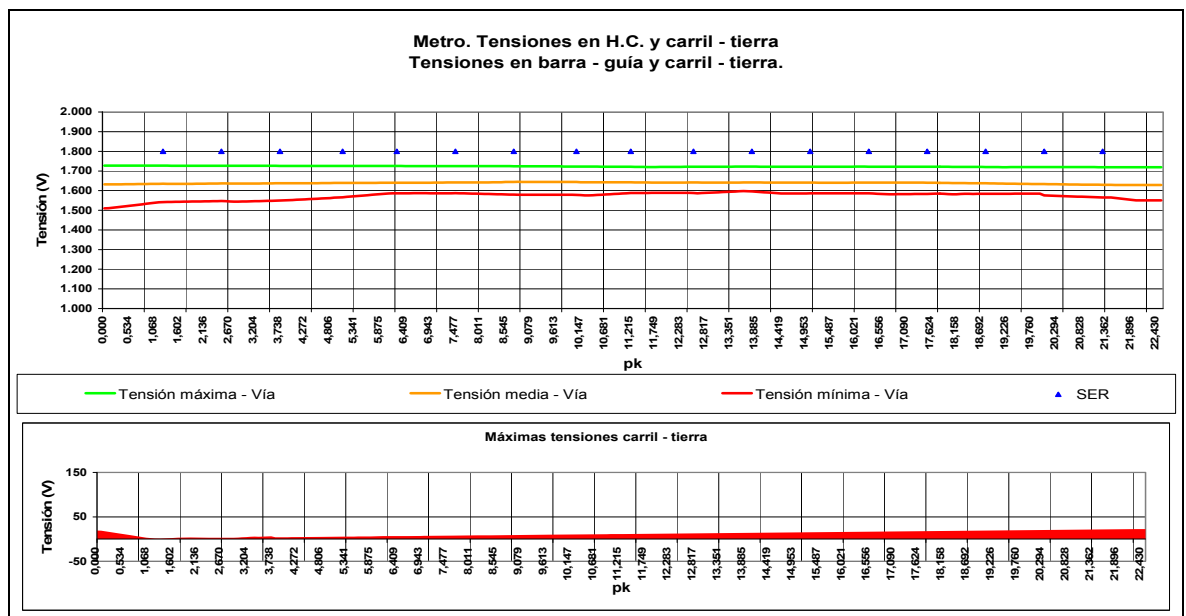


Figura 6.15 1G Caso funcionamiento normal. Tensiones.



Para el caso de vías separadas, las potencias se mantienen por debajo de los valores nominales. Las tensiones de catenaria se encuentran en valores dentro del rango permitido, y tan sólo se producen ligeras caídas a medida que se acercan al extremo de línea. La tensión carril-tierra también se encuentra en valores adecuados. De la misma manera que en casos anteriores las subestaciones que más potencia suministran son las de los extremos, por lo tanto en la Figura 6.16 y Figura 6.17 se muestran los resultados de la simulación crítica.

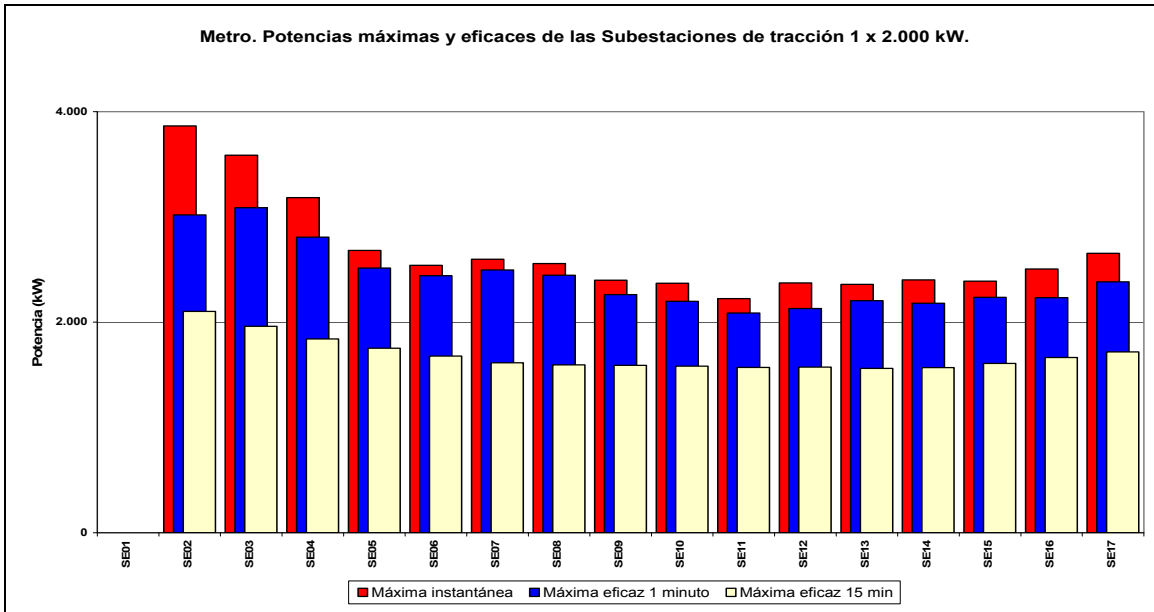


Figura 6.16 1G Caso funcionamiento degradado. Potencias.

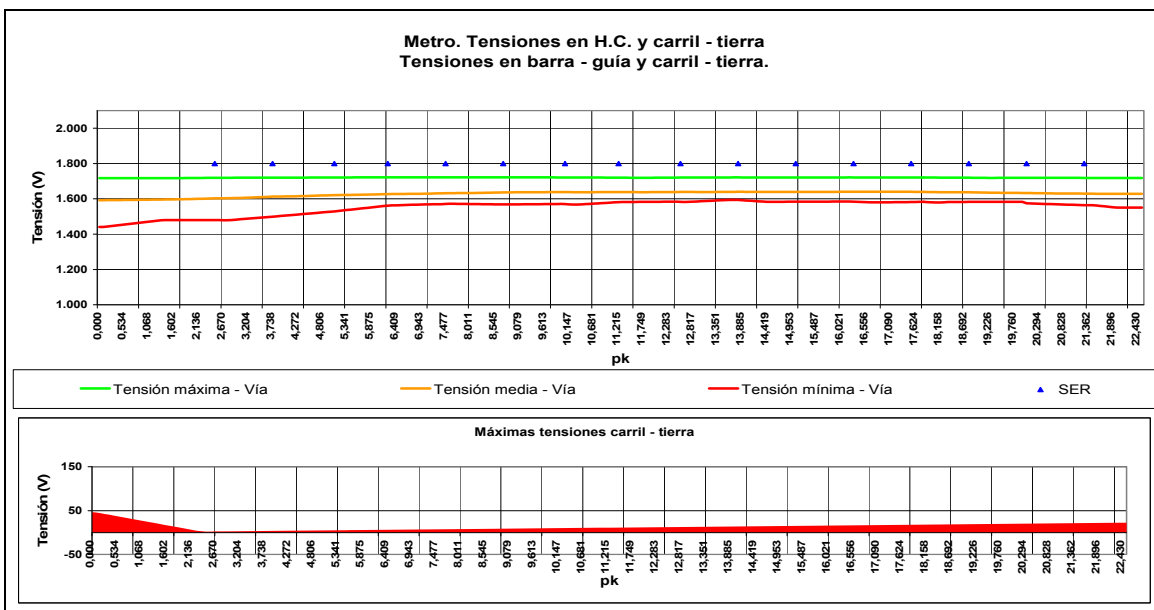


Figura 6.17 1G Caso funcionamiento degradado. Tensiones.



Al contrario que en vías unidas, esta vez cuando se produce la caída de una subestación, la colateral si que se encuentra por encima de sus valores nominales, por lo tanto se deberá continuar con la restricción de que la caída no puede durar más de 2 horas, ni la potencia de ninguna subestación podrá superar el 150 %. La tensión de catenaria, sigue dentro del rango 1.000-1.800 V, y apenas tiene ligeras caídas de tensión. La tensión carril-tierra se encuentra dentro de los límites también, aunque aumenta notablemente en la zona en la que se encuentra la subestación caída pero muy por debajo del límite impuesto por la norma de 120 V.

- Tipología de subestaciones con 2 grupos de transformación-rectificación

Para el caso de funcionamiento normal los resultados son los mostrados en la Figura 6.18 y Figura 6.19.

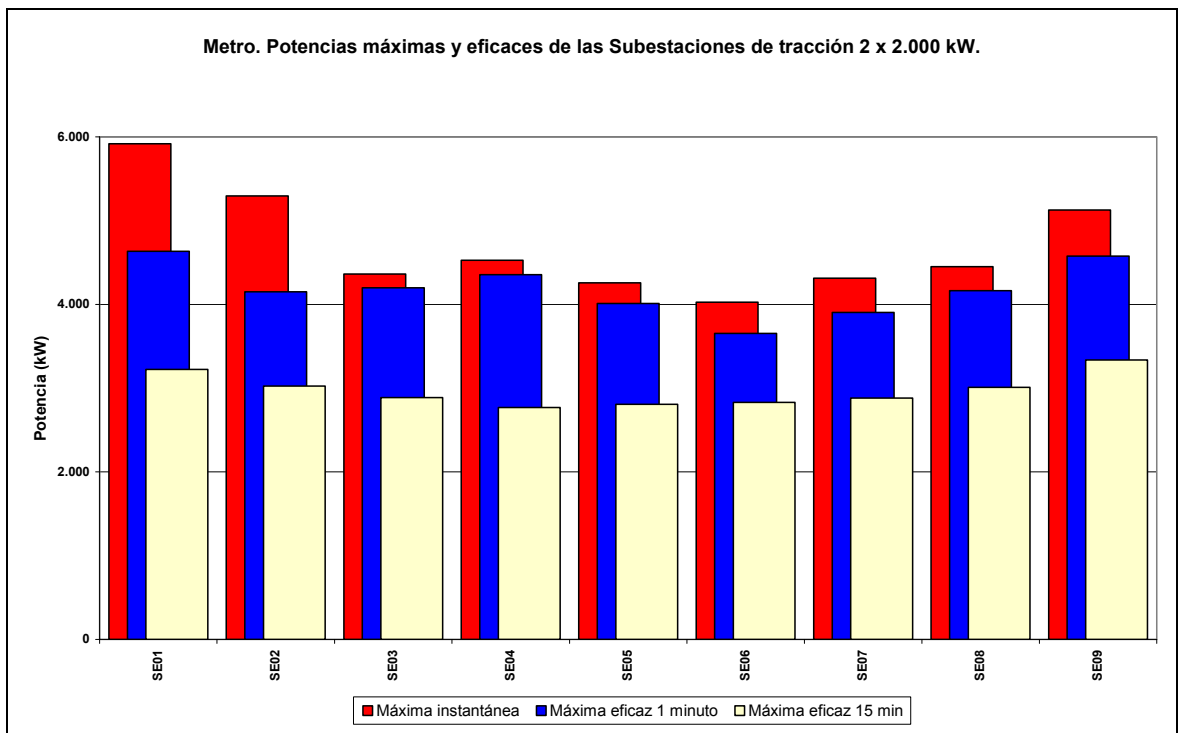


Figura 6.18 2G Caso funcionamiento normal. Potencias.



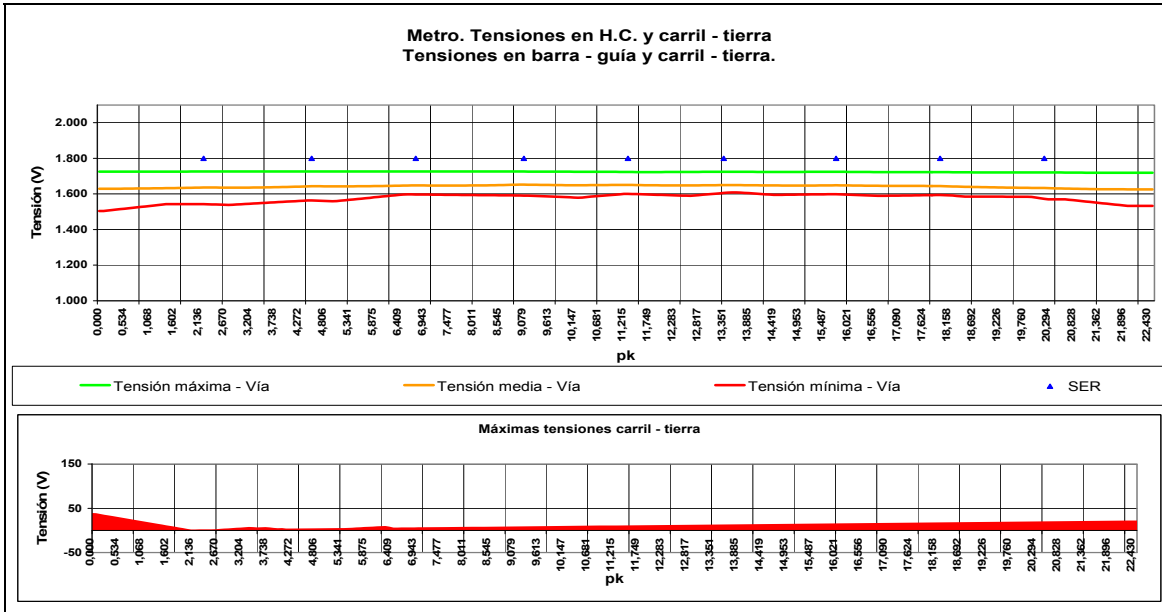


Figura 6.19 2G Caso funcionamiento normal. Tensiones.

Las potencias suministradas por cada subestación se encuentran por debajo de sus valores nominales. Las tensiones también se encuentran en el rango admitido y apenas hay caídas de tensión notables, es importante recordar que el motivo es la gran sección conductora existente al instalar catenaria rígida. De la misma manera la tensión carril-tierra se mantiene en valores admisibles. En la Figura 6.20 y la Figura 6.21 se muestra el caso más desfavorable que es el de la caída de una de las subestaciones de los extremos.

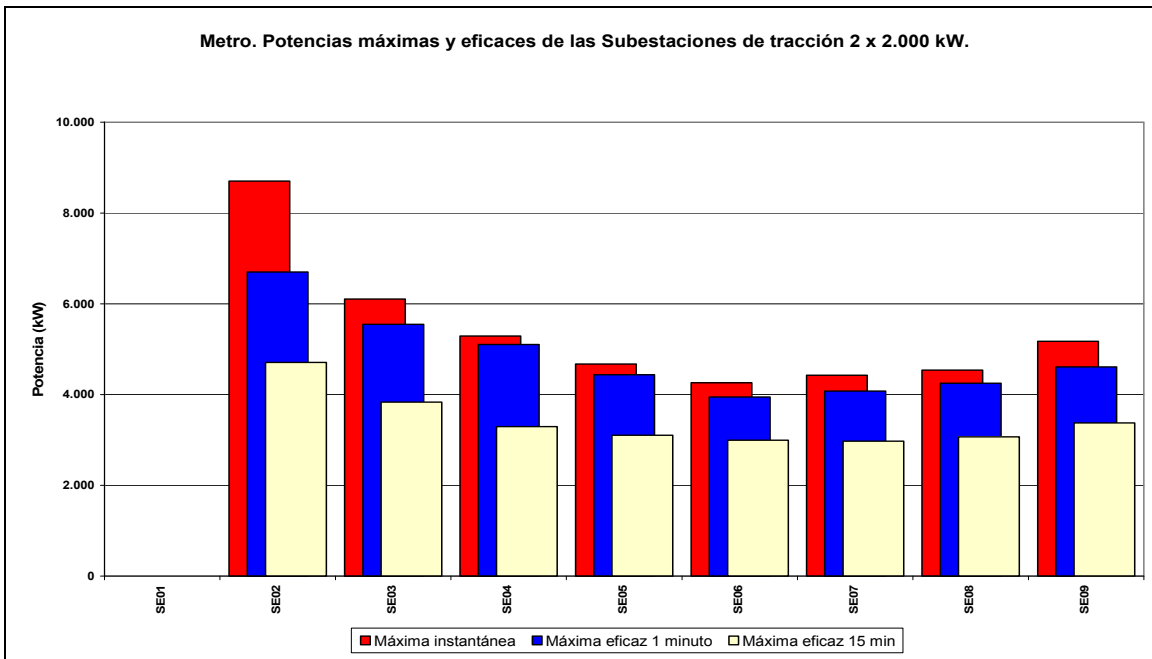


Figura 6.20 2G Caso funcionamiento degradado. Potencias.



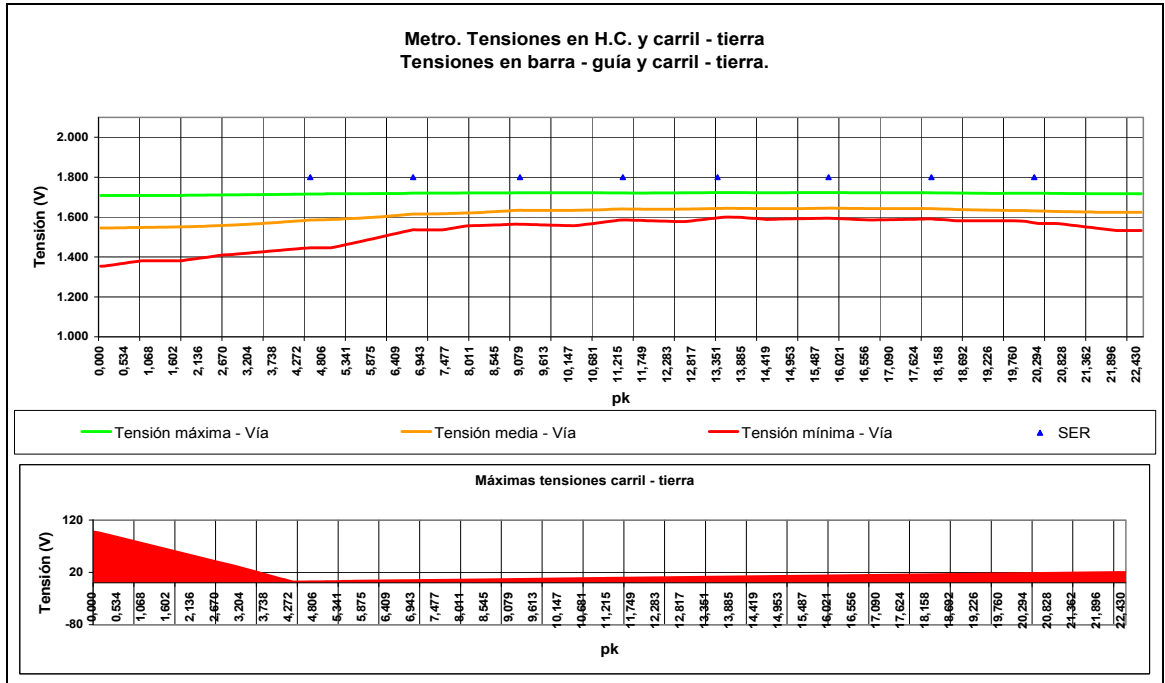


Figura 6.21 2G Caso funcionamiento degradado. Tensiones.

De la misma manera que para el caso de 1 grupo, los valores se encuentran por encima de los nominales, por lo que la caída de la subestación no debe ser superior a las 2 horas. Los niveles de tensión de catenaria se encuentran en el rango adecuado aunque en la zona extrema la tensión llega a caer hasta un nivel de 1.350 V. En cuanto a las tensiones carril-tierra, a medida que aumentamos el número de grupos y separamos cada vez más las subestaciones, aumenta, y en esta ocasión se encuentra rozando los 120 V, aunque no los llega a sobrepasar en ningún punto de la línea, por lo tanto, sería una situación aceptable.



- Tipología de subestaciones con 3 grupos de transformación-rectificación

Para el caso de funcionamiento normal los resultados son los mostrados en la Figura 6.22 y la Figura 6.23.

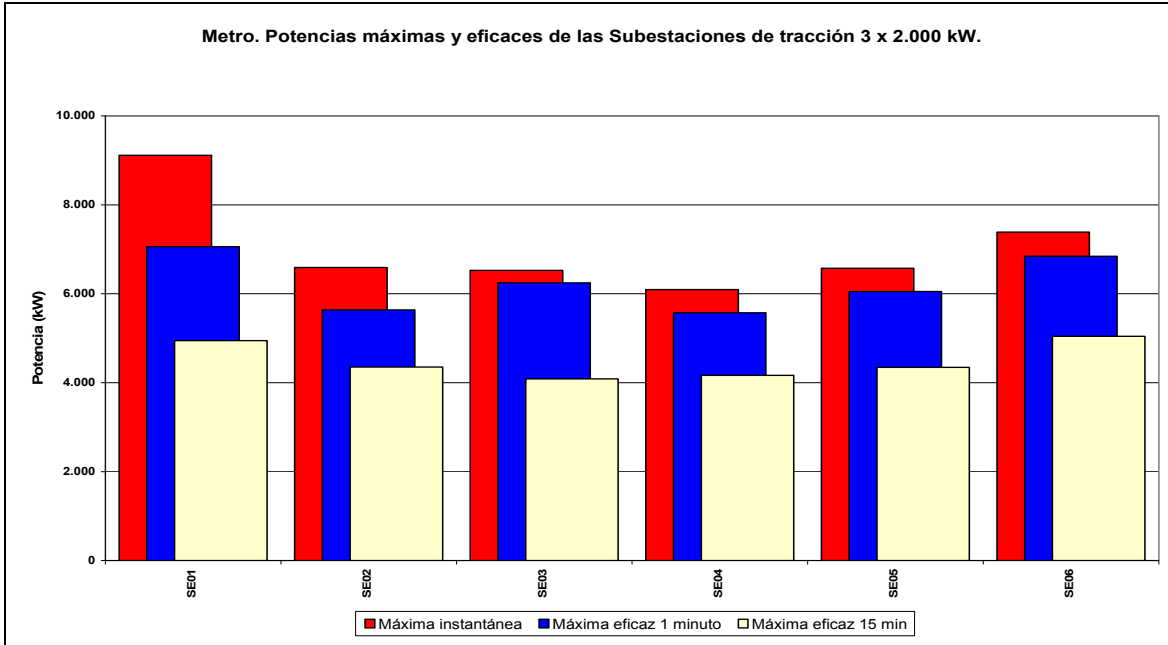


Figura 6.22 3G Caso funcionamiento normal. Potencias.

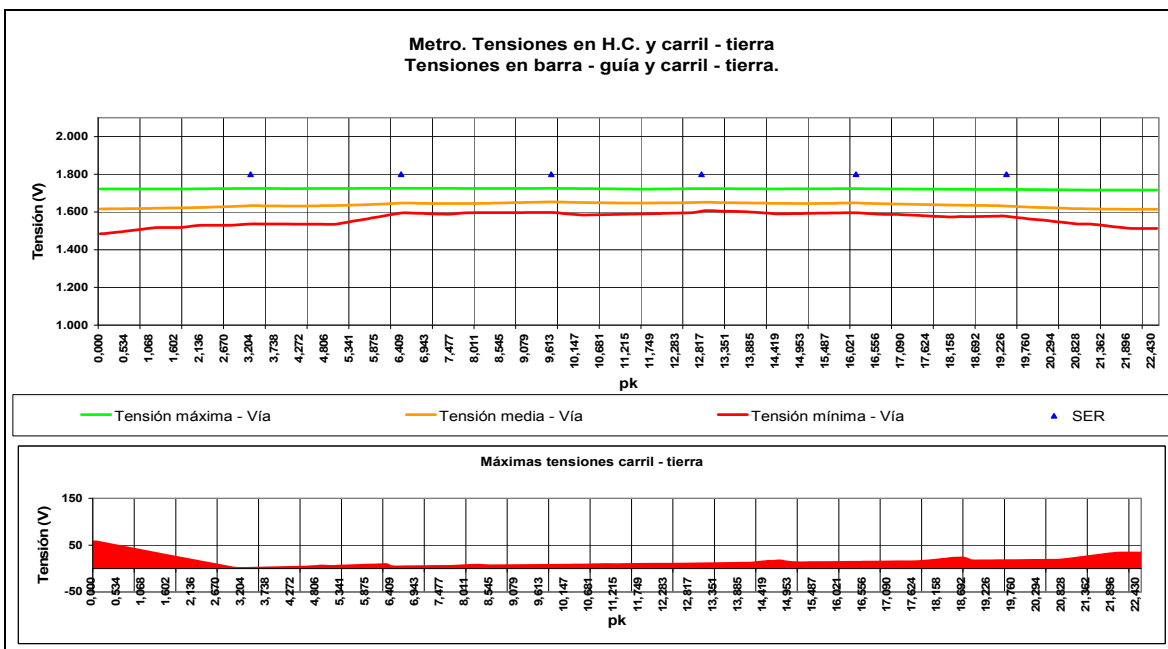


Figura 6.23 3G Caso funcionamiento normal. Tensiones.



Para el caso de 3 grupos de transformación-rectificación funcionando en condiciones normales, se observa que ninguna de las subestaciones trabaja por encima de su funcionamiento nominal. De la misma manera que el caso anterior, la peor situación sería si cayese cualquiera de las subestaciones más extremas de la línea (ver Figura 6.24 y Figura 6.25). Los niveles de tensión de catenaria y de carril-tierra son adecuados y se adaptan a la normativa vigente.

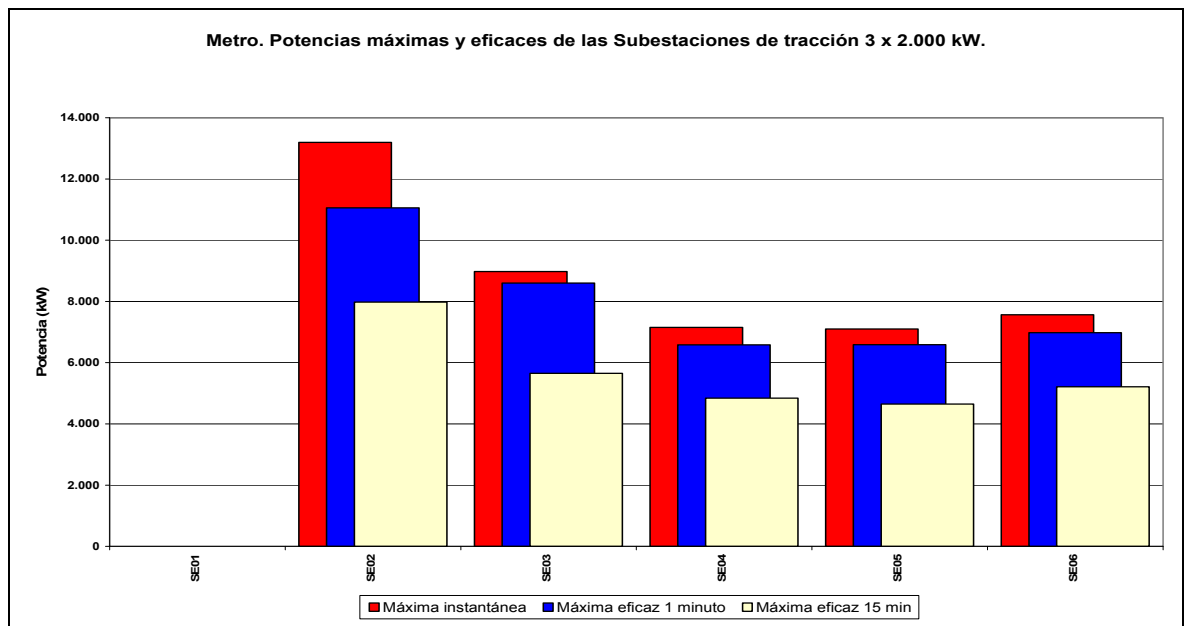


Figura 6.24 3G Caso funcionamiento degradado. Potencias.

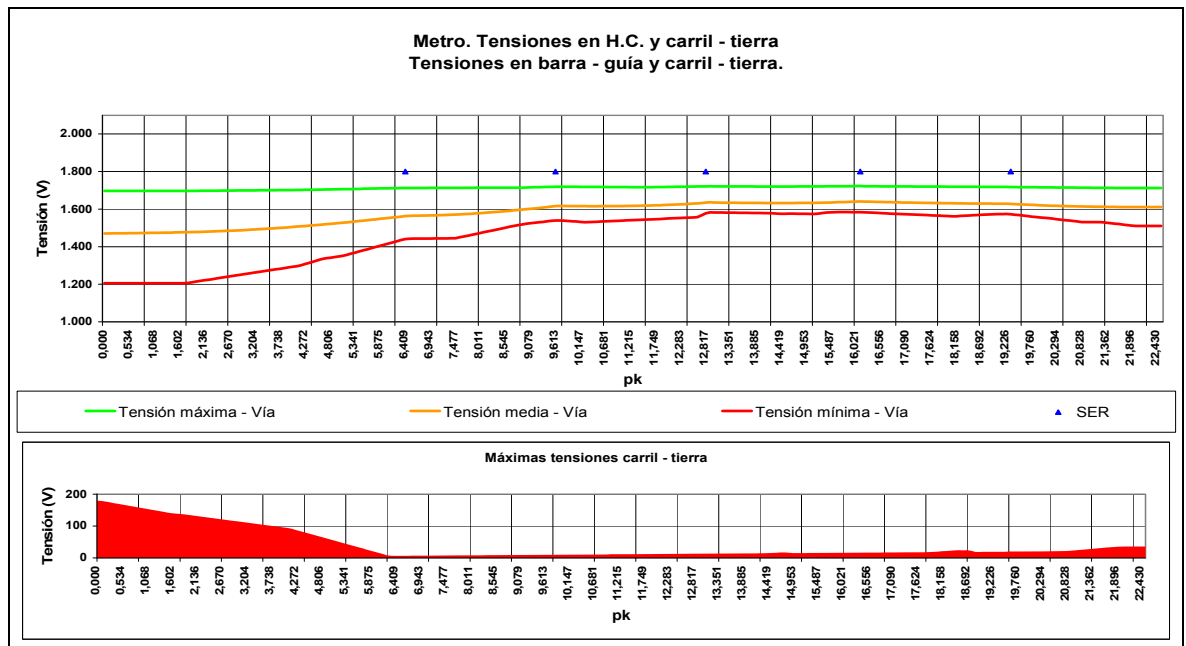


Figura 6.25 3G Caso funcionamiento degradado. Tensiones.



En el caso de la caída de una de las subestaciones de los extremos, las potencias no superan los valores nominales aunque aumentan de manera considerable, sobretodo la de la subestación colateral del extremo, que incrementa su valor en un 133 %. Sin embargo, mientras la caída no sea superior a las 2 horas, podría darse la situación. Son importantes también las caídas de tensión de la catenaria, que llegan a descender hasta los 1.200 V, aunque siguen dentro del rango. No obstante, la tensión carril-tierra supera los 120 V, durante un recorrido considerable, de manera que el degradado N-1 para el caso de subestaciones de 3 grupos no es aceptable a no ser que se incorporase un sistema de puesta a tierra de los carriles de forma automática o algún tipo de descargador de tensión. De todas maneras, consideraremos esta configuración no viable para un nivel de redundancia N-1 o superior. Aunque no soporte la caída de una subestación, es posible que la caída de 2 de sus 3 grupos de transformación-rectificación si, se estaría hablando de redundancia N-2 respecto a la caída por grupo independiente. En la Figura 6.26 y la Figura 6.27 se muestran los resultados de esta configuración:

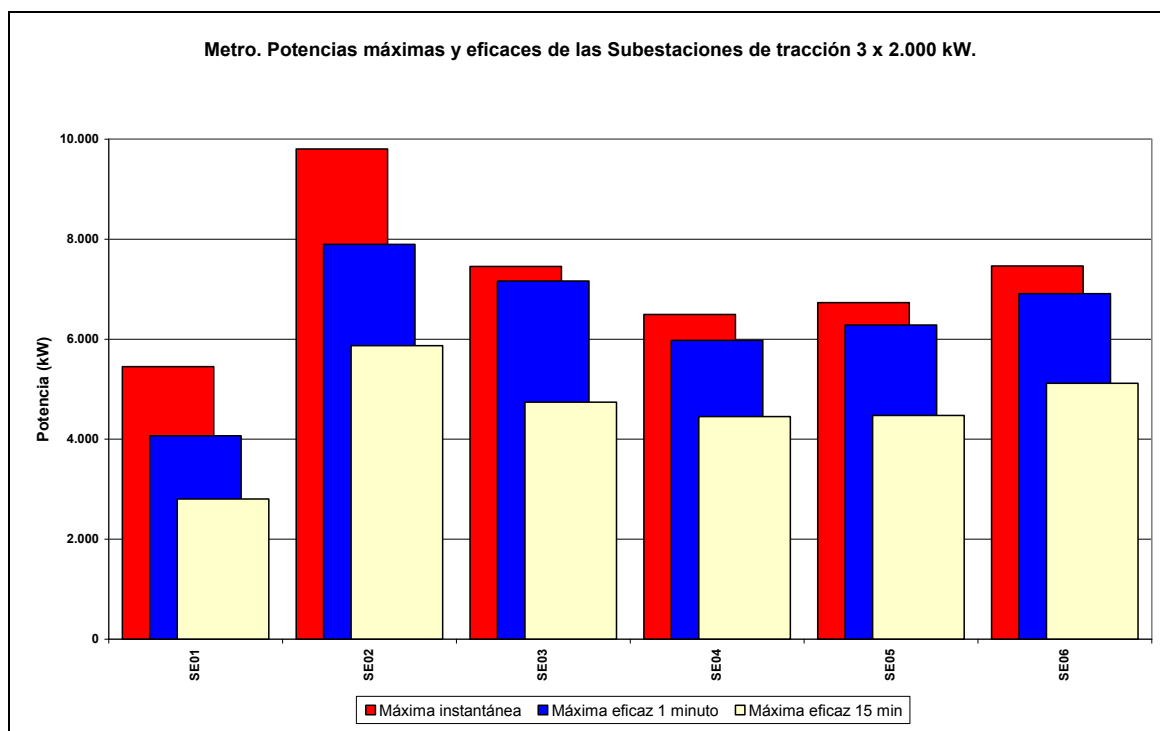


Figura 6.26 3G Caso funcionamiento degradado. Potencias.



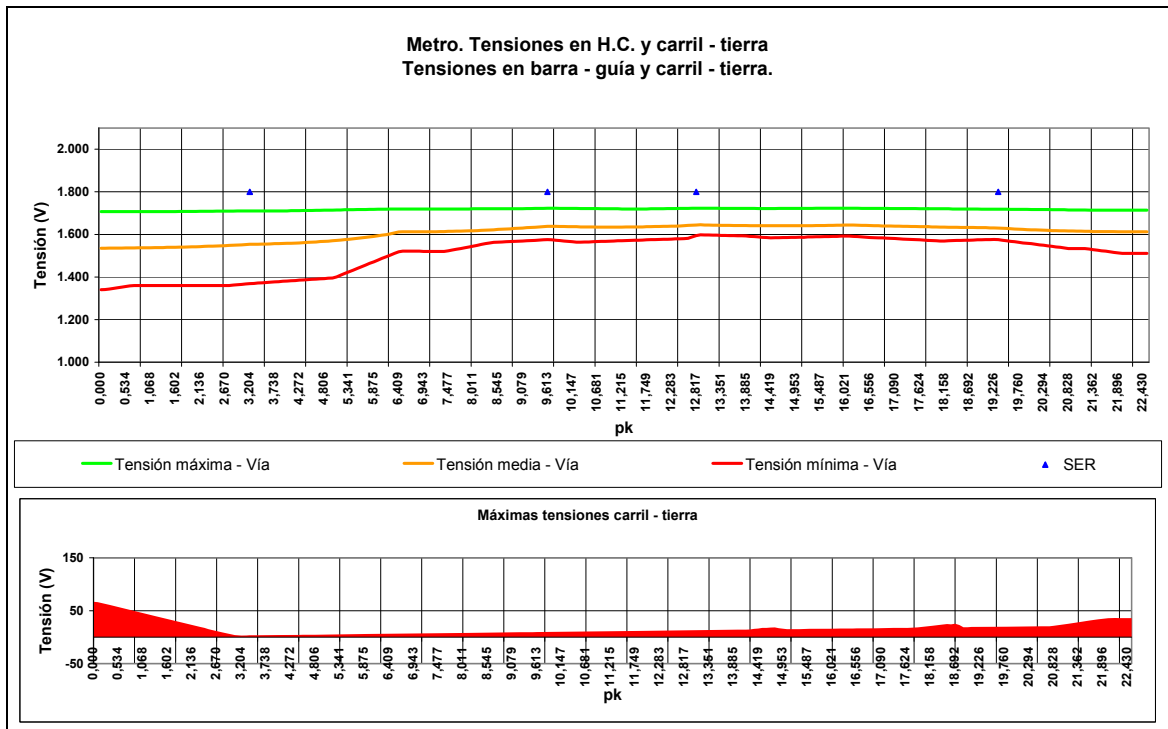


Figura 6.27 3G Caso funcionamiento degradado. Tensiones.

En la simulación anterior se observa como la tensión carril-tierra se reduce considerablemente hasta estar por debajo de los 120 V que exige la normativa. La tensión de catenaria también mejora, encontrándose en un rango de valores más cercano a los 1.500 V. Respecto a la potencia suministrada por la subestación colateral, se encuentra ligeramente por debajo de los valores nominales, cuando en el caso anterior estaba muy por encima (133 %). Por el contrario, la subestación del extremo que actualmente se encuentra trabajando con un único grupo porque los otros dos han fallado, trabaja aproximadamente al 141 %, muy cercano al 150 % máximo que pueden alcanzar durante dos horas, no obstante, sigue estando dentro de los márgenes, por lo tanto la opción de redundancia N-2 en número de grupos de transformación-rectificación si que es válida.

En definitiva, el caso de vías separadas presenta diferencias al caso de vías unidas, tal y como se ha demostrado en las simulaciones, en vías separadas no es posible la redundancia N-1 para subestaciones de 3 grupos debido a que se supera el límite de 120 V en la tensión carril-tierra. Sin embargo, se ha demostrado la posibilidad de soportar en cualquiera de las subestaciones de la línea la caída simultánea de dos de tres de sus grupos de tracción durante no más de dos horas.



6.2. Análisis RAM

A continuación se realiza el estudio RAM de conjunto, teniendo en cuenta la instalación global.

6.2.1. Consideraciones

6.2.1.1. Consideraciones generales

Las consideraciones generales son las mismas que para el apartado 5.2.1.1.

6.2.1.2. Consideraciones eléctricas

En cuanto a las consideraciones eléctricas se pueden distinguir dos posibles fallos críticos que producen la interrupción del servicio.

- Fallo producido por la caída de más de una subestación del conjunto.

Además del nivel de redundancia propio de cada subestación (según número de grupos de transformación-rectificación), entra en juego el nivel de redundancia del conjunto (N-1), es decir, el sistema soporta la caída de una de las subestaciones, dando como fallo crítico directo la caída de una segunda subestación. Para simulación de fallo tan sólo es necesario un fallo en un componente situado entre la entrada de línea y la entrada a las cabinas de feeder.

- Fallo producido desde la entrada a cabinas de feeder hasta las vías (conjunto).

El estudio de conjunto es diferente al estudio individual, puesto que la caída de una de las salidas de feeder no ocasiona directamente la interrupción del sistema, ya que la subestación colateral permite que el tramo de vía afectado se pueda seguir alimentando.

En definitiva, se producirá interrupción del sistema cuando, caiga una de las subestaciones y además caiga también cualquiera de las salidas de la subestaciones colaterales que alimentan los tramos de vía comunes con la subestación caída. También existe fallo cuando caen salidas de feeder contiguas de dos subestaciones.

Para el caso de las subestaciones extremas, se ha considerado que se pueden alimentar los extremos aunque haya caído la subestación, puesto que a través de la correcta conmutación del seccionador de catenaria permite alimentar dichos extremos con la subestación colateral.



6.2.2. Resultados

Los resultados obtenidos para cada instalación teniendo en cuenta que se ha considerado una redundancia de N-1 se detallan en la Tabla 6.5.

		Vías unidas				Vías separadas			
		SIN BP		CON BP		SIN BP		CON BP	
		Indisp.	% disp.	Indisp.	% disp.	Indisp.	% disp.	Indisp.	% disp.
1G	1 SE	3,04E-02	96,9600000000	2,47E-02	97,5300000000	3,62E-02	96,3800000000	2,47E-02	97,5300000000
	17 SE	3,30E-02	96,7011700000	3,16E-02	96,8392500000	3,44E-02	96,5629000000	3,16E-02	96,8392447000
2G	1 SE	6,41E-03	99,3590000000	5,08E-04	99,9492000000	1,23E-02	98,7700000000	5,27E-04	99,9473000000
	9 SE	7,76E-05	99,9922440000	2,58E-06	99,9997419620	1,53E-04	99,9847380000	2,58E-06	99,9997419830
3G	1 SE	5,94E-03	99,4060000000	3,09E-05	99,9969100000	1,18E-02	98,8200000000	5,03E-05	99,9949700000
	6 SE	3,56E-05	99,9964430000	2,59E-09	99,9999997408	7,10E-05	99,9928960000	2,01E-09	99,9999997990

Tabla 6.5 Disponibilidades

6.3. Análisis económico

En el siguiente apartado se exponen los costes totales integrando las configuraciones obtenidas en la totalidad de la línea de metro usada como referencia. De esta manera se consigue obtener el coste total de la instalación. Es importante realizar las conclusiones con los precios finales de toda la instalación, ya que las subestaciones de 1 grupo por ejemplo tienen un coste inferior a las que tienen más grupos, pero el número de subestaciones a instalar será superior a las de más grupos para una misma demanda, por lo que el coste individual es menor, pero el total de la instalación será superior.

El cálculo incluye el coste de la instalación de la subestación de tracción y el coste de la línea aérea de contacto. No se tendrá en cuenta el coste de los conductores de retorno, puesto que se supone que no hay excesiva separación entre subestación y vías. Además se supone que no existe un número elevado de seccionamientos entre subestaciones.

No se ha tenido en cuenta el precio de los seccionadores existentes en estaciones ni en las bretelles, ya que se supone que el número será equivalente para todas las alternativas puesto que depende del número de estaciones y es equivalente en todos los casos.

No se tienen en cuenta el coste del terreno, puesto que es muy relativo y depende en gran medida de la zona en la que se encuentre.



6.3.1. Vías unidas

A continuación se detallan los precios finales de las instalaciones distinguiendo entre subestaciones con y sin By-pass para el caso de vías unidas.

- Instalación de subestaciones con 1 grupo de transformación-rectificación (ver Tabla 6.6)

Presupuesto línea metro con subestaciones de tracción de 1 Grupo		
Configuración	Sin By-pass	Con By-pass
P.E.M. (1SE) [€]	1.078.069,05	1.115.216,75
P.E.M. (17SE) [€]	18.327.173,85	18.958.684,75
P.E.M. Estudio Seguridad y Salud [€]	79.694,82	79.694,82
P.E.M. Tramo catenaria extremos [€]	46.011,78	46.011,78
P.E.M. Total instalación metro [€]	18.452.880,45	19.084.391,35
13 % gastos generales [€]	20.851.754,91	21.565.362,23
6 % beneficio industrial [€]	22.102.860,20	22.859.283,96
18 % I.V.A. [€]	26.081.375,04	26.973.955,07
Presupuesto FINAL [€]	26.081.375,04	26.973.955,07

Tabla 6.6 Presupuesto total 1G V.U.

- Instalación de subestaciones con 2 grupos de transformación-rectificación (ver Tabla 6.7)

Presupuesto línea metro con subestaciones de tracción de 2 Grupos		
Configuración	Sin By-pass	Con By-pass
P.E.M. (1SE) [€]	1.272.859,76	1.310.007,46
P.E.M. (9SE) [€]	11.455.737,84	11.790.067,14
P.E.M. Estudio Seguridad y Salud [€]	79.694,82	79.694,82
P.E.M. Tramo catenaria extremos [€]	82.828,56	82.828,56
P.E.M. Total instalación metro [€]	11.618.261,22	11.952.590,52
13 % gastos generales [€]	13.128.635,18	13.506.427,29
6 % beneficio industrial [€]	13.916.353,29	14.316.812,92
18 % I.V.A. [€]	16.421.296,88	16.893.839,25
Presupuesto FINAL [€]	16.421.296,88	16.893.839,25

Tabla 6.7 Presupuesto total 2G V.U.



- Instalación de subestaciones con 3 grupos de transformación-rectificación (ver Tabla 6.8)

Presupuesto línea metro con subestaciones de tracción de 3 Grupos		
Configuración	Sin By-pass	Con By-pass
P.E.M. (1SE) [€]	1.466.326,39	1.503.474,09
P.E.M. (6SE) [€]	8.797.958,34	9.020.844,54
P.E.M. Estudio Seguridad y Salud [€]	79.694,82	79.694,82
P.E.M. Tramo catenaria extremos [€]	118.321,26	118.321,26
P.E.M. Total instalación metro [€]	8.995.974,42	9.218.860,62
13 % gastos generales [€]	10.165.451,09	10.417.312,50
6 % beneficio industrial [€]	10.775.378,16	11.042.351,25
18 % I.V.A. [€]	12.714.946,23	13.029.974,48
Presupuesto FINAL [€]	12.714.946,23	13.029.974,48

Tabla 6.8 Presupuesto total 3G V.U.

- Comparación de los presupuestos de instalación de todas las alternativas para vías unidas (ver Figura 6.28)

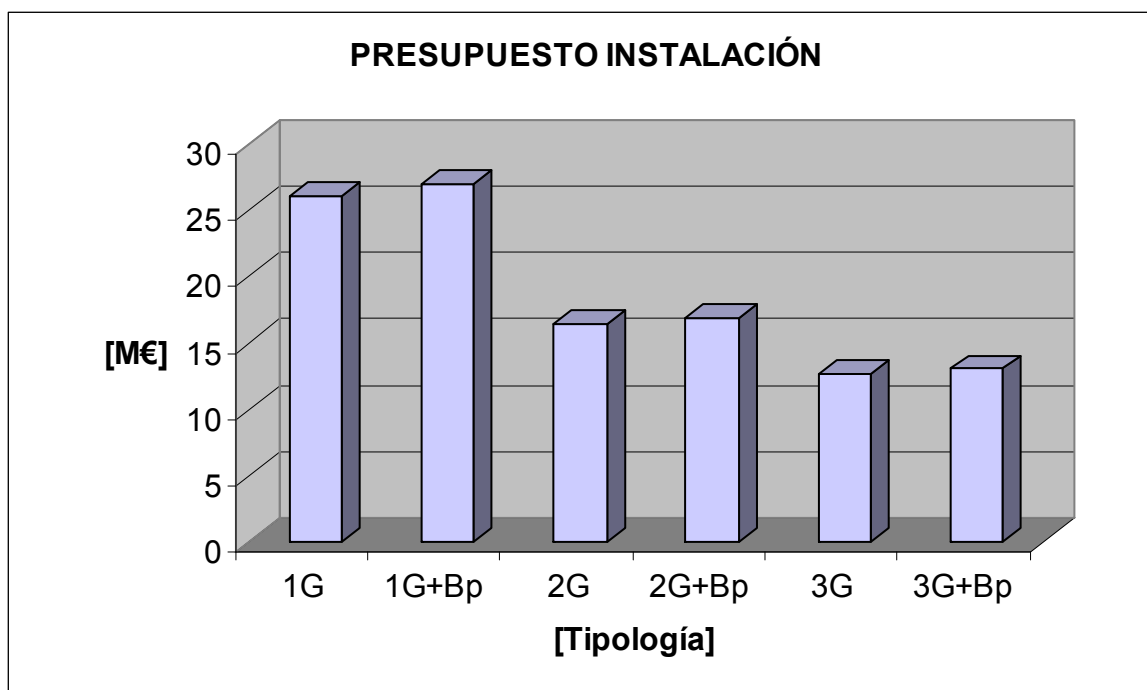


Figura 6.28 Presupuesto instalación V.U.



6.3.2. Vías separadas

A continuación se detallan los precios finales de las instalaciones distinguiendo entre subestaciones con y sin By-pass para el caso de vías separadas.

- Instalación de subestaciones con 1 grupo de transformación-rectificación (ver Tabla 6.9)

Presupuesto línea metro con subestaciones de tracción de 1 Grupo		
Configuración	Sin By-pass	Con By-pass
P.E.M. (1SE) [€]	1.184.003,05	1.221.150,75
P.E.M. (17SE) [€]	20.128.051,85	20.759.562,75
P.E.M. Estudio Seguridad y Salud [€]	79.694,82	79.694,82
P.E.M. Tramo catenaria extremos [€]	46.011,78	46.011,78
P.E.M. Total instalación metro [€]	20.253.758,45	20.885.269,35
13 % gastos generales [€]	22.886.747,05	23.600.354,37
6 % beneficio industrial [€]	24.259.951,87	25.016.375,63
18 % I.V.A. [€]	28.626.743,21	29.519.323,24
Presupuesto FINAL [€]	28.626.743,21	29.519.323,24

Tabla 6.9 Presupuesto total 1G V.S.

- Instalación de subestaciones con 2 grupos de transformación-rectificación (ver Tabla 6.10)

Presupuesto línea metro con subestaciones de tracción de 2 Grupos		
Configuración	Sin By-pass	Con By-pass
P.E.M. (1SE) [€]	1.378.793,76	1.415.941,46
P.E.M. (9SE) [€]	12.409.143,84	12.743.473,14
P.E.M. Estudio Seguridad y Salud [€]	79.694,82	79.694,82
P.E.M. Tramo catenaria extremos [€]	82.828,56	82.828,56
P.E.M. Total instalación metro [€]	12.571.667,22	12.905.996,52
13 % gastos generales [€]	14.205.983,96	14.583.776,07
6 % beneficio industrial [€]	15.058.343,00	15.458.802,63
18 % I.V.A. [€]	17.768.844,74	18.241.387,11
Presupuesto FINAL [€]	17.768.844,74	18.241.387,11

Tabla 6.10 Presupuesto total 2G V.S.



- Instalación de subestaciones con 3 grupos de transformación-rectificación (ver Tabla 6.11)

Presupuesto línea metro con subestaciones de tracción de 3 Grupos		
Configuración	Sin By-pass	Con By-pass
P.E.M. (1SE) [€]	1.572.260,39	1.609.408,09
P.E.M. (6SE) [€]	9.433.562,34	9.656.448,54
P.E.M. Estudio Seguridad y Salud [€]	79.694,82	79.694,82
P.E.M. Tramo catenaria extremos [€]	118.321,26	118.321,26
P.E.M. Total instalación metro [€]	9.631.578,42	9.854.464,62
13 % gastos generales [€]	10.883.683,61	11.135.545,02
6 % beneficio industrial [€]	11.536.704,63	11.803.677,72
18 % I.V.A. [€]	13.613.311,47	13.928.339,71
Presupuesto FINAL [€]	13.613.311,47	13.928.339,71

Tabla 6.11 Presupuesto total 3G V.S.

- Comparación de los presupuestos de instalación de todas las alternativas para vías unidas (ver Figura 6.29)

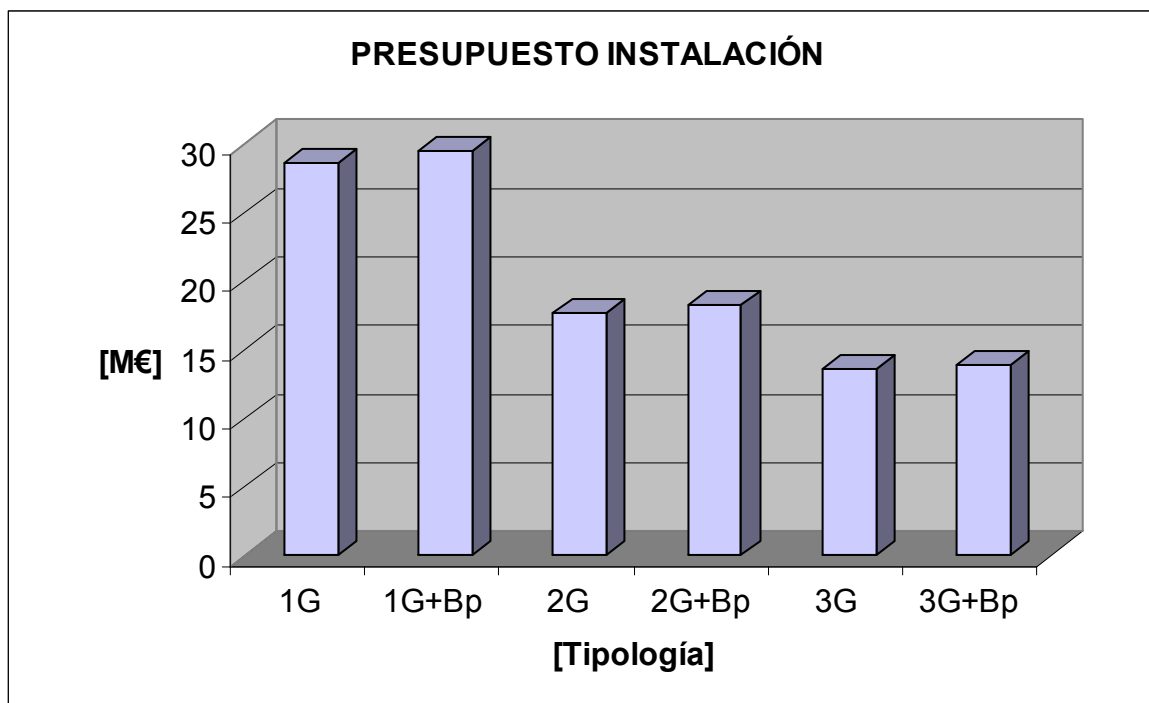


Figura 6.29 Presupuesto instalación V.S.



6.3.3. Comparativa

Con todos los presupuestos de las instalaciones para cada alternativa, es necesario realizar una comparativa que nos permita observar la variación del precio de una subestación con respecto al precio de la totalidad de la instalación para cada una de las alternativas.

Para el cálculo del presupuesto final, se ha tenido en cuenta el tramo de catenaria que existe en los extremos, y se han aplicado los respectivos porcentajes sobre el presupuesto de ejecución de material obteniendo así el presupuesto final.

Los resultados obtenidos son los mostrados en la Figura 6.30.

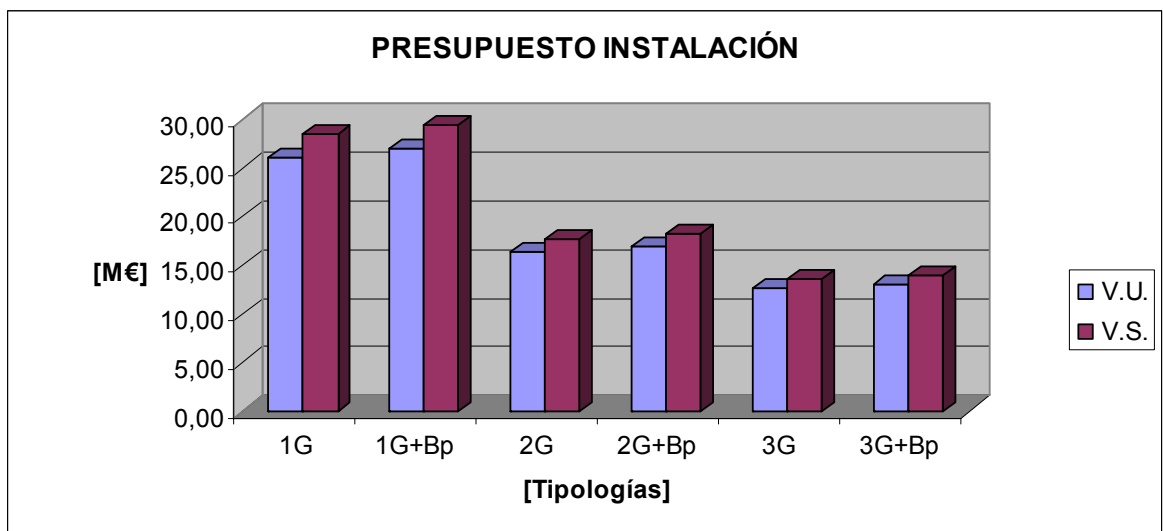


Figura 6.30 Presupuesto final V.U. & V.S.

Tal y como se había previsto en el estudio individual, el coste de las subestaciones con inferior número de grupos es menor, pero debido a que la demanda global que deben satisfacer es la misma tengan 1, 2 o 3 grupos, el número de subestaciones de la instalación final aumentará en gran medida como menor sea el número de grupos de cada subestación. Por lo que finalmente se puede observar que cuanto menor es el número de grupos, mayor es el coste de la instalación global puesto que necesita un mayor número de subestaciones. En definitiva, es más económico añadir grupos de transformación-rectificación que construir subestaciones de tracción nuevas.

Tanto en los presupuestos individuales como en los de conjunto, los costes que supone una instalación en vías separadas siguen siendo mayores que en vías unidas.

Con todos los resultados del estudio económico es necesario realizar una valoración conjunta con los otros aspectos realizados en el proyecto con la finalidad de poder ajustarse



idóneamente a la solución óptima. En definitiva, para cada necesidad se deberá seleccionar el caso en el que los tres estudios conjuntamente sean óptimos (disponibilidad, simulación eléctrica y estimación económica).

- Diferencia entre el coste de vías separadas y vías unidas

En la Tabla 6.12 se muestran las diferencias en los presupuestos cuando se trata de vías separadas o vías unidas.

	P.F. V.U. [€]	P.F. V.S. [€]	Ahorro [€]	Δ P.F./n° SE [€]
1G	26.081.375,04	28.626.743,21	2.545.368,17	149.727,54
1G+Bp	26.973.955,07	29.519.323,24	2.545.368,17	149.727,54
2G	16.421.296,88	17.768.844,74	1.347.547,85	149.727,54
2G+Bp	16.893.839,25	18.241.387,11	1.347.547,85	149.727,54
3G	12.714.946,23	13.613.311,47	898.365,24	149.727,54
3G+Bp	13.029.974,48	13.928.339,71	898.365,24	149.727,54

Tabla 6.12 Ahorro V.U. & V.S.

Si decidimos instalar por tanto subestaciones con 2 grupos de tracción, el ahorro es más que significativo, concretamente de 1.347.548 euros.

6.3.4. Comparación económica entre vías unidas y vías separadas

Para realizar el cálculo se han obtenido los costes de explotación según tarifas vigentes del 28 de junio de 2010.

Los costes de explotación comprenden la compra de la energía y el mantenimiento de las instalaciones.

El coste de la energía se compone de dos términos:

- La tarifa fija, que depende de la potencia instalada (kW).
- La tarifa variable, que varía según el consumo de energía (kW·h).

Para realizar el cálculo por tanto se debe conocer el término de potencia (T_p) y el término de energía (T_e), que según las tarifas vigentes son los que se detallan en la Tabla 6.13.



T_p [€/kW·año]	20,63
T_e [€/kW·h]	0,12

Tabla 6.13 Tarifas 2010

A partir de estas tarifas, es necesario calcular el coste de potencia (C_p) y el coste de energía (C_e), que dependerá de la tipología de cada subestación.

$$C_p = P_{\text{Rectificador}} \cdot n^{\circ} \text{ grupos} \cdot n^{\circ} \text{ subestaciones} \cdot \text{años} \cdot T_p$$

$$C_e = t_{\text{funcionamiento}} \cdot P_{\text{MediaTotal}} \cdot T_e$$

La suma de ambos costes da por solución el coste total de la instalación.

$$C_t = C_p + C_e$$

En la Tabla 6.14 se muestran todos los cálculos realizados y una comparativa del ahorro que supone realizar la instalación con vías unidas frente a una instalación con vías separadas.

	1G		2G		3G	
	Vías unidas	Vías separadas	Vías unidas	Vías separadas	Vías unidas	Vías separadas
C_p [€]	701.526	701.526	742.793	742.793	742.793	742.793
C_e [€]	20.611.015	20.703.231	20.566.603	20.708.220	20.622.577	20.838.287
C_t [€]	21.312.542	21.404.757	21.309.395	21.451.013	21.365.370	21.581.080
Ahorro anual con V.U. [€]	92.216		141.618		215.710	

Tabla 6.14 Costes de explotación

Tal y como se ha ido comentando a lo largo del proyecto, con vías separadas la sección conductora es la mitad que en el caso de vías unidas, por lo que las pérdidas son mayores y por tanto la potencia que deben suministrar las subestaciones es mayor. A medida que aumentamos el número de grupos, la distancia entre subestaciones aumenta, y con ello la caída de tensión, por esta razón el ahorro económico en vías unidas es más notable con el incremento de grupos de transformación-rectificación.

En definitiva, los ahorros no son muy elevados, pero se recuerda que estas cifras son anuales. En un periodo de tiempo significativo, puede suponer un ahorro más que notable.



6.4. Análisis global

Una vez realizados los tres estudios que se han llevado a cabo en el proyecto es necesario contrastar los resultados de ambos. A continuación se detallan los resultados para cada tipo de instalación posible para la línea de metro estudiada (ver Tabla 6.15 y Tabla 6.16).

6.4.1. Vías unidas

	1G		2G		3G	
	SIN BP	CON BP	SIN BP	CON BP	SIN BP	CON BP
Simulación eléctrica	OK	OK	OK	OK	OK	OK
% disp.	96,7011700	96,8392500	99,9922440	99,9997419	99,9964430	99,9999997
Pres. [€]	26.081.375	26.973.955	16.421.297	16.893.839	12.714.946	13.029.974

Tabla 6.15 Estudio de conjunto V.U.

Respecto a la simulación eléctrica, para una configuración en vías unidas, todas las tipologías son adecuadas con un nivel de redundancia N-1.

En cuanto a la disponibilidad de la instalación obtenida mediante el estudio RAM, observamos que con 1 grupo de transformación-rectificación, los resultados nos son demasiado alentadores, mientras que son muy optimistas para las configuraciones de 2 y 3 grupos. Es importante comentar que el hecho de que una instalación disponga o no de By-pass es notable en cuanto a la disponibilidad de la instalación. Tal y como se observa, la mejora que ofrece el By-pass no es proporcional para cada instalación, puesto que para subestaciones de 1 grupo no influye de la misma manera que para instalaciones con 3 grupos. La explicación reside precisamente en la importancia de que las subestaciones estén formadas por 1 o más grupos de tracción, es decir, para instalaciones de 1 grupo por ejemplo, la probabilidad de que pueda producirse fallo debido a la caída de 1 grupo es mucho mayor que la probabilidad de fallo en las salidas de feeder aún disponiendo o no de By-pass. Sin embargo, la probabilidad de que caiga un segundo o incluso tercer grupo es ya mucho menor, debido a la redundancia, que la probabilidad de fallo en las salidas de feeder, y es por tanto en estos casos en los que la redundancia en las salidas de feeder, aportada por el By-pass, es significativa. En definitiva, se puede concluir que a partir de subestaciones de 2 grupos, disponer de By-pass hace la instalación mucho más fiable.

Respecto al estudio económico, hay notables diferencias entre presupuestos para las instalaciones con 1, 2 y 3 grupos. El presupuesto para 1 grupo, es muy elevado en



comparación a los otros, aunque individualmente el coste de las subestaciones de 1 grupo sea inferior. En referencia a 2 y 3 grupos, se observa como el presupuesto para 2 grupos es notablemente superior. Por lo tanto se constata, que aunque el coste de una subestación con más grupos de transformación-rectificación sea superior, el coste de la instalación global posterior se verá reducido en gran medida.

En definitiva, para una configuración en vías unidas, las mejores tipologías son sin duda las de 2 y 3 grupos de tracción. Aunque hay notables diferencias, la simulación eléctrica obtenida es mucho más favorable para el caso de 2 grupos, sobretodo cuando se produce la caída de una de las subestaciones de la línea. En el caso de 3 grupos, los niveles exigidos por normativa en cuanto a tensión carril-tierra se refiere se llegan a cumplir pero están bordeando los límites máximos permitidos. En cambio, la disponibilidad y el presupuesto de la instalación son más adecuados para el caso de 3 grupos.

6.4.2. Vías separadas

	1G		2G		3G	
	SIN BP	CON BP	SIN BP	CON BP	SIN BP	CON BP
Simulación eléctrica	OK	OK	OK	OK	NO	NO
% disp.	96,5629000	96,8392447	99,9847380	99,9997419	99,9928960	99,9999998
Pres. [€]	28.626.743	29.519.323	17.768.845	18.241.387	13.613.311	13.928.340

Tabla 6.16 Estudio de conjunto V.S.

Respecto a los resultados de la simulación eléctrica, una instalación formada por subestaciones de 1 o 2 grupos cumplirá con los requisitos, mientras que una con subestaciones de 3 grupos, no, ya que la tensión carril-tierra supera los límites exigidos por la norma. Sería posible tener en cuenta dicha configuración si se dispusiera de los mecanismos que consiguen solventar el problema de la sobretensión en los carriles derivado básicamente por las grandes distancias que separan las subestaciones en este tipo de configuración.

En cuanto a la disponibilidad de la instalación obtenida mediante el estudio RAM, se observa que los valores obtenidos son muy similares a los existentes para vías unidas, detectándose únicamente pequeñas variaciones. En principio tienen una ligera mayor disponibilidad en vías unidas, puesto que existe un menor número de componentes, y por tanto menos elementos que puedan fallar, aunque cabe recordar que, en vías unidas, en caso de caer una de las salidas de alimentación, se produce un fallo que afecta a las dos vías, por tanto la alimentación a un lado o al otro de la subestación queda totalmente interrumpida. En cambio,



para vías separadas tan sólo se produciría la caída de un solo tramo de vía, por lo que sería posible la circulación todavía en sentido contrario. En definitiva, vías unidas tiene ligeramente mayor disponibilidad, pero sus repercusiones son diferentes y con menos “juego” que en vías separadas y por tanto la comparación no es equitativa.

Los resultados del estudio económico son ligeramente superiores que para el caso de vías unidas, pero siguen prácticamente la misma tendencia. El presupuesto para la configuración con 1 grupo de tracción es muy superior a la de 2 y 3 grupos. Aunque el coste de cada subestación como unidad es inferior, en la valoración conjunta al ser el número de subestaciones que completa la instalación mucho mayor, el coste también se incrementa. En el caso de 2 grupos, el presupuesto también acaba siendo notablemente mayor que para el de 3.

En conclusión, para una configuración en vías separadas, la alternativa idónea es la de subestaciones de tracción con 2 grupos de transformación-rectificación. Con 3 grupos sería una excelente opción, pero debido a los resultados de la simulación eléctrica no es posible tenerla en cuenta.



7. Estudio de impacto ambiental

Este apartado pretende responder a la prescripción establecida por el Real Decreto Ley 9/2000, del 6 de Octubre.

En este reglamento se establece la obligación de someterse a evaluación del impacto proyectos que repercutan sobre el medio ambiente y los recursos naturales.

Se deben tener en cuenta distintas situaciones:

- Situación preoperacional.
- Situación durante la ejecución.
- Situación durante la explotación.
- Medidas preventivas y correctoras.

En general, puede decirse que todos los análisis tienen la misma importancia. Cualquiera de ellos puede y debe condicionar la actuación.

En los siguientes apartados se analiza cada situación y se marcan las normas específicas de este proyecto en lo relacionado a impacto ambiental. Por esto, se sigue metodológicamente (aunque de forma esquemática) la “Guía metodológica para la elaboración de estudios de impacto ambiental. Carreteras y ferrocarriles”, publicada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes en 1989.

7.1. Situación preoperacional

7.1.1. Medio físico

El ámbito de actuación del proyecto, se encuentra en una zona actualmente calificada como vía férrea, en la cual las vías ya están instaladas, por tanto, en principio no se debe esperar ninguna interferencia con ecosistemas biológicos ni geológicos.

Las emisiones contaminantes disminuirán con la ejecución de la instalación de cualquier tipología de metro estudiada, puesto que fomenta el transporte público, y se reduce en gran medida el número de desplazamientos en vehículo privado.



Las emisiones sonoras, se pueden ver incrementas según la zona en la que se encuentre la línea, sin embargo este incremento no será significativo. Durante la fase de explotación no obstante, la emisiones sonoras si que serán notables.

Las emisiones de campos electromagnéticos (CEM) procedentes de instalaciones como cables de alta tensión o subestaciones de tracción representan un aumento muy significativo de los valores actuales y se deberán limitar durante la fase de explotación.

7.1.2. Medio socioeconómico e institucional

Se supone que no existe en la zona afectada ninguna construcción catalogada de interés general a la que pertenezca el patrimonio histórico, ni similar.

7.1.3. Valoración y síntesis de la situación preoperacional

El espacio objeto no variará su situación debido a la ejecución de las obras proyectadas en el presente proyecto, ya que no producen ningún cambio sustancial en el entorno ambiental.

7.2. Situación durante la ejecución

7.2.1. Sobre el medio físico

Efectos que se producen sobre el medio físico durante la fase de ejecución:

- Calidad del aire: Los cambios experimentados en él no serán perceptibles respecto a la situación actual.
- Ruido: Se analizará en siguientes apartados.
- Paisaje: Se minimizará el impacto de la ubicación de las subestaciones y la catenaria.
- Campos electromagnéticos: Se analizarán en el siguiente apartado.

7.2.2. Sobre la población

Se debe tener especial consideración, puesto que al tratarse de un transporte en una zona metropolitana, hay que preveer que las obras se hagan de manera que afecten lo mínimo posible a la población.



7.2.3. Fase de obras

Aumentarán los niveles de emisión de partículas durante la ejecución de la obras, debido a las excavaciones y movimiento de tierras.

Se producirán incrementos puntuales de los niveles sonoros, debido a los procesos de transporte, carga y descarga de materiales y a los movimientos de maquinaria pesada. Se procurará que la fase de obras afecte lo menos posible a la población.

7.3. Situación durante la explotación

Algunos de los efectos producidos por el desarrollo del proyecto son:

- Estética: El efecto producido por la infraestructura instalada es negativo.
- Seguridad: Las instalaciones proyectadas son de ejecución nueva y sobredimensionada para ser capaces de soportar sobrecargas puntuales. El efecto es positivo.
- Nivel de ruido: Los transformadores y el resto de equipos generan niveles de ruido que deberán estar por debajo de los límites máximos permitidos. El efecto es negativo.
- Emisiones de campos electromagnéticos: Se debe comprobar que no existe peligro vinculado a la exposición a los CEM y cuales son las repercusiones sanitarias potenciales. El efecto es negativo.

7.4. Medidas preventivas y correctoras

7.4.1. Fase de ejecución

Las principales afecciones medioambientales ocasionadas por la ejecución de la obra consisten en la emisión de ruido y la emisión de polvo en la etapa de excavación y transporte de tierras.

Como solución se adopta que la maquinaria ruidosa como martillos picadores neumáticos, maquinaria pesada de excavación, carga y transporte así como cualquier fuente de ruido no funcionará antes de las 8 horas de la mañana y se procurará que los trabajos que las requieran las empleen durante el mínimo tiempo posible.



Igualmente, se establecerán reuniones periódicas para tener constancia de las perturbaciones provocadas y, si es posible, corregirlas inmediatamente.

No se utilizarán sirenas de aviso horario. En su defecto, se pueden instalar señales luminosas con el mismo fin.

7.4.2. Fase de explotación

- Emisiones electromagnéticas

La norma UNE EN 50121-2, Aplicaciones ferroviarias, Compatibilidad electromagnética, Parte 2: Emisión del sistema ferroviario completo al mundo exterior, fija los límites de emisión procedente del sistema ferroviario en su conjunto. Describe también el método de medida que debe utilizarse para comprobar las emisiones.

Conviene, según esta norma, considerar que estas emisiones existen en todos los puntos de los planos verticales situados a 10 m de las líneas centrales de las vías de ferrocarril en zona exterior o a 3 m del cerramiento de las subestaciones.

El Anejo C de dicha norma da un cuadro de los valores numéricos de la magnitud que describen las emisiones del sistema a 1.500 Vcc (ver la Tabla 7.1).

Sistema	Frec. [Hz]	Campo E [V/m]	Campo H [μ T]	Condiciones	Documentación de referencia
1.500 V catenaria	0	63	111	$I_{cc} = 8.000$ A, $U = 1.800$ V. Sin cable aéreo.	ITU (T) Directivas CIGRE WG 3601

Tabla 7.1 Valores de campos eléctricos y magnéticos

Con la aplicación de esta norma se obtiene el cuadro siguiente del CEM en función de la distancia con relación al cerramiento de la instalación debido a que los valores son muy inferiores a niveles de la recomendación europea ($E_{adm} = 5.000$ V/m, $H_{adm} = 100$ μ T) otorgados para una exposición permanente.

- Ruido

El valor del ruido puede ligeramente ser diferente según el método de refrigeración del transformador.



En la fase de proyecto civil, se estudian las medidas correctoras destinadas a evitar la emisión sonora fuera de los límites de las instalaciones o encima de los límites reglamentarios (habitualmente 45 dB por la noche), introduciendo pantallas acústicas en aquellas direcciones con núcleos de población donde pueda incumplirse la normativa.



8. Estudio de seguridad y salud

En cumplimiento del artículo 4 del Real Decreto 1627/1997 del 24 de octubre se establece la necesidad de realizar el Estudio de Seguridad y Salud al legalizar una instalación al ser el presupuesto de ejecución por contrata incluido en el proyecto superior en todos los casos a 450.759,08 €.

El estudio es necesario puesto que sirve para dar las directrices básicas a las empresas contratantes para que elaboren un plan de seguridad y salud en el trabajo donde analicen, estudien, desarrollen y complementen las previsiones contenidas en el estudio de acuerdo con su propio sistema de ejecución.

En el caso que durante la ejecución de la obra se realicen nuevas actividades o se utilicen procedimientos o medios no contemplados en el futuro estudio, ya sea debido a modificaciones o ampliaciones del proyecto o de incidencias que surjan durante la ejecución de la obra, el plan de seguridad y salud que elabore el contratista deberá analizar los riesgos laborales asociados así como las medidas de prevención y protección necesarias.

Asimismo deberá complementarse y actualizarse el plan de seguridad y salud, cuando se observe que la eficiencia y la adecuación de las medidas preventivas y de protección no sea adecuada o suficiente, y siempre esperando la aprobación correspondiente.

En definitiva, es necesario elaborar un estudio exhaustivo de seguridad y salud en el que se contemplen todos los medios y prevenciones necesarias para realizar y llevar a cabo adecuadamente todo el conjunto de las obras.

Dicho estudio se encuentra en el Anejo A. Estudio de Seguridad y Salud del presente proyecto.



Conclusiones

A lo largo de la ejecución del proyecto se han diferenciado claramente tres aspectos: eléctrico, económico y de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM). En el caso de los aspectos económicos y de RAM, los resultados obtenidos han ido asociados al número de componentes que intervenían en el estudio y a la relación entre ellos, de manera que se ha ido buscando el equilibrio del sistema teniendo en cuenta los puntos débiles con el fin de introducir las redundancias necesarias para reforzarlos y se ha ido incrementando el número de componentes hasta llegar a un compromiso de mejora en los valores de fiabilidad y disponibilidad dentro de un coste razonable.

Sin embargo, a la hora de generalizar, qué solución es la mejor dado un sistema cualquiera, falta tener en cuenta qué sucede eléctricamente, ya que el trazado nunca es el mismo, y lo que parece una solución ideal en un caso, para otro no sirve porque a nivel eléctrico no funciona. Así pues, aunque debe llegarse a un compromiso entre la fiabilidad y disponibilidad del sistema asociada al coste que conlleva, siempre hay que comprobar eléctricamente que la solución propuesta funciona.

En el transcurso del proyecto se ha descartado la solución con subestaciones de un único grupo de transformación-rectificación porque al hacer el cálculo del global del sistema, el coste total se encarecía en gran medida. Sin embargo, decidir entre una solución con subestaciones de dos grupos de transformación-rectificación respecto a subestaciones de tres grupos no es tan evidente. Claramente a nivel de costes la solución con subestaciones de tres grupos es más barata que la de dos grupos y además con valores de disponibilidad mayores. Sin embargo, el riesgo de concentrar tres grupos en una misma subestación y que ésta se quede sin suministro eléctrico por parte de la compañía, por ejemplo, o por factores externos, y por tanto, sin el suministro de tres grupos a la vez, conlleva entrar en el límite de viabilidad eléctrica que según el trazado final de la línea no permite realizar generalizaciones.

Para el caso de la línea de metro estudiada, sí puede generalizarse que teniendo en cuenta una solución en vías unidas, subestaciones con tres grupos de transformación-rectificación y By-pass, es la mejor solución, sin embargo para vías separadas, la mejor solución pasa por subestaciones de dos grupos de transformación-rectificación y By-pass. En este último caso, subestaciones de tres grupos, suponiendo que una subestación entera quede fuera de servicio, provoca problemas eléctricos suficientemente grandes como para no poder afrontarlas y esto se debe al trazado de esta línea ejemplo tratado.

Así pues, la solución óptima puede generalizarse hasta un nivel determinado, pero siempre deberá comprobarse e individualizarse según cada caso.



Consideraciones y ampliaciones futuras

En el proyecto no se han tenido en cuenta los posibles fallos desde el suministro hasta la entrada de línea de las subestaciones de tracción, fallos considerados responsabilidad de compañía, así como tampoco los posibles fallos asociados a agentes externos como lluvias, climas extremos, etc. En ambos casos, la subestación afectada quedaría fuera de servicio en su totalidad y, dadas las repercusiones ya comentadas anteriormente que pudiera tener en el caso de tres grupos de transformación-rectificación por ejemplo, convendría que se consideraran y valoraran.

Por otro lado, sistemas como el control y el telemando, de gran relevancia en el funcionamiento de las líneas ferroviarias, también introducen errores y limitaciones a las instalaciones reales y por tanto, deberían considerarse igualmente en posibles estudios futuros.

Obviamente, el estudio realizado con los correspondientes cambios y adaptaciones puede ser extendido a otros sistemas de tracción como el tranvía o ferrocarril. Sin embargo, quizá convendría profundizar primero en el caso de metro antes de abarcar otros horizontes.

En definitiva, este proyecto final de carrera pretende ser una guía o manual en el que basarse para realizar cualquier instalación de metro. En el presente documento se han analizado las configuraciones más habituales que se suelen instalar para poder dar una idea general de cualquier tipología que se quiera estudiar.

El haber realizado un proyecto que abarca cualquier tipología de instalación de metro, ha llevado a concluir el estudio con una aplicación, que permite, a partir de datos iniciales de explotación, como son el recorrido que debe tener la línea, la frecuencia de paso de los trenes, la potencia, el número de grupos, etc. obtener los datos más relevantes que ayuden al cliente a decidir qué tipo de instalación desea realizar o dar una idea general de cómo debería ser, ofreciendo unos valores de disponibilidad de la instalación general y una previsión económica de lo que supondría llevarla a cabo, recordando que posteriormente cualquiera de las opciones debe ser corroborada por una simulación eléctrica.



Agradecimientos

En primer lugar y en lo que concierne a la ayuda moral, quiero agradecer la inestimable e indefinida ayuda de mi familia, que no sólo en el proyecto sino en toda la carrera han estado apoyándome.

A todos y cada uno de mis amigos y gente que me ha rodeado durante esta etapa.

En segundo lugar y en lo que concierne a la ayuda en la realización del proyecto, quiero agradecer la continua ayuda prestada por Meritxell Cusidó, ingeniera de SENER, tutora del proyecto y amiga.

A mis compañeros Sergi Ratés, José Maria Pey y Fulvio Capogna por su permanente disposición y desinteresada ayuda.



Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] TECNORAIL CO. Sistemas de alimentación a la tracción eléctrica, 2008.
- [2] IIR España. Electrificación ferroviaria. Subestaciones de tracción y sistemas de electrificación por línea aérea de contacto, 2007.
- [3] Department of Defense. Military handbook, Reliability prediction of electronic equipment, 1991.
- [4] IEEE Std 493-2007. IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems.
- [5] Rockwell automation. Métodos de análisis de Riesgos, 2009.
- [6] Department of Defense. Reliability, Maintainability & Risk 6E, 1991.
- [7] Teledyne Relays. Application note, 2001.
- [8] H. Paul Barringer. Maintainability, 2008.
- [9] Ben Flood, Simon Wilson, Sergiy Vilkomir. Propagating Uncertainty Through Availability Models, 2000.
- [10] Sunrise Telecom Incorporated. Mean Time Between Failure. 1998.
- [11] Gregory Levitin. The Universal Generating Function in Reliability Analysis and Optimization, 1996.
- [12] Luis A. Escobar. Statistical Methods for Reliability data, 1998.

Bibliografía complementaria

[Boix O., Córcoles F., Sainz L., Suelves F.] *Tecnología eléctrica*. Ediciones CEYSA 2002.

[RLAAT] Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión. B.O.E. 27 diciembre de 1968.



[UNE EN 50121 2] Aplicaciones ferroviarias. Compatibilidad electromagnética. Parte 2: Emisión del sistema ferroviario completo al mundo exterior.

[UNE EN 60146 1-1] Convertidores de semiconductores. Especificaciones y convertidores conmutados por red. Parte 1-1: Especificaciones de los requisitos técnicos básicos.

[Real Decreto 9-2000] REAL DECRETO-LEY 9/2000, del 6 de octubre, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, del 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.

[Real Decreto 1627-1997] REAL DECRETO 1627/1997, del 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción. BOE nº 256 25-10-1997.

[UNE EN 50329 0] Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Transformadores de tracción.

[UNE EN 50328] Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Convertidores electrónicos de potencia para subestaciones.

[UNE EN 50122 1] Aplicaciones de ferrocarriles. Instalaciones fijas. Parte 1: Medidas de protección relacionadas con la seguridad eléctrica y la puesta a tierra.

[CEI IEC 60850 2] Applications ferroviaires-Tensions d'alimentation des systèmes de traction. Railway applications-Supply voltages of traction systems.

[UIC 600 OR] Electric traction with aerial contact line.

