



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

TRABAJO FIN DE GRADO

MODELADO DE CATENARIAS FERROVIARIAS A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES DE LA ALTURA DEL HILO DE CONTACTO

Grado Ingeniería Mecánica

Autora: **Ana Paula Gomes Gonçalves**

Tutora: **Ana María Pedrosa Sánchez**

Cotutor: **Santiago Gregori Verdú**

SEPTIEMBRE 2020

**MODELADO DE CATENARIAS FERROVIARIAS A
PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES DE LA
ALTURA DEL HILO DE CONTACTO**

Grado Ingeniería Mecánica

Escuela Técnica Superior De Ingeniería Del Diseño

Universidad Politécnica De Valencia

ANA PAULA GOMES GONÇALVES

Resumen

La calidad de la interacción entre el pantógrafo y la catenaria es determinante para asegurar un suministro energético constante al ferrocarril y para que así este alcance las mayores velocidades posibles. La interacción por su parte viene determinada por las fuerzas de contacto entre los frotadores del pantógrafo y el hilo de contacto que le suministra corriente. Cuanto más constante esta fuerza más estable es el suministro de corriente y menor el desgaste originado en los componentes en contacto. En la realidad esta fuerza se ve afectada por factores externos, entre los que se encuentran los fallos en la instalación de la catenaria.

El objetivo del presente TFG es el modelado de catenarias con error de montaje en base a medidas experimentales de la altura del hilo de contacto y el análisis de la influencia de los mismos sobre la fuerza de contacto de la interacción dinámica de forma experimental a través del software PaCDIn elaborado por el Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales (DIMM) de la Universidad Politécnica de Valencia.

Lo primero que se deberá hacer tras la familiarización con el programa, es obtener datos de errores reales de instalación a partir de los datos experimentales proporcionados. Tras su caracterización estadística, se generarán errores se generarán 4 catenarias reales que posteriormente se utilizarán en la simulación dinámica. Los resultados de estas interacciones se analizarán con respecto a lo esperado de la misma simulación con catenarias nominales. Por último, se podrá ver el efecto que tienen estos errores sobre la desviación típica de la fuerza de contacto y, por lo tanto, sobre la calidad de la interacción.

Abstract

The quality of the interaction between the pantograph and the catenary is decisive to ensure a constant energy supply to the railway and so that it reaches the highest possible speeds. The interaction for its part is determined by the contact forces between the pantograph panheads and the contact wire that supplies current to the pantograph. The more constant this force, the more stable the current supply and the less wear caused by the components in contact. In reality, this force is affected by external factors, among which are failures in the installation of the catenary.

The objective of this project is the modeling of catenaries with installation error based on experimental measurements of the contact wire height and the analysis of their influence on the contact force of the dynamic interaction experimentally through the PaCDIn software produced by the Department of Mechanical and Materials Engineering (DIMM) of the Polytechnic University of Valencia.

The first thing to do after getting to know the program is to obtain data on real installation errors from the experimental data provided. After their statistical characterization, errors will be generated, 4 real catenaries will be generated that will later be used in the dynamic simulation. The results of these interactions will be analyzed with respect to what is expected from the same simulation with nominal catenaries. Finally, it will be possible to see the effect that these errors have on the standard deviation of the contact force and, therefore, on the quality of the interaction.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 HISTORIA DEL FERROCARRIL EN ESPAÑA	1
1.1.1 TRAYECTO MADRID-VALENCIA	1
1.2 OBJETIVOS	1
2. DEFINICIÓN DE LOS COMPONENTES	3
2.1 INTRODUCCIÓN A LA CATENARIA	3
2.1.1 ESTRUCTURA DE LA CATENARIA	3
2.1.2 ELEMENTOS CATENARIA	5
2.1.2.1 CABLEADO	5
2.1.2.2 ELEMENTOS ESTRUCTURALES	6
2.1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS CATENARIAS	7
2.1.3.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	7
2.1.3.2 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	9
2.1.3.3 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	10
2.2 INTRODUCCIÓN AL PANTÓGRAFO	10
3. ERRORES DE MONTAJE	13
3.1 FLUCTUACIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO POR IRREGULARIDADES EN EL CABLE DE CONTACTO	13
3.2 DESCRIPCIÓN DEL ERROR DE MONTAJE DE LAS CATENARIAS	15
4. OBTENCIÓN ALTURA HILO DE CONTACTO A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES	17
4.1 INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE UTILIZADO	17
4.1.1 OBTENCIÓN DATOS GRÁFICOS	17
4.2 ERRORES DE MEDIDA	19
4.3 ERRORES DE MONTAJE GRÁFICOS	21
5. GENERACIÓN DE CATENARIAS	23
5.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	23
5.2 CÁLCULO Y DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA DE LOS ERRORES	26
5.2.1 ERROR EN LA ZONA DE CONTACTO CON EL PANTÓGRAFO	26
5.2.2 ERROR EN LOS TRAMOS ASCENDENTES Y DESCENDENTES	29
5.3 GENERACIÓN DE CATENARIAS	30

5.4	GENERACIÓN DE CATENARIAS CON ERRORES DE MONTAJE ALEATORIOS	32
5.5	ANÁLISIS ERRORES DE MONTAJE SIMULACIÓN	33
6.	<u>INTERACCIÓN PANTÓGRAFO-CATENARIA</u>	35
6.1	OBTENCIÓN FUERZAS DE CONTACTO	36
6.1.1	PARÁMETROS A ANALIZAR	36
6.1.2	RESULTADOS	37
6.1.2.1	CATENARIA NOMINAL	37
6.1.2.2	CATENARIAS CON ERROR DE MONTAJE REAL	38
6.2	ANÁLISIS RESULTADOS	42
7.	<u>CONCLUSIONES</u>	44
7.1	TRABAJOS FUTUROS	44
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	45
	<u>ANEXOS</u>	47
	<u>PRESUPUESTO</u>	48
	<u>PLIEGO DE CONDICIONES</u>	49
	OBJETO	49
	CONOCIMIENTOS REQUERIDOS	49
	NORMATIVA	49
	LICENCIAS DE SOFTWARE	49

Índice de tablas

<i>Tabla 1-Altura del hilo de contacto</i>	7
<i>Tabla 2-Descentramiento de los hilos de contacto</i>	8
<i>Tabla 3-Altura del sistema de catenaria</i>	8
<i>Tabla 4- Variación de altura en los hilos de contacto</i>	8
<i>Tabla 5- Vano máximo nominal según la altura del sistema</i>	9
<i>Tabla 6-Longitud máxima del cantón nominal</i>	10
<i>Tabla 7- Especificaciones DSA380</i>	12
<i>Tabla 8- Materiales catenaria []</i>	25
<i>Tabla 9-Alturas de contacto en péndolas generadas con error de montaje real</i>	29
<i>Tabla 10- Comparación componentes geométricos de la catenaria del tramo 1 y la catenaria nominal</i>	31
<i>Tabla 11- Datos nominales de la altura del cable de contacto en los puntos de unión con las péndolas catenaria</i>	31
<i>Tabla 12- Datos nominales distancia entre péndolas</i>	31
<i>Tabla 13- Parámetros simulación interacción con catenaria nominal</i>	38
<i>Tabla 14-Parámetros simulación interacción con CAT 1</i>	39
<i>Tabla 15-Parámetros simulación interacción con CAT 2</i>	40
<i>Tabla 16-Parámetros simulación interacción con CAT 3</i>	41
<i>Tabla 17-Parámetros simulación interacción con CAT 4</i>	42

Índice de figuras

Figura 1-Solape entre cantones [15]	4
Figura 2- Principales elementos de la línea aérea de contacto [3]	4
Figura 3- Péndola en Y [7]	5
Figura 4- Conjunto de compensación [4]	6
Figura 5- Características geométricas de la catenaria [3]	9
Figura 6- Partes principales del pantógrafo [3]	11
Figura 7- Modelo de fluctuación del hilo de contacto	14
Figura 8- Ejemplo relación entre pérdida de contacto y el incremento de la desviación típica [11]	15
Figura 9- Representación de las irregularidades del cable de contacto por error de la longitud de las péndolas [9]	15
Figura 10- Representación del error de la distancia entre péndolas [9]	16
Figura 11- Interfaz Engauge Digitizer (importación)	17
Figura 12-Pasos a seguir para digitalización de datos	18
Figura 13- Barra de herramientas de digitalización	18
Figura 14- Puntos a digitalizar gráfica de datos	19
Figura 15- Interfaz Engauge Digitizer (exportación)	19
Figura 16- Errores de medida en el Tramo	20
Figura 17- Error de medida Tramo	20
Figura 18-Error de Montaje tramo 1	20
Figura 19- Puntos hilo de contacto solución error de medida	21
Figura 20- Desigualdad altura hilo de contacto en el tramo 4	21
Figura 21- Fallo de montaje tramo 1	22
Figura 22- PDF errores reales de montaje	27
Figura 23- PDF de errores con distribución normal	27
Figura 24 -Distribución normal de errores CDF	27
Figura 25-Herramienta dfittool Matlab distribución normal	28
Figura 26- Cálculo de la altura real de contacto en las zonas con pendiente	29
Figura 27- Vista frontal simulación catenaria real	32
Figura 28- Vista frontal simulación catenaria nominal	32
Figura 29- Errores de montaje en la catenaria real	33
Figura 30- Péndolas a compresión	34
Figura 31- Vista tridimensional de la catenaria nominal C-350	37
Figura 32- Fuerza de contacto (N) vs Tiempo interacción catenaria nominal (s)	38
Figura 33- Vista tridimensional de CAT 1	39
Figura 34- Fuerza de contacto (N) vs Tiempo interacción(s) CAT 1	39
Figura 35-Vista tridimensional de CAT 2	40
Figura 36-Fuerza de contacto (N) vs Tiempo interacción (s) CAT 2	40
Figura 37-Vista tridimensional de CAT 3	41
Figura 38- Fuerza de contacto (N) vs Tiempo interacción (s) CAT 3	41
Figura 39-Vista tridimensional de CAT 4	42
Figura 40- Fuerza de contacto (N) vs Tiempo interacción (s) CAT 4	42

1. INTRODUCCIÓN

1.1 HISTORIA DEL FERROCARRIL EN ESPAÑA

La historia del ferrocarril español empieza en 1837 en Cuba, antigua colonia, y no llega a la península hasta el 1848 en el trayecto de 29 km entre Barcelona y Mataró con una consecuente expansión de líneas ferroviarias que salen de Madrid (sistema radial como ocurre en las carreteras) hacia otras ciudades del país. Pero el momento más importante es el 1992, año en el que se inaugura el AVE (Alta Velocidad Española) con su primer trayecto entre Madrid y Sevilla, rebajando el tiempo de viaje entre las dos ciudades de seis a poco más de dos horas y media.

Este nuevo proyecto es el primero con ancho de vía estándar en España, lo que posibilitaba la conexión, que hasta ahora no había sido posible, con los ferrocarriles del resto de Europa, llegó tras años de planificación y cinco años de construcción. Y llega la alta velocidad con posibilidad de alcanzar velocidades de hasta 300 km/h, pero finalmente la máxima velocidad se alcanzó en 1993, 356,8 km/h.

Actualmente España con 3410 km de vías ferroviarias es el país de Europa con más kilómetros de red de alta velocidad y el segundo del mundo tras China. Siendo así una de las principales referencias para países con redes ferroviarias en desarrollo.

1.1.1 TRAYECTO MADRID-VALENCIA

Dentro de esos 3410 km de red se encuentra el tramo Madrid-Valencia con 390,25 km de longitud. Este tramo fue inaugurado en diciembre del 2010, con el objetivo de que se alcanzaran velocidades de hasta 300 km/h.

Este objetivo se cumple en algunas secciones del trayecto siendo así la velocidad media de 238,9 km/h (tren) y 287,6 km/h (línea), es decir, hay un rendimiento del 83,1%, esto se debe principalmente a los posibles errores de montaje de la estructura.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Grado es el modelado de catenarias con errores de montaje en base a medidas experimentales de la altura del hilo de contacto de las catenarias del tramo Madrid-Valencia y el análisis de la influencia de los mismos sobre las fuerzas de contacto de la interacción dinámica

a través del software PaCDIn, para llegar a este objetivo principal, utilizando conocimientos mecánicos, eléctricos y métodos informáticos, se deben cumplir objetivos intermedios.

Describir catenarias y pantógrafos con todos sus componentes (hilo de contacto, estructuras de soporte, cable sustentador...) y el problema, objeto de estudio, el error de montaje.

Una vez conocidos los elementos del sistema, recopilar los datos necesarios para el estudio, es decir, obtener la altura del hilo de contacto y del escalonamiento a partir de datos reales utilizando aplicaciones informáticas.

Adquirir conocimientos sobre el programa de Matlab PaCDIn (PAntograph-Catenary Dynamic INteraction) y aplicarlos para la simulación de catenarias.

Analizar los resultados para extraer de ellos el error con su distribución correspondiente y consecuentemente poder generar catenarias con errores reales de montaje.

Utilizar PaCDIn realizar la simulación de la circulación del pantógrafo por las distintas catenarias generadas y estudiar la interacción catenaria-pantógrafo.

Comparar los parámetros principales de las interacciones del pantógrafo con las catenarias generadas con error y con la catenaria nominal.

2. DEFINICIÓN DE LOS COMPONENTES

2.1 INTRODUCCIÓN A LA CATENARIA

El nombre de catenaria proviene de la forma geométrica de curva ideal que representa la curva generada por un cable que está suspendido por sus dos extremos y expuesta a los efectos de la gravedad, pero este término se ha adaptado al ámbito ferroviario y se usa comúnmente para referirse a la línea aérea de contacto (LAC).

El sistema de la línea aérea de contacto es el que se encarga de proveer energía eléctrica a los ferrocarriles para su propulsión, ya sean de corriente alterna o continua. Para llevar a cabo este proceso de suministro de energía, además de las líneas de contacto son necesarios aparatos de toma de corriente.

Los aparatos de toma de corriente, pantógrafos, se encuentran en la parte superior del ferrocarril y están formados por mecanismos articulados que permiten el desplazamiento vertical de la cabeza del pantógrafo, cabeza que entra en contacto con la catenaria, permitiendo así la captación de corriente.

2.1.1 ESTRUCTURA DE LA CATENARIA

La catenaria, como antes se ha dicho, proporciona la energía eléctrica necesaria para el movimiento del ferrocarril, pero no es posible mantener un único cable continuo en todo el recorrido, por ello, la estructura principal de las catenarias ferroviarias se divide en cantones, en el caso del recorrido Madrid-Valencia estos elementos tienen una longitud aproximada de un kilómetro.

Los cantones son tramos tensionados en ambos extremos por un sistema de poleas y contrapesos, cada cantón se solapa con el siguiente en las zonas llamadas seccionamientos. Este sistema de tensionado, llamado sistema de compensación mecánica garantiza la tensión constante del hilo de contacto y el cable sustentador, tensión que es más fácil de mantener en distancias cortas, una de las causas por la que se hace la división en cantones, además de porque es más conveniente a la hora de realizar operaciones de mantenimiento.

Las zonas de seccionamiento, como se puede observar en la Figura 1, en las que la altura del cable de contacto del primer cantón va aumentando gradualmente mientras que la altura del hilo de contacto del cantón contiguo va disminuyendo también de forma gradual, sirve como zona de transición entre cantones para que así la interacción hilo de contacto-pantógrafo no tenga grandes perturbaciones.

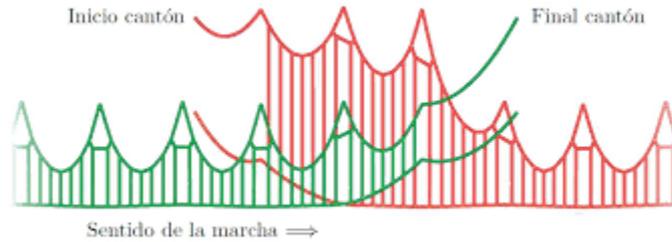


Figura 1-Solape entre cantones [15]

Breve descripción de la instalación:

La catenaria o LAC, conforme se describe en [3], es el tendido aéreo que se monta sobre las vías de ferrocarril de forma aislada, permitiendo al material rodante la captación de energía. Por extensión, la catenaria también representa el conjunto de elementos que están interrelacionados con el hilo de contacto (sustentador, péndolas y sus alimentaciones), elementos que permiten situar los hilos conductores en una posición paralela a las vías ferroviarias.

Para que haya una buena captación de corriente el cable de contacto debe estar posicionado horizontalmente al plano de rodadura. Con tal de evitar que el hilo conductor se arquee por su propio peso, entra en acción el cable superior denominado sustentador, este cable también es conductor, pero no está en contacto con el pantógrafo por lo que no tiene que estar paralelo a las vías. El cable sustentador mantiene la altura y posición del cable de contacto por medio de otros cables verticales, denominados péndolas. Por lo tanto, la corriente circula por estos tres elementos; hilo de contacto, cable sustentador y péndolas.

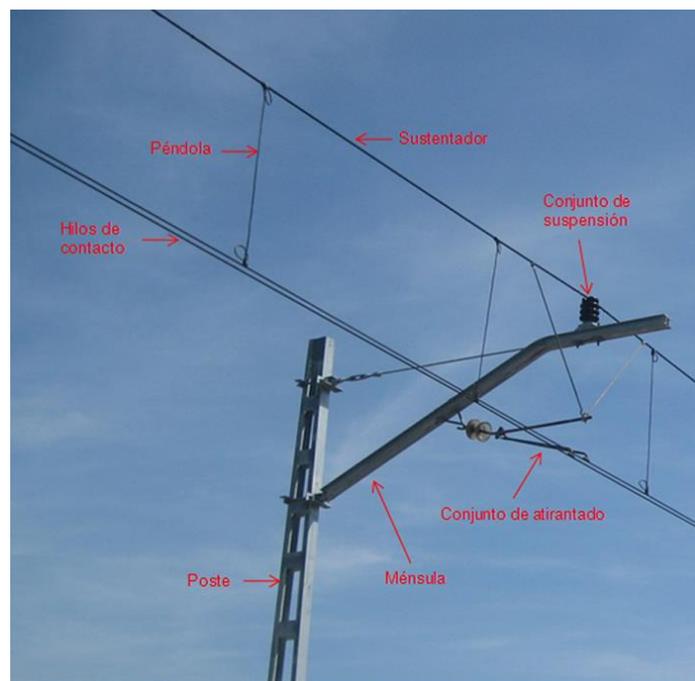


Figura 2- Principales elementos de la línea aérea de contacto [3]

2.1.2 ELEMENTOS CATENARIA

2.1.2.1 CABLEADO

Hilo de contacto

El cable de contacto puede ser considerado el elemento más importante de la LAC pues es el único elemento de la instalación en contacto directo con el pantógrafo y, por lo tanto, el que se encarga de toda la transmisión de la corriente eléctrica. Dado su gran papel es importante, como hemos dicho antes, que se mantenga paralelo a las vías, sin que haya zonas de contacto cero entre hilo de contacto y pantógrafo, y además que esté posicionado a una altura constante en todo el trayecto.

Cable sustentador

Este elemento se encuentra suspendido en la parte superior del sistema de la catenaria y se encarga de aguantar tanto su peso como el peso del hilo de contacto, para que este último se mantenga a la altura de diseño con la ayuda de unos cables verticales llamados péndolas. El cable sustentador sí que adquiriría la forma característica de la catenaria, que da nombre al conjunto, porque está expuesto a las fuerzas gravitacionales con una resistencia nula a la flexión sino fuera por las péndolas.

Péndolas

Cables encargados de soportar los esfuerzos del cable de contacto y transmitirlo al hilo sustentador, la unión de este conjunto se da con elementos auxiliares denominados grifas. Al tratarse de cables tienen comportamiento exclusivo a tracción. A pesar de lo que se ha dicho antes sobre la circulación de corriente a través de las péndolas, tendrán función exclusiva de transmisión de esfuerzos.

Además de la configuración anteriormente explicada, las péndolas adquieren otras configuraciones. Péndolas en Y o con falso sustentador se incorporan al principio y al final de los vanos para aportar rigidez en las conas cercanas a los postes y se consigue cambiando las péndolas más cercanas a la ménsula por cables diagonales. También existe la catenaria compuesta que surge de unir la catenaria simple y la catenaria en Y. Ambas configuraciones mejoran las características dinámicas y estáticas, pero a coste de un montaje y mantenimiento más complicados.

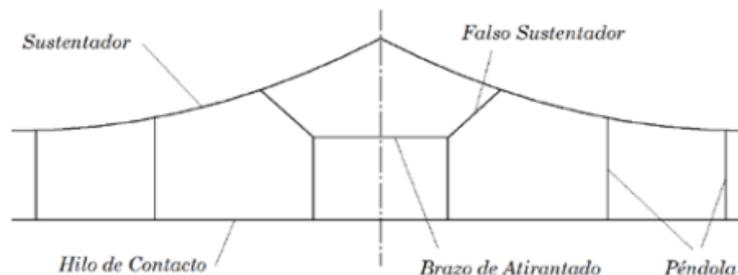


Figura 3- Péndola en Y [7]

2.1.2.2 ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Postes

Elementos de soporte verticales aislados eléctricamente hechos de metal o de hormigón sobre los que se realiza el montaje de la LAC y están fijados al terreno y a una distancia de unos tres metros de la vía, distancia conocida como gálibo de la instalación.

Ménsula

Soporte metálico en voladizo unido al poste que se encarga de sostener la catenaria en su posición correcta sobre el tren. El elemento principal de las ménsulas es el brazo de registro

Los postes y las ménsulas componen la estructura de soporte de la catenaria.

Sistema de tensionado

El sistema de tensionado mecánico surge del problema de dilataciones al que están sometidos los cables conductores. Este problema es la dilatación térmica producida por las variaciones de temperatura y que provoca variaciones en la longitud de los cables. Al variar la longitud de los conductores varía también la geometría de la catenaria, aumentando la flecha de los cables.

Este efecto es indeseable porque reduce la calidad de interacción catenaria-pantógrafo por lo que se contrarresta con un sistema de regulación automática de la tensión mecánica.

El sistema está formado por un conjunto de poleas y contrapesos que tiran de los extremos de los cables manteniendo constantes tanto la tensión de estos como la geometría de la catenaria.



Figura 4- Conjunto de compensación [4]

2.1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS CATENARIAS

Las características de las catenarias se clasifican en tres ámbitos distintos: geométrico, eléctrico y mecánico. Las características geométricas que destacan son: altura del hilo de contacto, descentramiento, distancia entre péndolas, pendiente y longitud de los vanos. Las características mecánicas son: vano, cantón, tensión de los cables, etc. Y, por último, las características eléctricas están determinadas por la potencia que demande el tren en las situaciones más desfavorables.

En el presente TFG las características geométricas son las más importantes a considerar, ya que, el objetivo será el estudio de los errores de montaje en la altura de los hilos de contacto.

Todas las características se describen según la información técnica de ADIF [5].

2.1.3.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Altura hilo de contacto

Distancia vertical entre los raíles del ferrocarril y la cara inferior del hilo de contacto. Esta altura deberá mantenerse lo más constante posible para mantener una buena captación a través del pantógrafo.

La altura mínima dependerá de:

- El gálibo cinemático aplicable en cada caso.
- Velocidad de explotación y longitud del vano, que afectan a la oscilación dinámica de la catenaria.
- Probabilidad de formación de manguitos de hielo (según la altura sobre el nivel del mar).
- Si es una catenaria a cielo abierto o en un túnel, porque el vano máximo queda limitado.

Altura mínima de diseño	Variable
Altura Nominal	5300 mm
Atura máxima de diseño	6000 mm

Tabla 1-Altura del hilo de contacto

Descentramiento

Variación de la posición del hilo de contacto respecto al eje central de los carriles, suele tomar valores entre 20 y 25 cm. Se recurre al descentramiento evitar el desgaste prematuro del patín del pantógrafo, porque siguiendo la definición del “hilo de contacto” habría fricción siempre en el mismo punto, con el descentramiento se fuerza un trazado zigzag, con la ayuda de postes que tiran de

los vértices, para que de esta forma haya un desgaste uniforme del pantógrafo, alargando su tiempo de vida.

Recta	± 20 cm
Curva	± 20 cm (hacia el exterior de la curva) Aplicación a curvas de radio: $R \leq 3050$ m para CA-160 Tipo A y C $R \geq 2500$ m para CA-160 Tipo B

Tabla 2-Descentramiento de los hilos de contacto

Altura del sistema

Distancia vertical entre el sustentador y el hilo de contacto en la ménsula o suspensión.

Altura Nominal (trayectos y estaciones)	1400 mm
Altura en zonas de gálibo reducido (túneles, pasos superiores, etc)	853 mm 462 mm 263 mm
Altura máxima en seccionamientos	1400 mm

Tabla 3-Altura del sistema de catenaria

Pendiente

Diferencia de la altura del hilo de contacto entre dos puntos consecutivos, con tal de garantizar la correcta captación de energía eléctrica por el pantógrafo existen valores máximos.

Pendiente máxima de los hilos de contacto	$\pm 2\%$
Variación de pendiente máxima	$\pm 1\%$

Tabla 4- Variación de altura en los hilos de contacto

En la Figura 5 se pueden apreciar todos los elementos geométricos antes descritos en perspectiva al montaje real.

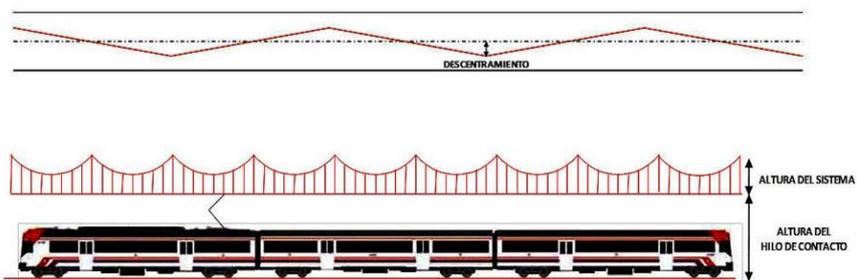
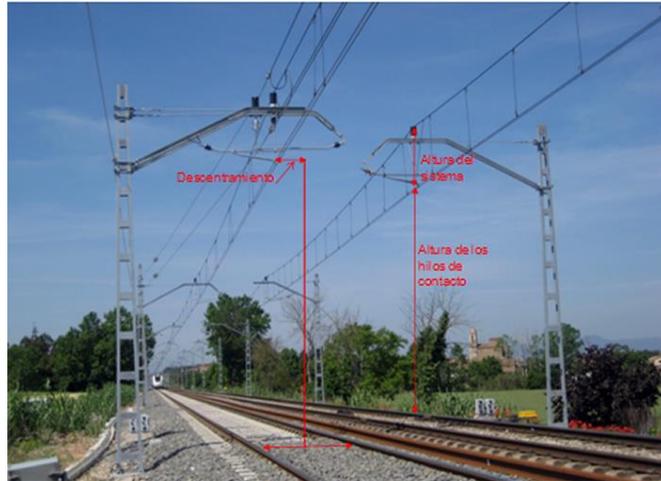


Figura 5- Características geométricas de la catenaria [3]

2.1.3.2 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Tensión mecánica de los cables conductores

Tensión a la que están sometidos los cables conductores para asegurar que cumplen su función cuando varían las condiciones exteriores a las que están sometidos.

Vano

Distancia entre dos apoyos contiguos de la LAC. Este valor depende de la altura del sistema de la catenaria, el tense de los conductores, la velocidad del viento, etc.

La altura condiciona la longitud mínima de la péndola en el centro del vano.

Altura sistema de catenaria	Vano
1400 mm	60 m
853 mm	45 m
462 mm	30 m
263 mm	20 m

Tabla 5- Vano máximo nominal según la altura del sistema

Cantón

Tramo independiente en el que se divide la catenaria para mantener una tensión mecánica constante ante las variaciones térmicas.

Recta	1200 m
Tramo con curvas	20 vanos (800-900 m aprox.)

Tabla 6-Longitud máxima del cantón nominal

2.1.3.3 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Resistencia o impedancia del circuito

Resistencia total de la catenaria y la resistencia del circuito de retorno, compuesto este generalmente por carriles, y, en ocasiones, conductores de retorno.

Corriente máxima

Intensidad máxima que puede circular por las catenarias y va limitada por la temperatura máxima que admitan los conductores y las condiciones ambientales.

Tensiones normalizadas

Tensiones determinadas por la norma europea que se pueden usar para la tracción eléctrica, tanto para corriente alterna como continua, así como las tensiones máximas y mínimas admisibles para cada nivel de tensión.

2.2 INTRODUCCIÓN AL PANTÓGRAFO

Los aparatos de toma de corriente son los elementos necesarios para que la LAC cumpla su función de transmitir energía eléctrica desde subestaciones hasta unidades motrices eléctricas. Para las líneas aéreas de tensión este aparato de toma de corriente es el pantógrafo, encargado de captar la energía eléctrica del hilo o hilos conductores en las unidades motrices.

El pantógrafo se encuentra posicionado en la parte superior del ferrocarril y está formado por un dispositivo articulado que permite el desplazamiento vertical de la cabeza del pantógrafo.

Partes fundamentales del pantógrafo:

Bastidor base

Se trata de la base fija del pantógrafo que va unido sobre aisladores en el techo del vehículo.

Bastidor

Estructura articulada que funciona a través de un sistema elástico o neumático (sistema operativo) que permite el movimiento vertical del cabezal del colector.

Es una parte muy importante ya que mantiene los frotadores presionados contra el hilo de contacto para evitar pérdidas de contacto y cortes de corriente. Evitar las pérdidas de contacto es muy importante por lo peligrosas que estas pueden llegar a ser porque aparte de provocar cortes de corriente en los motores del tren, pueden provocar arcos eléctricos entre el hilo de contacto y el pantógrafo que generan aumentos de temperaturas, situación que lleva a un mayor desgaste de ambos elementos.

Cabezal del colector

Parte superior del pantógrafo que se encuentra sobre el bastidor y que incluye las tiras de contacto (frotadores), los cuernos (extremos del cabezal, colector que asegura un paso suave del hilo de contacto) y puede incluir una suspensión.

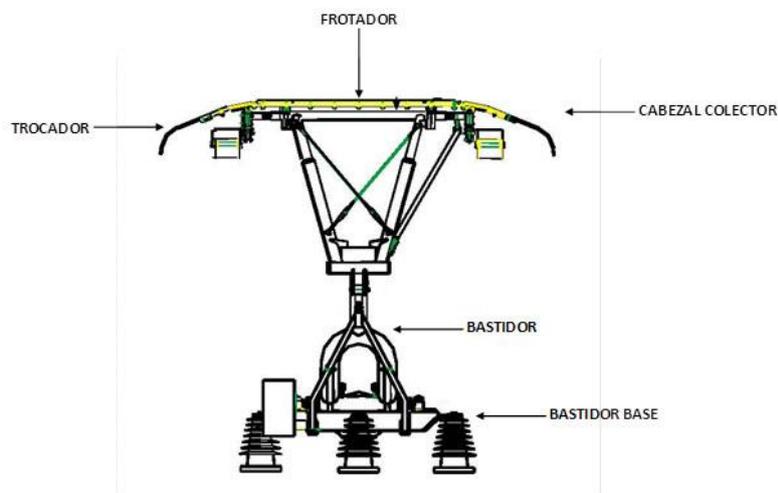


Figura 6- Partes principales del pantógrafo [3]

DSA380

El modelo de pantógrafo presente en el tramo Madrid-Valencia y que se utilizará en las futuras simulaciones, es el DSA380, definido en [8].

Este modelo consiste en un brazo único con una pequeña masa del cabezal del colector y excelente aerodinámica utilizada para alta velocidad. Este pantógrafo se puede modificar para añadirle un sistema de descenso automático del bastidor con un tope mecánico de altura de elevación.

Velocidad (km/h)	380
Sistema de operación	AC/DC
Corriente	(A determinar según proyecto)
Fuerza de contacto estático (N)	70-120
Masa (kg)	109

Tabla 7- Especificaciones DSA380 [8]

3. ERRORES DE MONTAJE

El funcionamiento de los trenes de alta velocidad, como se ha explicado en el apartado anterior, consiste en el suministro de energía desde la línea aérea de contacto al pantógrafo. La altura del cable de contacto de la LAC se mantiene horizontal y constante a lo largo de la catenaria excepto por el pandeo entre las péndolas. Sin embargo, en la realidad existen un desnivel en toda la catenaria debido a la imprecisión en el montaje en los puntos de apoyo o irregularidades alrededor de los puntos de suspensión. La calidad de interacción de estos dos elementos, como consecuencia de su interacción dinámica, determina la calidad y estabilidad del suministro según la variación de la fuerza de contacto. La fuerza de interacción no debe tener picos altos para evitar el desgaste de los frotadores del pantógrafo y tampoco debe tener valores cercanos al cero pues eso significaría la pérdida de contacto provocando la formación de arcos eléctricos.

La fuerza de contacto fluctúa por:

1. La interacción dinámica entre el pantógrafo y LAC, por la variación periódica entre la rigidez que presentan los brazos de registro y el comportamiento no lineal de las péndolas (son elementos sin rigidez a compresión) con el paso el pantógrafo.
2. Movimiento periódico del pantógrafo entre los puntos de apoyo, y en los tramos de suspensión
3. El desnivel del cable de contacto por el desgaste y fallos en la instalación. A pesar de las constantes tareas de mantenimiento de la LAC el error de instalación sigue presente y afecta a las fluctuaciones de la fuerza de contacto de la interacción.

Las irregularidades en la altura del cable de contacto a partir del análisis de la catenaria con el error basado en los datos de medición reales del tramo Madrid-Valencia es el factor que se pretende estudiar a lo largo del presente TFG.

3.1 FLUCTUACIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO POR IRREGULARIDADES EN EL CABLE DE CONTACTO

Según el estudio realizado en [11], donde se considera el hilo de contacto como un modelo de cuerda infinita (tensión T , densidad ρ), Figura 7, la fluctuación del cable de contacto va determinado por la fórmula:

$$\rho \cdot \frac{\partial y^2}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = F\delta(x - vt) \quad (1)$$

x, y, t : Desplazamiento de posición, desplazamiento vertical y tiempo

F : Fluctuación de la fuerza de contacto.

δ : Función de Dirac

v : Velocidad del pantógrafo bajo el cable de contacto.

La ecuación (1) se traslada a un sistema de referencia móvil con origen en el pantógrafo, la fuerza de contacto se definirá como:

$$F = -i\omega \frac{Z_t Z_p}{Z_t + Z_p} A e^{i\omega t}, \quad \omega = \frac{2\pi v}{\lambda} \quad (2)$$

Z_p, Z_t : Impedancias del cable de pantógrafo y cable de contacto.

λ : Longitud de onda.

A: Amplitud de onda.

ω : Frecuencia de onda.

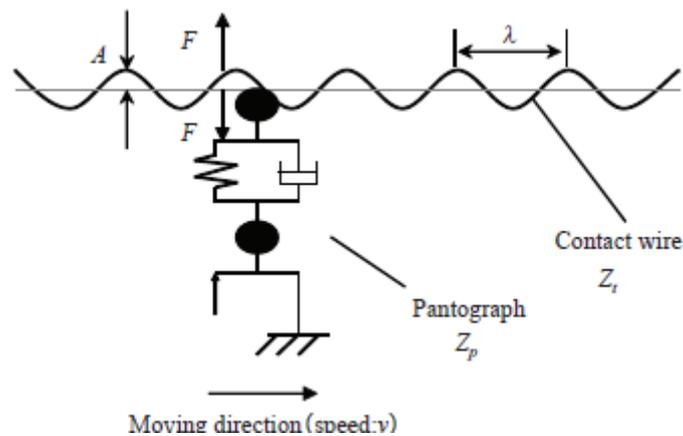


Figura 7- Modelo de fluctuación del hilo de contacto

A pesar de que en (2) la fuerza de contacto esté relacionada con características del pantógrafo y línea de contacto, este factor depende esencialmente de la amplitud de onda, porque esta define las irregularidades del cable.

Las irregularidades en la catenaria tienen una relación directa con la pérdida de contacto de los pantógrafos a lo largo de la interacción de este con la catenaria. En la Figura 8 se puede ver la relación entre la desviación estándar de la fuerza de contacto y la pérdida de contacto en una catenaria ejemplo. En el eje de ordenadas se representa la pérdida de contacto con respecto al tiempo en tanto por ciento.

$$\text{Tasa pérdida de contacto (\%)} = \frac{\Sigma(F_{ci} - F_{ci+1}) (N)}{t (s)} \cdot 100 \quad (3)$$

Y en el eje de abscisas la desviación típica, hace referencia a las irregularidades del montaje de la catenaria, pues cuántas más irregularidades más dispares serán las fuerzas de contacto, y por lo consiguiente, mayor la desviación. En la gráfica se ve claramente la influencia de los desniveles en la catenaria en las

fluctuaciones de la fuerza de contacto, la gráfica corresponde a un ejemplo de la catenaria estudiada en [11].

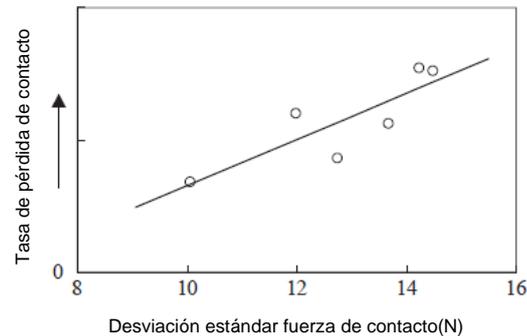


Figura 8- Ejemplo relación entre pérdida de contacto y el incremento de la desviación típica [11]

3.2 DESCRIPCIÓN DEL ERROR DE MONTAJE DE LAS CATENARIAS

Conforme dice el estudio realizado en [9], durante la instalación de las catenarias el factor humano puede afectar provocando que la catenaria montada difiera a la catenaria del diseño original. A pesar de los intentos para conseguir la altura de contacto deseada surgen errores, y de entre todos los errores se consideran de interés la desviación de los siguientes valores nominales:

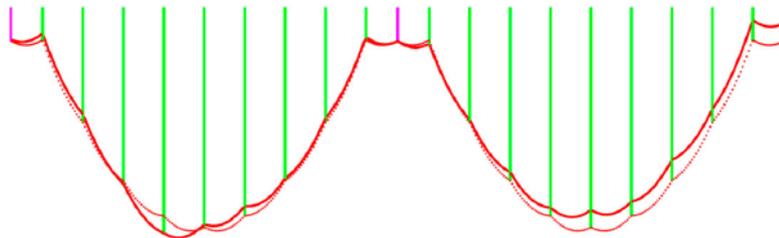


Figura 9- Representación de las irregularidades del cable de contacto por error de la longitud de las péndolas [9]

- **Desviación de la longitud de las péndolas:** Durante la fabricación de las péndolas la exactitud de producción es de 1 cm. Asumiendo que el error de producción sigue una distribución estándar y siguiendo la regla de 3σ , el 99.87% de las péndolas tendrán un error de ± 2 cm.
- **Desviación de la distancia entre péndolas:** A lo largo de kilómetros de catenaria montada por operadores humanos es inevitable que las péndolas se pongan en la posición ideal, sino que algunas de estas, sino todas dependiendo de la calidad del montaje, estarán situadas desplazadas ligeramente del punto de diseño. Asumiendo también que sigue una desviación estándar y siguiendo la misma regla 3σ , el 99.87% de las péndolas se encontrará desplazada a una distancia de ± 60 mm de la posición de diseño.

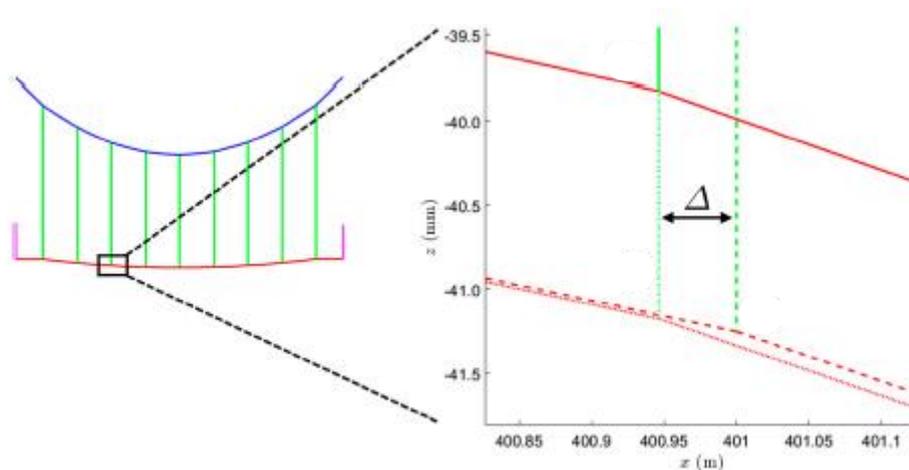


Figura 10- Representación del error de la distancia entre péndolas [9]

- **Desviación de la altura del cable sustentador:** Este sería un error como el anterior, inevitable en tramos tan largos en los que el factor humano tiene gran importancia. Analizando los estudios sobre el error y haciendo las mismas consideraciones que en los apartados anteriores, se obtiene que el 99.87% de los hilos sustentadores presentan irregularidades mayores a 6 cm.

Con el fin de cuantificar estas desviaciones se asumen que son independientes entre ellas y siguen una distribución probabilística normal, sin pérdidas, como valores independientes cada una de ellas tiene un valor de desviación que le representará. Esto se asume por la falta de datos experimentales.

Algunos otros errores causantes de la irregularidad del hilo de contacto son:

- Desviación de la altura entre el cable de contacto y el cable sustentador por causa de expansiones térmicas que no se han recuperado.
- Tensionado incorrecto de los cables, por malfuncionamiento del sistema de tensionado. No permite la recuperación del cable tras la interacción.

4. OBTENCIÓN ALTURA HILO DE CONTACTO A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES

Los datos experimentales de estudio para el presente TFG, como se ha dicho anteriormente, son algunas de las características geométricas de las catenarias; y estas son el descentramiento y, el objeto de estudio principal, la altura del hilo de contacto. Los datos deseados han sido proporcionados han sido proporcionados en gráficas en formato .jpg. Al no tener una lista con los puntos gráficos y tener que extraerlos de estas imágenes se debe buscar un programa que permita la extracción de datos a partir de una imagen.

4.1 INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE UTILIZADO

La aplicación software elegida para la extracción de datos ha sido Engauge Digitizer. Esta herramienta acepta archivos de imagen que contienen gráficos y recupera los puntos de esos gráficos. Los puntos resultantes pueden y serán utilizados como entrada en otras aplicaciones de software. Conceptualmente, Engauge Digitizer, es lo opuesto a una herramienta gráfica que convierte los puntos en gráficos.

La interfaz del programa es intuitiva y el proceso consta de los siguientes pasos: se importa una imagen y luego se digitaliza dentro de Engauge Digitizer colocando los puntos a lo largo de ejes y curvas. Los datos pueden ser transferidos a otras aplicaciones exportándolos a un archivo de texto.

4.1.1 OBTENCIÓN DATOS GRÁFICOS

Con tal de obtener los datos necesarios se ha siguen los pasos anteriormente dichos, aunque de manera breve. En este apartado se extenderá más el procedimiento seguido.

I. Importar imagen

La toma de datos ha sido hecha en cuatro tramos aleatorios de la catenaria que une Madrid-Valencia, por lo que se empieza importando una de las imágenes que han sido proporcionadas.



Figura 11- Interfaz Engauge Digitizer (importación)

Tras esto el propio programa muestra los pasos a seguir para la digitalización de los datos.

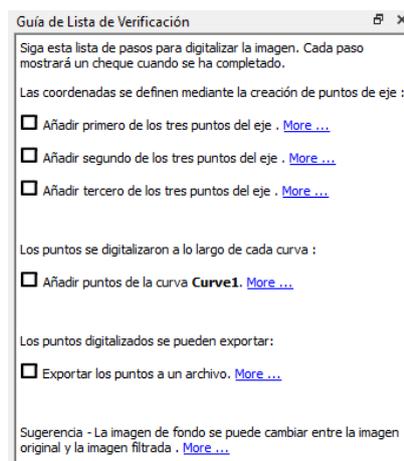


Figura 12-Pasos a seguir para digitalización de datos

II. Definir Ejes

El siguiente paso es la definición de los ejes, paso muy necesario para que el programa tome bien las medidas, por ello es muy importante que la imagen tenga unos ejes claramente marcados a los cuales acoplar los puntos que marcarán los límites de la gráfica. Este paso se hace utilizando el elemento “a” de la Figura 13. Los ejes definidos para la toma de datos de la altura del hilo de contacto serán diferentes al que se necesitará para el descentramiento, ya que tienen rangos distintos en el eje de referencia Y.

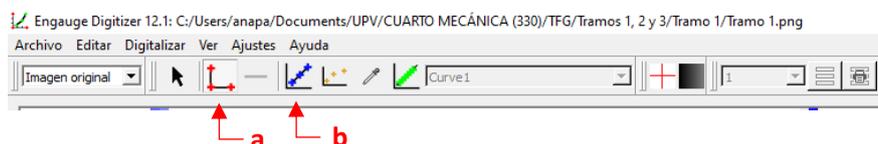


Figura 13- Barra de herramientas de digitalización

III. Añadir puntos a digitalizar

Estos son los datos que se pretenden obtener, este paso se debe hacer utilizando la función “b” marcada en la anterior Figura 13. Se han formado dos curvas diferentes en función de la variable geométrica del momento.

- Descentramiento: Los puntos a marcar son aquellos en los que el hilo de contacto entra en contacto con los postes según la forma de zigzag que adopta.
- Altura hilo de contacto: Tanto los puntos en los que el hilo de contacto esté en contacto con los postes como aquellos que estén en contacto con las péndolas.

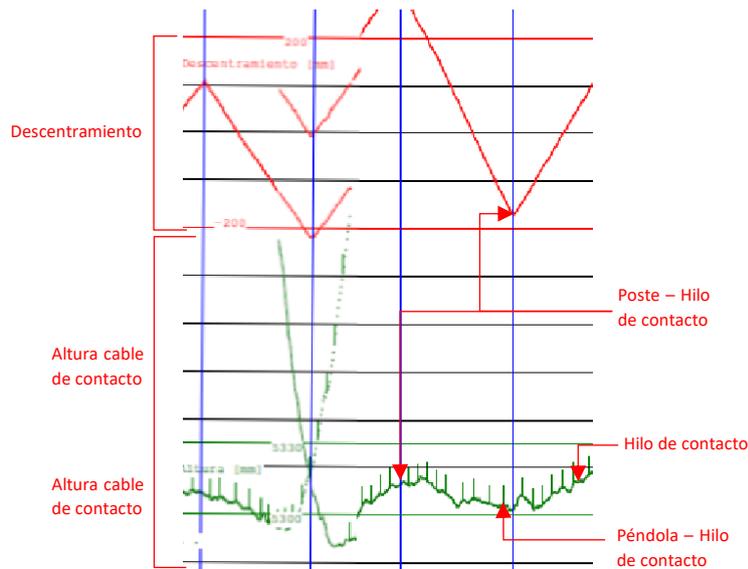


Figura 14- Puntos a digitalizar gráfica de datos

IV. Exportar datos

Una vez se han completado los pasos anteriores el último es exportar los puntos marcados a un archivo .csv en el que aparecen las coordenadas en dos ejes de cada punto.

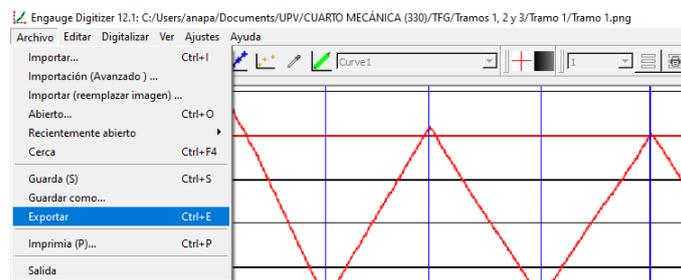


Figura 15- Interfaz Engauge Digitizer (exportación)

Una vez exportados los datos como se ha dicho estarán en formato “*comma separated values*” significando esto “valores separados por comas” pero el futuro software que se ha utilizado para la simulación de catenarias no admite la coma como formato de separación deberemos cambiar esto variando las opciones del lector de datos que se utilice (p. ej.: LibreOffice o Excel).

4.2 ERRORES DE MEDIDA

Se pueden observar a lo largo de la gráfica de datos proporcionada varios errores de montaje o bien errores de medida en los tramos, de los cuales algunos caben ser destacados:

En la Figura 16 se ven dos tipos de errores que se repiten a lo largo de todos los tramos, estos caben imaginar que son errores de medida.

1. El primer error se observa en la zona de solape de los cantones, este error viene dado por la falta de péndolas en el tramo descendente del hilo de contacto, péndolas que cómo se puede observar en el tramo ascendente del cantón anterior sí que han sido captadas.
2. El siguiente error se ve justo a continuación del anterior y también se debe a la falta de péndolas en el tercer vano de la catenaria. Se asume un error en la medida porque se puede observar claramente como el hilo de contacto se mantiene sostenido por lo que sí que existen péndolas que no han sido señaladas.

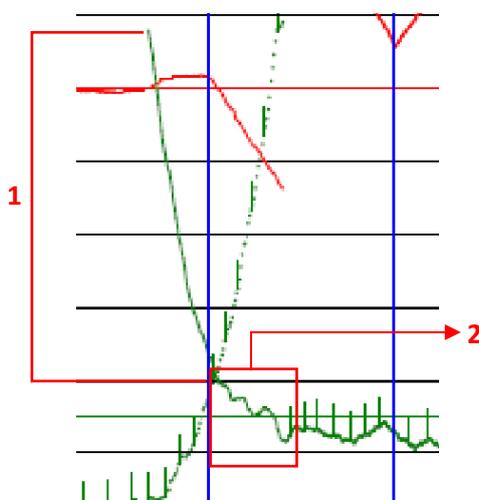


Figura 16- Errores de medida en el Tramo

A continuación, se expone un error del Tramo 4 en el que, conforme se puede observar en la Figura 17, se aprecia un corte en el hilo de contacto que después del corte sigue sin ningún problema, por el hecho de que la rotura del hilo es inconcebible por la gran cantidad de tensión que desprendería produciendo un fallo en toda la catenaria, se asume que es un fallo de medida. Un error de esta clase también se puede observar en el tramo 1, Figura 18.

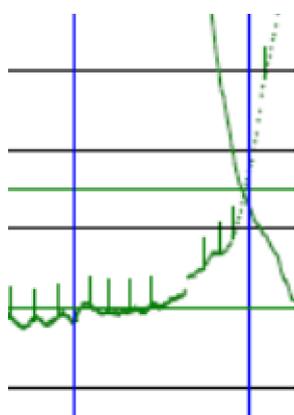


Figura 17- Error de medida Tramo

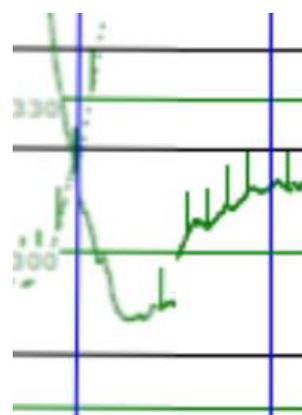


Figura 18-Error de Montaje tramo 1

Para solventar los errores de medida y con tal de obtener el mayor número de datos para tener una mejor visión de la catenaria real, se pasa por alto estos fallos, marcando péndolas no aparecen en los gráficos.

En el caso del fallo 1 se marcan péndolas a una altura similar a la zona ascendente del cantón anterior y en el fallo 2 se señala péndolas se observe que el hilo de contacto está sostenido.

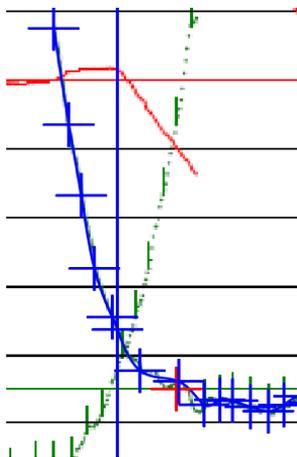


Figura 19- Puntos hilo de contacto solución error de medida

4.3 ERRORES DE MONTAJE GRÁFICOS

En este apartado se describirán los errores de montaje que se ha podido observar tanto a simple vista de las gráficas de datos proporcionada como analizando los datos obtenidos.

Analizando las gráficas se aprecia, primeramente, la desigualdad de la altura del cable de contacto y se puede comprobar que varía, según los datos obtenidos, entre 5.271 m y 5.354 m (sin contar las péndolas de los dos primeros y dos últimos vanos) cuando el valor nominal de altura del hilo de contacto es de 5.3 m. Se pueden ver estas diferencias de altura en la Figura 20 que corresponde al tramo 4 y donde la altura nominal está marcada por la línea de trazo discontinuo.

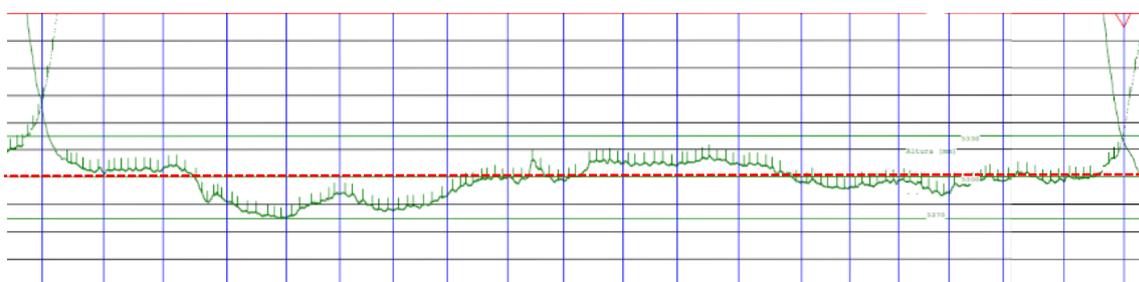


Figura 20- Desigualdad altura hilo de contacto en el tramo 4

Otros errores que se pueden ver en los gráficos proporcionados son como los de la Figura 21, en estos no se puede saber con certeza si ha sido un fallo de medida

o bien que faltan péndolas intermedias que durante el montaje no se han puesto, o bien, se han caído o dañado debido a factores externos

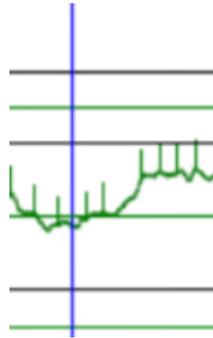


Figura 21- Fallo de montaje tramo 1

Por otro lado, como se explicará en el apartado posterior, en la toma de datos se observan fallos que pueden ser generados tanto en la toma de datos como en el montaje inicial. Estos son: número de postes, descentramiento, distancia entre péndolas (que lleva a la distancia entre vanos), altura del cable de contacto (en los brazos de registro y a lo largo del vano), etc.

En el siguiente apartado se expondrán los valores nominales de estos datos y se compararán a los valores reales.

5. GENERACIÓN DE CATENARIAS

En este capítulo se explicará el procedimiento a seguir para la simulación de la catenaria real, la nominal y las catenarias generadas con el error de montaje real, que en el siguiente capítulo se usarán para la simulación de la interacción dinámica. El problema a resolver en este apartado es el problema de configuración inicial, está explicado y definido su método de resolución en [6],[9] y [10].

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

El software utilizado para la simulación es el PaCDIn, este funciona en el entorno de Matlab y ha sido desarrollado por Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales de la UPV y explicado en [12]. El programa tiene el código encriptado, pero permite la configuración de datos tanto de carácter geométrico y mecánico para la simulación dinámica y para resolver el problema de configuración inicial.

En primer lugar, en la carpeta principal el comando que llevará a cabo la simulación de la catenaria será GENCAT, pero para que se pueda simular primero se deberá definir el archivo de inicialización .ini en el que se definirá el directorio de la catenaria, el archivo de texto en el que esta esté definida y el archivo de configuración.

El archivo principal es el archivo .txt en el que introducen los datos geométricos de la catenaria, estos datos son los resultados del proceso del capítulo anterior. Una vez definido este archivo, se generará un archivo .ini en el que están definidas las características del pantógrafo y la información sobre los elementos finitos.

Los elementos que definen la catenaria en el archivo .txt son:

Definición del **cantón**:

- Número de cantones: se hacen únicamente simulaciones individuales por lo que este valor siempre será 1.
- Tipo de catenaria: hay dos opciones tipo Y o simple, en la catenaria de alta velocidad Madrid-Valencia las catenarias son de tipo Y.
- Extremos del cantón: al igual que en el apartado anterior hay dos opciones; con y sin solape, en esta catenaria todos los cantones están solapados.
- Punto kilométrico de inicio del cantón: siempre 0, este apartado surge para los casos en los que hay más de un cantón, pues aquí se define el punto de inicio del segundo y así definir la longitud del primero.

Definición de los **postes**:

- Número de postes que conforman la catenaria.

- Distancia del poste, también conocido como gálibo: tendrá un valor uniforme de 2.5 m en todos los postes, este valor solo influye en el comando POSTPROCESO por lo que no influirá en este trabajo.
- Altura de soportes del sustentador: estos valores tampoco influyen en el estudio a realizar en el TFG, por lo que se mantienen los valores iniciales designados.
- Distancia entre postes.
- Tipo de ménsulas: estas son brazos de registro.
- Brazos de registro: los valores nominales de este apartado son una longitud de 1.15 m y una altura de 0.15 m.
- Descentramiento: el primer y último poste tendrán un descentramiento nominal de ± 2.5 m.
- Altura cable de contacto en los brazos de registro: al igual que en el apartado anterior hay un valor nominal para el primer y último poste que es de 6.2 m.
- Indicador de Cable en Y en los postes: en los dos primeros y dos últimos postes no tienen cable en Y mientras que todos los intermedios sí.
- Suspensión en los soportes del sustentador: valor 0 para todos los postes, esto es porque se trata de puntos fijos en los que no hay mucha variación de altura.
- Rigidez de la suspensión en los soportes del sustentador: no influye ya que como se ha indicado arriba, no hay suspensión en el sustentador.
- Amortiguamiento de la suspensión en los soportes del amortiguador: igual que antes, no importan los valores expuestos en este apartado porque no hay suspensión.

Definición de las **poleas**: Las poleas se consideran puntos fijos que no se modelan por no influir en el estudio.

Definición de las **grifas**:

- Masa de las grifas de conexión de péndolas con el cable sustentador: 0.2125 kg.
- Masa de las grifas de conexión de péndolas con el cable de contacto: 0.2125 kg.
- Masa de las grifas de conexión del cable en Y: 0.310 kg.

Definición de **la tensión en cables**:

- Fuerza de pretensado del CS: 15451 N.
- Fuerza de pretensado de CC: 30902N.
- Fuerza de pretensado del CY: 3090 N.

Definición de la **mall**a:

- Número de elementos entre péndolas en el CS: 10.

- Número de elementos entre péndolas en el CC: 10.
- Número de elementos del CS en el cable en Y: 10.
- Número de elementos del CC en el cable en Y: 10.
- Número de elementos del vano inicial y final del CS: 20.
- Número de elementos del vano inicial y final en CC: 20.

Definición de materiales:

- Número de materiales: 5.
- Material x: los materiales que conforman el sustentador, cable de contacto, péndolas, cable en Y y brazos de registro son los que se estudian, y se definen según:

	Módulo de Young (Pa)	Sección transversal (m²)	Densidad ($\frac{g}{m^3}$)	Momento de inercia (m⁴)
Sustentador	$1.03 \cdot 10^{11}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	$9.095 \cdot 10^3$	$7.2 \cdot 10^{-10}$
Cable de contacto	$1.2 \cdot 10^{11}$	$1.499 \cdot 10^{-4}$	$6.667 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^{-9}$
Péndolas	$1.03 \cdot 10^{11}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$9.875 \cdot 10^3$	1
Cable en Y	$1.03 \cdot 10^{11}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	$3.316 \cdot 10^3$	0
Brazos de registro	$1.1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5.463 \cdot 10^3$	0

Tabla 8- Materiales catenaria []

Definición de los vanos: Estos valores son los que más varían de una catenaria a otra pues aquí se encuentran la mayoría de los datos que se han extraído de las gráficas anteriores.

- Número de péndolas por vano: En los dos primeros y últimos vanos se mantiene el número de péndolas nominal.
- Distancia entre péndolas: valor que surge de calcular la diferencia de kilómetros entre dos puntos consecutivos del vano, habrá tantos valores como péndolas por vano más uno, por medirse también la diferencia de distancia entre los brazos de registro y la primera y última péndola.
- Distancia entre cable e Y y soporte del sustentador: se mide la distancia al principio y al final del vano, tiene valores nominales ya que no participa en el estudio ni se han proporcionado estos datos. En el primer y último vano no hay cables en Y por lo que las distancias serán 0, al igual que en el inicio del segundo vano y final del penúltimo, por la misma razón. En los demás vanos la distancia es de 7.5 m.
- Altura cable de contacto en las uniones de las péndolas: dato más importante y de los únicos que cambia al simular catenarias reales. El primer y último vano no tiene péndolas.

Una vez ya están definidos todos los elementos geométricos nombrados anteriormente, se utiliza el comando GENCAT para generar la catenaria descrita. Este comando utiliza el método de cálculo Newton-Raphson para el cálculo de equilibrio estático y el cálculo de la configuración inicial.

Método de cálculo Newton-Raphson

Es un método de resolución numérica que busca resolver una ecuación de tipo $f(x)=0$, es decir, buscar raíces de la ecuación mediante aproximaciones sucesivas (iteraciones), también puede ser usado para encontrar máximos y mínimos de la función.

Como resultado se obtiene la configuración inicial, la simulación, de la catenaria en la que están representados todas las variables geométricas definidas.

5.2 CÁLCULO Y DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA DE LOS ERRORES

En este siguiente apartado se pretende calcular el error por distribución probabilística de la altura del cable de contacto de las catenarias reales, esto con el objetivo de poder generar valores de error aleatorios en función de los errores de montaje reales de las catenarias dadas y así poder generar tantas catenarias con el error de montaje real como sean necesarias para la simulación. Catenarias cuyo único aspecto variará entre unas y otras será la altura del cable de contacto.

5.2.1 ERROR EN LA ZONA DE CONTACTO CON EL PANTÓGRAFO

1. Cálculo de la diferencia

El primer paso es calcular el error de montaje de todas las catenarias medidas en el capítulo 4, dentro de esas catenarias no se calculará el error de todo el hilo de contacto, sino solo del tramo que se sabe que está en contacto con el pantógrafo, es decir el tramo que se encuentra a 5.3 m de altura. Para el cálculo de la diferencia se empieza a calcular la diferencia de la altura del hilo de contacto de cada punto respecto al anterior, empezando con el valor nominal de 5.3 m.

2. Distribución estadística

El siguiente paso es ajustar una curva de distribución al error calculado. Para ello se pasan los valores de las diferencias de altura calculados en el punto 1 a Matlab, donde con la función *dfittool* en la que se introducen los datos y en la que se pueden probar diferentes tipos de distribución para ver la que mejor se ajusta, tanto en el tipo densidad PDF como el formato de distribución probabilidad acumulativa CDF.

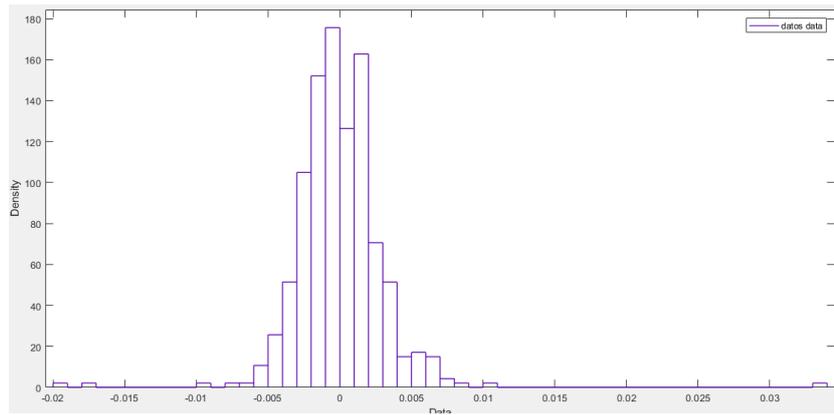


Figura 22- PDF errores reales de montaje

El primer histograma generado es el mostrado en la figura anterior, los valores límites mayores a 0.03 y menos a -0.015 alteran en gran medida la distribución probabilística, como son 4 valores frente a las más de 400 errores generados y representan menos de un 1% estos valores extremos se obvian por ser no representativos, sacando otra vez el histograma y ajustándolo a una distribución normal se obtienen los siguientes gráficos.

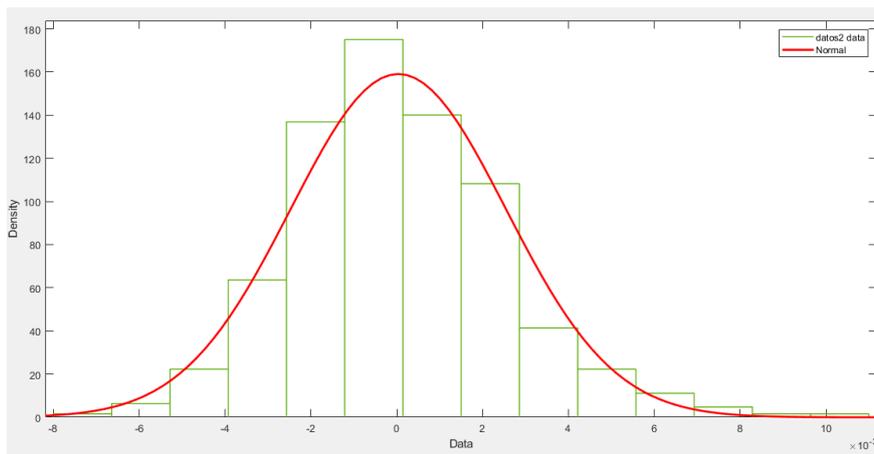


Figura 23- PDF de errores con distribución normal

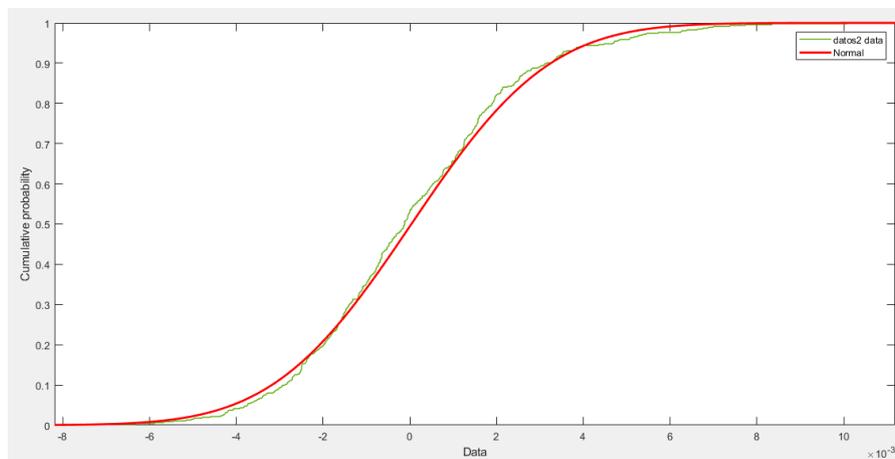


Figura 24 -Distribución normal de errores CDF

La distribución normal es la que más se ajusta a los errores, por lo que se tomará esta distribución para el paso siguiente con su correspondiente valor medio y desviación típica que la propia función *dfittool* proporciona.

3. Generar errores aleatorios

El último paso es generar valores aleatorios de errores que posteriormente se usaran para calcular alturas de cable de contacto.

Los valores de error aleatorios se generan con la función *normrnd* que utilizando los datos característicos de la distribución normal da como resultado una matriz de elementos del orden deseado.

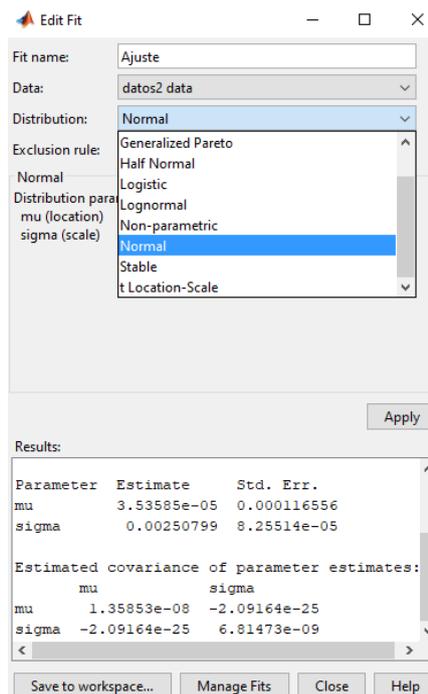


Figura 25-Herramienta *dfittool* Matlab distribución normal

Completados los pasos anteriores se procede a la generación de nuevas alturas de hilo de contacto con el error establecido. Esto se hace para los tramos cuya altura se sabe que es 5.3 m en la catenaria nominal, como se ha dicho en el paso 1. La altura que se obtiene parte de sumar el primer error a la altura nominal de 5.3 m y a partir de esta ir sumando los errores a la altura del punto anterior. Haciendo esto se obtiene la altura de las péndolas del vano, al igual que las alturas en los brazos de registro. Ejemplo a continuación en la Tabla 9.

Para las siguientes catenarias generadas solo varía la altura del hilo de contacto por ser el objeto de estudio, por lo que las demás características de la catenaria mantienen su valor nominal, de manera que el número de péndola por vano será de 8.

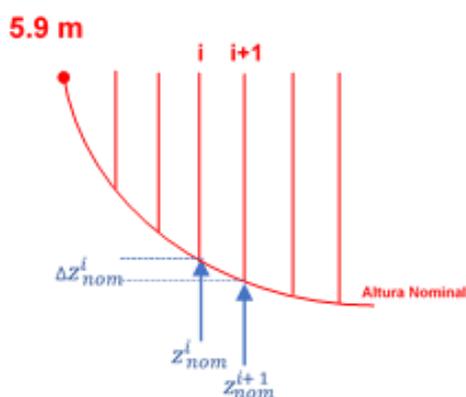
Error generado	Nueva altura
-0.0033	5.300
-0.0011	5.299
0.0009	5.300
0.0090	5.309
0.0069	5.316
-0.0034	5.312
0.0076	5.320
0.0018	5.322
-0.0002	5.322
0.0018	5.323
-0.0005	5.323
-0.0003	5.323
0.0037	5.326
0.0035	5.330

Tabla 9-Alturas de contacto en péndolas generadas con error de montaje real

En el tercer vano, el primero que aparece en la simulación, es necesaria la altura de cuatro péndolas por considerar la altura constante en 5.3 m a partir de la cuarta péndola, el siguiente valor corresponde al del tercer brazo de registro (marcado en amarillo). Sigue el proceso, ahora con ocho péndolas, hasta el próximo brazo de registro que corresponde al cuarto, y así hasta cuatro péndolas antes del brazo de registro número 18.

5.2.2 ERROR EN LOS TRAMOS ASCENDENTES Y DESCENDENTES

El error de estas zonas no sigue la misma regla que lo anterior, ya que, en estos tramos cada punto tiene una altura, pero sí se utilizan los errores sacados de la variable estadística anterior, ya que, ese error es el error de montaje ligado a todo el hilo de contacto. El cálculo de las alturas de contacto en estos tramos se hace de la siguiente forma:



$$\Delta z_{nom}^i = z_{nom}^i - z_{nom}^{i+1}$$

$$z_{nom}^{i+1} = z_{nom}^i + \Delta z_{nom}^i$$

Con Error = Δz^i sacado con la variable estadística anterior

$$z^{i+1} = z^i + \Delta z_{nom}^i - \Delta z^i$$

Figura 26- Cálculo de la altura real de contacto en las zonas con pendiente

Este procedimiento se hará en este orden en el caso descendente y en orden contrario en el caso ascendente, en este caso se obtendrán las alturas de las péndolas en el segundo y penúltimo vano y de los brazos de registro que le correspondan y también de las péndolas que faltaban en el tercer y antepenúltimo vano.

5.3 GENERACIÓN DE CATENARIAS

Para empezar con el programa y poder ver de forma simulada el error de montaje de las catenarias reales que cuyos datos se han obtenido en el capítulo 4, se simularán estas catenarias alterando todos los valores que correspondan a cada una. También se simula la catenaria nominal que después servirá como referente de montaje, además de para la simulación dinámica.

A continuación, se expondrán los valores del tramo 1 frente a los de la catenaria nominal, y se aprovecha para comentar los errores de montaje desde el punto de vista de los datos obtenidos.

	Catenaria Tramo 1	Catenaria Nominal	Análisis
Número de postes	14	21	Esta diferencia puede deberse a condiciones del terreno o forma de la vía y por tanto requerir cantones más cortos
Distancia entre postes	Entre 44.711 m y 65.992 m según el vano	64 m	Fallo que va ligado a la distancia entre las péndolas, explicado en el capítulo 3
Descentramiento (vanos intermedios)	Entre -0.194 m y 0.212 m	±0.2 m	Este como en el caso del número de postes puede ser debido a la forma de la vía (curva, por ejemplo)
Altura del CC en los brazos de registro (tramos intermedios)	Entre 5.308 m y 5.335 m	5.3 m	El error de las alturas, aunque en algunos tramos postes sea muy pequeño lo más probable es que tenga un origen humano por fallo de montaje

Número de péndolas por vano	Entre 6 y 11	8	Fallo de montaje debido al factor humano, en caso de déficit puede tener tanto origen humano como haberse roto o caído alguna péndola por factores externos, o bien, fallo en la toma de datos
------------------------------------	--------------	---	--

Tabla 10- Comparación componentes geométricos de la catenaria del tramo 1 y la catenaria nominal

A continuación, se exponen la distancia nominal entre péndolas y la altura nominal del cable de contacto en las uniones con las péndolas, los valores del tramo 1 no se van a presentar por no poder sacar de ellos más datos que los dichos anteriormente.

Altura del CC en las uniones con las péndolas (m)	2°	5.8377	5.7371	5.647	5.5672	5.4978	5.4389	5.3903	5.3522
	3°	5.3176	5.3022	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
	18°	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3022	5.3176
	19°	5.3522	5.3903	5.4389	5.4978	5.5672	5.647	5.7371	5.8377

Tabla 11- Datos nominales de la altura del cable de contacto en los puntos de unión con las péndolas catenaria

Distancia entre péndolas (m)	4.5	7.857	7.857	7.857	7.858	7.857	7.857	7.857	4.5
-------------------------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----

Tabla 12- Datos nominales distancia entre péndolas

Se generan las catenarias con el comando GENCAT teniendo abierto a la vez el archivo que define el directorio correspondiente a cada catenaria .ini.

A continuación, se muestra la catenaria correspondiente a uno de los tramos que fueron dados como gráfica de datos, con tal de ver cómo sería la simulación real del tramo y la catenaria nominal.

Las catenarias vienen representadas por el eje de abscisas correspondiente a la longitud del vano en metros y el eje de ordenadas correspondiente a la altura vertical en metros también. Y en caso de la vista tridimensional, se ve un eje perpendicular al plano de ordenadas que corresponde al descentramiento en metros.

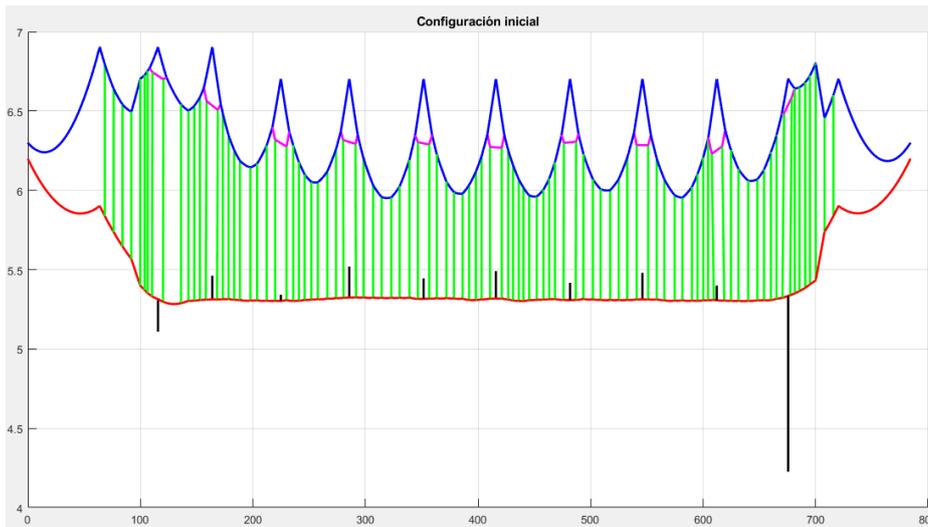


Figura 27- Vista frontal simulación catenaria real

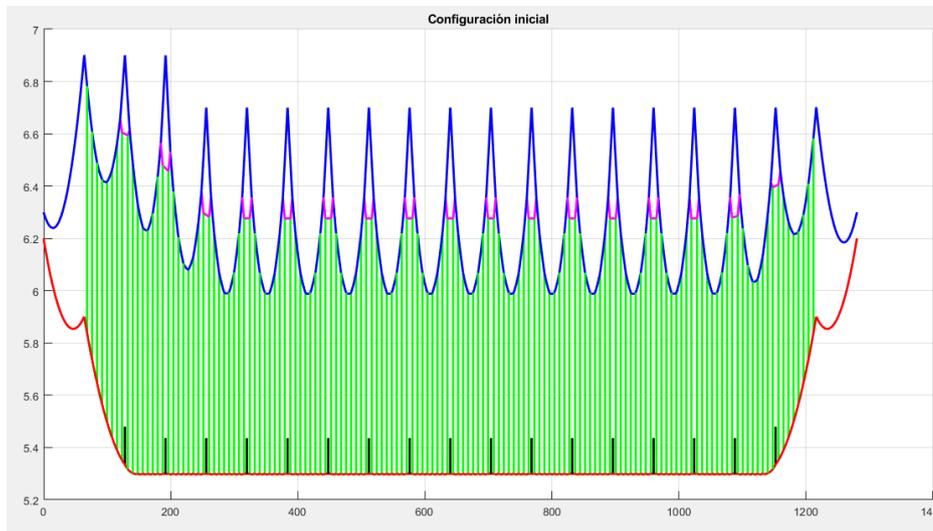


Figura 28- Vista frontal simulación catenaria nominal

5.4 GENERACIÓN DE CATENARIAS CON ERRORES DE MONTAJE ALEATORIOS

La finalidad de la lectura de datos gráficos anterior es la generación de errores aleatorios que permitan la simulación de catenarias con un error de montaje igual al real, siendo estas catenarias aleatorias en las que el único elemento que se altera es el objeto de estudio, es decir, la altura del hilo de contacto. El error de entre las alturas de las péndolas es importante porque las alturas no son independientes entre las péndolas, sino que existe dependencia.

Llegado este punto ya se puede modelizar, para su posterior simulación, tantas catenarias como sean necesarias para el estudio del montaje del hilo de contacto, siguiendo los mismos pasos que en el apartado 5.3 únicamente que manteniendo

los datos de la catenaria nominal y variando la altura de contacto según lo hecho en el apartado 5.2.

5.5 ANÁLISIS ERRORES DE MONTAJE SIMULACIÓN

En este apartado se estudiarán los errores de montaje que más se repiten a lo largo de la simulación de la catenaria, los errores de montaje que se pueden ver a partir de las gráficas proporcionadas para la toma de datos se están descritos en el apartado 4.4 y en la Tabla 2.

Primero se analizarán las catenarias reales que han sido dadas como datos. En la Figura 29 están señalados dos errores que se repiten a lo largo de todas las catenarias reales simuladas.

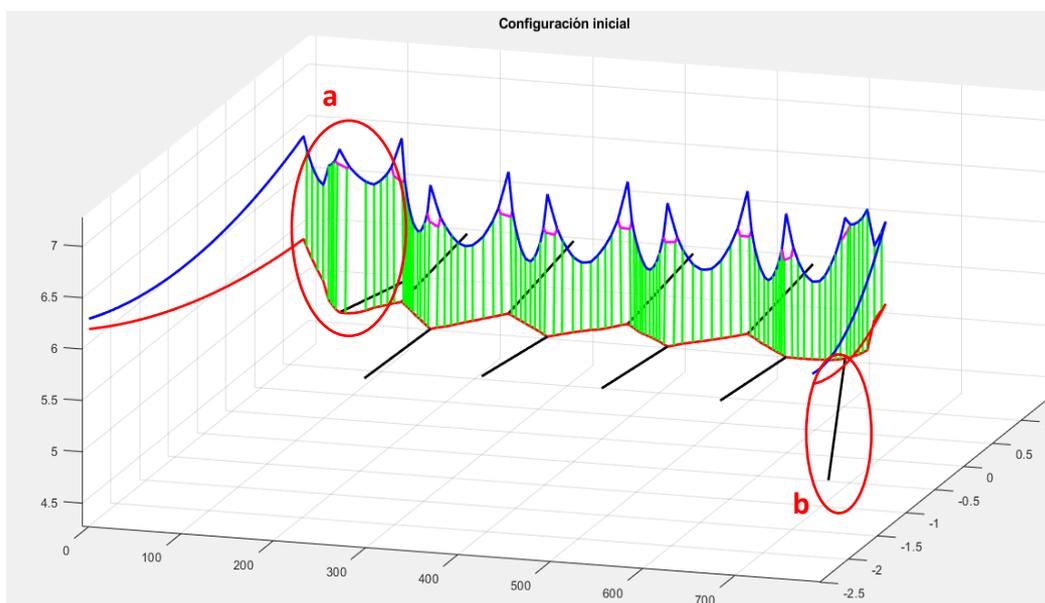


Figura 29- Errores de montaje en la catenaria real

Estos errores son:

- Falta de una o varias péndolas, en este caso ese vano según los datos generados tiene 6 péndolas, lo que justifica esa zona vacía. Esto puede ser por un error de montaje o bien de medida, aunque también puede ser que las péndolas hayan caído por alguna razón externa.
- El brazo de registro de este poste, a diferencia de los demás que están horizontales, se encuentra casi vertical al suelo, esto es porque tiene la función de tirar del cable de contacto hacia abajo para conseguir la altura del cable de contacto medida de las gráficas, por la gran diferencia de altura que hay entre los dos puntos sucesivos de la zona.

En el caso de las catenarias generadas en el apartado 5.4 al coger directamente los datos de altura producidos por la distribución estadística se obtienen catenarias con una estructura no realista, como puede ser por:

- Péndolas a compresión: que están siendo modeladas como barras. En el modelo real las péndolas son elementos no lineales que únicamente tienen rigidez a tracción, eso quiere decir que al tener nula rigidez a compresión cuando se encuentran sometidas a este esfuerzo están flojas y no aguantan el peso del cable de contacto, es como si no estuvieran. Pero en la simulación no se ve reflejada este comportamiento, únicamente se representan como barras expuestas a la compresión entre el cable sustentador y el cable de contacto.
- Brazos de registro que tienen que tirar del cable de contacto para mantener la altura producidas por la distribución estadística, como en el apartado b anterior, pero este problema se intenta solventar elevando ligeramente la altura del brazo de registro en el que ocurre este problema.

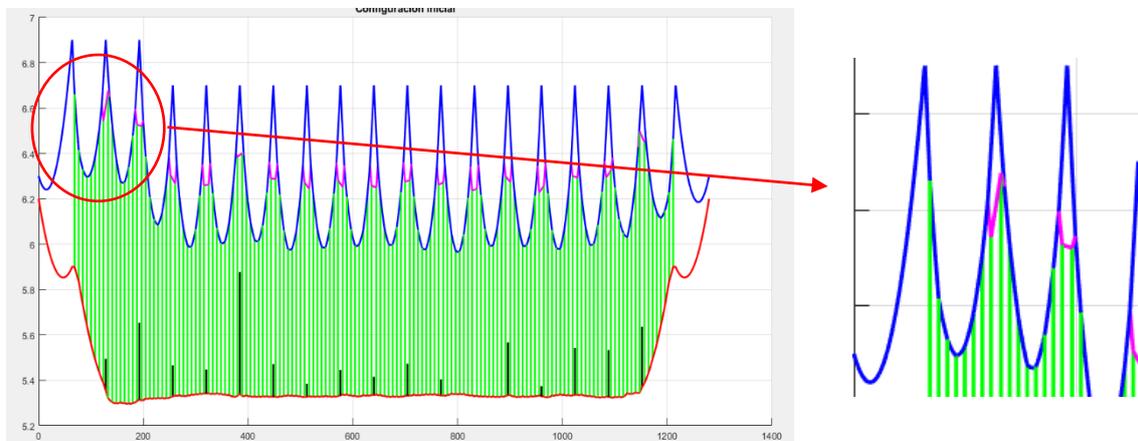


Figura 30- Péndolas a compresión

El error que se mantiene a lo largo de todas las simulaciones y el realmente importante es la altura del cable de contacto, en todas las simulaciones a diferencia de la simulación nominal Figura 28 tienen una altura irregular, como es de esperar, con picos hacia arriba y hacia abajo, haciendo que cada uno de los brazos de registro se represente de una manera diferente según lo grande que sea la diferencia con el punto de anterior.

6. INTERACCIÓN PANTÓGRAFO-CATENARIA

Una vez que ya ha sido creado el modelo de la catenaria y su configuración inicial, se puede realizar la simulación dinámica en la que se analiza la interacción entre el pantógrafo y la catenaria generada. Las simulaciones dinámicas son una importante herramienta para el análisis de diferentes geometrías, como es este caso, configuraciones y materiales para la simulación y optimización de estas sin necesidad de un prototipo o pruebas. Para esta simulación es necesario seleccionar el pantógrafo, la velocidad con la que se realizará la simulación y el paso del tiempo. La definición y los métodos de resolución del problema dinámico se explica en [10] [6].

De la simulación de la interacción se obtienen como resultado de la fuerza de contacto entre pantógrafo y el cable de contacto con respecto al tiempo, de los cuales se puede extraer la desviación típica, la fuerza de contacto máxima y mínima y el valor medio de esta fuerza. Estos datos que caracterizan la interacción de la catenaria y los frotadores se extraerán tanto para las catenarias generadas con irregularidades en el montaje como para la catenaria ideal, para así compararlos y poder analizar la influencia de las irregularidades en la interacción dinámica.

La simulación dinámica se hace con el comando SIMULA_PANTO_CAT, pero antes de dar paso a la simulación hay que variar algunas de las características del archivo .ini que se ha creado en la simulación de la catenaria. En este archivo se encuentran las características del pantógrafo y de la simulación en si. Algunos de las características a definir más importantes son:

- Nombre del pantógrafo: DSA380.
- Punto kilométrico de inicio de simulación: 128 m. Se iniciará la simulación a partir de cuando la catenaria alcance la altura de referencia objetivo y esto será, como ya se ha dicho anteriormente, a partir del vano 3.
- Alturas de referencia objetivo: 5.3 m.
- Altura de referencia inicial: 5.2 m. El pantógrafo sigue un movimiento ascendente en rampa para entrar en contacto de forma gradual con el hilo de contacto, así se evita el choque inicial que provocaría un movimiento transitorio al inicio de la simulación.
- Velocidad de simulación: 300 km/h. Por ser la velocidad nominal del tramo Madrid-Valencia.
- Distancia de simulación: 1024m. Esto son equivalentes a 16 vanos, que son los vanos en los que la altura se mantiene alrededor de 5.3 m.
- Incremento de tiempo: 0.001 s.

Definidos estos aspectos se puede dar paso a la simulación de las cuales se obtienen como resultado gráficas en las que se ven representadas las fuerzas de contacto entre pantógrafo y el cable de contacto frente al tiempo de interacción.

De la gráfica directamente no se pueden extraer ningún tipo de datos ya que es complicada de analizar. Lo único que se puede sacar en claro es el momento en

el que el pantógrafo comienza a interactuar con el hilo de contacto, pues la gráfica empieza con una fuerza de contacto cero correspondiente al período en el que el pantógrafo pasa de la altura de referencia inicial a la altura de referencia objetivo, siendo este último el momento en el que hay el gran salto de fuerza. Al no poder usar las gráficas se recurre a los datos generados de estas dos variables, que servirán para el posterior estudio de las variables principales que definen la interacción.

6.1 OBTENCIÓN FUERZAS DE CONTACTO

Las fuerzas de contacto, como se ha definido en el apartado anterior, se han medido entre los vanos 2 y 16, ósea entre 128 y 1024 metros, pero a la hora de analizar las fuerzas de contacto debidas a la interacción de la catenaria únicamente se tienen en cuenta los vanos intermedios, esto es porque los valores extremos están contaminados por las fuerzas de frontera.

Las fuerzas de frontera, también conocidas como efectos de borde o de contorno, surgen al principio y final de la interacción pantógrafo-catenaria, esto es porque al principio existen oscilaciones debidas al transitorio inicial, cuando empieza el contacto del pantógrafo y el hilo de contacto, y al final del modelo, las ondas empiezan a rebotar al final de la catenaria pudiendo actuar con el pantógrafo y como consecuencia alterar las fuerzas de contacto de ese tramo. Estas oscilaciones extremas difieren del valor que tendrían en régimen permanente, lo más representativo a este régimen en el modelo simulado es el tramo intermedio (10 vanos).

Siendo así y teniendo en cuenta que no se dispone de los metros en los que se encuentra el pantógrafo en cada momento, sino que se dispone del tiempo que lleva interactuando. Hay que establecer una relación, que se cumplirá en todas las catenarias pues todas tienen la misma configuración, entre la distancia y el tiempo.

6.1.1 PARÁMETROS A ANALIZAR

El objetivo principal de la simulación del modelo es la obtención de unos valores que influyen en gran medida en el comportamiento de las catenarias. Estos parámetros tan importantes y que después se analizarán son:

- **Fuerza de contacto:** Es la fuerza que ejerce el pantógrafo sobre el hilo de contacto. Esta fuerza es de suma importancia porque es un factor que determina la eficiencia de recolección de energía, pues el contacto de estos dos elementos es la única fuente de alimentación del ferrocarril. Los valores de fuerza no pueden ser muy elevados, porque supondrían el desgaste de la LAC y esto conllevaría a un aumento de los costes de mantenimiento y

reparación del sistema. Por otro lado, si estas fuerzas son muy pequeñas se podrían producir despegues del cable del contacto y el pantógrafo, produciendo por una parte el corte de suministro de energía al ferrocarril y, por otro lado, la aparición de arcos eléctrico, generado por la gran diferencia de potencial entre la catenaria y el pantógrafo, que produciría graves daños en el sistema.

- **Desviación típica de la fuerza de contacto:** La desviación típica es importante porque sirve para acotar la fuerza de contacto en un determinado rango que impida las pérdidas de contacto y las fuerzas muy altas. Es conveniente que sea un rango pequeño para así mantener lo más constante posible la alimentación del ferrocarril. Esta describe la fluctuación de la fuerza de contacto referente a su valor medio.
- **Fuerza de contacto media, máxima y mínima:** La fuerza de contacto media, de acuerdo con la norma EN50367 se rige por la fórmula:

$$F_m = 0.00097 \cdot v^2 + 70 \quad (4)$$

Donde v es la velocidad de circulación del ferrocarril. Los valores máximos y mínimo indicarán, también, la calidad de la interacción pantógrafo-catenaria, vienen definidas por las siguientes fórmulas:

$$F_{m\acute{a}x} = F_m + 3 \cdot \sigma \quad (5)$$

$$F_{m\acute{i}n} = F_m - 3 \cdot \sigma \quad (6)$$

6.1.2 RESULTADOS

A continuación, se expondrán las catenarias generadas en el apartado 5, tanto nominal como las generadas con errores reales de montaje, junto a la representación de la fuerza de contacto con respecto al tiempo de simulación dinámica hecha, la tabla de los parámetros de interés mencionados en el apartado anterior y, finalmente, un comentario y comparación de los datos obtenidos.

6.1.2.1 CATENARIA NOMINAL

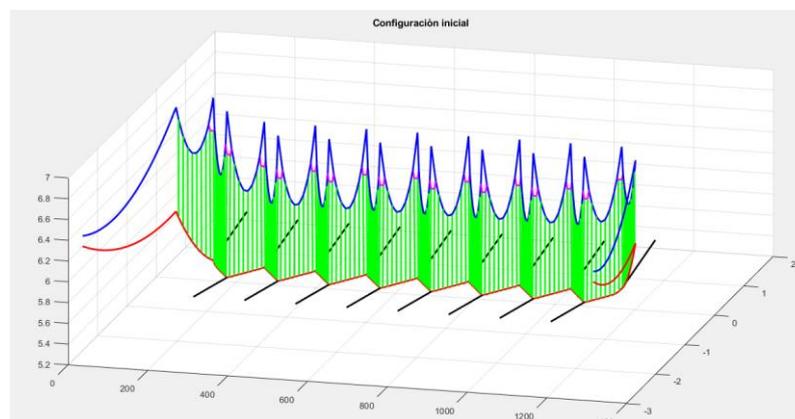


Figura 31- Vista tridimensional de la catenaria nominal C-350

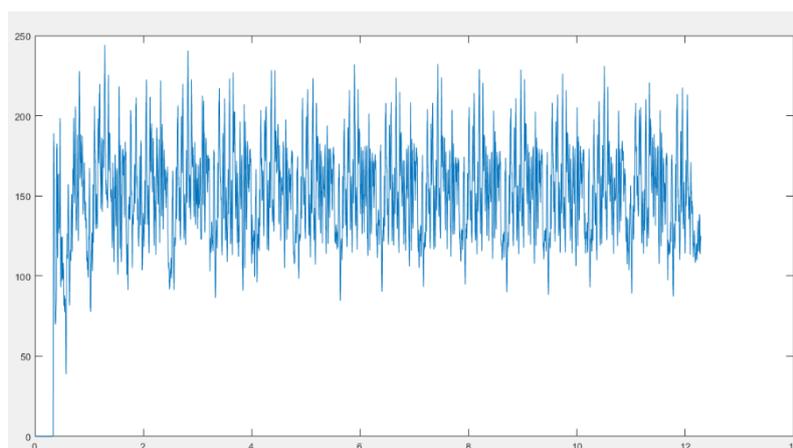


Figura 32- Fuerza de contacto (N) vs Tiempo interacción catenaria nominal (s)

$F_c \text{ medio}$	152.37 N
$F_c \text{ máx}$	240.68 N
$F_c \text{ mín}$	84.63 N
σ	26.54 N

Tabla 13- Parámetros simulación interacción con catenaria nominal

Siguiendo el procedimiento de selección del tramo intermedio explicado en el apartado 6.1 se han extraídos estos como los valores que definen la interacción de la catenaria nominal con el pantógrafo.

De la tabla anterior el término $F_c \text{ medio}$ hace referencia al valor medio de la fuerza de interacción de la simulación, esta debe ser menor a la dictada por la norma EN50367 y se puede ver en la ecuación (4). $F_c \text{ máx}$ y $F_c \text{ mín}$ hacen respetivamente referencia al valor máximo y mínimo de la fuerza aplicada por el pantógrafo a lo largo de la interacción y deberían cumplirse con las ecuaciones (5) y (6). Y, por último, la σ hace referencia a la desviación típica de la fuerza en esta simulación.

Los datos de la Tabla 13 se utilizarán como referencia para las próximas simulaciones, ya que, la catenaria nominal sería el caso de simulación ideal sin errores de montaje, que será lo que se va a analizar.

6.1.2.2 CATENARIAS CON ERROR DE MONTAJE REAL

En las catenarias generados con el error de montaje real previamente calculado, la interacción del pantógrafo con el cable de contacto no es constante como en el caso de la catenaria nominal que mantiene una altura constante, sino que aumentan las irregularidades del cable de contacto y la variación de las fuerzas de contacto. Esto ocurre porque habrá puntos que estén por debajo de la altura nominal en la que la fuerza sobre el pantógrafo será mayor y otros en los que los puntos estarán por encima y por tanto tendrá una fuerza menor de contacto.

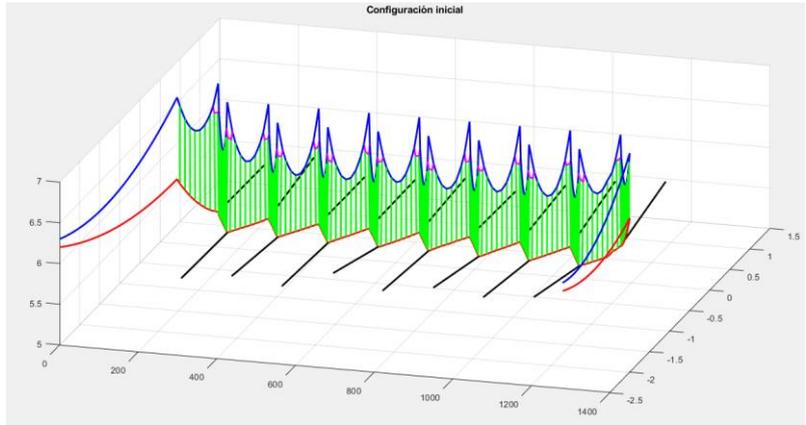


Figura 33- Vista tridimensional de CAT 1

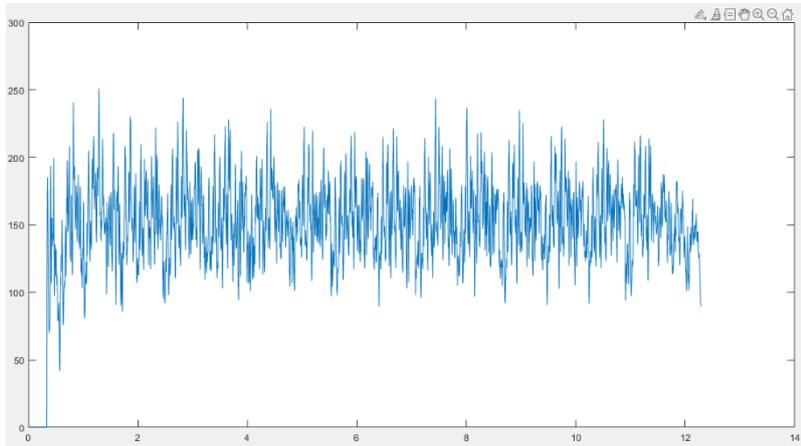


Figura 34- Fuerza de contacto (N) vs Tiempo interacción(s) CAT 1

F_c medio	154.19 N
F_c máx	244.05 N
F_c mín	89.39 N
σ desv típica	26.29 N

Tabla 14-Parámetros simulación interacción con CAT 1

Como se ha explicado al principio de este apartado, al existir variaciones en la altura del cable de contacto respecto a la altura nominal de este, las fuerzas de contacto máximas pueden ser mayores y las mínimas pueden ser menores por haber mucha diferencia en las alturas.

Analizando los datos de la Tabla 14, se puede comprobar en esta catenaria generada con error aleatorio las alturas están por debajo de la altura nominal, esto se ve en que todos los valores de la fuerza de contacto (mínimo, máximo y medio) son mayores a los de la catenaria nominal.

En cuanto a la desviación típica varía en 0.25 N respecto a la desviación de la catenaria nominal, menos de un 1%. Se podría entender de este resultado que la catenaria instalada de la que hemos tomado la medida está montada con pocos errores de instalación.

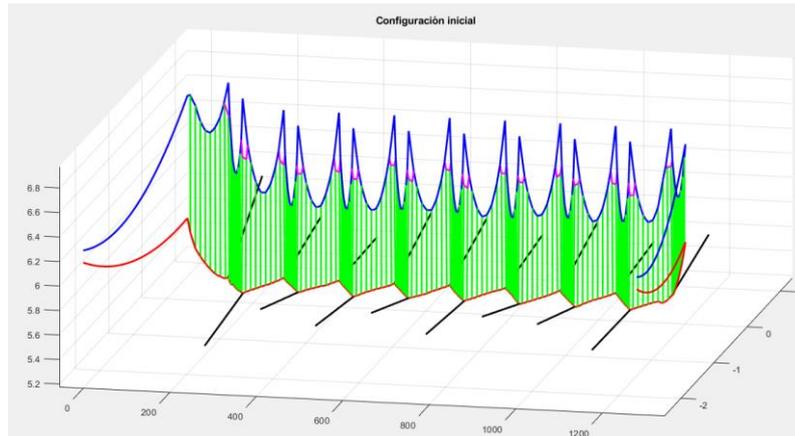


Figura 35-Vista tridimensional de CAT 2

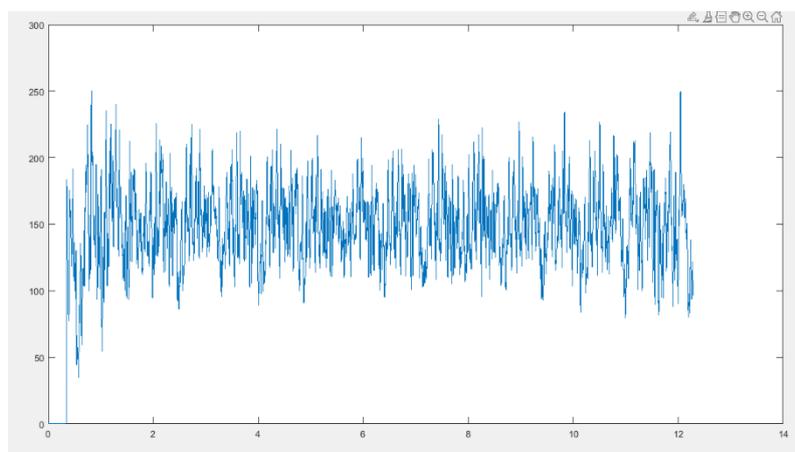


Figura 36-Fuerza de contacto (N) vs Tiempo interacción (s) CAT 2

F_c medio	150.51 N
F_c máx	234.31 N
F_c mín	85.80 N
σ desv típica	25.21 N

Tabla 15-Parámetros simulación interacción con CAT 2

En este caso al contrario que en la primera catenaria generada, la altura del cable de contacto generalmente a lo largo de esta catenaria está un poco por encima del valor nominal, esto se traduce en fuerzas de contacto menores a lo largo de la catenaria.

La desviación típica en este caso es mucho mayor al anterior, del orden de 3 veces más. La diferencia de desviaciones es de 1.33 N, un 5.01% de la desviación típica referente. Este valor al ser tan dispar al anterior, aunque sigue siendo un valor pequeño, lleva a pensar que la catenaria sí que cuenta con errores de montaje importantes.

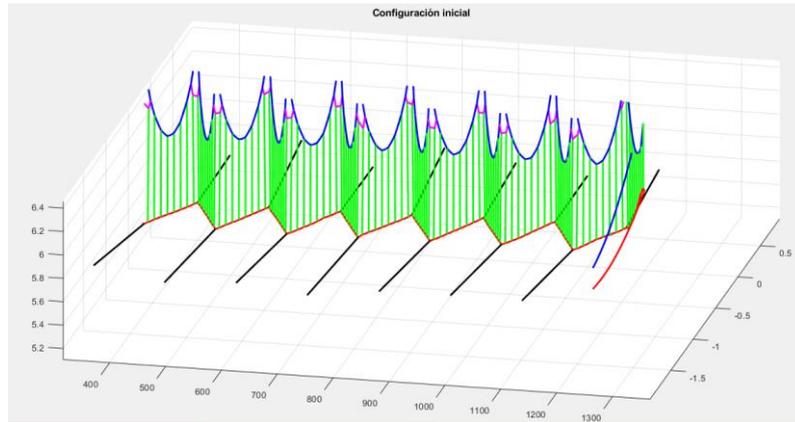


Figura 37-Vista tridimensional de CAT 3

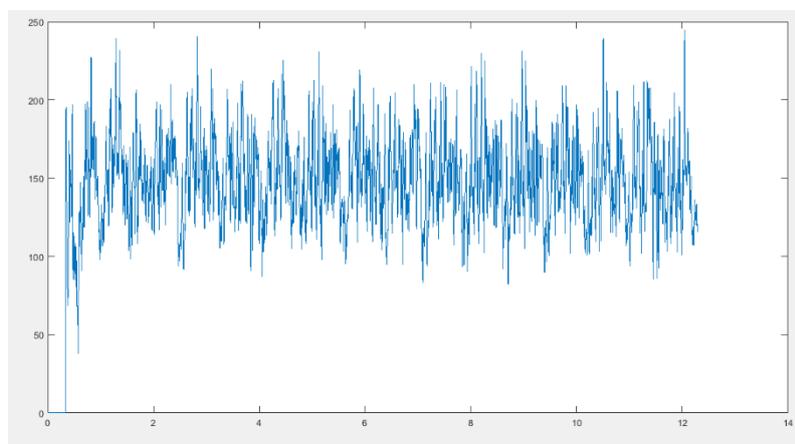


Figura 38- Fuerza de contacto (N) vs Tiempo interacción (s) CAT 3

F_c medio	150.29 N
F_c máx	240.55 N
F_c mín	82.19 N
σ desv típica	26.17 N

Tabla 16-Parámetros simulación interacción con CAT 3

En la tercera catenaria simulada, el valor de $F_{c\ máx}$ no varía con respecto al referente, pero sí baja el valor de la $F_{c\ mín}$ lo que resulta en un consecuente descenso de la fuerza media. Esto es porque mantiene tu altura muy cercana a la altura referente, pero hay algunos puntos en los que el cable de contacto sube, disminuyendo la fuerza de contacto.

La variación de la desviación típica es de 0.37 N, 1.39%. Nuevamente es un valor bajo que indica pocos errores de montaje a lo largo del montaje.

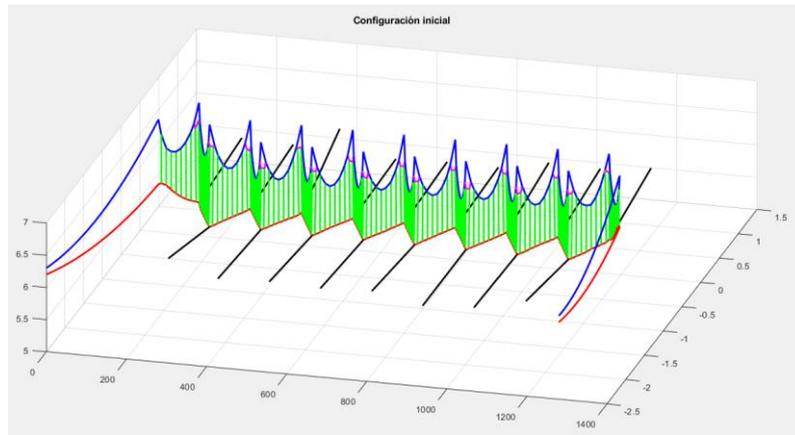


Figura 39-Vista tridimensional de CAT 4

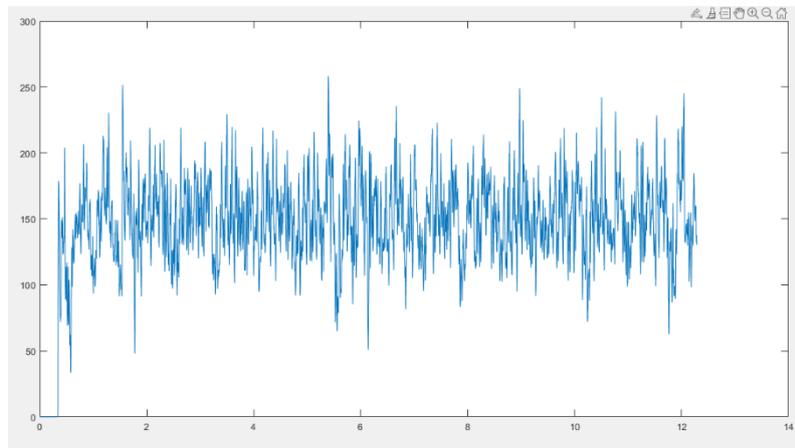


Figura 40- Fuerza de contacto (N) vs Tiempo interacción (s) CAT 4

F_c medio	150.45 N
F_c máx	233.08 N
F_c mín	81.79 N
σ desv típica	26.51 N

Tabla 17-Parámetros simulación interacción con CAT 4

Por último, en la última catenaria simulada para el estudio, vuelve a ocurrir lo que en el caso 2 anterior, las fuerzas de contacto son nuevamente menores, lo que indica que la catenaria se encuentra por encima del valor nominal de 5.3m.

Aunque en el caso de la F_c máx hay una diferencia de casi 8 N, no se traduce en la desviación típica. La variación es de 0.03N, es decir, una variación con respecto a la catenaria nominal de 0.11%, un valor no considerable.

6.2 ANÁLISIS RESULTADOS

En todas las simulaciones llevadas a cabo se cumplen las ecuaciones 1, 2 y 3, que marcan el valor límite de la fuerza que le corresponde.

De la tabla 13 se saca que el valor de la desviación típica ideal es de 26.54 N. Con la presencia de errores la desviación típica desciende a un mínimo de 25.21 N, lo que es mucho mejor a la condición ideal. Una menor desviación típica se traduce en una fuerza de contacto más uniforme.

Por otro lado, el valor de referencia ideal de la $F_{c\ máx}$ es de 240.68 N. El 75% de las simulaciones tiene una $F_{c\ máx}$ menor a la establecida. La mayor $F_{c\ máx}$ simulada es de 244.05 N (Tabla 14) y la menor $F_{c\ máx}$ es de 233.08 N (Tabla 17), siendo un 3.157% mejor que la fuerza máxima ideal.

Finalmente, en el caso de que no existan irregularidades en el montaje la $F_{c\ mín}$ es de 84.63 N. En el 50% de las simulaciones de catenarias con error la $F_{c\ mín}$ es más favorable que la nominal, siendo el valor mínimo de $F_{c\ mín}$ de 81.79 N (Tabla 17) y el máximo de 89.39 N (Tabla 14).

7. CONCLUSIONES

Las conclusiones del estudio realizado sobre la catenaria son:

- La simulación con catenarias generadas con errores reales refleja la realidad de la fluctuación del sistema pantógrafo catenaria. En este TFG se propone el análisis de catenarias con el error basado en los datos de medición reales de la catenaria Madrid-Valencia. Los errores a considerar han sido de carácter geométrico, la altura del cable de contacto en función de la longitud de las péndolas, distancia entre péndolas y altura del cable sustentador.
- Respecto a las pequeñas diferencias entre los valores nominales y los de las catenarias con errores de montaje, de 0.11%, 1% y 1.39%, se podría decir que es tan pequeña la diferencia porque los tramos que se han proporcionado para la toma de datos reales son tramos que están relativamente bien montados y con pocos errores o que incluso toda la catenaria estuviera montada con ligeros errores de montaje. Pero al ver el error de 5%, que difiere mucho a los 3 anteriores, aunque siga siendo pequeño, esto último se descarta, pues con la generación aleatoria de errores pueden surgir errores que lleven a una configuración más irregular en la altura del hilo de contacto.
- Contra todo lo pensado, en las simulaciones con irregularidades de altura del cable de contacto llevadas a cabo, la desviación típica de la fuerza de contacto es en todos los casos menor a la desviación de la interacción ideal. Esto significa que la fuerza de contacto en estas catenarias con errores tiene un valor más constante y por ello la interacción y el paso de corriente entre catenaria y pantógrafo es más fluida.

7.1 TRABAJOS FUTUROS

Algunos de los trabajos que se podrían tener en cuenta en el futuro relacionados con la temática del TFG son:

- Simulación de más catenarias para comprobar el segundo punto de las conclusiones.
- Tener en cuenta otros errores de montaje: distancia entre péndolas, descentramientos, altura del sistema... y ver su influencia en la desviación de las fuerzas de contacto.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1]https://es.wikipedia.org/wiki/Alta_velocidad_ferroviaria_en_Espa%C3%B1a
Consultado en septiembre de 2020.
- [2]<http://ferropedia.es/mediawiki/index.php/Catenaria#:~:text=Estructuras%20de%20soporte%20de%20catenaria,-Las%20estructuras%20de&text=La%20estructura%20de%20soporte%20de,el%20poste%20y%20la%20m%C3%A9nsula.&text=Las%20m%C3%A9nsulas%20son%20elementos%20estructurales,posici%C3%B3n%20correcta%20sobre%20el%20tren.> Consultado en septiembre de 2020.
- [3]http://www.adif.es/gl_ES/comunicacion_y_prensa/fichas_de_actualidad/ficha_actualidad_00070.shtml Consultado en septiembre de 2020
- [4]http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/oferta_de_empleo_publico/doc/08_fc_ConceptosFerroviarios.pdf Consultado en septiembre de 2020.
- [5][http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/328047FCAA6F53C7C1258393003AC71C/\\$FILE/NAE%20300.%20Parte%201.%20Dise%C3%B1o%20funcional%20LAC%20CA-160.%20\(1%C2%AA+Erratum%20ed.\).pdf?OpenElement](http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/328047FCAA6F53C7C1258393003AC71C/$FILE/NAE%20300.%20Parte%201.%20Dise%C3%B1o%20funcional%20LAC%20CA-160.%20(1%C2%AA+Erratum%20ed.).pdf?OpenElement)
Consultado en septiembre de 2020.
- [6] Borromeo López S: *Algoritmos de optimización para la adquisición y procesamiento de imágenes capturadas con cámaras CCD lineales. Aplicación a los sistemas de medida del desgaste del hilo de contacto en las líneas electrificadas de ferrocarril.* (2004). Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- [7] García León S; *Optimización de catenarias ferroviarias para diferentes velocidades del vehículo.* (2019). TFM, Universidad Politécnica de Valencia.
- [8]http://www.stemann.com/en/products/roof_mounted_pantographs/long_distance_traffic/dsa150_200_250_350_380 Consultado en septiembre de 2020.
- [9] Gregori S, Tur M, Taracón J, Fuenmayor F: *Stochastic Monte Carlo simulations of the pantograph-catenary Dynamic interaction to allow for uncertainties introduced during catenary installation.* (2018): 1-9.
- [10] Gregori S: *Efficient simulation of the pantograph- catenary dynamic interaction. Catenary optimisation and installation error análisis.* (2018). Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.
- [11] Aboshi Tsunemoto: *Installation guidelines for Shinkansen High Speed Overhead Contact Lines.* (2011): 230-232.
- [12] Tur M, Baeza L, Fuenmayor F. *PACDIN statement of methods. Vehicle Syst Dyn.* (2015).

- [13] Collin A, Fossati F, Papi M, Resta F: *Impact of overhead line irregularity on current collection and diagnostics based on the measurement of pantograph dynamics*. (2007): 549-558.
- [14] Song Y, Ronquist A, Liu Z, Navik P: *Contact wire irregularity stochastics on high-speed railway pantograph-catenary interactions*. (2020). 7-9.
- [15] Gil Romero J: *Simulación eficiente de la interacción dinámica pantógrafo-catenaria con seccionamientos*. (2019). TFG, Universidad Politécnica de Valencia.
- [16] <http://test.cua.uam.mx/MN/Methods/Raices/NewtonRaphson/NewtonRaphson.php> .Consultado en septiembre de 2020.
- [17] Comando HELP Matlab <https://es.mathworks.com/help/matlab/> Consultado en agosto de 2020.

ANEXOS

PRESUPUESTO

El objetivo de este apartado es el cálculo del presupuesto necesario para la realización de este proyecto que ha tenido lugar en un período de 3 meses. El presupuesto teniendo en cuenta los recursos y el tiempo utilizados se detalla a continuación:

Cantidad	Concepto	Porcentaje (%)	Precio unidad (€)	Precio total (€)
1	Licencia Matlab R2020a	100	800,00	800,00
1	Licencia Office365	100	69,00	69,00
300	Trabajo Ingeniero mecánico		35,00	10.500
1	Acer Aspire E5-573	6	427,31	25,64
Total (sin IVA)				11.394,64
IVA (21%)				2.392,87
Presupuesto Total				13.787,51

El presupuesto total del proyecto es de TRECE MIL SETESIENTOS OCHENTA Y SIETE CON CINCUENTA Y UN EUROS.

PLIEGO DE CONDICIONES

OBJETO

El objeto del presente proyecto es el estudio de la influencia de las irregularidades del hilo de contacto de la catenaria sobre la fuerza de contacto sobre la interacción dinámica pantógrafo-catenaria, utilizando el software PACDIN.

CONOCIMIENTOS REQUERIDOS

Los conocimientos mínimos requeridos para la realización del proyecto son:

- Conocimientos sobre el funcionamiento de los comandos de Matlab.
- Conocimientos sobre el Método de Elementos Finidos, el Método de Penalti y el Método de Newton-Raphson.

NORMATIVA

En todo momento de realización del trabajo se debe cumplir las normativas de seguridad y salud en el trabajo:

- Real Decreto 309/2001, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1879/1996, de 2 de agosto, por el que se regula la composición de la Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.
- Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización.

También se deben tener en cuenta las medidas preventivas necesarias para evitar factores de riesgos en el trabajo en oficinas y despachos y sus riesgos asociados.

LICENCIAS DE SOFTWARE

Para realizar el TFG han sido necesario las licencias oficiales de los softwares empleados:

- Licencia Microsoft 365®.
- Licencia Matlab®.

Ambas licencias han sido usadas en su versión estudiante, pero se incluye en el presupuesto el precio que tienen las licencias oficiales cara al público