



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

Especialidad Mecánica

SIMULACIÓN DEL EFECTO DEL VIENTO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN CON CRUCETAS AISLANTES PIVOTANTES

Autor: Daniel Andrés Arcones

Directores: Alberto Carnicero López, Jesús Ramón Jiménez Octavio

Madrid

Junio 2018

Índice de documentos

DOCUMENTO I. MEMORIA

Parte I. Memoria

pág. 3 a 172

169 páginas

Parte II. Código fuente

pág. 173 a 223

50 páginas

DOCUMENTO II. PLANOS

1. Lista de planos

pág. 3

1 página

2. Planos

pág. 5

1 página

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

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

El autor D. DANIEL ANDRÉS ARLORES

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: SIMULACIÓN DEL EFECTO DEL VIENTO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN CON CABLES AISLADOS PLÁSTICOS, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

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

3º. Condiciones de la cesión y acceso

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

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

4º. Derechos del autor.

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

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

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

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

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

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

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

Madrid, a 25 de JUNIO de 2018.

ACEPTA

Fdo... DANIEL... ANDRÉS... ARCONES.....

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

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
..SIMULACIÓN DEL EFECTO DEL VIENTO EN LÍNEAS DE.....
ALTA TENSIÓN CON CRUCETAS AISLANTES PIVOTANTES.....

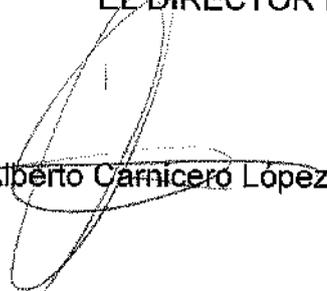
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2017.-2018.. es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio
de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros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


Fdo.: Daniel Andrés Arcones

Fecha: 25.1.06.18.

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO


Fdo.: Alberto Carnicero López

Fecha: 25.1.06.18



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

Especialidad Mecánica

SIMULACIÓN DEL EFECTO DEL VIENTO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN CON CRUCETAS AISLANTES PIVOTANTES

Autor: Daniel Andrés Arcones

Directores: Alberto Carnicero López, Jesús Ramón Jiménez Octavio

Madrid

Junio 2018

SIMULACIÓN DEL EFECTO DEL VIENTO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN CON CRUCETAS AISLANTES PIVOTANTES

Autor: Andrés Arcones, Daniel

Directores: Carnicero López, Alberto; Jiménez Octavio, Jesús Ramón

Entidad Colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

En los últimos años ha aumentado sustancialmente el interés por la instalación de líneas de alta tensión compactas, perfilándose como la alternativa de futuro para las instalaciones de transporte de energía eléctrica [1]. Este tipo de líneas cuentan con importantes ventajas a su favor, como son la necesidad de una menor servidumbre, un menor impacto visual y un menor gasto de material.

El principal elemento que ha permitido el desarrollo de estos diseños es la sustitución de las crucetas tradicionales por crucetas aislantes pivotantes. Estas crucetas eliminan la necesidad de aisladores entre la torre y la línea, haciendo pasar el conductor por el vértice de la cruceta y sustituyendo el brazo y la riostra por materiales aislantes. Para evitar los esfuerzos sobre el poste derivados por cargas en la línea, se libera el giro de la cruceta.

Gracias a este diseño, si la línea sufre algún tipo de carga, la cruceta gira a una nueva posición de equilibrio para compensarla. Por tanto, los esfuerzos percibidos por la torre son mucho menores, permitiendo una reducción de su tamaño. No obstante, se introduce un elemento móvil en la línea, que se debe considerar como un sistema altamente no lineal. Este hecho obliga al diseño conjunto de todo el sistema, hasta el momento el mayor obstáculo para la generalización de este tipo de líneas.

Uno de los principales efectos a tener en cuenta en el diseño es el efecto del viento. De hecho, en el Reglamento de Líneas de Alta Tensión (RD23/2008) [2] no se contemplan unas pautas específicas de diseño bajo cargas de viento para líneas con crucetas aislantes pivotantes, empleándose la normativa común. En particular, se establece que se debe diseñar bajo viento estático constante perpendicular a la línea, lo que no será suficiente.

Por todo ello, en este proyecto se plantean tres objetivos fundamentales. En primer lugar, desarrollar un modelo de línea compacta con crucetas aislantes pivotantes que sea lo más sistemático y general posible, con el objetivo de que pueda ser aplicado en cualquier condición de diseño. En segundo lugar, desarrollar un programa capaz de generar series temporales de viento dinámico válidas en toda la línea, que posteriormente serán aplicadas al modelo. Por último, obtener la respuesta estocástica de este tipo de líneas en diferentes casos y analizar su comportamiento.

Hasta el momento, las distintas investigaciones llevadas a cabo en este campo se han centrado en el comportamiento de las propias crucetas [3, 4] o precisaban de herramientas con un ámbito de distribución muy limitado [5]. Por tanto, la necesidad de un modelo como el que se desarrollará es indudable.

Metodología

Como es práctica habitual en este tipo de diseños, se desarrolla un modelo al que aplicar el método de análisis por elementos finitos (FEM). Como programa de cálculo se emplea Matlab R2015b, y como programa de análisis de FEM, se emplea ANSYS 19.0, incluyendo SpaceClaim como editor de geometrías. Estos programas son usados ampliamente en la industria, asegurando su adaptación a las posibles aplicaciones reales.

En primer lugar, se calcula la curva catenaria discretizada con Matlab a partir de la aproximación parabólica. También se añaden las rectas de las crucetas. A su vez, se calcula la longitud real del cable, que permita desarrollar un modelo preliminar con el que calcular las tensiones iniciales. Estos datos se importan al editor de geometrías 3D SpaceClaim, donde se escribe un programa para automatizar el proceso, generando los modelos geométricos. A continuación, se implementa dicho modelo preliminar en ANSYS para el cálculo de la pretensión inicial, consistente en el cable sin deformar al que se le libera un extremo y se le aplica la tensión de tendido. La tensión inicial obtenida se aplica al modelo completo, al cual previamente se ha introducido el modelo geométrico de la curva catenaria, las crucetas y las condiciones de contorno correspondientes.

Las series temporales de viento se generan con un modelo en dos componentes. La componente de turbulencia se modelará por un proceso estocástico gaussiano multivariante basado en espectros en frecuencia. La componente media se calculará de tal manera que los máximos de la serie de viento cumplan las velocidades indicadas por la normativa.

Para la obtención de resultados se aplica una carga de viento estático, una carga de viento dinámico uniforme y una carga de viento dinámico distribuido. En cada uno de los modelos se recogen datos de los desplazamientos de los vértices de las crucetas y del punto medio de los vanos en perpendicular a la línea.

En el caso del modelo de viento estático, se toman dos series de 300 y 450 m de longitud de vano, respectivamente, y se varían el número de vanos, el ángulo de incidencia y la velocidad del viento. Con ello se generan las curvas de desplazamientos de cada uno de los puntos y las superficies de estabilidad para cada número de vanos distinto. Posteriormente, se generan las superficies de estabilidad para 140 km/h en función del número de vanos y el ángulo de incidencia, así como las mesetas de inestabilidad en las cuales se supera el desplazamiento necesario para romper la distancia de seguridad con el poste, 1.1 m de desplazamiento en Z.

Para los modelos de viento dinámico se fija la longitud (450 m) y el número de vanos (4 vanos) y se genera una serie con ángulo crítico (60°) y velocidad pico 140 km/h, realizándose su análisis estadístico. A continuación, se varía el ángulo de incidencia y la velocidad pico, comparando los datos obtenidos.

Resultados

A partir del modelo estático, para viento de 140 km/h se obtienen las siguientes mesetas de inestabilidad en las crucetas:

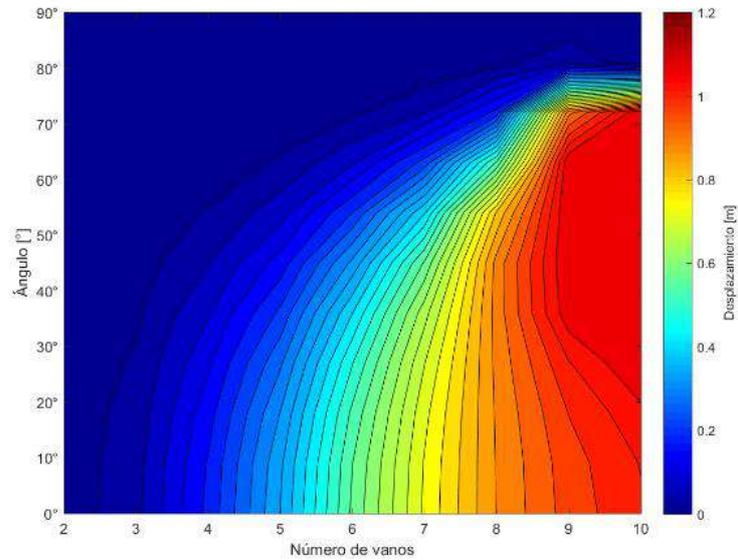


Figura 1. Meseta de inestabilidad para vanos de 300 m

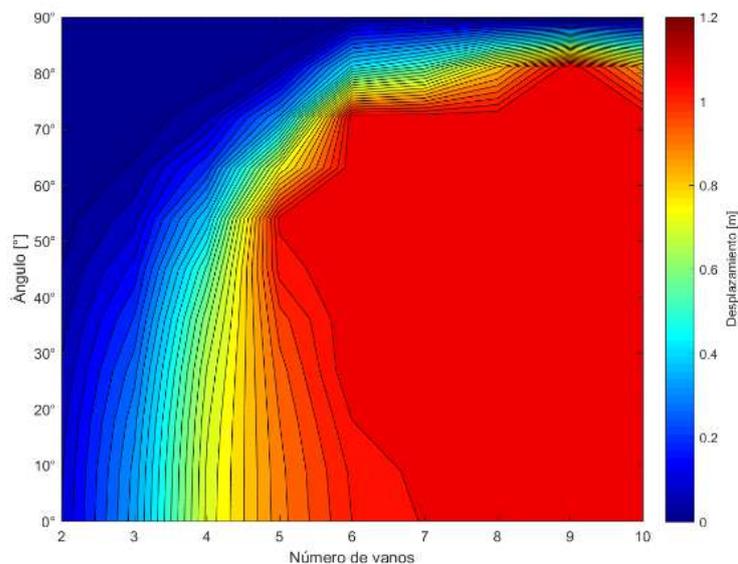


Figura 2. Meseta de inestabilidad para vanos de 450 m

Se observa que un aumento del número de vanos, de su longitud y un ángulo más próximo a 90° (perpendicular a la línea), aumenta también la inestabilidad. La zona de estabilidad cerca de los 90° se debe a que en el modelo ideal no se produciría giro en la cruceta. Por lo tanto, si se diseña para ese caso, tal y como indica la normativa, se está cometiendo un error considerable.

Por otra parte, a partir de los datos obtenidos para el modelo de viento dinámico uniforme se deduce que, bajo viento real, los desplazamientos máximos medios se mantienen por debajo de las medidas del estático. Sin embargo, la principal amenaza para la seguridad de la línea la representan los desplazamientos extremos que aparecen. Estos picos pueden deberse al “efecto galope” producido por variaciones bruscas de la velocidad del viento. Este modelo representa una cota superior al desplazamiento máximo de las crucetas.

El modelo de viento dinámico distribuido apoya esas mismas conclusiones. La distribución del viento suaviza los máximos, siendo una cota superior mejor. Además, aporta información sobre el comportamiento del sistema bajo vientos perpendiculares. Se observa que este es el único modelo de los tres que presenta un desplazamiento en las crucetas bajo viento con ángulo de incidencia cercano a los 90°. Al ser el más parecido a la realidad, se concluye que es el más apropiado para el diseño, y este desplazamiento es efecto de las perturbaciones producidas por la diferencia de carga entre vanos.

El análisis estadístico para 4 vanos de 450 m muestra que, para el modelo de viento dinámico uniforme se cumple la Regla de las 3σ de seguridad a partir de 1.1 m de desplazamiento, justo antes de romper la distancia de seguridad. Para el modelo de viento dinámico distribuido, este valor se alcanza antes. Además, ambos modelos muestran distribuciones de probabilidad muy densas en torno a valores pequeños de desplazamientos, y largas colas, mayor en el uniforme que en el distribuido. Resulta destacable que, en el modelo estático, esta disposición de vanos no debería superar los 0.8 m de desplazamiento en Z para ningún caso.

A continuación, se muestran los gráficos comparativos del desplazamiento máximo en las crucetas para los tres modelos variando el ángulo de incidencia y la velocidad del viento:

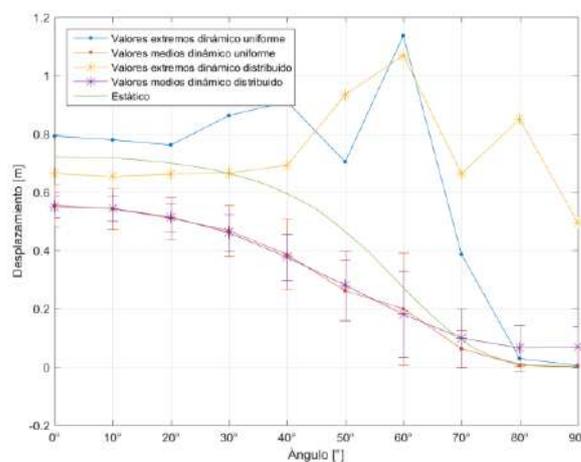


Figura 3. Desplazamiento máximo en Z para 4 vanos de 450 m bajo viento de 140 km/h variando el ángulo

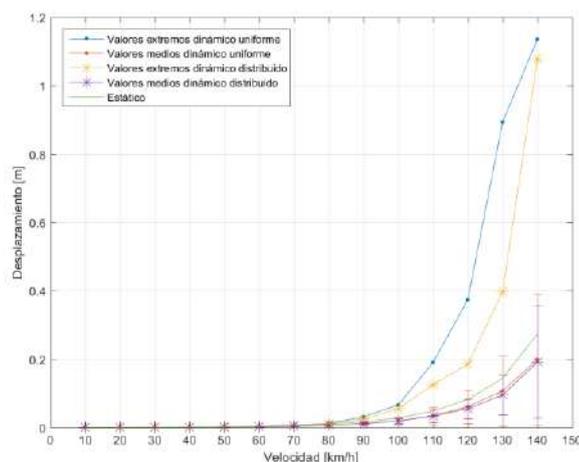


Figura 4. Desplazamiento máximo en Z para 4 vanos de 450 m bajo viento a 60° variando la velocidad

Conclusiones

Se considera que se han cumplido los tres objetivos propuestos satisfactoriamente. El modelo de línea desarrollado es válido para un gran rango de condiciones de diseño, siendo fácilmente modificable y exportable. El modelo de series temporales de viento también es válido para diversas aplicaciones. Los resultados obtenidos de los distintos análisis constituyen por sí mismos herramientas válidas para el diseño de líneas compactas con crucetas aislantes pivotantes. A partir de ellos se ha establecido el comportamiento de este tipo de líneas y se han indicado pautas para su diseño.

Referencias

- [1] Lakhpati D, Furrer A., Gassmann H. R., y Schmuck F. “Examples of transmission line tower configurations and solutions such as 765 kV insulated cross arms to minimize the impact of new EHV lines”. Technical report, CIGRE session, paper B2-106, (2014).
- [2] España. “Real decreto 223/2008 de 15 de febrero por el que se aprueba el reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas de alta tensión.” Boletín Oficial del Estado, 68, (2008).
- [3] Baker A. C., Bernstorff R. A., et al. “IEEE guide for braced insulator assemblies for overhead transmission lines 60 kV and greater”. IEEE Transactions on Power Delivery, 23, 785–792, (2008).
- [4] Quiroga-Agudo A., Carnicero-López A., Jiménez-Octavio J. y Sánchez-Rebollo C. “Análisis del efecto de las fuerzas del viento sobre líneas de alta tensión compactas.”, (2014).
- [5] Carnicero-López A., Jiménez-Octavio J., y Sánchez-Rebollo C. “Estabilidad en crucetas aislantes pivotantes de líneas aéreas.” En VIII Jornada Técnica de Líneas. Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos, (2015).

SIMULATION OF WIND EFFECT IN HIGH VOLTAGE POWER TRANSMISSION LINES WITH PIVOTING INSULATED CROSS-ARMS

Author: Andrés Arcones, Daniel

Directors: Carnicero López, Alberto; Jiménez Octavio, Jesús Ramón

Collaborating Entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Introduction

In recent years, there has been a substantial increase in interest in the installation of compact high-voltage lines, clearly becoming the future alternative of choice for electric power transmission installations [1]. This type of lines has important advantages in their favor, such as the need for less servitude, less visual impact and less material expenditure.

The main element that has allowed the development of these designs is the replacement of the traditional cross-arms by pivoted insulated cross-arms. These cross-arms eliminate the need for insulators between the tower and the line, passing the conductor through the vertex of the cross-arm and replacing the arm and the brace with insulating materials. To avoid the stresses on the pole derived by loads on the line, the rotation of the crosshead is released.

Thanks to this design, if the line suffers any kind of load, the cross-arm rotates to a new equilibrium position to compensate it. Therefore, the efforts perceived by the tower are much smaller, allowing a reduction in its size. However, a mobile element is introduced into the line, which must be considered as a highly non-linear system. This fact requires the joint design of the entire system, this becoming the biggest obstacle to the generalization of this type of lines so far.

One of the main effects to consider in the design of these lines is the effect of the wind. In fact, the Spanish regulation (Reglamento de Líneas de Alta Tensión, RD23/2008) [2] does not contemplate specific design guidelines under wind loads for lines with pivoted insulated cross-arms. Indeed, it is established that lines must be designed under constant static wind perpendicular to them, which in this case may not be sufficient.

Due to all these reasons, this project has three fundamental objectives. First, to develop a compact line model with pivoted insulated cross-arms as systematic and general as possible, so that it can be applied under any design condition. Second, to develop a program capable of generating valid dynamic wind time series throughout the line, which will then be applied to the model. Finally, to obtain the stochastic response of this type of lines in different cases and analyze their behavior.

Up to date, the different investigations carried out in this field have focused on the behavior of the cross-arms themselves [3, 4] or they required tools with a very limited range of distribution [5]. Therefore, the need for a model like the one that will be developed is beyond all doubt.

Methodology

As is usual practice in this type of design, a model is developed to apply the finite element method (FEM). Matlab R2015b is used as calculation program, and ANSYS 19.0 is used as FEM program, including SpaceClaim as geometry editor. These programs are widely used throughout the industry, ensuring an easy adaptation of the model to its applications.

Firstly, the catenary curve discretized with Matlab is calculated from the parabolic approximation and the straight lines of the cross-arms are added. The real length of the cable is also calculated, which allows the development of a preliminary model with which to calculate the initial tensions. This data is imported into SpaceClaim, the 3D geometry editor, where a program is written to automate the process, generating the geometric models. Next, this preliminary model is implemented in ANSYS for the calculation of the initial pretension, consisting of the cable without deforming for which one end is released and the tension of laying is applied. The initial tension obtained is applied to the complete model, in which has previously been introduced the geometric model of the catenary curve, the cross-arms and the corresponding boundary conditions.

The wind time series are generated with a model in two components. The turbulence component will be modeled by a multivariate Gaussian stochastic process based on frequency spectra. The average component will be calculated in such a way that the maxima of the wind series comply with the speeds indicated by the regulations.

To obtain results, a static wind load, a uniform dynamic wind load and a distributed dynamic wind load are applied. In each of the models, data on the displacements of the vertices of the crossheads and the midpoint of the spans perpendicular to the line are collected.

In the case of the static wind model, two series of 300 and 450 m span length are taken, respectively, and the number of spans, the angle of incidence and the wind speed are varied. This generates the displacement curves of each of the points and the stability surfaces for each different number of spans. Subsequently, the stability surfaces are generated for 140 km/h depending on the number of spans and the angle of incidence, as well as the plateaus of instability in which the displacement necessary to break the safety distance with the pole is exceeded, 1.1 m displacement in Z.

For dynamic wind models, the length (450 m) and the number of spans (4 spans) are set and a series with a critical angle (60°) and a peak speed of 140 km/h is generated, carrying out its statistical analysis. Next, the angle of incidence and the peak speed are varied, comparing the obtained data.

Results

From the static model, for wind of 140 km/h the following plateaus of instability in the crossheads are obtained:

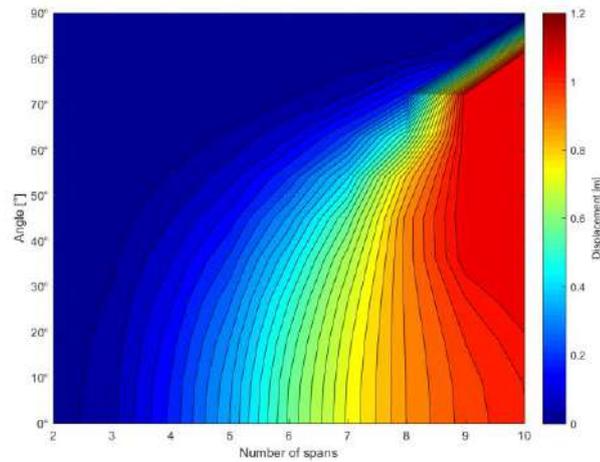


Figure 1. Instability plateau for 300 m spans

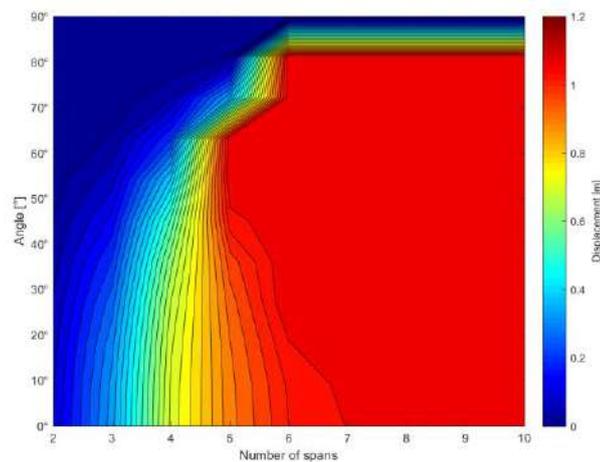


Figure 2. Instability plateau for 450 m spans

It is observed that an increase in the number of spans, their length or an angle closer to 90° (perpendicular to the line), also increases the instability. The zone of stability near 90° is due to the fact that in the ideal model there would be no turning in the crosshead. Therefore, designing for that case, as indicated in the regulations, a considerable error is being committed.

On the other hand, from the data obtained for the uniform dynamic wind model, it can be deduced that, under real wind, the maximum average displacements are maintained below the static measurements. However, the main threats to the safety of the line are represented by the extreme displacements that appear. These peaks may be due to the "gallop effect", produced by sudden variations in wind speed. This model represents an upper bound for the maximum displacement of the cross-arms.

The distributed dynamic wind model supports those same conclusions. The distribution of the wind softens the maximums, being a better upper bound. In addition, it provides information on the behavior of the system under perpendicular winds. It is observed that this is the only model of the three that presents a displacement in the cross-arms under wind with angle of incidence close to 90°. Being the most similar to reality, it is concluded that it is the most appropriate for the design, and this displacement is the effect of the disturbances produced by the difference in load between spans.

The statistical analysis for 4 spans of 450 m shows that, for the uniform dynamic wind model, the Rule of 3 σ of safety is fulfilled since 1.1 m of displacement, just before breaking the safety distance. For the uniform dynamic wind model, this value is reached before. In addition, both models show very dense probability distributions around small displacement values, and long queues, greater in the uniform than in the distributed one. It is noteworthy that, in the static model, this arrangement of spans would not exceed 0.8 m displacement in Z for any case.

Next, the comparative graphs of the maximum displacement in the cross-arms of the three models are shown, varying the angle of incidence and the wind speed:

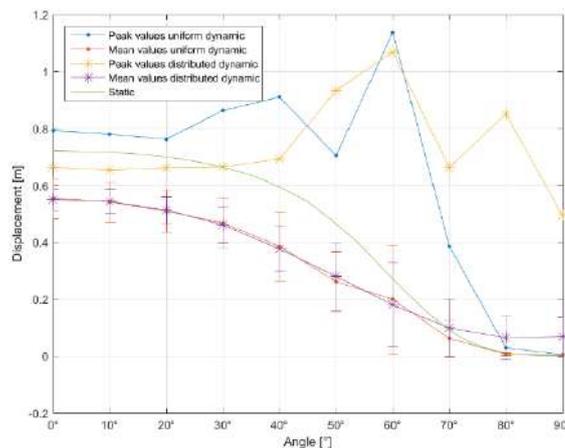


Figure 3. Maximum displacement in Z for 4 spans of 450 m under wind of 140 km/h varying the angle

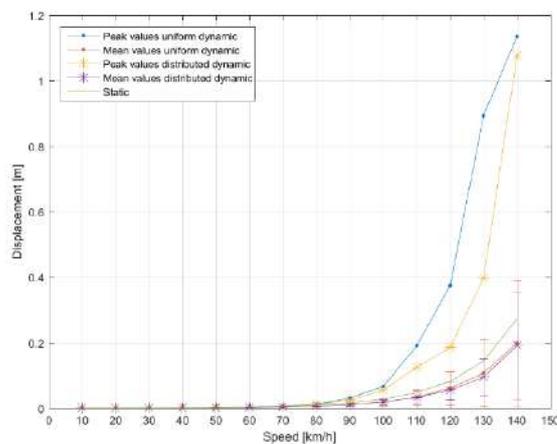


Figure 4. Maximum displacement in Z for 4 spans of 450 m under wind at 60° varying the speed

Conclusions

It is considered that the three proposed objectives have been met successfully. The developed line model is valid for a wide range of design conditions, being easily modifiable and exportable. On the other hand, the model of wind time series is also valid for various applications. Finally, the results obtained from the different analysis constitute in themselves valid tools for the design of compact lines with pivoted insulated cross-arms. From them, the behavior of this type of lines has been established and guidelines for its design have been indicated.

References

- [1] Lakhapati D., Furrer A., Gassmann H. R., and Schmuck F. “Examples of transmission line tower configurations and solutions such as 765 kV insulated cross arms to minimize the impact of new EHV lines”. Technical report, CIGRE session, paper B2-106, (2014).
- [2] Spain. “Real decreto 223/2008 de 15 de febrero por el que se aprueba el reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas de alta tensión.” Boletín Oficial del Estado, 68, (2008).
- [3] Baker A. C., Bernstorff R. A., et al. “IEEE guide for braced insulator assemblies for overhead transmission lines 60 kV and greater”. IEEE Transactions on Power Delivery, 23, 785–792, (2008).
- [4] Quiroga-Agudo A., Carnicero-López A., Jiménez-Octavio J. and Sánchez-Rebollo C. “Análisis del efecto de las fuerzas del viento sobre líneas de alta tensión compactas.”, (2014).
- [5] Carnicero-López A., Jiménez-Octavio J., and Sánchez-Rebollo C. “Estabilidad en crucetas aislantes pivotantes de líneas aéreas.” In VIII Jornada Técnica de Líneas. Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos, (2015).

DOCUMENTO I
—
MEMORIA



Índice

I. Memoria	19
1. Introducción	21
1.1. Motivación	22
1.2. Objetivos	23
1.3. Metodología	23
1.3.1. Plan de trabajo	25
2. Estado del arte	27
2.1. Crucetas de líneas de transporte eléctrico de alta tensión	27
2.1.1. Diseño y evolución de las crucetas de transporte eléctrico en líneas compactas	27
2.1.2. Crucetas aislantes: Diseño y características	33
2.1.3. Crucetas aislantes pivotantes: Comportamiento mecánico	36
2.1.4. Análisis de estabilidad de líneas con crucetas aislantes pivotantes	40
2.2. Mecánica de catenaria	43
2.2.1. Estructuras de cables	43
2.2.2. Ecuaciones de la catenaria rígida	44
2.2.3. Ecuaciones de la catenaria elástica	47
2.2.4. Aproximación parabólica de la catenaria	49
2.3. Modelado de vientos	51
2.3.1. Criterios de diseño	51
2.3.1.1. Diseño según Eurocódigo	51
2.3.1.2. Diseño según el Reglamento de Alta Tensión (RLTA)	53
2.3.2. Modelos dinámicos clásicos puntuales	53
2.3.2.1. Parámetros	54
2.3.2.2. Modelos basados en matrices PSD	54
2.3.2.3. Modelos autorregresivos	59
2.4. Análisis de estructuras con el método de elementos finitos	60
2.4.1. Principio de los trabajos virtuales y matriz de rigidez	61
2.4.2. FEM para sistemas no lineales	64
3. Características y parámetros del sistema	67
3.1. Características del conductor	67
3.2. Tablas de tendido	68
3.3. Características de las crucetas	69
4. Modelado de la línea	73
4.1. Generación de la curva catenaria	73
4.2. Generación del modelo geométrico	76
4.3. Mallado y condiciones de contorno del modelo de condiciones iniciales	78

5. Modelado del viento	83
5.1. Parámetros de viento	83
5.2. Modelo de espectros en frecuencia	84
5.3. Modelo temporal y coherencia de la línea	88
5.4. Modificaciones estadísticas	92
6. Modelado del conjunto	95
6.1. Modelado de las crucetas	95
6.2. Modelo completo sin viento	97
6.3. Modelo estático completo	100
6.4. Modelo transitorio	104
6.4.1. Modelo transitorio con viento dinámico uniforme	104
6.4.2. Modelo transitorio con viento dinámico no uniforme	106
7. Obtención y análisis de resultados: viento estático	109
7.1. Análisis de la estabilidad para cada número de vanos	109
7.1.1. Vanos de 300 m	110
7.1.1.1. Superficies de estabilidad naturales	114
7.1.1.2. Superficies de estabilidad en meseta	120
7.1.2. Vanos de 450 m	123
7.1.2.1. Superficies de estabilidad naturales	126
7.1.2.2. Superficies de estabilidad en meseta	132
7.1.3. Análisis de los resultados	135
7.2. Superficies de estabilidad para viento de 140 km/h	137
8. Obtención y análisis de resultados: viento dinámico	141
8.1. Modelo de viento dinámico uniforme	141
8.1.1. Curvas de desplazamientos	144
8.1.2. Análisis estadístico	146
8.1.3. Variación del ángulo del viento	148
8.1.4. Variación de la velocidad del viento	150
8.2. Modelo de viento dinámico no uniforme	152
8.2.1. Curvas de desplazamientos	152
8.2.2. Análisis estadístico	153
8.2.3. Variación del ángulo del viento	155
8.2.4. Variación de la velocidad del viento	157
8.3. Comparativa del modelo de viento dinámico uniforme y no uniforme	158
8.3.1. Curvas de desplazamientos	159
8.3.2. Análisis estadístico	161
8.3.3. Variación del ángulo del viento	163
8.3.4. Variación de la velocidad del viento	164
9. Conclusiones, aportaciones y extensiones	165
9.1. Conclusiones	165
9.1.1. Conclusiones de los modelos de la línea	165
9.1.2. Conclusiones del modelo de vientos	166
9.1.3. Conclusiones del modelo de viento estático	166
9.1.4. Conclusiones del modelo de viento dinámico uniforme	166
9.1.5. Conclusiones del modelo de viento dinámico distribuido	167
9.2. Aportaciones	167
9.3. Extensiones	168

Bibliografía	169
II. Código fuente	173
1. Programas de la línea	175
1.1. Vano.m	175
1.2. Longitud_real.m	176
1.3. Script1.scsript	176
2. Programas del modelo del vientos	179
2.1. Viento_frecuencias.m	179
2.2. Generacion_viento.m	181
2.3. Generacion_Sii.m	182
2.4. Desviacion.m	183
2.5. Coherencia.m	183
2.6. Validacion.m	184
3. Programas de toma y procesamiento de datos	187
3.1. Toma_de_datos.m	187
3.2. Lector.m	187
3.3. Superficies_estabilidad.m	189
3.4. Series_dinamico.m	193
3.5. Uniforme_vs_distribuido.m	213

Índice de figuras

1.1. Línea compacta con crucetas aislantes pivotantes	21
1.2. Pasos seguidos para la generación y resolución del modelo	24
2.1. Línea de alta tensión convencional	28
2.2. Esquema del balanceo de un aislador convencional	28
2.3. Soporte con aisladores en V	28
2.4. Brazo aislante	29
2.5. Brazo aislante suspendido	29
2.6. Cruceta en V horizontal	30
2.7. Primera línea compacta de alta tensión con crucetas aislantes	30
2.8. Comparación de la torre con crucetas pivotantes y la línea antigua	31
2.9. Sistemas de mantenimiento de emergencia	31
2.10. Línea compacta de 420 kV en Dubai junto a la anterior línea existente	32
2.11. Línea compacta Windtrack de 420 kV en Países Bajos	33
2.12. Línea compacta de 220 kV con crucetas aislantes pivotantes en Valladolid	33
2.13. Diseño experimental en Dinamarca de línea compacta de 420 kV con pilones en V y crucetas aislantes rígidas	34
2.14. Esquema de una cruceta aislante rígida (izquierda) y una pivotante (derecha)	34
2.15. Unión en el vértice de la cruceta aislante con desalineamiento entre el brazo y la riostra	37
2.16. Test de pandeo en crucetas aislantes pivotantes con brazos de 63 mm de área con diferentes longitudes y comparación con la carga teórica	37
2.17. Esquema de unión tipo “boomerang” en dos posiciones distintas	38
2.18. Carga vertical frente a horizontal para una cruceta pivotante típica de 230 kV	38
2.19. Diagramas de carga para cruceta rígida típica	39
2.20. Esquema de la cruceta en equilibrio, vista lateral	39
2.21. Esquema de la cruceta en equilibrio, vista superior	40
2.22. Esquema con fuerzas horizontales estabilizantes (arriba) y desestabilizantes (abajo)	41
2.23. Velocidad del viento crítica en función del número de vanos de 250 m por cantón con el ángulo ϑ como parámetro	42
2.24. Velocidad del viento crítica en función del ángulo de incidencia sobre el cable en una línea de 20 vanos de 250 m y $\vartheta = 20^\circ$	42
2.25. Cruceta de estabilización con brazo rígido doble	43
2.26. Esquema de la cubierta del Estadio Olímpico de Múnich	44
2.27. Esquemas para el cálculo de la catenaria rígida	45
2.28. Sistemas de coordenadas de la catenaria	46
2.29. Coordenadas de la catenaria elástica	48
2.30. Comparación de la aproximación parabólica	50
2.31. Comparación de modelos de densidad espectral	58
2.32. Espectro de Van der Hoven	59
2.33. Tipos de elemento típicos en análisis de estructuras	61

2.34. Método para calcular los coeficientes de rigidez aplicando PTV	62
2.35. Sistema lineal frente a no lineal	64
2.36. Método de Newton-Raphson	65
2.37. Varios pasos de carga	66
3.1. Introducción en ANSYS de las propiedades del conductor AL/AW Condor	68
3.2. Plano de la cruceta ACSR DX Condor	70
3.3. Introducción en ANSYS de los parámetros del brazo	71
3.4. Introducción en ANSYS de los parámetros de la riostra	71
4.1. Curva generada para 1 vano de 450 m con una resolución de 10 m	74
4.2. Comparación distintas divisiones de x con la curva catenaria real	74
4.3. Error en la mitad de un vano de 450 m en función del intervalo de división de x	75
4.4. Diferencia de longitud entre el cable y el vano en función de la longitud de vano	76
4.5. Geometría en SpaceClaim de la línea preliminar para 6 vanos de 450 m	77
4.6. Geometría en SpaceClaim de la línea deformada para 6 vanos de 450 m	77
4.7. Detalle en SpaceClaim de la geometría de una cruceta	78
4.8. Partes del sistema de Mechanic del modelo preliminar	79
4.9. Condiciones de contorno del modelo de condiciones iniciales	80
4.10. Condiciones de contorno del modelo final de 1 vano de 450 m	81
4.11. Deformaciones en Y de un vano de 450 m	81
4.12. Comparación de la deformación en Y con el número de elementos de la malla	82
4.13. Convergencia de la Fuerza en el modelo de 1 vano de 450 m	82
5.1. Espectro del modelo de Kaimal con ω espaciado uniformemente y los parámetros de la Tabla 5.1.	86
5.2. Extracto del resultado del análisis modal para una línea de 6 vanos de 450 m	86
5.3. Diagrama de Bode del sistema de segundo orden con $\zeta = 8.83$ y $\omega_n = 0.135$ Hz	87
5.4. Espectro del rango de frecuencias elegido	88
5.5. Ejemplo de serie temporal de viento generada	89
5.6. Validación en frecuencia del modelo temporal	89
5.7. Coherencia entre los puntos de máxima y mínima altura en un vano de 450 m	90
5.8. Tres series temporales de viento correlacionadas	91
5.9. Desglose de las tres series temporales de viento correlacionadas	91
5.10. Relaciones de σ y $\mu + 3\sigma$ con la velocidad media	92
5.11. Histograma y distribución normal para 5000 valores de velocidad	93
6.1. Detalle de la articulación en el vértice de la cruceta empleada	95
6.2. Esquema del mallado de una cruceta	96
6.3. Esquema del modelo completo sin viento	97
6.4. Condiciones de contorno del modelo completo sin viento	98
6.5. Desplazamiento total en los vertices del modelo sin viento	99
6.6. Deformación en Y a lo largo del cable	99
6.7. Deformación total del modelo sin viento	100
6.8. Deformación por pasos del modelo con viento estático	101
6.9. Variación de q con el ángulo para $v=140$ km/h	102
6.10. Desplazamiento total máximo en los vértices sin carga en las crucetas con viento paralelo a la línea	103
6.11. Desplazamiento total máximo en los vértices con carga en las crucetas con viento paralelo a la línea	103
6.12. Cruceta girada	104
6.13. Convergencia del modelo con viento estático con giro de las crucetas	104
6.14. Deformación máxima del modelo transitorio sin estabilización	105

6.15. Deformación máxima del modelo transitorio con estabilización	106
6.16. Deformación máxima en Z en los vértices para el modelo de viento dinámico uniforme con ejemplo de giro de la cruceta	107
7.1. Curvas de desplazamiento para 2 vanos de 300 m.	110
7.2. Curvas de desplazamiento para 3 vanos de 300 m.	111
7.3. Curvas de desplazamiento para 4 vanos de 300 m.	111
7.4. Curvas de desplazamiento para 5 vanos de 300 m.	111
7.5. Curvas de desplazamiento para 6 vanos de 300 m.	112
7.6. Curvas de desplazamiento para 7 vanos de 300 m.	112
7.7. Curvas de desplazamiento para 8 vanos de 300 m.	112
7.8. Curvas de desplazamiento para 9 vanos de 300 m.	113
7.9. Curvas de desplazamiento para 10 vanos de 300 m.	113
7.10. Superficie de estabilidad en las crucetas para 2 vanos de 300 m.	114
7.11. Superficie de estabilidad en los vanos para 2 vanos de 300 m.	114
7.12. Superficie de estabilidad en las crucetas para 3 vanos de 300 m.	114
7.13. Superficie de estabilidad en los vanos para 3 vanos de 300 m.	115
7.14. Superficie de estabilidad en las crucetas para 4 vanos de 300 m.	115
7.15. Superficie de estabilidad en los vanos para 4 vanos de 300 m.	115
7.16. Superficie de estabilidad en las crucetas para 5 vanos de 300 m.	116
7.17. Superficie de estabilidad en los vanos para 5 vanos de 300 m.	116
7.18. Superficie de estabilidad en las crucetas para 6 vanos de 300 m.	116
7.19. Superficie de estabilidad en los vanos para 6 vanos de 300 m.	117
7.20. Superficie de estabilidad en las crucetas para 7 vanos de 300 m.	117
7.21. Superficie de estabilidad en los vanos para 7 vanos de 300 m.	117
7.22. Superficie de estabilidad en las crucetas para 8 vanos de 300 m.	118
7.23. Superficie de estabilidad en los vanos para 8 vanos de 300 m.	118
7.24. Superficie de estabilidad en las crucetas para 9 vanos de 300 m.	118
7.25. Superficie de estabilidad en los vanos para 9 vanos de 300 m.	119
7.26. Superficie de estabilidad en las crucetas para 10 vanos de 300 m.	119
7.27. Superficie de estabilidad en los vanos para 10 vanos de 300 m.	119
7.28. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 2 vanos de 300 m.	120
7.29. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 3 vanos de 300 m.	120
7.30. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 4 vanos de 300 m.	120
7.31. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 5 vanos de 300 m.	121
7.32. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 6 vanos de 300 m.	121
7.33. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 7 vanos de 300 m.	121
7.34. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 8 vanos de 300 m.	122
7.35. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 9 vanos de 300 m.	122
7.36. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 10 vanos de 300 m.	122
7.37. Curvas de desplazamiento para 2 vanos de 450 m.	123
7.38. Curvas de desplazamiento para 3 vanos de 450 m.	123
7.39. Curvas de desplazamiento para 4 vanos de 450 m.	123
7.40. Curvas de desplazamiento para 5 vanos de 450 m.	124
7.41. Curvas de desplazamiento para 6 vanos de 450 m.	124
7.42. Curvas de desplazamiento para 7 vanos de 450 m.	124
7.43. Curvas de desplazamiento para 8 vanos de 450 m.	125
7.44. Curvas de desplazamiento para 9 vanos de 450 m.	125
7.45. Curvas de desplazamiento para 10 vanos de 450 m.	125
7.46. Superficie de estabilidad en las crucetas para 2 vanos de 450 m.	126

7.47. Superficie de estabilidad en los vanos para 2 vanos de 450 m.	126
7.48. Superficie de estabilidad en las crucetas para 3 vanos de 450 m.	126
7.49. Superficie de estabilidad en los vanos para 3 vanos de 450 m.	127
7.50. Superficie de estabilidad en las crucetas para 4 vanos de 450 m.	127
7.51. Superficie de estabilidad en los vanos para 4 vanos de 450 m.	127
7.52. Superficie de estabilidad en las crucetas para 5 vanos de 450 m.	128
7.53. Superficie de estabilidad en los vanos para 5 vanos de 450 m.	128
7.54. Superficie de estabilidad en las crucetas para 6 vanos de 450 m.	128
7.55. Superficie de estabilidad en los vanos para 6 vanos de 450 m.	129
7.56. Superficie de estabilidad en las crucetas para 7 vanos de 450 m.	129
7.57. Superficie de estabilidad en los vanos para 7 vanos de 450 m.	129
7.58. Superficie de estabilidad en las crucetas para 8 vanos de 450 m.	130
7.59. Superficie de estabilidad en los vanos para 8 vanos de 450 m.	130
7.60. Superficie de estabilidad en las crucetas para 9 vanos de 450 m.	130
7.61. Superficie de estabilidad en los vanos para 9 vanos de 450 m.	131
7.62. Superficie de estabilidad en las crucetas para 10 vanos de 450 m.	131
7.63. Superficie de estabilidad en los vanos para 10 vanos de 450 m.	131
7.64. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 2 vanos de 450 m.	132
7.65. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 3 vanos de 450 m.	132
7.66. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 4 vanos de 450 m.	132
7.67. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 5 vanos de 450 m.	133
7.68. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 6 vanos de 450 m.	133
7.69. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 7 vanos de 450 m.	133
7.70. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 8 vanos de 450 m.	134
7.71. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 9 vanos de 450 m.	134
7.72. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 10 vanos de 450 m.	134
7.73. Superficie de estabilidad en función del número de vanos en las crucetas para vanos de 300 m y viento estático de 140 km/h.	137
7.74. Superficie de estabilidad en meseta en función del número de vanos en las crucetas para vanos de 300 m y viento estático de 140 km/h.	138
7.75. Superficie de estabilidad en función del número de vanos en los mismos para vanos de 300 m y viento estático de 140 km/h.	138
7.76. Superficie de estabilidad en función del número de vanos en las crucetas para vanos de 450 m y viento estático de 140 km/h.	138
7.77. Superficie de estabilidad en meseta en función del número de vanos en las crucetas para vanos de 450 m y viento estático de 140 km/h.	139
7.78. Superficie de estabilidad en función del número de vanos en los mismos para vanos de 450 m y viento estático de 140 km/h.	139
7.79. Superficies de estabilidad de referencia	140
8.1. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 6 vanos de 450 m con serie de 5000 s de viento dinámico de 140 km/h de valor pico e incidencia de 60°	142
8.2. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 5 vanos de 450 m con serie de 5000 s de viento dinámico de 132 km/h de valor pico e incidencia de 60°	142
8.3. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 5 vanos de 450 m con serie de 200 s de viento dinámico de 132 km/h de valor pico e incidencia de 60°	143
8.4. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con serie de 200 s de viento dinámico de 140 km/h de valor pico e incidencia de 60°	143
8.5. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h a 60°	144

8.6. Desplazamientos máximos en Z de los vanos para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h a 60°	144
8.7. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h a 60°	145
8.8. Distribución de probabilidad de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s	146
8.9. Probabilidad acumulada de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s .	146
8.10. Distribución de probabilidad de los picos de desplazamiento máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s	147
8.11. Probabilidad acumulada de los picos de desplazamiento máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s	147
8.12. Series de desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h variando el ángulo de incidencia	148
8.13. Desplazamiento máximo en Z para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h variando el ángulo	149
8.14. Diagramas de caja y bigotes del desplazamiento máximo en Z para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h variando el ángulo	149
8.15. Series de desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento a 60° variando la velocidad pico	150
8.16. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento a 60° variando la velocidad	151
8.17. Diagramas de caja y bigotes del desplazamiento máximo en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento a 60° variando la velocidad pico	151
8.18. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido pico de 140 km/h a 60°	152
8.19. Desplazamientos máximos en Z de los vanos para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido pico de 140 km/h a 60°	153
8.20. Distribución de probabilidad de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento distribuido pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s	153
8.21. Probabilidad acumulada de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento distribuido pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s	154
8.22. Distribución de probabilidad de los picos de desplazamiento máximo en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento distribuido pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s	154
8.23. Probabilidad acumulada de los picos de desplazamiento máximo en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento distribuido pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s	155
8.24. Series de desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido pico de 140 km/h variando el ángulo de incidencia . .	156
8.25. Desplazamiento máximo en Z para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido pico de 140 km/h variando el ángulo	157
8.26. Diagramas de caja y bigotes del desplazamiento máximo en Z para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido pico de 140 km/h variando el ángulo	157
8.27. Series de desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido a 60° variando la velocidad pico	158

8.28. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido a 60° variando la velocidad	159
8.29. Diagramas de caja y bigotes del desplazamiento máximo en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido a 60° variando la velocidad pico	159
8.30. Comparativa de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h a 60°	160
8.31. Comparativa de los desplazamientos máximos en Z de los vanos para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h a 60°	160
8.32. Comparativa de la distribución de probabilidad de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s	161
8.33. Comparativa de la probabilidad acumulada de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s	161
8.34. Comparativa de la distribución de probabilidad de los picos de máximo desplazamiento en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s	162
8.35. Comparativa de la probabilidad acumulada de los picos de máximo desplazamiento en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento distribuido pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s	162
8.36. Comparativa del desplazamiento máximo en Z para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h variando el ángulo	163
8.37. Comparativa del desplazamiento máximo en Z para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento con ángulo de incidencia de 60° variando la velocidad pico objetivo	164

Índice de tablas

2.1. Ventajas y desventajas de las líneas compactas con crucetas aislantes (Lakhapati et al. 2014)	35
2.2. Clasificación técnica de configuraciones de brazo	36
2.3. Comparativa de la aproximación parabólica con $c = 1767$ m	50
2.4. Factor del terreno k_T y parámetro de irregularidades del terreno z_0 para las diferentes categorías del terreno según el Eurocódigo ENV 1991-2-4	51
2.5. Valores de distintos factores según UNE EN 50341-1:2004	52
2.6. Valores de z_0 según la clasificación revisada de Wieringa 1992.	55
3.1. Características del conductor AL/AW Condor	67
3.2. Tense admisible de la línea	68
3.3. Tabla de tendido para 20 °C	69
3.4. Características cruceta ACSR DX Condor	70
5.1. Parámetros escogidos para el modelo de vientos	84
5.2. Modos del código en función del modelo de potencia espectral del viento elegido	85
6.1. Comparativa de fuerza aplicada en la cruceta para $d_{\text{cable}} = 27$ mm	102

Acrónimos

<i>AR</i>	Autorregresivo
<i>ARMA</i>	Autorregresivo de media móvil (Autoregressive with Mobile Average)
<i>CAD</i>	Computer Assited Drawing
<i>CDF</i>	Función de Distribución Acumulada
<i>CIGRE</i>	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
<i>EDS</i>	Tensión de Cada Día
<i>EN</i>	European Norm
<i>FEM</i>	Método de elementos finitos (Finite Elements Method)
<i>ICAI</i>	Instituto Católico de Artes e Industrias
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>PDF</i>	Función de Distribución de Probabilidad
<i>PFC</i>	Proyecto Fin de Carrera
<i>PSD</i>	Densidad espectral de potencia (Power Spectral Density)
<i>PTV</i>	Principio de Trabajos Virtuales
<i>RD</i>	Real Decreto
<i>REE</i>	Red Eléctrica de España
<i>RIV</i>	Riesgo de interferencias de radio
<i>RLAT</i>	Reglamento de Líneas de Alta Tensión
<i>UNE</i>	Una Norma Española
<i>WMO</i>	World Meteorological Organization

Símbolos

α	Ángulo entre brazo y riostra
α	Factor del terreno para velocidad media
α	Peso de amortiguamiento numérico de las masas
β	Peso de amortiguamiento numérico de la rigidez
Δ	Desplazamiento exterior
δ	Constante arbitrariamente pequeña
δ	Desplazamiento interno
ζ	Factor de amortiguamiento
η	Coordenada horizontal en ejes locales
ϑ	Ángulo el eje de rotación de la cruceta y la riostra
θ	Giro
μ	Media
ν	Coefficiente de Poisson
ξ	Coordenada vertical en ejes locales
ρ	Densidad
ρ	Función de autocorrelación
σ	Desviación típica
φ	Ángulo de rotación del vértice de la cruceta en la dirección de la línea
ω	Frecuencia angular
ω_n	Frecuencia natural
A	Área
A_{Pol}	Área proyectada en el área normal al viento
a_1, a_2	Longitud de los vanos adyacentes
B	Fuerza en la riostra
B_j	Proceso de Lévy asociado al elemento j
C_D	Coefficiente de arrastre
C_d	Factor de decaimiento
c	Parámetro de catenaria
d	Diámetro
E	Módulo de Young
F	Fuerza
$F(s)$	Función de transferencia
f	Flecha
f_L	Frecuencia normalizada en L
G_g	Factor de ráfaga
G_s	Parámetro de vano
G_v	Factor asociado al terreno o la estructura
g	Aceleración de la gravedad
H	Fuerza horizontal contra la cruceta
H	Descomposición de Cholesky de S

h	Altura
I	Momento de inercia
i	Índice de fila
j	Índice de columna
K	Matriz de rigidez
k	Factor de rigidez
k_T	Factor del terreno
L	Longitud de vano
L_0	Longitud inicial del cable
L_f	Longitud final del cable
Δl	Incremento de longitud
M	Momento angular
M	Matriz de masas
m	Masa
N	Distribución normal
N	Fuerza axial
n	Frecuencia en Hz
n	Número de vanos
O	Origen absoluto de coordenadas
P	Fuerza en el brazo
P	Carga externa
p	Punto de estudio en coordenadas lagrangianas
q	Carga
R	Matriz de autocorrelaciones
R	Matriz de rotación
r_σ	Resolución de la relación de desviaciones típicas
T	Fuerza en la dirección de la línea
T	Temperatura
t	Tiempo
S	Función de densidad espectral
S_{ND}	Función de densidad espectral normalizada
s	Coordenada lagrangiana relativa
u	Componente de turbulencia de la velocidad del viento
u	Carga interior
u	Desplazamiento
\bar{u}	Componente media de la velocidad del viento
V	Fuerza vertical
V_V	Velocidad de viento de diseño
v_h	Velocidad en la altura h
$v_{R(II)}$	Velocidad de referencia para Tipo II
W	Peso total del cable
x	Coordenada horizontal en ejes absolutos
y	Coordenada vertical en ejes absolutos
Z	Fuerza horizontal a favor de la cruceta
z	Coordenada perpendicular en ejes absolutos
z	Altura
z_0	Parámetro de irregularidades

PARTE I

MEMORIA



Capítulo 1

Introducción

En los últimos años se ha extendido el uso de crucetas aislantes pivotantes en las líneas de alta tensión. Estos elementos permiten el movimiento relativo de la línea respecto de la torre que las soporta, lo que conlleva una reducción de las dimensiones de la misma. De esta forma se consigue una línea más eficiente y sostenible a todos los niveles. Por una parte, se reduce el uso de materiales, lo que repercute en un beneficio económico y medioambiental. Estas nuevas torres reducen también el impacto ambiental de la línea. Además, se limita el movimiento de la línea, por lo que su servidumbre de paso será menor. Este tipo de líneas compactas son consideradas según el CIGRE como la alternativa de futuro para el transporte de energía eléctrica [1].



Figura 1.1. Línea compacta con crucetas aislantes pivotantes

Sin embargo, debido a la existencia de partes móviles y la no linealidad del sistema, es necesario un diseño más exhaustivo y complejo de la línea con el fin de que cumpla las condiciones de seguridad.

Por otra parte, la naturaleza aleatoria del viento conlleva la necesidad de realizar una serie de cálculos y mediciones estadísticas que permitan controlar los parámetros de diseño. La normativa vigente [2, 3, 4] no está establecida con este tipo de líneas en mente, por lo que es necesario comprobar que los parámetros indicados en la misma para el cálculo de cargas de viento son los adecuados.

Debido a todo esto, resulta evidente la necesidad de una herramienta que permita cumplir las exigencias mencionadas. Dada la complejidad de los cálculos y la baja viabilidad de realizar ensayos físicos, el análisis por elementos finitos se muestra como la opción indicada. Gracias a poder realizar las simulaciones por elementos finitos en un tiempo razonable, es posible completar un análisis detallado.

Respecto al análisis de las crucetas, se han realizado estudios de cómo afectan los parámetros de estas a su comportamiento baja carga estática [5, 6, 7]. Esto lleva a la obtención de un diseño óptimo de la cruceta, pero no a un análisis válido del comportamiento de la línea en su conjunto. También se han desarrollado modelos válidos de las crucetas y los cables para emplear el método de análisis por elementos finitos [8]. Los estudios que comparten más similitudes con este proyecto son los análisis de estabilidad realizados en [9], pero siempre bajo carga estática y empleando una herramienta de cálculo propia, lo que limita la difusión del modelo.

1.1. Motivación

El desarrollo de un modelo válido de simulación de líneas eléctricas con crucetas aislantes pivotantes permitiría la obtención de resultados fiables dentro de unos límites sin necesidad de ensayo. Además, el uso de un software de simulación por elementos finitos tan extendido como ANSYS hace que los modelos y resultados obtenidos sean de fácil aplicación y repetición. Estas mismas simulaciones servirían de base para futuros ensayos y diseños sin la necesidad de desarrollo de un software específico.

Por otra parte, el análisis estocástico de la respuesta de la línea bajo los efectos del viento real, hace que sea posible asegurar unas pautas con las cuales la línea sería segura y con qué probabilidad se superarían determinados valores. Esto haría que los futuros diseños de líneas fueran mucho más precisos. Diseñando solo bajo la normativa actual, se tiende a sobredimensionar los elementos de las torres para garantizar su seguridad. Esto se debe a que la norma no está pensada para este tipo de líneas, sino para las convencionales. A partir de estos estudios sería posible realizar un análisis cuantitativo de los riesgos del cable. En última instancia, a partir de las pautas obtenidas se podría desarrollar una normativa específica para las líneas compactas con crucetas aislantes pivotantes.

En resumen, el desarrollo del proyecto queda justificado debido a su relevancia para posibles investigaciones derivadas y por su posible aplicación generalizada en el diseño de líneas de transporte eléctrico con este tipo de crucetas.

1.2. Objetivos

■ Objetivo 1: Creación de un modelo de línea válido en ANSYS

Para llevar cualquier simulación a cabo es necesario primero obtener un modelo sobre el que aplicar el método de elementos finitos. En este caso, el objetivo es desarrollar una serie de geometrías y condiciones de contorno que permitan obtener resultados fiables una vez sometidos a cargas reales. En la medida de lo posible, se buscará que el modelo sea lo más eficiente y flexible posible.

Este objetivo incluye el desarrollo del modelo de catenaria, el modelo de tensión preliminar y en carga para un solo vano, los modelos de las crucetas y el modelo de tensión preliminar y en carga para varios vanos.

■ Objetivo 2: Desarrollo de un modelo de vientos real

En segundo lugar, se busca desarrollar un modelo de cargas de viento a partir de los modelos teóricos de simulación de vientos reales. Este modelo se aplicará posteriormente a la línea, por lo que debe poder controlarse todas sus variables.

■ Objetivo 3: Obtención de la respuesta estocástica de la línea

Por último, el objetivo final es obtener la respuesta estocástica de la línea. Esto consiste en calcular cómo se comportaría la línea en función de la carga de viento. Este objetivo incluye la respuesta bajo viento estático, viento dinámico uniforme y viento dinámico distribuido. Además, se realizará un análisis estadístico de los datos con el fin de obtener las pautas de comportamiento básico de este tipo de líneas.

1.3. Metodología

Los pasos del método básico seguido para la obtención y análisis de resultados se muestran en la Figura 1.2.

1. Modelo de línea

En primer lugar, se calculará la curva catenaria discretizada con Matlab a partir de la aproximación parabólica y las rectas de las crucetas son añadidas. A su vez, se calculará la longitud real del cable, que permitirá desarrollar el modelo preliminar. Estos datos se importarán al editor de geometrías 3D SpaceClaim, donde se escribirá un programa para automatizar el proceso, generando los modelos geométricos. A continuación, se implementará el modelo preliminar en ANSYS para el cálculo de la pretensión inicial. Esta tensión inicial se aplica al modelo completo, al cual previamente se ha introducido el modelo geométrico de la curva catenaria, las crucetas y las condiciones de contorno correspondientes.

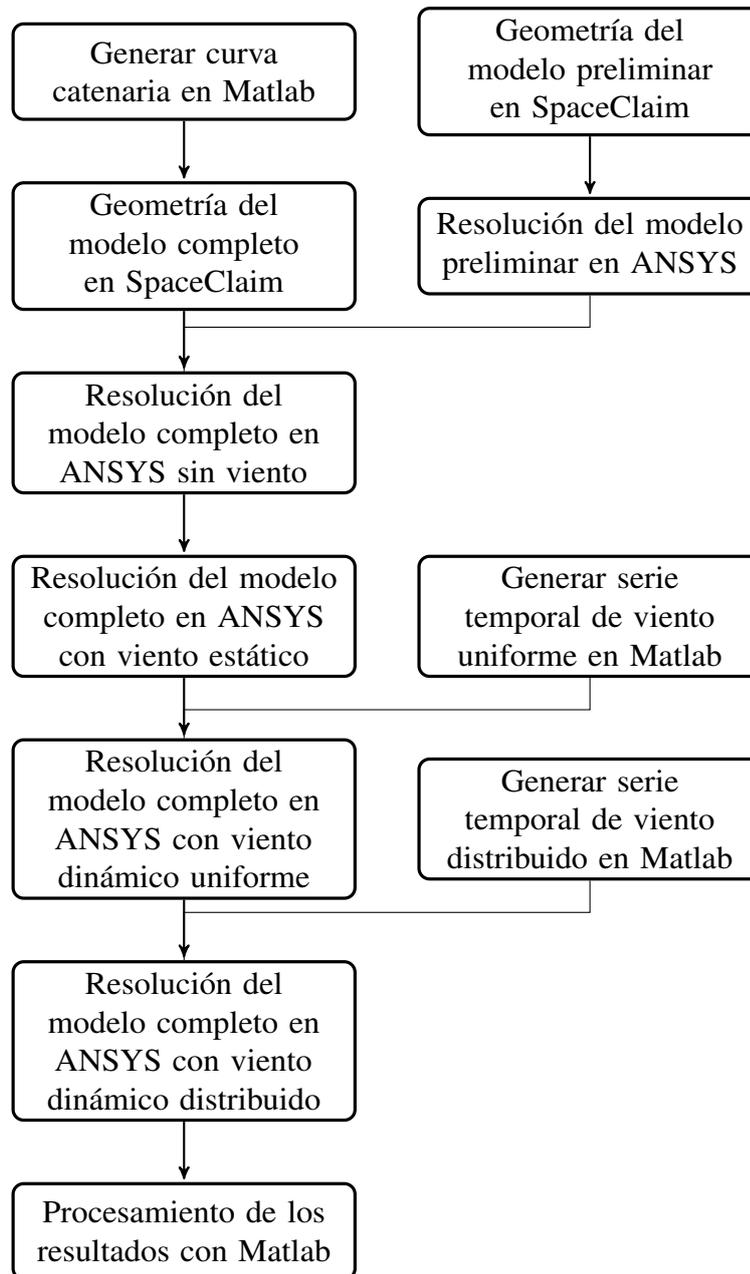


Figura 1.2. Pasos seguidos para la generación y resolución del modelo

2. Modelo de viento

Las series temporales de viento se generarán con un modelo en dos componentes. La componente de turbulencia se modelará por un proceso estocástico gaussiano multivariante basado en espectros en frecuencia. La componente media se calculará de tal manera que los máximos de la serie de viento cumplan las velocidades indicadas por la normativa.

3. Obtención y análisis de resultados

Para la obtención de resultados se aplicará una carga de viento estático, una carga de viento dinámico uniforme y una carga de viento dinámico distribuido. En cada uno de los modelos se recogerán datos de los desplazamientos de los vértices de las crucetas y del punto medio de los vanos. Se analizará el desplazamiento en dirección perpendicular a la línea.

En el caso del modelo de viento estático, se tomarán dos series de 300 y 450 m de longitud de vano, respectivamente, y se variará el número de vanos, el ángulo de incidencia y la velocidad del viento. Con ello se generarán las curvas de desplazamientos de cada uno de los puntos y las superficies de estabilidad para cada número de vanos distinto. Posteriormente, se generarán las superficies de estabilidad para la velocidad de normativa en función del número de vanos y el ángulo de incidencia, así como las mesetas de inestabilidad en las cuales se supera el desplazamiento necesario para romper la distancia de seguridad con el poste.

Para los modelos de viento dinámico se fijará la longitud y el número de vanos y se generará una serie con ángulo crítico y velocidad pico según normativa, realizándose su análisis estadístico. A continuación, se variará el ángulo de incidencia y la velocidad pico, comparando los datos obtenidos.

1.3.1. Plan de trabajo

El plan de trabajo consiste en los siguientes hitos:

- 1. Revisión del estado del arte**
- 2. Aprendizaje de ANSYS**
- 3. Generación de la curva catenaria en Matlab**
 - Discretización y cálculo de la curva
 - Cálculo de las crucetas
 - Generación y exportación de los puntos
 - Cálculo de la longitud inicial
- 4. Generación de la serie temporal de viento**
 - Cálculo de los espectros
 - Cálculo del modelo estocástico
 - Ajuste estadístico
 - Validación
- 5. Desarrollo de los modelos geométricos**
 - Creación del programa de SpaceClaim
 - Creación del modelo preliminar
 - Creación del modelo completo
- 6. Desarrollo del modelo para un vano**
 - Creación del programa de SpaceClaim
 - Creación del modelo preliminar
 - Creación del modelo completo

7. Desarrollo del modelo para varios vanos

- Creación del programa de SpaceClaim
- Creación del modelo preliminar
- Creación del modelo completo

8. Resolución y análisis de los modelos bajo viento estático

- Resolución del modelo variando el número de vanos y el ángulo de incidencia para vanos de 450 m
- Resolución del modelo variando el número de vanos y el ángulo de incidencia para vanos de 300 m
- Cálculo de las curvas de desplazamiento
- Cálculo de las superficies de estabilidad
- Cálculo de las mesetas de inestabilidad

9. Resolución y análisis de los modelos bajo viento dinámico uniforme

- Resolución de la serie de 30 simulaciones con ángulo de incidencia crítico y velocidad pico máxima
- Resolución del modelo variando el ángulo
- Resolución del modelo variando la velocidad pico
- Análisis estadístico
- Comparación y análisis de los resultados

10. Resolución y análisis de los modelos bajo viento dinámico distribuido

- Resolución de la serie de 30 simulaciones con ángulo de incidencia crítico y velocidad pico máxima
- Resolución del modelo variando el ángulo
- Resolución del modelo variando la velocidad pico
- Análisis estadístico
- Comparación y análisis de los resultados

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Crucetas de líneas de transporte eléctrico de alta tensión

Algunos de los principales problemas a la hora de afrontar el diseño de grandes líneas de transporte eléctrico son la servidumbre y el impacto visual. Como alternativa a las configuraciones convencionales surgen las líneas compactas. Su diseño permite reducir el tamaño de la línea, aumentando la capacidad de transporte y reduciendo a su vez la cantidad de materiales empleados. Su desarrollo ha estado ligado a la creación de nuevos materiales aislantes, perfilándose como la opción predominante en las líneas de futura construcción.

2.1.1. Diseño y evolución de las crucetas de transporte eléctrico en líneas compactas

Tradicionalmente el aislamiento de las líneas de alta tensión consiste en torres con aisladores colgantes a diferentes alturas como los de la Figura 2.1. El objetivo del aislador es impedir el paso de corriente a la cruceta y alejar la línea de la propia torre. Para ello se diseñan aisladores con suficiente longitud, pero eso conlleva un aumento del arco de balanceo con el viento. Esto limita la capacidad de transporte de la línea, ya que la distancia de seguridad a la torre depende del voltaje de la línea. La Figura 2.2 muestra un esquema de los límites del aislador.

El primer avance en el diseño fue el uso de aisladores en V (Figura 2.3). Este tipo de aisladores limita el movimiento de la línea pero provoca que los esfuerzos los absorban tanto los aisladores como la cruceta. Esto hace que el peso del conjunto sea mayor y haya que dimensionar la torre en concordancia. En un primer momento se emplean los tradicionales aisladores de porcelana, pero con el desarrollo de materiales compuesto que permiten reducir el peso y aumentar las prestaciones su uso se ha generalizado.

También gracias a los materiales compuestos aparecen los brazos aislantes adheridos al poste (Figura 2.4). Tienen el inconveniente que no pueden usarse para líneas con cables de mucha sección o gran longitud de vanos, puesto que las cargas sobre el brazo producen principalmente flexión y la capacidad del brazo para su absorción es limitada. Se emplean mayoritariamente en líneas ya existentes en sustitución de otros aisladores anteriores, puesto que mejoran la estética de la línea y tienen unas prestaciones similares a las de los modelos más antiguos.



Figura 2.1. Línea de alta tensión convencional [10]

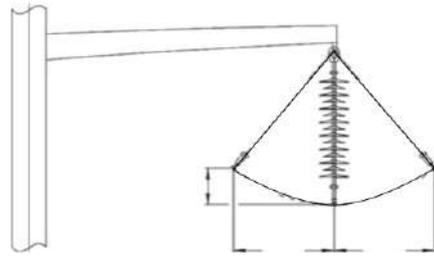


Figura 2.2. Esquema del balanceo de un aislador convencional [10]



Figura 2.3. Soporte con aisladores en V [10]

Para reducir los esfuerzos verticales del brazo se le puede añadir un aislante suspendido a la cruceta como el de la Figura 2.5. Este diseño es el antecedente de las crucetas aislantes pivotantes. La innovación parte de unir el aislante vertical (la riostra) directamente al poste de la torre, creando una V horizontal (Figura 2.6). En la cruceta aislante el brazo trabaja generalmente a compresión y la riostra a tracción. Además, esta configuración permite crear una unión pivotante de la cruceta al poste, generando una fuerza restauradora que compense las cargas en la dirección de la línea.

El desarrollo de líneas compactas con crucetas aislantes comenzó en los años 70 y 80 en Estados Unidos [11] pero su aplicación no se extendió hasta la década de los 90. La primera línea de alta tensión se construyó en Suiza en 1998 entre Lausanne y Ginebra (Figura 2.7). Debido



Figura 2.4. Brazo aislante [10]



Figura 2.5. Brazo aislante suspendido [10]

al escarpado paisaje entre las ciudades, la tierra disponible limitaba mucho las opciones para ampliar la línea de transporte, por lo que se recurrió a postes con crucetas aislantes pivotantes. Fue la primera línea de este tipo de 400 kV, creando precedente para futuras instalaciones.

Los postes de crucetas aislantes también han sido de utilidad en el desarrollo de sistemas de mantenimiento de emergencia de líneas de transporte. El rápido montaje de este tipo de crucetas facilita la reparación y mantenimiento en líneas críticas sujetas a desgaste importante, o la redirección de intersecciones. La ligereza de los aisladores de crucetas y su resistencia favorecen el uso de este tipo de sistemas (Figura 2.9).



Figura 2.6. Cruceta en V horizontal [10]

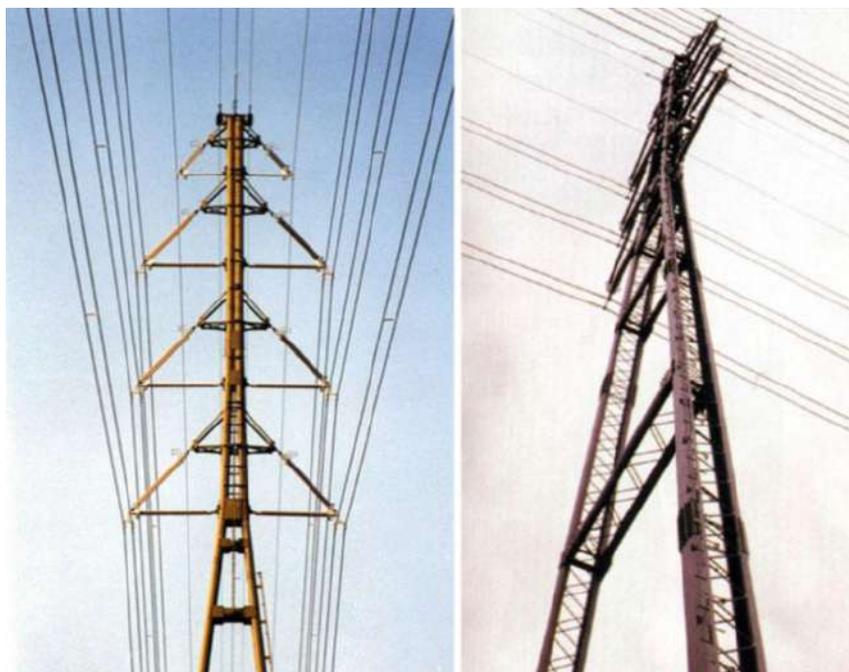


Figura 2.7. Primera línea compacta de alta tensión con crucetas aislantes [10]

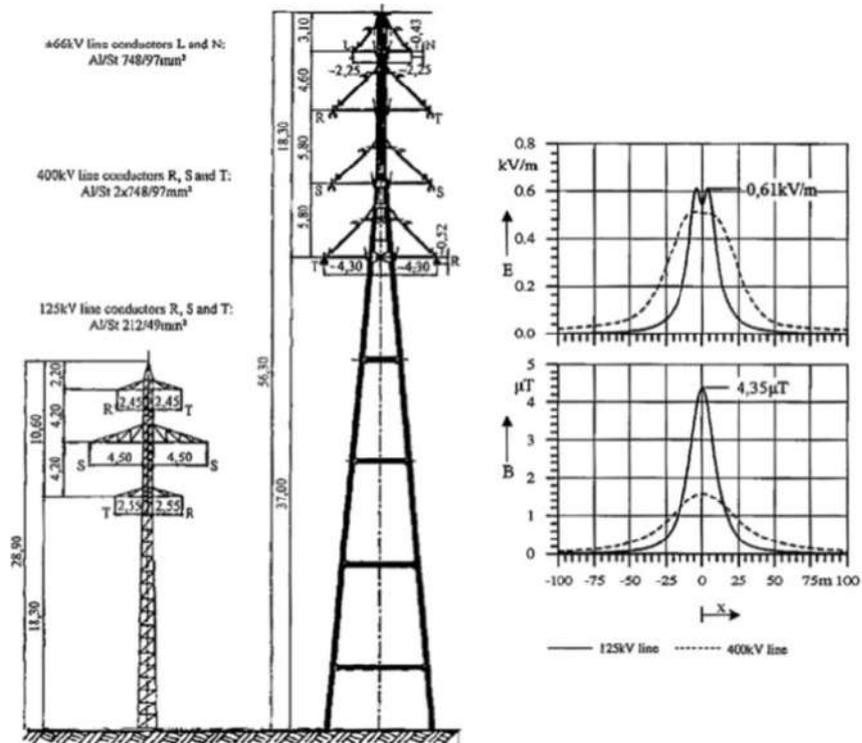


Figura 2.8. Comparación de la torre con crucetas pivotantes y la línea antigua [10]



Figura 2.9. Sistemas de mantenimiento de emergencia [10]



Figura 2.10. Línea compacta de 420 kV en Dubai junto a la anterior línea existente [10]

En la actualidad, se suelen instalar redes con crucetas pivotantes en líneas de materiales compuestos con tensiones elevadas. Un ejemplo de ello es la línea doble de 420 kV con crucetas aislantes pivotantes de núcleo sólido compuesto instalada entre dos subestaciones de Dubai entre 2004 y 2006. El espacio disponible era un corredor de 4.5 km de largo y 11 m de ancho, limitado por la línea ya existente y una autopista (Figura 2.10). En este caso se emplearon conjuntamente las innovaciones en materiales compuestos para las crucetas, nuevos métodos de fabricación de los postes y la simulación de modelos por el método de elementos finitos para la resistencia de las crucetas creados específicamente para el proyecto.

En Europa también han tenido un gran desarrollo, gracias especialmente a su bajo impacto visual [12]. En los Países Bajos instalaron en 2009 las llamadas Windtracks (Figura 2.11), líneas de 420 kV con postes asimétricos y crucetas aislantes pivotantes. Su novedoso diseño tiene por objetivo aprovechar el terreno del país (escaso y poco firme en muchas zonas) y ser estéticamente atractivo. Se tuvo que modificar el ángulo de las crucetas para compensar la asimetría del poste. La última instalación de línea compacta con crucetas pivotantes de gran envergadura fue realizada en España en 2013 por Red Eléctrica de España (REE) para modernizar la conexión de 220 kV entre las subestaciones de Mudarra y La Olma, a las afueras de Valladolid (Figura 2.12). Actualmente están proyectadas dos líneas más en Reino Unido y Austria [12], respectivamente, y en Dinamarca han comenzado las pruebas de un nuevo diseño de pylon en V con crucetas aislantes rígidas para una mayor capacidad de transporte en líneas de 420 kV (Figura 2.13).

Las ventajas y desventajas de las líneas compactas en la actualidad pueden resumirse en la Tabla 2.1, elaborada por Lakhapati en 2014 [1]. Como se puede ver, la mayoría de desventajas se pueden subsanar por medio de un adecuado diseño de la línea, las torres y los medios de instalación. Un ejemplo de ello puede ser el montaje previo de las crucetas empleando soportes temporales de aluminio para garantizar la seguridad del operario en el montaje y el tendido del cable. En otros casos, se han empleado postes modulares que simplifican la instalación de las crucetas y ahorran costes en comparación con las estructuras tradicionales.



Figura 2.11. Línea compacta Windtrack de 420 kV en Países Bajos [12]



Figura 2.12. Línea compacta de 220 kV con crucetas aislantes pivotantes en Valladolid [12]

2.1.2. Crucetas aislantes: Diseño y características

En general, existen dos tipos de crucetas aislantes: crucetas rígidas y crucetas pivotantes o de V horizontal. Ambos se diferencian principalmente en que en las crucetas rígidas el brazo está unido al poste de manera fija, mientras que en las pivotantes se permite su giro. Esto hace que las crucetas rígidas tengan que soportar esfuerzos en la dirección de la línea, lo que provoca importantes esfuerzos de torsión sobre el apoyo, mientras que las pivotantes pueden rotar hasta una nueva posición de equilibrio. Debido a esto, las crucetas rígidas suelen tener distinto ángulo entre el brazo y la riostra que las pivotantes, como se puede observar en la Figura 2.14.



Figura 2.13. Diseño experimental en Dinamarca de línea compacta de 420 kV con pilones en V y crucetas aislantes rígidas [12]

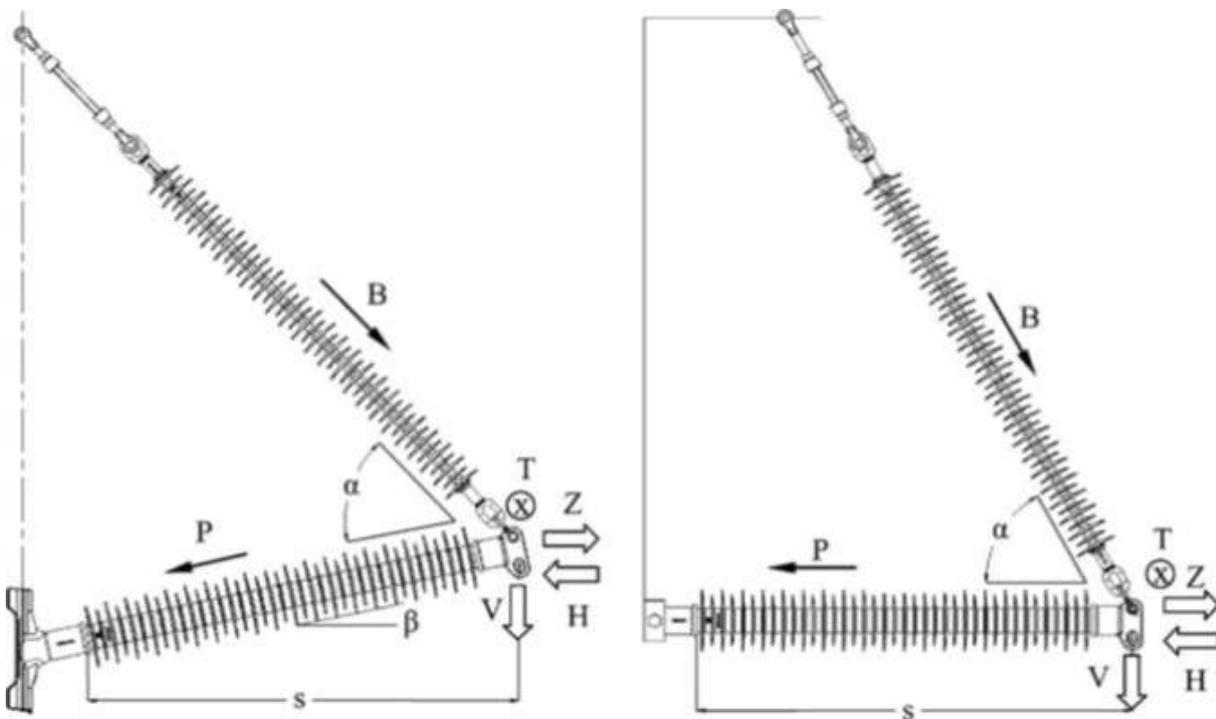


Figura 2.14. Esquema de una cruceta aislante rígida (izquierda) y una pivotante (derecha) [10]

Ventajas	Desventajas
Requieren menos terreno, ahorro en propiedades y tiempo necesario para los permisos	Longitudes de vano habitual pero no necesariamente más cortas
Ahorro en la construcción de la torre y los cimientos debido a los menores momentos flectores producidos por las crucetas más cortas comparadas con las tradicionales	Mayor riesgo de interferencias de radio (RIV) o efecto corona debido a la menor distancia entre fases del conductor, si la configuración del mismo es inapropiada o no se ha instalado adecuadamente
Configuraciones de torre más estéticas	Tendido de conductores más exigente
Reducción del campo electromagnético en tierra	El mantenimiento con línea activa puede ser un problema en las torres con circuitos dobles
Mayor capacidad de transporte por una menor impedancia característica	Problemas mecánicos de estabilidad, cuando el número de crucetas pivotantes es muy grande en relación con el viento in-situ
Redundancia a prueba de fallos por el uso de dos aisladores	Las crucetas aislantes son más caras que las configuraciones convencionales, pero los costes adicionales son despreciables en relación al ahorro

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de las líneas compactas con crucetas aislantes (Lakhatpati et al. 2014) [1]

Las fuentes de los esfuerzos que soportan las crucetas son varios: la fuerza vertical V proviene del peso del propio cable y la cruceta, la componente vertical del viento y otras incidencias en la línea, como hielo o nieve. La fuerza horizontal Z o H se originan esencialmente por el efecto del viento en el cable. La fuerza T , paralela a la línea, la generan el viento o posibles desequilibrios mecánicos en la línea. Tanto en las crucetas rígidas como en las pivotantes, la fuerza vertical V la absorbe mayoritariamente la riostra, ya que el ángulo α con el brazo es pequeño, provocando que esta trabaje a tensión pura. A su vez, la fuerza horizontal H (o Z , menos crítica) actúa haciendo que el brazo trabaje a compresión, pudiendo trabajar a tracción bajo determinadas configuraciones de viento. Esta compresión provoca que el brazo también pueda sufrir pandeo. Las dimensiones de las crucetas se diseñan en función de estas cargas. Las fuerzas P en el brazo y B en la riostra se pueden obtener fácilmente a partir del esquema anterior con las siguientes ecuaciones:

$$P = H \cdot \frac{\cos(\varphi + \vartheta)}{\sin(\alpha)} + V \cdot \frac{\sin(\varphi - \vartheta)}{\sin(\alpha)} \quad (2.1)$$

$$P = H \cdot \left[\frac{\cos(\varphi + \vartheta)}{\tan(\alpha)} - \sin(\varphi + \vartheta) \right] + V \cdot \left[\frac{\sin(\varphi + \vartheta)}{\tan(\alpha)} + \cos(\varphi - \vartheta) \right] \quad (2.2)$$

donde φ es el ángulo de rotación del vértice de la cruceta en la dirección de la línea y ϑ el ángulo el eje de rotación de la cruceta y la riostra. Para crucetas rígidas habría que tener en cuenta además el efecto de las fuerzas T en dirección de la línea, mientras que en la pivotante esos esfuerzos se absorben en la nueva posición de equilibrio.

En base a estos esfuerzos, se diseñan las dimensiones y los materiales de las crucetas. Además, se emplean diferentes medidas de seguridad adicionales para que en caso de fallo se garantice la integridad de la línea, como pueden ser el uso de uniones y mordazas de seguridad, sobredimensionado del brazo o duplicidad del mismo. En el caso de las crucetas pivotantes, la

factor crítico es el pandeo, determinando si se opta por un brazo de porcelana o material aislante, un brazo compuesto o un brazo doble. La Tabla 2.2 [1] muestra las distintas soluciones técnicas posibles a varios problemas de diseño y su viabilidad.

Propiedad / Característica	Brazo de material			
	Brazo Simple	compuesto con núcleo vacío	Brazo Híbrido	Brazo Doble
Peso	1	2	3	2
Rendimiento en condiciones de contaminación	1	2	2	3
Resistencia a la torsión y el pandeo	3	2	1	2
Fragilidad	1	1	3	1
Demanda técnica en la fabricación del aislador	1	3	1	1

Tabla 2.2. Clasificación técnica de configuraciones de brazo, 1=mejor, 3=peor. [1]

Las consideraciones anteriores se han realizado bajo el supuesto de una cruceta con una distribución de cargas ideal. No obstante, hay que destacar que las fuerzas no son aplicadas en el vértice exacto de la cruceta, sino que existe un desalineamiento entre el brazo y la riostra debido a la construcción de la propia cruceta, tal y como se puede ver en la Figura 2.15 [10]. Este hecho es cuanto más relevante en el caso de las crucetas pivotantes, ya que se diseñan con el pandeo del brazo como parámetro crítico y esta aplicación excéntrica afecta directamente a la carga que soporta. Si observamos los test de pandeo realizados por Baker [5] sobre crucetas aislantes pivotantes y la comparación con la curva teórica de pandeo (Figura 2.16), se puede apreciar una importante reducción en la carga crítica para las crucetas reales. Esto se debe a que el desalineamiento de la carga provoca flexión adicional sobre el brazo, reduciendo la carga crítica que soporta. Una de las soluciones empleadas para evitar este efecto es el uso de las llamadas fijaciones tipo “boomerang” (Figura 2.17). Este tipo de fijaciones modifican el ángulo entre brazo y riostra de tal manera que el vértice real coincida lo máximo posible con el punto de aplicación de las cargas, limitando la flexión por desalineamiento.

En el caso de las crucetas aislantes pivotantes se limitan las combinaciones de carga permisibles para evitar el fallo del brazo, asegurar las distancias mínimas a la torre y hacer que la riostra trabaje siempre a tracción. Siguiendo la Ecuación 2.2 para obtener la carga límite a la cuál la riostra trabaja a compresión, se establece la zona de esfuerzos límite. La Figura 2.18 muestra dicho diagrama para una cruceta típica de líneas de 230 kV con $\vartheta = 15^\circ$, $\alpha = 50^\circ$ y $\varphi = 65^\circ$ [5]. El mismo principio se sigue para crucetas rígidas, añadiendo el término longitudinal (Figura 2.19) [11].

2.1.3. Crucetas aislantes pivotantes: Comportamiento mecánico

Como ya se ha explicado anteriormente, una de las principales ventajas de las crucetas pivotantes es su capacidad para absorber esfuerzos en la dirección de la línea. Un desequilibrio de estos esfuerzos puede darse bien de forma brusca (como un fallo en el conductor) o de manera constante debido a cargas de viento o hielo. Las primeras suelen establecerse experimentalmente mediante test de impacto [10] o aplicando el método de elementos finitos (FEM). Los primeros resultados se obtuvieron para la línea de Suiza en 1998, y se observó que en el fallo aparecía un

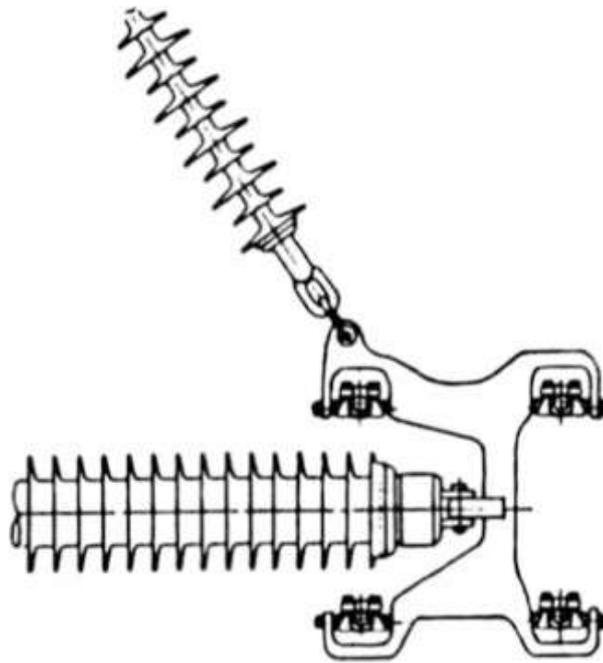


Figura 2.15. Unión en el vértice de la cruceta aislante con desalineamiento entre el brazo y la riostra [10]

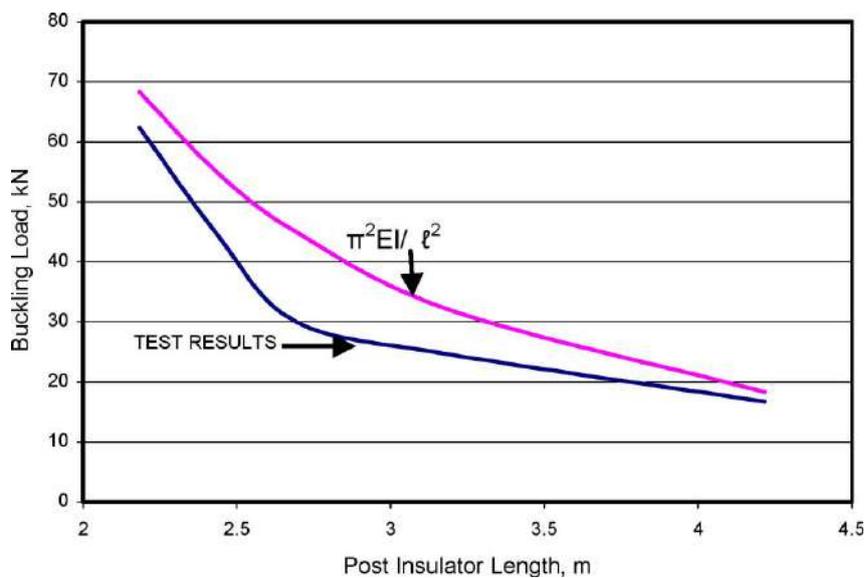


Figura 2.16. Test de pandeo en crucetas aislantes pivotantes con brazos de 63 mm de área con diferentes longitudes y comparación con la carga teórica [5]

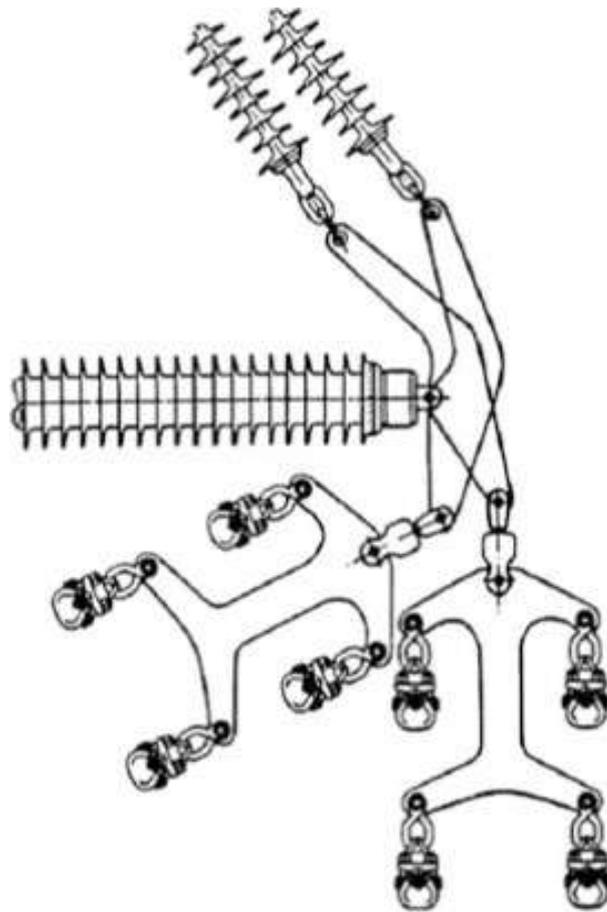


Figura 2.17. Esquema de unión tipo “boomerang” en dos posiciones distintas [10]

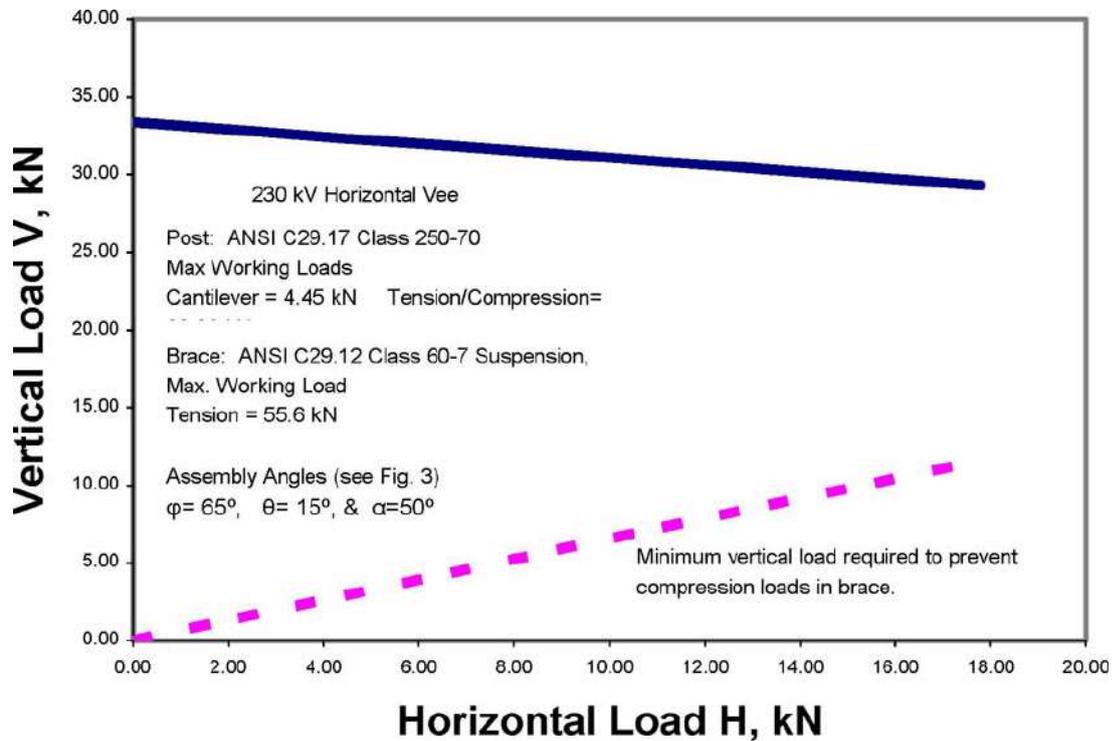


Figura 2.18. Carga vertical frente a horizontal para una cruceta pivotante típica de 230 kV [5]

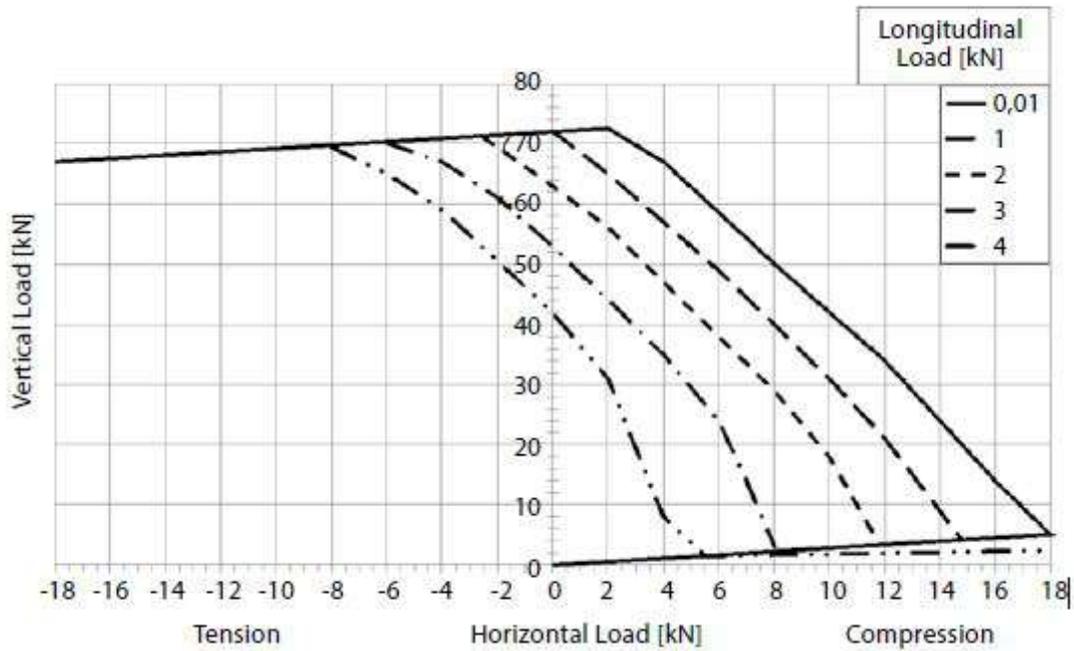


Figura 2.19. Diagramas de carga para cruceta rígida típica [11]

esfuerzo mayor en el brazo que la carga crítica. Este nuevo esfuerzo es debido a la aceleración producida por la rotación repentina de la cruceta, siguiendo las leyes de Newton. A día de hoy estos umbrales críticos en fallo se calculan mediante ensayos o simulación.

De más interés para el diseño de la línea es la estabilización de la cruceta en esfuerzos continuos. Cuando el sistema de esfuerzos sobre la cruceta se desestabiliza, esta pivota hasta una nueva posición de equilibrio. Esta desestabilización puede ser debida al viento, al hielo, vanos de distinta longitud (por ejemplo en zonas montañosas) o fuerzas de cortocircuito. Estos desplazamientos pueden poner en peligro la distancia de seguridad entre la línea y la torre, por lo que son un elemento a tener en cuenta en el diseño. En la Figuras 2.20 y 2.21 observamos un esquema de una cruceta en equilibrio sobre la que actúa una fuerza V [13].

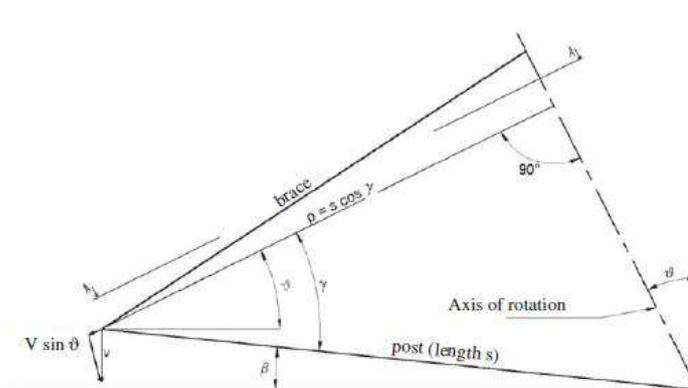


Figura 2.20. Esquema de la cruceta en equilibrio, vista lateral[10]

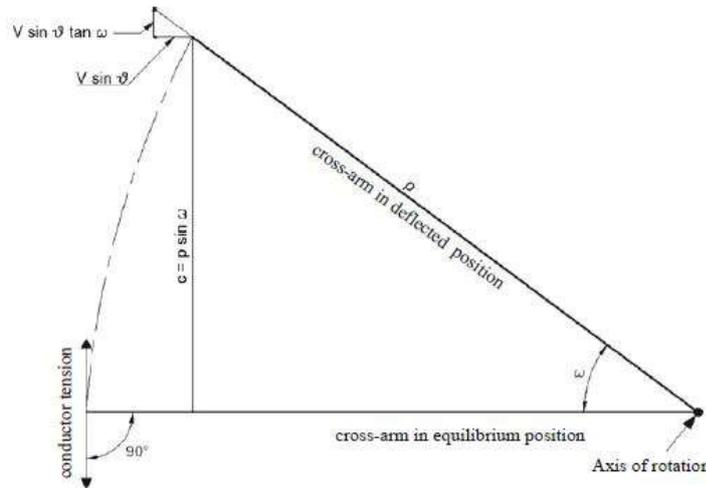


Figura 2.21. Esquema de la cruceta en equilibrio, vista superior [10]

Si tomamos la notación del esquema, vemos que $V \cdot \sin(\vartheta)$ se puede descomponer en una componente radial p y en una componente tangencial en la dirección de la línea T . Por lo tanto, considerando la condición de equilibrio de la cruceta obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$T = V \cdot \sin(\vartheta) \tan(\omega) \quad (2.3)$$

$$c = p \cdot \sin(\omega) \quad (2.4)$$

Estas variables T y c dependen de la rotación ω de la línea. Para estudiar la estabilidad de la línea se le añade la fuerza horizontal H , proveniente de cargas como el viento. Esta fuerza puede ejercer efectos estabilizantes o desestabilizantes 2.22. Obtenemos por tanto para la nueva T la Ecuación 2.5.

$$T_{HW} = (H \cdot \cos(\vartheta) + V \cdot \sin(\vartheta)) \tan(\omega) \quad (2.5)$$

En este caso no se ha tenido en cuenta el efecto de la fricción de los elementos sobre la rotación de la cruceta. Sin embargo, este efecto es siempre estabilizante, puesto que desde el equilibrio la fricción se opone al giro de la misma, reduciendo su deflexión. Además, este desplazamiento influye directamente en la línea al completo, provocando un desplazamiento en el resto de crucetas y pudiendo poner en riesgo la estabilidad de la línea.

2.1.4. Análisis de estabilidad de líneas con crucetas aislantes pivotantes

Debido a los desplazamientos mencionados anteriormente, asegurar la estabilidad de la línea en las condiciones de trabajo es un objetivo básico del diseño de la misma. Los primeros trabajos de estabilidad de la propia cruceta fueron desarrollados por Baker en 1982 [13], y se basaron en la simulación por método de elementos finitos conocidas las cargas que se ejercían sobre la misma. En ellos se analiza la velocidad del viento crítica a la cual la cruceta se vuelve inestable en función del número de vanos por cantón y el ángulo ϑ (Figura 2.23) y en función del ángulo del viento respecto a la línea (Figura 2.24).

Como era de esperar, un menor número de vanos y un mayor ángulo ϑ mejoran la estabilidad de la cruceta. A su vez, un viento en dirección de la línea ejerce un efecto estabilizador. En base a estos resultados, Baker propone las siguientes soluciones para mejorar la estabilidad de la línea [5]:

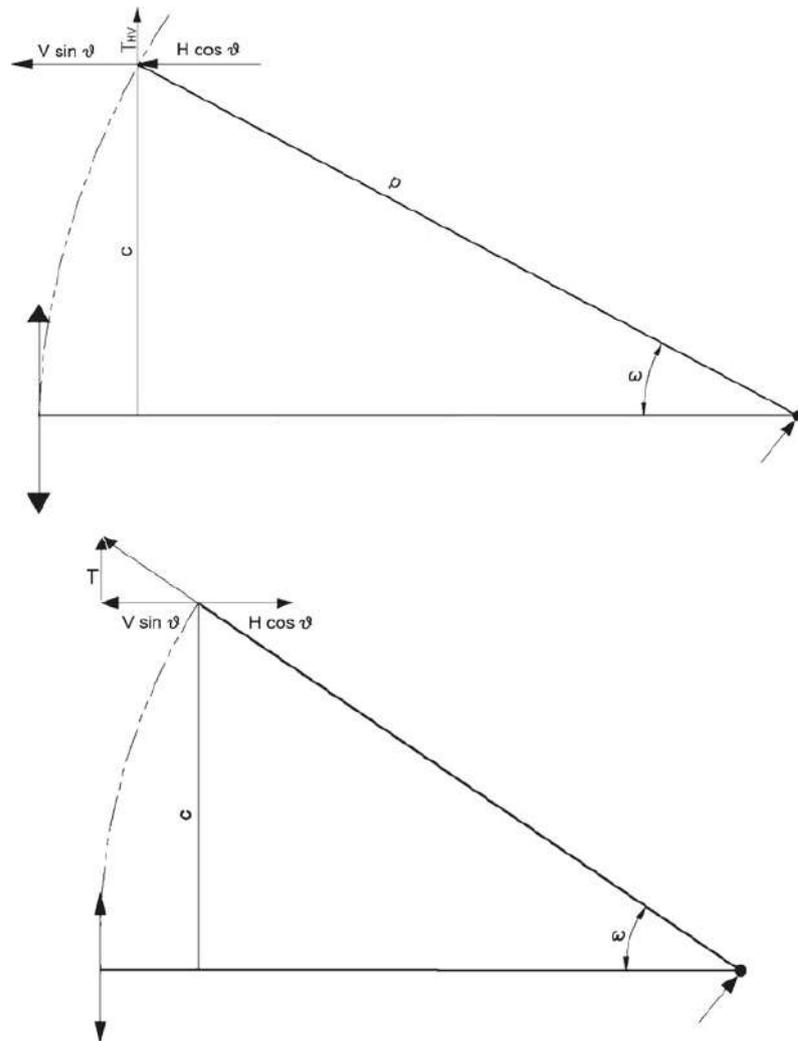


Figura 2.22. Esquema con fuerzas horizontales estabilizantes (arriba) y desestabilizantes (abajo) [10]

- Incrementar la inclinación del ángulo ϑ o el ángulo α entre riostra y brazo (Figura 2.14).
- Incrementar la carga vertical en las crucetas, por ejemplo añadiendo pesos adicionales.
- Incrementar la tensión del conductor.
- Reducir la longitud de cada vano individual y/o el número de vanos en un mismo cantón.
- Reducir el ángulo en las torres con cambio de dirección.
- Usar “crucetas de estabilización” en secciones de línea largas, en las cuales el brazo pivotante de la cruceta habitual se sustituye por dos brazos rígidos montados con un ángulo agudo entre ellos (Figura 2.25).

No obstante, estas consideraciones se centran en la estabilidad de la propia cruceta en lugar de en la línea completa. De hecho, la dificultad reside en calcular las fuerzas horizontales (transversal y longitudinal) que actúan sobre las mismas, pues se transmiten a través de la línea, siendo esta un elemento altamente no lineal. Debido a esto es necesario modelar la línea completa. Esta consideración suele hacer necesario el uso del método de elementos finitos para su resolución, considerando normalmente vientos constantes sobre la línea, como en [7].

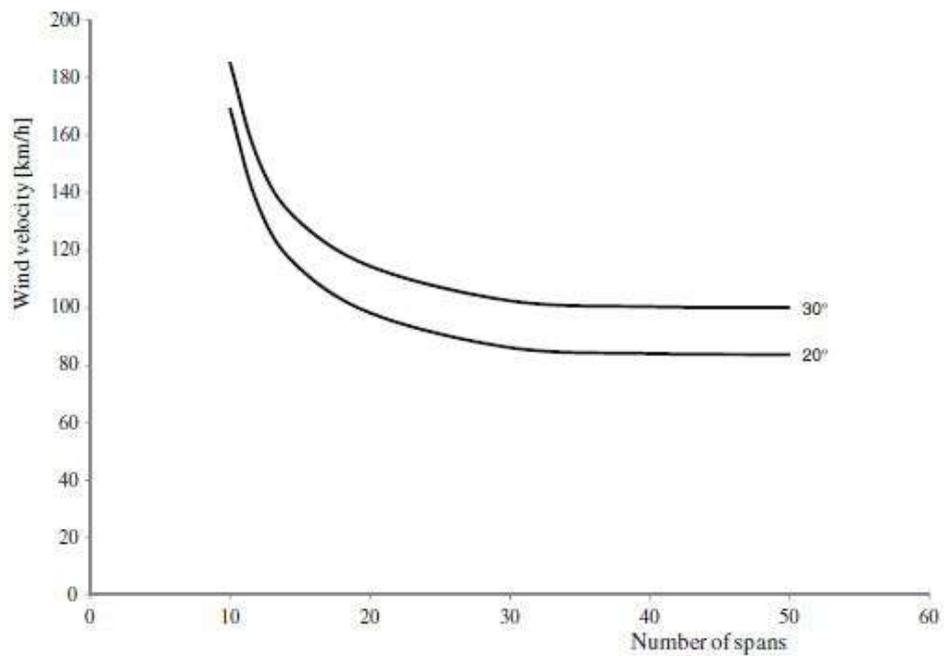


Figura 2.23. Velocidad del viento crítica en función del número de vanos de 250 m por cantón con el ángulo ϑ como parámetro [13]

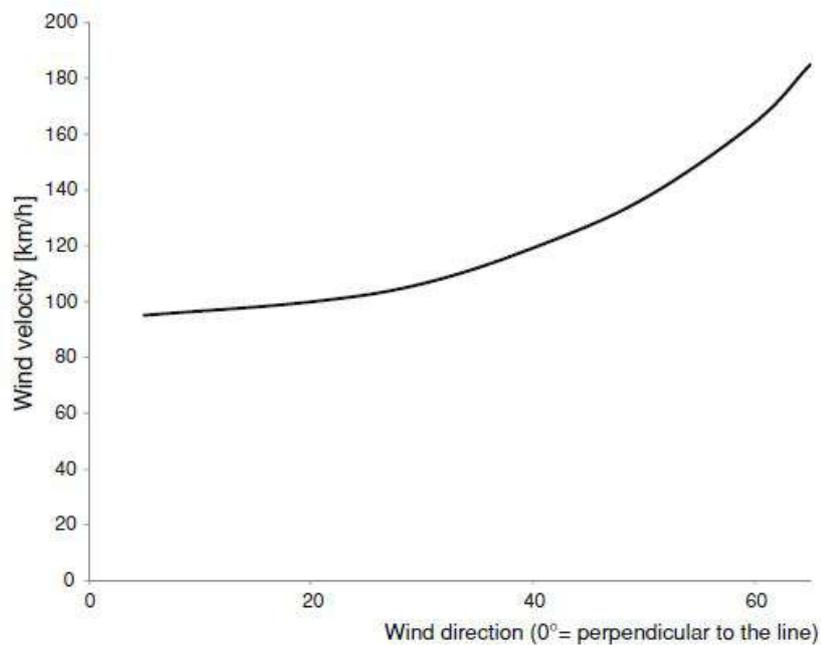


Figura 2.24. Velocidad del viento crítica en función del ángulo de incidencia sobre el cable en una línea de 20 vanos de 250 m y $\vartheta = 20^\circ$ [13]



Figura 2.25. Cruceta de estabilización con brazo rígido doble

2.2. Mecánica de catenaria

2.2.1. Estructuras de cables

Los problemas basados en el comportamiento de cables han sido objeto de estudio desde la antigüedad. Sin embargo, no es hasta mediados del siglo XX cuando gana popularidad el uso generalizado de estructuras de cables como elemento constructivo. A partir de la década de 1950 se empieza a valorar su eficiencia y estética, dando lugar a numerosos artículos en los 60 y 70 centrados en su cálculo. A día de hoy su uso es habitual en gran diversidad de aplicaciones, como puentes colgantes, estructuras de edificios, catenarias de sistemas de transporte o líneas de transporte eléctrico [6], el objetivo de este proyecto.

Las estructuras se caracterizan por su flexibilidad, ligereza y rigidez ante la flexión y tracción. Estas mismas características son las que les otorgan su comportamiento altamente no lineal, complicando su cálculo. Además, hay que añadir el hecho de que la configuración de referencia es inicialmente desconocida, puesto que depende directamente de la configuración de las tensiones de los propios cables, desconocida en un primer momento. Este es el llamado problema de configuración inicial. Tradicionalmente existen dos familias de métodos de cálculo de estructuras de cables: los basados en el método de los desplazamientos no lineales y los basados en el método de la densidad de fuerza. Una clasificación más exhaustiva y la comparativa entre los distintos métodos se pueden encontrar en las realizadas por Veenendaal en [14].

El método de los desplazamientos no lineales fue puesto en práctica por primera vez por Argyris en 1973 para la estructura de la cubierta del Estadio Olímpico de Múnich [15] (Figuras 2.26 y ??). Se trata de un método iterativo basado en el análisis por elementos finitos de estructuras con grandes desplazamientos. El objetivo del método es obtener una geometría y unas distribuciones internas de tensiones compatibles con el sistema. En primer lugar se parte de una red plana con las características y distribución de los cables problema, y se restringen los grados de libertad conocidos correspondientes a los soportes. A continuación se desplaza uno de dichos soportes, creando una forma tridimensional que genera un desequilibrio de fuerzas que desplaza los otros puntos. Se prosigue con las iteraciones del algoritmo hasta obtener las posiciones finales

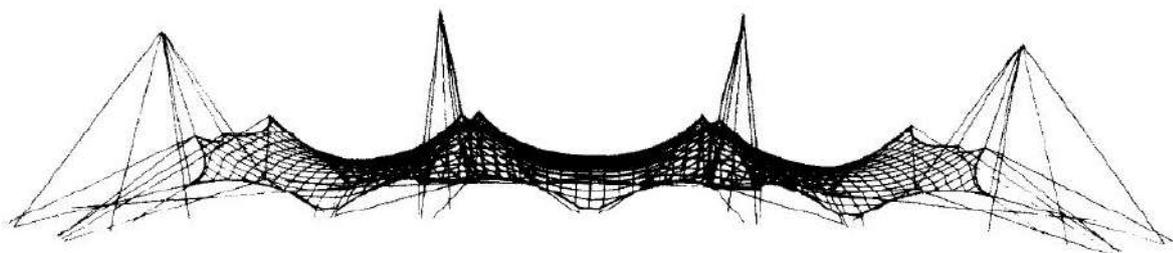


Figura 2.26. Esquema de la cubierta del Estadio Olímpico de Múnich [15]

de los soportes y un sistema de fuerzas equilibradas. Para iniciar este proceso es necesario tener la red plana pretensada con unas tensiones conocidas, lo cuál es una desventaja para la velocidad de cálculo. Una vez obtenido el equilibrio sin deformaciones, se reajustan las longitudes de los cables para tener en cuenta la deformación y se calculan las nuevas tensiones. Este proceso se repite hasta obtener las fuerzas tras las deformaciones equilibradas y los nodos soporte en la posición final. En [15], Argyris sustituye los cables por elementos rígidos tipo barra para evitar la no linealidad en la primera aproximación. Otros autores presentan distintas alternativas a esta sustitución con el objetivo de mejorarla, como el uso de elementos barra curvos, elementos con dos nodos o elementos de catenaria elástica deformable [6].

El método de la densidad de fuerza fue primeramente desarrollado por Schek en 1974 [16]. La no linealidad del problema se trata considerando la proyección de las fuerzas sobre cada nodo de la malla y su codependencia no lineal como incógnitas en las coordenadas nodales. Esto es, introduciendo un nuevo parámetro q llamado densidad de fuerza, se obtiene un sistema de ecuaciones lineales a partir del inicial que tiene en cuenta la relación entre la longitud del cable y la distancia entre nodos. Todo ello permite emplear este método desconociendo las restricciones iniciales de la tensión, pero solo da como resultado las coordenadas finales de los nodos estudiados, limitando su aplicación. Se han propuesto distintas extensiones al modelo [6], como forzar una condición de ortogonalidad en los nodos, el uso de elementos curvos o placas en lugar de barra o viga o su combinación con la optimización por mínimos cuadrados para acelerar la obtención de la forma.

En este proyecto se empleará sin embargo un modelo basado en la solución exacta de la curva catenaria. La diferencia con los dos anteriores reside en que en lugar de tener las tensiones o la posición de los nodos como incógnitas, respectivamente, tiene en cuenta todas las variables del cable problema. Esto permite que tanto la forma inicial como los esfuerzos finales puedan calcularse con el mismo método, proporcionando un tratamiento más exacto del problema. Además, el software empleado para la resolución de los modelos será ANSYS, que tiene su base en el método de los elementos finitos, que comparte principios con el de los desplazamientos no lineales.

2.2.2. Ecuaciones de la catenaria rígida

La curva catenaria es el estado de equilibrio de un cable sujeto por dos puntos bajo su propio peso. A continuación se expone el proceso para obtener la ecuación de la catenaria rígida de un cable tal y como se propone en [9]. En primer lugar, se considerará un cable rígido inextensible que cuelga entre dos puntos al mismo nivel, pudiendo soportar únicamente esfuerzos de tensión.

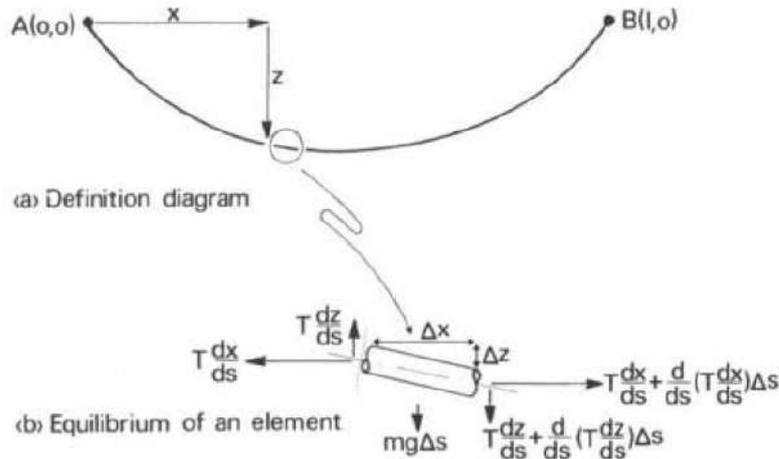


Figura 2.27. Esquemas para el cálculo de la catenaria rígida. (a) Diagrama de definición. (b) Equilibrio de un elemento [9]

Teniendo en cuenta los esquemas de la Figura 2.27, se observa que el equilibrio vertical de un elemento en las coordenadas (x, z) requiere:

$$\frac{d}{ds} \left(T \frac{dz}{ds} \right) = -mg \quad (2.6)$$

donde T es la tensión del cable, dz/ds es el seno del ángulo entre la horizontal y la tangente a la curva (ángulo de inclinación), y mg es el peso del cable por unidad de longitud. De igual manera, el equilibrio horizontal se corresponde con:

$$\frac{d}{ds} \left(T \frac{dx}{ds} \right) = 0 \quad (2.7)$$

donde dx/ds es el coseno del ángulo de inclinación. La Ecuación 2.7 se puede integrar directamente, dando:

$$T \frac{dx}{ds} = H \quad (2.8)$$

donde H es la componente horizontal de la tensión del cable, que es horizontal puesto que no se aplican cargas longitudinales. Sustituyendo 2.8 en 2.6, queda:

$$H \frac{d^2z}{dx^2} = -mg \frac{ds}{dx} \quad (2.9)$$

Dado que se debe de cumplir que $(dx)^2 + (dz)^2 = (ds)^2$, se añade la siguiente restricción geométrica:

$$\left(\frac{dx}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dz}{ds} \right)^2 = 1 \quad (2.10)$$

que sustituyendo en 2.9, la ecuación diferencial de la catenaria queda:

$$H \frac{d^2z}{dx^2} = -mg \left\{ 1 + \left(\frac{dx}{dz} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (2.11)$$

Si tenemos en cuenta las identidades de las funciones hiperbólicas $\cosh^2 t - \sinh^2 t = 1$, $\frac{d}{dt}(\cosh t) = \sinh t$ y $\frac{d}{dt}(\sinh t) = \cosh t$, se observa que una solución que satisface la Ecuación 2.11 y las condiciones de contorno es:

$$z = c \left\{ \cosh \left(\frac{L}{2c} \right) - \cosh \left(\frac{1}{c} \left(\frac{L}{2} - x \right) \right) \right\} \quad (2.12)$$

donde $c = \frac{H}{mg}$ es el llamado parámetro de catenaria y L la distancia de vano. Para calcular la longitud de un tramo de cable es suficiente con aplicar la expresión de la longitud de un arco de curva:

$$s = \int_0^x \left\{ 1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right\}^{1/2} = c \left\{ \sinh \left(\frac{L}{2c} \right) - \sinh \left(\frac{1}{c} \left(\frac{L}{2} - x \right) \right) \right\} \quad (2.13)$$

Por lo tanto, para un cable de longitud L_0 se obtiene que:

$$\sinh \left(\frac{L}{2c} \right) = \frac{L_0}{2c} \quad (2.14)$$

pudiéndose calcular c y, consecuentemente H . Cabe destacar que a menos que se relaje la condición de inextensibilidad, L_0 no puede ser mayor que l . Por otra parte, la tensión en cualquier punto de la catenaria es:

$$T = H \cosh \left(\frac{1}{c} \left(\frac{L}{2} - x \right) \right) \quad (2.15)$$

En caso de no estar los dos extremos a la misma altura, es necesario modificar la Ecuación 2.12 [17]. En primer lugar, modificamos el sistema de coordenadas a uno local $\langle \tilde{O}\eta\xi \rangle$ como el de la Figura 2.28 y aplicamos como condición de contorno que en el punto de mínima altura, que coincide con c respecto a \tilde{O} , la tensión es únicamente horizontal para conservar el equilibrio.

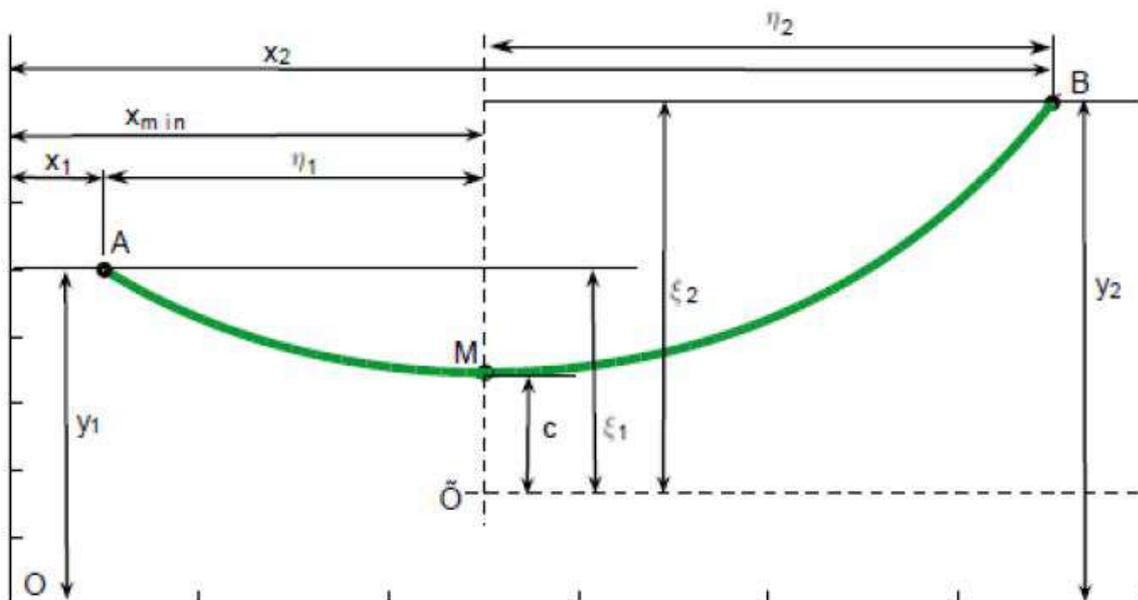


Figura 2.28. Sistemas de coordenadas de la catenaria [17]

Las Ecuaciones 2.12, 2.13 y 2.15 se transforman en:

$$\xi = c \cdot \cosh\left(\frac{\eta}{c}\right) \quad (2.16)$$

$$s = c \cdot \sinh\left(\frac{\eta}{c}\right) \quad (2.17)$$

$$T = H \cdot \cosh\left(\frac{\eta}{c}\right) \quad (2.18)$$

Estas soluciones en coordenadas locales se cumplen para cualquier configuración de la catenaria, puesto que solo dependen de la posición del origen \tilde{O} , que siempre se coloca en el punto de tensión horizontal pura y de los parámetros de la curva. Este origen puede estar en un punto exterior a la curva real. Si se quiere deshacer el cambio para coordenadas globales, basta conocer el punto x_{min} , c y las coordenadas de los extremos y tomarlos como referencia para la transformación $\tilde{O} \rightarrow O$.

2.2.3. Ecuaciones de la catenaria elástica

Las ecuaciones de la sección anterior solo son válidas si se toma el cable como inextensible. Para añadir la deformación debida a la elasticidad del cable, es suficiente con aplicar la ecuación de la ley de Hooke, puesto que solo depende de la tensión y las propiedades del cable:

$$\Delta l = \int_L \frac{T(x)}{E \cdot A} \quad (2.19)$$

donde L es el cable, E es el módulo elástico de Young, A es el área de la sección del cable que se supone constante y $T(x)$ es la tensión en la dirección del cable según la Ecuación 2.18 trasladada a coordenadas globales. Como $T(x)$ ya tiene en cuenta la proyección de la tensión sobre la curva, la Ecuación 2.19 se puede integrar directamente, obteniendo:

$$\Delta l = \frac{H}{2EA} \left\{ \frac{c}{2} \left[\sinh\left(\frac{2 \cdot (x_{min} - x_1)}{c}\right) + \sinh\left(\frac{2 \cdot (x_2 - x_{min})}{c}\right) \right] + (x_2 - x_1) \right\} \quad (2.20)$$

Y la longitud total del cable deformado será:

$$L_f = L_0 + \Delta l \quad (2.21)$$

No obstante, esta expresión no permite describir con exactitud la curva de la catenaria elástica en todos sus puntos. Para obtener las nuevas ecuaciones emplearemos de nuevo la aproximación lagrangiana descrita por Irvine en [9]. Tomamos de nuevo un cable dispuesto como en la Figura 2.29, con dos puntos fijos A y B con coordenadas cartesianas $(0, 0)$ y (l, h) respectivamente. Por tanto, la longitud de vano es l y el desplazamiento vertical relativo es h . La longitud en reposo del cable es L_0 , que en este caso no tiene necesariamente que ser mayor que $(l^2 + h^2)^{1/2}$, aunque tampoco puede ser mucho menor para no incumplir la ley de Hooke. Un punto en el cable tiene coordenada lagrangiana s en el perfil en reposo. Cuando el cable se carga con su propio peso $W = mgL_0$, este punto ocupa su nueva posición en el perfil cargado con coordenadas cartesianas x y z y con coordenada lagrangiana p . Al igual que para la catenaria rígida, la siguiente restricción geométrica se tiene que cumplir:

$$\left(\frac{dx}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dz}{ds}\right)^2 = 1 \quad (2.22)$$

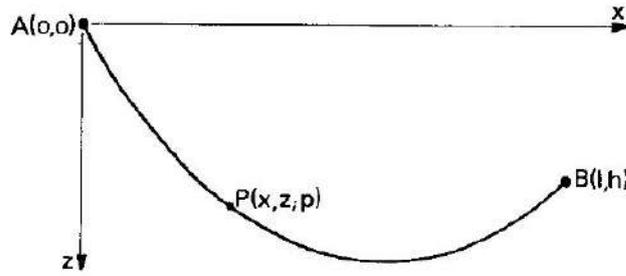


Figura 2.29. Coordenadas de la catenaria elástica [9]

y las ecuaciones de equilibrio de un segmento de cable como el de la Figura 2.24 son:

$$T \frac{dx}{dp} = H \quad (2.23)$$

$$T \frac{dz}{dp} = V - W \frac{s}{L_0} \quad (2.24)$$

donde, debido a la conservación de la masa, el peso de la porción de cable es Ws/L_0 , V es la componente vertical de la reacción en A y H es la componente horizontal constante de la tensión del cable. Además, el sistema tiene que cumplir la ley de Hooke, expresada en forma diferencial como:

$$T = EA \left(\frac{dp}{ds} - 1 \right) \quad (2.25)$$

Por último, las condiciones de contorno en A y B respectivamente son:

$$\begin{aligned} x = 0, \quad z = 0, \quad p = 0 & \text{ en } s = 0 \\ x = l, \quad z = h, \quad p = L & \text{ en } s = L_0 \end{aligned} \quad (2.26)$$

donde L es la longitud del cable cargado. A partir de estas cinco ecuaciones (2.22–2.26) se pueden obtener operando los siguientes resultados para T , x y z en función de s .

$$T(s) = \left\{ H^2 + \left(V - W \frac{s}{L_0} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (2.27)$$

$$x(s) = \frac{Hs}{EA} + \frac{HL_0}{W} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{V}{H} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{V - Ws/L_0}{H} \right) \right] \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} z(s) = \frac{Ws}{EA} \left(\frac{V}{W} - \frac{s}{2L_0} \right) + \\ + \frac{HL_0}{W} \left[\left\{ 1 + \left(\frac{V}{H} \right)^2 \right\}^{1/2} - \left\{ 1 + \left(\frac{V - Ws/L_0}{H} \right)^2 \right\}^{1/2} \right] \end{aligned} \quad (2.29)$$

Es común que no se disponga de H y V , por lo que es necesario calcularlas. Aplicando las Ecuaciones 2.28 y 2.29 en B con $s = L_0$, $x = l$ y $z = h$ se obtiene un sistema de ecuaciones no lineal con H y V como incógnitas. Una vez resuelto el sistema mediante métodos numéricos, ya se pueden resolver las ecuaciones generales para x , z y T .

Ahora es necesario comprobar si el efecto de la elasticidad en la curva de la catenaria es suficientemente relevante como para justificar el incremento en la complejidad del cálculo de la misma. Tomando los dos apoyos al mismo nivel, obtenemos una ecuación análoga a la 2.14:

$$\sinh\left(\frac{Wl}{2HL_0} - \frac{W}{2EA}\right) = \frac{W}{2H} \quad (2.30)$$

Una suposición habitual suele ser que la longitud del cable no es mucho mayor que la del vano completo, por lo que es razonable tomar $\frac{l}{L_0} \approx 1$. Por otra parte, el producto EA es habitualmente del orden de 10^7 N mientras que el orden de H es 10^4 N, por lo que el término $\frac{W}{2EA}$ se puede despreciar frente al de la tensión, y la Ecuación 2.30 es equivalente a la de la catenaria rígida. Aplicando el mismo razonamiento en 2.28 y 2.29 se obtienen las ecuaciones paramétricas de la catenaria rígida en función de la coordenada lagrangiana s , por lo que se puede asumir razonablemente que el efecto de la elasticidad a la hora de describir la curva es despreciable en la práctica.

2.2.4. Aproximación parabólica de la catenaria

Las ecuaciones descritas anteriormente para el cálculo de catenaria suelen considerarse muy exigentes para su computación. Por ello, para el modelado de líneas de transporte eléctrico es habitual emplear la aproximación parabólica de la catenaria. Esta viene directamente de la aproximación de Taylor de la Ecuación 2.16 en coordenadas locales. La serie de Maclaurin asociada al coseno hiperbólico es:

$$\cosh x \rightarrow 1 + \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} + \frac{x^6}{720} + \dots \quad (2.31)$$

Si consideramos el caso en el que los apoyos está a la misma altura separados una longitud de vano l y tomamos de nuevo como origen de coordenadas el punto mínimo de la curva (situado en $l/2$) con coordenada vertical c , la ecuación de la parábola asociada a la catenaria queda:

$$z = \frac{x^2}{2c} + c \quad (2.32)$$

Esta expresión es mucho más compacta y menos exigente computacionalmente al tratarse de un polinomio de grado 2. El error cometido por la aproximación se obtiene a partir del siguiente término en el polinomio [18]. Para $l/2$, que es el punto de mayor error al ser una función estrictamente creciente aproximada en el origen:

$$E = c \cdot \frac{f^{(4)}(\eta/c)}{24} \left(\frac{l}{2c}\right)^4 = c \cdot \frac{\cosh(\eta/c)}{24} \left(\frac{l}{2c}\right)^4 \leq c \cdot \frac{\cosh\left(\frac{l}{2c}\right)}{24} \left(\frac{l}{2c}\right)^4 \quad (2.33)$$

Para acotar la Ecuación 2.33 se ha tenido en cuenta que el coseno hiperbólico es una función estrictamente convexa, por lo que el máximo valor en el intervalo $(-l/2, l/2)$ se encuentra en los extremos. Esta ecuación permite obtener una longitud de vano para la que la aproximación parabólica deje de ser válida en base a un error aceptable.

Físicamente esta aproximación implica tomar la distribución de carga uniformemente sobre la proyección horizontal en lugar de sobre el perfil del cable. Es equivalente a suponer que el cable es inextensible y tiene la misma longitud que el vano que lo aloja. El principal parámetro

donde puede afectar esta aproximación es en la flecha del punto medio del cable, determinante para su diseño puesto que es el punto más crítico para las distancias de seguridad. En vanos a la misma altura, la flecha máxima para la parábola se sitúa en la mitad del vano, y viene dada por la ecuación:

$$f = \frac{l^2}{8c} \quad (2.34)$$

Tomando $c = 1767$ m, que es el valor que se tomará para el modelo, se obtienen las curvas de la Figura 2.30. Atendiendo a la flecha máxima, se obtiene la Tabla 2.3 donde se analizan los errores cometidos en la aproximación para distintas longitudes de vano.

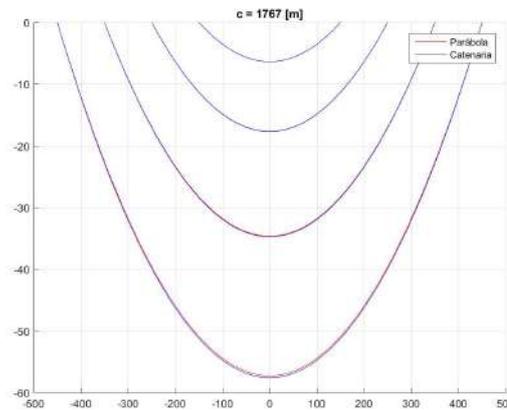


Figura 2.30. Comparación de la aproximación parabólica y la curva catenaria real para $c = 1767$ m

d [m]	f_c [m]	f_p [m]	e [%]
300	6.3705	6.3667	0.0600
500	17.7149	17.6853	0.1666
700	34.7768	34.6633	0.3263
900	57.6109	57.3005	0.5387

Tabla 2.3. Comparativa de la aproximación parabólica con $c = 1767$ m

Como se puede apreciar, el error del ajuste parabólico no supera en ningún momento el 1 %, siendo generalmente insignificante en vanos cortos. Esto se debe a que se emplea un c muy elevada, típico de cables muy tensos como los de la líneas de transporte. Si se impone una cota superior del error de la aproximación de un 1 % con esta misma c , se obtiene la siguiente ecuación:

$$0,01 \cdot \frac{l^2}{8c} = c \cdot \frac{\cosh(\eta/c)}{24} \left(\frac{l}{2c}\right)^4 \leq c \cdot \frac{\cosh\left(\frac{l}{2c}\right)}{24} \left(\frac{l}{2c}\right)^4 \Rightarrow l \leq 1190.60\text{m} \quad (2.35)$$

Por lo que queda justificado el uso de la aproximación parabólica de la catenaria en este caso hasta vanos de 1190 m, asegurando un error inferior al 1 %.

2.3. Modelado de vientos

Uno de los principales objetivos de este proyecto es la creación de un modelo de vientos que permita establecer su efecto sobre la línea. Para ello es necesario analizar las distintas aproximaciones clásicas al problema y su desarrollo.

2.3.1. Criterios de diseño

2.3.1.1. Diseño según Eurocódigo

Desde hace años existe gran interés en el estudio y diseño bajo cargas de viento, tanto con el objetivo de evitar sus efectos sobre las distintas construcciones como últimamente para su aprovechamiento eléctrico. Al diseñar cargas sobre estructuras como las líneas de transporte eléctrico se toman en cuenta unos valores máximos de velocidad de viento obtenidos a partir de datos tomados recurrentemente. Las normas europeas UNE-EN 50341-1 [4] y UNE-EN 50423-1 [19] establecen un procedimiento empírico para cálculos de cargas en caso de que se disponga de una base estadística.

Categoría del terreno	Características del terreno	k_T	z_0
I	Nivel del mar, lagos que ofrezcan al viento al menos 5 km de longitud y regiones lisas y planas sin obstáculos	0.17	0.01
II	Tierras de labranza con límites definidos, estructuras ocasionales de pequeñas granjas, casas o árboles	0.19	0.05
III	Áreas suburbanas o industriales y bosques permanentes	0.22	0.3
IV	Áreas urbanas en las que al menos el 15 % de la superficie está cubierta de edificios de una altura principal de más de 15 m	0.24	1.0
V	Terrenos montañosos y más complejos donde el viento puede intensificarse o debilitarse localmente	Debe evaluarse individualmente, posiblemente por meteorólogos	

NOTA– Aunque las categorías de los terrenos listadas en la tabla están en concordancia con el Eurocódigo ENV 1991-2-4, capítulo 8, algunos países pueden buscar otra sección más útil de categorías del terreno y que sea más representativa de su propio territorio. Esto se debería especificar en los NNA. Las categorías del terreno III y IV normalmente no serán de aplicación para las líneas aéreas, aunque se incluyen para completar la tabla.

Tabla 2.4. Factor del terreno k_T y parámetro de irregularidades del terreno z_0 para las diferentes categorías del terreno según el Eurocódigo ENV 1991-2-4

En primer lugar se parte de un conjunto de velocidades de referencia $v_{R(II)}$ que por norma están medidos a 50 años a una altura de 10 m en un terreno de categoría II (ver Tabla 2.4). Estos valores es necesario adaptarlos a las características de la línea según la Ecuación 2.36.

$$v_h = k_T \cdot \ln \frac{z}{z_0} \cdot v_{R(II)} \quad (2.36)$$

donde z es la altura sobre el suelo, k_T el factor del terreno y z_0 el parámetro de irregularidades. La norma también contempla el uso de la Ecuación 2.37, donde α es el factor de rugosidad del terreno, especificado en la norma propia del país.

$$v_h = v_{R(II)} \cdot \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (2.37)$$

A partir de estos datos provistos, se aplica el procedimiento indicado en [4]. Este aplica la metodología de cálculo de valores extremos desarrollada a partir del teorema de Fisher-Tippett, que es una extensión del teorema central de límite que contempla valores extremos. Una muestra de velocidades de viento tomadas diariamente (365 datos) es suficientemente grande como para satisfacer las condiciones del teorema de Fisher-Tippett, por el que se establece que los máximos y mínimos del conjunto de muestras de una distribución dada sigue una de las tres funciones obtenidas en la Ecuación 2.38.

$$F(x) = \exp \left(- \left(1 - k \frac{x - \beta}{a} \right)^{\frac{1}{k}} \right) \quad (2.38)$$

El parámetro k establece el tipo de de función:

- Si $k \rightarrow 0$ se trata de una función de Gumbel.
- Si $k < 0$ la función es una distribución de Frechet.
- Si $k > 0$ la distribución es una Weibull inversa.

La norma indica que para la velocidad del viento se tome $k \rightarrow 0$, por lo que aplicando el procedimiento de Gumbel es posible obtener los estimadores apropiados para calcular la velocidad extrema de diseño.

Partiendo de la velocidad de diseño v obtenida, se calcula la carga a aplicar en la altura z según la Ecuación 2.39

$$q_z = \frac{1}{2} \rho G_g G_v G_s v^2 \quad (2.39)$$

donde ρ es la densidad del aire según la Ecuación 2.40 a una temperatura T en K y una altura h en m; G_g es el factor de ráfaga [4]; G_v es un factor asociado al terreno o la estructura; y G_s es el parámetro de vano. Valores habituales para estos factores se muestran en la Tabla 2.5.

$$\rho = 1.225 \frac{288}{T} e^{-1.2 \times 10^{-4}(h-600)} \quad (2.40)$$

Factor	Value
Factor de ráfaga (G_g)	2.05 a 10 m
Factor de terreno (G_v)	1-0.75
Factor de vano (G_s)	1
Coefficiente de arrastre (C_D)	1

Tabla 2.5. Valores de distintos factores según UNE EN 50341-1:2004

Para calcular la presión lineal debida a la carga del viento, aplicamos la Ecuación 2.41.

$$q_w = C_D q_z d \quad (2.41)$$

2.3.1.2. Diseño según el Reglamento de Alta Tensión (RLTA)

El Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en las líneas de alta tensión aprobado por el Real Decreto 223/2008, del 15 de febrero de 2008 [2] propone un método alternativo para el modelado de las cargas, que será el cual se siga en este proyecto. En todos los componentes debe considerarse un viento mínimo de 120 km/h, excepto en líneas de categoría especial, que será de 140 km/h. También se indica que se supondrá viento horizontal que incida perpendicularmente sobre las superficies. Para el cálculo de la fuerza aplicada sobre los conductores, se aplica la siguiente ecuación:

$$F_c = q \times d \times \frac{a_1 + a_2}{2} \text{ daN} \quad (2.42)$$

donde d es el diámetro del conductor, en metros; a_1 y a_2 son las longitudes de los vanos adyacentes, en metros, y q es la presión de viento. La semisuma $\frac{a_1+a_2}{2}$ es el vano de viento o eolovano a_v . El cálculo de q se obtiene como:

$$q = 60 \times \left(\frac{V_V}{120} \right)^2 \text{ daN/m}^2 \text{ para conductores de } d \leq 16 \text{ mm}$$

$$q = 50 \times \left(\frac{V_V}{120} \right)^2 \text{ daN/m}^2 \text{ para conductores de } d \geq 16 \text{ mm}$$

Para la fuerza sobre los conductores, las ecuaciones son:

$$F_c = q \times A_{Pol} \text{ daN} \quad (2.43)$$

donde A_{Pol} es el área proyectada en el área normal a la dirección del viento, en m^2 , y q se calcula como:

$$q = 70 \times \left(\frac{V_V}{120} \right)^2$$

2.3.2. Modelos dinámicos clásicos puntuales

Tradicionalmente las velocidades de viento para el diseño de cargas se suelen tomar a partir de datos estadísticos como los indicados anteriormente. Sin embargo, el objetivo es generar una señal que tenga en cuenta las componentes aleatorias del viento. La mayoría de los estudios en este campo han sido motivados por el estudio del efecto de la velocidad en el comportamiento de las turbinas eólicas. No obstante, este efecto también es objeto de interés en el campo de las estructuras y edificaciones. Este es el caso de la líneas de transmisión eléctrica, objeto de este estudio. Las variaciones en la velocidad del viento modifica las presiones sobre la línea, lo que cambia el comportamiento de las estructuras que los componen.

La naturaleza del viento se considera normalmente determinista, puesto que el comportamiento habitual se rige por las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, la componente de turbulencia parece ser estocástica, obligando al uso de métodos propicios para su cálculo. Para ello se tienen en cuenta unas determinadas características de dispersión de la señal de viento, dadas por los distintos modelos.

2.3.2.1. Parámetros

En general todos los modelos se basan en una serie de parámetros relacionados con las características del viento y las condiciones específicas del diseño. Las principales son la altura de referencia h , el factor de decaimiento C_D y la altura de rugosidad equivalente z_0 .

- La altura de referencia h es la altura que se toma por normativa para el estudio de la velocidad del viento en condiciones normalizadas. En el caso de la norma europea, h es 10 m.
- El factor de decaimiento C_D ajusta la coherencia de las ráfagas de viento en distintos puntos. Depende de la componente de ráfaga del viento a estudio y toma valores entre 7 y 20.
- La altura de rugosidad equivalente es la altura teórica a la cual la velocidad horizontal del viento se anula. Se obtiene empíricamente a partir de medidas experimentales en distintas condiciones geográficas. La primera clasificación empleada extensamente es la elaborada por Davenport en 1960. En los años sucesivos se han ido desarrollando diversas modificaciones al modelo (Oke 1978, Cook 1985), empleándose en la actualidad la desarrollada por el ingeniero holandés Jon Wieringa en 1992 [20]. La Tabla 2.6 muestra los diferentes valores para esta clasificación. Esta es la clasificación indicada por la World Meteorological Organization [21] para el cálculo de series temporales de viento. La norma UNE EN 50341-1 emplea la clasificación indicada en la Tabla 2.4.

Los parámetros dependientes de la geometría vienen dados por las indicaciones de la línea.

2.3.2.2. Modelos basados en matrices PSD

Uno de los métodos clásicos para generar series temporales reales es la generación de una señal estocástica a partir de una determinada densidad de potencia espectral, consistente con la velocidad real del viento [22]. Por tanto, asumimos que el campo de velocidades de viento sigue un proceso estocástico gaussiano estacionario multidimensional multivariante basado en PSD para este tipo de aplicaciones. Con estas suposiciones, la velocidad de viento está formada por dos componentes, una velocidad media constante $\bar{\mathbf{u}}$ y un término variable asociado a la turbulencia \mathbf{u} .

$$\mathbf{u}_t = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u} \quad (2.44)$$

El término variable se puede desglosar en sus componentes cartesianas $\mathbf{u} = [u_x, u_y, u_z]^T$. Esto hace que este término dependa del punto en el espacio x, y, z y el tiempo t , por lo que es un término compuesto de tres variables en cuatro dimensiones. La correlación entre las tres componentes espaciales es débil [23], por lo que se pueden considerar las distintas componentes espaciales por separado. Por lo tanto, se puede considerar un proceso gaussiano multivariante unidimensional con media cero, definiendo la matriz de PSD como Ecuación 2.45.

$$S = \begin{bmatrix} S_{11}(p) & S_{12}(p) & \dots & S_{1n}(p) \\ S_{21}(p) & S_{22}(p) & \dots & S_{2n}(p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1}(p) & \dots & \dots & S_{nn}(p) \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Clasificación	z_0	Descripción del paisaje
Mar	0.0002	Mar abierto o lago (independientemente del tamaño de ola), llanuras fluviales, llanuras planas cubiertas de nieve, desiertos sin orografía, alquitranado y cemento con espacio libre de varios kilómetros.
Suave	0.005	Superficie de tierra sin orografía ni obstáculos apreciables y vegetación despreciable; por ejemplo playas, hielo compactado o campo abierto cubierto de nieve
Abierto	0.03	Campo nivelado con poca vegetación (por ejemplo hierba) y obstáculos aislados con separaciones de al menos 50 veces su altura; por ejemplo páramos, brezales, tundras, pistas de aeropuertos.
Desigualmente abierto	0.10	Zonas cultivadas con una cubierta regular de cultivos bajos o campo moderadamente abierto con obstáculos ocasionales (seto bajo, hileras de arboles, granjas aisladas) con distancias horizontales relativas de al menos 20 veces la altura del obstáculo.
Desigual	0.25	Paisaje joven desarrollado recientemente, con cultivos altos o de altura variable, y obstáculos distribuidos (zonas de cobertizos densos, viñedos) con distancias horizontales relativas de 15 veces su altura.
Muy desigual	0.50	Paisaje cultivado viejo con grupos de obstáculos grandes y abundantes (granjas grandes, sotobosques) separados por espacios abiertos de 10 veces la altura de los obstáculos; también zonas con mucha vegetación con pequeños espacios intermedios, como matorrales, huertas o bosques de plantación densos.
Cerrado	1.0	Terreno cubierto total y regularmente por obstáculos grandes de tamaño similar, con espacios abiertos comparables a la altura de los mismos; por ejemplo bosques maduros, ciudades homogéneas o pueblos
Caótico	≥ 2	Centros de grandes poblaciones con una mezcla de edificios de distintas alturas. También bosques grandes con muchos claros

Tabla 2.6. Valores de z_0 según la clasificación revisada de Wieringa 1992.

donde S_{ij} , términos relativos a la correlación cruzada, viene dado por la Ecuación 2.46 cuando $i \neq j$. Para los términos S_{ii} existen diversos modelos en función de la aplicación final del viento y de las consideraciones de diseño.

$$S_{ij}(\omega) = \sqrt{S_{ii}(\omega) S_{jj}(\omega)} e^{-f_{ij}(\omega)} \quad (2.46)$$

El término $e^{-f_{ij}(\omega)}$ es la función de coherencia. Si dos puntos i y j están a la misma altura, la función de coherencia tiende a 1 y la Ecuación 2.46 se puede reescribir como la Ecuación 2.47.

$$S_{ij}(\omega) = S_{ii}(\omega) e^{-\frac{C_{ad}}{4\pi^2(h)}|\omega|} \quad (2.47)$$

donde C_d es el factor de decaimiento, que toma valores entre 7 y 20 [24], d es la distancia entre los puntos i y j , y $\bar{u}(h)$ es la velocidad media del viento a la altura de referencia h .

Existen varios modelos desarrollados para el cálculo de la PSD y por extensión el término S_{ii} de la diagonal. Las distintas funciones describen el contenido en frecuencia de las series de velocidades de viento. Para su cálculo suele tomarse el término adimensional S_{ND} definido como en la Ecuación 2.48.

$$S_{ND} = \frac{nS}{\sigma^2} \quad (2.48)$$

La frecuencia n es en hercios y σ^2 es la variancia de la turbulencia. Para terrenos llanos, el cálculo de σ se realiza según la Ecuación 2.49.

$$\sigma = \frac{\bar{u}}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.49)$$

Algunos de los modelos de densidad espectral más habituales en la generación de señales de viento a partir de PSD, y los que se programarán en el modelo de vientos, son los de Kaimal, Davenport, Von Karman, Solari, Panofsky y Harris. Todos ellos tienen en común el uso de la variable $f_L = nL_z/\bar{u}$, donde L_z depende de la longitud en la que se considera la turbulencia y depende de cada modelo.

- **Densidad espectral de Kaimal** [25, 26]: La función para la autocorrelación normalizada sigue la Ecuación 2.50. Es la más empleada y es la que se recoge para vientos horizontales en el caso de la norma europea EN 1991-1-4:2004 [3]. Para calcular el valor de L_{zK} se emplea la Ecuación 2.51.

$$S_{ND} = 6.8 \frac{f_L}{(1 + 10.2f_L)^{\frac{5}{3}}} \quad (2.50)$$

$$L_{zK} = 411 \left(\frac{z}{300}\right)^{0.046+0.074\ln(h)} \quad (2.51)$$

- **Densidad espectral de Davenport** [27]: La función para la autocorrelación normalizada sigue la Ecuación 2.52. Es el empleado por los códigos chino (GB50009-2006) y canadiense (NBCC-2005)[28]. Se emplea el valor de $L_{zD} = 1200$ m.

$$S_{ND} = 2 \frac{f_L^2}{3(1 + f_L^2)^{\frac{4}{3}}} \quad (2.52)$$

- **Densidad espectral de Von Karman** [29]: La función para la autocorrelación normalizada sigue la Ecuación 2.53. Es la empleada en los estándares japonés (AIJ-RLB-2004) y australiano (AS/NZS 1170.2-2002).[28]. Para calcular el valor de L_{zVK} se emplea la Ecuación 2.54.

$$S_{ND} = 4 \frac{f_L}{(1 + 70.8f_L^2)^{\frac{5}{6}}} \quad (2.53)$$

$$L_{zVK} = 300 \left(\frac{z}{300}\right)^{0.046+0.074\ln(h)} \quad (2.54)$$

- **Densidad espectral de Solari** [30]: La función para la autocorrelación normalizada sigue la Ecuación 2.55. Es una versión más precisa de la de Kaimal, adoptada únicamente en el código americano (ANSI/ASCE 7-10) [28]. Para calcular el valor de L_{zS} se emplea la Ecuación 2.51, el mismo que para la de Kaimal.

$$S_{ND} = 6.868 \frac{f_L}{(1 + 10.302f_L)^{\frac{5}{3}}} \quad (2.55)$$

- **Densidad espectral de Panofsky** [31]: La función para la autocorrelación normalizada sigue la Ecuación 2.56. Se aproxima más a la componente vertical de la velocidad del viento real [32]. Para calcular el valor de L_{zP} se emplea la Ecuación 2.51, igual que para el de Kaimal.

$$S_{ND} = 1.1 \frac{f_L}{(1 + 4f_L)^2} \quad (2.56)$$

- **Densidad espectral de Harris** [33]: La función para la autocorrelación normalizada sigue la Ecuación 2.57. Es la más adecuada para turbulencias de baja frecuencia. Se toma como valor $L_{zD} = 1800$ m.

$$S_{ND} = 6.8 \frac{f_L}{(1 + 10.2f_L)^{\frac{5}{3}}} \quad (2.57)$$

La Figura 2.31 Muestra una comparación de los distintos modelos de densidad espectral. El modelo de Harris no se representa ya que su rango de frecuencias de aplicación es más bajo a los de los demás espectros. Todos los modelos anteriores están obtenidos para componentes de turbulencia sin tener en cuenta las componentes de ráfaga ni las variaciones día-noche. La Figura 2.32 [34], el llamado espectro de Van der Hoven, muestra la distribución de la potencia de la velocidad del viento en función de la frecuencia. Como se puede observar, existe una zona de baja energía que establece la frontera entre la componente turbulenta y la componente de bajas frecuencias. En estudios con un muestreo superior a las 2 horas será necesario tener en cuenta los modelos de bajas frecuencias.

A partir de los términos S_{ii} y S_{ij} , se construye la matriz PSD $S(\omega)$ según lo indicado en la Ecuación 2.45. Debido a la forma en la que está construida, $S(\omega)$ es una matriz simétrica semidefinida positiva dependiente de ω . Por lo tanto, se puede emplear la factorización de Cholesky para descomponer S en dos matrices triangulares complejas conjugadas cuya diagonal son valores reales no negativos, una superior y otra inferior, tales que cumplen la Ecuación 2.58.

$$S(\omega) = H(\omega) H(\omega)^{*T} \quad (2.58)$$

De esta forma, cada una de las componentes en frecuencia de \mathbf{u} a partir de su matriz de PSD corresponde a estados en la Ecuación 2.59.

$$v_j = \int_{-\infty}^{\infty} H_{j1} e^{i\omega t} dB_1(\omega) + \int_{-\infty}^{\infty} H_{j2} e^{i\omega t} dB_2(\omega) \\ + \dots + \int_{-\infty}^{\infty} H_{jj} e^{i\omega t} dB_j(\omega), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.59)$$

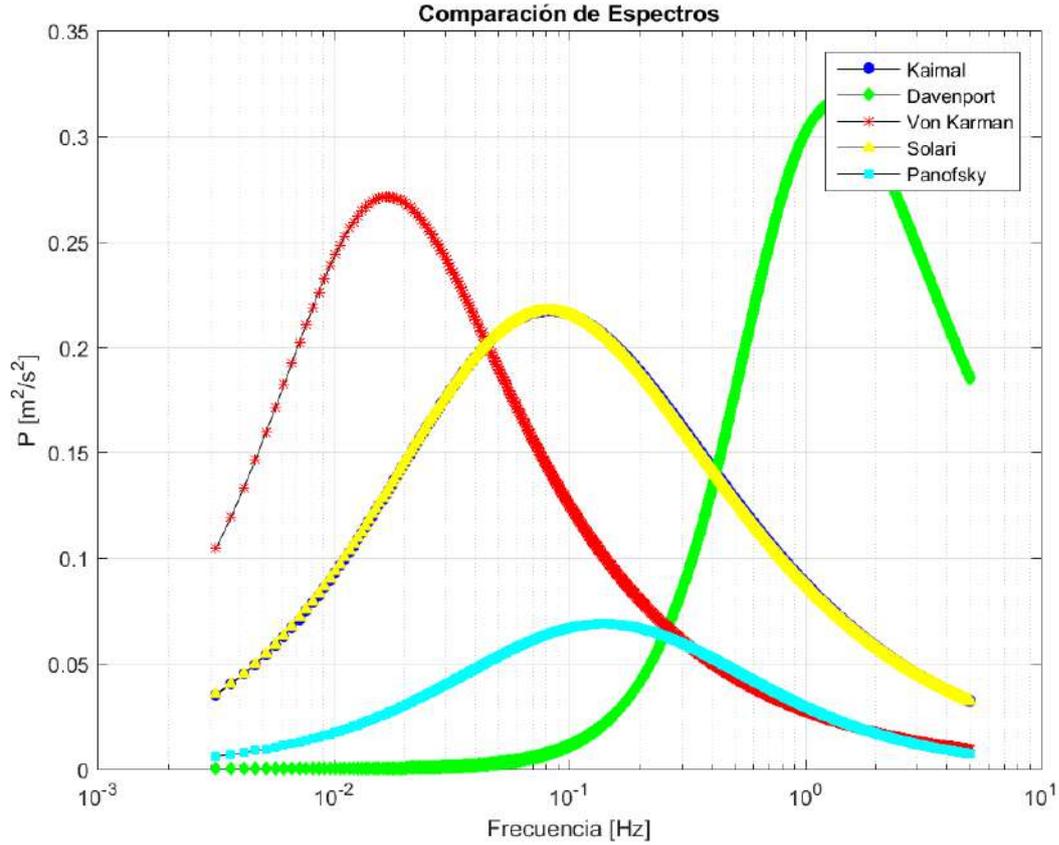


Figura 2.31. Comparación de modelos de densidad espectral a $z = 30$ m, $z_0 = 0.01$ y $\bar{u} = 10$ m/s

Donde dB_j son procesos de Lévy, procesos estocásticos incrementales ortogonalmente independientes, tomados generalmente tal que $B_j - B_k \approx N(0, j - k)$, $0 \leq k < j$ donde $N(\mu, \sigma^2)$ es la distribución normal de media μ y desviación típica σ y se cumpla la Ecuación 2.60.

$$\mathbb{E}(dB_j(\omega), dB_k(\omega)) = \delta_{rs}\delta_{jk}d\omega_r \quad (2.60)$$

Computando estocásticamente las componentes de \mathbf{u} y conocida su matriz PSD, se puede obtener su expresión temporal según la Ecuación 2.61.

$$u_j = 2\Delta\omega \sum_{r=1}^j \sum_{k=1}^n |H_{jr}(\omega_{rk})| \cos(\omega_{rk}t - h_{jr}(\omega_{rk}) + \phi_{rk}), j = 1, 2, \dots, n \quad (2.61)$$

En la Ecuación 2.61 se requiere computar la variable aleatoria ϕ_{rk} , que es un ángulo de fase aleatorio uniformemente distribuido entre 0 y 2π ; ω_{rk} se muestrea en intervalos $\Delta\omega$ y $h_{jr}(\omega_{rk})$ representa un ángulo dado por la matriz PSD según la Ecuación 2.62.

$$h_{jr}(\omega) = \text{atan} \left(\frac{\text{Im}(H_{jr}(\omega))}{\text{Re}(H_{jr}(\omega))} \right) \quad (2.62)$$

A partir de las velocidades obtenidas en la Ecuación 2.61 se puede obtener la componente de turbulencia que se le añadirá a la componente de velocidad media en la Ecuación 2.44.

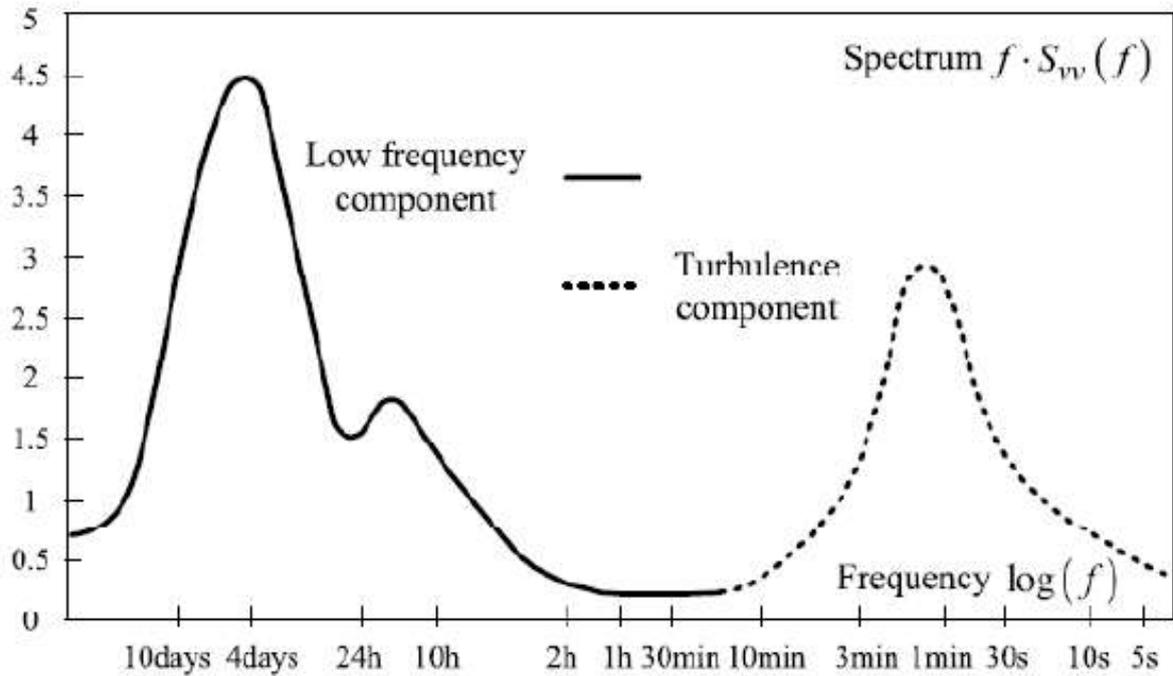


Figura 2.32. Espectro de Van der Hoven [34]

2.3.2.3. Modelos autorregresivos

Otro tipo de modelos muy empleados para la generación de señales de viento son los basados en métodos autorregresivos [22]. Tienen su base en el modelo de Akaike [35], que permite predecir el comportamiento de la velocidad del viento en base solo a datos previos. Esto se consigue con la adición de un ruido blanco gaussiano (media cero y distribución normal) que añade la componente de aleatoriedad al modelo. Este tipo de modelos siguen la Ecuación 2.63, donde δ es una constante de ajuste, ϵ_t es el ruido blanco, los coeficientes $a_i, i = 1, 2, \dots, p$ los parámetros de autorregresión y $b_i, i = 1, 2, \dots, q$ los parámetros de media móvil. Los términos a_i y b_i se ajustan para producir el menor error posible, generalmente usando el método de los mínimos cuadrados, y los índices p y q se escogen en función del tamaño de la muestra de datos.

$$X_t = \delta + \epsilon_t \sum_{j=1}^p a_j X_{t-j} + \sum_{i=1}^q b_i \epsilon_{t-i} \quad (2.63)$$

En función de la presencia o no del parámetro b_i , se pueden emplear modelos autorregresivos puros, AR, ($b_i = 0$) o modelos autorregresivos mixtos con media móvil, ARMA, ($b_i \neq 0$). La idoneidad de unos u otros modelos es objeto de estudio y se determina según el criterio de validación empleado. En el caso de contar con un modelo AR puro, es posible obtener los valores de la matriz de correlación cruzada aplicando la llamada ecuación de Yule-Walker (Ecuación 2.64).

$$\rho_i = \sum_{j=1}^p a_j \rho_{i-j} \quad (2.64)$$

donde $\rho_i = Cov(s, s + i) / \sigma^2$ es la función de autocorrelación, y representa la forma estándar de la función de covariancia.

Expresando vectorialmente $\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ \dots \ a_p]^T$ y $\boldsymbol{\rho} = [\rho_1 \ \rho_2 \ \rho_3 \ \dots \ \rho_p]^T$, se puede estimar la función de autocorrelación \mathbf{R} de orden p según la Ecuación 2.65.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \dots & \rho_{p-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{p-1} & \rho_{p-2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

Por lo tanto, aplicando la Ecuación 2.66 se obtiene el set de parámetros \mathbf{a} , que permite simular la velocidad del viento en cada paso a partir de sus valores previos.

$$\boldsymbol{\rho}^T = \mathbf{R} \cdot \mathbf{a}^T \Rightarrow \mathbf{a}^T = \mathbf{R}^{-1} \cdot \boldsymbol{\rho}^T \quad (2.66)$$

Estos modelos se pueden aplicar de manera recursiva, por ejemplo a modo de filtro partiendo de una señal de ruido blanco [36], o para pronosticar el futuro comportamiento de una señal de viento de partida [37]. También existen otros modelos más complejos, enfocados a la predicción de valores concretos de las señales de viento tanto a corto como a medio y largo plazo [38].

2.4. Análisis de estructuras con el método de elementos finitos

El método de elementos finitos (FEM) es un procedimiento empleado para dar una solución numérica a las ecuaciones que gobiernan los distintos problemas que se pueden encontrar en la naturaleza. Generalmente estas ecuaciones se encuentran en forma diferencial o integral, lo que para problemas complejos las hacen intratables analíticamente. Este método permite obtener numéricamente resultados concretos que representan el comportamiento del sistema. Por tanto, se trata de un método numérico que no permite generalmente obtener soluciones exactas del sistema bajo cualquier condición, sino que da como resultado una solución concreta, habitualmente para un sistema aproximado con un error debidamente acotado. Este tipo de procedimientos se suelen basar en sistemas lineales algebraicos para resolver las ecuaciones, convirtiendo los ordenadores en una herramienta inestimable.

El FEM nace como desarrollo natural del cálculo de estructuras clásico en la década de los 50 con la implementación de los primeros ordenadores, si bien no se empieza a aplicar ampliamente hasta los años 60 y 70. En un principio se aplicaba únicamente a problemas lineales muy limitados, especialmente en el cálculo estructural, pero con los trabajos de Argyris, Clough, y Zienkiewicz se extiende su uso y se amplía a nuevas aplicaciones, como el cálculo no lineal que atañe a este proyecto [39, 40]. En la actualidad es un método que se emplea con frecuencia en la resolución de problemas de ingeniería, existiendo una gran variedad de software especializado. Uno de los más usados es ANSYS, que será también el que se emplee en este proyecto.

En primer lugar, para aplicar este método es necesario identificar el problema a tratar. Para ello hay que analizar los distintos elementos que lo componen, cómo se comportan, la precisión buscada, etc. A continuación, se elabora un modelo conceptual que incluya todos los datos necesarios para su análisis. Para aplicarlo a estructuras, los cuatro aspectos fundamentales a contemplar son la descripción geométrica del sistema, las expresiones matemáticas que definen su comportamiento, las propiedades de los materiales que lo componen y las cargas que actúan. Una vez establecidos estos parámetros, lo siguiente es aplicar el FEM propiamente dicho. Esto pasa por discretizar el modelo geométrico en elementos más sencillos y de menor tamaño que

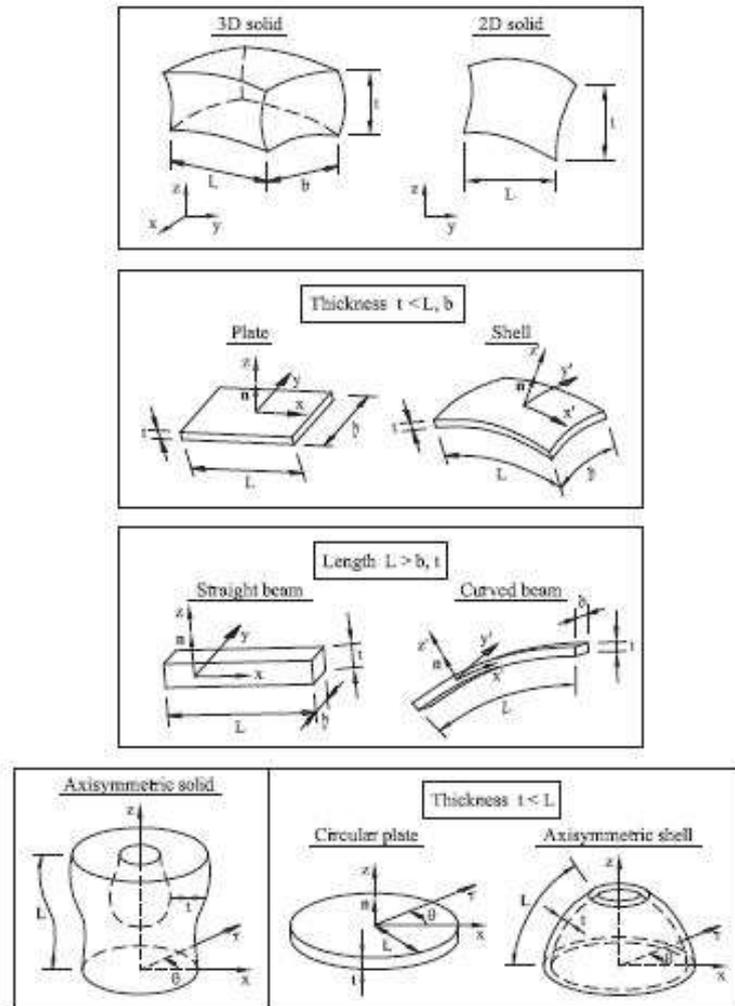


Figura 2.33. Tipos de elemento típicos en análisis de estructuras [41]

formen una malla del sistema, y añadir unas condiciones de contorno definidas por las cargas. Algunos elementos típicos se muestran en la Figura 2.33. El modelo obtenido es el llamado *modelo computacional*, y es el que se resolverá para obtener la solución. Para ello se resuelve el sistema de ecuaciones correspondiente a los nodos de la malla mediante métodos numéricos y se procesa la solución. Los software que aplican el FEM a análisis de estructuras suelen basarse en el principio de los trabajos virtuales y la matriz de rigidez del sistema.

2.4.1. Principio de los trabajos virtuales y matriz de rigidez

El Principio de los Trabajos Virtuales (PTV) fue desarrollado por John Bernoulli y provee de un método general para obtener el desplazamiento en un punto concreto de una estructura [42]. Por una parte, es sabido que si se aplican una serie de cargas externas P a una estructura, estas generarán unas cargas internas u en la mismas, relacionadas necesariamente por ecuaciones de equilibrio. A su vez, desplazamientos externos Δ ocurrirán en los puntos de aplicación de P y desplazamientos internos δ en los de u . Estos desplazamientos no tienen por qué ser elásticos ni estar relacionados con las cargas, pero sí que deben regirse por las ecuaciones de compatibilidad. En resumen, si se conocen los desplazamientos externos, los correspondientes desplazamientos internos quedan únicamente definidos. Por lo tanto, aplicando el principio de conservación de la

energía:

$$\underbrace{\sum P\Delta}_{\text{Trabajo de las cargas externas}} = \underbrace{\sum u\delta}_{\text{Trabajo de las cargas internas}} \quad (2.67)$$

Se va a aplicar el PTV a un sistema sometido a cargas reales P del cual se quiere conocer el desplazamiento en un punto C . En primer lugar se toma el sistema sin las cargas y se le aplica una fuerza virtual unitaria P_V en C en la dirección del desplazamiento. Esta fuerza genera una carga virtual interior u_V , relacionada por las ecuaciones de equilibrio. A continuación se aplican las cargas reales P , creando desplazamientos externos Δ e internos δ . Por tanto, las fuerzas virtuales generan un trabajo virtual externo $1 \cdot \Delta$ y un trabajo virtual interno $\sum u \cdot \delta$. Aplicando el principio de conservación de la energía expuesto en 2.67, obtenemos $1 \cdot \Delta = \sum u \cdot \delta$, de donde se sigue que directamente $\Delta = \sum u \cdot \delta$, como se quería obtener. Se puede proceder de manera análoga para los giros, aplicando un momento virtual en lugar de una fuerza.

Este principio permite introducir el concepto de rigidez. Se define rigidez como la capacidad de un cuerpo para resistir una deformación cuando se aplica una carga en uno de sus grados de libertad, dejando los demás fijos. Para cuantificar esta propiedad se emplean los coeficientes de rigidez, que son la carga que se debe aplicar en dicho grado de libertad para producir una deformación o desplazamiento unitario. En elementos viga, los coeficientes se calculan aplicando el PTV a una viga biempotrada a la que se le libera uno de sus grados de libertad (Figura 2.34). Esta viene definida por la longitud L , el área A , el módulo de Young E y el momento de inercia I . Por ejemplo, se calculará el coeficiente de rigidez para un desplazamiento en 1 bajo una carga axial. Se establece en primer lugar el sistema de coordenadas locales en los nodos, en el cual se representa cada uno de los posibles grados de libertad de los mismos. A continuación se coge la viga biempotrada, se libera el grado de libertad 1 y se le aplica una fuerza virtual unitaria en sentido axial. A partir del PTV, se obtiene la Ecuación 2.68, de lo que se deduce que el coeficiente de rigidez para esa combinación de grado de libertad y dirección de la carga es $k_{11} = \frac{AE}{L}$.

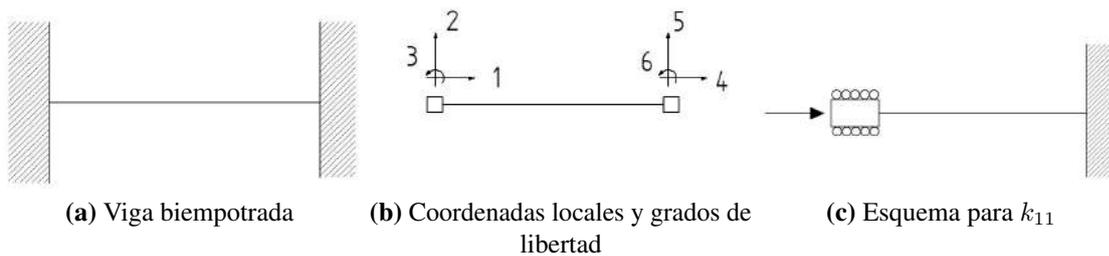


Figura 2.34. Método para calcular los coeficientes de rigidez aplicando PTV

$$1 \cdot u_1 = \frac{NL}{AE} \Rightarrow k_{11} = \frac{AE}{L} \quad (2.68)$$

Siguiendo este procedimiento se puede obtener los coeficientes de rigidez para todos los grados de libertad de los dos nodos. Dispuestos en forma matricial 6x6, se obtiene la matriz de rigidez \mathbf{K} del sistema local. A un elemento viga con dos nodos le corresponde la matriz de rigidez indicada en 2.69 y a un elemento barra le corresponde la de 2.70.

$$[\mathbf{K}]_L = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

$$[\mathbf{K}]_L = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{AE}{L} & 0 & \frac{AE}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

El sistema local debe estar en equilibrio, por lo que se debe de cumplir:

$$[\mathbf{K}]_L \begin{Bmatrix} \theta \\ u \end{Bmatrix}_N = \begin{Bmatrix} M \\ F \end{Bmatrix}_N - \begin{Bmatrix} M \\ F \end{Bmatrix}_R \quad (2.71)$$

donde $\begin{Bmatrix} \theta \\ u \end{Bmatrix}_N$ es el vector de giros y desplazamientos en los nodos, $\begin{Bmatrix} M \\ F \end{Bmatrix}_N$ es el vector de cargas en los nodos y $\begin{Bmatrix} M \\ F \end{Bmatrix}_R$ es el vector de cargas en las reacciones. De este modo los desplazamientos en los nodos quedan definidos únicamente por las propiedades del material y las cargas que se aplican al sistema. Además, esta definición permite fácilmente el paso de coordenadas locales a globales y la generalización a sistemas compuestos por varios de estos elementos. Para pasar de un sistema de dos nodos en coordenadas locales con ángulos θ_1 y θ_2 respecto al sistema global, es suficiente con emplear las matrices de rotación correspondientes, de tal manera que $[\mathbf{K}]_G = [\mathbf{R}]^T [\mathbf{K}]_L [\mathbf{R}]$. La matriz de rotación para el elemento viga es la indicada en 2.72 y para el elemento barra, la de 2.73.

$$[\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sen \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sen \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta_2 & \sen \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sen \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

$$[\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sen \theta_1 & 0 & 0 \\ -\sen \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta_2 & \sen \theta_2 \\ 0 & 0 & -\sen \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

Para estudiar un sistema conformado por varios de estos elementos, se establece en primer lugar un sistema de coordenadas global y se identifican los nodos para los cuales se quieren conocer sus desplazamientos. El objetivo sigue siendo generar una matriz de rigidez global que permita solucionar el sistema de la Ecuación 2.71 en coordenadas globales. La matriz $[K]_G$ será $N \times N$, donde N es el número de grados de libertad de los nodos del sistema, pudiéndose construir una matriz reducida aplicando las condiciones de contorno para los desplazamientos conocidos y eliminando sus filas y columnas asociadas. Los términos k_{ij} de la matriz de rigidez global se calculan como la suma de los coeficientes de rigidez de los elementos que influyen en esos mismos nodos, expresados respecto a las coordenadas globales.

Los programas de cálculo aplicando el método de elementos finitos al análisis de estructuras lineales buscan típicamente resolver a gran escala el sistema de ecuaciones mencionado anteriormente. Se establecen los nodos del mallado como nodos problema, se calcula la matriz de rigidez y las cargas del sistema y se resuelven las ecuaciones matriciales. Tanto para calcular los esfuerzos como para resolver el sistema de ecuaciones se emplean normalmente métodos numéricos, siendo los basados en eliminación gaussiana o en procesos iterativos (Gauss-Siedel) los más empleados para ecuaciones lineales [43]. Como criterio de convergencia se establece normalmente el cumplimiento del PTV, permitiendo cierta holgura entre las fuerzas externas e internas. Este sistema también aplica para elementos 2D y 3D (ver [44, 45, 46, 47]), teniendo sus propias matrices de rigidez asociadas. No obstante, el modelo a resolver en este proyecto emplea únicamente elementos de los tipos tratados anteriormente, por lo que su desarrollo carece de interés práctico.

2.4.2. FEM para sistemas no lineales

Los métodos descritos en la sección anterior describen la realidad con precisión únicamente para los sistemas lineales. Estos sistemas tienen una rigidez \mathbf{K} constante e independiente del desplazamiento o la fuerza, por lo que siguen la ley de Hooke (Figura 2.35a). Los sistemas no lineales, en cambio, tiene una \mathbf{K} variable, por lo que viene determinada por las condiciones del sistema (Figura 2.35b). Esto hace que los sistemas de ecuaciones ya no sean lineales y su resolución aplicando cálculo numérico matricial deje de ser posible.

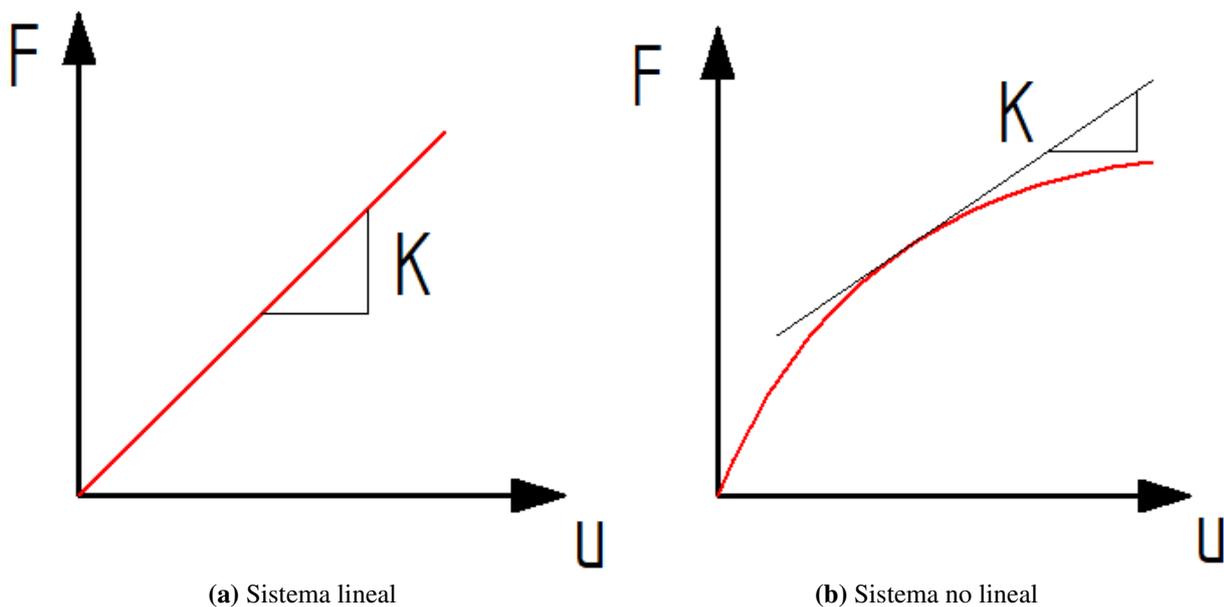


Figura 2.35. Sistema lineal frente a no lineal

Esta ausencia de linealidad se puede dar generalmente por tres causas: geometría no lineal (como grandes deformaciones), propiedades del material no lineales (cambios en la plasticidad) o cambios abruptos en la rigidez del modelo (contactos entre piezas). Las que más interesan para este proyecto son las de origen geométrico, puesto que son las que aparecen en la línea. Debido a las grandes deformaciones que sufre el cable en relación con su sección, la orientación de las cargas queda determinada por la posición en el espacio de cada segmento de cable, por lo que el desplazamiento del mismo influye en cómo se comporta ante dicha carga. Además, la hipótesis

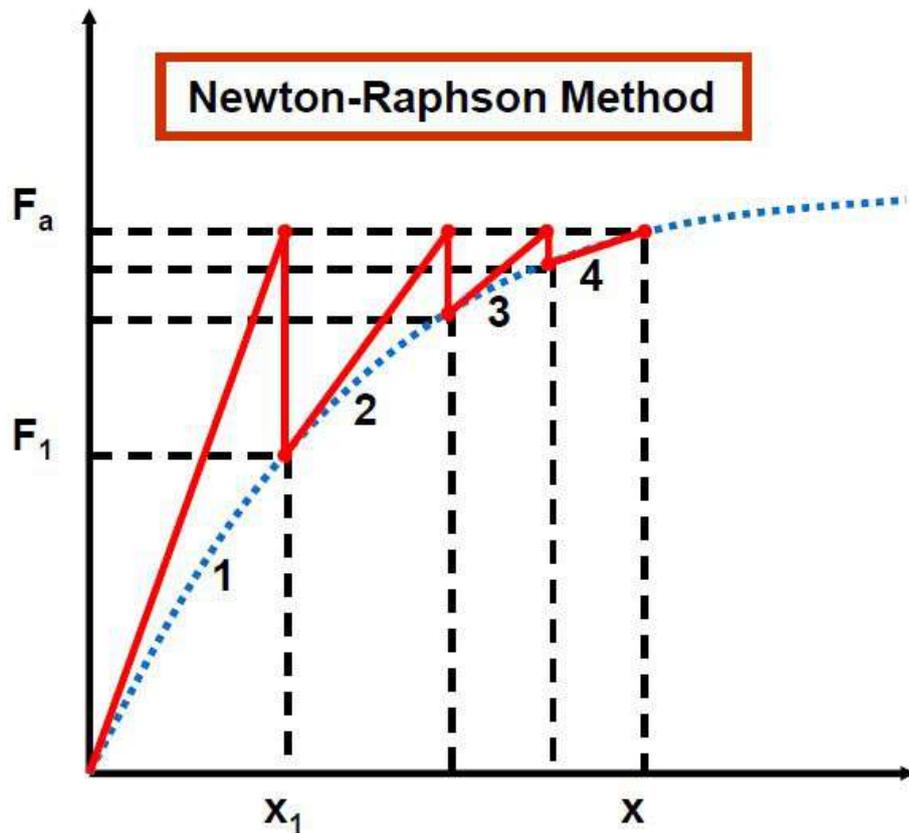


Figura 2.36. Método de Newton-Raphson [48]

de pequeños desplazamientos en la que se basa gran parte de los conceptos empleados en la sección 2.4.1 deja de ser válida.

Para solucionar este problema se suele linealizar la resolución del sistema. Esto es, modificar el método de resolución de tal manera que se pueda obtener una solución del sistema no lineal combinando varias iteraciones de métodos lineales ajustando los parámetros entre las mismas. Existen varios métodos distintos para este tipo de sistemas, siendo el más empleado (y el que emplea ANSYS Mechanical por defecto) el método de Newton-Raphson [48].

En el método de Newton-Raphson, la carga total F_a se aplica en la iteración 1, siendo el resultado x_1 . A partir de los desplazamientos se calculan las fuerzas internas F_1 . Si $F_a \neq F_1$, entonces el sistema no está en equilibrio, por lo que se calcula la nueva matriz de rigidez (pendiente de la línea de puntos) en base a las condiciones actuales. La diferencia $F_a - F_1$ es la fuerza residual, que debe ser lo suficientemente pequeña para considerar que la solución ha convergido. Este proceso se repite hasta que $F_a = F_i$.

Una desventaja de este método es que no se asegura la convergencia. Para aumentar las posibilidades de que el algoritmo converja, se recomienda comenzar con la solución dentro del radio de convergencia y aplicar las cargas incrementalmente. En el caso de ANSYS Mechanical, el software adapta la resolución para cumplir estas condiciones. Además, la carga se aplica en diferentes pasos (ver Figura 2.37) hasta que converge antes de aplicar el siguiente paso.

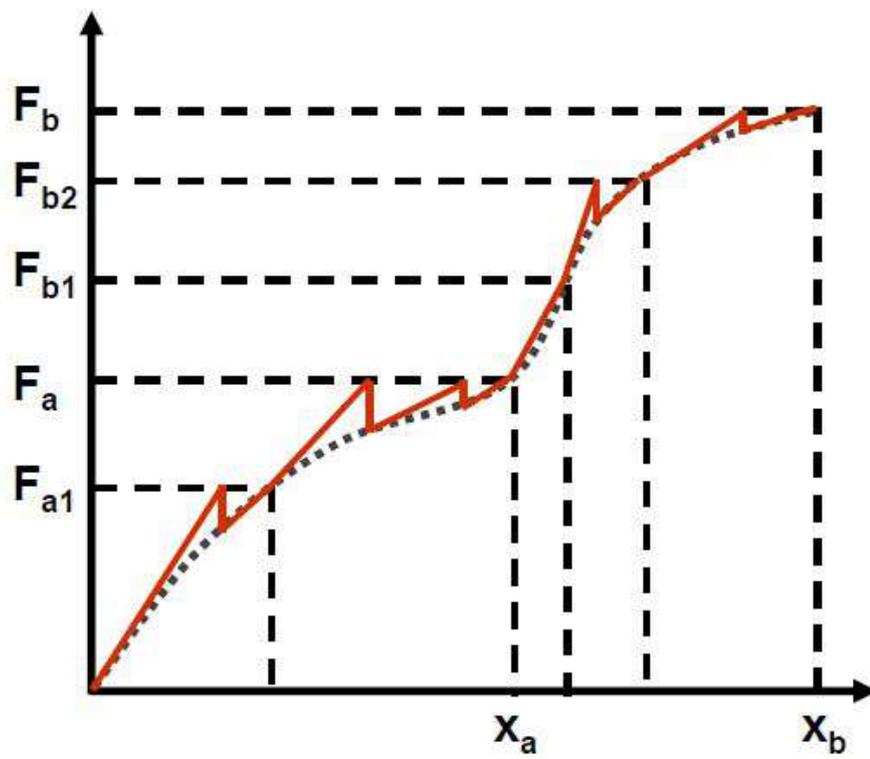


Figura 2.37. Varios pasos de carga [48]

Capítulo 3

Características y parámetros del sistema

El primer paso para la obtención del modelo numérico es establecer las características físicas en las que se va a basar. Esto incluye tanto la geometría como las propiedades mecánicas de los distintos elementos que la componen. Para la catenaria se tomará un conductor tipo AL/AW Condor, cuyos parámetros han sido proporcionados por Red Eléctrica de España. En el caso de las crucetas, se eligen las ACSR DX para 245 kV de PFISTERER, de las cuales se adjuntan los planos con esta memoria. Cabe destacar que el modelo se programará de tal manera que pueda ser aplicable a cualquier tipo de conductor y cruceta, siempre que se disponga de los parámetros adecuados.

Para los datos dependientes de la línea, se aplicará el Reglamento para Líneas de Alta Tensión (RLAT) [2]. No obstante, uno de los objetivos de este proyecto es comprobar el comportamiento de este tipo de líneas bajo cargas de viento reales con el fin de comprobar precisamente la normativa, por lo que lógicamente no se aplicará en esos casos.

3.1. Características del conductor

Como ya se ha indicado, el conductor es del tipo AL/AW Condor, compuesto por acero recubierto de aluminio. Las características de dicho conductor se recogen en la siguiente tabla:

Conductor AL/AW Condor	
Sección (mm ²)	454.5
Diámetro (mm)	27.72
Área (mm ²)	603.5
Peso (daN/m)	143
Carga rotura (daN)	12897
Módulo elasticidad (daN/mm ²)	6728
Coefficiente dilatación (1/°C)	0.0000202

Tabla 3.1. Características del conductor AL/AW Condor

A la hora de introducir estos datos en ANSYS, se creará un nuevo material con dichas características. Esto permite que el modelo generado se comporte lo más parecido a la realidad posible. Uno de los datos necesarios para la completa definición del material es el coeficiente de Poisson, del cual no se dispone. Por tanto, se empleará el coeficiente habitual del aluminio, $\nu = 0.34$. Este coeficiente no suele variar sustancialmente dentro del mismo material. Además,

solo es especialmente relevante cuando se tiene en cuenta el momento torsor respecto a la sección, caso que, tal y como se verá más adelante, no se va a dar en este proyecto. La introducción en el programa queda como en la Figura 3.1.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	3207,3	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
5	Coefficient of Thermal Expansion	2,02E-05	C ⁻¹		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's...			
8	Young's Modulus	6858,3	MPa		
9	Poisson's Ratio	0,34			
10	Bulk Modulus	7,1441E+09	Pa		
11	Shear Modulus	2,5591E+09	Pa		
12	Tensile Ultimate Strength	28,93	MPa		

Figura 3.1. Introducción en ANSYS de las propiedades del conductor AL/AW Condor

3.2. Tablas de tendido

En servicio y antes de aplicar las cargas, la línea está sometida a una carga tensional determinada. Esto viene indicado en las llamadas tablas de tendido. Estas se generan siguiendo las indicaciones en el apartado 3 del RLAT [2].

En primer lugar, se identifican varios tipos de zona en función de la altitud geográfica a la que se encuentre: Zona A (menos de 500 m sobre el nivel del mar), Zona B (entre 500 m y 1000 m) y Zona C (más de 1000 m). En este caso, la línea de la cual se poseen datos se encuentra en la Zona B.

A continuación se distinguen dos hipótesis de distribución. Por un lado se toman las condiciones de servicio bajo carga para el cálculo de los apoyos. Esta hipótesis resulta irrelevante para este proyecto, puesto que no tiene como objetivo el dimensionado de los apoyos, y por consiguiente, se desecha. Por otro lado se tiene la hipótesis de tendido. En este caso se toma como estado tensional el “Tensado al límite dinámico” o “Tensión de Cada Día” (EDS). Este estado es el que tiene en cuenta la vibración causada por el viento en condiciones de temperatura normales. En este caso, se adopta como criterio que la tensión a 15 °C no debe exceder el 19 % de la carga a rotura del cable. A partir de este dato y la tracción máxima del cable con un coeficiente de seguridad determinado, se calcula el tense admisible. Para el caso de esta línea, se obtiene la Tabla 3.2.

Tense admisible			
E.D.S. (%)	E.D.S. (daN)	Tracción (%)	Tracción (daN)
19	2450.43	40	5158.8

Tabla 3.2. Tense admisible de la línea

Bajo estas hipótesis es posible establecer la tabla de tendido del conductor. Esta tabla recoge los valores de la tensión, el parámetro de catenaria c y la flecha en la mitad del vano para varios valores de temperatura y vano regulador. De esta forma, basta con mirar en la tabla la combinación de temperatura y longitud de vano para conocer los parámetros que definen el tendido de la línea. En este proyecto se trabajará con la Tabla 3.3. En ella se muestran los datos para 20 °C. Si se trabaja a otras temperaturas o longitudes de vano será necesario emplear las tablas correspondientes.

Vano regulador (m)	20 °C			Hipótesis inicial	% EDS
	Tracción (daN)	Parámetro (m)	Flecha (m)		
100	2686	1878	0.67	EDS	19
150	2630	1839	1.53	EDS	19
200	2584	1807	2.77	EDS	19
250	2550	1783	4.38	EDS	19
300	2527	1767	6.37	EDS	19
350	2510	1755	8.72	EDS	19
400	2498	1747	11.45	EDS	19
450	2489	1741	14.54	EDS	19
500	2482	1736	18	EDS	19
550	2477	1732	21.83	EDS	19
600	2473	1729	26.02	EDS	19
650	2470	1727	30.58	EDS	19
700	2467	1725	35.5	EDS	19
750	2465	1724	40.79	EDS	19
800	2464	1723	46.43	EDS	19
850	2462	1722	52.46	EDS	19
900	2461	1721	58.83	EDS	19
950	2460	1720	65.58	EDS	19
1000	2459	1720	72.69	EDS	19

Tabla 3.3. Tabla de tendido para 20 °C

3.3. Características de las crucetas

Para las crucetas se emplearán las ACSR DX Condor para 245 kV de PFISTERER, como ya se ha indicado. No obstante, como se van a modelar de manera simplificada, la mayor parte de las características geométricas y mecánicas de las que se dispone no son necesarias. En particular, son relevantes las longitudes del brazo y la riostra, el ángulo existente entre ellos y el peso de cada uno. Como se demuestra en [8], estos son los principales parámetros que afectan a su comportamiento, por lo que es necesario controlarlos.

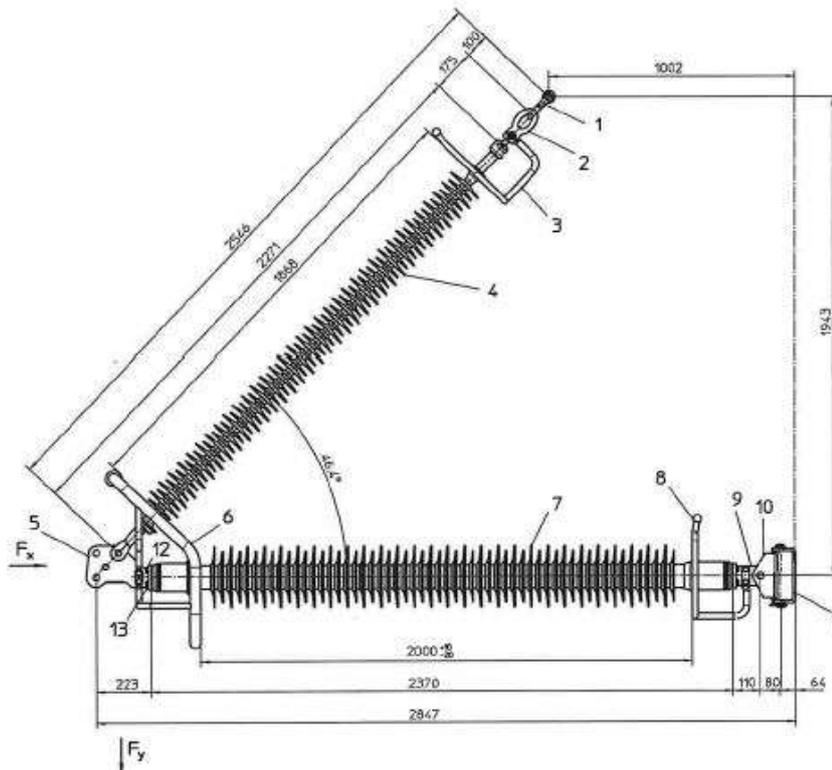


Figura 3.2. Plano de la cruceta ACSR DX Condor

Las características geométricas se pueden obtener directamente del plano. Para el peso de cada parte, se toman los elementos que lo componen siguiendo el plano y se suman sus respectivas masas. Los elementos que son compartidos tanto por el brazo como por la riostra añaden la mitad de su peso a la suma de cada uno por simplicidad. Estos elementos son relativamente ligeros, por lo que no tienen mucho efecto sobre la masa del conjunto. Para introducir la masa en ANSYS se calcula la densidad del elemento. Las características de las crucetas se recogen en la siguiente tabla:

Cruceta ACSR DX Condor		
	Brazo	Riostra
Longitud (mm)	2847	2546
Diámetro (mm)	100	32.8
Sección (mm ²)	7853.98	844.96
Masa efetiva (kg)	88.79	30.54
Densidad (kg/m ³)	14196	3964.2
θ (°)	46.4	

Tabla 3.4. Características cruceta ACSR DX Condor

En las Figuras 3.3 y 3.4 se puede ver cómo quedan los datos del material del brazo y la riostra una vez importados a ANSYS. Los datos adicionales introducidos son necesarios para poder continuar, pero por la manera en que se definirán los elementos de la cruceta, no tendrán ningún efecto. En cualquier caso, se han empleado valores habituales para este tipo de aisladores [10].

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	14198	kg m^-3		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's...			
6	Young's Modulus	68900	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,183			
8	Bulk Modulus	3,6225E+10	Pa		
9	Shear Modulus	2,9121E+10	Pa		

Figura 3.3. Introducción en ANSYS de los parámetros del brazo

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	3964,2	kg m^-3		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's...			
6	Young's Modulus	68900	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,183			
8	Bulk Modulus	3,6225E+10	Pa		
9	Shear Modulus	2,9121E+10	Pa		

Figura 3.4. Introducción en ANSYS de los parámetros de la riostra

Además, en los planos se indica que la fuerza necesaria para que se produzca pandeo es de 15.75 kN en la dirección horizontal (F_x) y 100.5 kN en la vertical (F_y). Por lo tanto, esta se podrá emplear en caso de que no se superen estos límites.

Capítulo 4

Modelado de la línea

El modelado de la línea consta de tres partes. En primer lugar, es necesario generar una curva catenaria a partir de la cual crear el modelo geométrico. A continuación, se crea dicho modelo en un editor de geometrías (SpaceClaim en este caso). Por último, se genera el modelo sobre el que se aplicará el método de elementos finitos, realizando un mallado de la geometría y estableciendo unas condiciones de contorno. Este último paso es el más extenso, por lo que en este capítulo solo se tratará el modelo generado para el procesamiento de las condiciones iniciales en un único vano, completándose en el Capítulo 6 con la inclusión de las cargas y las crucetas. En la Figura 1.2 se muestra el esquema de los pasos que se han seguido para obtener el modelo final.

4.1. Generación de la curva catenaria

Como ya se indicó en el Capítulo 2, se empleará la aproximación parabólica de la curva catenaria. Recordemos que esta sigue la fórmula de la Ecuación 2.32:

$$y = \frac{x^2}{2c} + c \quad (2.32)$$

Para facilitar la sistematización del modelo y el tratamiento del mismo, es conveniente desplazar la curva de tal manera que el origen de coordenadas se encuentre en el extremo del vano. Para ello basta con hacer un cambio de origen:

$$y = \frac{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2}{2c} - \frac{L^2}{8c} \quad (4.1)$$

Una vez acotada entre los extremos del vano, esta sería la curva que habría que importar al editor de geometrías.

Sin embargo, SpaceClaim precisa de un archivo de puntos coordenados a partir del cual genera la curva. Esto implica una discretización de la curva continua. Para ello se empleará el software de cálculo matricial Matlab en su versión R2015b. El código del programa `Vano.m`, adjunto a esta memoria, crea el archivo `.txt` necesario. Esto lo hace simplemente dividiendo el vano en intervalos regulares de x y sustituyendo en la ecuación 4.1. El resultado se puede ver en la Figura 4.1, que representa un vano de 450 m con divisiones de $x = 10$ m. El parámetro de catenaria $c = 1741$ m se ha tomado de las tablas de tendido.

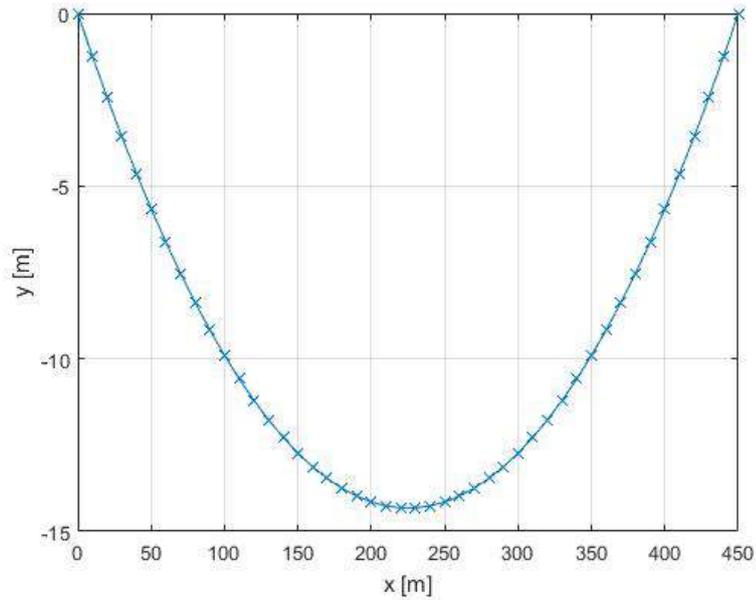


Figura 4.1. Curva generada para 1 vano de 450 m con una resolución de 10 m

Este método genera una posible fuente de error, el producido por la elección del número de intervalos en los que se divide el vano. Una mayor división aporta mayor precisión, pero implica un mayor tiempo de cálculo. Puede darse el caso de que la acumulación de este aumento del tiempo deje de ser irrelevante para líneas grandes. En la Figura 4.2 se muestran algunas de las posibles divisiones y su comparación con la curva catenaria real. Como se puede ver, el error máximo no se encuentra siempre en el mismo punto del vano, sino que depende de la divisibilidad del mismo por la resolución.

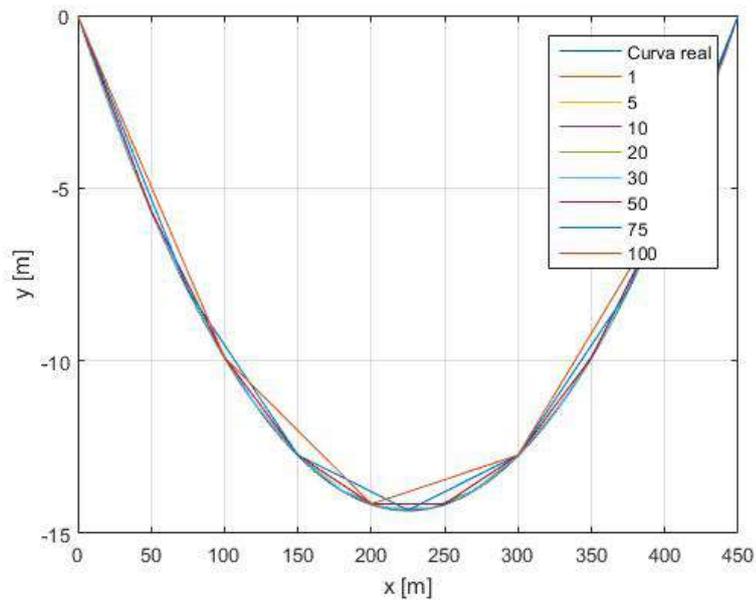


Figura 4.2. Comparación distintas divisiones de x con la curva catenaria real

Para determinar el punto crítico en el que analizar la resolución de la curva, es suficiente con aplicar la desigualdad de Jensen para dos puntos. Esta desigualdad establece que para una curva con f'' positiva (como lo son el coseno hiperbólico o la aproximación parabólica en todo el dominio de \mathbb{R}):

$$f(tx_1 + (1-t)x_2) \leq tf(x_1) + (1-t)f(x_2) \quad (4.2)$$

donde $t \in [0, 1]$. Es decir, una recta secante que corta a una curva convexa por dos puntos siempre se quedará por encima de la misma. Por tanto, siempre que el intervalo empiece y acabe antes del punto mínimo de la curva ($L/2$), el punto más bajo será x_2 , y si lo hace después, x_1 . Esto hace que si algún extremo de intervalo coincide con la mitad de vano, este será el punto de flecha máxima en cualquiera de los casos. Si el intervalo contiene a ($x = L/2$), entonces el punto mínimo será precisamente $L/2$. En conclusión, es apropiado estudiar la resolución en el punto medio del vano, puesto que, al ser donde la curva real tiene flecha máxima, es donde un error en la curva del modelo tendrá mayor repercusión. Que la curva discreta esté un poco por encima es menos crítico si se ajusta en su vértice a la real.

La Figura 4.3 muestra la comparativa del error producido por la discretización en la flecha en la mitad de un vano de 450 m. Destacan los picos de precisión producidos por intervalos de resolución que son divisores enteros de la longitud de vano total. También se observa que a partir de una resolución de $x = 10$ m, la mejora en la precisión es prácticamente imperceptible, reduciéndose al producido por la aproximación parabólica. Tiene sentido concluir que una resolución de 10 m es apropiada para las longitudes de vano habituales, obteniéndose un error despreciable debido a la discretización de la curva.

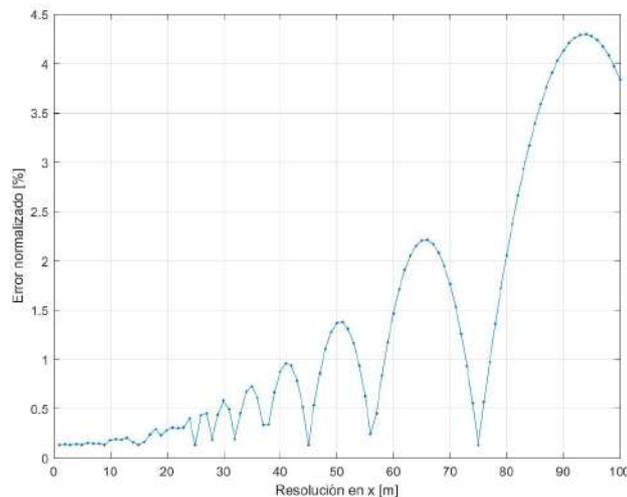


Figura 4.3. Error en la mitad de un vano de 450 m en función del intervalo de división de x

Una vez generado el conjunto de puntos correspondiente a un vano, solo queda repetir el proceso para el número de vanos de la línea completa. Además, el código también genera otro fichero `.txt` con las coordenadas de las crucetas. Por último, se añaden las órdenes `3d=true` para indicar que será una geometría 3D, `npolyline=true` para que interpole una curva con los puntos de la línea y `npolyline=false` para que en las crucetas haya líneas rectas.

Por otra parte, es necesario también generar el cable sin deformar, puesto que será el que se emplee para el modelo inicial de tensiones previas. Para ello, se calculará la distancia entre cada

dos puntos de la curva generados con el programa y se sumarán para obtener la longitud total de cable en cada vano:

$$L_0 = \sum_i \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (x_i - x_{i-1})^2} \quad (4.3)$$

La Figura 4.4 muestra cómo varía la diferencia entre la longitud del cable y la del vano en función de esta última. Los datos para obtenerla se han tomado de las tablas de tendido. Para generar la geometría del cable recto, es suficiente con crear tantas rectas de la longitud indicada como vanos conformen la línea.

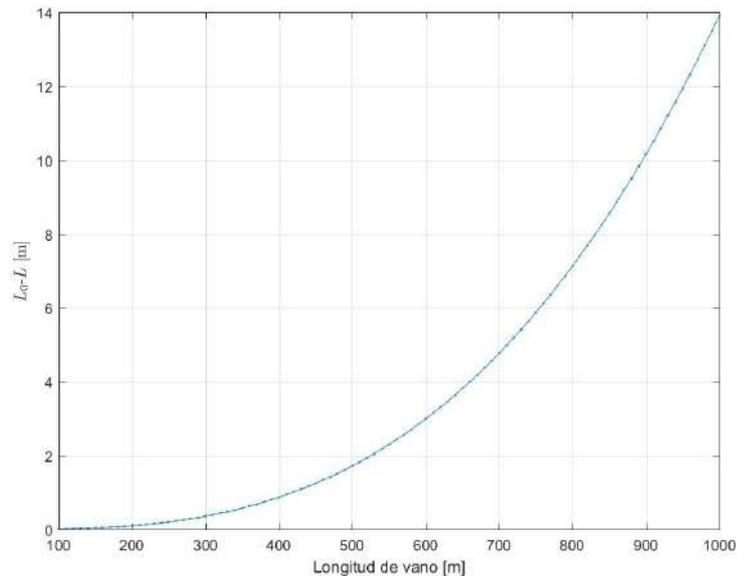


Figura 4.4. Diferencia de longitud entre el cable y el vano en función de la longitud de vano

4.2. Generación del modelo geométrico

Como ya se ha indicado anteriormente, el software empleado para la edición de la geometría es SpaceClaim en la versión incluida con ANSYS Workbench 19.0. Se ha optado por este programa porque agiliza la generación del modelo evitando el uso de un programa de CAD 3D, puesto que la preparación de la geometría es un paso necesario para la resolución del mismo. Además, SpaceClaim permite importar un archivo de puntos para generar la geometría y, desde su última versión, incluye la posibilidad de ejecutar código en base Python para generar las geometrías. Todo esto hace que este programa contribuya razonablemente a la sistematización buscada.

Se necesitan dos archivos de geometría: el del cable tenso sin deformar y el de la línea catenaria completa con las crucetas. Para el cable tenso, el código primero importa la sección del cable, tomada de la tabla de características del conductor. A continuación, genera una recta de la longitud indicada en el mismo y le aplica la sección anterior para formar la viga correspondiente. Por último repite el proceso tantas veces como vanos se hayan indicado. La longitud introducida debe ser la del cable sin deformar, calculada según el apartado anterior. Una vez ejecutado el código, se agrupan los elementos y se activa la opción de “Share topology”. Esta opción le indica al programa que, cuando se vaya a realizar el mallado, tome los puntos comunes a varias

vigas como uno solo y continúe la red, en lugar de tratarlas como componentes distintos. La Figura 4.5 muestra el resultado para 6 vanos de 450 m, así como los menús relevantes y el código.

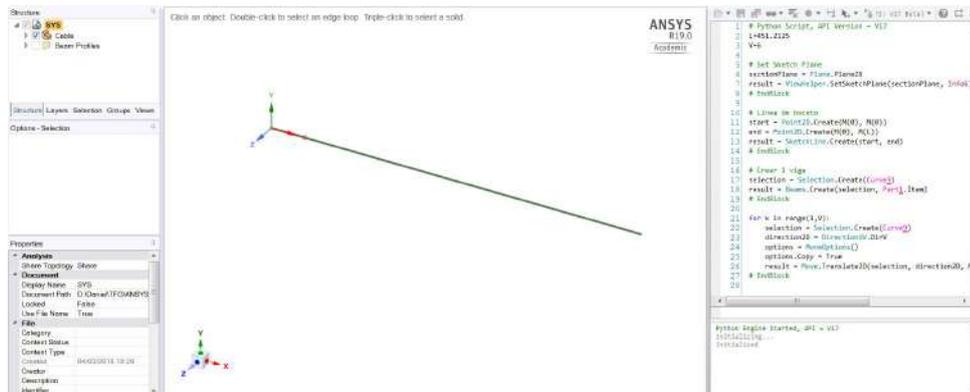


Figura 4.5. Geometría en SpaceClaim de la línea preliminar para 6 vanos de 450 m

El código que genera el segundo archivo de geometría opera de manera análoga. Primero importa las tres secciones (cable, brazo y riostra), genera el cable importando el archivo de puntos, lo prepara como viga y repite el proceso tantas veces como sea necesario. Para las crucetas actúa de igual forma: importa los puntos de una cruceta, crea las rectas, divide la cruceta en dos por el vértice, prepara cada parte con su sección correspondiente y repite el proceso. Todo esto es posible gracias al uso de las llamadas Smart Variables, que permiten al programa identificar el elemento que se va a editar cada vez que se modifica. La Figura 4.6 muestra la geometría generada para 6 vanos de 450 m. En este caso se debe volver a activar la opción de Share topology para todos los elementos, así como agrupar en componentes las crucetas y el cable. Además, de cara a la sistematización cobra relevancia la creación de grupos nombrados de elementos o puntos. Estos identifican aspectos del modelo geométrico que podrán ser referenciados en el mecánico. Cuando ha sido posible se han incorporado al código, siendo necesaria la creación manual de los demás.

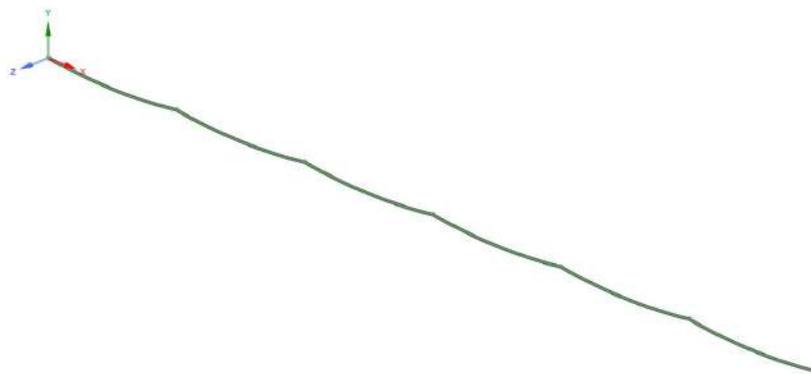


Figura 4.6. Geometría en SpaceClaim de la línea deformada para 6 vanos de 450 m

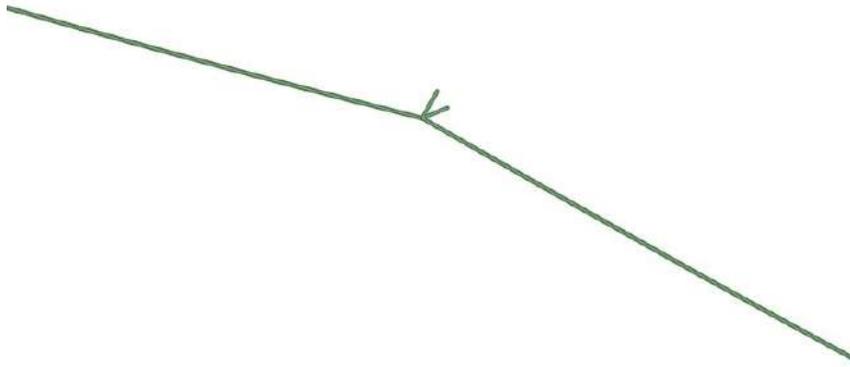


Figura 4.7. Detalle en SpaceClaim de la geometría de una cruceta

4.3. Mallado y condiciones de contorno del modelo de condiciones iniciales

El siguiente paso es crear el modelo de condiciones iniciales. Como ya se ha explicado con anterioridad, la catenaria está sometida a una tensión inicial previa. Para simular esto, se tomará el cable sin deformar, se le aplicará la tensión de tendido en el extremo y después se aplicará el efecto de la gravedad sobre el cable. Una vez terminado este proceso, se espera tener la forma correspondiente a la curva catenaria, así como las tensiones pertinentes en el cable. El objetivo es llevar posteriormente estas tensiones como carga inicial al modelo deformado. Para todo ello se empleará el módulo de ANSYS Mechanic correspondiente a la versión de 19.0 de Workbench, específicamente la aplicación indicada para estructuras estáticas.

En general, la resolución de un modelo en Mechanic, tal y como se puede ver en la Figura 4.8 tiene las siguientes partes:

- **Geometría:** Importa la geometría desde el editor, SpaceClaim en este caso. Aquí es donde se especifica el material o el tipo de elemento que se empleará. Para el sistema preliminar, únicamente se indicará que el material es el correspondiente al AL/AW Cónдор.
- **Secciones:** Importa directamente las secciones de las que están compuestas las vigas.
- **Sistema de coordenadas:** Establece un sistema de coordenadas en el modelo.
- **Conexiones:** Establece cómo se relacionan las distintas componentes del sistema en sus puntos de contacto. Si no se modifica, se generan de manera automática atendiendo a los requerimientos de la topología.
- **Mallado:** Divide el sistema continuo en uno puntual de elementos finitos.
- **Resolución:** Incluye las distintas aplicaciones para el tratamiento del modelo.
- **Otros:** Incluyendo la creación de grupos de nodos o elementos y de geometrías de referencia.

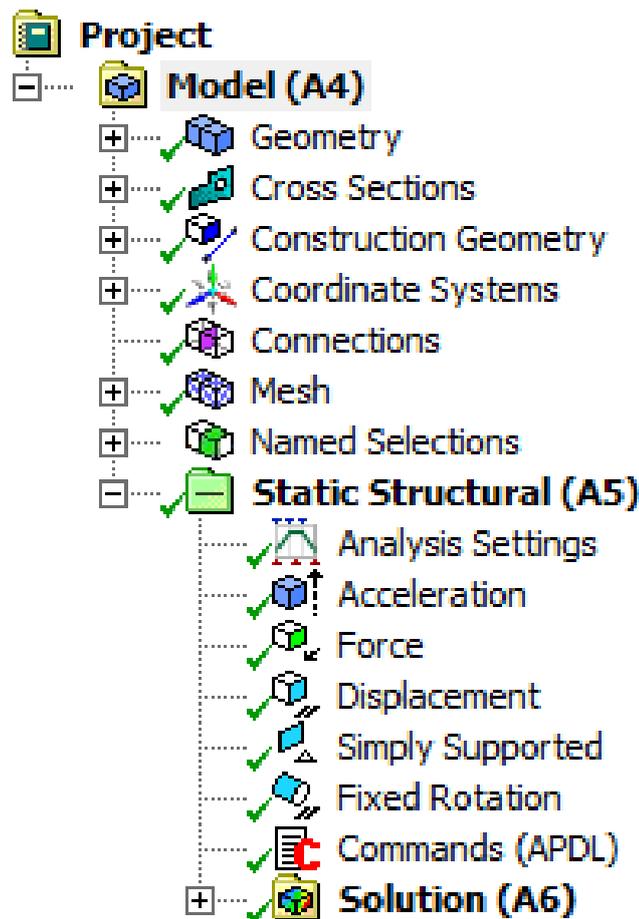


Figura 4.8. Partes del sistema de Mechanic del modelo preliminar

Una de las partes más importantes en la resolución de un modelo aplicando el FEM es la generación de la malla que discretice las distintas componentes. En el caso del modelo preliminar, la única malla es la correspondiente al cable, por lo que se trata de una malla lineal. Dado que no se pueden despreciar de manera genérica los flectores en el cable, el elemento más sencillo que permite la simulación del sistema real es un elemento viga, que es el que se aplica por defecto. Además, se debe controlar el tamaño de la malla empleando la opción de “Hard Mesh” y una especificación del número de elementos en la malla del cable. La elección de este número tiene un efecto similar a la resolución elegida para la discretización de la curva catenaria, por lo que debe ser analizado convenientemente.

No obstante, para estudiar el efecto del tamaño de malla sobre el modelo, es necesario primero analizar las condiciones iniciales del preliminar y los resultados que aporta. Una captura del programa se muestra en la Figura 4.9. Siguiendo la nomenclatura de la figura, se aplican las siguientes condiciones de contorno:

- A **Aceleración:** Se aplica la aceleración de la gravedad a partir del segundo paso de carga. Esto se hace para facilitar la convergencia del paso anterior, donde se aplicará la fuerza de tendido. Aparece como fuerza inercial, por lo que el símbolo es contrario a la dirección de la gravedad.
- B **Fuerza:** Se aplica la fuerza de tendido sobre el extremo libre del cable.

- C **Desplazamiento:** Se bloquean los desplazamientos en Y y en Z de uno de los extremos, dejando libre el desplazamiento en X. Esto genera una variación en la longitud de vano, pero se corregirá en el modelo final.
- D **Soporte simple:** Bloquea todos los desplazamientos del otro vértice del cable sin afectar a las rotaciones.
- E **Rotación fija:** Se bloquea la rotación del cable en el extremo fijo, dejando libre únicamente la correspondiente al eje Z.

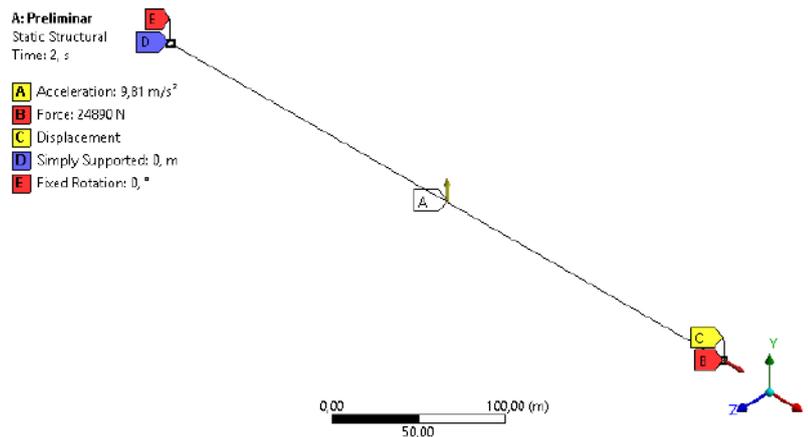


Figura 4.9. Condiciones de contorno del modelo de condiciones iniciales

Al resolver el modelo se obtienen las tensiones a las que está sometido el cable cuando actúan la fuerza de tendido y su propio peso. Este mismo estado tensional es el que se empleará para el modelo final con los apoyos fijos. Para ello se hace uso del comando de APDL `INISTATE, SET, -2, S`, que crea un archivo de tensiones que posteriormente se puede emplear como estado inicial. Cabe destacar que este estado de tensiones no es exactamente el mismo que si se tuvieran los dos apoyos fijos, sino un paso previo que facilita la convergencia de la solución. Esto se debe a que el desplazamiento del extremo libre modifica la longitud del vano, afectando a la forma de todo el sistema. Este efecto se ajustará una vez que se introduzcan las tensiones en el modelo final. Es por ello que los datos de este paso todavía no son válidos para su análisis.

Para el modelo final de un solo vano, simplemente basta con sustituir la geometría por la de la curva catenaria, eliminar la condición de desplazamiento por un soporte fijo (igual que la condición D) y cambiar la fuerza de tendido por un comando de APDL `INISTATE, READ`. Es importante que el mallado en ambos modelos sea idéntico, puesto que las tensiones se aplican sobre los nodos del mismo. Además, para posibilitar la convergencia de la solución se fija la rotación en el eje paralelo a la línea. El área del cable es varios órdenes de magnitud menor que su longitud. Esto hace que al actualizar la matriz de rigidez en cada iteración del método de Newton-Raphson se produzcan grandes variaciones en los términos de esa dirección, imposibilitando la convergencia de la solución. Puesto que no se calcularán momentos en X, esta decisión no afecta a los resultados obtenidos del modelo. Siguiendo esta misma idea, también se desactiva la convergencia de momentos como criterio de convergencia para el *solver*. La Figura 4.10 muestra el modelo para un vano de 450 m antes de ser resuelto. Su resolución da finalmente las condiciones reales de un vano en ausencia de viento.

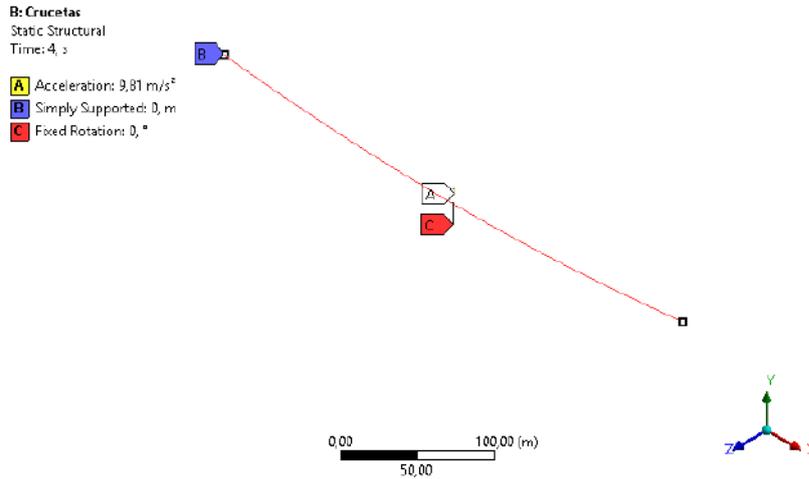


Figura 4.10. Condiciones de contorno del modelo final de 1 vano de 450 m

De este modelo sí que es posible sacar conclusiones acerca del efecto del tamaño de malla sobre las soluciones obtenidas. En primer lugar, denotar que existe una deformación vertical adicional respecto a la curva catenaria importada como geometría, tal y como se muestra en la Figura 4.11. Esta deformación se debe probablemente a la discretización del problema continuo y al error numérico del propio método de análisis por elementos finitos. En cualquiera de los casos, la flecha máxima aumenta, por lo que se trata de un límite inferior a la deformación teórica. Además, el modelo sí que tiene en cuenta la deformación elástica de la catenaria a la hora de calcular la nueva posición de equilibrio. Todo esto unido a la resolución para grandes deformaciones hace que la diferencia sea inevitable pero asumible.

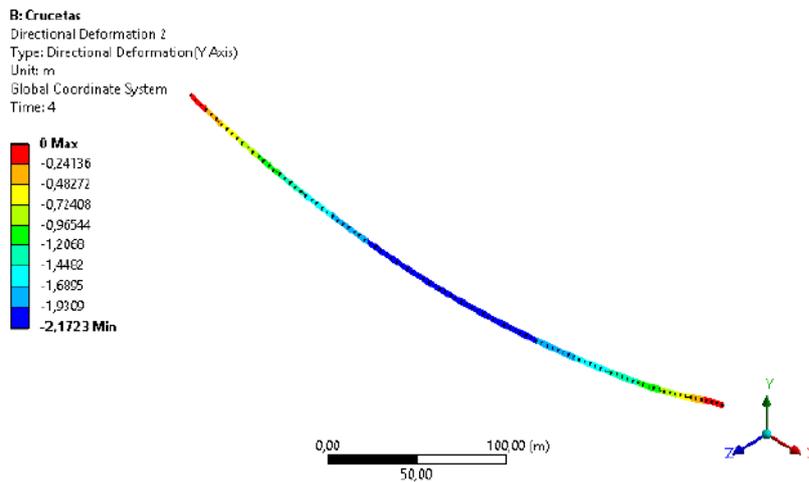


Figura 4.11. Deformaciones en Y de un vano de 450 m

Para evaluar la influencia del tamaño de malla estudiamos las curvas de deformación en Y de los modelos con distintos números de elementos. La Figura 4.12 muestra estas gráficas. El error que aparecía en la discretización de la catenaria se ve agravado en este caso por el error del cálculo estructural. Este efecto se aprecia sobretodo en mallas con un número de elementos muy bajo. A la vista de estos resultados, es aceptable tomar 100 elementos para la malla.

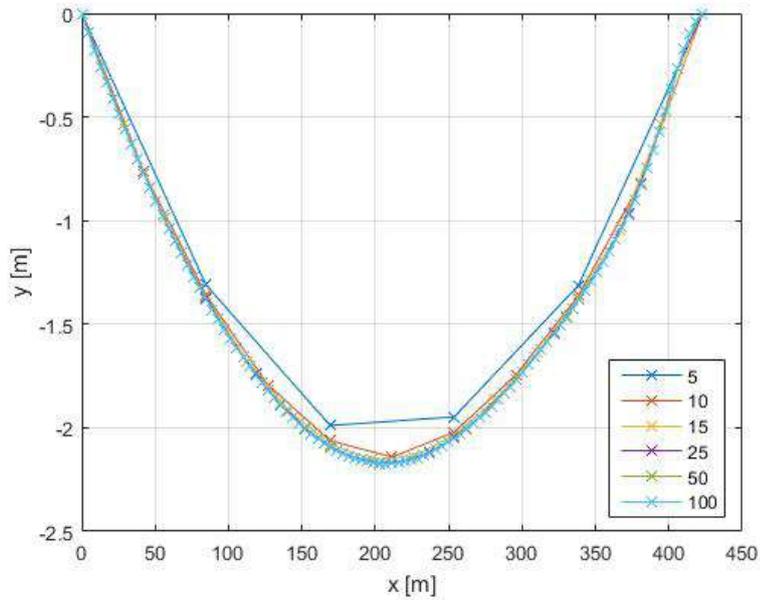


Figura 4.12. Comparación de la deformación en Y con el número de elementos de la malla

Este modelo es el más sencillo que se va a simular. Consta únicamente de un vano, por lo que no se tiene ninguna cruceta, y los desplazamientos son solo los del cable. Por consiguiente, su convergencia es muy rápida. La resolución se ha dividido en varios pasos para favorecer la misma; primero se aplica el estado inicial de tensiones y después la aceleración de la gravedad. La Figura 4.13 muestra la convergencia del criterio de fuerza del sistema para este modelo. Como se ve, no se aprecian incidencias relevantes y no ha sido necesario un gran número de pasos intermedios.

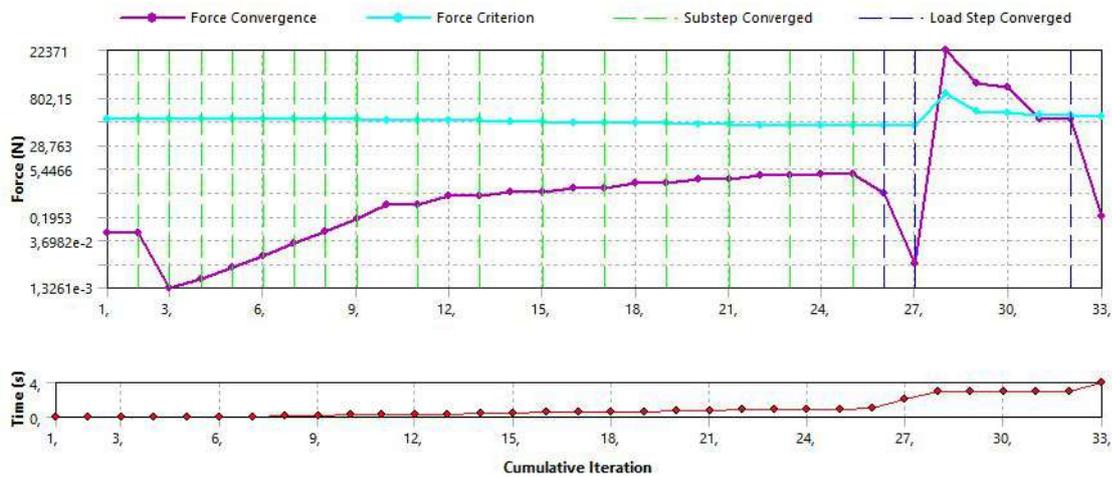


Figura 4.13. Convergencia de la Fuerza en el modelo de 1 vano de 450 m

Capítulo 5

Modelado del viento

El modelo de vientos se ha generado con Matlab, y el código se adjunta a esta memoria. El objetivo último es obtener una serie temporal real de cargas de viento para la línea. Para ello se tomarán como base las indicaciones del RD 223/2008 y el método basado en la matriz de densidad de potencia espectral (PSD). Se pretende que el código sea lo más flexible posible, pudiendo adaptarse para las condiciones específicas de la línea en cuestión. Además, dado que la normativa considera únicamente vientos medios y en este caso se tendrá también en cuenta la componente de turbulencia, es necesario realizar una serie de modificaciones que permitan la comparación de los dos casos y el control de la variabilidad de la turbulencia.

5.1. Parámetros de viento

El modelo de vientos se ha creado a partir de los fundamentos teóricos explicados en la sección 2.3. Por ello, es necesario introducir los parámetros indicados en el mismo. Los valores elegidos, así como una breve descripción de los mismos y de qué factor de la línea dependen, se muestran en la Tabla 5.1. Cabe destacar que es posible modificar todo los valores indicados sin que el modelo pierda validez. Para los parámetros relacionados con la geometría y el diseño de la línea se han elegido valores habituales de este tipo de líneas y coherentes con lo expuesto en los capítulos anteriores. Los que refieren a norma se basan en el RD 223/2008. Para los parámetros referidos a la situación geográfica, se han tomado valores representativos a un emplazamiento habitual, como un terreno de categoría I según la Tabla 2.4. Aquellos relacionados con el modelo en frecuencia se comentarán en la Sección 5.2. El ajuste estadístico será tratado en la Sección 5.4. Por tanto, quedan solo por aclarar los parámetros relacionados con la simulación.

Por un lado está el tiempo, que depende únicamente de la duración deseada de la simulación. En este caso se ha elegido 500 s para diseñar el modelo de vientos y comprobar su validez. No obstante, hay que tener en cuenta que en caso de simular vientos de muy larga duración, los resultados no coincidirán necesariamente con la realidad, ya que entrarán en juego las componentes de rampa y de ráfaga. Estas componentes son las variaciones del viento a muy bajas frecuencias, debidas al ciclo noche-día y a la variación de la velocidad media, respectivamente. Para comprobar la validez del modelo de dos componentes basta con analizar en qué posición del Espectro de Van der Hoven (Figura 2.32) se encuentra el tiempo a simular. A partir de 2 h sería necesario considerar la componente de ráfaga, y a partir de 24 h, la de rampa. El modelo de cuatro componentes escapa al alcance de este proyecto, puesto que se simulará el caso crítico sobre las líneas. Debido a la inercia de las mismas, la influencia de las componentes de baja frecuencia puede considerarse despreciable, teniéndose en cuenta solo la velocidad media y la de turbulencia.

Parámetro	Valor	Descripción	Dependencia
Vanos	6	Número de vanos que forman el cantón a simular	Diseño de la línea
L	450 m	Longitud de vano	Diseño de la línea
v_h	140 km/h	Velocidad pico esperada o velocidad de diseño (la suele imponer la normativa)	Diseño o norma
z	30 m	Altura del punto	Diseño de la línea
h_r	10 m	Altura de referencia	Norma
α	0.28	Factor de terreno para la velocidad media	Situación geográfica
z_0	0.01	Altura equivalente para la rugosidad del terreno	Situación geográfica
C_d	15	Coefficiente de decaimiento	Situación geográfica
$\Delta\omega$	$\frac{2\pi}{1000}$ rad/s	Resolución de la división del rango de frecuencias	Modelo en frecuencia
N	400	Número de frecuencias distintas que se van a evaluar	Modelo en frecuencia
ω_{\min}	0.005 rad/s	Frecuencia mínima que se tendrá en cuenta	Modelo en frecuencia
r_σ	10	Resolución de la relación de desviaciones típicas	Ajuste estadístico
t	500 s	Tiempo a simular	Simulación
Intervalos	6	Número de intervalos con distinta carga de viento	Simulación
Modo	1	Tipo de modelo de potencia espectral del viento	Norma

Tabla 5.1. Parámetros escogidos para el modelo de vientos

Por otra parte, se especifica el número de intervalos en los que se discretizará la carga de viento. Este parámetro está relacionado con la coherencia de la línea y la señal temporal, por lo que se discutirá extensamente en el apartado correspondiente. A grandes rasgos, se pretende que el modelo pueda generar una señal de viento en cada punto de la línea, siendo cada una de ellas única pero relacionada con la anterior, tal y como ocurriría en la realidad. Para ello es necesario discretizar la línea en distintos intervalos que tendrán el mismo viento. A modo de simplificación se ha tomado un viento para cada vano, 6 en este caso. Aumentar el número de intervalos implicaría crear las correspondientes divisiones de la línea en el modelo geométrico, incrementando sustancialmente la complejidad del mismo, así como los tiempos de preparación y resolución.

Por último, falta hacer alusión al “Modo”. Este no es más que un parámetro que le indica al programa qué tipo de modelo de potencia espectral debe aplicar. Estos vienen determinados por las normas de las distintas regiones, y se resumen en la Tabla 5.2.

5.2. Modelo de espectros en frecuencia

Al haberse decidido emplear un modelo basado en PSD, se debe crear el programa correspondiente. Para ello, el primer paso es generar los términos de la autocorrelación empleando las fórmulas del modelo elegido. Como ya se ha comentado, el modelo se elige con el Modo.

Modo	Modelo	Frecuencia	Regiones
1	Kaimal	Media	Europa
2	Davenport	Alta	Canadá, China
3	Von Karman	Media	Australia, Japón
4	Harris	Baja	*
5	Solari	Media	Estados Unidos
6	Panofski	Media	**

*Indicado para bajas frecuencias, fuera de norma
**Indicado para vientos verticales, fuera de norma

Tabla 5.2. Modos del código en función del modelo de potencia espectral del viento elegido

La función creada para este caso se ha nombrado como `Generacion_Sii.m`. En el código adjunto se muestra que necesita cinco parámetros a modo de entrada: la velocidad media, la altura z del punto, la altura de rugosidad equivalente z_0 , el vector de frecuencias ω , el modo y si se desea un gráfico del espectro o no. En general, se trata de los parámetros que deben introducirse en las fórmulas enunciadas en la Sección 2.3, teniendo especial interés el vector de frecuencias ω .

La definición del rango de frecuencias a estudiar no es una tarea sencilla. Un rango desplazado hacia las bajas frecuencias obviaría las componentes más energéticas de la turbulencia, y un rango desplazado hacia las altas frecuencias genera un ruido innecesario puesto que será absorbido por la inercia de la línea. Además, el muestreo en tiempo se realiza en intervalos de 1 segundo, por lo que oscilaciones muy rápidas de la velocidad del viento pueden no ser observables. A modo de ejemplo se va a mostrar el razonamiento elegido para el modelo espectral de Kaimal, ya que es el que se aplica en los estándares europeos. No obstante, este mismo razonamiento es aplicable a los otros modelos.

El espectro obtenido al emplear una distribución equidistante de frecuencias se muestra en la Figura 5.1. Debido a la naturaleza de las funciones que definen la densidad espectral, las frecuencias se representan en un eje semilogarítmico, como es convención habitual. Gracias a ello se ve claramente que la mayoría de las frecuencias evaluadas se encuentran en la parte de altas frecuencias del espectro. Se puede estimar, por tanto, que la mayoría de los datos evaluados se encontrarán en torno a la última zona evaluada del espectro. Ahora bien, estas frecuencias son las que tienen más probabilidad de ser amortiguadas.

El viento dinámico solo actuará sobre el sistema transitorio de la línea, por lo que hay que evaluar la respuesta en frecuencia del mismo para adecuar el rango. Para ello, una primera aproximación pasa por realizar un análisis modal con el módulo de ANSYS preparado para ello. Para una línea de 6 vanos y partiendo de la solución del sistema estático sin viento, se obtienen los datos de la Figura 5.2. Se aprecia que los primeros modos están en torno a la misma frecuencia de 0.135-0.140 Hz, predominando los desplazamientos en el eje Z y una masa efectiva máxima de 4240 kg.

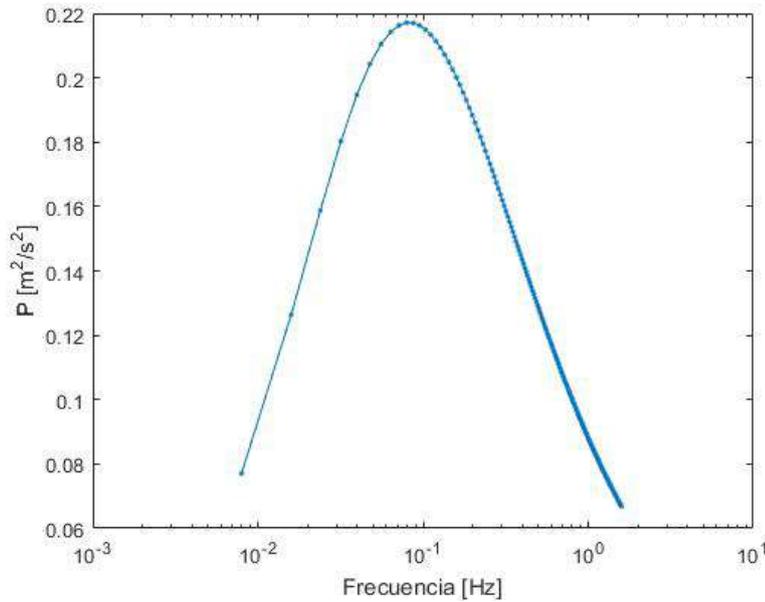


Figura 5.1. Espectro del modelo de Kaimal con ω espaciado uniformemente y los parámetros de la Tabla 5.1.

***** MODAL MASSES, KINETIC ENERGIES, AND TRANSLATIONAL EFFECTIVE MASSES SUMMARY *****

MODE	FREQUENCY	MODAL MASS	KENE	EFFECTIVE MASS					
				X-DIR	RATIO%	Y-DIR	RATIO%	Z-DIR	RATIO%
1	0.1357	2506.	911.2	0.2813E-11	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
2	0.1357	1429.	519.8	0.000	0.00	0.7654E-08	0.00	239.3	4.48
3	0.1357	1702.	619.1	0.1899E-05	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
4	0.1358	2530.	920.4	0.000	0.00	0.1384E-05	0.00	470.9	8.82
5	0.1358	1314.	477.9	0.3865E-04	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
6	0.1358	1405.	511.4	0.000	0.00	0.3737E-04	0.00	3529.	66.13
7	0.1397	1396.	538.1	0.3777	0.01	0.000	0.00	0.000	0.00
8	0.1402	1306.	507.0	0.000	0.00	0.2722E-05	0.00	0.1951E-05	0.00
9	0.1414	2630.	1039.	9.041	0.17	0.000	0.00	0.000	0.00
10	0.1446	1793.	740.6	0.000	0.00	0.3980E-04	0.00	0.1328E-03	0.00
11	0.1556	1535.	733.4	481.9	9.03	0.000	0.00	0.000	0.00
12	0.1920	2415.	1757.	0.000	0.00	4071.	76.28	0.1414E-04	0.00
13	0.2679	1460.	2068.	238.3	4.47	0.000	0.00	0.000	0.00
14	0.2694	1404.	2011.	0.000	0.00	0.2073E-04	0.00	0.6936E-10	0.00
15	0.2696	1856.	2663.	13.19	0.25	0.000	0.00	0.000	0.00
16	0.2697	1373.	1971.	0.000	0.00	0.6944E-04	0.00	0.4003E-09	0.00
17	0.2698	1840.	2643.	3.221	0.06	0.000	0.00	0.000	0.00
18	0.2698	1713.	2461.	0.000	0.00	0.1636E-04	0.00	0.1017E-09	0.00
19	0.2712	2510.	3644.	0.2709E-09	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
20	0.2712	1431.	2078.	0.000	0.00	0.6429E-06	0.00	0.6463E-09	0.00
sum				746.1	13.98	4071.	76.28	4240.	79.44

Figura 5.2. Extracto del resultado del análisis modal para una línea de 6 vanos de 450 m

Para estimar el amortiguamiento se puede aproximar el sistema como un sistema dinámico de segundo grado, cuya función de transferencia sigue la Ecuación 5.1, siendo s la variable de Laplace, ω_n la frecuencia de oscilación natural del sistema y ζ el factor de amortiguamiento.

$$F(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{5.1}$$

A raíz de los resultados del análisis modal, podemos establecer la frecuencia natural en 0,135 Hz. El amortiguamiento se introduce en forma de amortiguamiento proporcional, que depende de la inercia (es decir, de la masa efectiva) y de la rigidez según la Ecuación 5.2:

$$\zeta = \alpha [M] + \beta [K] \quad (5.2)$$

donde α y β son pesos, $[M]$ es la matriz de masas y $[K]$ es la matriz de rigidez.

Como se trata de un sistema no lineal, no se puede tener en cuenta la rigidez exacta, ya que la matriz de rigidez cambiará con cada iteración de algoritmo. Para la matriz de rigidez, tomaremos el mayor valor obtenido de la masa efectiva dividida entre el número de vanos, 712 kg. Las cruceas actúan como separadores y la inercia que actúa sobre cada intervalo de cable es la del propio vano, no toda la línea. Como α se tomará 0.0125 y como β , aunque en esta aproximación no sea necesaria, 0.0001 [49]. Los parámetros del sistema dinámico serían $\zeta = 8.83$ y $\omega_n = 0.135$ Hz. La función de transferencia queda por tanto:

$$F(s) = \frac{0.774}{s^2 + 15.54s + 0.774} \quad (5.3)$$

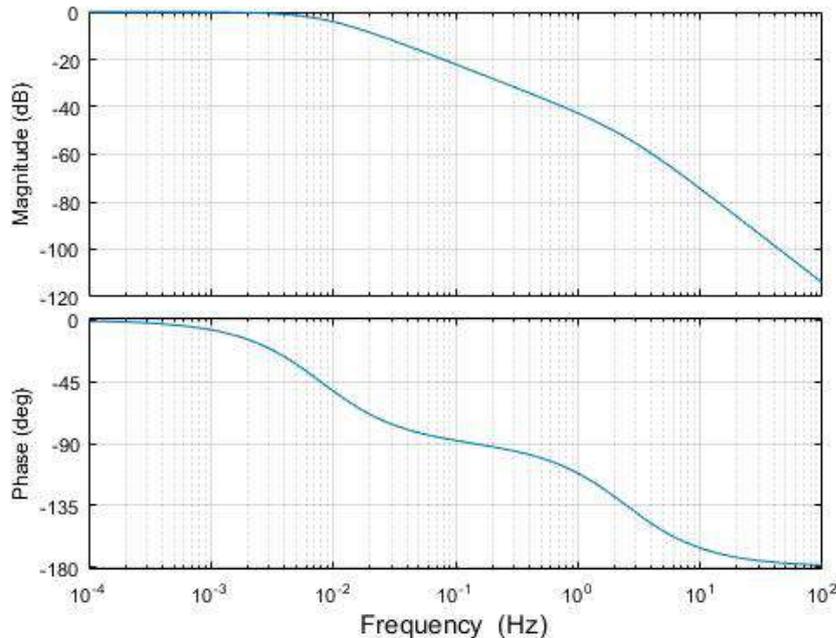


Figura 5.3. Diagrama de Bode del sistema de segundo orden con $\zeta = 8.83$ y $\omega_n = 0.135$ Hz

La Figura 5.3 muestra el diagrama de Bode de la función de transferencia en el caso extremo en el que no se tiene en cuenta la rigidez del sistema. Si se incluyera, el filtrado sería aún más acusado, puesto que un mayor factor de amortiguamiento aumenta la pendiente de la curva de magnitud. Un amortiguamiento de la señal en -20 dB implica que su amplitud es un 10 % de la inicial, mientras que -40 dB equivalen a una amplitud un 1 % la inicial. Esto muestra que, efectivamente, las frecuencias más altas tienen un menor efecto en el desplazamiento del sistema en comparación con las más bajas. Además, teniendo en cuenta que la amplitud de la señal está relacionada con su contenido energético, del espectro de potencia se deduce que las frecuencias altas no solo están más amortiguadas, sino que tienen menor amplitud. En consecuencia, el efecto de las altas frecuencias es mucho menor frente al de las bajas. Esto hace que a la hora de muestrear el rango de frecuencias haya que dar prioridad a la parte de bajas y medias frecuencias.

Un ejemplo de muestreo del espectro empleado se representa en la Figura 5.4. En él se encuentra un compromiso entre pragmatismo y precisión del modelo. Un mayor rango de frecuencias en la zona de alta frecuencia reduciría el número de muestras en baja, reduciendo la fidelidad del modelo. Un aumento en el número de muestras afectaría mucho menos a las frecuencias relevantes que a las amortiguadas, por lo que de nuevo es un gasto de recursos poco eficiente. El muestreo elegido para este proyecto es el indicado en la Tabla 5.1, pudiendo ser modificado sin dificultad si fuera necesario.

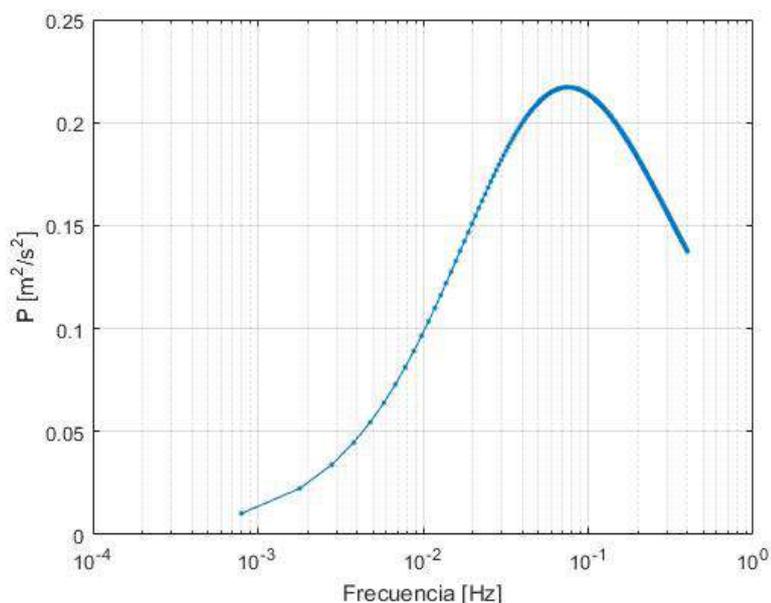


Figura 5.4. Espectro del modelo de Kaimal para el rango de frecuencias elegido con los parámetros de la Tabla 5.1

5.3. Modelo temporal y coherencia de la línea

Una vez obtenido los coeficientes de la matriz de PSD correspondientes a la autocorrelación, se está en disposición de generar la serie temporal a partir del modelo estocástico. Para ello se emplea el código mostrado en `Generacion_viento.m`. El modelo debe cumplir una serie de premisas. En primer lugar, debe respetar el espectro en frecuencia. En segundo lugar, debe cumplir los requisitos de coherencia en altura en los que se basa el uso de la Ecuación 2.47 en vez del uso de funciones de coherencia. Por último, la serie obtenida debe ser coherente con lo esperado para el viento real. Una muestra de la serie temporal se puede ver en la Figura 5.5.

Para la validación del modelo temporal se crea el código mostrado en `Validacion.m`. Este lo que hace es generar varias series temporales con los mismos parámetros y calcular los espectros en frecuencias asociados a dichas señales. Para ello toma los datos discretos, crea una curva interpolada que pase por ellos y le aplica la transformada de Fourier para obtener su espectro en frecuencia. El resultado para varias de estas muestra se observa en la Figura 5.6.

Si se comparan las Figuras 5.4 y 5.6 se aprecian claramente las similitudes en el espectro. Por un lado, los máximos de las series temporales suelen corresponder aproximadamente a las mismas frecuencias que el espectro ideal. Además, existe una mayor densidad de puntos en la zona donde se muestrean más frecuencias, como era de esperar. Las diferencias en la escala de la

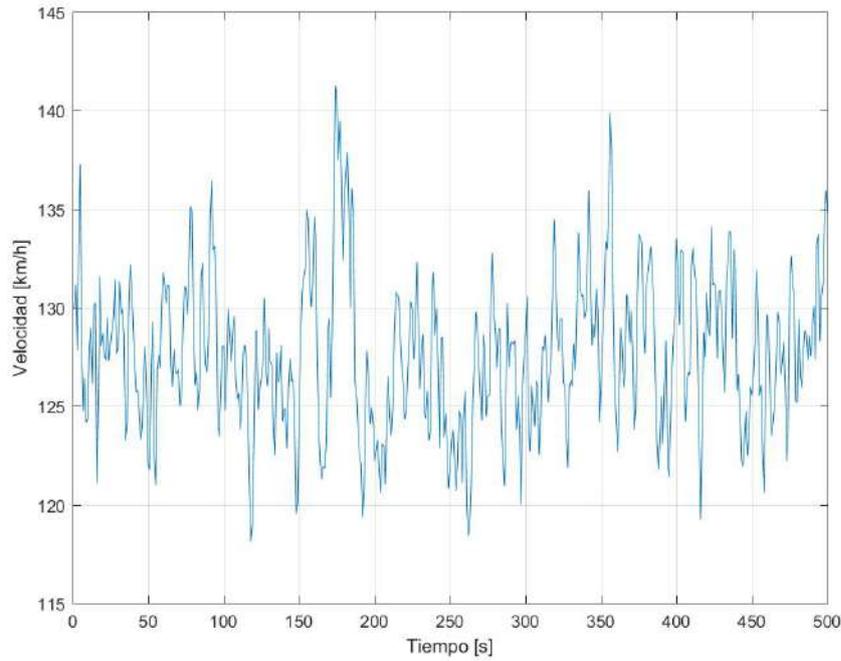


Figura 5.5. Ejemplo de serie temporal de viento generada

potencia tiene su origen en el paso de espectro normalizado a serie teórica. Los valores que no se encuentran en la línea exacta del espectro son debidos a la componente aleatoria del modelo estocástico, pues probablemente coincidan con valores de frecuencia con un efecto disminuido por la misma. La aparición de muestras en zonas donde no se toman valores en frecuencia se deben a la interpolación de los datos reales, tomando valor 0 en esas zonas. Se da, por tanto, como válido el modelo en lo que respecta al espectro en frecuencia.

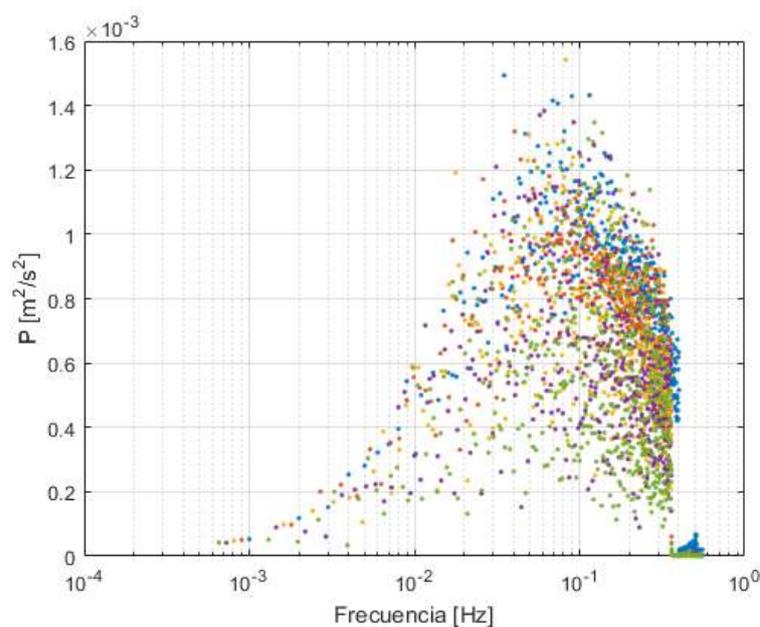


Figura 5.6. Validación en frecuencia del modelo temporal

El siguiente paso es comprobar la coherencia en altura. Para ello se ha creado el programa *Coherencia.m*, que hace uso de la función *mscohere* de Matlab. Este código genera dos series temporales de viento, una a la altura $z = 30$ m y la otra a la altura de un punto con flecha máxima, $z' = 30 - 14.54 = 15.46$ m en este caso. A estas series se les ha eliminado la componente aleatoria para poder compararlas exactamente. No tendría sentido comparar la coherencia de dos series de viento que ocurrieran en distintos momentos en el tiempo. La función *mscohere* calcula la coherencia entre dos señales por el método de Welch, devolviendo un valor entre 0 y 1 en el rango de la frecuencia de muestreo normalizada. Un valor de 1 implica una coherencia muy fuerte entre las señales. La Figura 5.7 muestra el resultado de esta función. Como se puede apreciar, la coherencia está muy cercana a 1 en todo el rango de frecuencias, por lo que se da por bueno evitar el cálculo de la función de coherencia en altura.

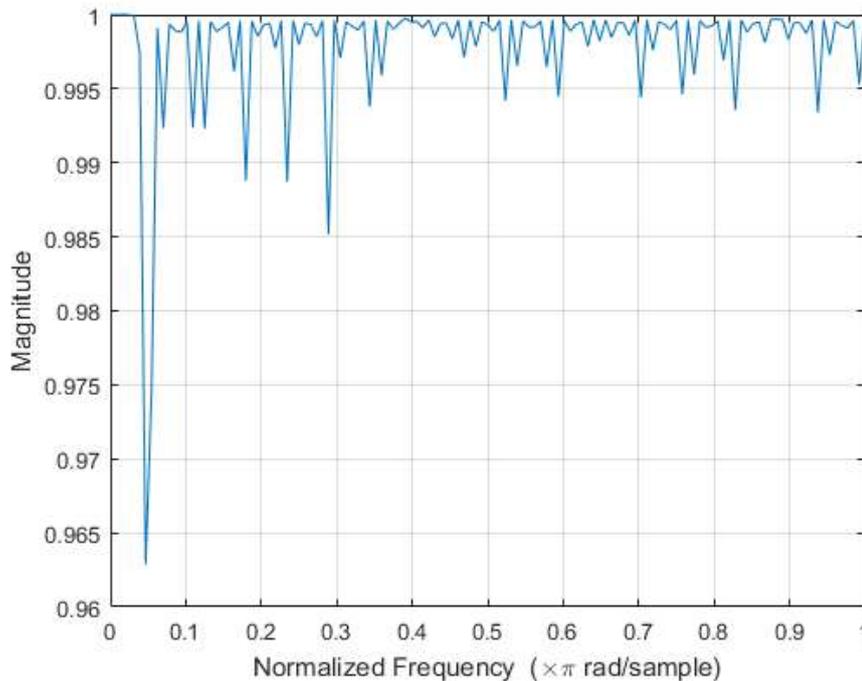


Figura 5.7. Coherencia entre los puntos de máxima y mínima altura en un vano de 450 m

Por último queda comprobar que la serie generada concuerda con lo observado en el viento real. Por ejemplo, no tendría sentido que dos series de viento generadas para puntos cercanos sean completamente independientes, por cómo se comportan los frentes de viento [50]. A su vez, tampoco tiene sentido que sean iguales, puesto que habrá diferencias entre un punto y otro. Un valor extremo en uno de los puntos probablemente tenga una respuesta similar en otro de ellos, dependiendo de su dirección. No obstante, esta respuesta puede estar desplazada en el tiempo, como corresponde a lo que tarda la perturbación en recorrer la distancia que separa ambos puntos. En la Figura 5.8 se observan las tres primeras series generada para los parámetros de la Tabla 5.1. Separando las tres series para una mejor comparación, se obtiene la Figura 5.9.

En la comparativa se observan claramente las similitudes entre las tres series. Existe un desfase temporal, tal y como se esperaba. Este es más apreciable en los máximos y mínimos de la serie. Por ejemplo, si se toma el mínimo de la primera serie que se da en torno al segundo 15, se ve que se repite en el segundo 20 en la segunda serie. Este mismo pico correspondería a uno de los amortiguados de aproximadamente el segundo 25 de la tercera. El mismo análisis se

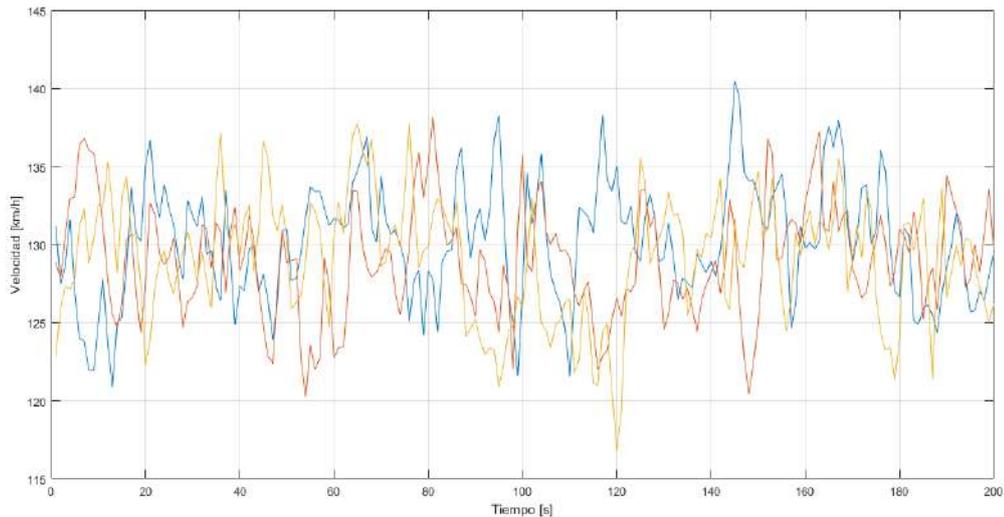


Figura 5.8. Tres series temporales de viento correlacionadas

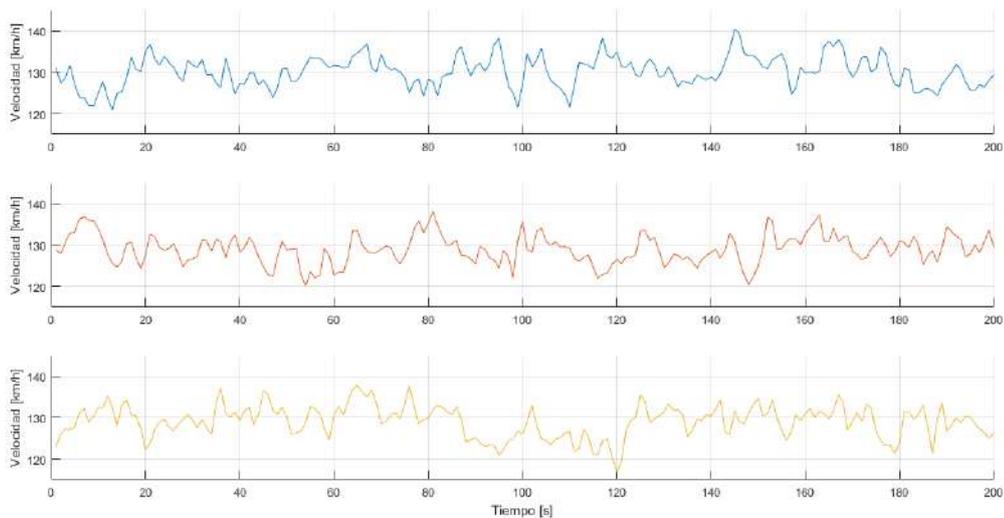


Figura 5.9. Desglose de las tres series temporales de viento correlacionadas

puede repetir para cualquiera de los extremos, teniendo en cuenta los correspondientes desfases y amortiguamientos. Si se aumenta el número de intervalos, estos desfases en el tiempo se reducen drásticamente, como es lógico puesto que la distancia entre puntos es menor. Por lo tanto, se cumple que el comportamiento de las series temporales es el esperado.

En conclusión, se decide dar por válido el modelo temporal de las series de viento. Sin embargo, es necesario poder controlar los valores que van a tomar las series. Para ello se realizará una serie de ajustes y modificaciones estadísticas.

5.4. Modificaciones estadísticas

Como el objetivo es poder comparar los vientos reales con la normativa, es necesario poder fijar un valor de pico esperado. Para ello se hará uso de la “Regla de las 3 Sigma” [51]. Esta regla se basa en que para un sistema que siga una distribución normal, el 99.7 % de los valores que adopte se encontrarán en el intervalo $\mu \pm 3\sigma$. Este es el estándar habitual en la industria. Aplicando este valor, se puede asumir que todos los valores que se tomen se encontrarán por debajo de 140 km/h. Si se evalúa el valor de la distribución normal, se espera que únicamente un 0.17 % de los valores sean por encima del valor pico, menos de 2 por cada 1000.

Para poder controlar la desviación típica hay que tener en cuenta que depende de la propia velocidad media. Por ello, se ha optado por un enfoque numérico en la función indicada como `Desviacion.m`. En primer lugar se calcula la desviación típica para distintos valores de la velocidad y se genera el interpolador por esplín cúbico que relaciona la velocidad media con el valor de $\mu + 3\sigma$. Después se extrapola el valor pico deseado y con ello se obtiene la velocidad media correspondiente, que será la que se tome para el resto del programa. La Figura 5.10 muestra las gráficas que relacionan σ y $\mu + 3\sigma$, respectivamente, con la velocidad media para los parámetros elegidos.

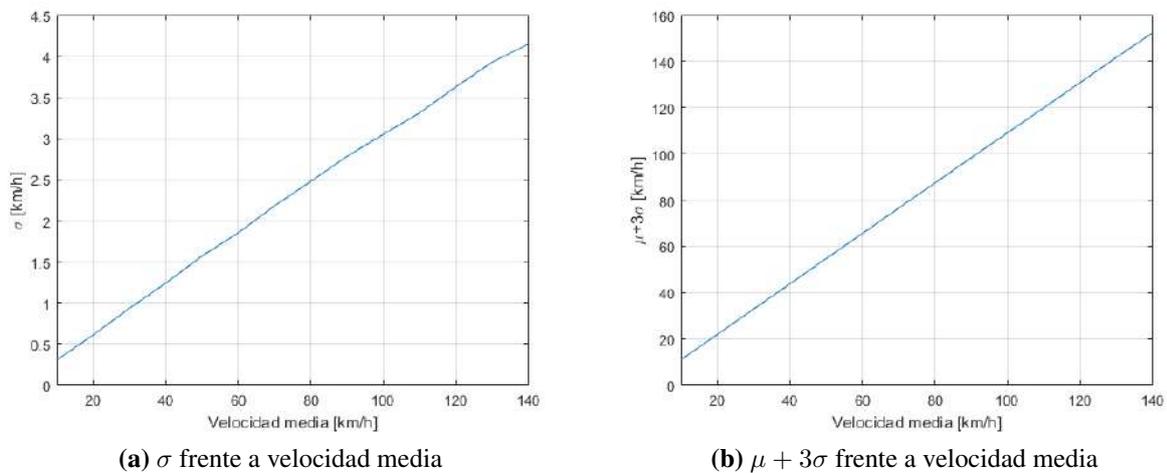


Figura 5.10. Relaciones de σ y $\mu + 3\sigma$ con la velocidad media

Se observa que la relación para los parámetros de línea habituales parece lineal. No obstante, el emplear un método numérico permite reducir el error en caso de que no lo sea para otros parámetros. Por otra parte, es necesario comprobar también que las velocidades de viento real siguen una distribución normal. Si se toma una cantidad de datos suficientemente grande, según el Teorema Central del Límite la distribución debería aproximarse a una normal. Tomando 5000 valores y analizando la distribución, se obtiene la Figura 5.11. En ella se ha superpuesto el histograma dado por Matlab para los intervalos que mejor se ajusten a una normal con la curva hipotética de la propia distribución. Como se puede observar, la forma de la distribución normal y el histograma se ajustan bastante.

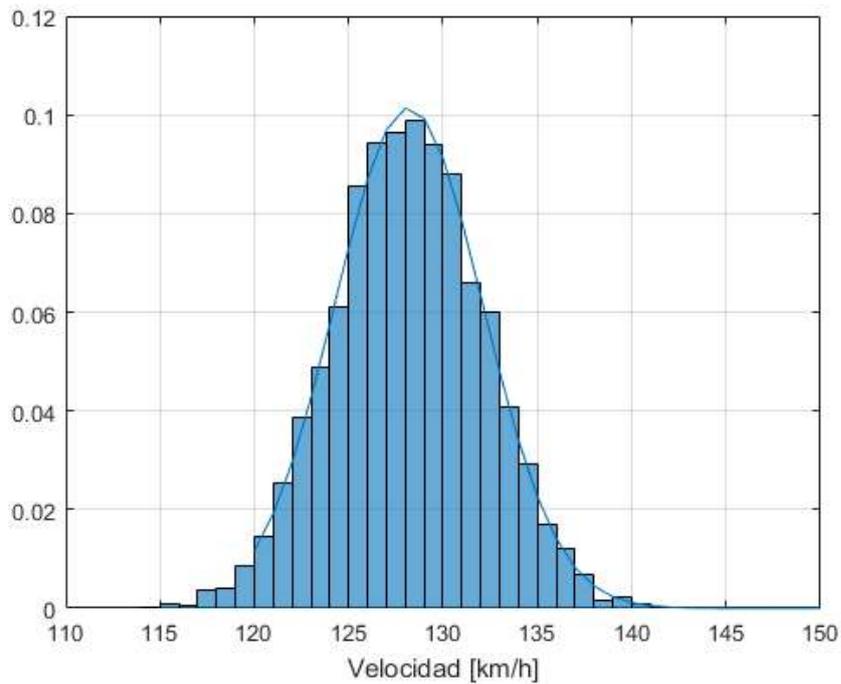


Figura 5.11. Histograma y distribución normal para 5000 valores de velocidad

Para poder confirmar el ajuste, se elabora en el mismo programa de generación de vientos una prueba Kolmogorov-Smirnov para una variable respecto la distribución normal correspondiente. Para el caso mostrado, se obtiene que no es posible rechazar la hipótesis de que los datos se ajusten a una normal con una significancia del 95 %. Esto permite dar por bueno el ajuste estadístico, y concluir con ello que el modelo temporal de series de viento desarrollado es válido.

Capítulo 6

Modelado del conjunto

Una vez desarrollados los modelos de la catenaria y el viento se modela el conjunto completo. Para ello se va a modelar una línea de 6 vanos de 450 m con los parámetros mencionados en los capítulos anteriores. Como la línea está compuesta por varios vanos esta vez, se debe desarrollar el modelo de las crucetas. Con ello ya se está en disposición de completar el modelo básico y comprobar el conjunto sin viento. A continuación, se añade la carga correspondiente al viento, en forma de carga estática constante y como carga dinámica. La carga dinámica se tratará como un sistema transitorio, y se generarán modelos para el viento dinámico uniforme y no uniforme.

6.1. Modelado de las crucetas

El modelado de las crucetas se basa en los parámetros indicados en el Capítulo 3. La geometría viene importada al módulo de Mechanic tal y como se ha explicado en la Sección 4.2. Las diferencias respecto a la catenaria comienzan en este paso. La más relevante es el uso de elementos barra en lugar de viga. En particular se empleará el elemento LINK180. Este elemento se caracteriza por soportar únicamente cargas en la dirección axial y tener tres grados de libertad en sus extremos. Es decir, su matriz de rigidez viene determinada por la Ecuación 2.70. Recordemos que las crucetas pivotantes están articuladas en su unión con el poste y en el vértice común con el cable, como se puede observar en la Figura 6.1. Si fuera una unión tipo *boomerang* el modelo seguiría siendo aplicable. Por tanto, tiene sentido aplicar este tipo de elementos.

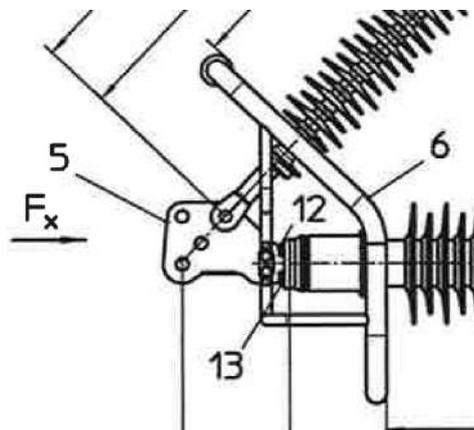


Figura 6.1. Detalle de la articulación en el vértice de la cruceta empleada

Además, el uso de este elemento cuenta con otras ventajas. Por un lado, evita la necesidad de definir específicamente el tipo de contactos entre el brazo, la riostra y el cable. Es en el cálculo de estos contactos donde surgen la mayoría de los problemas de convergencia en este tipo de aplicaciones. Al haber indicado la opción de topología compartida en la definición de la geometría del cable, el programa lo trata como un único elemento continuo, por lo que los distintos segmentos del mismo no se ven afectados por la articulación. A su vez, se está asociando un punto concreto del cable con el vértice, lo que evita que la longitud real de cable varíe entre vanos. Por otra parte, al tratarse de un elemento barra, el programa no calcula los momentos en el brazo y la riostra. Debido a esta matriz de rigidez más reducida, se facilita la convergencia. Los esfuerzos en direcciones distintas a la axial se traducen directamente en desplazamientos de sólido rígido, sin necesidad de cálculo de las deformaciones internas del elemento.

Como ya se ha indicado anteriormente, carece de sentido modelar la cruceta al completo, puesto que no es el objeto de estudio. Del mismo modo, tampoco se ha modelado el poste al que estaría anclada. No obstante, es necesario tener en cuenta su existencia a la hora de evaluar los resultados obtenidos. No tiene sentido que la cruceta gire más de 180° , por ejemplo, puesto que chocaría con el poste.

Con el fin de mantener todas las ventajas del elemento barra, hay que indicar un mallado específico para las crucetas, distinto del empleado en el cable. Este mallado debe constar de un único elemento por borde, es decir, un elemento para cada riostra y otro para cada brazo. Esto obliga a que los únicos nodos sean los que aparecen en los vértices y en las uniones articuladas. De no ser así, al mallar las crucetas se crearían nodos en mitad de los componentes, que serían tratados como nuevas articulaciones. Esto daría lugar a un modelo totalmente erróneo. La Figura 6.2 muestra un esquema del mallado de una de las crucetas.

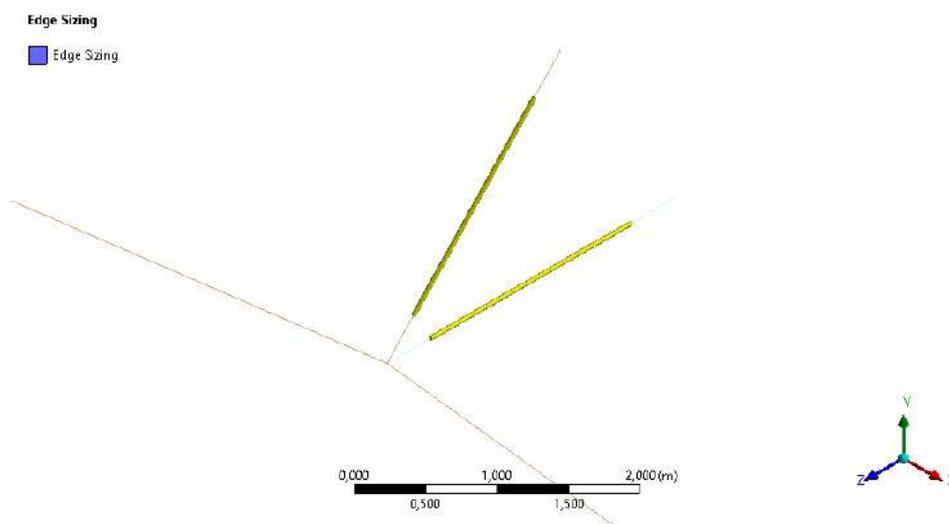


Figura 6.2. Esquema del mallado de una cruceta

6.2. Modelo completo sin viento

Una vez definidos la geometría de los elementos y el mallado, el siguiente paso es comprobar el modelo únicamente bajo la gravedad y la fuerza de tendido. El esquema seguido es similar al indicado en el Capítulo 4, pero es necesario añadir nuevas condiciones de contorno. La Figura 6.3 muestra dicho esquema tal y como aparece en el programa.

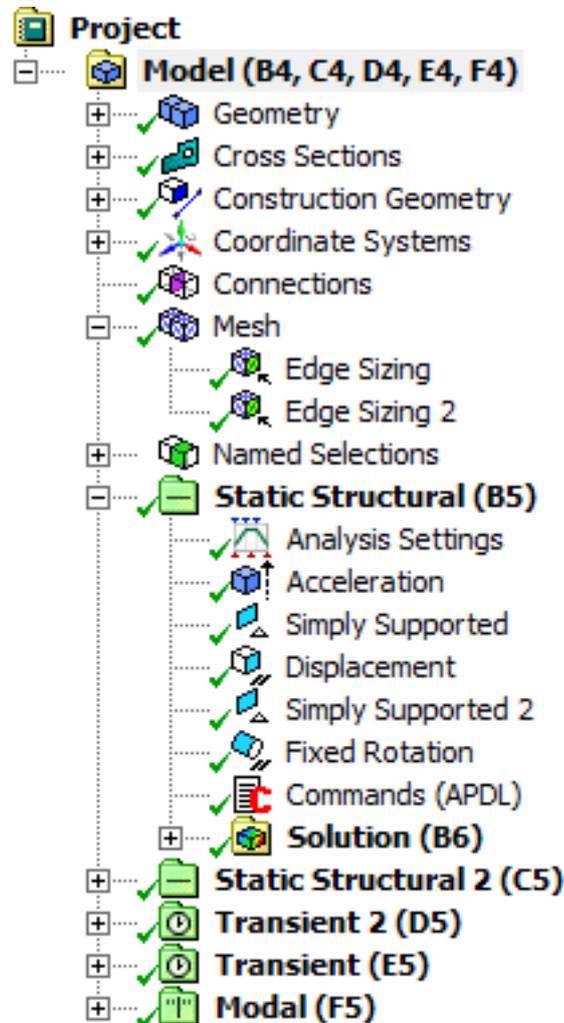


Figura 6.3. Esquema del modelo completo sin viento

La diferencia con respecto al modelo de un solo vano reside en la inclusión de nuevas condiciones de contorno y pasos de carga adicionales. La Figura 6.4 muestra la aplicación de las siguientes condiciones de contorno:

- A **Aceleración:** Se aplica la aceleración de la gravedad a partir del segundo paso de carga. Esto se hace para facilitar la convergencia del paso anterior, donde se aplicará la fuerza de tendido. Aparece como fuerza inercial, por lo que el símbolo es contrario a la dirección de la gravedad. Se aplica sobre todos los componentes.
- B **Soporte simple:** Se bloquea los desplazamientos de los extremos del cable sin afectar a las rotaciones.

- C **Desplazamiento:** Se bloquean los desplazamientos en X, Y y Z de los vértices, lo que facilita la convergencia. En el último paso de carga se liberan para permitir el movimiento de las crucetas.
- D **Soporte simple 2:** Se bloquea los desplazamientos de los extremos de la cruceta que estarían unidos al poste.
- E **Rotación fija:** Se bloquea la rotación del cable en el extremo fijo, dejando libre únicamente la correspondiente al eje Z.
- F **Comandos APDL:** Se aplica el estado de tensiones inicial con `INISTATE, READ`.

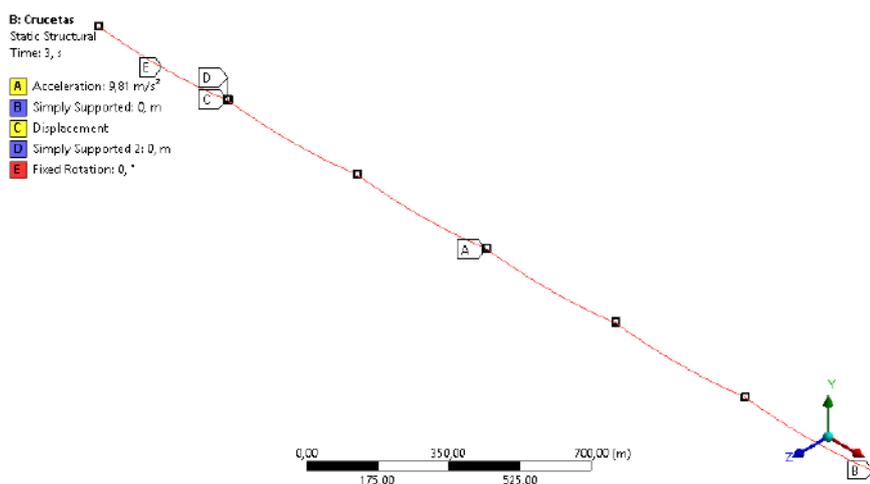


Figura 6.4. Condiciones de contorno del modelo completo sin viento

Para poder validar el modelo se tienen que cumplir dos condiciones. En primer lugar, las crucetas no se deberían mover, puesto que toda la carga está en sentido vertical y la tensión horizontal previa proviene de un estado de equilibrio anterior. En segundo lugar, la deformación de todos los vanos debe ser la misma e igual que la que se tenía para uno solo, puesto que están sometidos a las mismas cargas.

La Figura 6.5 muestra el desplazamiento máximo y mínimo en los vértices de las crucetas. Lógicamente, no es hasta el último paso de carga que aparece este desplazamiento, puesto que existe una condición de contorno que lo fija. Una vez que se libera, el desplazamiento aumenta a poco más de 2 mm. Teniendo en cuenta que la longitud del brazo es de casi 3 m, una variación de 2 mm resulta insignificante, Este mínimo desplazamiento puede ser fruto del error numérico derivado de la discretización, despreciable en cualquier caso.

Por otra parte, la Figura 6.6 muestra la deformación en Y a lo largo del cable. Como se puede observar, esta deformación se repite uniformemente en cada vano, alcanzando un valor máximo de -2.3193 m, que concuerda exactamente con lo obtenido para un solo vano. Resulta interesante analizar también la gráfica de la deformación total del cable en los distintos pasos de carga, representada en la Figura 6.7. La primera parte corresponde a la aplicación de la tensión inicial, seguida por el descenso y estabilización provocados por la acción de la gravedad. Cuando se libera el desplazamiento, la variación es imperceptible, como era de esperar. En conclusión, el modelo sin carga puede darse por válido.

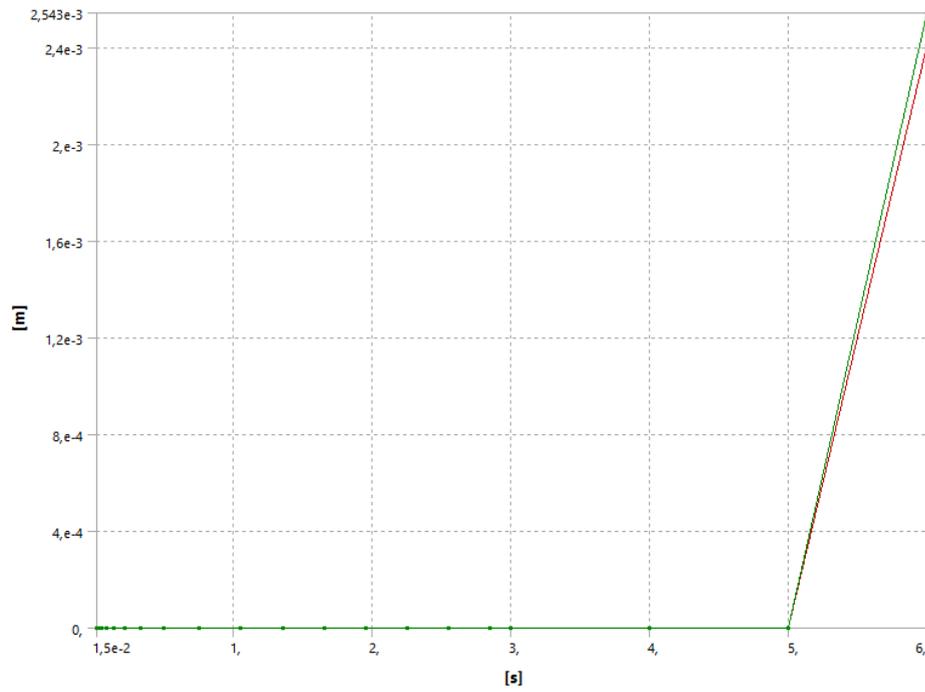


Figura 6.5. Desplazamiento total en los vértices en función de los pasos de carga para el modelo sin viento. Máximo en verde y mínimo en rojo.

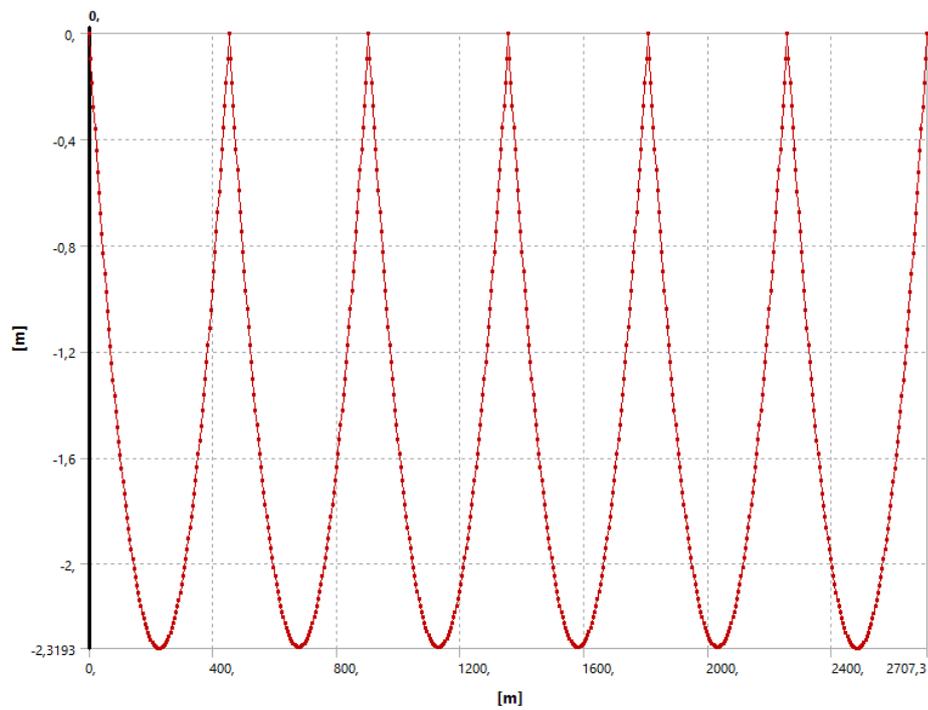


Figura 6.6. Deformación en Y a lo largo del cable

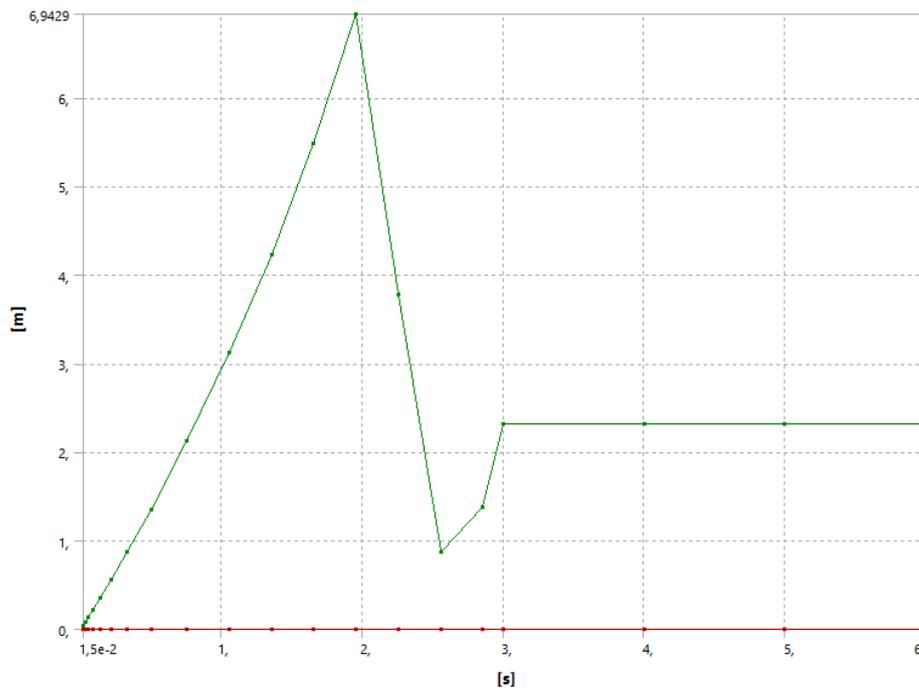


Figura 6.7. Deformación total en la mitad de vano en función de los pasos de carga para el modelo sin viento. Máximo en verde y mínimo en rojo.

6.3. Modelo estático completo

El modelo estático completo parte del modelo anterior, al que se le añade una carga de viento estático uniforme. Para tener en cuenta la carga de viento, se añade una carga lineal distribuida por todo el cable. Esta se aplica en un nuevo paso de carga, después de liberar los desplazamientos. A partir de este modelo se obtendrán los resultados del Capítulo 7. Para el análisis del mismo es necesario tener en cuenta varias consideraciones. En primer lugar, hay que analizar el método de recogida de los resultados. Además, la normativa no indica expresamente cómo se debe aplicar la fuerza en el caso de que el viento no sea perpendicular a la línea, por lo que se analizarán las alternativas. También es necesario explicar por qué aplicar una carga en las crucetas va en detrimento de la eficiencia del modelo. Por último, es conveniente analizar los posibles fallos del mismo.

Para la toma de datos se emplean una serie de comandos de APDL que recogen los datos de los puntos de interés y los exportan a un fichero externo para ser procesados. En este caso, se identifican los nodos de los vértices y la mitad de los vanos, y con su ID de nodo se le indica al programa que son los puntos de interés. A continuación se hace uso del postprocesador temporal, el POST26. Este es el procesador que guarda los resultados de todos los pasos intermedios de carga de un paso concreto. La frecuencia con la que toma los datos viene determinado por el número de pasos mínimos indicado al programa. Si existe algún problema en la convergencia directa, el propio programa podrá añadir pasos de carga adicionales. Este método permite recoger una gran cantidad de datos con subdivisiones de los pasos de carga. Un ejemplo de ello es el mostrado en la Figura 6.8, que muestra la deformación total máxima en el cable a lo largo de los pasos de carga. Cada punto representa un dato recogido.

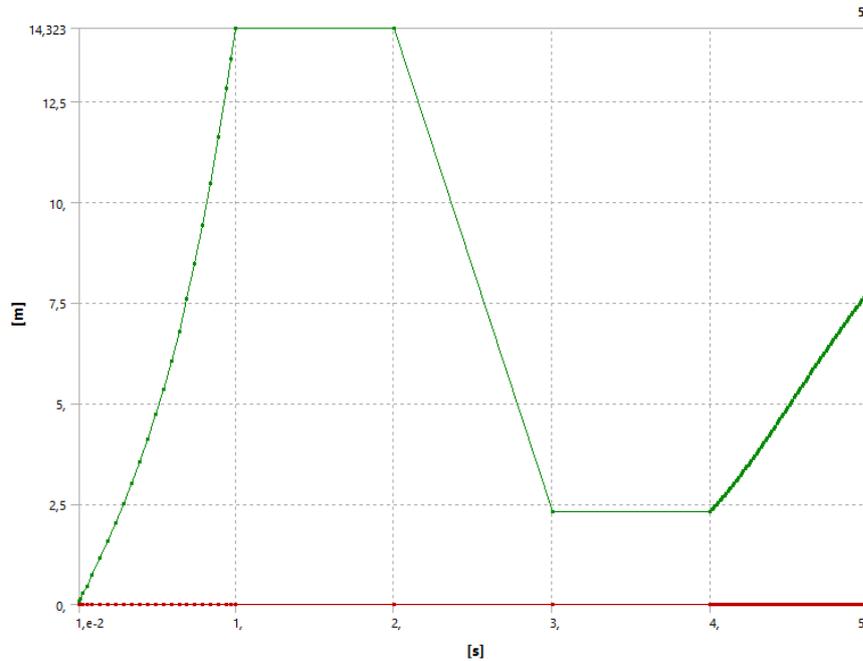


Figura 6.8. Deformación total en el cable en función de los pasos de carga para el modelo con viento estático. Máximo en verde y mínimo en rojo.

Otro punto clave es la forma de aplicar la carga de velocidad. Como ya se ha explicado antes, la normativa indica que la velocidad debe tenerse en cuenta en dirección perpendicular a la línea. Esto tiene sentido para torres de alta tensión con aisladores de bastón, puesto que su distancia crítica se alcanzará con esa misma dirección. Sin embargo, este criterio no tiene sentido para las líneas con crucetas pivotantes, dado que su ángulo crítico será distinto. Las alternativas son asignar la variación de ángulo a la carga lineal o a la velocidad.

En este proyecto se ha decidido proyectar la velocidad en los ejes, incluyéndose el ángulo en las velocidades. Las ecuaciones de las cargas quedan como:

$$q_x = d \times 50 \times \left(\frac{V_V}{120} \cos \theta \right)^2 \tag{6.1}$$

$$q_y = d \times 50 \times \left(\frac{V_V}{120} \sen \theta \right)^2 \tag{6.2}$$

El módulo de la carga deja de ser constante y pasa a variar como el coseno de 4 veces el ángulo. Este efecto se puede ver en la Figura 6.9. Este hecho es coherente con la aplicación de las cargas, puesto que se compensa con el área proyectada. En cualquier caso, al tratarse de una aplicación novedosa, la normativa no está lo suficientemente desarrollada para aplicarse rigurosamente en estos casos.

Otra consideración es la aplicación de carga en las crucetas o no. Al haberse simulado con un elemento barra, carece de sentido de cara a estudiar su deformación. No obstante, la carga se transformaría directamente en movimiento, lo que puede afectar al giro de las crucetas. Si comparamos las longitudes y los diámetros de la riostra y el brazo en comparación con la fuerza aplicada en el cable, se obtiene la siguiente tabla:

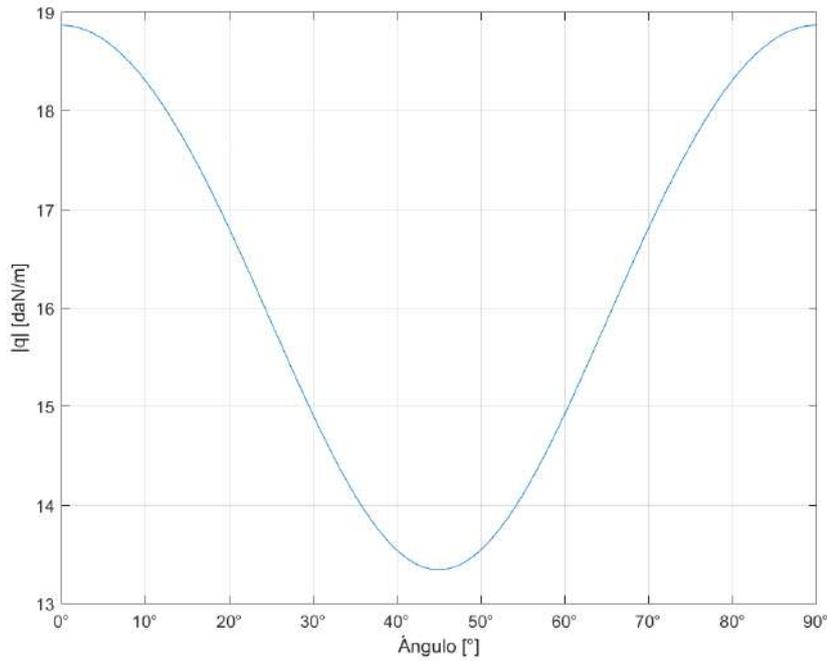


Figura 6.9. Variación de q con el ángulo para v=140 km/h

Elemento	Diámetro[mm]	d/d _{cable} [%]	L[m]	L/L _{cable} [%]	Producto [%]
Riostra	32.8	118	2.847	0.63	0.74
Brazo	100	361	2.546	0.57	2.05
Total	–	–	5.393	1.20	–

Tabla 6.1. Comparativa de fuerza aplicada en la cruceta para d_{cable} = 27 mm

Como se puede observar, la carga en las crucetas tiene un peso mucho menor que en el cable. Si tomamos dos simulaciones, una con carga en las crucetas y otra sin ella, se obtienen las Figuras 6.10 y 6.11. Se ha tomado el caso más favorable para la carga en las crucetas, cuando esta es paralela a la línea (y perpendicular a las crucetas en consecuencia). En este caso, la diferencia en el desplazamiento total es de 2 cm frente a los más de 2 m, menos de un 1%. No obstante, la complejidad del modelo y los tiempos de computación se ven aumentados. El peso de la línea y la fuerza que ejerce sobre las crucetas prevalece frente a la del viento, como se quería comprobar. Por tanto, es razonable prescindir de la carga en las crucetas con el fin de aumentar la eficiencia del modelo.

Por último, es necesario identificar las limitaciones del modelo. Como ya se ha comentado anteriormente, un aspecto importante a destacar es que el modelo no limita el giro de la cruceta en situaciones irreales. Por ejemplo, tiene total libertad de giro completo, lo cual no puede pasar en la realidad. Esta situación en la que la cruceta gira más de 90° se da cuando la posición de equilibrio más estable pasa por dicho giro, lo que genera una disposición del cable y las crucetas erróneas. En ejemplo en el que se ha dado el caso es en la Figura 6.12, donde se ha modificado la escala para poder apreciar mejor el efecto del giro.

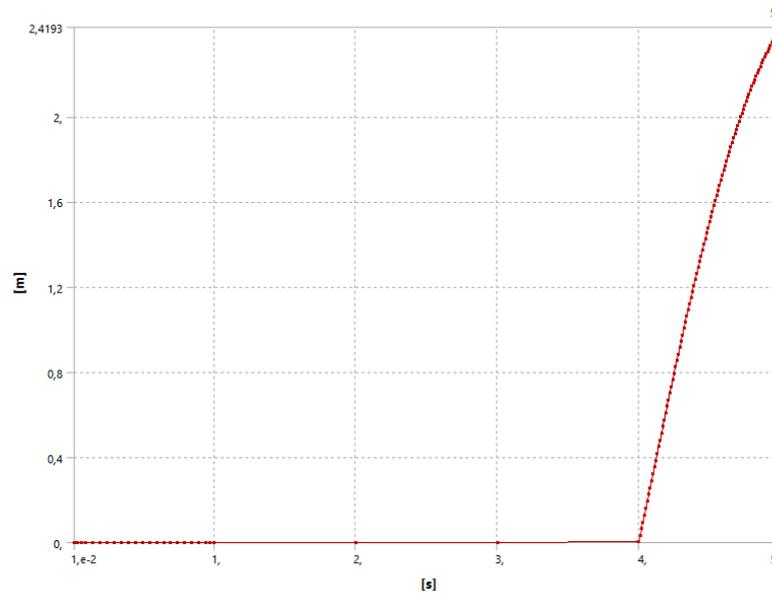


Figura 6.10. Desplazamiento total máximo en los vértices sin carga en las crucetas con viento paralelo a la línea

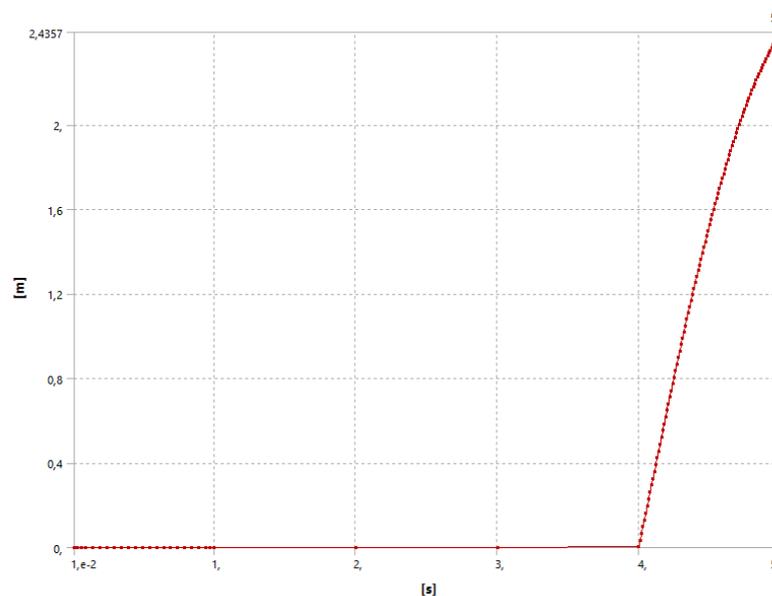


Figura 6.11. Desplazamiento total máximo en los vértices con carga en las crucetas con viento paralelo a la línea

Además, es en estos casos en los que la convergencia del modelo falla. Al tratarse de variaciones muy bruscas en la forma, el modelo se vuelve inestable. De cara a la recogida de datos, estos fallos en la convergencia del modelo son irrelevantes, puesto que la cruceta nunca debería girar hasta ese extremo y el límite de fallo se alcanza mucho antes. No obstante, como ejercicio académico es posible facilitar la convergencia del modelo. Para ello, la estrategia consiste en aplicar pequeños pasos de carga que se aproximen al valor deseado con una variación del ángulo. Esto minimiza las alteraciones de forma de la malla, permitiendo la obtención de un resultado. Este proceso es muy laborioso y carece de utilidad directa, por lo que se prescindirá de los valores en los que el modelo no converja por este motivo.

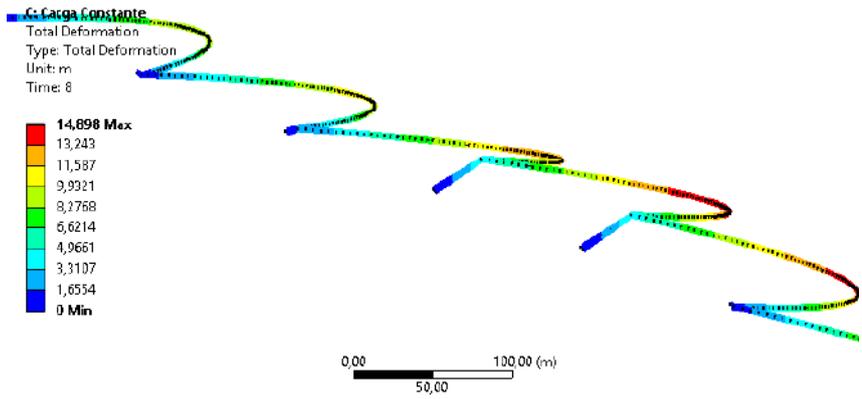


Figura 6.12. Cruceta girada

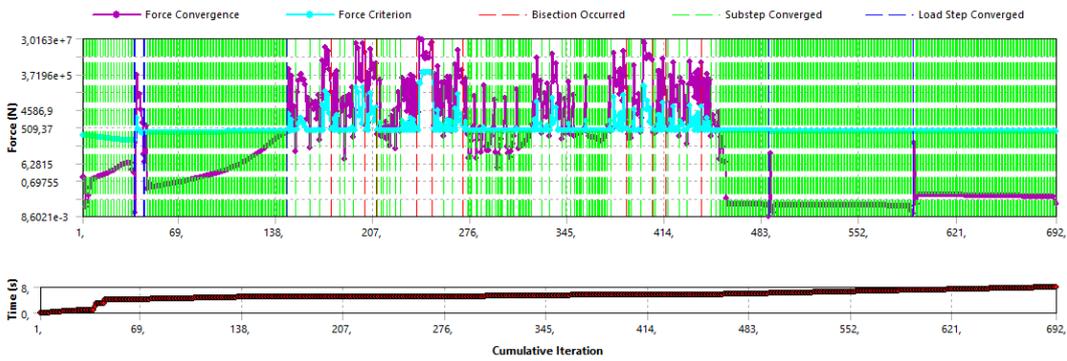


Figura 6.13. Convergencia del modelo con viento estático con giro de las crucetas

Como se puede observar en la Figura 6.13, hay un tramo en el que el *solver* necesita varios intentos para obtener una solución a un subpaso de carga. Este tramo se corresponde con el anterior a que gire la cruceta. En el momento en que gira (segundo 450 aproximadamente), la convergencia es mucho más sencilla, aunque los resultados sean incoherentes con el sistema real.

6.4. Modelo transitorio

El modelo transitorio emplea el módulo “Transient” de Mechanic. Este módulo permite la integración en tiempo del sistema, teniendo en cuenta la inercia y la evolución del mismo. Esto permite simular el efecto del viento dinámico variable sobre la catenaria. En concreto, se crearán un modelo transitorio con viento dinámico uniforme y otro con viento dinámico distribuido.

6.4.1. Modelo transitorio con viento dinámico uniforme

Los dos modelos transitorios son bastante parecidos. Parten de la base del modelo completo al que se le aplica una carga de viento. La diferencia es que para el modelo con viento dinámico uniforme se aplica una única carga como presión lineal, mientras que en el modelo con viento dinámico distribuido se aplica una carga para cada vano. En este apartado se analizarán las decisiones tomadas en torno al modelo de viento dinámico uniforme.

El esquema básico del modelo es el mismo que para el modelo estático, representado en la Figura 6.8. La mayor diferencia reside en la definición de los pasos de cargas. Se diferencian dos tipos de pasos, los que tienen integración en tiempo y los que no. En este caso, los únicos pasos de carga con integración son los dos últimos. En estos pasos se tiene en cuenta la inercia del sistema y la posición previa. Serán un paso en el que se aplique la serie de viento y un último paso de estabilización.

Los pasos que no tienen integración numérica son, básicamente, los mismos que para el modelo estático más un paso de estabilización previa. Es necesario aplicar los pasos del estático para poder partir del mismo punto de equilibrio. En estos pasos se aplican la tensión inicial y la aceleración y se liberan los desplazamientos. Por su parte, el paso de estabilización evita someter al sistema a cambios bruscos irreales. Cuando comienza la integración en tiempo, si no está actuando ninguna fuerza previa, la línea se ve expuesta a una distorsión repentina que la desestabiliza. Un escenario en el que el viento fuera de 0 a 140 km/h instantáneamente resulta inverosímil, por lo que es necesario limitar este efecto.

Las Figuras 6.14 y 6.15 representan la deformación total máxima en el cable para un sistema no estabilizado y uno estabilizado, respectivamente. El efecto de la estabilización es muy notable en los primeros segundos del paso de aplicación del viento dinámico.

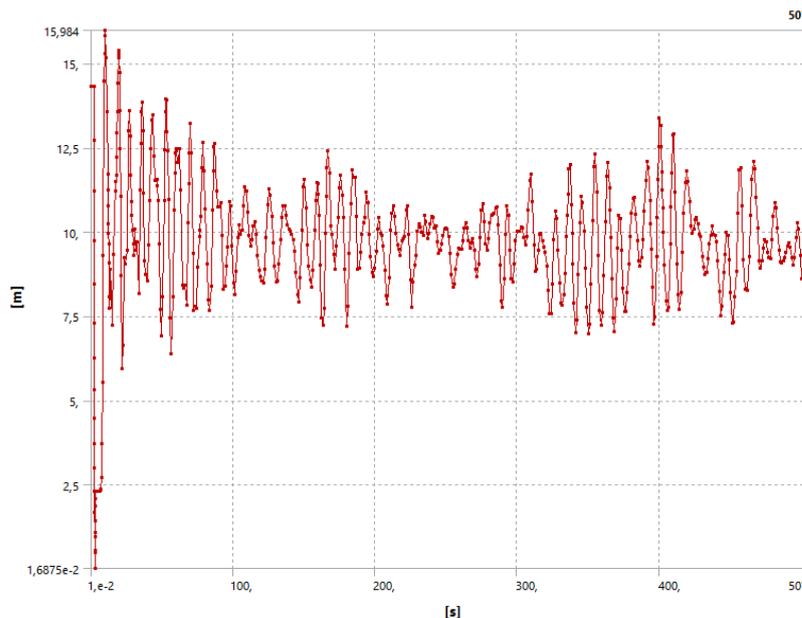


Figura 6.14. Deformación total máxima del cable en el modelo transitorio con viento dinámico uniforme sin estabilización

Otra consideración a tener en cuenta es el amortiguamiento del sistema. Como ya se indicó en el Capítulo 5, el sistema está amortiguado como un sistema de segundo grado. Los pesos aplicados en los parámetros aplicados son $\alpha = 0.0125$ y $\beta = 0.0001$ [49]. Este amortiguamiento es numérico, pues depende íntegramente de la masa y la matriz de rigidez del sistema, además de dichos coeficientes. El sistema real tendría además un amortiguamiento dinámico. Existe un gran rozamiento entre el cable y la cruceta, además del resto de elementos móviles. Por ello, los resultados obtenidos se pueden considerar una cota superior.

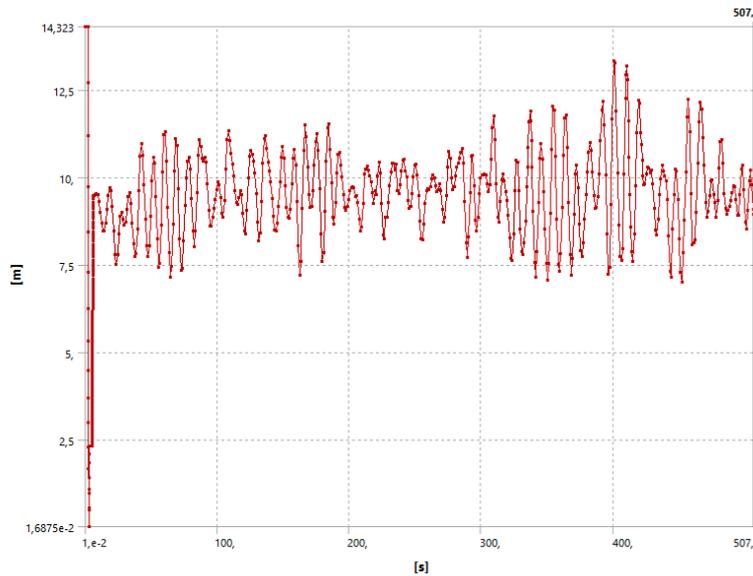


Figura 6.15. Deformación total máxima del cable en el modelo transitorio con viento dinámico uniforme con estabilización

Si se evalúa el modelo dinámico para casos extremos, también se puede dar el giro de la cruceta. Esto ocurre cuando aparece un cambio brusco de velocidad, lo que traslada la posición de equilibrio con un giro de más de 180° . En ese caso, el sistema oscila en torno a la nueva posición de equilibrio, aportando datos erróneos. Es posible que esto se repita y vuelva a una posición factible. De nuevo, de cara a la aplicación práctica estos casos carecen de interés práctico, puesto que rompen la distancia de seguridad mucho antes del giro. No obstante, puede tener interés académico y, a diferencia del modelo estático, el modelo dinámico converge y permite obtener resultados con facilidad. La Figura 6.16 muestra la deformación máxima en Z en las crucetas de un modelo con giro de más de 180° . Se observa cómo aparece un cambio repentino en la deformación media, provocado por el giro de la cruceta, con retornos puntuales a la posición de equilibrio inicial.

6.4.2. Modelo transitorio con viento dinámico no uniforme

El modelo transitorio con viento dinámico no uniforme es completamente análogo al de viento dinámico uniforme. La única diferencia reside en la aplicación de una carga lineal distinta por cada vano. En caso de buscar una distribución con más intervalos sería necesario dividir la geometría de alguno de los cables con vértices virtuales, y aplicar una carga en cada tramo. Esta división deberá hacerse igual en el modelo preliminar. Esto se debe a que la pretensión inicial debe aplicarse exactamente sobre los nodos en la misma posición en ambos modelos. La creación de un vértice artificial fuerza la existencia de un nodo en ese punto concreto, por lo que se debe tener en cuenta.

Es necesario destacar que al hacer esta distribución del viento se está añadiendo cierto error. Existe un cambio en la serie temporal entre cada uno de los vanos, apareciendo esta diferencia exactamente en las crucetas. Esto no se ajusta con el comportamiento real, pero para poder resolver el modelo en un tiempo razonable no es posible representar la variación continua en longitud de las series de viento.

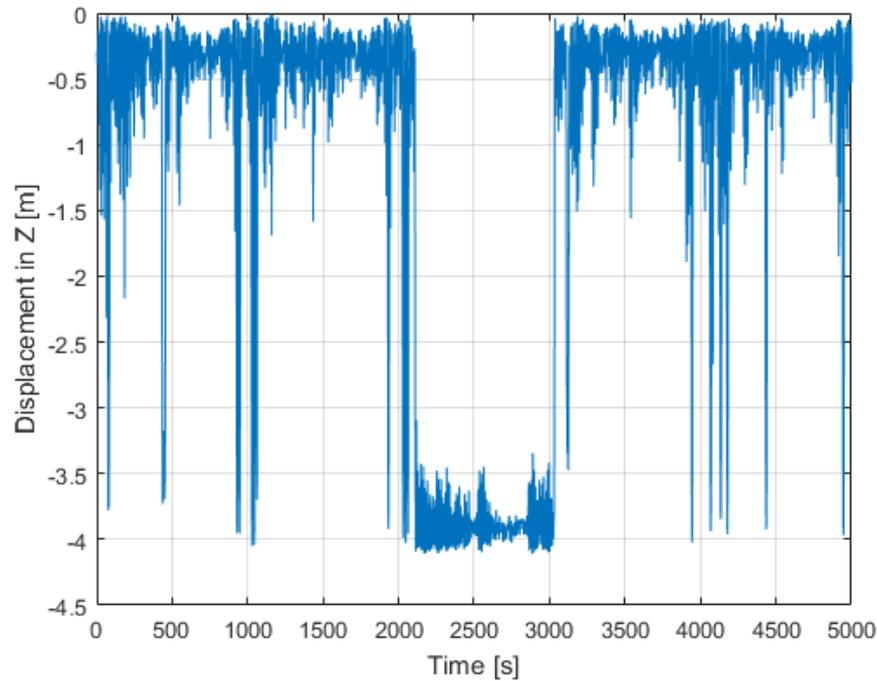


Figura 6.16. Deformación máxima en Z en los vértices para el modelo de viento dinámico uniforme con ejemplo de giro de la cruceta

Además, surge la cuestión de cómo distribuir las series de viento una vez seleccionado el número de ellos. En este caso se ha elegido aplicarlas en cada vano, teniendo el cambio de serie en las crucetas, pero bien podría haberse decidido ubicar el dicho cambio en la mitad de los vanos o en cualquier otro punto. Dado que se considera el cable completo como un continuo, no se espera que el efecto derivado de aplicar la carga en uno o en otro punto resulte relevante para el desplazamiento de las crucetas. La mayor variación surge en los desplazamientos del propio cable, puesto que es el que está expuesto a la carga dinámica, pero de cara al análisis estadístico no es importante el comportamiento del mismo en cada instante. Por su parte, las crucetas sufren los esfuerzos derivados de todo el cable, que transmite la tensión y el desplazamiento como un cuerpo sólido completo, por lo que la posición de las series de viento no afectan a su comportamiento.

Capítulo 7

Obtención y análisis de resultados: viento estático

El procedimiento de obtención de resultados para viento estático parte de su correspondiente modelo. En primer lugar se fija un ángulo y se calculan las cargas lineales que le corresponden a 140 km/h. A continuación se introduce en el modelo y se especifica un número de pasos intermedios suficientes para crear la curva de deformación. En este caso se indica un mínimo de 100 pasos intermedios, finalizando a 140 km/h o cuando falle la convergencia. Siguiendo este procedimiento se toman datos de todo el rango de ángulos entre 0° y 90° .

7.1. Análisis de la estabilidad para cada número de vanos

Siguiendo el procedimiento indicado, se han realizado ensayos para vanos de 300 m y 450 m de longitud de vano. Para su análisis se han seguido varios pasos para cada serie. En primer lugar, se han obtenido las curvas de desplazamiento de cada uno de los vértices de las crucetas y del punto medio de los vanos en función del ángulo de incidencia. Se han elegido estos puntos por distintos motivos. El desplazamiento máximo en Z en la cruceta determina lo próximo que están a romper la distancia de seguridad con el poste. Si se tiene en cuenta que el brazo de la cruceta mide cerca de los 3 m mientras que la distancia de vano son 300 m, se puede considerar que el ángulo que se genera respecto a la dirección X paralela al cable es 0. Por consiguiente, si el vértice tiene un desplazamiento en Z que lo sitúe a menos de la distancia de seguridad, se puede asegurar que el cable también romperá dicha distancia. Por otro lado, la distancia en la mitad de vano será la que alcance el punto más alejado a la posición inicial de la línea. A partir de ella se puede estimar la sección de terreno que deberá mantenerse en condiciones de servidumbre de paso de la línea.

Estas curvas se han calculado recogiendo el valor máximo del desplazamiento en Z que alcanza ese punto al aplicar las cargas de viento paulatinamente. Esto provoca que, en los ángulos en los que no se han recogido datos para todas las velocidades por falta de convergencia, pueda haber valores menores que los reales. Este efecto se puede reconocer en los casos que hay un descenso brusco en el desplazamiento.

El segundo paso es representar las superficies de estabilidad del modelo. Las primeras son las que se denominarán como superficies de estabilidad naturales, pues se obtienen por la interpolación directa en superficie de los datos recogidos. Se han representado en un eje tridimensional ángulo-velocidad-desplazamiento. El interpolador elegido es el esplín cúbico aplicado en superficie, por ser el que mejor se ajusta a los puntos obtenidos. A su lado se representan las líneas de contorno correspondientes, que permiten aproximar los valores de la deformación máxima directamente a partir de unas condiciones determinadas.

En los propios gráficos 3D de las superficies de estabilidad se han representado también los puntos tomados. Se puede ver claramente dónde no se han recogido datos debido a la falta de convergencia. Esto hace que aparezcan zonas imprecisas a su alrededor, que no pueden tomarse como fiables.

Las segundas son las que se denominarán como superficies de estabilidad en meseta. Como ya se ha explicado, si el desplazamiento en Z en las crucetas rompe la distancia de seguridad, el cable también la romperá. Por consiguiente resulta muy útil disponer de las curvas que indiquen cuándo ocurrirá esto. Para ello se toman todos los valores de la superficie de estabilidad correspondiente y se eliminan todos los valores que superan la distancia límite, igualando estos casos al caso límite. En el caso de la línea de este proyecto y siguiendo el RLAT [2], la distancia de seguridad es 1.7 m con el poste. Si se tiene en cuenta que la longitud del brazo de la cruceta es 2.847 m, se puede establecer como cota superior un desplazamiento máximo en Z de 1.1 m en sentido del poste. Por tanto, todo valor de las superficies de estabilidad naturales aparecerá como 1.1 m en la superficies en meseta. Se ha cambiado el interpolador, empleando interpolación por el vecino más próximo en lugar de esplín cúbico. Esto se ha hecho para conseguir una mejor definición de la meseta, perdiendo parte de la información correspondiente a las pendientes.

A continuación se presentan los gráficos descritos, así como un análisis de los resultados derivados de estos.

7.1.1. Vanos de 300 m

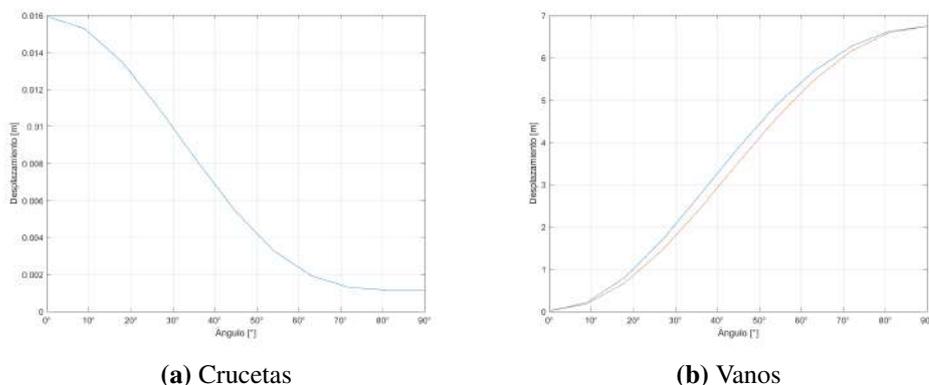
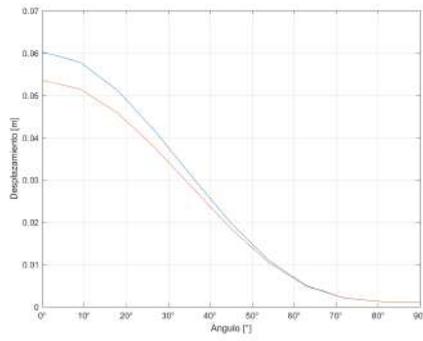
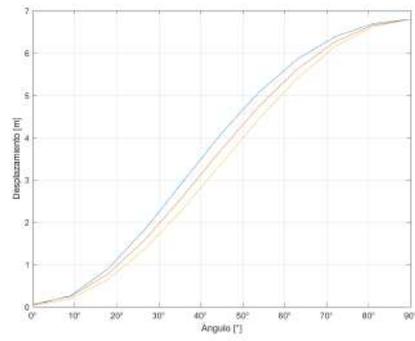


Figura 7.1. Curvas de desplazamiento para 2 vanos de 300 m.

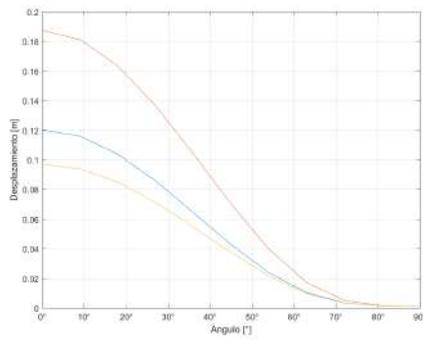


(a) Crucetas

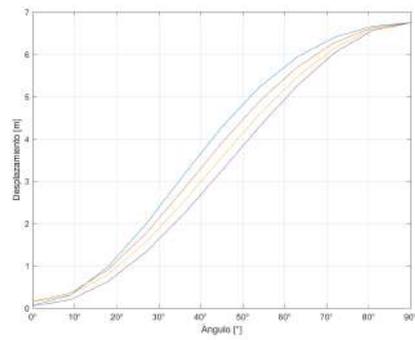


(b) Vanos

Figura 7.2. Curvas de desplazamiento para 3 vanos de 300 m.

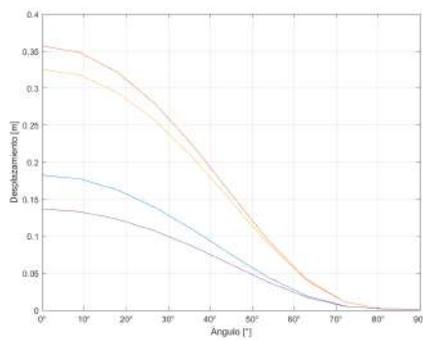


(a) Crucetas

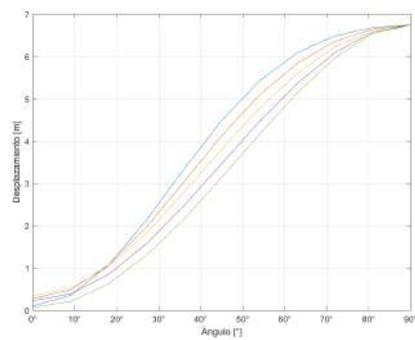


(b) Vanos

Figura 7.3. Curvas de desplazamiento para 4 vanos de 300 m.

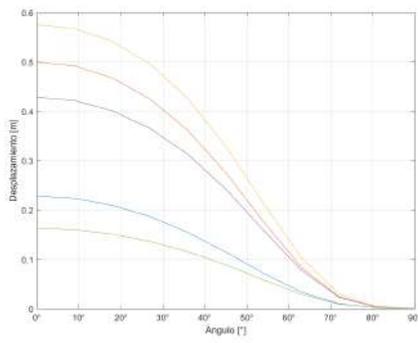


(a) Crucetas

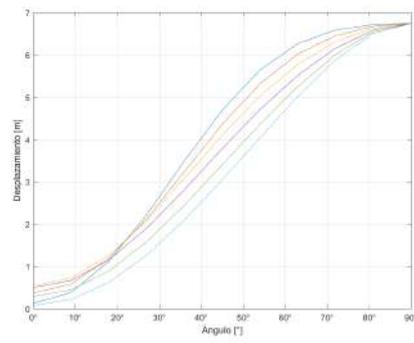


(b) Vanos

Figura 7.4. Curvas de desplazamiento para 5 vanos de 300 m.

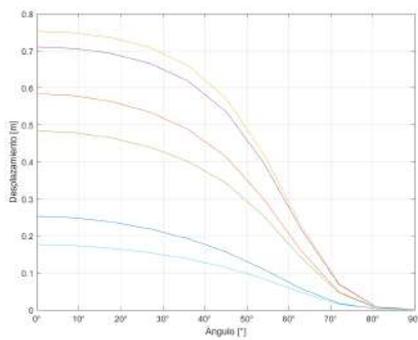


(a) Crucetas

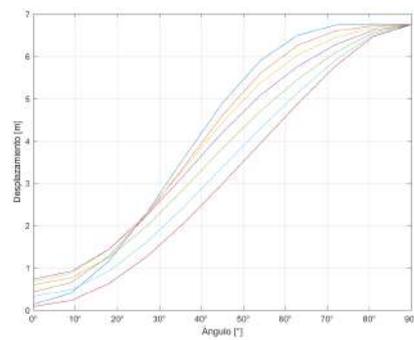


(b) Vanos

Figura 7.5. Curvas de desplazamiento para 6 vanos de 300 m.

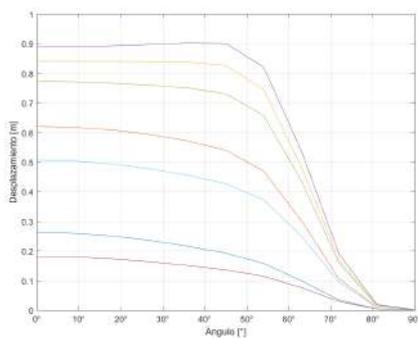


(a) Crucetas

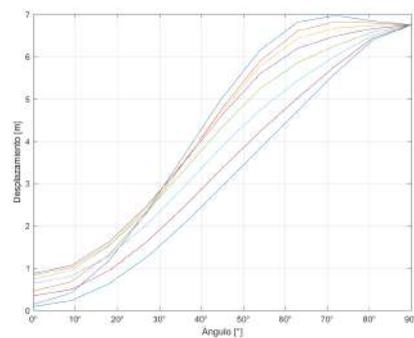


(b) Vanos

Figura 7.6. Curvas de desplazamiento para 7 vanos de 300 m.

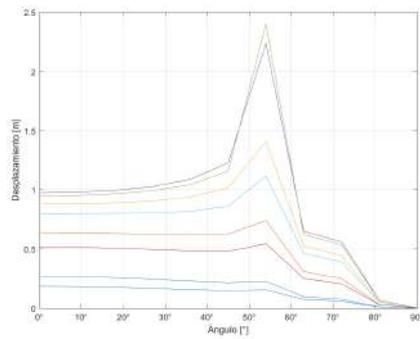


(a) Crucetas

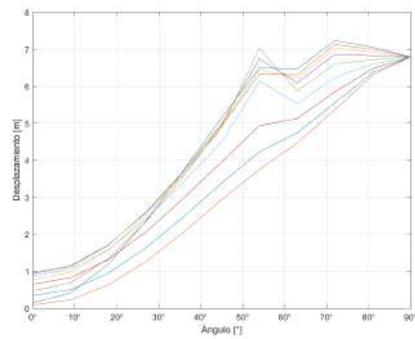


(b) Vanos

Figura 7.7. Curvas de desplazamiento para 8 vanos de 300 m.

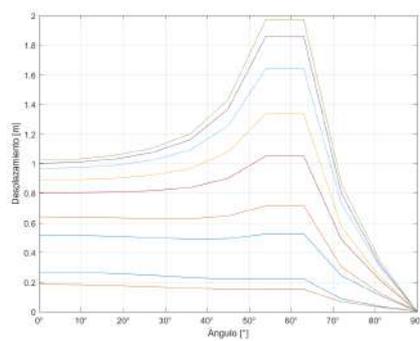


(a) Crucetas

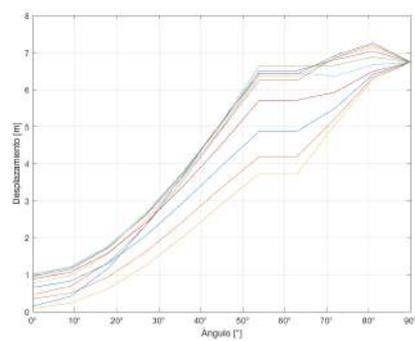


(b) Vanos

Figura 7.8. Curvas de desplazamiento para 9 vanos de 300 m.



(a) Crucetas



(b) Vanos

Figura 7.9. Curvas de desplazamiento para 10 vanos de 300 m.

7.1.1.1. Superficies de estabilidad naturales

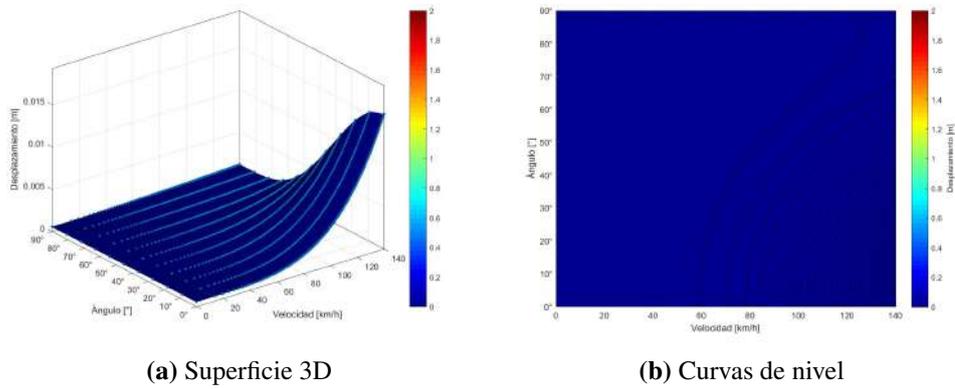


Figura 7.10. Superficie de estabilidad en las crucetas para 2 vanos de 300 m.

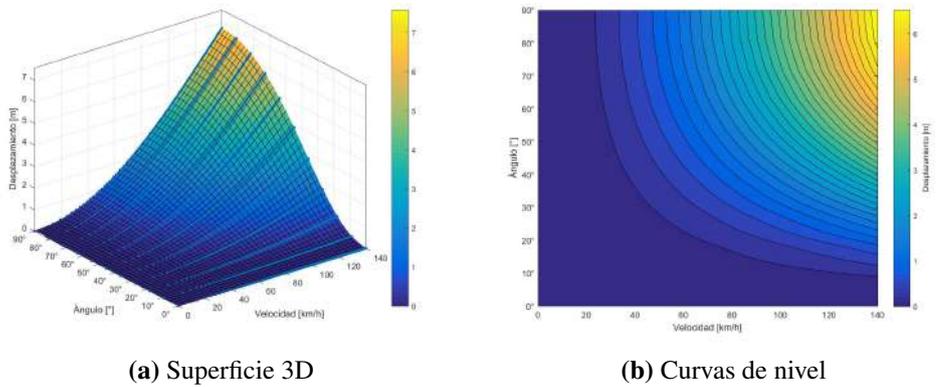


Figura 7.11. Superficie de estabilidad en los vanos para 2 vanos de 300 m.

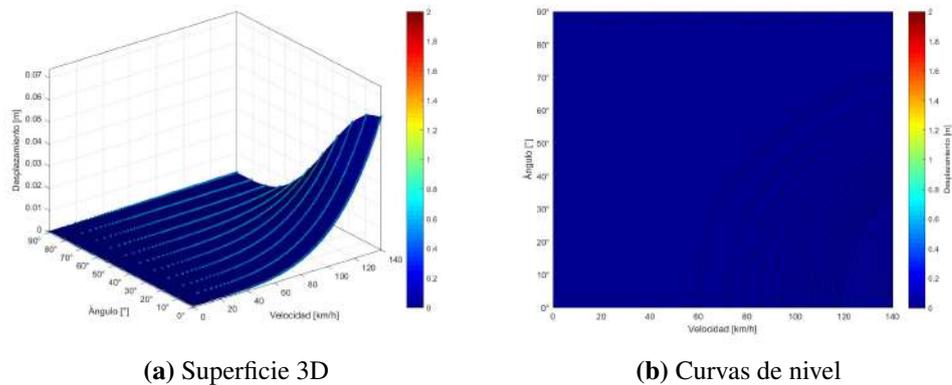


Figura 7.12. Superficie de estabilidad en las crucetas para 3 vanos de 300 m.

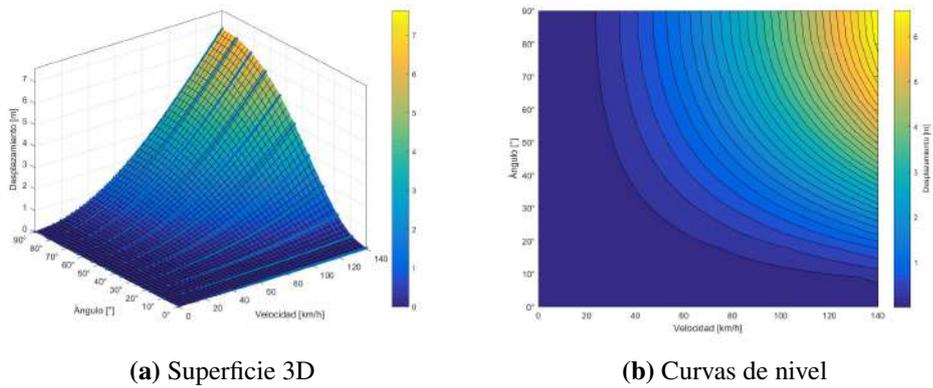


Figura 7.13. Superficie de estabilidad en los vanos para 3 vanos de 300 m.

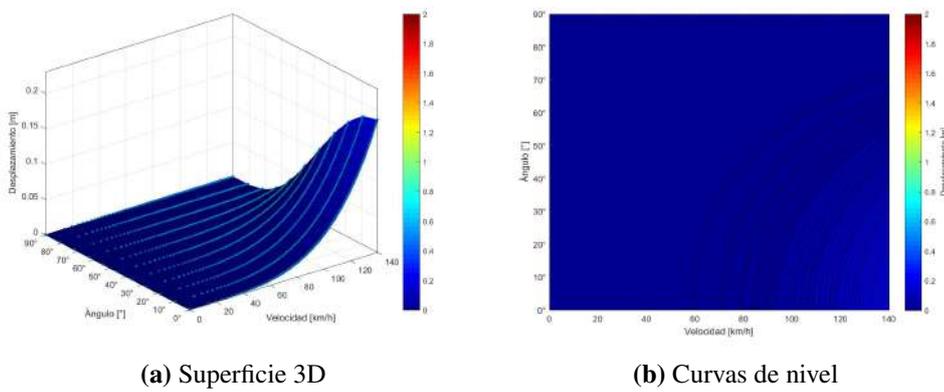


Figura 7.14. Superficie de estabilidad en las crucetas para 4 vanos de 300 m.

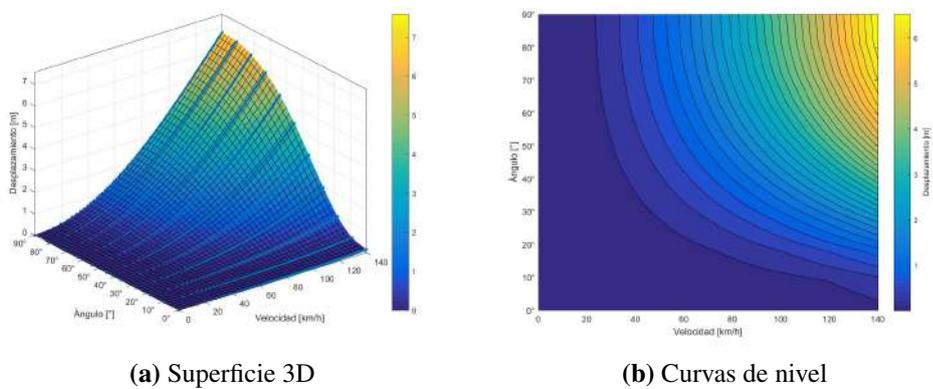


Figura 7.15. Superficie de estabilidad en los vanos para 4 vanos de 300 m.

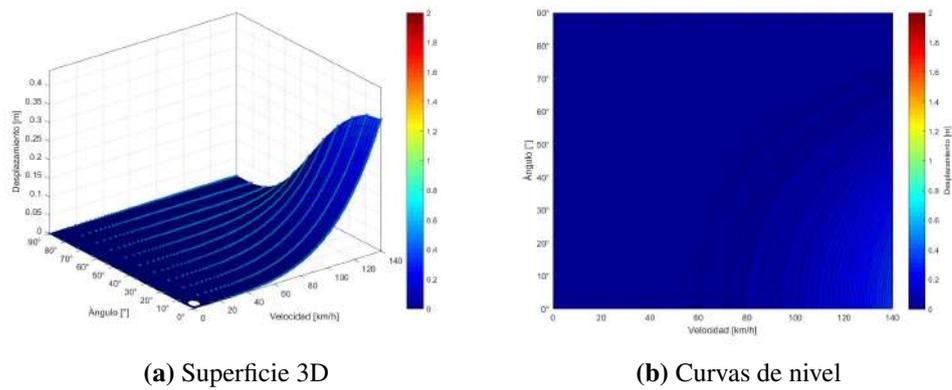


Figura 7.16. Superficie de estabilidad en las crucetas para 5 vanos de 300 m.

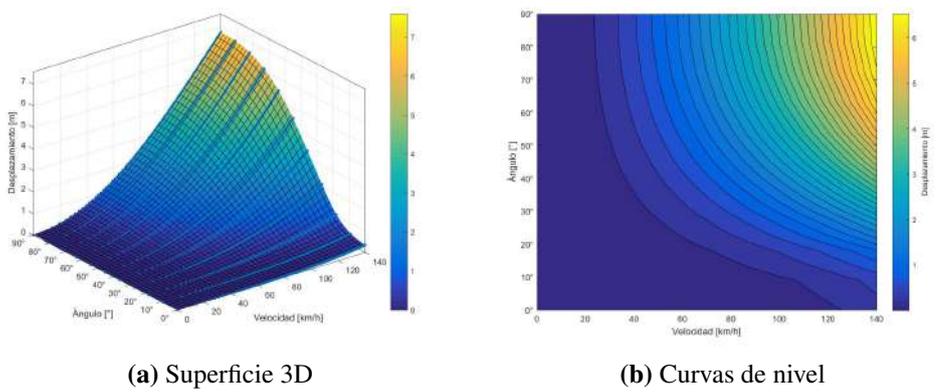


Figura 7.17. Superficie de estabilidad en los vanos para 5 vanos de 300 m.

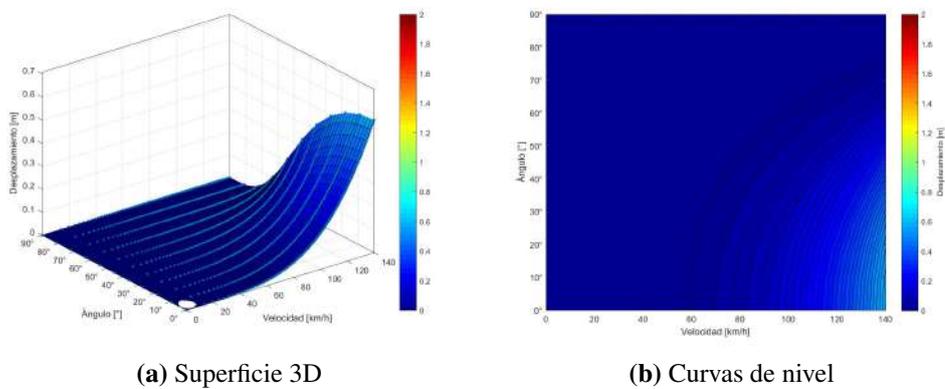


Figura 7.18. Superficie de estabilidad en las crucetas para 6 vanos de 300 m.

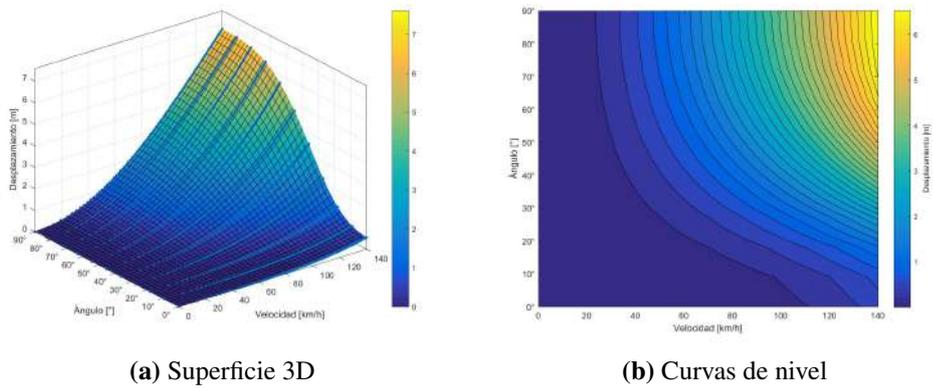


Figura 7.19. Superficie de estabilidad en los vanos para 6 vanos de 300 m.

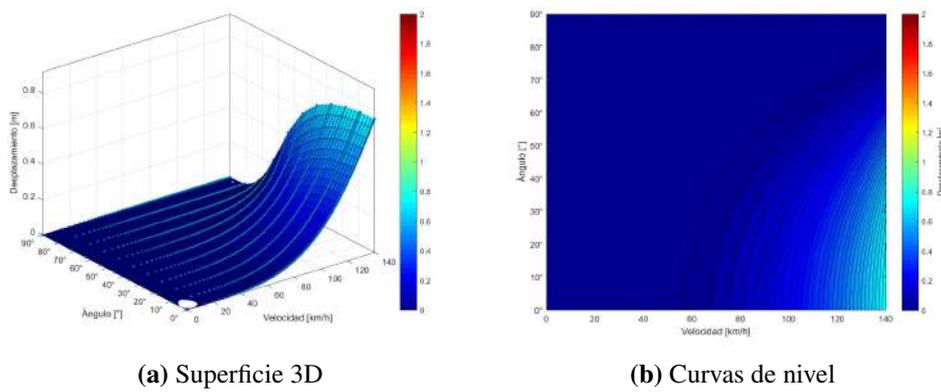


Figura 7.20. Superficie de estabilidad en las crucetas para 7 vanos de 300 m.

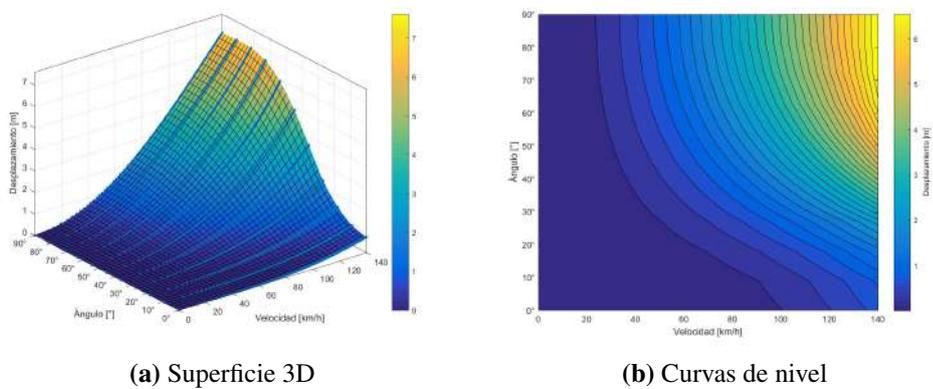


Figura 7.21. Superficie de estabilidad en los vanos para 7 vanos de 300 m.

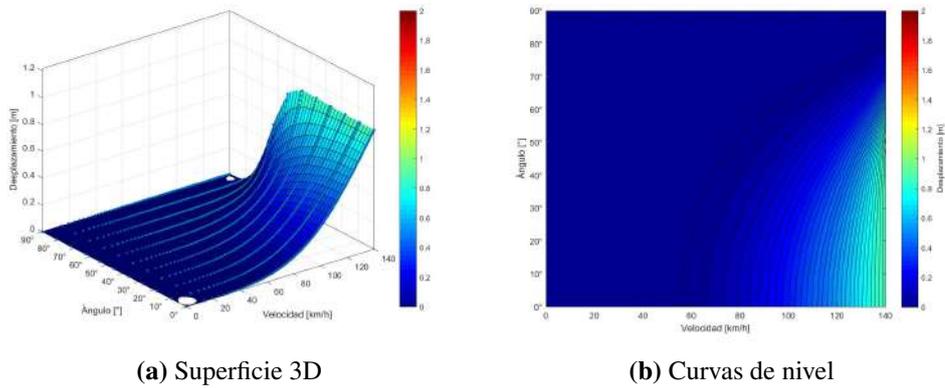


Figura 7.22. Superficie de estabilidad en las crucetas para 8 vanos de 300 m.

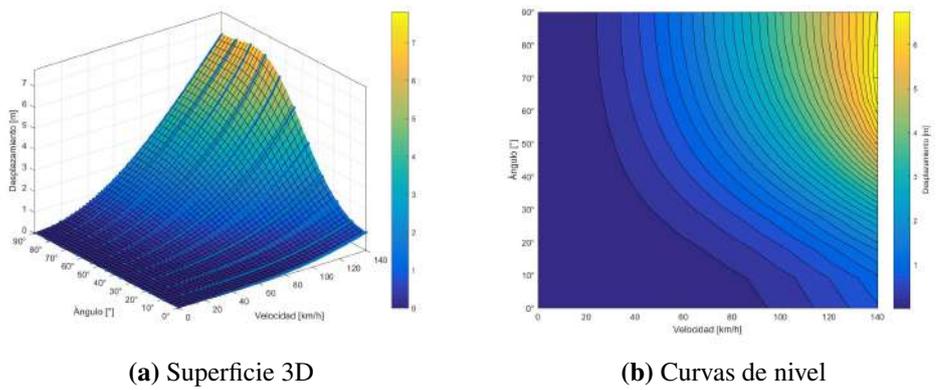


Figura 7.23. Superficie de estabilidad en los vanos para 8 vanos de 300 m.

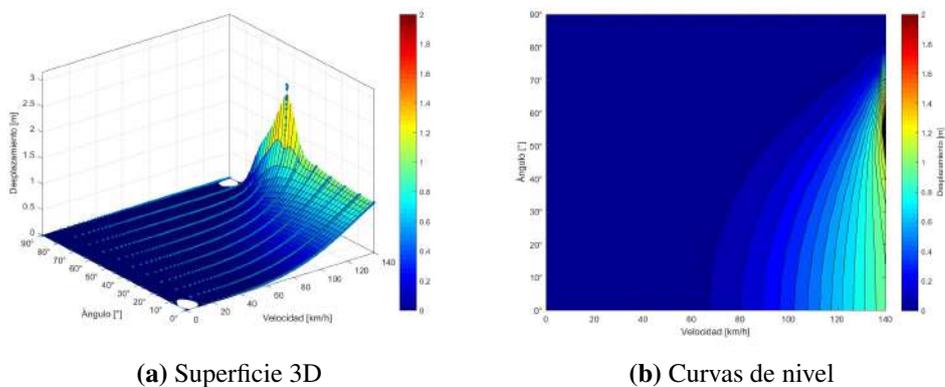


Figura 7.24. Superficie de estabilidad en las crucetas para 9 vanos de 300 m.

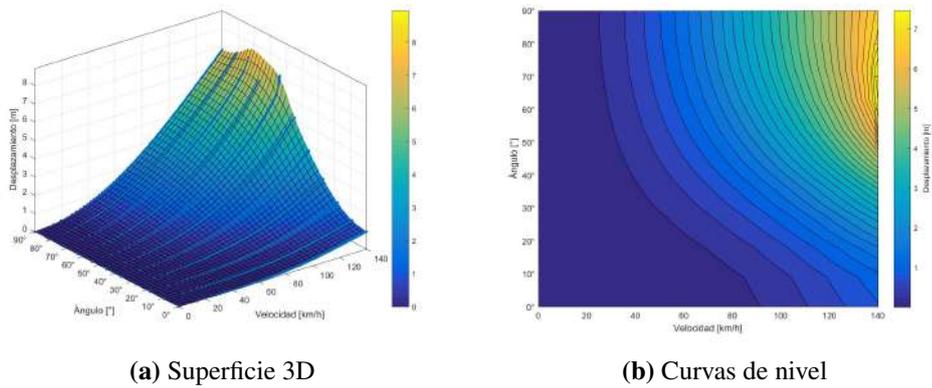


Figura 7.25. Superficie de estabilidad en los vanos para 9 vanos de 300 m.

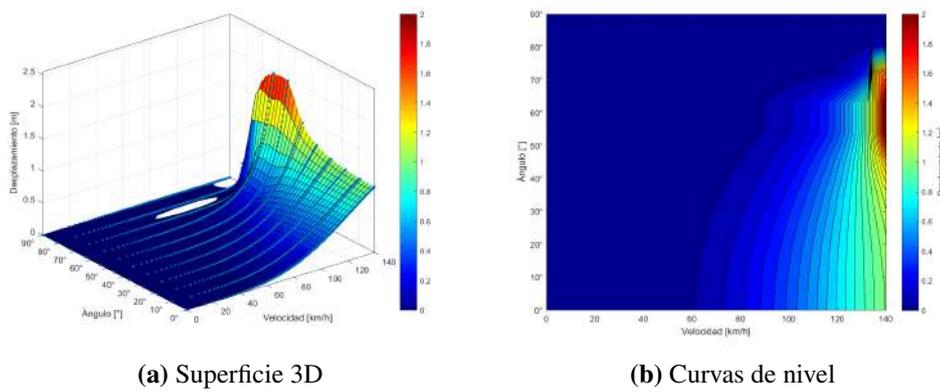


Figura 7.26. Superficie de estabilidad en las crucetas para 10 vanos de 300 m.

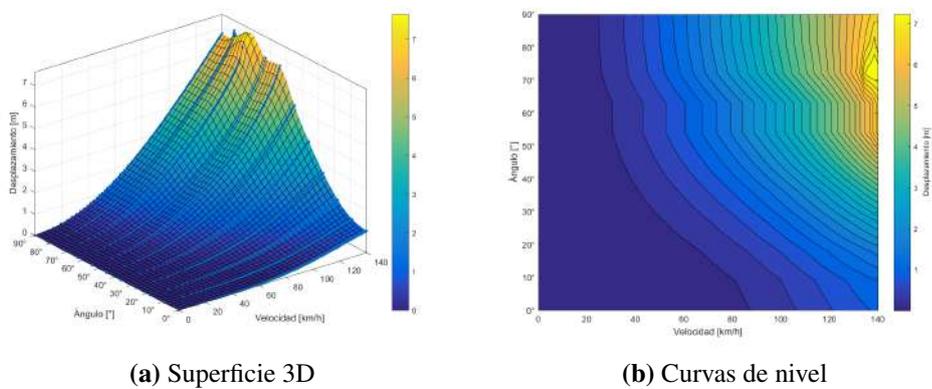


Figura 7.27. Superficie de estabilidad en los vanos para 10 vanos de 300 m.

7.1.1.2. Superficies de estabilidad en meseta

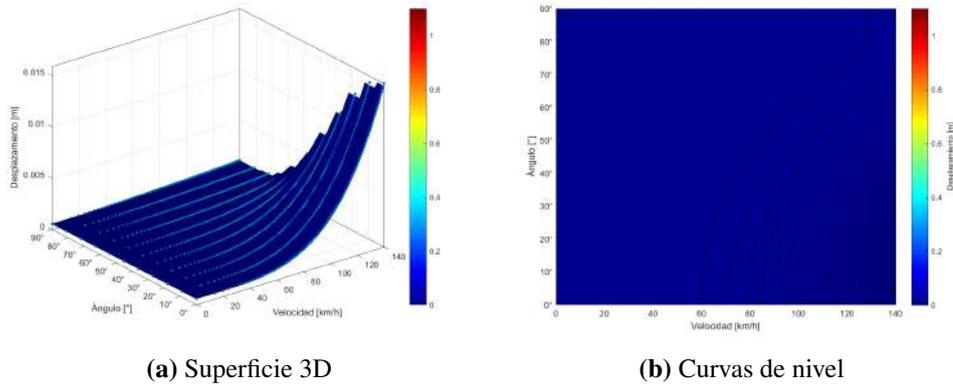


Figura 7.28. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 2 vanos de 300 m.

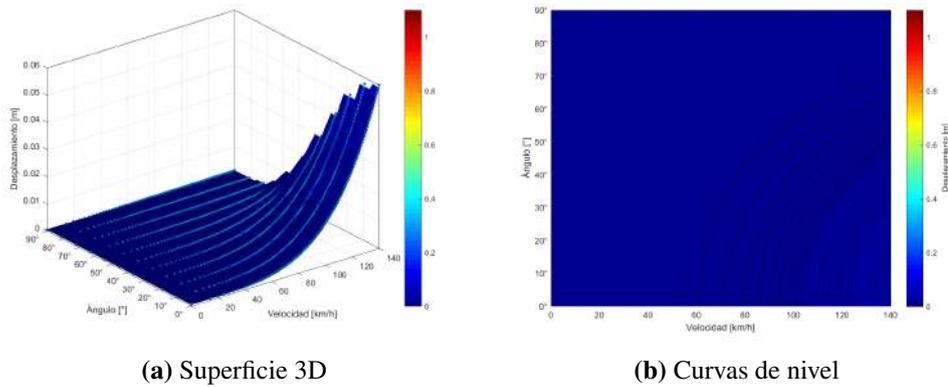


Figura 7.29. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 3 vanos de 300 m.

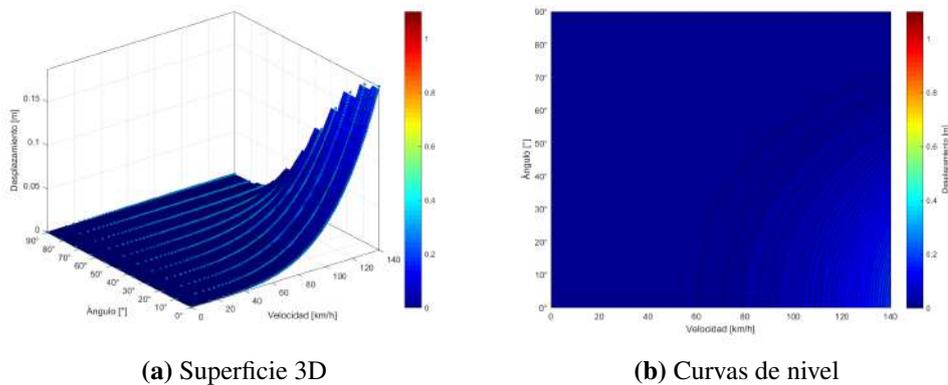


Figura 7.30. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 4 vanos de 300 m.

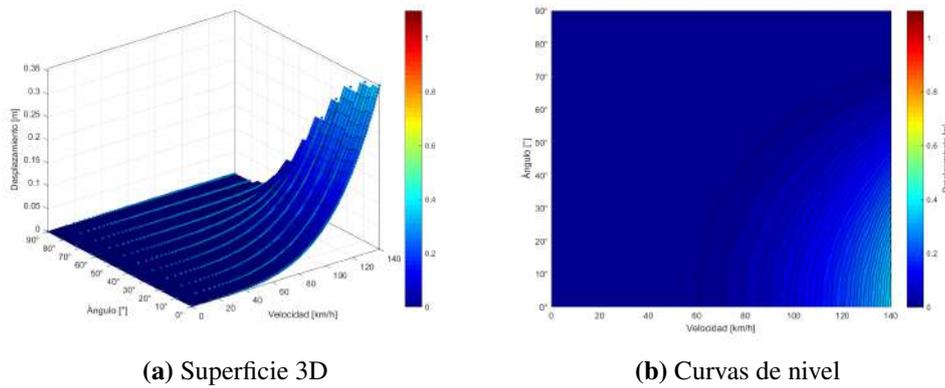


Figura 7.31. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 5 vanos de 300 m.

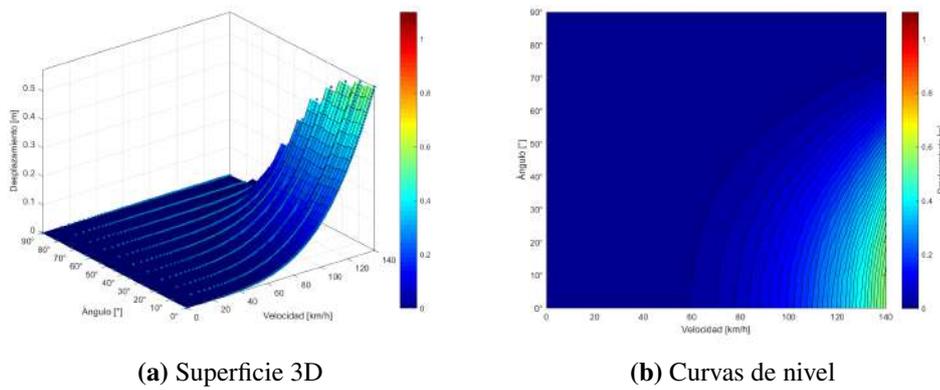


Figura 7.32. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 6 vanos de 300 m.

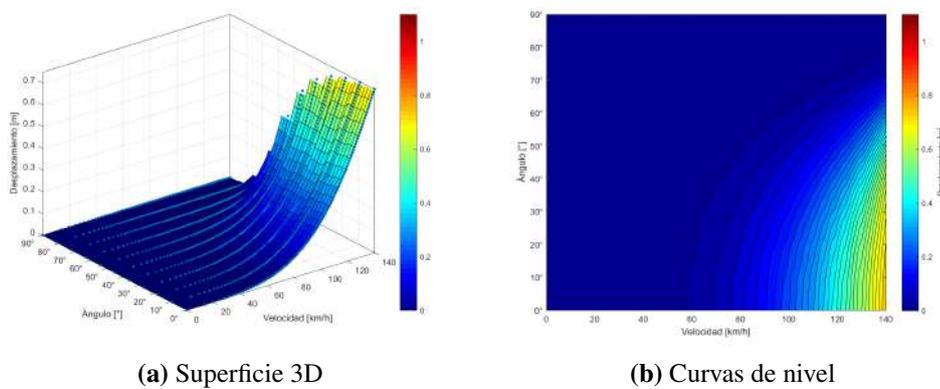


Figura 7.33. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 7 vanos de 300 m.

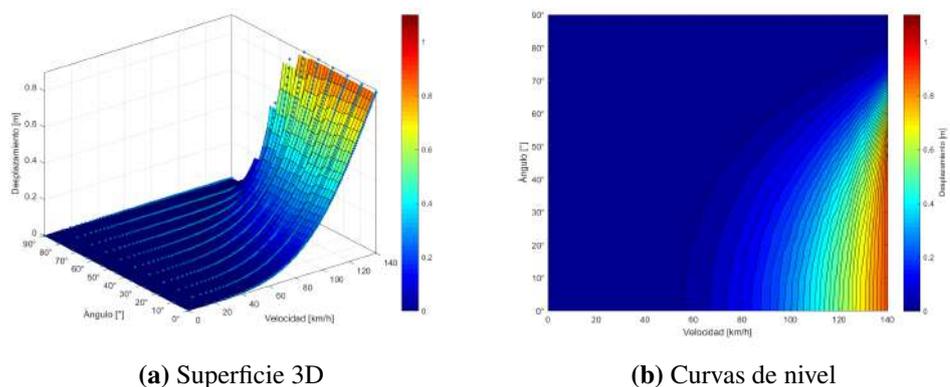


Figura 7.34. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 8 vanos de 300 m.

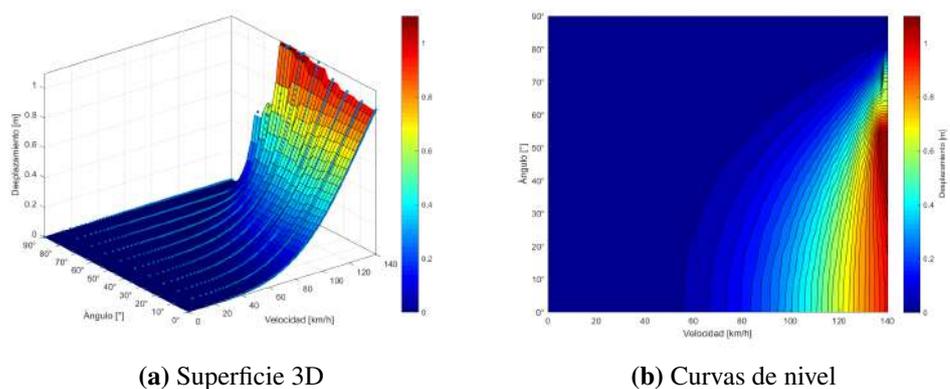


Figura 7.35. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 9 vanos de 300 m.

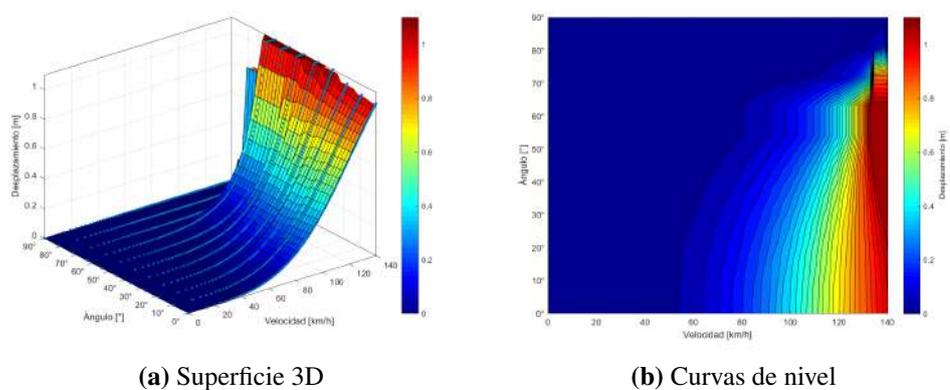
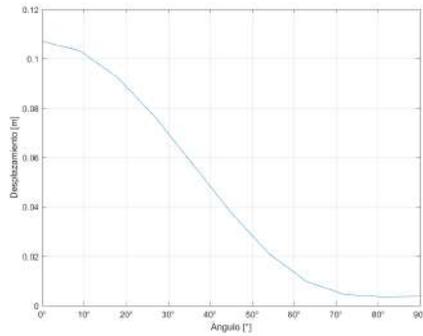
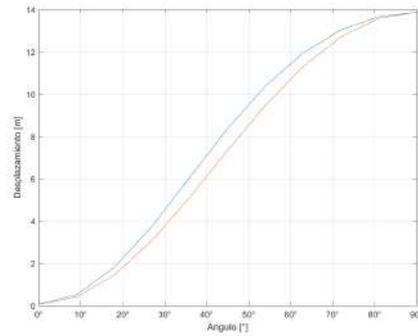


Figura 7.36. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 10 vanos de 300 m.

7.1.2. Vanos de 450 m

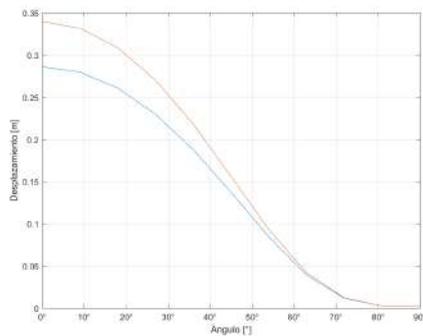


(a) Crucetas

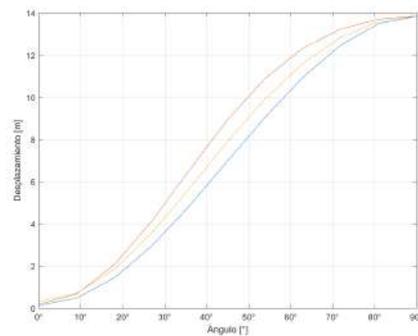


(b) Vanos

Figura 7.37. Curvas de desplazamiento para 2 vanos de 450 m.

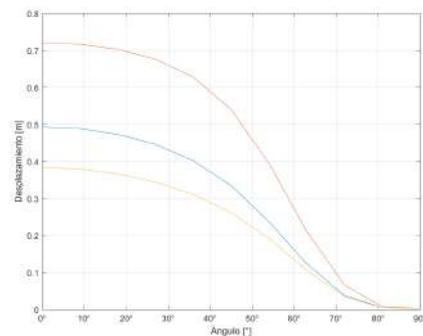


(a) Crucetas

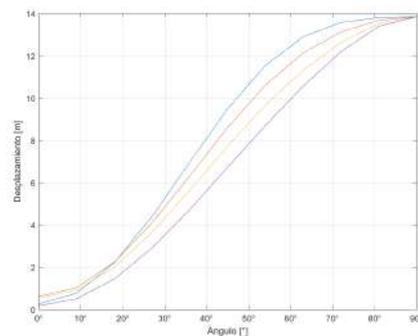


(b) Vanos

Figura 7.38. Curvas de desplazamiento para 3 vanos de 450 m.



(a) Crucetas



(b) Vanos

Figura 7.39. Curvas de desplazamiento para 4 vanos de 450 m.

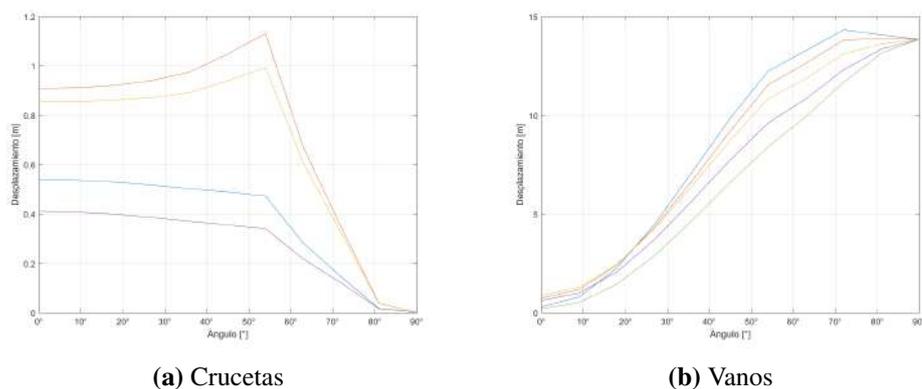


Figura 7.40. Curvas de desplazamiento para 5 vanos de 450 m.

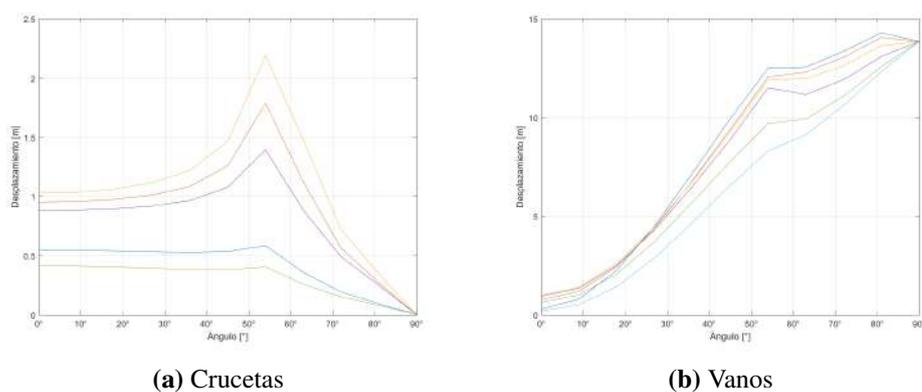


Figura 7.41. Curvas de desplazamiento para 6 vanos de 450 m.

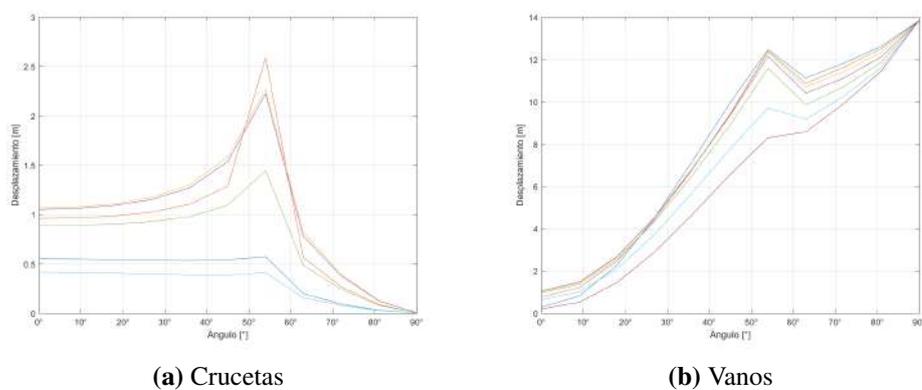
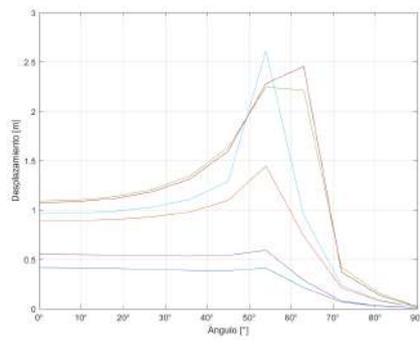
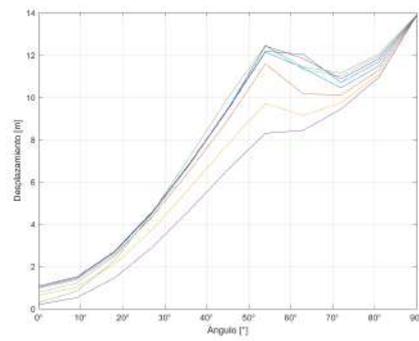


Figura 7.42. Curvas de desplazamiento para 7 vanos de 450 m.

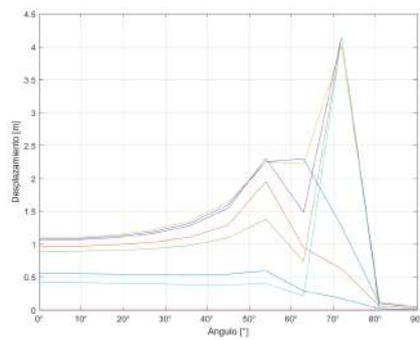


(a) Crucetas

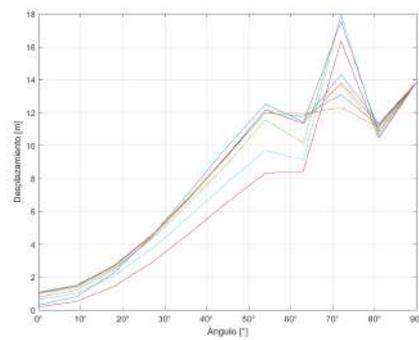


(b) Vanos

Figura 7.43. Curvas de desplazamiento para 8 vanos de 450 m.

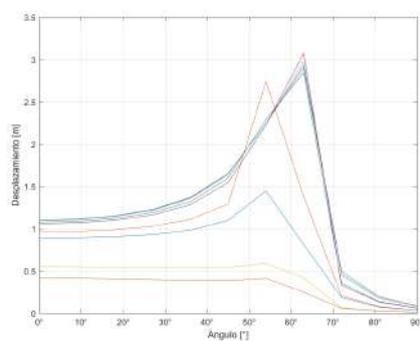


(a) Crucetas

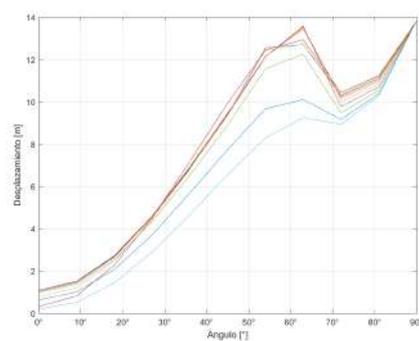


(b) Vanos

Figura 7.44. Curvas de desplazamiento para 9 vanos de 450 m.



(a) Crucetas



(b) Vanos

Figura 7.45. Curvas de desplazamiento para 10 vanos de 450 m.

7.1.2.1. Superficies de estabilidad naturales

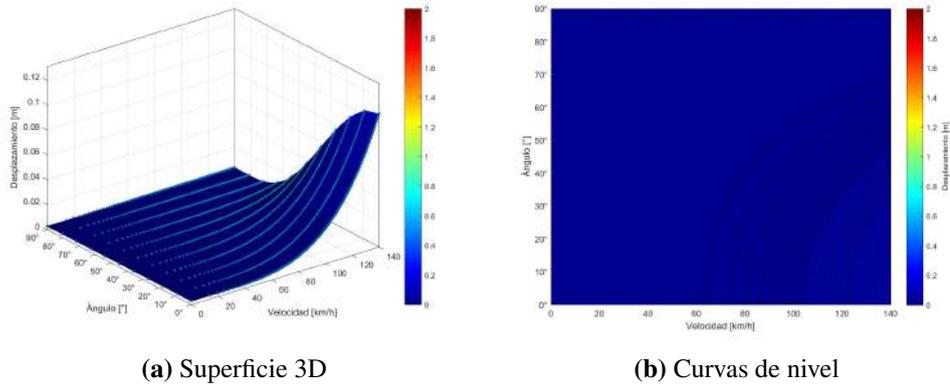


Figura 7.46. Superficie de estabilidad en las crucetas para 2 vanos de 450 m.

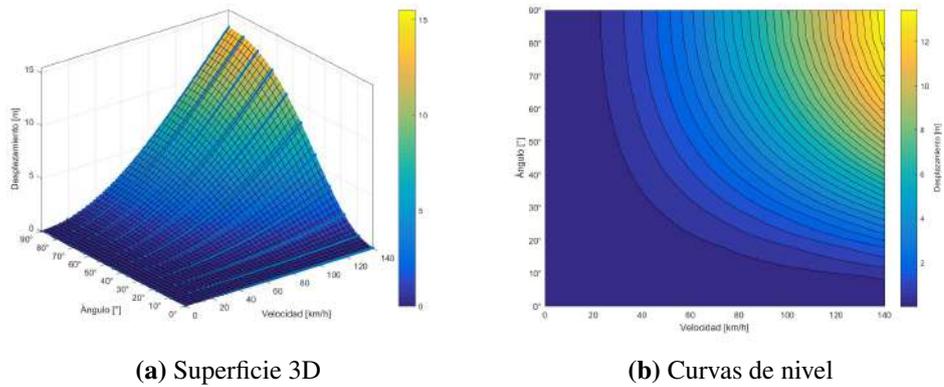


Figura 7.47. Superficie de estabilidad en los vanos para 2 vanos de 450 m.

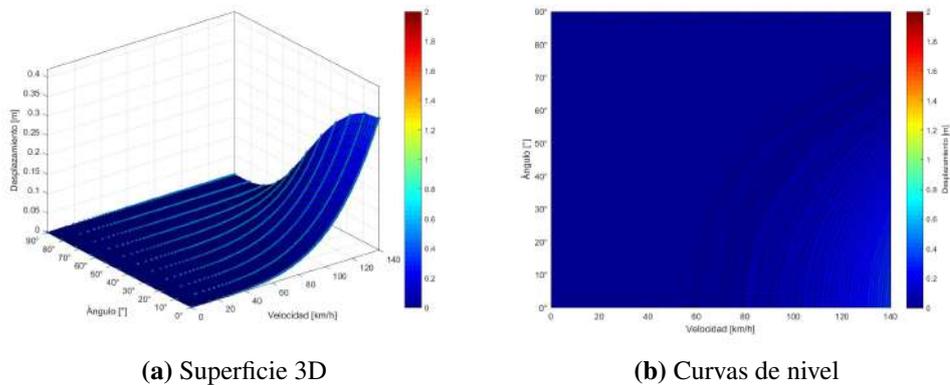


Figura 7.48. Superficie de estabilidad en las crucetas para 3 vanos de 450 m.

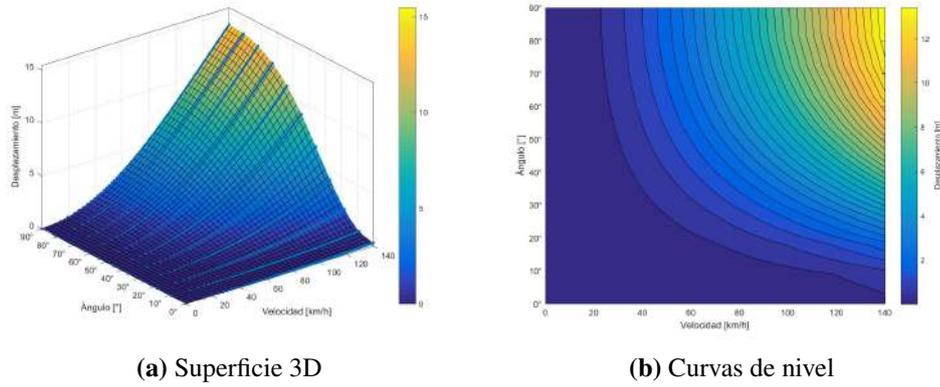


Figura 7.49. Superficie de estabilidad en los vanos para 3 vanos de 450 m.

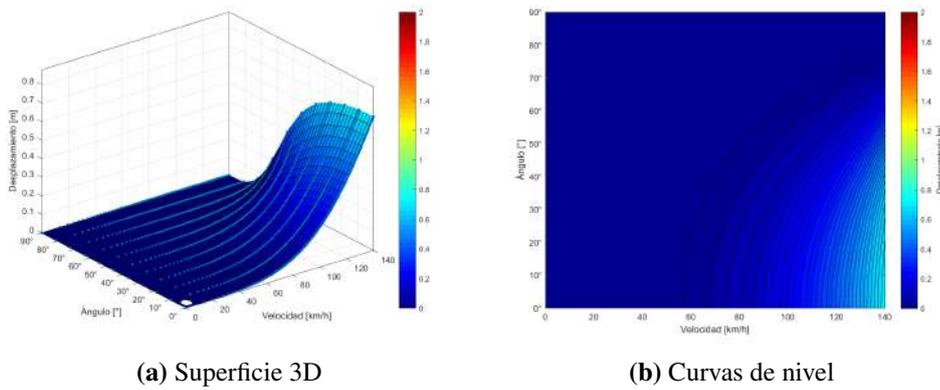


Figura 7.50. Superficie de estabilidad en las crucetas para 4 vanos de 450 m.

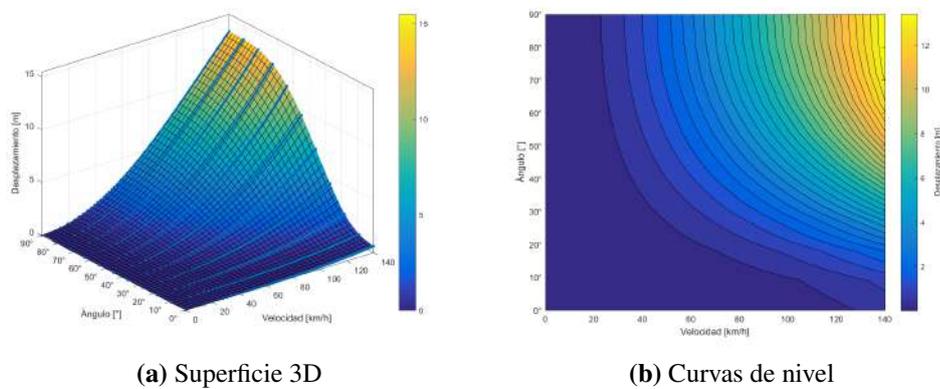


Figura 7.51. Superficie de estabilidad en los vanos para 4 vanos de 450 m.

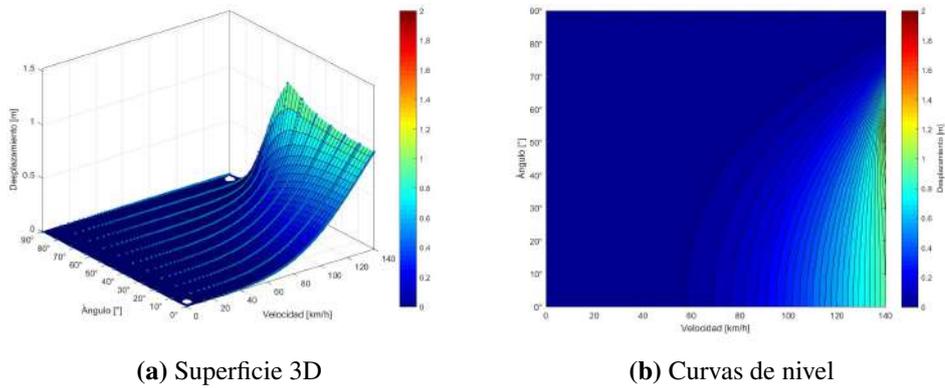


Figura 7.52. Superficie de estabilidad en las crucetas para 5 vanos de 450 m.

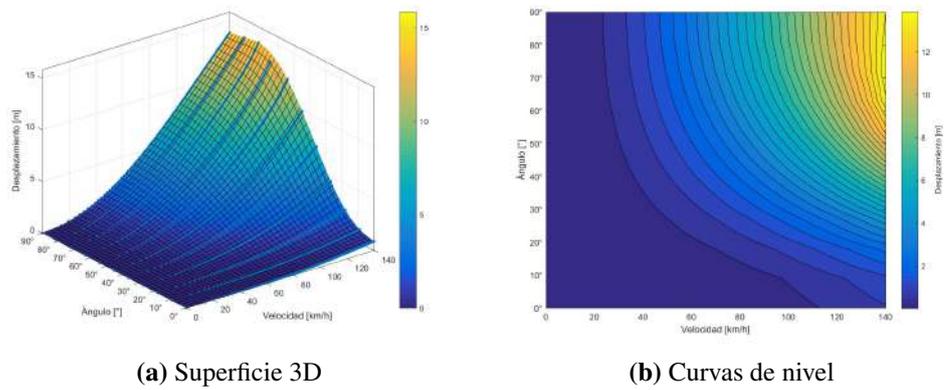


Figura 7.53. Superficie de estabilidad en los vanos para 5 vanos de 450 m.

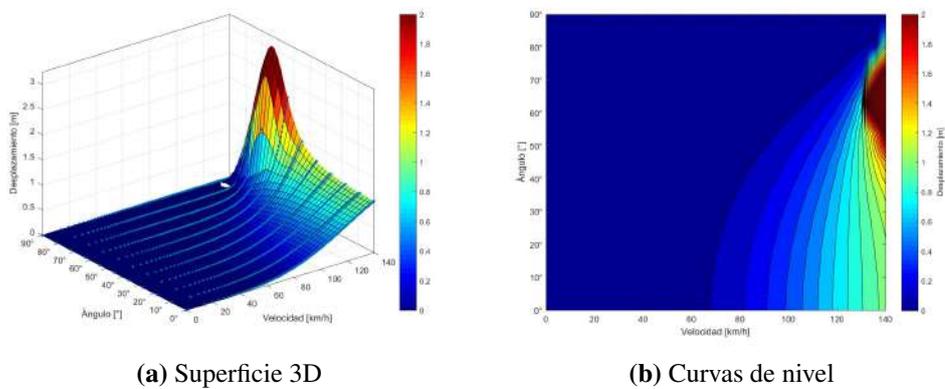


Figura 7.54. Superficie de estabilidad en las crucetas para 6 vanos de 450 m.

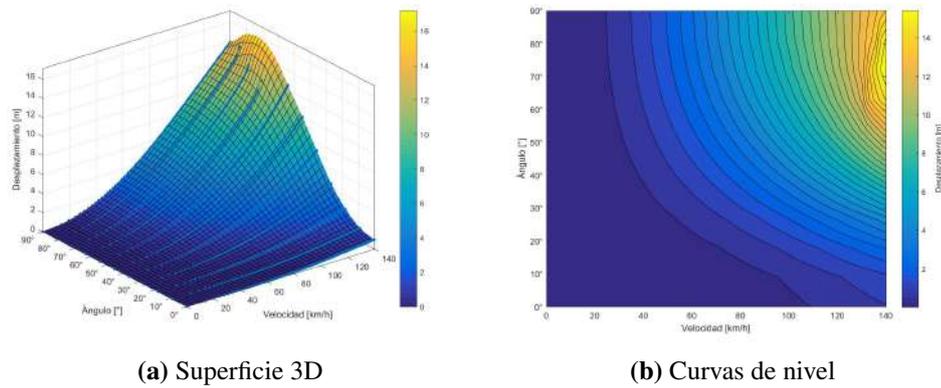


Figura 7.55. Superficie de estabilidad en los vanos para 6 vanos de 450 m.

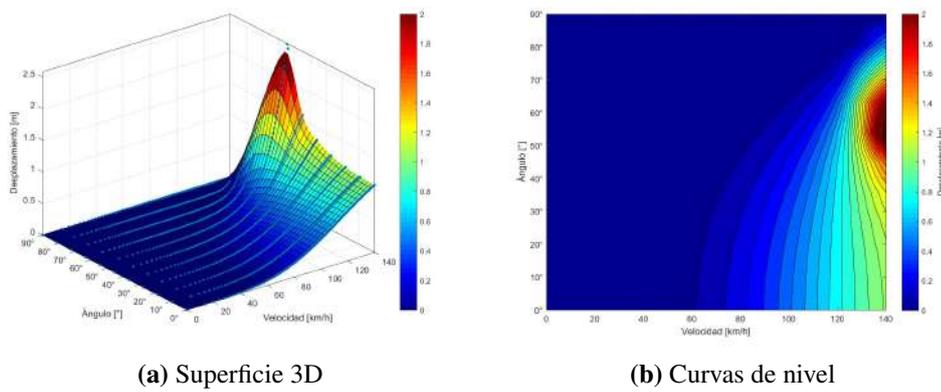


Figura 7.56. Superficie de estabilidad en las crucetas para 7 vanos de 450 m.

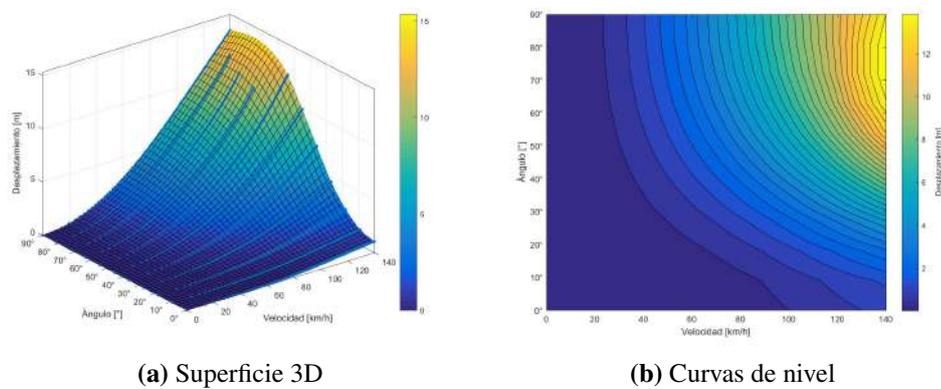


Figura 7.57. Superficie de estabilidad en los vanos para 7 vanos de 450 m.

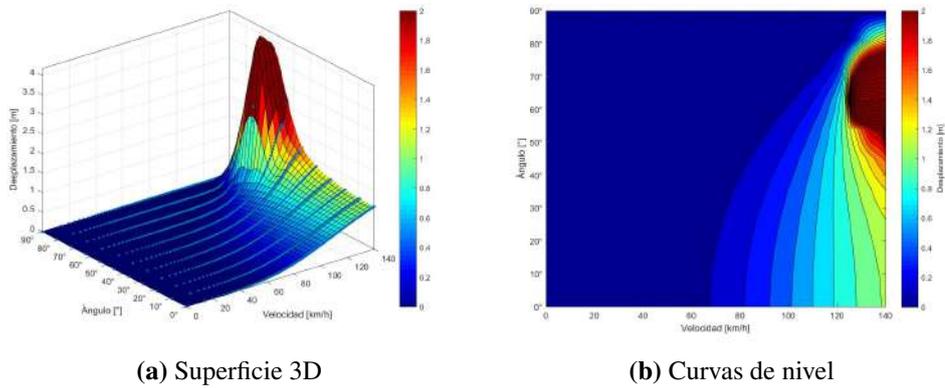


Figura 7.58. Superficie de estabilidad en las crucetas para 8 vanos de 450 m.

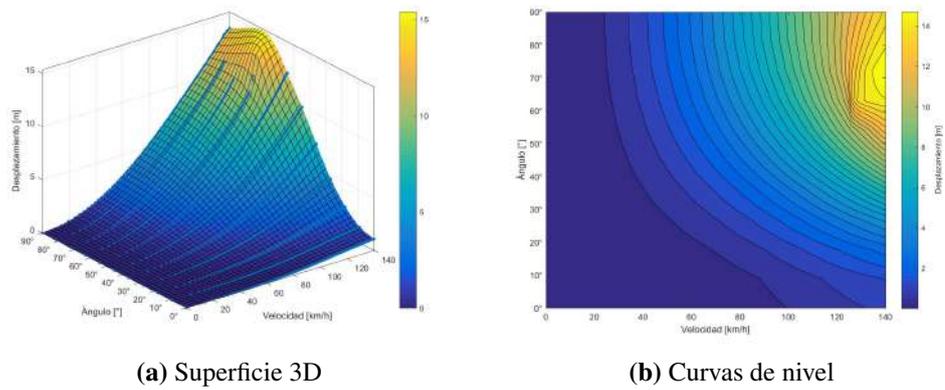


Figura 7.59. Superficie de estabilidad en los vanos para 8 vanos de 450 m.

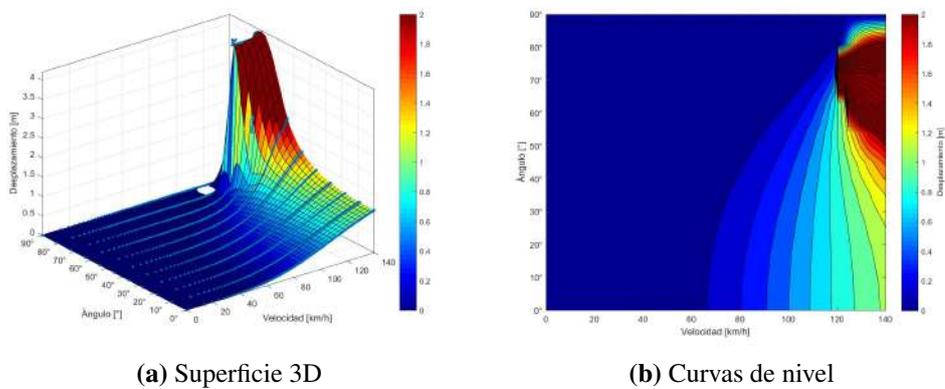


Figura 7.60. Superficie de estabilidad en las crucetas para 9 vanos de 450 m.

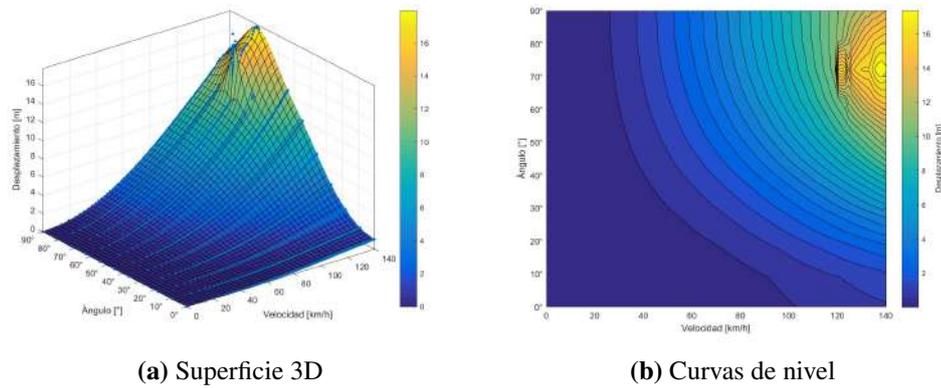


Figura 7.61. Superficie de estabilidad en los vanos para 9 vanos de 450 m.

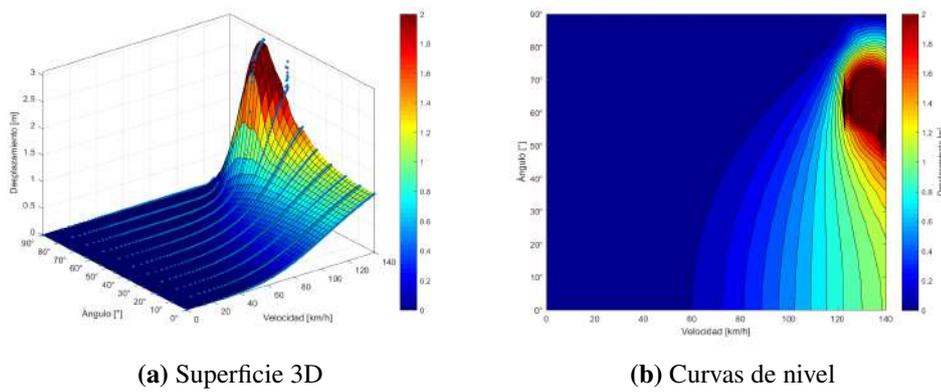


Figura 7.62. Superficie de estabilidad en las crucetas para 10 vanos de 450 m.

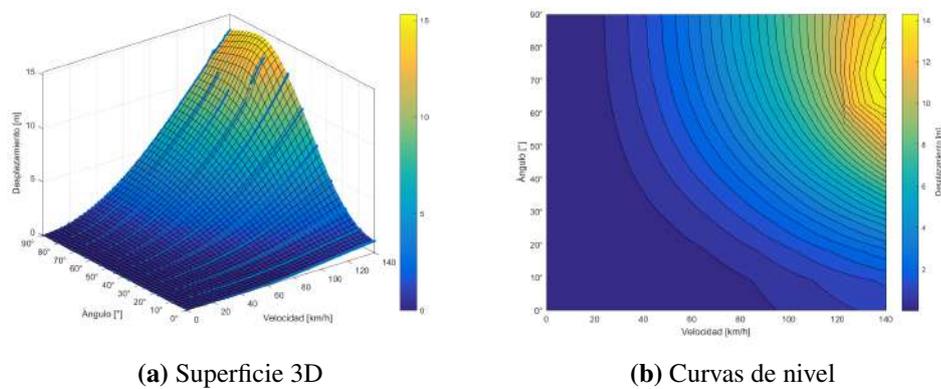


Figura 7.63. Superficie de estabilidad en los vanos para 10 vanos de 450 m.

7.1.2.2. Superficies de estabilidad en meseta

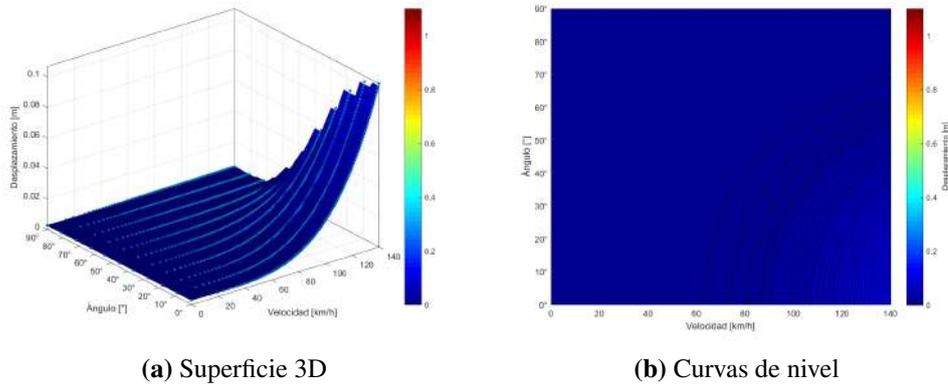


Figura 7.64. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 2 vanos de 450 m.

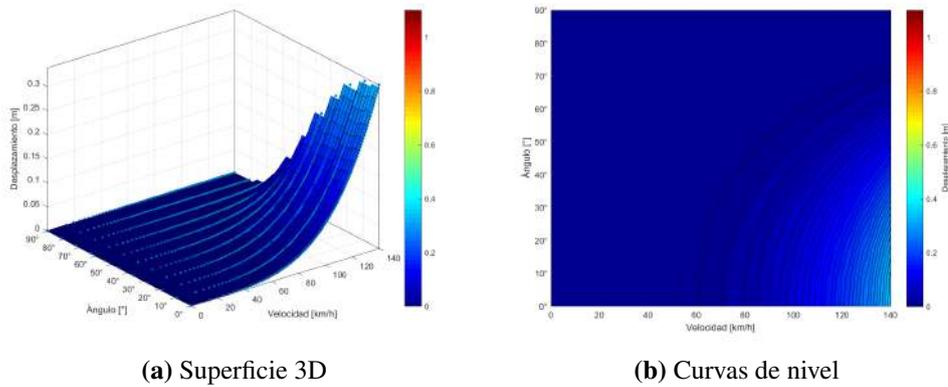


Figura 7.65. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 3 vanos de 450 m.

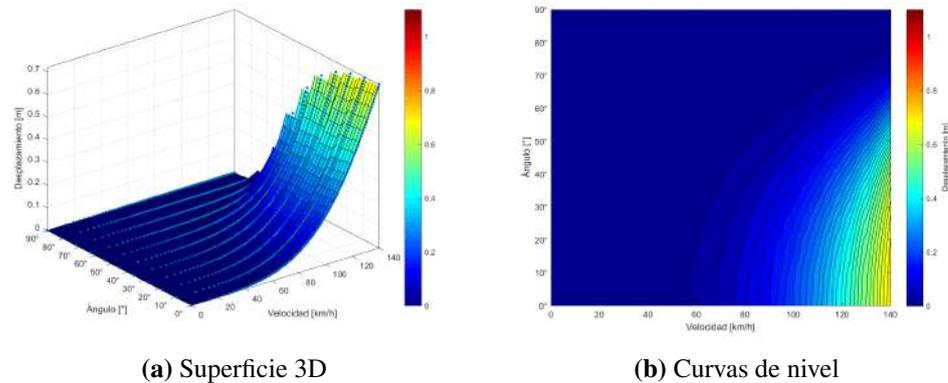


Figura 7.66. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 4 vanos de 450 m.

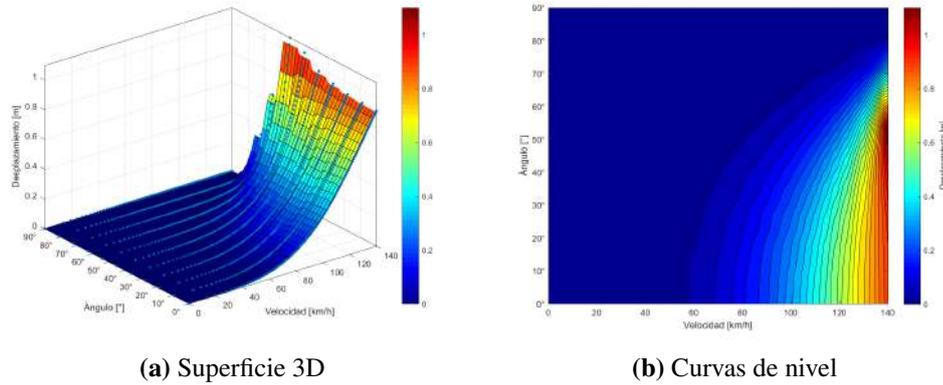


Figura 7.67. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 5 vanos de 450 m.

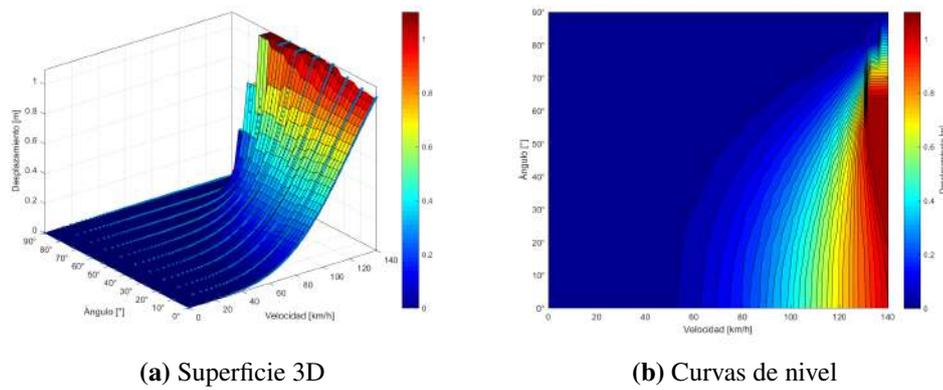


Figura 7.68. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 6 vanos de 450 m.

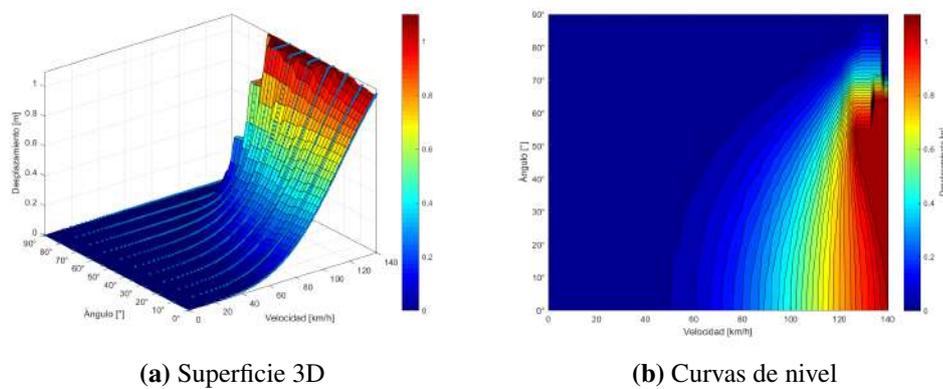


Figura 7.69. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 7 vanos de 450 m.

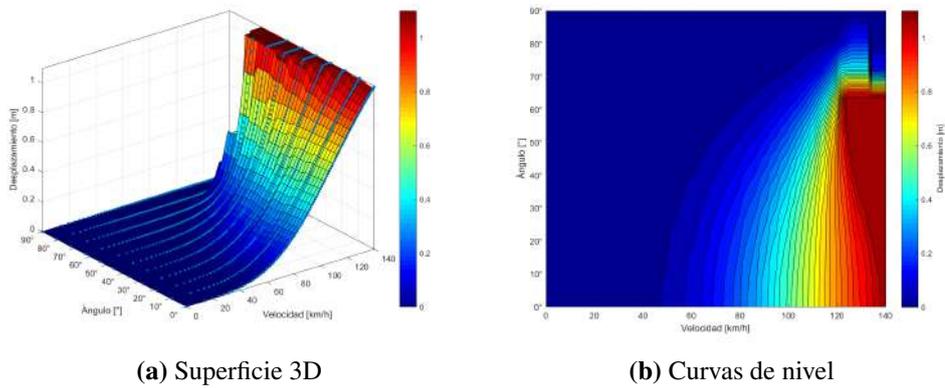


Figura 7.70. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 8 vanos de 450 m.

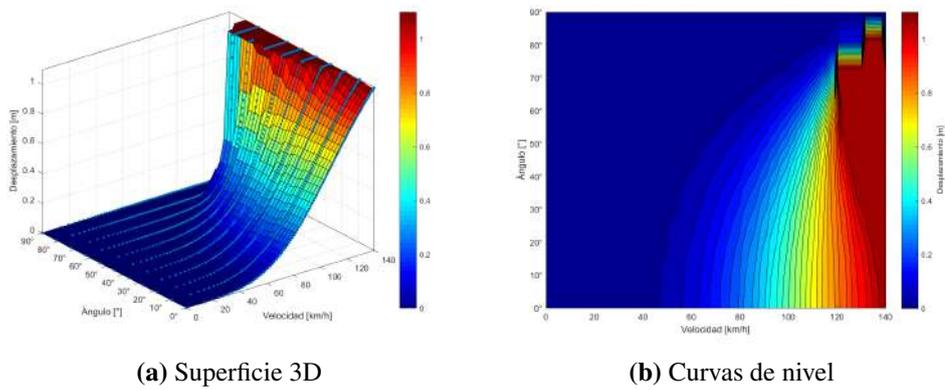


Figura 7.71. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 9 vanos de 450 m.

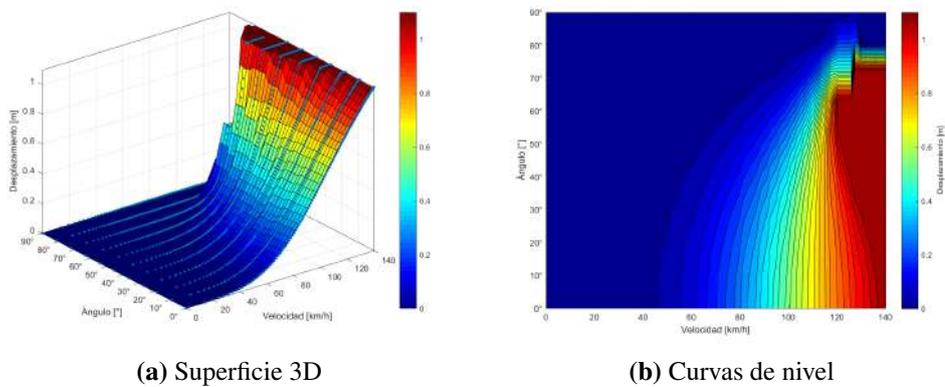


Figura 7.72. Superficie de estabilidad en meseta en las crucetas para 10 vanos de 450 m.

7.1.3. Análisis de los resultados

A partir de los gráficos anteriores se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- **De los resultados de la simulación**

- Las zonas sin datos son más comunes cuanto mayor es el número de vanos o estos son más largos. Esto tiene sentido, puesto que se aumenta la longitud total de cable. Esto implica una mayor fuerza aplicada, un mayor número de nodos, más posibilidades de forma de malla y, en definitiva, un modelo más complejo cuya convergencia es más complicada.
- De igual manera, las zonas sin datos tienden a acumularse en los ángulos próximos a 90° , pero nunca en este valor exacto. Esto se debe a que son los ángulos más críticos para las crucetas. El viento incide más perpendicularmente sobre el cable, creando una mayor fuerza a favor del giro de la cruceta. Además, hay una componente paralela a la línea que permite desestabilizar la posición inicial de la cruceta.

- **De las curvas de desplazamiento**

- A 90° el desplazamiento en las crucetas es nulo. Esto se debe a que el viento incide de manera perpendicular al cable (paralelo a las crucetas) y uniforme, por lo que no se genera ningún momento que haga girar las crucetas.
- Para pocos vanos, el desplazamiento máximo en las crucetas se alcanza con 0° . Esto se debe a que son cantones muy estables en los que ocurre poca acumulación de desplazamientos. Parece que el efecto de reducir la longitud de vano es similar.
- En la mitad de los vanos ocurre lo contrario. Para 90° perciben el viento totalmente perpendicular a su dimensión más grande, por lo que la fuerza es mayor. Debido a esto, el momento respecto a X también aumenta, por lo que el desplazamiento en Z crece. Análogamente, a 0° se alcanza el mínimo.
- Para un número de vanos mayor, aparecen picos en los valores cercanos al ángulo crítico. Estos puntos se deben a que alguna de las crucetas debe compensar con un mayor desplazamiento la acumulación de deformaciones de las demás. Recordemos que el eje de giro de la cruceta no corresponde con el poste, sino que está ligeramente inclinado. Esto permite que la cruceta se desplace en Y al modificar su equilibrio. Esto le permite a las últimas crucetas en el sentido del viento mantener la tensión del vano pese a la acumulación de deformaciones. Los valores extremos corresponden a estas crucetas que se desplazan más por la acumulación de todas las precedentes.
- El desplazamiento de los vanos carece de estos valores anómalos, salvo los producidos por la ausencia de puntos en las velocidades más altas. Un desplazamiento de 2 m en la cruceta no tiene tanto efecto en la mitad del vano frente a sus propios desplazamientos. Tomando de nuevo la aproximación de que el ángulo de la línea desplazada y su posición inicial tiende a 0, el giro en las crucetas se puede considerar nulo a efectos del vano debido a que existen dos apoyos fijos.

- Los desplazamientos no son iguales ni las diferencias entre ellos son las mismas. El único valor para el cual el desplazamiento es el mismo es para 90° . Esto se debe al efecto de acumulación del desplazamiento en el sentido longitudinal del viento, al que se ha aludido anteriormente. Resulta relevante que los desplazamientos de las crucetas parecen dividirse en dos grupo separados por una gran diferencia en el desplazamiento, uno de ellos siempre compuesto por dos crucetas. Tiene sentido que estas sean las correspondientes al primer y último vano, puesto que la existencia de un apoyo en el otro extremo reduce la posibilidad de desplazamiento de las mismas.
- El efecto anterior también ocurre para los vanos, pero solo es apreciable en los cantones con más vanos de la serie de 450 m. De nuevo, la longitud de la línea reduce las diferencias. De hecho, los vanos tienen desplazamientos mucho más parecidos entre sí en relación al desplazamiento total.

- **De las superficies de estabilidad naturales**

- Las observaciones derivadas de las curvas de deformación se aplican también a las superficies de estabilidad.
- La pérdida de estabilidad se produce de manera brusca, tanto en dirección del aumento de velocidad como del aumento de ángulo. Esto se debe a que el equilibrio del sistema inicial es un equilibrio estable. Hasta que se alcanza la fuerza necesaria para sacar el sistema de su posición, el desplazamiento es muy progresivo, ya que está producido sobretodo por el desplazamiento del propio cable. Al desestabilizar el sistema, el desequilibrio de tensiones en el cable crean un momento que provoca el giro brusco de la cruceta.
- El efecto del desplazamiento sobre sí mismo se aprecia también en la mayor densidad de curvas de nivel en las zonas con mayor desplazamiento.
- El efecto del giro se ve acrecentado por el propio desplazamiento. Una vez superado una distancia lo suficientemente grande, cobran más importancia los momentos en la dirección transversal, favoreciendo el giro.
- Las superficies probablemente crezcan conforme lo hacen el ángulo y la velocidad, pero la ausencia de datos hace parecer que existe una zona de desplazamientos menores para valores muy altos. No solo eso, sino que, debido a la existencia de una recta con muy poca deformación para 90° , la interpolación fuerza el paso de la superficie por ese valor.

• De las superficies de estabilidad en meseta

- Se deducen las mismas observaciones básicas que para las superficies de estabilidad naturales.
- Como era de esperar, una vez que se pierde la estabilidad y se entra en la zona de meseta, el desplazamiento se mantiene por encima del valor mínimo de seguridad. La única excepción es el aumento del ángulo hasta valores cercanos a 90° por razones que ya se han explicado.
- Parece que cuanto mayor es el número de vanos, más cerca de 90° se sitúa la meseta de inestabilidad. Esto responde a que con menos vanos las fuerzas longitudinales provocan un aumento de la tensión con momento directo en las crucetas, mientras que con más vanos este desplazamiento se distribuye. A su vez, al tener más longitud de cable, las cargas perpendiculares tienen un efecto mayor sobre el momento de giro, puesto que este no se distribuye.
- Para ángulos más cercanos al ángulo crítico, la velocidad necesaria para romper la distancia de seguridad es menor. Esto se encuentra en consonancia con todo lo anterior, un mayor momento efectivo precisa de menos fuerza aplicada.

7.2. Superficies de estabilidad para viento de 140 km/h

Partiendo de las superficies de estabilidad natural interpoladas, se pueden establecer las superficies de estabilidad correspondientes en función del número de vanos y el ángulo de incidencia. Si se toman dichas superficies para vientos de 140 km/h, se obtienen las gráficas que rigen el diseño de las líneas conforme al RLAT. De nuevo se representan las superficies naturales y en meseta, sirviendo como guía básica del comportamiento de las líneas con crucetas pivotantes y vanos de 300 y 450 m respectivamente.

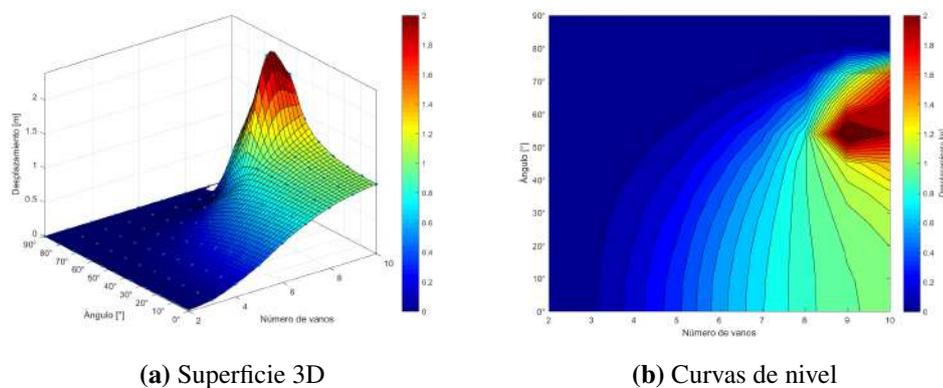


Figura 7.73. Superficie de estabilidad en función del número de vanos en las crucetas para vanos de 300 m y viento estático de 140 km/h.

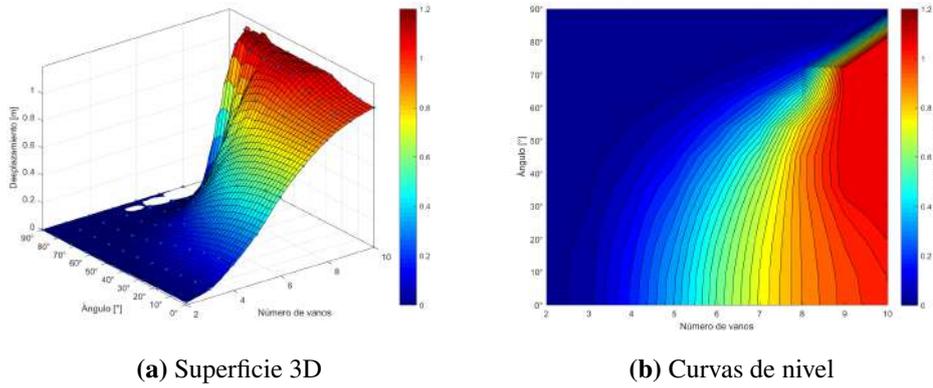


Figura 7.74. Superficie de estabilidad en meseta en función del número de vanos en las crucetas para vanos de 300 m y viento estático de 140 km/h.

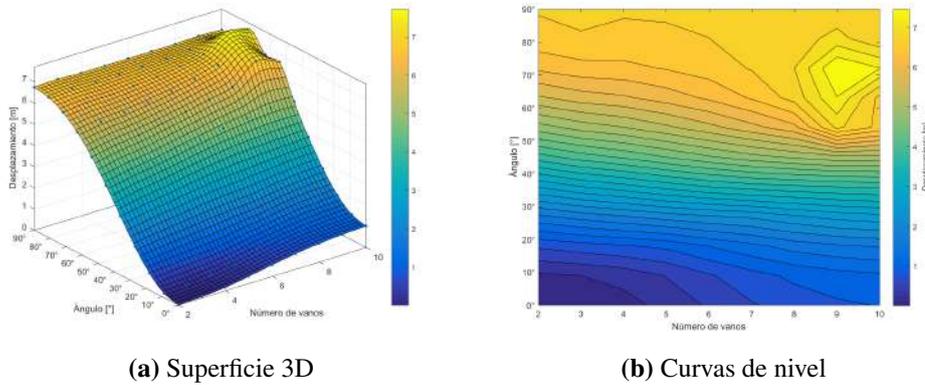


Figura 7.75. Superficie de estabilidad en función del número de vanos en los mismos para vanos de 300 m y viento estático de 140 km/h.

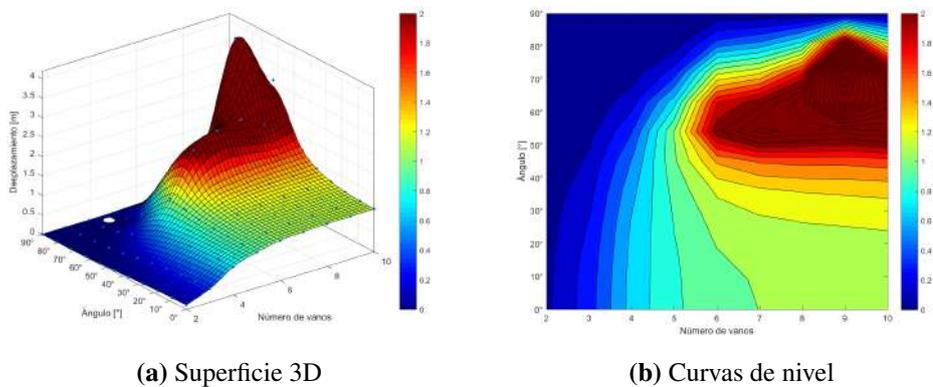


Figura 7.76. Superficie de estabilidad en función del número de vanos en las crucetas para vanos de 450 m y viento estático de 140 km/h.

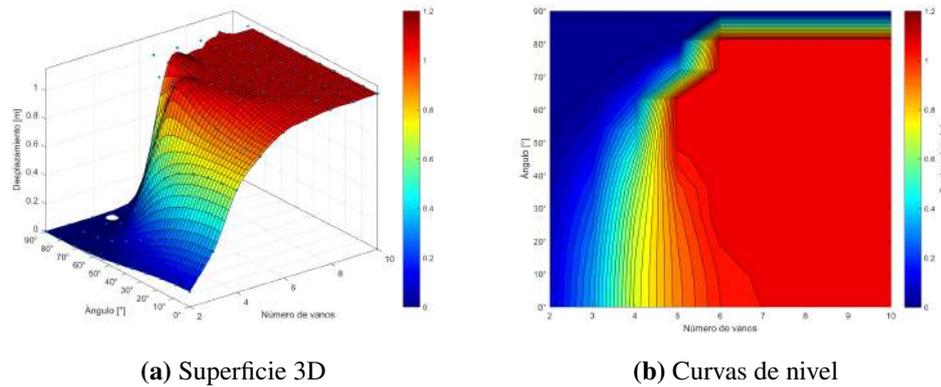


Figura 7.77. Superficie de estabilidad en meseta en función del número de vanos en las crucetas para vanos de 450 m y viento estático de 140 km/h.

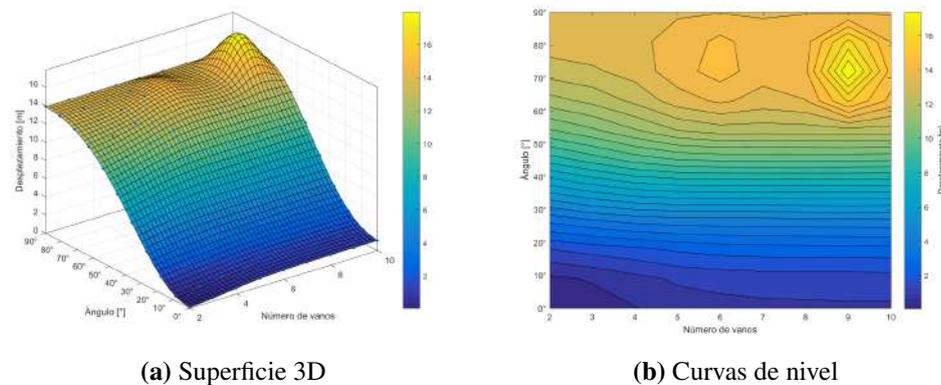
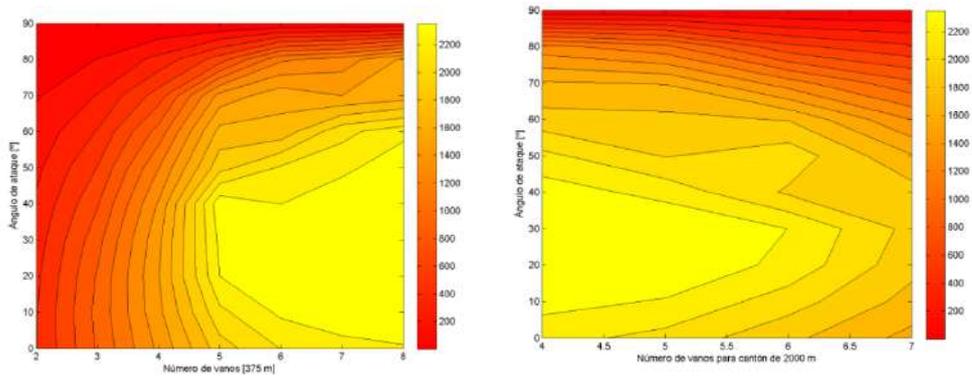


Figura 7.78. Superficie de estabilidad en función del número de vanos en los mismos para vanos de 450 m y viento estático de 140 km/h.

En estos gráficos quedan representadas algunas de las observaciones del apartado anterior. Un mayor número de vanos aumenta claramente la tendencia a la inestabilidad. Hay incluso valores para la serie de 450 m para los cuales la línea es inestable a 140 km/h independientemente del ángulo de incidencia (salvo para 90°). No se debe olvidar que se espera que estos datos sean una cota superior del desplazamiento, como ya se ha explicado a lo largo del proyecto.

Por su parte, los desplazamientos en los vanos se mantienen bastante uniformes al variar el número de vanos. Únicamente se aprecia un cambio en valores para los que se espera el giro de la cruceta, y el consiguiente fallo del modelo.

Para verificar los resultados, se comparan las superficies de estabilidad con las obtenidas [7]. Denotar que dichas superficies son las mesetas de estabilidad equivalentes, donde 2200 mm de desplazamiento absoluto rompen la distancia de seguridad con el poste. Además, la distribución del peso de la cruceta, elemento determinante para las superficies de estabilidad, se toma en el vértice de la misma, mientras que en el caso de este proyecto se distribuye a lo largo de la misma. Por otra parte, la meseta obtenida corresponde a un valor de longitud de vano intermedio a los dos simulados.



(a) Superficie de estabilidad en cruceta para vano de 375 m

(b) Superficies de estabilidad en función del número de vanos para cantón de 2000 m

Figura 7.79. Superficies de estabilidad obtenidas en [7].

Como se puede observar, las formas de las curvas de nivel son similares en ambos casos. La diferencia radica en la posición y el tamaño de estas. Una mayor distribución del peso y las zonas de ausencia de datos explican que las curvas obtenidas reflejen una mayor inestabilidad para ángulos más altos. No obstante, estos resultados tienen sentido, puesto que para ángulos muy cercanos a 90° , el sistema necesitará un momento menor para desestabilizarse. La diferencia en el número de vanos para que el sistema sea inestable es a causa de la diferencia de longitud de vano. Los valores obtenidos en la referencia se encuentran entre los registrados para 300 m y 450 m, por lo que son razonables. En conclusión, las superficies obtenidas no entran en conflicto con los resultados publicados.

Capítulo 8

Obtención y análisis de resultados: viento dinámico

Para la obtención de resultados de los modelos de viento dinámico se trabajará sobre el modelo correspondiente. Para ello se generará en el programa de Matlab la carga de viento real con el valor pico y el tiempo deseado, se introducirán en el modelo y se tomarán los resultados. De nuevo los puntos de interés serán los vértices de las crucetas y la mitad de los vanos.

8.1. Modelo de viento dinámico uniforme

Para el modelo de viento dinámico uniforme se realizarán tres tipos de ensayo. En primer lugar, se elaborará una serie de 30 muestras para un número de vanos determinado, todas con el mismo valor de velocidad pico y ángulo de incidencia. Cada serie de velocidades se generará de manera independiente, lo que permitirá un tratamiento estadístico de la muestra. A continuación, para esta misma línea se mantendrá la velocidad pico y se variará el ángulo de incidencia, con el fin de obtener unas curvas similares a las del capítulo anterior. Por último se repetirá el mismo proceso dejando fijo el ángulo y variando la velocidad pico.

En este caso se operará únicamente sobre el desplazamiento máximo en Z para las crucetas y para los vanos, respectivamente. No se ha considerado necesario evaluar y comparar los datos de todos los puntos, puesto que los más reveladores son los máximos. El resto de valores serán versiones amortiguadas del mismo.

A su vez, se debe elegir la línea de estudio, determinada por su número de vanos y longitud de los mismos. Además, para el primer ensayo es necesario fijar una velocidad pico y un ángulo de incidencia, así como el tiempo de las series. A la vista de las superficies de estabilidad para el caso de viento estático, se decide optar por una longitud de 450 m para poder tener gran variedad de casos. Ya que se espera que estas superficies sean el caso límite del dinámico, una primera aproximación es tomar 6 vanos, pues es el menor número para el cual no se supera la distancia de seguridad en todos los ángulos. Por su parte, se decide tomar como valor pico 140 km/h, para poder comparar los datos con la norma, y 60° de ángulo de incidencia, pues este es aproximadamente el valor de ángulo crítico. Para el tiempo se opta por una serie larga de 5000 s, que permita la toma de gran cantidad de datos sin necesidad de realizar muchas simulaciones. La Figura 8.1 representa el resultado de esta simulación.

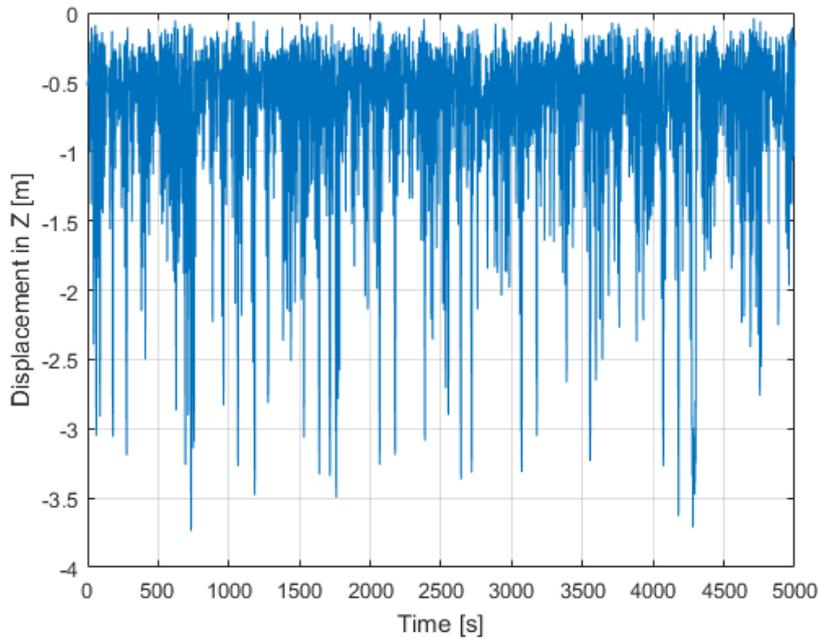


Figura 8.1. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 6 vanos de 450 m con serie de 5000 s de viento dinámico de 140 km/h de valor pico e incidencia de 60°

La gráfica obtenida refleja una gran cantidad de datos que rompen la distancia de seguridad, así como mucha inestabilidad. Esto muestra que en condiciones de viento dinámico, esta línea se comportaría así, pero no permite realizar un análisis exhaustivo por la gran cantidad de valores extremos y *outliers*. Se decide reducir el número de vanos a 5 y la velocidad pico a 132 km/h.

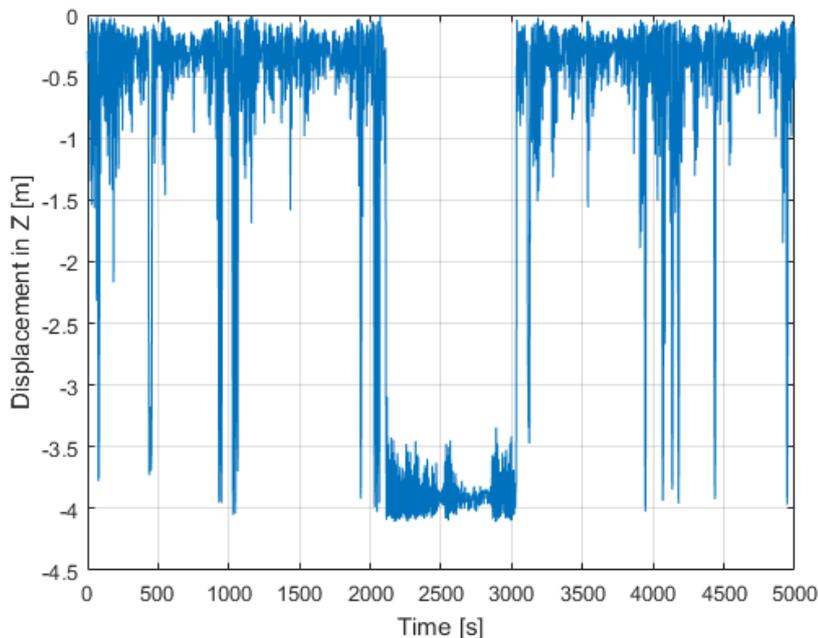


Figura 8.2. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 5 vanos de 450 m con serie de 5000 s de viento dinámico de 132 km/h de valor pico e incidencia de 60°

Se reduce la inestabilidad y los valores anómalos, pero siguen apareciendo giros de cruceta que llevan el sistema a posiciones irreales. Esto también ocurría en algunas simulaciones de 6 vanos. Para poder controlarlos se decide reducir el tiempo a series más cortas de 200 s.

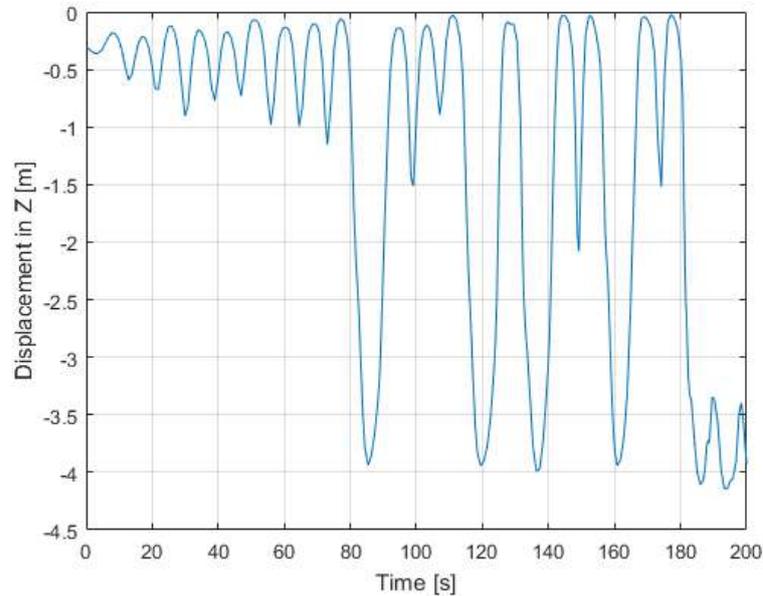


Figura 8.3. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 5 vanos de 450 m con serie de 200 s de viento dinámico de 132 km/h de valor pico e incidencia de 60°

En las series cortas siguen apareciendo giros de cruceta y *outliers*, por lo que se reduce el número de vanos aún más. Esto permite aumentar la velocidad pico a 140 km/h de nuevo. El resultado final se ejemplifica en la Figura 8.4.

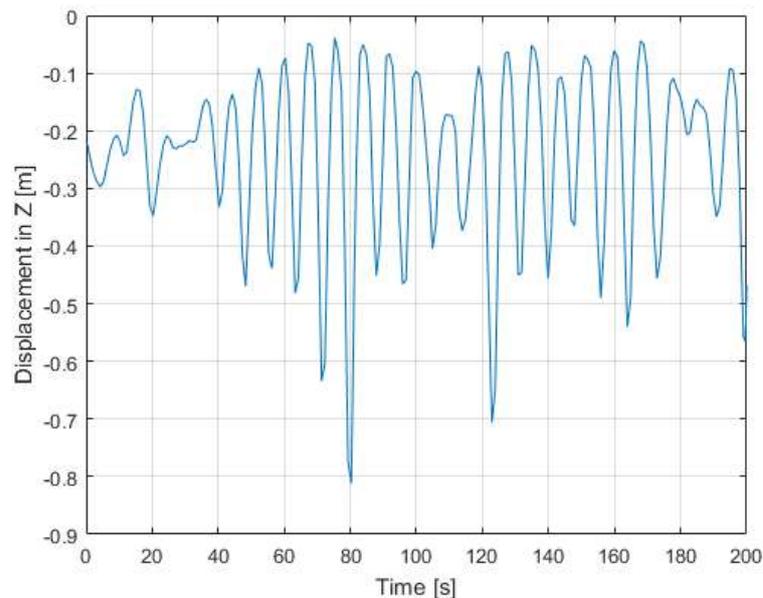


Figura 8.4. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con serie de 200 s de viento dinámico de 140 km/h de valor pico e incidencia de 60°

8.1.1. Curvas de desplazamientos

A continuación se muestran los resultados de realizar 30 simulaciones de 200 s con velocidad pico de 140 km/h y 60° de ángulo de incidencia para una línea de 4 vanos de 450 m. Se han representado con un diagrama de caja y bigotes, marcando las deformaciones máximas.

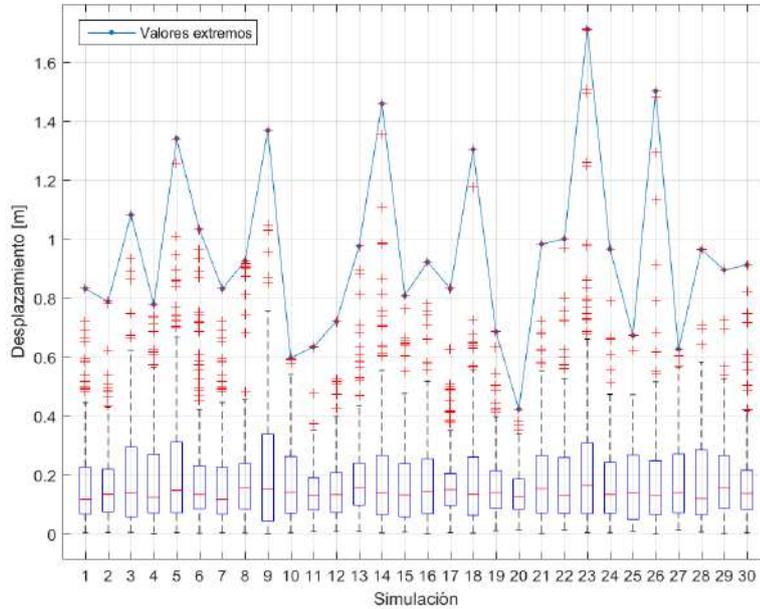


Figura 8.5. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h a 60°

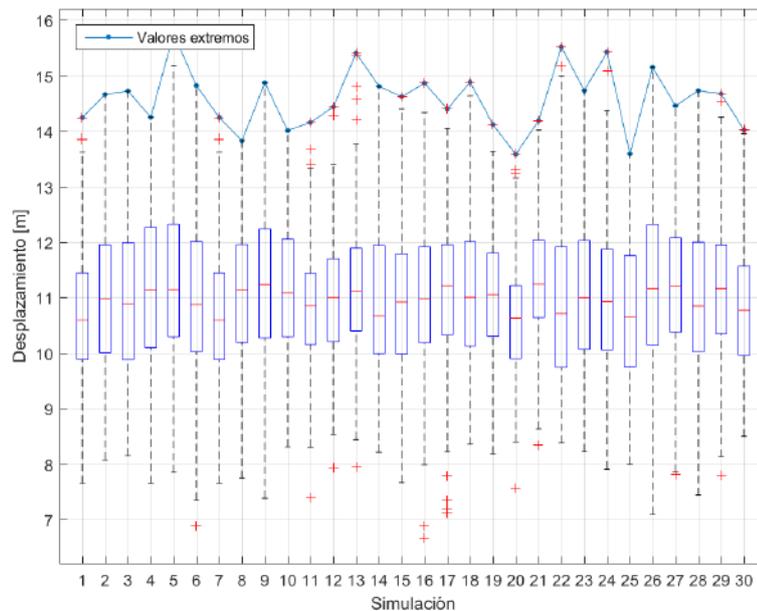


Figura 8.6. Desplazamientos máximos en Z de los vanos para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h a 60°

Como se puede observar, los desplazamientos medios están muy por debajo de la distancia de seguridad. Esto ya se esperaba, puesto que las gráficas del viento estático marcan valores muy similares. No obstante, son los extremos los que representan un problema a la hora de diseñar las líneas. No hay que olvidar el hecho de que este modelo sigue siendo una cota superior, puesto que no se tiene en cuenta el rozamiento mecánico ni la distribución de la carga de viento. Para los vanos las gráficas presentan valores menos extremos. Sin embargo, si se compara con las superficies de estabilidad se observa que los máximos también superan las predicciones del estático.

Este efecto es similar al “efecto galope” que se puede producir en las líneas de transporte eléctrico. Se traduce en una vibración de alta amplitud y baja frecuencia en la línea y es producida por la acción del viento. En el caso de viento distribuido, que será el que se dé en la realidad, aparecerán perturbaciones de los distintos vanos que romperán la resonancia. Además, las oscilaciones de la línea en el modelo de viento dinámico uniforme se deben también a la gran inercia que compone la línea. Las altas velocidades se corresponden con grandes desviaciones típicas y debido a ello aparecen cambios repentinos de velocidad. Estas son las diferencias de carga que provocan los extremos.

Con el objetivo de comprobar el comportamiento del modelo con un sistema menos estable, se ha realizado el mismo ensayo para 5 vanos de 450 m. Los resultados se muestran en la Figura 8.7. Como se puede observar, el giro de las crucetas hace imposible la obtención de resultados coherentes. Se concluye que en el caso de que se produzca el giro de las crucetas, se rompe la distancia de seguridad, no siendo concluyente la respuesta dinámica.

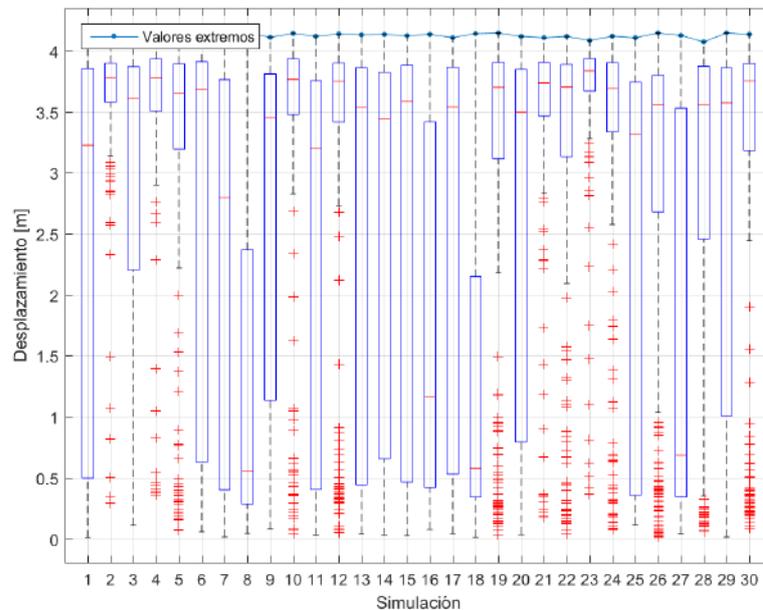


Figura 8.7. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h a 60°

8.1.2. Análisis estadístico

Para analizar correctamente los datos del apartado anterior es necesario realizar un tratamiento estadístico de los mismos. En este caso se analizará el desplazamiento de las crucetas, pues es el de mayor interés al ser el más crítico. El primer paso es realizar la distribución de probabilidad de los datos. En la Figura 8.8 se puede ver el histograma de dicha distribución, y en la Figura 8.9 su probabilidad acumulada.

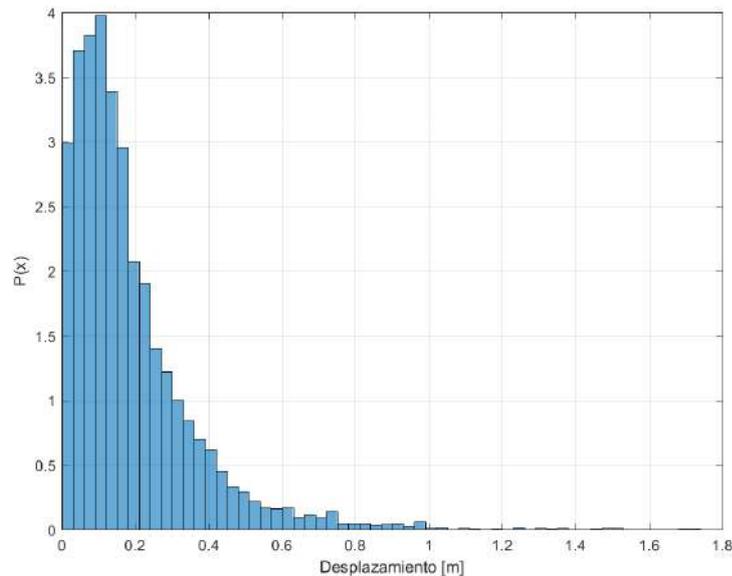


Figura 8.8. Distribución de probabilidad de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s

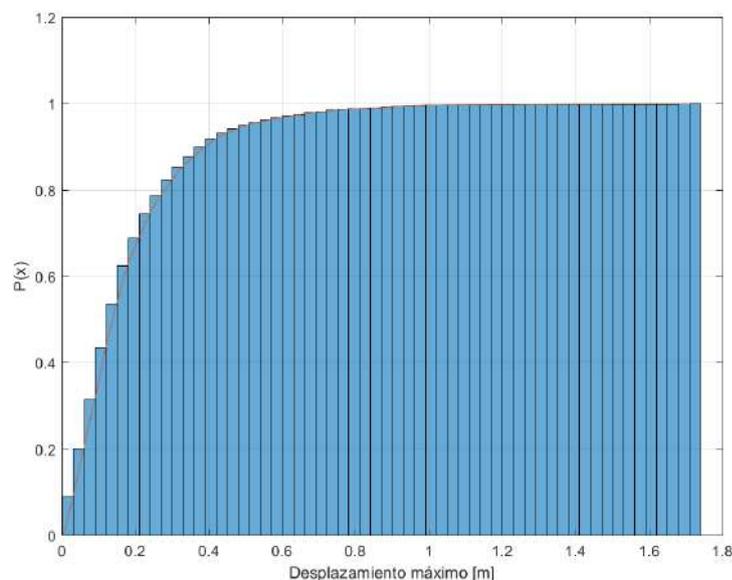


Figura 8.9. Probabilidad acumulada de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s

Resulta destacable el hecho de que la mayor parte de los valores se sitúa por debajo de los 0.2 m, valor aproximado para el modelo de viento estático. Concretamente, un 67 % de los datos recogidos están por debajo de este valor. De hecho, únicamente el 0.27 % de los valores superan los 1.1 m de desplazamiento necesarios para romper la distancia de seguridad. Esto provoca una distribución de probabilidad muy densa en los valores más bajos, con una cola muy larga formada por los *outliers*. Si analizamos el rango, se observa que solo en la primera mitad se encuentran más del 99 % de los datos registrados. Las 3σ de seguridad, típicas en la industria, se alcanzan justamente antes de 1.1 m de desplazamiento. A continuación se representan las mismas gráficas para la distribución de máximos.

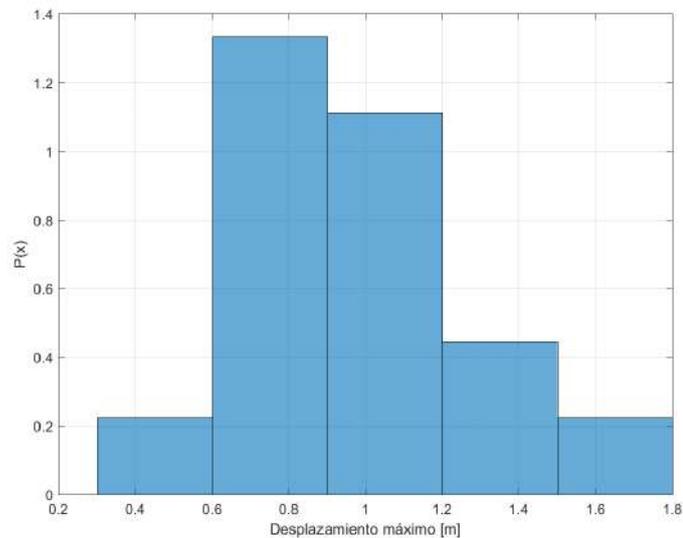


Figura 8.10. Distribución de probabilidad de los picos de desplazamiento máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s

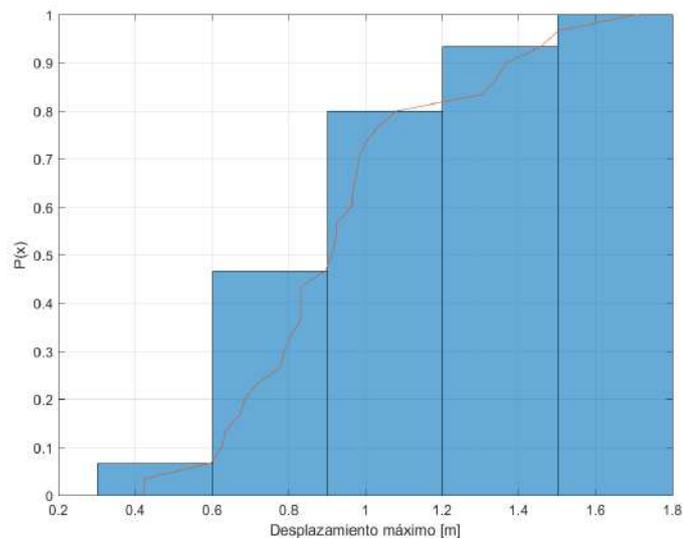


Figura 8.11. Probabilidad acumulada de los picos de desplazamiento máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s

Estas gráficas muestran una mayor dispersión. Esto es debido a que el pico máximo depende mucho de la naturaleza de la serie de viento en particular. Se puede ver que los máximos superan la distancia de seguridad en el último 20 % de la función de probabilidad acumulada. Esto demuestra, una vez más, que los datos con valores extremos son la excepción, y probablemente sean compensados si se tienen en cuenta el resto de variables del modelo. En cualquier caso, queda comprobado que el diseño en estático no es suficiente.

8.1.3. Variación del ángulo del viento

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para el modelo de viento dinámico uniforme en el que se ha fijado la velocidad pico a 140 km/h y se ha ido variando el ángulo. Se ha optado por realizar una única simulación de 1000 s por cada ángulo, de la cual se han obtenido otros tantos datos. Algunas de las series resultantes se puede observar en la Figura 8.12.

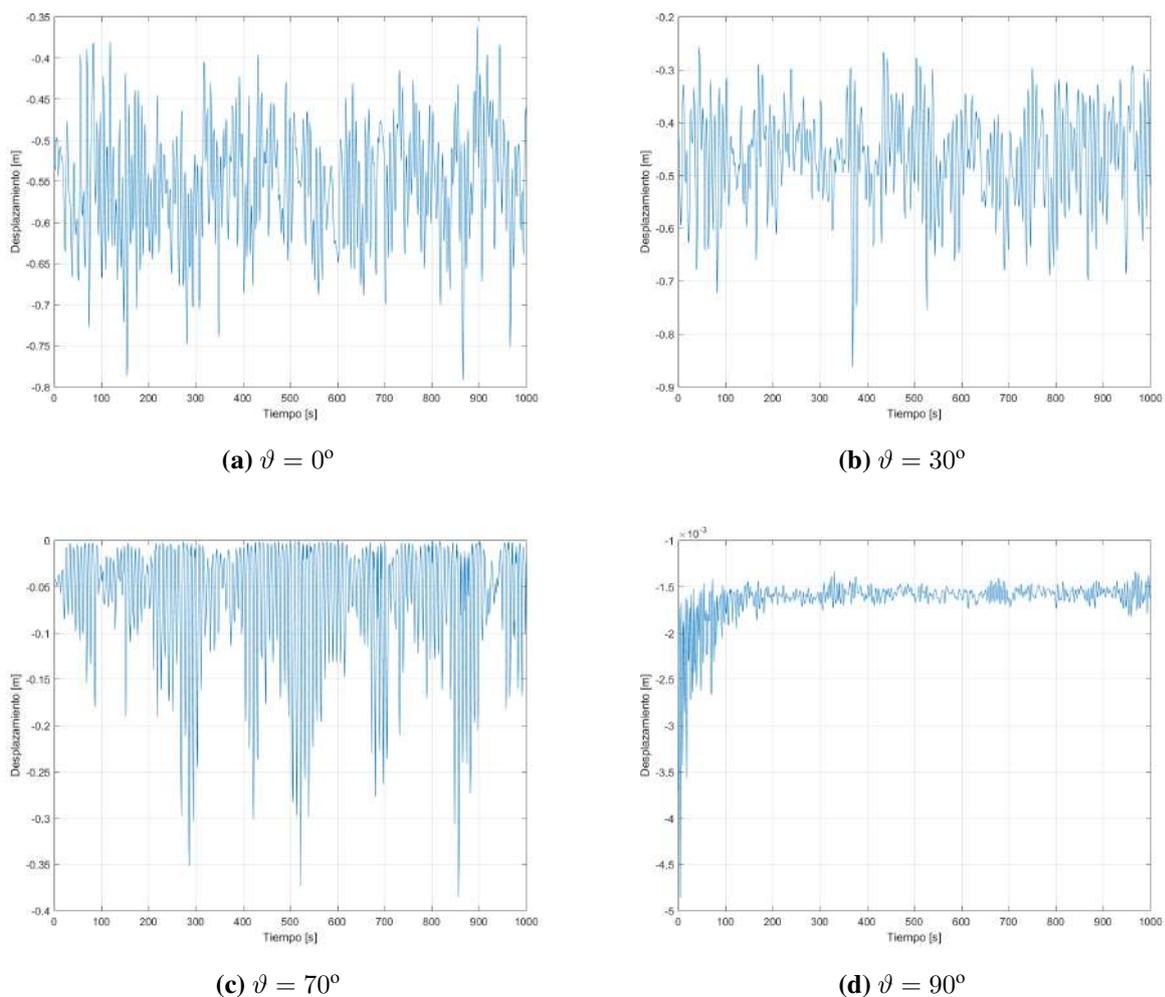


Figura 8.12. Series de desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h variando el ángulo de incidencia

El comportamiento recogido es muy similar al del modelo estático. Los valores medios parecen ser menores, y la desviación típica y el rango aumentan conforme lo hace el ángulo. Especialmente destacable es el caso para $\vartheta = 90^\circ$. Los valores de desplazamiento están en el orden de los milímetros, por lo que la estabilidad de este ángulo no se limita al modelo estático. No obstante, para simulaciones con más vanos el sistema se volvía inestable para 90° , lo que sugiere que la meseta de inestabilidad puede completarse como la continuación natural de la obtenida para el modelo estático.

Al representar las curvas ángulo-desplazamiento, se obtiene la Figura 8.13. Las barras de error indican una desviación respecto a la media. Se ha representado el valor obtenido en el modelo estático para permitir su comparación. Como era de esperar, la curva de la respuesta al viento dinámico uniforme está siempre por debajo de la del modelo estático.

La representación en diagrama de caja y bigotes de la Figura 8.14 muestra información adicional.

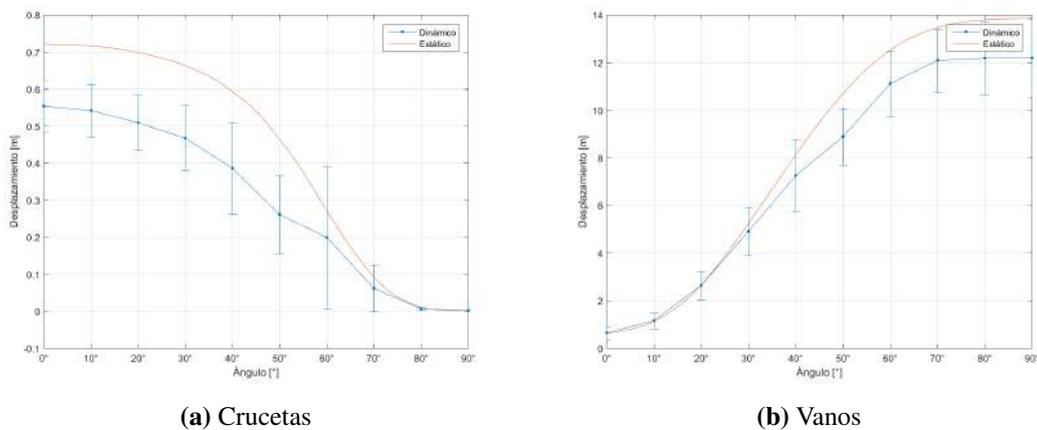


Figura 8.13. Desplazamiento máximo en Z para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h variando el ángulo

Se observa que para todos los ángulos aparece valores extremos superiores a los del modelo estático. A su vez, el número de estos valores parece aumentar con el ángulo. Esto concuerda con el razonamiento expuesto en el apartado anterior.

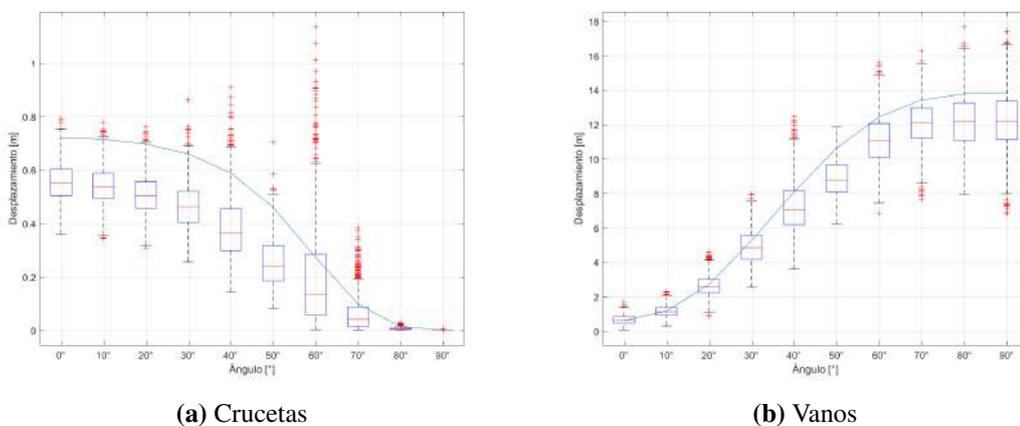


Figura 8.14. Diagramas de caja y bigotes del desplazamiento máximo en Z para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h variando el ángulo

8.1.4. Variación de la velocidad del viento

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para el modelo de viento dinámico uniforme en el que se ha fijado el ángulo de incidencia a 60° y se ha ido variando la velocidad pico. Se ha optado por realizar una única simulación de 1000 s por cada ángulo, de la cual se han obtenido otros tantos datos. Algunas de las series resultantes se pueden observar en la Figura 8.12.

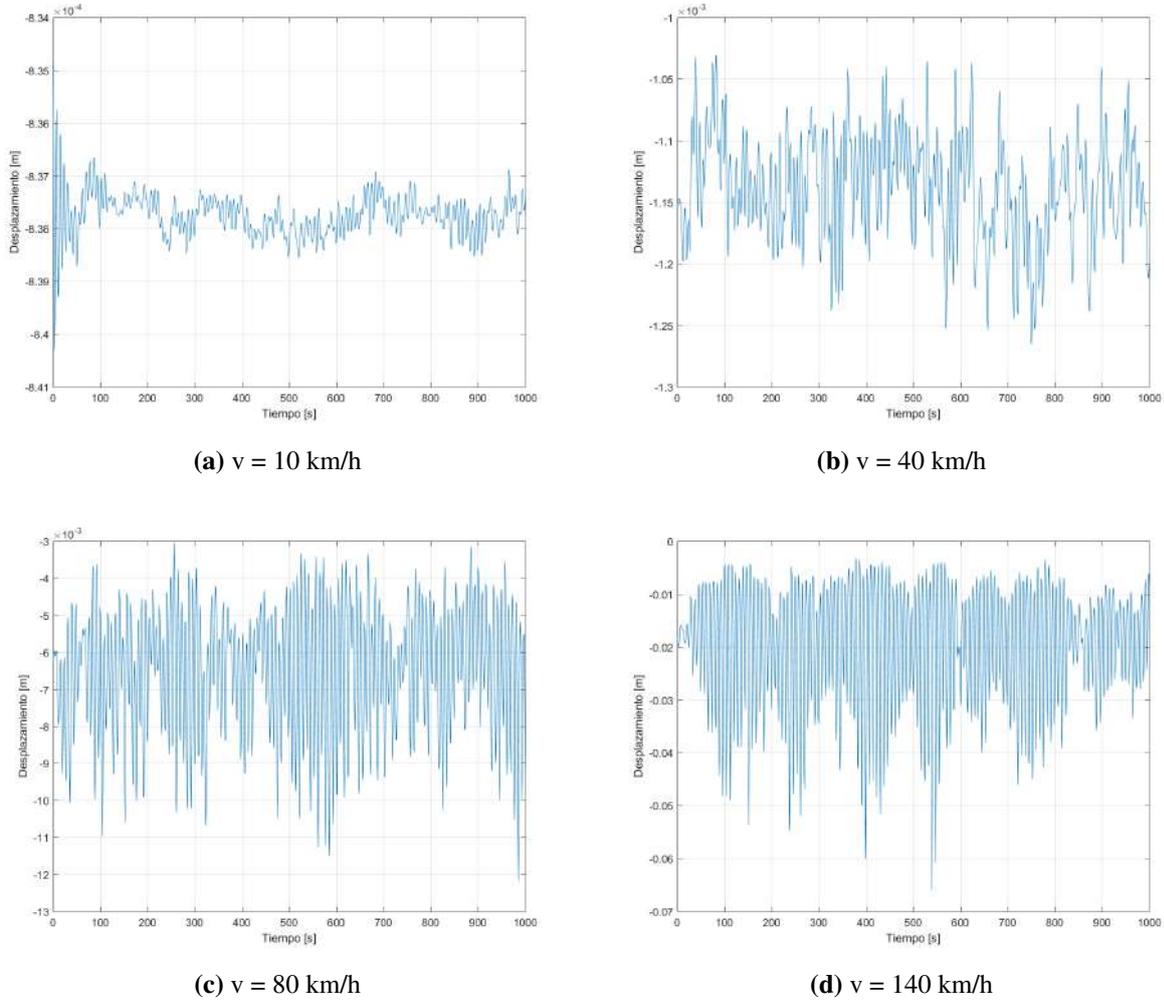


Figura 8.15. Series de desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento a 60° variando la velocidad pico

Repetiendo el proceso realizado para la sección anterior, se representan las curvas velocidad-desplazamiento. Nuevamente, los valores medios se encuentran siempre por debajo del estático. No obstante, se aprecia claramente el incremento en la desviación típica, que en las velocidades más altas genera la de que situación de los extremos de las barras de error superen de largo los máximos del estático. Este efecto es apreciable en las crucetas, siendo menos importante en los vanos. Además, la diferencia entre el valor medio del estático y del dinámico aumenta con la velocidad.

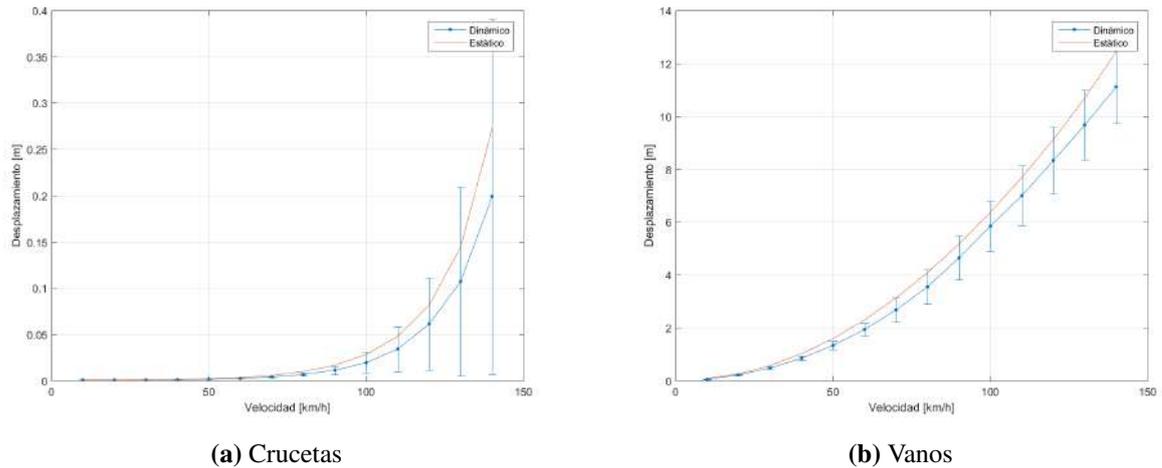


Figura 8.16. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento a 60° variando la velocidad

Observando el diagrama de caja y bigotes, se obtienen las mismas conclusiones que en el caso anterior, aparecen valores extremos por encima del valor del modelo estático. Estos valores son más abundantes conforme aumenta la velocidad pico. Esto se debe a que la desviación típica depende directamente de la velocidad del viento, como ya se vio en el Capítulo 5, por lo que una mayor desviación generará más valores de deformación por encima. Además, una mayor velocidad implica una mayor energía, por lo que la amplitud del “efecto galope” puede ser mayor.

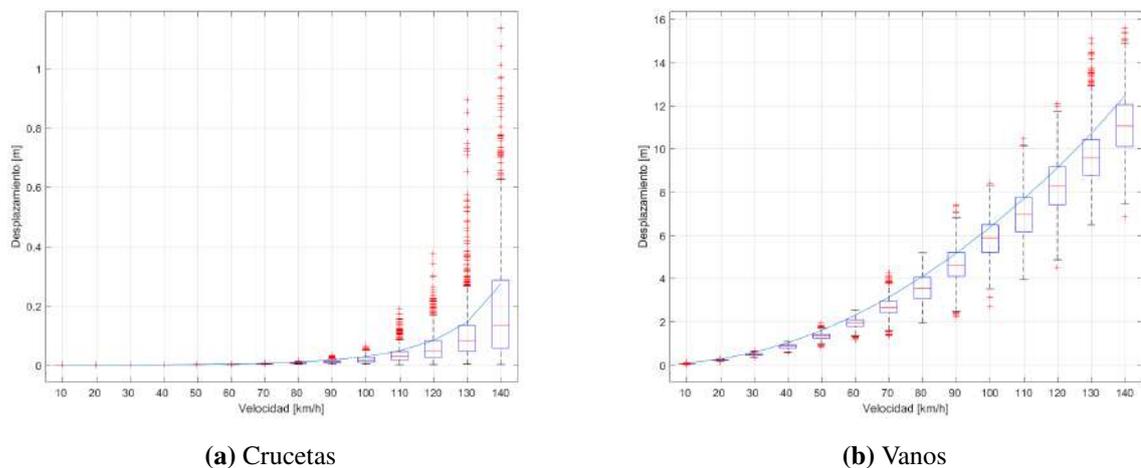


Figura 8.17. Diagramas de caja y bigotes del desplazamiento máximo en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento a 60° variando la velocidad pico

8.2. Modelo de viento dinámico no uniforme

En el modelo de viento dinámico distribuido se realizan los mismos tres ensayos que para el viento dinámico. Es decir, una serie de 30 muestras independientes con el mismo valor de velocidad pico y ángulo de incidencia, una serie variando el ángulo y otra serie variando la velocidad pico. Para poder comparar con el caso uniforme, se considerará el desplazamiento en Z. Además, se tomará el mismo cantón de 4 vanos de 450 m y una velocidad pico de 140 km/h.

Como ya se ha indicado en el Capítulo 6, cada uno de los vanos tiene una serie temporal de viento distinta pero relacionadas entre sí. Los datos representados son los valores máximos para toda la línea, por lo que de nuevo son cotas superiores de los desplazamientos generados. Alternativamente, con los datos obtenidos directamente del modelo se podrían analizar cada cruceta por separado. Se ha decidido esta aproximación debido a que es más relevante el máximo total, puesto que en el momento que una cruceta rompe la distancia de seguridad, el diseño deja de ser válido. El mismo razonamiento se sigue para los vanos.

8.2.1. Curvas de desplazamientos

De nuevo se muestran los resultados de realizar 30 simulaciones de 200 s con velocidad pico de 140 km/h y 60° de ángulo de incidencia para una línea de 4 vanos de 450 m. Se han representado con un diagrama de caja y bigotes, marcando las deformaciones máximas.

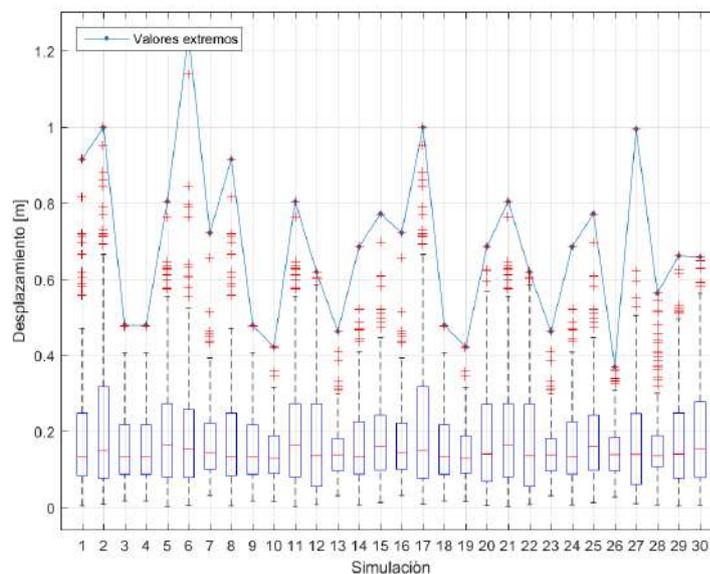


Figura 8.18. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido pico de 140 km/h a 60°

Los desplazamientos medios presentan valores similares al caso estático, tal y como se esperaba. Por otra parte, los valores máximos superan los del estático. No obstante, en este caso únicamente dos valores de los 6000 recogidos superan la distancia de seguridad. Esto hace que se cumpla estrictamente la regla de las 3σ , como se comprobará en el análisis estadístico. Los vanos muestran menor variación, menos *outliers* y valores más cercanos a los esperados.

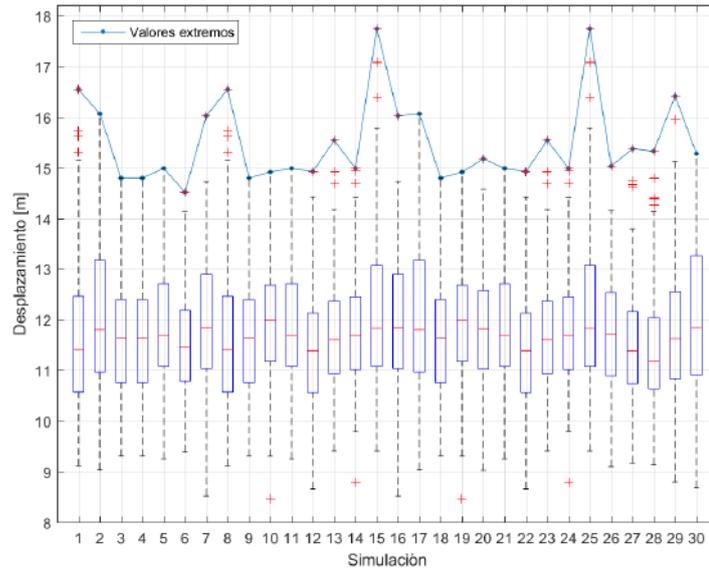


Figura 8.19. Desplazamientos máximos en Z de los vanos para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido pico de 140 km/h a 60°

8.2.2. Análisis estadístico

El tratamiento estadístico se realiza únicamente sobre las crucetas por ser el elemento más crítico en el diseño de la línea. En la Figura 8.20 se muestra el histograma de dicha distribución, y en la Figura 8.21 su probabilidad acumulada.

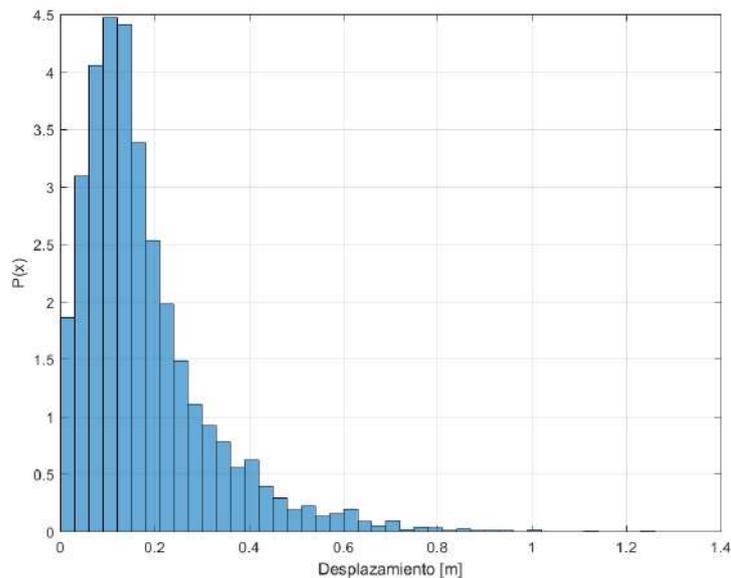


Figura 8.20. Distribución de probabilidad de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento distribuido pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s

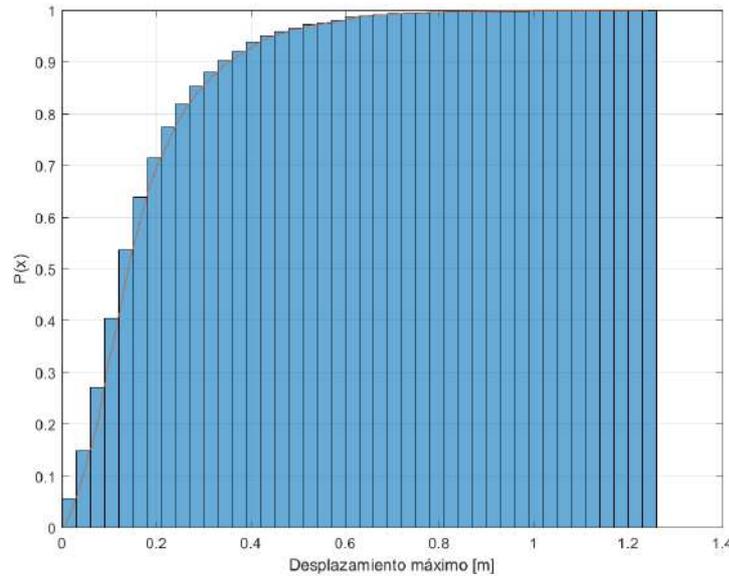


Figura 8.21. Probabilidad acumulada de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento distribuido pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s

El porcentaje de valores que están por debajo de la predicción del modelo estático se sitúa en el 69 %. Sólo el 0.03 % de los valores superan la distancia de seguridad de 1.1 m. Más del 99 % de los datos se encuentra por debajo de los 0.8 metros, teniendo un máximo en torno a 1.2 m. De nuevo se genera una distribución con muchos valores en los menores desplazamientos y una cola de valores extremos, aunque mucho más corta. Las 3σ de seguridad se alcanzan antes de 1 m de desplazamiento. A continuación se muestran los análisis estadísticos de los picos.

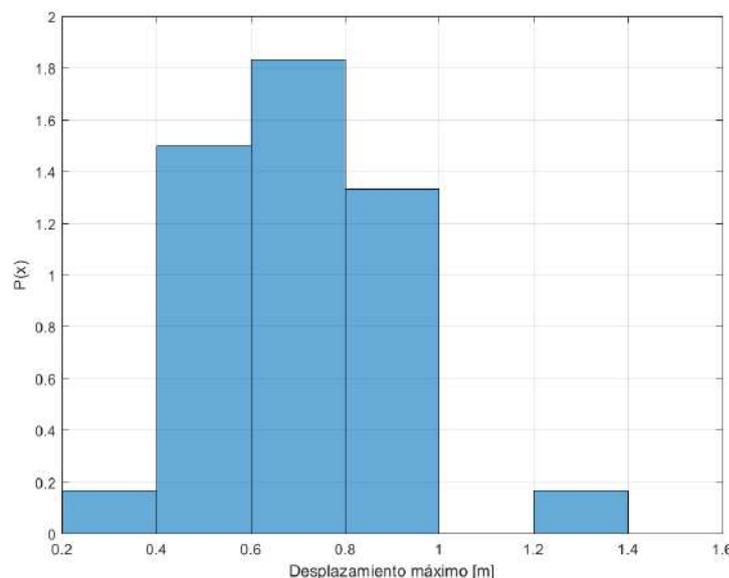


Figura 8.22. Distribución de probabilidad de los picos de desplazamiento máximo en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento distribuido pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s

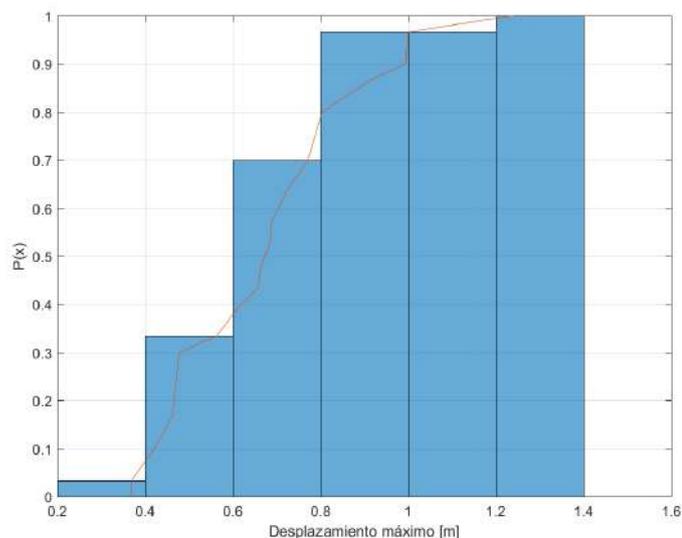


Figura 8.23. Probabilidad acumulada de los picos de desplazamiento máximo en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento distribuido pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s

En este caso se recoge un comportamiento similar, si bien es cierto que el número de casos tomado es limitado. No obstante, la mayoría de picos se encuentra entre 0.4 m y 1 m, lo cual se refleja en las gráficas. La distribución de probabilidad acumulada crece muy poco para valores superiores a la distancia de seguridad, debido a la poca presencia de valores extremos.

8.2.3. Variación del ángulo del viento

De manera análoga al modelo con viento uniforme, a continuación se muestran algunos ejemplos de series de 1000 s de viento para una velocidad pico objetivo de 140 km/h variando el ángulo de incidencia.

A primera vista, se aprecia la misma tendencia que en el resto de modelos. A mayor ángulo de incidencia implica un menor desplazamiento en las crucetas. No obstante, también aparece una mayor dispersión de los datos, con valores extremos de desplazamiento. Especialmente destacable es el caso de $\vartheta = 90^\circ$, que a diferencia de los modelos estático y dinámico uniforme, da un valor de desplazamiento para las crucetas. El hecho de no estar aplicando la carga de viento uniformemente sobre el cable genera un desequilibrio en las fuerzas horizontales que actúan sobre la cruceta, pese a aplicar la carga perpendicular. Esto provoca un momento que la desestabiliza, creando ese desplazamiento. En los gráficos de desplazamiento de la Figura 8.25 se aprecia claramente este hecho.

En estos gráficos también se obtiene que el valor medio del desplazamiento máximo está por debajo del valor para el ensayo estático salvo para valores cercanos a 90°. Esto se debe a que el modelo estático tampoco tiene en cuenta el desequilibrio producido por la distribución de viento. Este modelo de viento distribuido es más cercano a la realidad, por lo que se perfila como otro elemento a tener en cuenta. Si se diseña para viento perpendicular en estático, se está cometiendo el error de minorar la carga de viento desestabilizadora.

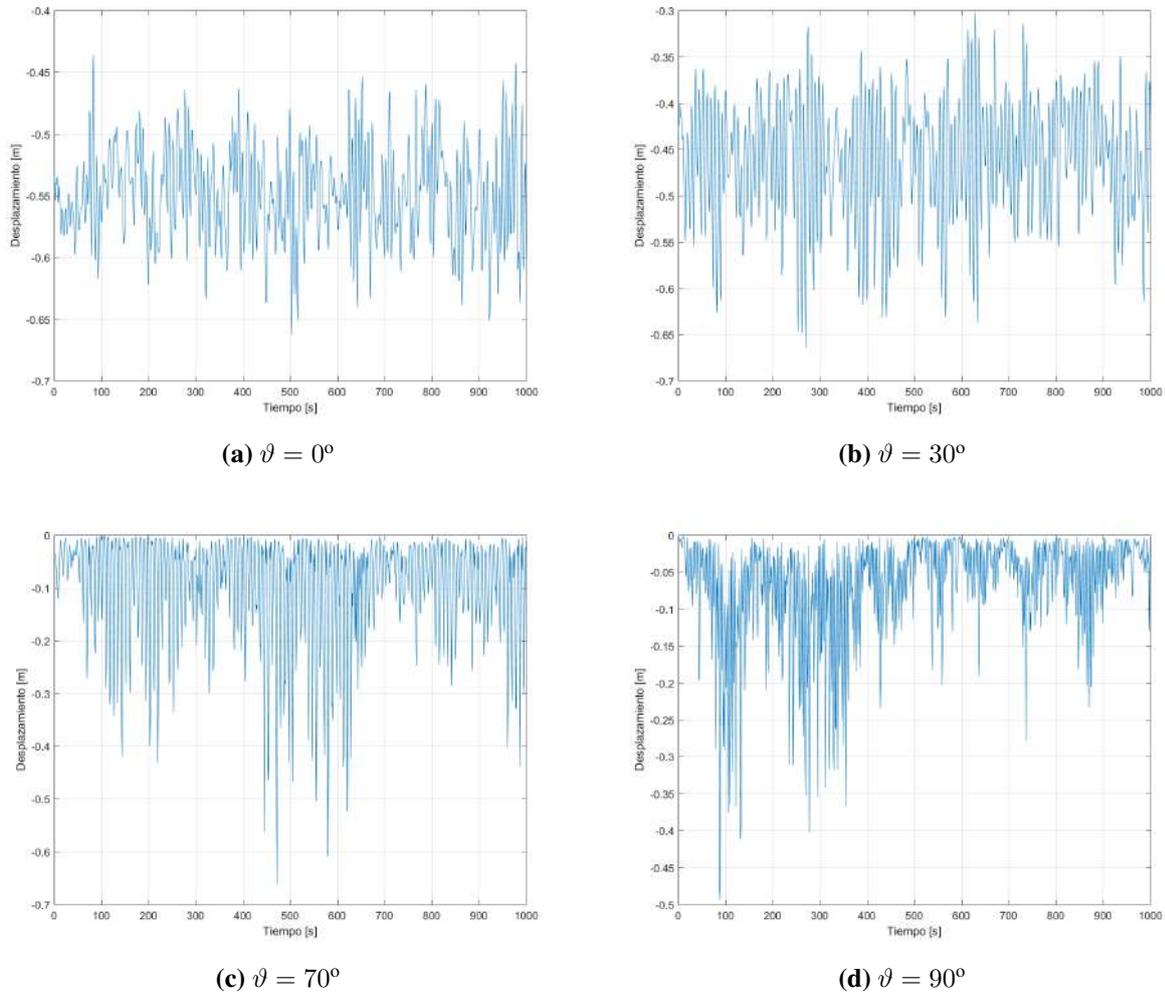


Figura 8.24. Series de desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido pico de 140 km/h variando el ángulo de incidencia

Por otra parte, la primera desviación típica de valores, señalizada por las barras de error, es muy baja para viento paralelo a la línea, estado siempre muy por debajo del valor estático. En los diagramas de cajas de la Figura 8.26 se realiza una representación más adecuada de la dispersión.

Como se observaba en los gráficos anteriores, para valores de ángulo pequeños la dispersión es muy baja. De hecho, los valores obtenidos para el dinámico distribuido son siempre menores que el estático, sin *outliers*, algo que no ocurría para el modelo uniforme. Sin embargo, para ángulos mayores de 30° aparece mayor dispersión, con extremos muy por encima del valor del estático. En algunos casos se llega a invertir la tendencia, teniendo mayores picos de desplazamiento máximo para valores de ángulo más cercanos a 90° . En el caso de los datos de los vanos, se aprecia la misma tendencia, si bien mucho más amortiguada. Los valores para dirección perpendicular a la línea superan a los del estático por el giro de las crucetas. El resto de casos no se ven muy afectados, puesto que la gran inercia de los cables limita el efecto de la distribución.

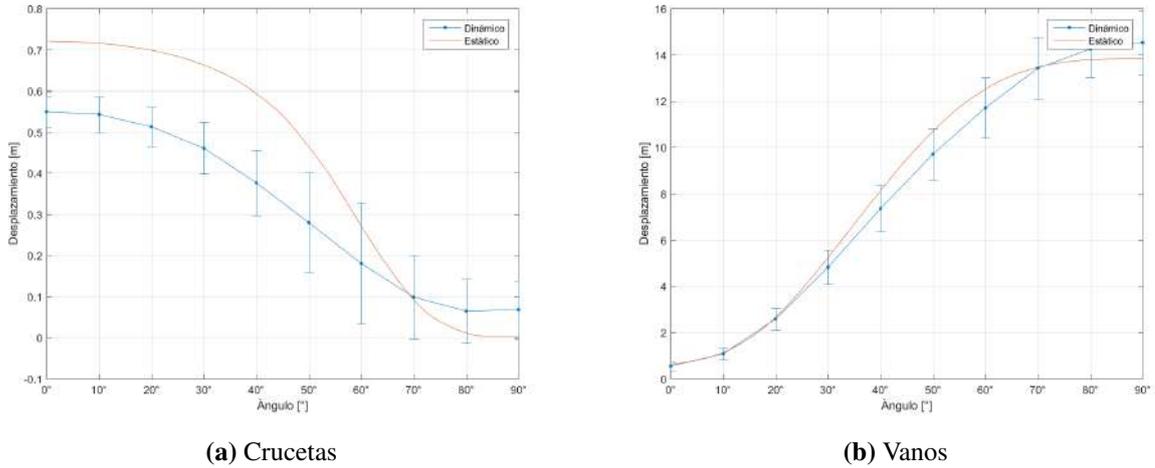


Figura 8.25. Desplazamiento máximo en Z para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido pico de 140 km/h variando el ángulo

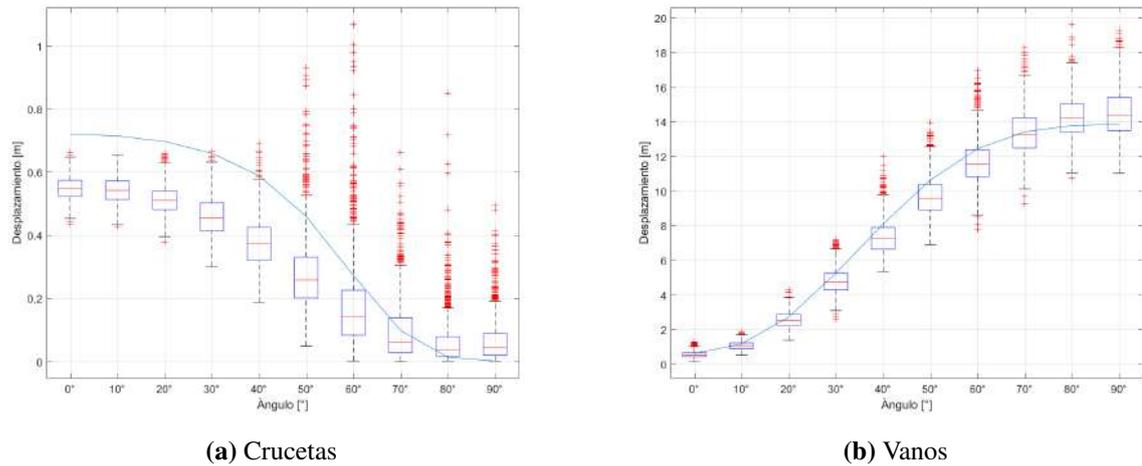


Figura 8.26. Diagramas de caja y bigotes del desplazamiento máximo en Z para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido pico de 140 km/h variando el ángulo

8.2.4. Variación de la velocidad del viento

De nuevo, en la Figura 8.27 se representan los datos obtenidos aplicando algunas series de 1000 s de viento dinámico distribuido con 60° de ángulo de incidencia y variando la velocidad pico objetivo. Igual que para los modelos estático y dinámico uniforme, para velocidades bajas se registran desplazamientos máximos pequeños. La dispersión parece depender de la velocidad media, no apreciándose un mayor número de valores extremos en las distintas velocidades.

En los gráficos comparativos se confirma dicha tendencia. En ningún momento los valores medios superan a lo registrado en el modelo estático. No es hasta los 140 km/h que a primera desviación típica supera el valor del estático. Por su parte, los desplazamientos en los vanos son prácticamente iguales en valor medio al estático, diferenciándose únicamente en la dispersión de los mismos.

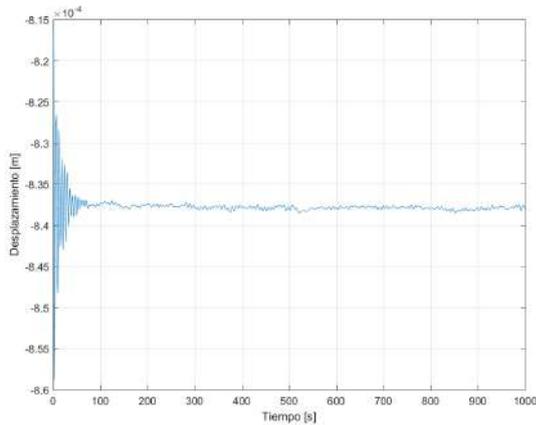
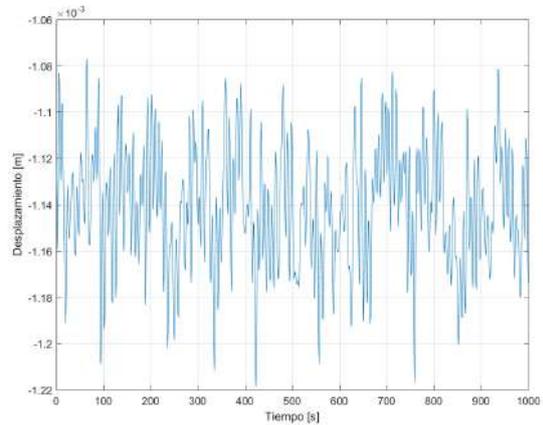
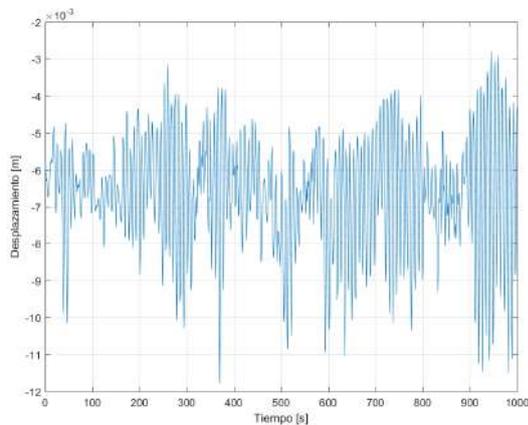
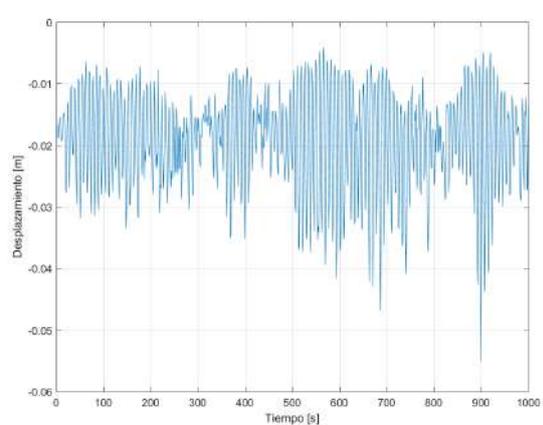
(a) $v = 10$ km/h(b) $v = 40$ km/h(c) $v = 80$ km/h(d) $v = 140$ km/h

Figura 8.27. Series de desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido a 60° variando la velocidad pico

De los diagramas de cajas se extraen las mismas conclusiones. Especialmente relevante es el aumento del número de *outliers* y la dispersión de los mismos con la velocidad. Esto se debe a que el ángulo escogido es precisamente el ángulo crítico de la línea, que tal y como se ve en el apartado anterior, tiene una gran inestabilidad.

8.3. Comparativa del modelo de viento dinámico uniforme y no uniforme

A continuación se realiza una comparativa de los modelos de viento dinámico uniforme y distribuido, así como la comparación con los datos obtenidos para viento estático. Este análisis tiene como objetivo final determinar la validez de los datos obtenidos y extraer las conclusiones pertinentes. Esto permite determinar unas pautas y condiciones de uso del modelo creado en este proyecto.

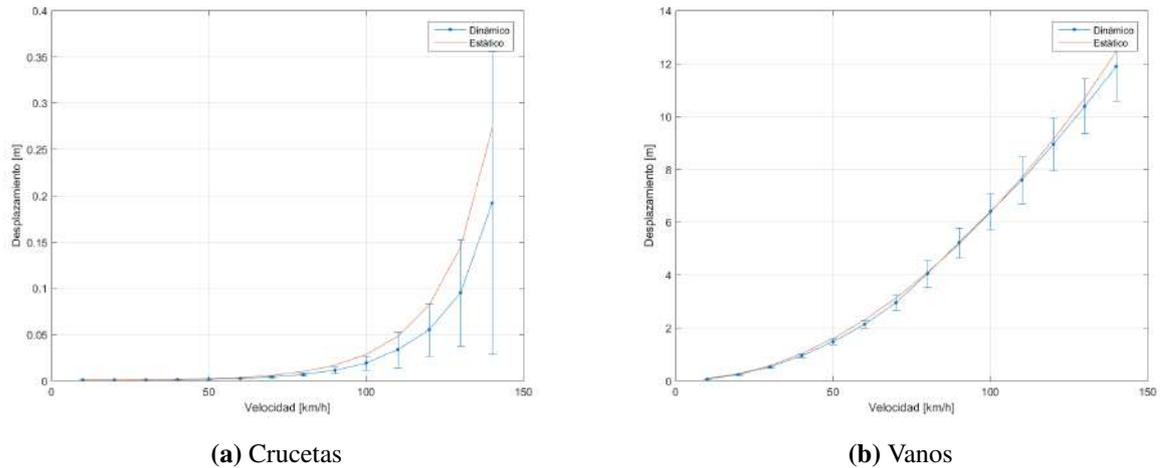


Figura 8.28. Desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido a 60° variando la velocidad

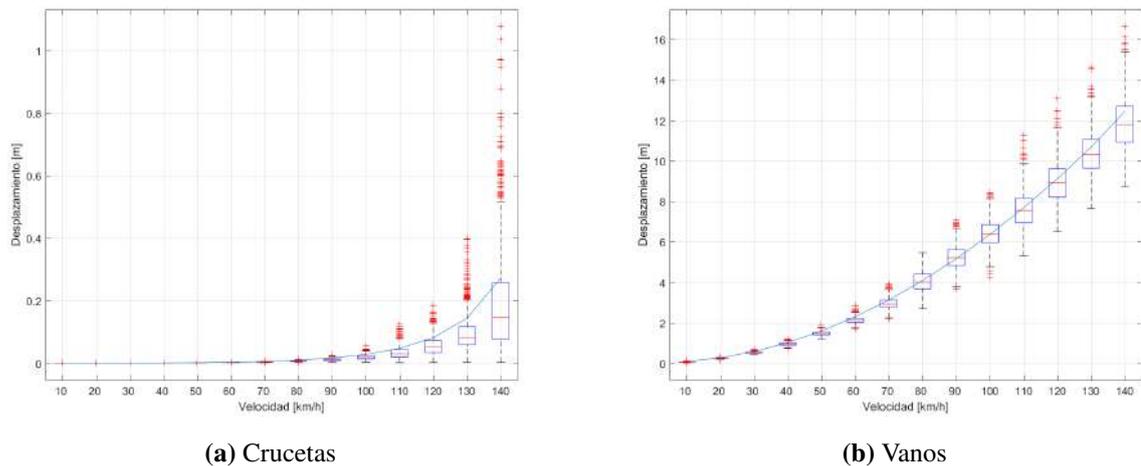


Figura 8.29. Diagramas de caja y bigotes del desplazamiento máximo en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento distribuido a 60° variando la velocidad pico

8.3.1. Curvas de desplazamientos

Las Figuras 8.30 y 8.31 muestran los valores medios y extremos para los datos recogidos en las 30 series de 200 s con viento pico de 140 km/h y ángulo de incidencia de 60° . Las barras de error representan la primera desviación típica. Se ha prescindido de los diagramas de caja y bigotes por proveer una representación poco clara y no permitir una correcta comparación entre los dos modelos.

En el caso de las crucetas, el desplazamiento medio y la primera desviación típica se mantienen muy próximos en los dos modelos. No obstante, los valores extremos son mayores para el modelo de viento dinámico uniforme. Esto se explica por el efecto de compensación que generan unos vanos sobre otros en el modelo distribuido. Además, este mismo hecho reduce la efectividad del “efecto galope”, lo que da lugar a picos de menor amplitud.

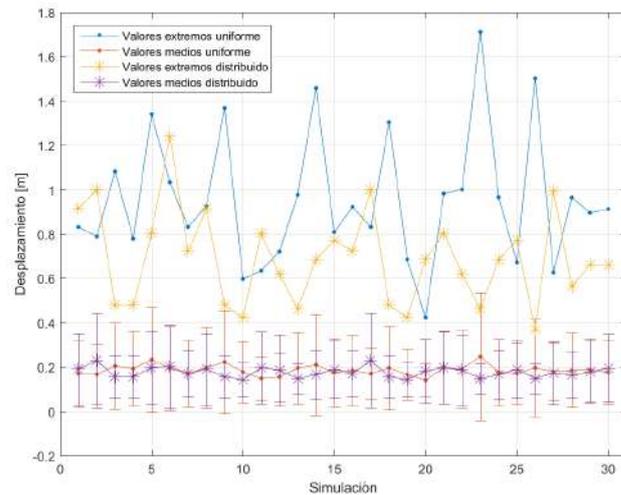


Figura 8.30. Comparativa de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h a 60°

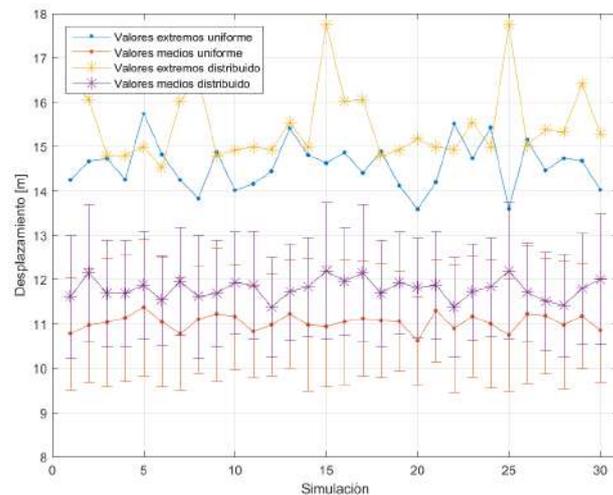


Figura 8.31. Comparativa de los desplazamientos máximos en Z de los vanos para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h a 60°

Por otra parte, el desplazamiento en los vanos presenta el comportamiento contrario. Por un lado, el desplazamiento máximo medio es mayor para el modelo distribuido, manteniéndose el valor la desviación típica en ambos. Además, los valores extremos reflejan este mismo hecho, siendo generalmente mayores en el caso del distribuido. Esto probablemente se deba a los mismos desequilibrios derivados de la distribución de las series de viento. En el modelo uniforme, todos los vanos se desplazan en la misma dirección y aportan carga a las crucetas de la misma forma, lo que provoca un mayor giro en las crucetas pero mayor uniformidad controlada en los vanos. En el modelo distribuido, las diferencias de carga hacen que el momento que aportan cada uno de los vanos al giro de la cruceta sea distinto, obteniéndose en cada momento unos vanos más desplazados y otros menos. El resultado es un desplazamiento medio mayor y más picos en los vanos pero menores en las crucetas.

8.3.2. Análisis estadístico

Para comparar los análisis estadísticos se han superpuesto las distribuciones de probabilidad de ambos modelos. Estas comparativas se recogen en las siguientes figuras.

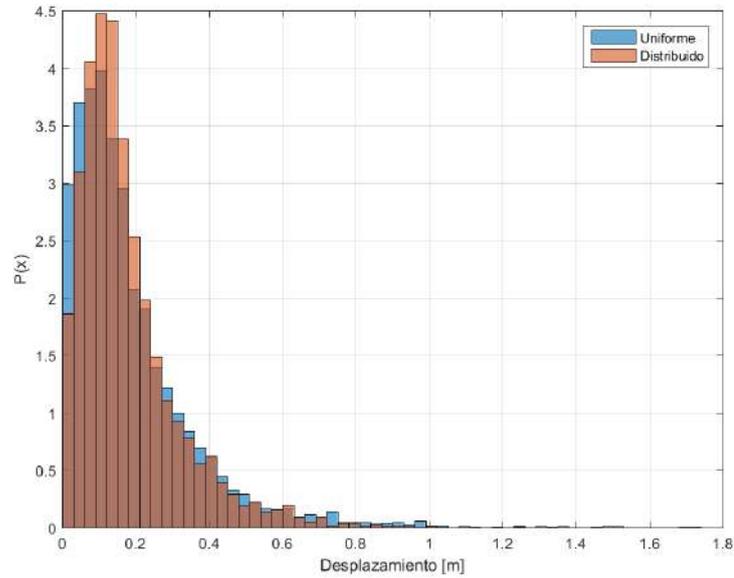


Figura 8.32. Comparativa de la distribución de probabilidad de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s

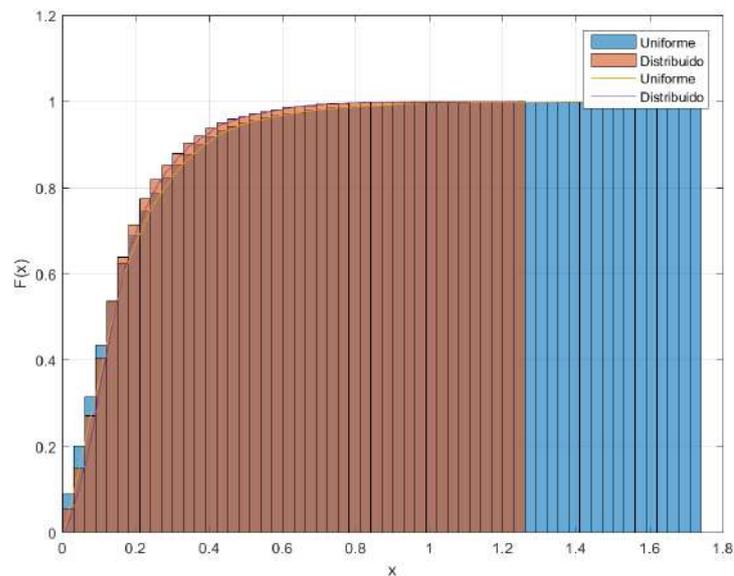


Figura 8.33. Comparativa de la probabilidad acumulada de los desplazamientos máximos en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s

Como era de esperar, las distribuciones son muy similares en ambos casos, tanto el PDF como el CDF. La diferencia radica esencialmente en el rango de los mismos, puesto que la cola de extremos es mucho mayor en el caso de viento dinámico uniforme que en el distribuido. También cabe destacar la mayor densidad del modelo de viento uniforme para valores muy próximos a 0. Esto se debe a que la distribución también afecta al número de casos en los que se registran valores muy pequeños de desplazamientos, puesto que el desplazamiento de otro de los vanos afectará al giro de la cruceta. En definitiva, se consolida el efecto amortiguador del modelo distribuido.

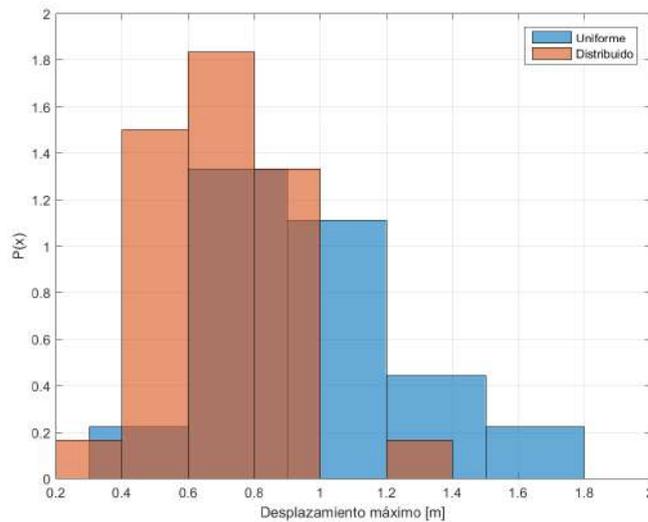


Figura 8.34. Comparativa de la distribución de probabilidad de los picos de máximo desplazamiento en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s

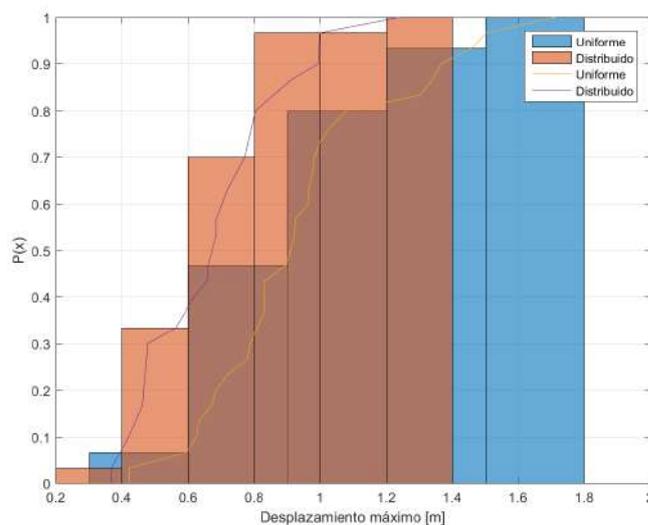


Figura 8.35. Comparativa de la probabilidad acumulada de los picos de máximo desplazamiento en Z de las crucetas para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento distribuido pico de 140 km/h a 60° en 30 series de 200 s

Para los picos se recoge el mismo comportamiento. Es necesario indicar que la diferencia en la distribución de las columnas de los histogramas se debe al ajuste elegido para los mismos, que genera dichas columnas de manera que se registre la mejor distribución posible para la serie de datos. En definitiva, se observa que para el desplazamiento en las crucetas, el modelo uniforme es más conservador que el modelo distribuido. Ambos son cotas superiores, pero el modelo dinámico distribuido es mejor aproximación al comportamiento real de las crucetas, al menos en el caso del ángulo crítico.

8.3.3. Variación del ángulo del viento

En la Figura 8.36 se han representado la comparativa para las series en las que se ha ido variando el ángulo de incidencia, así como la curva obtenida del ensayo estático. En el gráfico de los desplazamientos en las crucetas se resume todo lo indicado anteriormente. Por un lado, en general los desplazamientos máximos medios son iguales en los dos modelos dinámicos y menores que el estático, con una mayor desviación típica del uniforme. Los picos son mayores en el uniforme y únicamente para ángulos pequeños están por debajo del estático, dándose únicamente para el modelo dinámico distribuido. No obstante, para ángulos cercanos a 90° , el modelo distribuido es el más conservador, dando datos de desplazamiento superiores a los otros dos, tanto en valores medios y pico. Como ya se ha mencionado anteriormente, esto se debe a la fuerza desestabilizadora debida a la diferencia de cargas en los vanos.

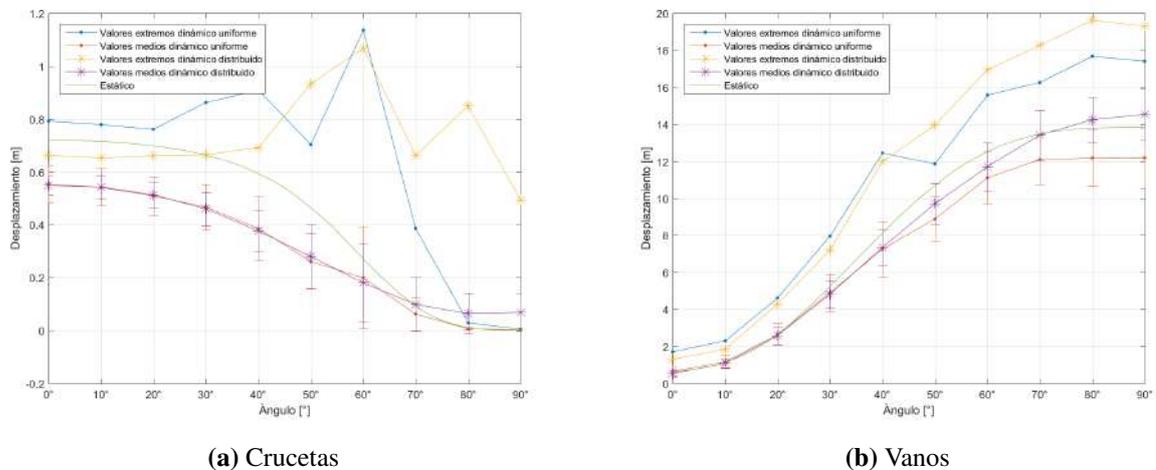


Figura 8.36. Comparativa del desplazamiento máximo en Z para línea de 4 vanos de 450 m con viento pico de 140 km/h variando el ángulo

Resulta destacable el hecho de que ambos modelos coinciden en 60° como ángulo crítico, aún no siendo el que recoge un mayor valor para el estático. Si se observan las mesetas de estabilidad del Capítulo 7, se aprecia que es en 60° donde se obtiene un punto más cercano a la meseta de inestabilidad para 4 vanos. Es decir, se deduce que los mayores desplazamientos se rigen por las superficies de inestabilidad, estando situados en ángulos próximos a 0° o dentro de la meseta de inestabilidad; pero la mayor dispersión queda determinada por la proximidad del punto de diseño a la frontera de la meseta de inestabilidad. Esta observación es determinante a la hora de diseñar la línea, puesto que se puede estar diseñando bajo una carga estática adecuada pero muy cerca de la inestabilidad, generando una respuesta inadecuada bajo carga dinámica.

Los gráficos de los desplazamientos en los vanos continúan la tendencia de los de las curvas de desplazamientos. Se evidencia el desplazamiento de las crucetas en ángulos próximos a 90° , evidenciando que el modelo distribuido es el más conservador en lo que respecta a la anchura de servidumbre necesaria para la línea. En todo caso, este es más cercano a la realidad, por lo que es el que se debe emplear.

8.3.4. Variación de la velocidad del viento

En el caso de la variación de la velocidad del viento, las diferencias entre los dos modelos de viento dinámico son poco destacadas. En las crucetas, el desplazamiento máximo medio se mantiene muy similar para ambos al variar la velocidad, situándose por debajo del estático pero superándolo con la dispersión. Los valores extremos superan ampliamente los del estático, siendo ligeramente inferiores para el modelo de viento dinámico distribuido. Para los desplazamientos máximos medios en los vanos, los tres modelos registran valores muy parecidos, sin diferencias apreciables. Los valores extremos vuelven a estar por encima de los del estático, pero en ambos modelos dinámicos se registran los mismos desplazamientos pico.

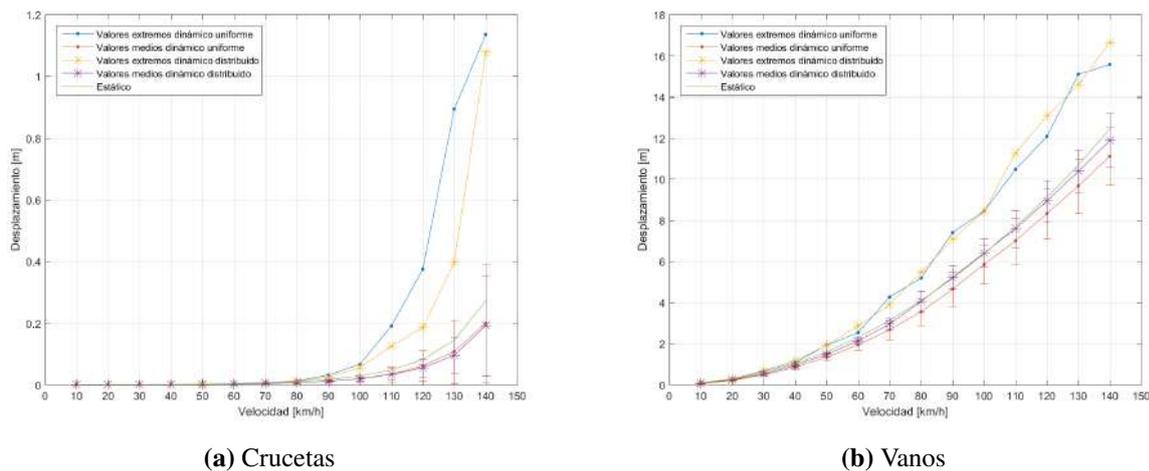


Figura 8.37. Comparativa del desplazamiento máximo en Z para línea de 4 vanos de 450 m bajo viento con ángulo de incidencia de 60° variando la velocidad pico objetivo

Capítulo 9

Conclusiones, aportaciones y extensiones

9.1. Conclusiones

En general, se considera satisfactorio el desarrollo del proyecto. Ha sido posible generar un modelo al que poder aplicar el FEM. A partir de él se han obtenido una serie de resultados y conclusiones respecto al comportamiento de la línea en los distintos modelos de viento.

9.1.1. Conclusiones de los modelos de la línea

En primer lugar, se ha generado una geometría de curva catenaria a partir de la aproximación parabólica, válida para un gran rango de longitudes de vano. El programa de Matlab desarrollado permite la total modificación de los parámetros para ajustarlo a las características de la línea que se va a diseñar. También se han establecido los límites de dichos parámetros para los cuales los resultados obtenidos serán suficientemente precisos.

Por otra parte, el modelo geométrico de SpaceClaim creado a partir de la curva generada en Matlab también se ha podido sistematizar y parametrizar. A partir del *script* de Python adjunto al propio modelo 3D se consigue dicha sistematización. Además, las características establecidas en el propio modelo permiten la correcta aplicación del FEM.

La resolución en ANSYS se ha basado en la solución de dos modelos estáticos. En primer lugar, se crea un modelo preliminar con el cable sin deformar, sin crucetas y un extremo libre donde se aplica una fuerza. Esto permite establecer las condiciones de tensión iniciales del sistema. A continuación se introduce esta información en el modelo completo de cable deformado y crucetas, aplicando las condiciones de contorno correspondientes. Gracias a esto se ha desarrollado un modelo completo de línea que se comporta como el sistema real. Este modelo puede aplicarse a las condiciones de diseño que se deseen sin dificultad, consiguiendo resultados precisos siempre que se respeten las pautas establecidas.

A partir de todo lo indicado, se puede concluir que se ha cumplido satisfactoriamente el Objetivo 1 establecido en el Capítulo 1.

9.1.2. Conclusiones del modelo de vientos

Se ha creado un programa en Matlab capaz de generar series temporales de viento dinámico, según se estableció como Objetivo 2 en el Capítulo 1. Este programa se ha basado en un modelo de dos componentes, con la componente de turbulencia obtenida a partir del análisis estocástico de la correlación de espectros de potencia. De nuevo, la parametrización del programa permite su adaptación a las condiciones específicas de diseño.

El modelo ha sido validado adecuadamente, estableciéndose los límites de aplicación y su comportamiento en distintas condiciones. Por ello se ha determinado que el modelo desarrollado es el adecuado para este proyecto.

9.1.3. Conclusiones del modelo de viento estático

Los tres siguientes apartados, este inclusive, responden al Objetivo 3 del Capítulo 1, obtención de la respuesta estocástica de la línea.

El modelo de viento estático permite la obtención de las curvas de desplazamientos de las crucetas y los vanos. A partir de estas se ha deducido el efecto desestabilizador del aumento de la longitud y número de vanos, así como el ángulo crítico en estos casos. Además, se han establecido las relaciones entre los desplazamientos de unas crucetas y otras, así como las limitaciones del modelo a la hora de proveer datos bajo determinadas condiciones.

También se han obtenido las superficies de estabilidad de la línea para un rango de 2 a 10 vanos de 300 m y 450 m variando el ángulo de incidencia y la velocidad. Estas superficies permiten una primera aproximación directa al diseño de líneas compactas con crucetas aislantes pivotantes en estas condiciones, constituyendo una herramienta de aplicación directa por sí mismas. También han permitido establecer el comportamiento de la línea bajo viento estático. En particular, se ha observado la aparición de giros bruscos en las zonas de mayor inestabilidad, además de la comprobación de las conclusiones derivadas de las curvas de desplazamiento de las crucetas.

A partir de estas gráficas se han confeccionado las superficies de estabilidad en función del número de vanos y el ángulo de incidencia para viento de 140 km/h. De nuevo, estas gráficas establecen los límites bajo los que la línea cumpliría las restricciones de la normativa. En concreto, las mesetas de inestabilidad proveen de una representación adecuada de este hecho. Se concluye que la norma, que establece que se debe diseñar para 140 km/h y 90° de ángulo de incidencia, no contempla los casos más críticos para este tipo de líneas. Estos resultados establecen unos primeros valores como base para el posterior análisis dinámico. También permiten determinar el ángulo crítico para cada configuración de cantón, que deberá ser el ángulo de diseño.

9.1.4. Conclusiones del modelo de viento dinámico uniforme

El modelo de viento dinámico uniforme constituye una cota superior del comportamiento de la línea bajo una carga de viento real. Se han recogido valores de desplazamiento medio menores que para el modelo de viento estático. No obstante, se ha observado que el principal riesgo en el diseño bajo viento dinámico son los valores extremos. Se ha deducido que estos valores son resultado de cambios bruscos en la velocidad del viento y del posible “efecto galope”.

En ambos modelos de viento dinámico se ha empleado un cantón de 4 vanos de 450 m, realizándose un análisis estadístico exhaustivo del caso de ángulo crítico (60°) y velocidad pico máxima de 140 km/h. El análisis estadístico en concreto, ha permitido establecer las probabilidades de estabilidad, y con ello el riesgo de fallo de la línea. De aplicarse este procedimiento a otras configuraciones, sería posible determinar con precisión la seguridad de la línea, obteniéndose un valor máximo de probabilidad de fallo esperada. De nuevo se observa que la normativa es inadecuada.

9.1.5. Conclusiones del modelo de viento dinámico distribuido

El modelo de viento dinámico distribuido arroja resultados análogos al de viento uniforme. No obstante, esta simulación es menos conservadora y más parecida al comportamiento real. Se confirma el riesgo de los valores extremos, aunque con este modelo son menos acusados y frecuentes. Esto hace que entre todos los ensayados sea el más adecuado para su aplicación generalizada. También muestra cómo debido al carácter ideal de los otros dos modelos, no se está representando adecuadamente el comportamiento de la línea bajo viento con ángulo de incidencia cercano a 90° .

En definitiva, este es el modelo que mejor refleja el comportamiento estocástico de la línea, estableciendo las pautas de diseño buscadas para este tipo de configuraciones.

9.2. Aportaciones

A continuación se recogen las aportaciones de este proyecto que pueden ser tomadas como base de futuras investigaciones o para diseños de aplicación directa:

- Se ha generado un modelo válido de línea de alta tensión compacta con crucetas aislantes pivotantes para la aplicación del FEM. Este modelo admite modificaciones para su adaptación a las condiciones de diseño.
- Se ha generado un programa de Matlab capaz de generar series temporales de viento real. Este programa puede emplearse directamente en un gran rango de escenarios cambiando sus parámetros de entrada.
- Se ha desarrollado un modelo en ANSYS capaz de generar resultados precisos del comportamiento de este tipo de líneas bajo cargas de viento estático y dinámico.
- Se han obtenido las curvas de desplazamientos, las superficies de estabilidad y las mesetas de inestabilidad correspondientes a cantones compuestos por vanos de 300 y 450 m. Los valores derivados de estas gráficas pueden tomarse directamente como datos de diseño.
- Se ha comprobado el comportamiento de las líneas de alta tensión compactas con crucetas pivotantes bajo viento estático, dinámico uniforme y dinámico distribuido. Esto ha permitido establecer unas pautas de diseño y desarrollar un método de estimación del riesgo de ruptura de la distancia de seguridad con la torre.

9.3. Extensiones

Algunas de las posibles extensiones de este proyecto para futuras investigaciones son las siguientes:

- Análisis del comportamiento del modelo con un mayor rango de longitudes de vano.
- Generación de las superficies de estabilidad para los modelos con cargas de viento dinámico.
- Estudio de cantones con vanos diferentes.
- Estudio del efecto del cambio de altura de las crucetas sobre la estabilidad de la línea.
- Ajuste estadístico riguroso de la distribución de probabilidad de los desplazamientos de las crucetas con el modelo bajo carga de viento dinámico.
- Sistematización e integración completa de Matlab, SpaceClaim y ANSYS, limitando las acciones que debe realizar el usuario a la hora de resolver una iteración del modelo.
- Sustitución en ANSYS de los elementos BEAM y LINK por elementos tipo PIPE54 que consideren el aire como fluido, y ajustar el modelo consecuentemente. Esto permitiría tener en cuenta la velocidad relativa del cable y dar una cota más ajustada.
- Entrenamiento de una inteligencia artificial (IA) basada en redes neuronales que permita la predicción del desplazamiento máximo esperado en base a los parámetros de ángulo, velocidad, longitud y número de vanos.

Bibliografía

- [1] D. Lakhapati, A. Furrer, H. R. Gassmann, and F. Schmuck, “Examples of transmission line tower configurations and solutions such as 765 kv insulated cross arms to minimize the impact of new ehv lines,” tech. rep., CIGRE session, 2014. paper B2-106.
- [2] España, “Real decreto 223/2008 de 15 de febrero por el que se aprueba el reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas de alta tensión.” Boletín Oficial del Estado núm 68. 19 de marzo de 2008.
- [3] European Committee for Standardization, “Eurocode 1: Actions on structures – general actions – part 1-4: Wind actions,” european standard, European Committee for Standardization, enero 2004.
- [4] AENOR, “Líneas eléctricas aéreas de más de 45 kV en corriente alterna. Parte 1: Requisitos generales. especificaciones comunes,” norma española, AENOR, julio 2004.
- [5] A. C. Baker, R. A. Bernstorff, *et al.*, “IEEE guide for braced insulator assemblies for overhead transmission lines 60 kv and greater,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 785–792, abril 2008.
- [6] M. Such, A. Carnicero-López, J. Jiménez-Octavio, and O. López-García, “An approach based on the catenary equation to deal with static analysis of three dimensional cable structures,” *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 2162–2170, septiembre 2009.
- [7] A. Carnicero-López, J. Jiménez-Octavio, and C. Sánchez-Rebollo, “Estabilidad en crucetas aislantes pivotantes de líneas aéreas,” in *VIII Jornada Técnica de Líneas*, Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos, Noviembre 2015.
- [8] A. Quiroga-Agudo, A. Carnicero-López, J. Jiménez-Octavio, and C. Sánchez-Rebollo, “Análisis del efecto de las fuerzas del viento sobre líneas de alta tensión compactas,” (Madrid), Junio 2014.
- [9] M. Irvine, *Cable Structures*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1981. ISBN 0-486-67127-5 (pbk.).
- [10] K. O. Papailiou and F. Schmuck, *Silicone Composite Insulators: Materials, Design, Applications*. Power Systems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1^a ed., 2013.
- [11] K. O. Papailiou, *Overhead Lines*. CIGRE Green Books, Springer International Publishing, 2017.
- [12] PFISTERER Holding AG, “Compact lines,” febrero 2017.
- [13] A. C. Baker, P. E. Murray, and J. D. Mozer, “Computer aided analysis of wind loads on horizontal vee type transmission line systems,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. Vol. PAS-101, pp. 2415–2420, agosto 1982.

- [14] D. Veenendaal and P. Block, “An overview and comparison of structural form finding methods for general networks,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 49, pp. 3741–3753, diciembre 2012.
- [15] J. H. Argyris, T. Angelopoulos, and B. Bichat, “A general method for the shape finding of lightweight tension structures,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, pp. 135–149, julio 1974.
- [16] H. J. Schek, “The force density method for form finding and computation of general networks,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, pp. 115–134, julio 1974.
- [17] P. Cella, “Methodology for exact solution of catenary,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 125, pp. 1451–1453, diciembre 1999.
- [18] C. Moreno-González, *Introducción al Cálculo Numérico*. Colección Grado, Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 1ª ed., 2011.
- [19] AENOR, “Líneas eléctricas aéreas de más de 1 kV hasta 45 kV inclusive en corriente alterna. Parte 1: Requisitos generales. especificaciones comunes,” norma española, AENOR, mayo 2006.
- [20] J. Wieringa, “Updating the Davenport roughness classification,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. Vol.41-44, pp. 357–368 pp., 1992.
- [21] World Meteorological Organization, *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Ginebra: World Meteorological Organization, 8ª ed., 2008. ISBN: 978-92-63-10008-5.
- [22] C. Sánchez-Rebollo, *Wind effects on the dynamic interaction between pantograph and overhead contact lines*. PhD thesis, ETSI ICAI, Universidad Pontificia Comillas, 2015.
- [23] C. E. Buell, “The structure of two-point wind correlations in the atmosphere,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 65, no. 10, pp. 3353–3366, 1960.
- [24] J. Peinke, P. Schaumann, and S. Barth, *Wind Energy: Proceeding of the Euromech Colloquium*. Springer Science & Business Media, 13 february 2007. 332 pp.
- [25] J. C. Kaimal, J. C. Wyngaard, Y. Izumi, and O. R. Coté, “Spectral characteristics of surface-layer turbulence,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. Vol. 98, pp. 563–589 pp., 1972.
- [26] J. Kaimal, J. Wyngaard, D. Haugen, O. Coté, and Y. Izumi, “Turbulence structure in the convective boundary layer,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. Vol. 33, pp. 2152–2170 pp., 1976.
- [27] A. G. Davenport, “The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 87, no. 372, pp. 194–211 pp., 1961.
- [28] Q. Yang, Y. Tian, B. Li, and B. Chen, “Statistical spectrum model of wind velocity at Beijing Meteorological Tower,” in *The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications* (International Association of Wind Engineering, ed.), (Shanghai), Septiembre 2012.

- [29] T. Von Karman, “Progress in the statistical theory of turbulence,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. Vol. 34, no. 11, pp. 530–539 pp., 1948.
- [30] G. Solari, “Gust buffeting. I: Peak wind velocity and equivalent pressure,” *Journal of Structural Engineering*, vol. Vol. 119, pp. 365–382 pp., 1993.
- [31] H. A. Panofsky and I. van der Hoven, “Spectra and cross-spectra of velocity components in the mesometeorological range,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. Vol. 81, no. 350, pp. 603–606 pp., 1955.
- [32] S. Yang, L. Zhigang, H. Wang, X. Lu, and J. Zhang, “Nonlinear analysis of wind-induced vibration of high-speed railway catenary and its influence on pantograph-catenary interaction,” *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 2016.
- [33] R. I. Harris, “Longer turbulence length scales,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. Vol. 24, no. 1, pp. 61–68 pp., 1986.
- [34] S. Udalov and N. Zubova, “Simulation of wind speed in the problems of wind power,” *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, vol. Vol. 2, pp. 150–165 pp., Marzo 2013.
- [35] H. Akaike, “Power spectrum estimation through autoregressive model fitting,” *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, vol. Vol. 21, pp. 407–419 pp., Diciembre 1969.
- [36] S. Figuerola-Asencio, S. Martínez-González, and D. Ochoa-Correa, “Generación de series temporales de velocidad de viento para su utilización en generación eólica en la red eléctrica,” (Madrid), Junio 2017.
- [37] L. Bramer, “Methods form modeling and forecasting wind characteristics,” Master’s thesis, Iowa State University, 2013.
- [38] J. Palomares-Salas, J. J. G. de la Rosa, J. G. Ramiro, *et al.*, “Comparison of models for wind speed forecasting.” Universidad de Cádiz. Área de Electrónica, 2014.
- [39] J. H. Argyris *et al.*, “Finite Element Method – the natural approach,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 17, pp. 1–106, 1979.
- [40] M. A. Crisfield, “A consistent co-rotational formulation for non-linear, three dimensional, beam-elements,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 81, pp. 131–150, 1990.
- [41] E. Oñate, *Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Statics: Volume 1: Basis and Solids (Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Sciences) (v. 1)*. Springer Netherlands, 1 ed., 2009.
- [42] R. C. Hibbeler, *Structural Analysis, Eighth Edition*. Pearson Education Canada, 8^a ed., 2011.
- [43] K. Bathe, *Finite element procedures*. Prentice Hall, 2^a ed., 1996.
- [44] K. Bathe, E. Ramm, and E. Wilson, “Finite element formulations for large deformation dynamic analysis,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. Vol. 9, pp. 353–386, 1975.

- [45] F. Hartmann and C. Katz, *Structural analysis with finite elements*. Springer, 2^a ed., 2007.
- [46] E. Oñate, *Structural Analysis with the Finite Element Method Linear Statics: Volume 2. Beams, Plates and Shells*. Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Sciences, Springer Netherlands, 1^a ed., 2013.
- [47] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The finite element method*, vol. Volumen 1 of *Finite Element Method Ser.* Butterworth-Heinemann, 5^a ed., 2000.
- [48] ANSYS, “Module 01: Overview and Procedure. ANSYS Mechanical Basic Structural Nonlinearities,” mayo 2016.
- [49] S. Bruni *et al.*, “The results of the pantograph-catenary interaction benchmark,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 53, no. 3, pp. 412–435, 2015.
- [50] J. R. Holton, *An Introduction to Dynamic Meteorology*. International Geophysics 88, Academic Press, 4 ed., 2004.
- [51] E. W. Grafarend, *Linear and Nonlinear Models: Fixed Effects, Random Effects, and Mixed Models*. 2006.

PARTE II



CÓDIGO FUENTE



Capítulo 1

Programas de la línea

En este apartado se recogen los códigos programados para la generación de la geometría de la línea.

1.1. Vano.m

Genera en Matlab la geometría de la catenaria y las crucetas en función de los parámetros de la misma.

```
%Vano.m
% Genera la geometría de la catenaria y las crucetas. La salida es en
% formato .txt ajustado para la importación a SpaceClaim. El origen de la
% curva es en (0, 0).

clc
clear all

%%Datos cruceta

l1=2.847; %en m
l2=2.521; %en m
angulo=47*pi()/180;

c=1/1739; %parámetro de catenaria
L=450; %Longitud de vano
intervalo=10; %longitud entre puntos calculados
Vanos=1; %Número de vanos
x=0:intervalo:L;
z=1/2*c*(x-L/2).^2.-L^2/8*c;
M=[zeros(1,L/intervalo+1)',x',z'];
T=M;

for i=1:Vanos-1
    M=[zeros(1,L/intervalo+1)',(x+i*L)',z'];
    T=vertcat(T(1:i*L/intervalo,:),M);
end

formatSpec= '%f %f %f\r\n';

fileID=fopen('modelo.txt','w');

fprintf(fileID,'3d=true\r\npolyline=false\r\n');
[nrows,ncolumns]=size(T);
for row = 1:nrows
    if (mod(row, L/intervalo)==1) && row>2 && row<nrows
        fprintf(fileID,formatSpec,T(row,:));
        fprintf(fileID,'\r\n');
    end
    fprintf(fileID,formatSpec,T(row,:));
end
fclose(fileID);
```

```

fileID=fopen('crucetas.txt','w');
fprintf(fileID,'3d=true\r\npolyline=true\r\n');
for j=1:(Vanos-1)
    fprintf(fileID,'\r\n');
    fprintf(fileID,formatSpec,[-11, j*L, 0]);
    fprintf(fileID,formatSpec, [0, j*L, 0]);
    fprintf(fileID,formatSpec, [-12*cos(angulo), j*L, 12*sin(angulo)]);
end
fclose(fileID);
type modelo.txt;
type crucetas.txt;

%% Plot de la catenaria

plot(T(:,2),T(:,3),'x-');
title(sprintf('Catenaria con %d vanos de %d m',Vanos,L));
xlabel('x [m]');
ylabel('y [m]');
grid on;

fclose('all');

```

1.2. Longitud_real.m

Calcula la longitud real del cable a partir de sus parámetros.

```

clc
clear all
close all

v=100:10:1000;
c=xlsread('024INLI_DistribucionApoyosTendidoConductorCondor_20150506','PARAMETROS
    TENDIDO','P8:P98');
dif=[];

for i=1:length(v)

    intervalo=10;
    x=0:intervalo:v(i);
    sum=0;

    z=1/2/c(i)*(x-v(i)/2).^2.-v(i)^2/8/c(i);
    for j=2:length(x)
        sum=sum+sqrt((z(j)-z(j-1))^2+(x(j)-x(j-1))^2);
    end
    dif(i)=abs(v(i)-sum);
end

figure;
plot(v,dif,'x-','MarkerSize',2);
xlabel('Longitud de vano [m]');
ylabel('L0-L [m]','Interpreter','latex');
grid on;

saveas(figure(1),'L_inicial');
saveas(figure(1),'L_inicial.jpg');

```

1.3. Script1.scscrip

Genera la geometría en SpaceClaim a partir de un fichero de puntos .txt. Está programado en el entorno de código incluido en el propio SpaceClaim, que tiene base Python.

```

L=450
V=10
#result = CreateBeamProfile.FromFile("Standard\Circular.scdoc", "Circulo",
    FileType.Supported, Info1)

```

```

# Insert From File
DocumentInsert.Execute("H:\TFG\Actual\modelo.txt", FileSettings1, GetMaps("8c8bdf67"))
# EndBlock
# Insertar perfil de viga
#result = CreateBeamProfile.FromFile("G:\TFG\Actual\Seccion.scdoc", "Seccion", FileType.User,
    Info7)
# EndBlock
# Insertar perfil de viga
#result = CreateBeamProfile.FromFile("G:\TFG\Actual\Brazo.scdoc", "Brazo", FileType.User,
    Info8)
# EndBlock
# Insertar perfil de viga
#result = CreateBeamProfile.FromFile("G:\TFG\Actual\Riostra.scdoc", "Riostra", FileType.User,
    Info10)
# EndBlock

# Crear 1 viga
selection = Selection.Create(Curve1)
result = Beams.Create(selection, Part4.Item)
#EndBlock

# Translate Along X Handle
for i in range(1,V):
    selection = Selection.Create(Curve1)
    direction = Direction.DirX
    options = MoveOptions()
    options.Copy = True
    result = Move.Translate(selection, direction, M(L*i), options, Info4)
    result = Beams.Create(selection, Part4.Item)
# EndBlock

selection = Selection.Create(Curve2, Curve5, Curve9, Curve10, Curve11, Curve12)
result = ComponentHelper.MoveBodiesToComponent(selection, Info6)
selection = Selection.Create(Part1)
result = RenameObject.Execute(selection, "Cable")
primarySelection = Selection.Create(Component1)
secondarySelection = Selection.Create(Component1)
result = NamedSelection.Create(primarySelection, secondarySelection)
result = NamedSelection.Rename("Grupol", "Cable")

DocumentInsert.Execute("H:\TFG\Actual\crucetas.txt", FileSettings1, GetMaps("8c8bdf67"))
# Dividir curva de boceto
targetCurves = Selection.Create(Curve13)
toolEntity = Selection.Create(CurvePoint1)
result = SplitSketchCurve.Execute(targetCurves, toolEntity)
# EndBlock
# Crear 1 viga
selection = Selection.Create(Curve30)
profile = Selection.Create(Part2)
result = Beams.Create(selection, profile)
# EndBlock
# Crear 1 viga
selection = Selection.Create(Curve32)
profile = Selection.Create(Part3)
result = Beams.Create(selection, profile)
# EndBlock
# Crear componentes
selection = Selection.Create(Curve30, Curve32)
result = ComponentHelper.MoveBodiesToComponent(selection, Info5)
# EndBlock

for j in range(1,V-1):
    # Translate Along Z Handle
    selection = Selection.Create(Curve26)
    direction = Move.GetDirection(selection)
    options = MoveOptions()
    options.Copy = True
    result = Move.Translate(selection, direction, M(L*j), options, Info12)
    # EndBlock
    # Translate Along Z Handle
    selection = Selection.Create(Curve27)
    direction = Move.GetDirection(selection)
    options = MoveOptions()
    options.Copy = True
    result = Move.Translate(selection, direction, M(-L*j), options, Info13)

```

```

# EndBlock
# Crear componentes
selection = Selection.Create(Curve28, Curve29)
result = ComponentHelper.MoveBodiesToComponent(selection, Info14)
# EndBlock

# Create Named Selection Group
primarySelection = Selection()
secondarySelection = Selection()
result = NamedSelection.Create(primarySelection, secondarySelection)
# EndBlock

# Rename Named Selection
result = NamedSelection.Rename("Group1", "Brazos")
# EndBlock

# Create Named Selection Group
primarySelection = Selection()
secondarySelection = Selection()
result = NamedSelection.Create(primarySelection, secondarySelection)
# EndBlock

# Rename Named Selection
result = NamedSelection.Rename("Group1", "Riostras")
# EndBlock

# Create Named Selection Group
primarySelection = Selection()
secondarySelection = Selection()
result = NamedSelection.Create(primarySelection, secondarySelection)
# EndBlock

# Rename Named Selection
result = NamedSelection.Rename("Group1", "Crucetas")
# EndBlock

# Create Named Selection Group
primarySelection = Selection()
secondarySelection = Selection()
result = NamedSelection.Create(primarySelection, secondarySelection)
# EndBlock

# Rename Named Selection
result = NamedSelection.Rename("Group1", "Apoyos")
# EndBlock

# Create Named Selection Group
primarySelection = Selection()
secondarySelection = Selection()
result = NamedSelection.Create(primarySelection, secondarySelection)
# EndBlock

# Rename Named Selection
result = NamedSelection.Rename("Group1", "Uniones")
# EndBlock

```

Capítulo 2

Programas del modelo del vientos

En este apartado se recogen los códigos relacionados con el modelo de vientos.

2.1. Viento_frecuencias.m

Genera la series temporales de vientos y cargas, y la exporta en un formato apropiado para su aplicación en ANSYS.

```
%% Viento_frecuencias.m

% Genera la serie temporal de vientos, las cargas asociadas y los archivos
% necesarios para su aplicación en ANSYS. Necesita las variables del la
% linea indicadas en el código.
% Funciones: - Generacion_viento.m
%           - Generacion_Sii.m
%           - Desviacion.m

clc
clear all
close all

%% Variables de vano

Vanos=6;
L=450; %Longitud de vano
intervalos=6;
T=293; %Temperatura en K
diametro=0.02772; %Diámetro en m

angulo_v = pi()/4;

%Parámetros de la fuerza según norma
Gg=2.05;
Gv=1;
Gs=1;
C=1;

%% Cálculo de la velocidad
% vh=60; %velocidad media
z=30; %Altura punto, se puede poner como función
hr=10; %Altura referencia, 10 m por norma
alfa=0.28; %Factor de terreno
z_0=0.01; %Altura equivalente rugosidad
delta_w=2*pi()/1000;
t=1:500;
N=200;
w=0.005:delta_w:delta_w*(N+0.005);
n=w/(2*pi());
Cd=15; % Entre 7 y 20

%% Estimación v_media y Tabla de velocidades
```

```

resolucion=10;
v_media_ev=10:resolucion:140;
for i=1:length(v_media_ev)
    des(i)=Desviacion( v_media_ev(i), z, z_0,t,w,delta_w, Cd,Vanos,L,intervalos);
end
ev=v_media_ev+3*des;

sol=interp1(ev,v_media_ev,140,'spline','extrap');

%v_media=sol/sqrt(2); % Para orientación variable
v_media=sol; % Para orientación fija

%% Cálculo de S y H
Cd=15; % Entre 7 y 20

S_diagonal=Generacion_Sii( v_media, z, z_0, w, 1,1);
v_x = Generacion_viento( v_media, S_diagonal, Cd, w, t, delta_w, L, Vanos, intervalos);
v_y = Generacion_viento( v_media, S_diagonal, Cd, w, t, delta_w, L, Vanos, intervalos);

for p=1:intervalos
    %% Cálculo de cargas

    % Distintas formas de cálculo de cargas
    %
    % ro=1.225*288/T*exp(-1.2*10^-4*(hr-600));
    % qz_x(p)=0.5*ro*Gg*Gv*Gs*v_x(p)^2;
    % qw_x(p)=C*qz_x(p)*diametro;
    % qz_y(p)=0.5*ro*Gg*Gv*Gs*v_y(p)^2;
    % qw_y(p)=C*qz_y(p)*diametro;
    % q_x(:,p)=diametro*10*50*(v_x(:,p)/120).^2; %Carga según longitud
    % q_y(:,p)=diametro*10*50*(v_y(:,p)/120).^2; %Carga según longitud

    q_t(:,p)=diametro*10*50*(cos(angulo_v)*v_x(:,p)/120).^2;
    q_x(:,p)=diametro*10*50*(cos(angulo_v)*v_x(:,p)/120).^2;
    q_z(:,p)=-diametro*10*50*(sin(angulo_v)*v_x(:,p)/120).^2;

end

%% Plot

fig1=figure;
for i=1:3

    plot(t,v_x(:,i));
    hold on;
end
title('Series temporales viento en tres puntos');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Velocidad [km/h]');
saveas(fig1,'Series_temporales_viento.jpg')
hold off;

v=horzcat(v_x,v_y);
q=horzcat(q_x,zeros(length(t),intervalos),q_z);

%% Generación archivos de vientos

for i=1:intervalos
    formatSpec= '%f %f %f\r\n';

    fileID=fopen(sprintf('viento_x%d.txt', i), 'w');

    [nrows,ncolumns]=size(v);
    for row = 1:nrows
        fprintf(fileID,formatSpec, row, v_x(row),v_y(row));
    end
    fclose(fileID);
end

%% Generación de archivos cargas

for i=1:intervalos
    formatSpec= '%f %f %f\r\n';

    fileID=fopen(sprintf('carga_x%d.txt', i), 'w');

```

```

[nrows,ncolumns]=size(q);
for row = 1:nrows
    fprintf(fileID,formatSpec, row, q_x(row,i),q_z(row,i));
end
fclose(fileID);
xlswrite(sprintf('carga_x%d.xlsx', i),[transpose(6+t) q(:,i) q(:,i+intervalos)
    q(:,i+2*intervalos)]);
end

```

2.2. Generacion_viento.m

```

function [ v ] = Generacion_viento( v_media, S_diagonal, Cd, w, t, delta_w, L, Vanos,
    intervalos)

%GENERACION_viento
% Genera una serie temporal de vientos a partir de los parámetros de su
% matriz PSD y la geometría de la línea
% Parámetros de entrada:
% - v_media: Velocidad de media del viento (da igual unidades)
% - S_diagonal: Diagonal de la matriz PSD en función de w
% - Cd: Coeficiente de arrastre del cable
% - w: vector de frecuencias a estudio
% - t: vector de tiempos a estudio
% - delta_w: espaciado entre frecuencias
% - L: Longitud total de la línea [m]
% - Vanos: Número de vanos de la línea
% - intervalos: Número de intervalos en los que se va a dividir la línea
% Parámetros de salida:
% - v: Serie temporal de velocidades en t

for i=1:intervalos
    for j=1:i
        if i==j
            S(i,j,:)=S_diagonal;
        else
            d=abs(i-j)*L*Vanos/intervalos;
            S(i,j,:)=S_diagonal.*exp(-(Cd*d)/(4*pi()*v_media)*abs(w));
            S(j,i,:)=S(i,j,:);
        end
    end
end

for p=1:intervalos

    sum1=0;

    for r=1:p

        sum2=0;
        for k=1:length(S_diagonal)

            H=chol(S(:, :,k), 'lower');

            hpr=atan(imag(H(p,r))/real(H(p,r)));
            fi=rand()*2*pi();

            sum2=sum2+abs(H(p,r))*cos(w(k)*t-hpr+fi);
        end

        sum1=sum1+sum2;
    end

    u(:,p)=2*delta_w*sum1;
    v(:,p)=v_media+u(:,p);
end
end

```

2.3. Generacion_Sii.m

```

function [ S_diagonal ] = Generacion_Sii( v_media, z, z_0, w, modo,grafico)

%GENERACION_SII
% Genera el término de la diagonal de la matriz de potencia espectral de
% vientos en función de la w
% Parámetros de entrada:
% - v_media: Velocidad de media del viento (da igual unidades)
% - z: altura de la línea [m]
% - z_0: altura de rugosidad equivalente [m]. Altura a la que v es
% teóricamente 0. Ver tablas de Wiejinga.
% - w: vector de frecuencias a estudio
% - modo: modelo usado (1 = Kaimal, 2 = Davenport, 3 = von Karman, 4 =
% Harris, 5 = Solari, 6 = Panofsky). Si no existe, modo 1 por defecto
% Parámetros de salida:
% - S_diagonal: Término correspondiente a la autocorrelación en la PSD
% Ejemplo:
% - INPUT: Generacion_Sii(100,10,0.01,[2,3,4])
% - OUTPUT: [100.0176 54.9526 35.4040]

if ~exist('modo','var')
    modo=1;
end

if ~exist('grafico','var')
    grafico=0;
end

sigma=v_media/log(z/z_0);

n=w/(2*pi());

switch modo
    case 1
        Lz=411*(z/300)^(0.046+0.074*log(10)); %Kaimal (Longitudinales)
        fl=Lz/v_media*n;
        SN=6.8*fl./(1+10.2*fl).^ (5/3);

    case 2
        Lz=300*(z/300)^(0.046+0.074*log(10)); %Davenport (Verticales)
        fl=Lz/v_media*n;
        SN=2*fl.^2./(3*(1+fl.^2).^ (4/3));

    case 3
        Lz=1200; %Von Karman
        fl=Lz/v_media*n;
        SN=4*fl./(1+70.8*fl.^2).^ (5/6);

    case 4
        Lz=1800; %Harris
        fl=Lz/v_media*n;
        SN=2*fl.^2./(3*(2+fl).^ (5/6));

    case 5
        Lz=411*(z/300)^(0.046+0.074*log(10)); %Solari (Americano)
        fl=Lz/v_media*n;
        SN=6.868*fl./(1+10.302*fl).^ (5/3);

    case 6
        Lz=411*(z/300)^(0.046+0.074*log(10)); %Panofsky
        fl=Lz/v_media*n;
        SN=1.1*fl./((1+4*fl).^2);
end

S_diagonal=SN*sigma^2./n;
%S_diagonal=SN;

if grafico==1
    semilogx(w,SN,'o');
    hold on;
    xlabel('frecuencia');
    ylabel('P [m^2/s^2]');
end
end

```

2.4. Desviacion.m

```
function [ desviacion ] = Desviacion( v_media, z, z_0,t,w,delta_w, Cd,Vanos,L,intervalos)

%Desviacion
% Genera la desviación típica de la distribución de vientos a partir de una
% v_media
% Parámetros de entrada:
% - v_media: Velocidad de media del viento (da igual unidades)
% - z: altura de la línea [m]
% - z_0: altura de rugosidad equivalente [m]. Altura a la que v es
% teóricamente 0. Ver tablas de Wiejinga.
% - S_diagonal: Diagonal de la matriz PSD en función de w
% - Cd: Coeficiente de arrastre del cable
% - w: vector de frecuencias a estudio
% - t: vector de tiempos a estudio
% - delta_w: espaciado entre frecuencias
% - L: Longitud total de la línea [m]
% - Vanos: Número de vanos de la línea
% - intervalos: intervalos de muestreo de la línea

% Ejemplo:
% - INPUT: desviacion( v_media, z, z_0,t,w,delta_w, Cd,Vanos,L,intervalos)
% - OUTPUT: []
%% Cálculo de la velocidad
% vh=60; %velocidad media

hr=10; %Altura referencia, 10 m por norma
alfa=0.28; %Factor de terreno

if ~exist('resolucion','var')
    resolucion=10;
end

%% Cálculo de S y H
S_diagonal=Generacion_Sii( v_media, z, z_0, w, 1);
v= Generacion_viento( v_media, S_diagonal, Cd, w, t, delta_w, L, Vanos, intervalos);

desviacion=0;
for i=1:intervalos
    desviacion=desviacion+std(v(:,i));
end
desviacion=desviacion/intervalos;

end
```

2.5. Coherencia.m

Código empleado para la comprobación de la coherencia en altura para el viento. La primera parte del código genera las series temporales de manera análoga a la de Viento_frecuencias.m, por lo que depende de los mismos parámetros y funciones.

```
%% Coherencia
%
% Valida la coherencia en altura del modelo de vientos
clc
clear all

Vanos=6;
L=450; %Longitud de vano
intervalos=6;
T=293; %Temperatura en K
diametro=0.02772; %Diámetro en m

angulo_v = pi()/4;

%Parámetros de la fuerza según norma
Gg=2.05;
Gv=1;
Gs=1;
C=1;
```

```

%% Cálculo de la velocidad
% vh=60; %velocidad media
z=30; %Altura punto, se puede poner como función
hr=10; %Altura referencia, 10 m por norma
alfa=0.28; %Factor de terreno
z_0=0.01; %Altura equivalente rugosidad
delta_w=2*pi()/1000;
t=1:500;
N=200;
w=0.005:delta_w:delta_w*(N+0.005);
n=w/(2*pi());
Cd=15; % Entre 7 y 20

%% Estimación v_media y Tabla de velocidades

resolucion=10;
v_media_ev=10:resolucion:140;
for i=1:length(v_media_ev)
    des(i)=Desviacion(v_media_ev(i), z, z_0,t,w,delta_w, Cd,Vanos,L,intervalos);
end
ev=v_media_ev+3*des;

sol=interp1(ev,v_media_ev,140,'spline','extrap');

%v_media=sol/sqrt(2); % Para orientación variable
v_media=sol; % Para orientación fija

%% Cálculo de S y H
Cd=15; % Entre 7 y 20

S_diagonal=Generacion_Sii(v_media, z, z_0, w, 1);
v_1 = Generacion_viento(v_media, S_diagonal, Cd, w, t, delta_w, L, Vanos, intervalos);
S_diagonal=Generacion_Sii(v_media, z-20, z_0, w, 1);
v_2 = Generacion_viento(v_media, S_diagonal, Cd, w, t, delta_w, L, Vanos, intervalos);

mscohere(v_1(:,1),v_2(:,1));
saveas(figure(1),'Coherencia en altura.jpg');

```

2.6. Validacion.m

Código empleado para la validación del modelo de vientos

```

clc
clear all
close all

%% Variables de vano

Vanos=6;
L=450; %Longitud de vano
intervalos=6;
T=293; %Temperatura en K
diametro=0.02772; %Diámetro en m

Gg=2.05;
Gv=1;
Gs=1;
C=1;
%% Cálculo de la velocidad
% vh=60; %velocidad media
z=30; %Altura punto, se puede poner como función
hr=10; %Altura referencia, 10 m por norma
alfa=0.28; %Factor de terreno

%v_media=vh*(z/hr)^alfa;
v_media=132;

%% Cálculo de SDN

z_0=0.01; %Altura equivalente rugosidad
sigma=v_media/log(z/z_0);

```

```

delta_w=2*pi()/1000;
t=1:1000;
N=400;
w=0.005:delta_w:delta_w*(N+0.005);
n=w/(2*pi());

%% Cálculo de S y H
Cd=15; % Entre 7 y 20

for k=1:5
    S_diagonal=Generacion_Sii( v_media, z, z_0, w, l);
    v = Generacion_viento_irr( v_media, S_diagonal, Cd, w, t, delta_w, L, Vanos, intervalos);

PSDtot=0;
for i=1:intervalos
    for j=1:intervalos
        if i==j
            time=0:length(v(:,i))-1;

            f=1/180;
            fm=200*f;
            dt=1/fm;
            t=0:dt:length(time);

            y=interp1(time,v(:,i),t,'spline');
            y=y-mean(y);
            Y=fft(y);

            end
            nf=length(y);

            P2=abs(Y/nf);
            P1=P2(1:nf/2+1);
            P1(2:end-1)=2*P1(2:end-1);
            PSD=P1.^2;

            frec=1/dt*(0:(nf/2))/nf;
            frec1=frec*3600;

            %     semilogx(frec1,PSD,'+');
            %     hold on;
            if i==1
                PSDtot=PSD;
            else
                PSDtot=PSDtot+PSD;
            end
        end
    end
end

semilogx(frec,PSDtot.*frec/sigma^2,',' , 'MarkerSize',5)
hold on;
end
for i=1:intervalos
    for j=1:i
        if i==j
            S(i,j,:)=S_diagonal;
        else
            d=abs(i-j)*L*Vanos/intervalos;
            S(i,j,:)=S_diagonal.*exp(-(Cd*d)/(4*pi()*v_media)*abs(w));
            S(j,i,:)=S(i,j,:);
        end
    end
end

end
for k=1:N
    for i=1:intervalos
        for j=1:intervalos
            suma(k)=S(i,j,k);
        end
    end
end
end

```

```

% semilogx(w*3600/(2*pi()),suma.*w/15/(2*pi())/sigma^2,'-');
hold off;
sum=0;

for i=1:intervalos;
    for j=1:intervalos
        if i==1&j==1
            [sum,fr]=pwelch(v(:,1),[]);
        elseif i==j
            sum=sum+pwelch(v(:,i));
        else
            sum=sum+real(cpsd(v(:,i),v(:,j)));
        end
    end
end

for i=1:intervalos
    for j=1:i
        if i==j
            S(i,j,:)=S_diagonal;
        else
            d=abs(i-j)*L*Vanos/intervalos;
            S(i,j,:)=S_diagonal.*exp(-(Cd*d)/(4*pi()*v_media)*abs(w));
            S(j,i,:)=S(i,j,:);
        end
    end
end

for k=1:N
    for i=1:intervalos
        for j=1:intervalos
            suma(k)=S(i,j,k);
        end
    end
end

figure;
semilogx(w,suma.*w/sigma^2,'+');

```

Capítulo 3

Programas de toma y procesamiento de datos

En este apartado se recogen los programas cuyo objetivo es la toma y procesamiento de los datos brutos procedentes de ANSYS.

3.1. Toma_de_datos.m

Código empleado para la toma de datos del modelo y su almacenamiento en variables de matlab.

```
%% Toma de datos

% Lee y guarda los datos de un archivo .txt en un archivo de variables de
% Matlaba .mat. Cada vez que se ejecute una simulación, se deben
% introducir los valores adecuados para el caso. El progrma es
% acumulativo, se tienen en cuenta los resultados anteriores siempre que
% no se hayan limpiado las variables de Matlab.
% Funciones: - Lector

angulo=11;
Vanos=6;
L=300;

[C_v,C_c]=Lector(Vanos)
cruceta{angulo}=C_c;
vano{angulo}=C_v;

save(sprintf('Datos brutos\\%d_%d.mat',Vanos,L),'cruceta','vano');
```

3.2. Lector.m

Lee de un archivo .txt con el formato de salida de ANSYS. Incluye un modo para leer solo los resultados finales en los puntos contemplados.

```
function [C_v,C_c]=Lector( Vanos, L )
% Lector: Lee los puntos de un archivo de texto con las deformaciones de
% crucetas y vanos
% Entrada: ninguna
% Salida: Matriz de deformaciones de la mitad de los vanos C_v y de las
% crucetas C_c

%% Lector de puntos

%
fileid=fopen('C:\Users\danie\Desktop\TFG\Modelos\20180322_Linea_6_300_files\dp0\SYS-2\MECH\ux_v.out');
```

```

% C_x=cell2mat(textscan(fileid,' %f %f','headerlines',20));
% fclose(fileid);
%
%
fileid=fopen('C:\Users\danie\Desktop\TFG\Modelos\20180322_Linea_6_300_files\dp0\SYS-2\MECH\uy_v.out');
% C_y=cell2mat(textscan(fileid,' %f %f','headerlines',20));
% fclose(fileid);
%
%
fileid=fopen('C:\Users\danie\Desktop\TFG\Modelos\20180322_Linea_6_300_files\dp0\SYS-2\MECH\uz_v.out');
% C_z=cell2mat(textscan(fileid,' %f %f','headerlines',20));
% fclose(fileid);
%
% C_v=horzcat(C_x,C_y(:,2),C_z(:,2));
%
%
fileid=fopen('C:\Users\danie\Desktop\TFG\Modelos\20180322_Linea_6_300_files\dp0\SYS-2\MECH\ux_c.out');
% C_x=cell2mat(textscan(fileid,' %f %f','headerlines',20));
% fclose(fileid);
%
%
fileid=fopen('C:\Users\danie\Desktop\TFG\Modelos\20180322_Linea_6_300_files\dp0\SYS-2\MECH\uy_c.out');
% C_y=cell2mat(textscan(fileid,' %f %f','headerlines',20));
% fclose(fileid);
%
%
fileid=fopen('C:\Users\danie\Desktop\TFG\Modelos\20180322_Linea_6_300_files\dp0\SYS-2\MECH\uz_c.out');
% C_z=cell2mat(textscan(fileid,' %f %f','headerlines',20));
% fclose(fileid);
%
% C_c=horzcat(C_x,C_y(:,2),C_z(:,2));

%% Lector por steps

for i=1:(Vanos-1)
    k=1;
    T=[];
    fileid=fopen(sprintf('C:\\Users\\danie\\Desktop\\TFG\\Modelos\\20180411_Linea_%d_%d_files\\dp0\\SYS-8\\MECH\\',k,i));
    while k>0
        if i<3
            if k==1
                M=cell2mat(textscan(fileid,' %f %f %f %f','headerlines',30));
            else
                M=cell2mat(textscan(fileid,' %f %f %f %f','headerlines',14));
            end
        else
            if k==1
                M=cell2mat(textscan(fileid,' %f %f %f %f','headerlines',24));
            else
                M=cell2mat(textscan(fileid,' %f %f %f %f','headerlines',14));
            end
        end

        if k==1
            T=M;
        else
            T=vertcat(T,M);
        end

        if length(M(:,1))==50
            k=k+1;
        else
            k=0;
        end
    end

    if i==1
        C_c=T;
    else
        C_c=cat(3,C_c,T);
    end
    fclose(fileid);
end

```

```

end

for i=1:Vanos
    k=1;
    T=[];
    fileid=fopen(sprintf('C:\\Users\\danie\\Desktop\\TFG\\Modelos\\20180411_Linea_%d_%d_files\\dp0\\SYS-8\\',i,k));
    while k>0
        if i<2
            if k==1
                M=cell2mat(textscan(fileid,'%f %f %f %f','headerlines',30));
            else
                M=cell2mat(textscan(fileid,'%f %f %f %f','headerlines',14));
            end
        else
            if k==1
                M=cell2mat(textscan(fileid,'%f %f %f %f','headerlines',24));
            else
                M=cell2mat(textscan(fileid,'%f %f %f %f','headerlines',14));
            end
        end
        end

        if k==1
            T=M;
        else
            T=vertcat(T,M);
        end

        if length(M(:,1))==50
            k=k+1;
        else
            k=0;
        end
    end

    if i==1
        C_v=T;
    else
        C_v=cat(3,C_v,T);
    end
    fclose(fileid);
end
end

```

3.3. Superficies_estabilidad.m

Genera las superficies de estabilidad de la línea a partir de los .mat.

```

%% Superficies_estabilidad.m

% Genera las superficies de estabilidad de la línea a partir de una
% matriz de variables generada en Toma_de_datos. Genera los diferentes
% plot que pueden ser necesarios

clc
clearvars -except P_c P_v

%% Procesamiento de datos
Vanos=4;
L=450;
angulo=11; %Último ángulo

R=load(sprintf('Datos Brutos\\%d_%d.mat',Vanos,L));
diametro=0.02772;
angulo_i=0:pi()/20:pi()/2;
q_x=diametro*10*50*(140*sin(angulo_i)./120).^2;
q_z=-diametro*10*50*(140*cos(angulo_i)./120).^2;
mag=diametro*10*50*(140/120)^2;
S_v=[]; %Matriz de la superficie de vano
S_c=[]; %Matriz de la superficie de cruceta

for a=1:angulo
    M_c=[];

```

```

M_v=[];
%Crucetas
for i=1:(Vanos-1)
    t_0=R.cruceta{a}(1,1,i);
    for j=1:length(R.cruceta{a}(:, :, i))
        %Calcula def total
        R.cruceta{a}(j,5,i)=sqrt(R.cruceta{a}(j,2,i)^2+R.cruceta{a}(j,3,i)^2+R.cruceta{a}(j,4,i)^2);
        %Transforma tiempo en carga
        R.cruceta{a}(j,1,i)=R.cruceta{a}(j,1,i)-t_0;
        R.cruceta{a}(j,1,i)=mag*R.cruceta{a}(j,1,i);
        %Transforma carga en velocidad
        R.cruceta{a}(j,1,i)=sqrt(R.cruceta{a}(j,1,i)/diametro/10/50)*120;
    end
end

%Vanos
for i=1:Vanos
    t_0=R.vano{a}(1,1,i);
    for j=1:length(R.vano{a}(:, :, i))
        %Calcula def total
        R.vano{a}(j,5,i)=sqrt(R.vano{a}(j,2,i)^2+R.vano{a}(j,3,i)^2+R.vano{a}(j,4,i)^2);
        %Transforma tiempo en carga
        R.vano{a}(j,1,i)=R.vano{a}(j,1,i)-t_0;
        R.vano{a}(j,1,i)=mag*R.vano{a}(j,1,i);
        %Transforma carga en velocidad
        R.vano{a}(j,1,i)=sqrt(R.vano{a}(j,1,i)/diametro/10/50)*120;
    end
end

M_v(:,1)=R.vano{a}(:,1,1); %Velocidades
M_v(:,2)=(a-1)*9*ones(length(M_v(:,1)),1); %Ángulo
M_v(:,3)=max(abs(R.vano{a}(:,4,:)), [],3); %Deformaciones máximas
S_v=vertcat(S_v,M_v);

M_c(:,1)=R.cruceta{a}(:,1,1); %Velocidades
M_c(:,2)=(a-1)*9*ones(length(M_c(:,1)),1); %Ángulo
M_c(:,3)=max(abs(R.cruceta{a}(:,4,:)), [],3); %Deformaciones máximas
S_c=vertcat(S_c,M_c);
end

V_v=scatteredInterpolant(S_v(:,1),S_v(:,2),S_v(:,3));
V_c=scatteredInterpolant(S_c(:,1),S_c(:,2),S_c(:,3));
V_v.Method='natural';
V_c.Method='natural';

xlin = linspace(0,140,101);
ylin = linspace(0,90,11);
[X,Y] = meshgrid(xlin,ylin);
Z=0*X+0*Y+1.1;

figure(1);
plot3(S_c(:,1),S_c(:,2),S_c(:,3),'.','MarkerSize',10);
hold on
% sfc_c=surfc(X,Y,V_c(X,Y));
f_c=fit([S_c(:,1),S_c(:,2)],S_c(:,3),'biharmonicinterp');
plot(f_c);
colormap jet;
caxis([0 2]);
xlim([0 140]);
ylim([0 90]);
zlim([0 inf]);
% plot3(F_c(:,1),F_c(:,2),F_c(:,3),'-r','MarkerSize',10);
% sfc_z=surfc(X,Y,Z);
colorbar;
% sfc_c(1).EdgeColor='none';
% sfc_z(1).EdgeColor='none';
% sfc_z(1).FaceAlpha=0.3;
hold off

figure(2);
plot3(S_v(:,1),S_v(:,2),S_v(:,3),'.','MarkerSize',10);
hold on
colorbar;
% sfc_v=surfc(X,Y,V_v(X,Y));
f_v=fit([S_v(:,1),S_v(:,2)],S_v(:,3),'biharmonicinterp');
plot(f_v)

```

```

xlim([0 140]);
ylim([0 90]);
zlim([0 inf]);
% sfc_v(1).EdgeColor='none';
hold off

figure(3);
contour_c=contourf(X,Y,f_c(X,Y),30);
set(gca,'YTick',0:10:90)
set(gca,'YTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
char(176)),sprintf('90 %c', char(176))})
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
colormap jet;
caxis([0 2]);
xlim([0 140]);
ylim([0 90]);
zlim([0 inf]);
h = colorbar;
set(get(h,'label'),'string','Desplazamiento [m]');

figure(4);
contour_c=contourf(X,Y,f_v(X,Y),30);
set(gca,'YTick',0:10:90)
set(gca,'YTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
char(176)),sprintf('90 %c', char(176))})
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
h = colorbar;
xlim([0 140]);
ylim([0 90]);
zlim([0 inf]);
set(get(h,'label'),'string','Desplazamiento [m]');

figure(1);
grid on;
set(gca,'YTick',0:10:90)
set(gca,'YTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
char(176)),sprintf('90 %c', char(176))})
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
zlabel('Desplazamiento [m]');

figure(2);
grid on;
set(gca,'YTick',0:10:90)
set(gca,'YTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
char(176)),sprintf('90 %c', char(176))})
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
zlabel('Desplazamiento [m]');

saveas(figure(1),sprintf('Datos brutos// %d_%d_crucetas',Vanos,L));
saveas(figure(1),sprintf('Datos brutos// %d_%d_crucetas.png',Vanos,L));
saveas(figure(2),sprintf('Datos brutos// %d_%d_vanos',Vanos,L));
saveas(figure(2),sprintf('Datos brutos// %d_%d_vanos.png',Vanos,L));
saveas(figure(3),sprintf('Datos brutos// %d_%d_crucetas_Isosuperficies',Vanos,L));
saveas(figure(3),sprintf('Datos brutos// %d_%d_crucetas_Isosuperficies.png',Vanos,L));
saveas(figure(4),sprintf('Datos brutos// %d_%d_vanos_Isosuperficies',Vanos,L));
saveas(figure(4),sprintf('Datos brutos// %d_%d_vanos_Isosuperficies.png',Vanos,L));

figure(3);
contour_c=contourf(X,Y,f_c(X,Y),30);
set(gca,'YTick',0:10:90)
set(gca,'YTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',

```

```

char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
char(176)), sprintf('90 %c', char(176)));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
caxis([0 2]);
h = colorbar;
set(get(h, 'label'), 'string', 'Displacement [m]');

figure(4);
contour_c=contourf(X,Y,f_v(X,Y),30);
set(gca, 'YTick', 0:10:90)
set(gca, 'YTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
char(176)), sprintf('90 %c', char(176))});
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
h = colorbar;
set(get(h, 'label'), 'string', 'Displacement [m]');

figure(1);
grid on;
set(gca, 'YTick', 0:10:90)
set(gca, 'YTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
char(176)), sprintf('90 %c', char(176))});
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
zlabel('Displacement [m]');
caxis([0 2]);
h = colorbar;
set(get(h, 'label'), 'string', 'Displacement [m]');

figure(2);
grid on;
set(gca, 'YTick', 0:10:90)
set(gca, 'YTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
char(176)), sprintf('90 %c', char(176))});
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
zlabel('Displacement [m]');
h = colorbar;
set(get(h, 'label'), 'string', 'Displacement [m]');

saveas(figure(1), sprintf('Datos brutos//Traducido// %d_%d_crucetas', Vanos, L));
saveas(figure(1), sprintf('Datos brutos//Traducido// %d_%d_crucetas.png', Vanos, L));
saveas(figure(2), sprintf('Datos brutos//Traducido// %d_%d_vanos', Vanos, L));
saveas(figure(2), sprintf('Datos brutos//Traducido// %d_%d_vanos.png', Vanos, L));
saveas(figure(3), sprintf('Datos brutos//Traducido// %d_%d_crucetas_Isosuperficies', Vanos, L));
saveas(figure(3), sprintf('Datos
brutos//Traducido// %d_%d_crucetas_Isosuperficies.png', Vanos, L));
saveas(figure(4), sprintf('Datos brutos//Traducido// %d_%d_vanos_Isosuperficies', Vanos, L));
saveas(figure(4), sprintf('Datos brutos//Traducido// %d_%d_vanos_Isosuperficies.png', Vanos, L));

%% Curvas interpoladas en v máxima
j=1;
for i=0:90
    Item_c(j,1)=i;
    Item_v(j,1)=i;
    Item_c(j,2)=f_c(140, i);
    Item_v(j,2)=f_v(140, i);
    j=j+1;
end

P_c{Vanos}=Item_c;
P_v{Vanos}=Item_v;

save(sprintf('Datos brutos\\Curva_ %d_%d.mat', Vanos, L), 'P_c', 'P_v');

```

3.4. Series_dinamico.m

Trata los datos leídos en Toma_de_datos.m para los modelos dinámicos y los analiza.

```

%% Series_dinamico_uniforme.m

% Genera y procesa los datos provenientes del sistema dinámico uniforme

clc
clear all

%% Procesamiento de datos

T_c=[]; %Matriz vanos-def max-ángulo en crucetas
T_v=[]; %Matriz vanos-def max-ángulo en vanos
Tb_c=[];
Tb_v=[];

L=450;
Vanos=4;
intervalos=1;
simulaciones=30;
diametro=0.02772;

for simulacion=1:simulaciones

    R=load(sprintf('Datos
        Brutos\Dinamico\Dinamico_%d_%d_%d.mat',Vanos,L,intervalos,simulacion));
    M_v=[];
    M_c=[];

    M_v(:,1)=R.vano{end}(:,1,1); %Velocidades
    M_v(:,2)=max(abs(R.vano{end}(:,4,:)), [], 3); %Deformaciones máximas
    M_v(:,3)=simulacion*ones(length(M_v(:,1)),1);
    Err_v(simulacion,:)=[simulacion mean(M_v(:,2)) std(M_v(:,2))];
    Pico_v(simulacion,:)=[simulacion max(M_v(:,2))];

    M_c(:,1)=R.cruceta{end}(:,1,1); %Velocidades
    M_c(:,2)=max(abs(R.cruceta{end}(:,4,:)), [], 3); %Deformaciones máximas
    M_c(:,3)=simulacion*ones(length(M_c(:,1)),1);
    Err_c(simulacion,:)=[simulacion mean(M_c(:,2)) std(M_c(:,2))];
    Pico_c(simulacion,:)=[simulacion max(M_c(:,2))];

    T_c=vertcat(T_c,M_c);
    T_v=vertcat(T_v,M_v);

end

ErrT_c=[mean(Err_c(:,2)) std(Err_c(:,2))];
PicoT_c=[mean(Pico_c(:,2)) std(Pico_c(:,2))];

ErrT_v=[mean(Err_v(:,2)) std(Err_v(:,2))];
PicoT_v=[mean(Pico_v(:,2)) std(Pico_v(:,2))];

%% CDF y Probabilidad

fig1=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
h_c=histogram(T_c(:,2),'Normalization','cdf');
grid on
hold on;
cdfplot(T_c(:,2));
title('');
xlabel('Desplazamiento máximo [m]');
ylabel('P(x)');
hold off;
saveas(fig1,sprintf('Datos Brutos\Dinamico\CDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig1,sprintf('Datos Brutos\Dinamico\CDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d.png',Vanos,
    L, intervalos));
xlabel('Maximum Displacement [m]')
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\CDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d',Vanos, L, intervalos));

```

```

saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\CDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));

fig2=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
h_c=histogram(T_c(:,2), 'Normalization', 'pdf');
grid on
xlabel('Desplazamiento [m]')
ylabel('P(x)');
saveas(fig2, sprintf('Datos Brutos\Dinamico\PDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig2, sprintf('Datos Brutos\Dinamico\PDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos));
xlabel('Displacement [m]')
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\PDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\PDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));

fig3=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
histogram(Pico_c(:,2), 'Normalization', 'pdf');
grid on
xlabel('Desplazamiento máximo [m]')
ylabel('P(x)');
saveas(fig3, sprintf('Datos Brutos\Dinamico\PDF_picos_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig3, sprintf('Datos Brutos\Dinamico\PDF_picos_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Maximum Displacement [m]')
saveas(fig3, sprintf('Datos Brutos\Traducido\Dinamico\PDF_picos_crucetas_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos));
saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\PDF_picos_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));

fig4=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
histogram(Pico_c(:,2), 'Normalization', 'cdf');
hold on
[f,x]=ecdf(Pico_c(:,2));
plot(x, f);
grid on
xlabel('Desplazamiento máximo [m]')
ylabel('P(x)');
saveas(fig4, sprintf('Datos Brutos\Dinamico\CDF_picos_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig4, sprintf('Datos Brutos\Dinamico\CDF_picos_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Maximum Displacement [m]')
saveas(fig4, sprintf('Datos Brutos\Traducido\Dinamico\CDF_picos_crucetas_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos));
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\CDF_picos_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
hold off

%% Plots

fig1=figure;
errorbar(Err_c(:,1), Err_c(:,2), Err_c(:,3), '-.', 'MarkerSize', 10);
grid on;
xlim([0 simulaciones+1]);
xlabel('Simulación');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\Dinamico\Desviaciones_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\Dinamico\Desviaciones_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
xlabel('Simulation');
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\Desviaciones_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\Desviaciones_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));

```

```

fig2=figure;
errorbar(Err_v(:,1),Err_v(:,2),Err_v(:,3),'-','MarkerSize',10);
grid on;
xlim([0 simulaciones+1]);
xlabel('Simulación');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig2,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_simulaciones_vanos_%d_%d_%d',Vanos,
L, intervalos));
saveas(fig2,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_simulaciones_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos, L, intervalos));
xlabel('Simulation');
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig2,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_simulaciones_vanos_%d_%d_%d',Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig2,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_simulaciones_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
intervalos));

fig3=figure;
plot(Pico_c(:,1),Pico_c(:,2),'-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
plot(Err_c(:,1),Err_c(:,2),'-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores medios');
grid on;
legend({'Valores extremos','Valores medios'},'Location','northwest');
xlim([0 simulaciones+1]);
xlabel('Simulación');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig3,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d',Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig3,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d.png',Vanos,
L, intervalos));
xlabel('Simulation');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values','Mean values'},'Location','northwest');
saveas(fig3,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d',Vanos, L, intervalos));
saveas(fig3,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
intervalos));
hold off

fig4=figure;
plot(Pico_v(:,1),Pico_v(:,2),'-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
plot(Err_v(:,1),Err_v(:,2),'-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores medios');
grid on;
legend({'Valores extremos','Valores medios'},'Location','northwest');
xlim([0 simulaciones+1]);
ylim([10 18]);
xlabel('Simulación');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig4,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_simulaciones_vanos_%d_%d_%d',Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig4,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_simulaciones_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
intervalos));
xlabel('Simulation');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values','Mean values'},'Location','northwest');
saveas(fig4,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_simulaciones_vanos_%d_%d_%d',Vanos, L, intervalos));
saveas(fig4,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_simulaciones_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
intervalos));
hold off

fig5=figure;
plot(Pico_c(:,1),Pico_c(:,2),'-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Err_c(:,1),Err_c(:,2),Err_c(:,3),'-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
medios');
grid on;
legend({'Valores extremos','Valores medios'},'Location','northwest');
xlim([0 simulaciones+1]);

```

```

xlabel('Simulación');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparativa_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparativa_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
xlabel('Simulation');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values', 'Mean values'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparativa_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparativa_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
hold off

fig6=figure;
plot(Pico_v(:,1), Pico_v(:,2), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
errorbar(Err_v(:,1), Err_v(:,2), Err_v(:,3), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores
    medios');
grid on;
legend({'Valores extremos', 'Valores medios'}, 'Location', 'northwest');
xlim([0 simulaciones+1]);
ylim([8 18]);
xlabel('Simulación');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig6, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Comparativa_simulaciones_vanos_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos));
saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparativa_simulaciones_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
xlabel('Simulation');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values', 'Mean values'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparativa_simulaciones_vanos_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparativa_simulaciones_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
hold off

%% Box plots

fig1=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
boxplot(T_c(:,2), T_c(:,3));
grid on;
xlabel('Simulación');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_simulaciones_crucetas_box_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_simulaciones_crucetas_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Simulation');
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_simulaciones_crucetas_box_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_simulaciones_crucetas_box_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos));

fig2=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
boxplot(T_v(:,2), T_v(:,3));
grid on;
xlabel('Simulación');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_simulaciones_vanos_box_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_simulaciones_vanos_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Simulation');

```

```

ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_simulaciones_vanos_box_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_simulaciones_vanos_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));

fig4=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
plot(Pico_v(:,1),Pico_v(:,2),'.-', 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
boxplot(T_v(:,2),T_v(:,3));
grid on;
legend({'Valores extremos', 'Valores medios'}, 'Location', 'northwest');
xlim([0 simulaciones+1]);
xlabel('Simulación');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig4, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_simulaciones_vanos_box_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Picos_simulaciones_vanos_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
xlabel('Simulation');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values', 'Mean values'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_simulaciones_vanos_box_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_simulaciones_vanos_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
hold off

fig5=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
plot(Pico_c(:,1),Pico_c(:,2),'.-', 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
boxplot(T_c(:,2),T_c(:,3));
grid on;
legend({'Valores extremos', 'Valores medios'}, 'Location', 'northwest');
xlim([0 simulaciones+1]);
xlabel('Simulación');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig5, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_simulaciones_crucetas_box_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos));
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Picos_simulaciones_crucetas_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
xlabel('Simulation');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values', 'Mean values'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_simulaciones_crucetas_box_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_simulaciones_crucetas_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
hold off

%% Variación de ángulos
clear all
clc

T_c=[]; %Matriz vanos-def max-ángulo en crucetas
T_v=[]; %Matriz vanos-def max-ángulo en vanos
Tb_c=[];
Tb_v=[];

L=450;
Vanos=4;
intervalos=4;
simulaciones=10;
diametro=0.02772;
angulos=0:10:90;

for simulacion=1:simulaciones

```

```

R=load(sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Angulos\\Dinamico_%d_%d_%d.mat',Vanos,L,intervalos,simulacion));
M_v=[];
M_c=[];

M_v(:,1)=R.vano{end}(:,1,1); %Velocidades
M_v(:,2)=max(abs(R.vano{end}(:,4,:)),[],3); %Deformaciones máximas
M_v(:,3)=(simulacion-1)*10*ones(length(M_v(:,1)),1);
Err_v(simulacion,:)=[angulos(simulacion) mean(M_v(:,2)) std(M_v(:,2))];
Pico_v(simulacion,:)=[angulos(simulacion) max(M_v(:,2))];

M_c(:,1)=R.cruceta{end}(:,1,1); %Velocidades
M_c(:,2)=max(abs(R.cruceta{end}(:,4,:)),[],3); %Deformaciones máximas
M_c(:,3)=(simulacion-1)*10*ones(length(M_c(:,1)),1);
Err_c(simulacion,:)=[angulos(simulacion) mean(M_c(:,2)) std(M_c(:,2))];
Pico_c(simulacion,:)=[angulos(simulacion) max(M_c(:,2))];

T_c=vertcat(T_c,M_c);
T_v=vertcat(T_v,M_v);
end

%% Plots Ángulos

fig1=figure;
errorbar(Err_c(:,1),Err_c(:,2),Err_c(:,3),'.-','MarkerSize',10);
grid on;
xlim([0 90]);
set(gca,'XTick',0:10:90)
set(gca,'XTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
    char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
    char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
    char(176)),sprintf('90 %c', char(176))});
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig1,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_crucetas_%d_%d_%d',Vanos,L,
    intervalos));
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_crucetas_%d_%d_%d.png',Vanos,L,intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]',char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_crucetas_%d_%d_%d',Vanos,L,
    intervalos));
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_crucetas_%d_%d_%d.png',Vanos,L,
    intervalos));

fig2=figure;
errorbar(Err_v(:,1),Err_v(:,2),Err_v(:,3),'.-','MarkerSize',10);
grid on;
xlim([0 90]);
set(gca,'XTick',0:10:90)
set(gca,'XTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
    char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
    char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
    char(176)),sprintf('90 %c', char(176))});
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig2,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_%d_%d_%d',Vanos,L,
    intervalos));
saveas(fig2,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos,
    L,intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]',char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig2,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_%d_%d_%d',Vanos,L,intervalos));
saveas(fig2,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos,L,
    intervalos));

fig3=figure;
plot(Pico_c(:,1),Pico_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
plot(Err_c(:,1),Err_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores medios');

```

```

grid on;
xlim([0 90]);
legend({'Valores extremos', 'Valores medios'}, 'Location', 'northwest');
set(gca, 'XTick', 0:10:90)
set(gca, 'XTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
char(176)), sprintf('90 %c', char(176))});
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]', char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig3, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_angulo_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig3, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_angulo_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values', 'Mean values'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig3, sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_angulo_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig3, sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_angulo_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
hold off

fig4=figure;
plot(Pico_v(:,1), Pico_v(:,2), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
plot(Err_v(:,1), Err_v(:,2), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores medios');
grid on;
legend({'Valores extremos', 'Valores medios'}, 'Location', 'northwest');
set(gca, 'XTick', 0:10:90)
set(gca, 'XTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
char(176)), sprintf('90 %c', char(176))});
xlim([0 90]);
ylim('auto');
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]', char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig4, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_angulo_vanos_%d_%d_%d', Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig4, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_angulo_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values', 'Mean values'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig4, sprintf('Datos Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_angulo_vanos_%d_%d_%d', Vanos,
L, intervalos));
saveas(fig4, sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_angulo_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
hold off

fig5=figure;
plot(Pico_c(:,1), Pico_c(:,2), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
errorbar(Err_c(:,1), Err_c(:,2), Err_c(:,3), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores
medios');
grid on;
legend({'Valores extremos', 'Valores medios'}, 'Location', 'northwest');
set(gca, 'XTick', 0:10:90)
set(gca, 'XTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
char(176)), sprintf('90 %c', char(176))});
xlim([0 90]);
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]', char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig5, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Comparativa_angulo_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig5, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Comparativa_angulo_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos,
L, intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values', 'Mean values'}, 'Location', 'northwest');

```

```

saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\Comparativa_angulo_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\Comparativa_angulo_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
intervalos));
hold off

fig6=figure;
plot(Pico_v(:,1),Pico_v(:,2),'.-', 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
errorbar(Err_v(:,1),Err_v(:,2),Err_v(:,3),'.-', 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores
medios');
grid on;
legend({'Valores extremos', 'Valores medios'}, 'Location', 'northwest');
set(gca, 'XTick', 0:10:90)
set(gca, 'XTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
char(176)), sprintf('90 %c', char(176))})
xlim([0 90]);
ylim('auto');
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]', char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig6, sprintf('Datos Brutos\Dinamico\Comparativa_angulo_vanos_%d_%d_%d', Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig6, sprintf('Datos Brutos\Dinamico\Comparativa_angulos_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos,
L, intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values', 'Mean values'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\Comparativa_angulo_vanos_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\Comparativa_angulo_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
intervalos));
hold off

fig7=figure;
plot(Err_v(:,1),Err_v(:,3),'.-', 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
grid on;
set(gca, 'XTick', 0:10:90)
set(gca, 'XTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
char(176)), sprintf('90 %c', char(176))})
xlim([0 90]);
ylim('auto');
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]', char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig7, sprintf('Datos Brutos\Dinamico\STD_angulo_vanos_%d_%d_%d', Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig7, sprintf('Datos Brutos\Dinamico\STD_angulo_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig7, sprintf('Datos Brutos\Traducido\Dinamico\STD_angulo_vanos_%d_%d_%d', Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig7, sprintf('Datos Brutos\Traducido\Dinamico\STD_angulo_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos,
L, intervalos));
hold off

fig8=figure;
plot(Err_c(:,1),Err_c(:,3),'.-', 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
grid on;
set(gca, 'XTick', 0:10:90)
set(gca, 'XTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
char(176)), sprintf('90 %c', char(176))})
xlim([0 90]);
ylim('auto');
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]', char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig8, sprintf('Datos Brutos\Dinamico\STD_angulo_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L,
intervalos));

```

```

saveas(fig8, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\STD_angulo_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig8, sprintf('Datos Brutos\\Traducido\\Dinamico\\STD_angulo_crucetas_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos));
saveas(fig8, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\STD_angulo_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
hold off
%% Box plots

fig1=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
boxplot(T_c(:,2), T_c(:,3));
grid on;
set(gca, 'XTick', 1:1:10)
set(gca, 'XTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
    char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
    char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
    char(176)), sprintf('90 %c', char(176))});
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]', char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_crucetas_box_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_crucetas_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_crucetas_box_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_crucetas_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));

fig2=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
boxplot(T_v(:,2), T_v(:,3));
grid on;
set(gca, 'XTick', 1:1:10)
set(gca, 'XTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
    char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
    char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
    char(176)), sprintf('90 %c', char(176))});
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]', char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig2, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_box_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos));
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_box_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));

%% Comparación con estático
P=load(sprintf('Datos brutos\\Curva_%d_%d.mat', Vanos, L));

Ideal_c=P.P_c{4};
Ideal_v=P.P_v{4};

%% Plots comparacion estático

fig1=figure;
errorbar(Err_c(:,1), Err_c(:,2), Err_c(:,3), '-.', 'MarkerSize', 10);
hold on;
plot(Ideal_c(:,1), Ideal_c(:,2), 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
grid on;
legend('Dinámico', 'Estático');
xlim([0 90]);
set(gca, 'XTick', 0:10:90)

```

```

set(gca,'XTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
char(176)),sprintf('90 %c', char(176))})
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig1,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_cruceetas_estatico_ %d_ %d_ %d',Vanos, L, intervalos));
saveas(fig1,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_cruceetas_estatico_ %d_ %d_ %d.png',Vanos, L,
intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]',char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend('Dynamic','Static');
saveas(fig1,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_cruceetas_estatico_ %d_ %d_ %d',Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig1,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_cruceetas_estatico_ %d_ %d_ %d.png',Vanos,
L, intervalos));
hold off

fig2=figure;
errorbar(Err_v(:,1),Err_v(:,2),Err_v(:,3),'.-','MarkerSize',10);
hold on;
plot(Ideal_v(:,1),Ideal_v(:,2),'MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
grid on;
xlim([0 90]);
set(gca,'XTick',0:10:90)
set(gca,'XTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
char(176)),sprintf('90 %c', char(176))})
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
legend('Dinámico','Estático');
saveas(fig2,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_estatico_ %d_ %d_ %d',Vanos, L, intervalos));
saveas(fig2,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_estatico_ %d_ %d_ %d.png',Vanos, L, intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]',char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend('Dynamic','Static');
saveas(fig2,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_estatico_ %d_ %d_ %d',Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig2,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_estatico_ %d_ %d_ %d.png',Vanos, L,
intervalos));
hold off

fig3=figure;
plot(Pico_c(:,1),Pico_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
plot(Err_c(:,1),Err_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores medios');
hold on;
plot(Ideal_c(:,1),Ideal_c(:,2),'MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
grid on;
xlim([0 90]);
legend({'Valores extremos dinámico','Valores medios
dinámico','Estático'},'Location','northwest');
set(gca,'XTick',0:10:90)
set(gca,'XTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
char(176)),sprintf('90 %c', char(176))})
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig3,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_angulo_cruceetas_estatico_ %d_ %d_ %d',Vanos,
L, intervalos));
saveas(fig3,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Picos_angulo_cruceetas_estatico_ %d_ %d_ %d.png',Vanos, L, intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]',char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values','Mean values','Static'},'Location','northwest');

```

```

saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_angulo_crucetas_estatico_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_angulo_crucetas_estatico_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
hold off

fig4=figure;
plot(Pico_v(:,1), Pico_v(:,2), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
plot(Err_v(:,1), Err_v(:,2), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores medios');
hold on;
plot(Ideal_v(:,1), Ideal_v(:,2), 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
grid on;
legend({'Valores extremos', 'Valores medios', 'Estático'}, 'Location', 'northwest');
set(gca, 'XTick', 0:10:90)
set(gca, 'XTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
    char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
    char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
    char(176)), sprintf('90 %c', char(176))})
xlim([0 90]);
ylim('auto');
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]', char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig4, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_angulo_vanos_estatico_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig4, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_angulo_vanos_estatico_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values', 'Mean values', 'Static'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_angulo_vanos_estatico_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_angulo_vanos_estatico_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
hold off

fig5=figure;
plot(Pico_c(:,1), Pico_c(:,2), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
errorbar(Err_c(:,1), Err_c(:,2), Err_c(:,3), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores
    medios');
hold on;
plot(Ideal_c(:,1), Ideal_c(:,2), 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
grid on;
legend({'Valores extremos', 'Valores medios', 'Estático'}, 'Location', 'northwest');
set(gca, 'XTick', 0:10:90)
set(gca, 'XTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
    char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
    char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
    char(176)), sprintf('90 %c', char(176))})
xlim([0 90]);
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]', char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparativa_angulo_crucetas_estatico_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparativa_angulo_crucetas_estatico_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values', 'Mean values', 'Static'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparativa_angulo_crucetas_estatico_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparativa_angulo_crucetas_estatico_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
hold off

fig6=figure;
plot(Pico_v(:,1), Pico_v(:,2), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');

```

```

hold on
errorbar(Err_v(:,1),Err_v(:,2),Err_v(:,3),'.-', 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores
medios');
hold on;
plot(Ideal_v(:,1), Ideal_v(:,2), 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
grid on;
legend({'Valores extremos', 'Valores medios', 'Estático'}, 'Location', 'northwest');
set(gca, 'XTick', 0:10:90)
set(gca, 'XTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
char(176)), sprintf('90 %c', char(176))});
xlim([0 90]);
ylim('auto');
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]', char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig6, sprintf('Datos
Brutos\Dinamico\Comparativa_angulo_vanos_estatico_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig6, sprintf('Datos
Brutos\Dinamico\Comparativa_angulos_vanos_estatico_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values', 'Mean values', 'Static'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig6, sprintf('Datos
Brutos\Traducido\Dinamico\Comparativa_angulo_vanos_estatico_%d_%d_%d', Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig6, sprintf('Datos
Brutos\Traducido\Dinamico\Comparativa_angulo_vanos_estatico_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
intervalos));
hold off

%% Box plot
angulo=11; %Último ángulo

R=load(sprintf('Datos Brutos\%d_%d.mat', Vanos, L));
diametro=0.02772;
angulo_i=0:pi()/20:pi()/2;
q_x=diametro*10*50*(140*sin(angulo_i)./120).^2;
q_z=-diametro*10*50*(140*cos(angulo_i)./120).^2;
mag=diametro*10*50*(140/120)^2;
S_v=[]; %Matriz de la superficie de vano
S_c=[]; %Matriz de la superficie de cruceta

for a=1:angulo
    M_c=[];
    M_v=[];
    %Crucetas
    for i=1:(Vanos-1)
        t_0=R.cruceta{a}(1,1,i);
        for j=1:length(R.cruceta{a}(:, :, i))
            %Calcula def total
            R.cruceta{a}(j,5,i)=sqrt(R.cruceta{a}(j,2,i)^2+R.cruceta{a}(j,3,i)^2+R.cruceta{a}(j,4,i)^2);
            %Transforma tiempo en carga
            R.cruceta{a}(j,1,i)=R.cruceta{a}(j,1,i)-t_0;
            R.cruceta{a}(j,1,i)=mag*R.cruceta{a}(j,1,i);
            %Transforma carga en velocidad
            R.cruceta{a}(j,1,i)=sqrt(R.cruceta{a}(j,1,i)/diametro/10/50)*120;
        end
    end

    %Vanos
    for i=1:Vanos
        t_0=R.vano{a}(1,1,i);
        for j=1:length(R.vano{a}(:, :, i))
            %Calcula def total
            R.vano{a}(j,5,i)=sqrt(R.vano{a}(j,2,i)^2+R.vano{a}(j,3,i)^2+R.vano{a}(j,4,i)^2);
            %Transforma tiempo en carga
            R.vano{a}(j,1,i)=R.vano{a}(j,1,i)-t_0;
            R.vano{a}(j,1,i)=mag*R.vano{a}(j,1,i);
            %Transforma carga en velocidad
            R.vano{a}(j,1,i)=sqrt(R.vano{a}(j,1,i)/diametro/10/50)*120;
        end
    end

    M_v(:,1)=R.vano{a}(:,1,1); %Velocidades
    M_v(:,2)=(a-1)*9*ones(length(M_v(:,1)),1); %Ángulo

```

```

M_v(:,3)=max(abs(R.vano{a}(:,4,:)), [], 3);           %Deformaciones máximas
S_v=vertcat(S_v,M_v);

M_c(:,1)=R.cruceta{a}(:,1,1);                       %Velocidades
M_c(:,2)=(a-1)*9*ones(length(M_c(:,1)),1);         %Ángulo
M_c(:,3)=max(abs(R.cruceta{a}(:,4,:)), [], 3);     %Deformaciones máximas
S_c=vertcat(S_c,M_c);
end

V_v=scatteredInterpolant(S_v(:,1),S_v(:,2),S_v(:,3));
V_c=scatteredInterpolant(S_c(:,1),S_c(:,2),S_c(:,3));
V_v.Method='natural';
V_c.Method='natural';

rango_angulo=horzcat(140*ones(length(0:10:90),1),transpose(0:10:90));
Ideal_c=V_c(rango_angulo);
Ideal_v=V_v(rango_angulo);

Ideal_c=Ideal_c;
Ideal_v=Ideal_v;

fig1=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
boxplot(T_c(:,2),T_c(:,3));
hold on;
plot(Err_c(:,1)./10+1,Ideal_c,'MarkerSize',10);
grid on;
set(gca,'XTick',1:1:10)
set(gca,'XTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
char(176)),sprintf('90 %c', char(176))});
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig1,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_crucetas_estatico_box_%d_%d_%d',Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig1,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_crucetas_estatico_box_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]',char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig1,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_crucetas_estatico_box_%d_%d_%d',Vanos,
L, intervalos));
saveas(fig1,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_crucetas_estatico_box_%d_%d_%d.png',Vanos,
L, intervalos));
hold off

fig2=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
boxplot(T_v(:,2),T_v(:,3));
hold on;
plot(Err_v(:,1)./10+1,Ideal_v,'MarkerSize',10);
grid on;
set(gca,'XTick',1:1:10)
set(gca,'XTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
char(176)),sprintf('90 %c', char(176))});
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig2,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_estatico_box_%d_%d_%d',Vanos, L, intervalos));
saveas(fig2,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_estatico_box_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
intervalos));
xlabel(sprintf('Angle [%c]',char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig2,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_estatico_box_%d_%d_%d',Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig2,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_angulo_vanos_estatico_box_%d_%d_%d.png',Vanos,
L, intervalos));
hold off

```

```

%% Variación de velocidad
clear all
clc

T_c=[]; %Matriz vanos-def max-ángulo en crucetas
T_v=[]; %Matriz vanos-def max-ángulo en vanos

L=450;
Vanos=4;
intervalos=4;
simulaciones=14;
diametro=0.02772;
velocidades=10:10:140;

for simulacion=1:simulaciones

    R=load(sprintf('Datos
        Brutos\\Dinamico\\Velocidades\\Dinamico_%d_%d_%d_%d.mat',Vanos,L,intervalos,simulacion));
    M_v=[];
    M_c=[];

    M_v(:,1)=R.vano{end}(:,1,1); %Velocidades
    M_v(:,2)=max(abs(R.vano{end}(:,4,:)), [], 3); %Deformaciones máximas
    M_v(:,3)=simulacion*ones(length(M_v(:,1)),1);
    Err_v(simulacion,:)=velocidades(simulacion) mean(M_v(:,2)) std(M_v(:,2));
    Pico_v(simulacion,:)=velocidades(simulacion) max(M_v(:,2));

    M_c(:,1)=R.cruceta{end}(:,1,1); %Velocidades
    M_c(:,2)=max(abs(R.cruceta{end}(:,4,:)), [], 3); %Deformaciones máximas
    M_c(:,3)=simulacion*ones(length(M_c(:,1)),1);
    Err_c(simulacion,:)=velocidades(simulacion) mean(M_c(:,2)) std(M_c(:,2));
    Pico_c(simulacion,:)=velocidades(simulacion) max(M_c(:,2));

    T_c=vertcat(T_c,M_c);
    T_v=vertcat(T_v,M_v);
end

%% Plots Velocidades

fig1=figure;
errorbar(Err_c(:,1),Err_c(:,2),Err_c(:,3),'.-','MarkerSize',10);
grid on;
xlim([0 150]);
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_crucetas_%d_%d_%d',Vanos, L, intervalos));
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_crucetas_%d_%d_%d.png',Vanos, L, intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_crucetas_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_crucetas_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos));

fig2=figure;
errorbar(Err_v(:,1),Err_v(:,2),Err_v(:,3),'.-','MarkerSize',10);
grid on;
xlim([0 150]);
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig2,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_%d_%d_%d',Vanos,
    L, intervalos));
saveas(fig2,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos, L, intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig2,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos));

```

```

saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));

fig3=figure;
plot(Pico_c(:,1),Pico_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
plot(Err_c(:,1),Err_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores medios');
grid on;
xlim([0 150]);
legend({'Valores extremos','Valores medios'},'Location','northwest');
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig3, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_velocidades_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig3, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_velocidades_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values','Mean values'},'Location','northwest');
saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_velocidades_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_velocidades_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
hold off

fig4=figure;
plot(Pico_v(:,1),Pico_v(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
plot(Err_v(:,1),Err_v(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores medios');
grid on;
legend({'Valores extremos','Valores medios'},'Location','northwest');
xlim([0 150]);
ylim('auto');
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig4, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_velocidades_vanos_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig4, sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Picos_velocidades_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values','Mean values'},'Location','northwest');
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_velocidades_vanos_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_velocidades_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
hold off

fig5=figure;
plot(Pico_c(:,1),Pico_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Err_c(:,1),Err_c(:,2),Err_c(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
    medios');
grid on;
legend({'Valores extremos','Valores medios'},'Location','northwest');
xlim([0 150]);
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparativa_velocidades_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparativa_velocidades_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L, intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values','Mean values'},'Location','northwest');
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparativa_velocidades_crucetas_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparativa_velocidades_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
hold off

```

```

fig6=figure;
plot(Pico_v(:,1),Pico_v(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Err_v(:,1),Err_v(:,2),Err_v(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
medios');
grid on;
legend({'Valores extremos','Valores medios'},'Location','northwest');
xlim([0 150]);
ylim('auto');
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig6,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\Comparativa_velocidades_vanos_%d_%d_%d',Vanos,
L, intervalos));
saveas(fig6,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Comparativa_velocidades_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos, L, intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values','Mean values'},'Location','northwest');
saveas(fig6,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparativa_velocidades_vanos_%d_%d_%d',Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig6,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparativa_velocidades_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
intervalos));
hold off

fig7=figure;
plot(Err_v(:,1),Err_v(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
grid on;
xlim([0 150]);
ylim('auto');
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig7,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\STD_velocidades_vanos_%d_%d_%d',Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig7,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\STD_velocidades_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig7,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\STD_velocidades_vanos_%d_%d_%d',Vanos, L, intervalos));
saveas(fig7,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\STD_velocidades_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos, L, intervalos));;
hold off

fig8=figure;
plot(Err_c(:,1),Err_c(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
grid on;
xlim([0 150]);
ylim('auto');
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig4,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\STD_velocidades_crucetas_%d_%d_%d',Vanos, L,
intervalos));
saveas(fig4,sprintf('Datos Brutos\\Dinamico\\STD_velocidades_crucetas_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig8,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\STD_velocidades_crucetas_%d_%d_%d',Vanos, L, intervalos));
saveas(fig8,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\STD_velocidades_crucetas_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
intervalos));
hold off

%% Box plot

fig1=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
boxplot(T_c(:,2),T_c(:,3));
grid on;
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
set(gca,'XTickLabel',10:10:140);

```

```

saveas (fig1, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_crucetas_box_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas (fig1, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_crucetas_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
saveas (fig1, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_crucetas_box_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas (fig1, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_crucetas_box_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos));

fig2=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
boxplot(T_v(:,2), T_v(:,3));
grid on;
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
set(gca, 'XTickLabel', 10:10:140);
saveas (fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_box_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas (fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_box.png_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
saveas (fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_box_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas (fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_box.png_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos));

%% Comparación con estático

angulo=11; %Último ángulo

R=load(sprintf('Datos Brutos\\%d_%d.mat', Vanos, L));
diametro=0.02772;
angulo_i=0:pi()/20:pi()/2;
q_x=diametro*10*50*(140*sin(angulo_i)./120).^2;
q_z=-diametro*10*50*(140*cos(angulo_i)./120).^2;
mag=diametro*10*50*(140/120)^2;
S_v=[]; %Matriz de la superficie de vano
S_c=[]; %Matriz de la superficie de cruceta

for a=1:angulo
    M_c=[];
    M_v=[];
    %Crucetas
    for i=1:(Vanos-1)
        t_0=R.cruceta{a}(1,1,i);
        for j=1:length(R.cruceta{a}(:, :, i))
            %Calcula def total
            R.cruceta{a}(j,5,i)=sqrt(R.cruceta{a}(j,2,i)^2+R.cruceta{a}(j,3,i)^2+R.cruceta{a}(j,4,i)^2);
            %Transforma tiempo en carga
            R.cruceta{a}(j,1,i)=R.cruceta{a}(j,1,i)-t_0;
            R.cruceta{a}(j,1,i)=mag*R.cruceta{a}(j,1,i);
            %Transforma carga en velocidad
            R.cruceta{a}(j,1,i)=sqrt(R.cruceta{a}(j,1,i)/diametro/10/50)*120;
        end
    end
end

%Vanos
for i=1:Vanos
    t_0=R.vano{a}(1,1,i);
    for j=1:length(R.vano{a}(:, :, i))
        %Calcula def total
        R.vano{a}(j,5,i)=sqrt(R.vano{a}(j,2,i)^2+R.vano{a}(j,3,i)^2+R.vano{a}(j,4,i)^2);
        %Transforma tiempo en carga
        R.vano{a}(j,1,i)=R.vano{a}(j,1,i)-t_0;
        R.vano{a}(j,1,i)=mag*R.vano{a}(j,1,i);
        %Transforma carga en velocidad
    end
end

```

```

        R.vano{a}(j,1,i)=sqrt(R.vano{a}(j,1,i)/diametro/10/50)*120;
    end
end
M_v(:,1)=R.vano{a}(:,1,1);
M_v(:,2)=(a-1)*9*ones(length(M_v(:,1)),1);
M_v(:,3)=max(abs(R.vano{a}(:,4,:)), [],3);
S_v=vertcat(S_v,M_v);

M_c(:,1)=R.cruceta{a}(:,1,1);
M_c(:,2)=(a-1)*9*ones(length(M_c(:,1)),1);
M_c(:,3)=max(abs(R.cruceta{a}(:,4,:)), [],3);
S_c=vertcat(S_c,M_c);
end

V_v=scatteredInterpolant(S_v(:,1),S_v(:,2),S_v(:,3));
V_c=scatteredInterpolant(S_c(:,1),S_c(:,2),S_c(:,3));
V_v.Method='natural';
V_c.Method='natural';

rango_angulo=horzcat(transpose(10:10:140),60*ones(length(10:10:140),1));
Ideal_c=V_c(rango_angulo);
Ideal_v=V_v(rango_angulo);

%% Plots comparacion estático

fig1=figure;
errorbar(Err_c(:,1),Err_c(:,2),Err_c(:,3),'.-','MarkerSize',10);
hold on;
plot(Err_c(:,1),Ideal_c,'MarkerSize',10);
grid on;
xlim([0 150]);
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
legend('Dinámico','Estático');
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend('Dynamic','Static');
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d',Vanos,
    L, intervalos));
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d.png',Vanos,
    L, intervalos));
hold off

fig2=figure;
errorbar(Err_v(:,1),Err_v(:,2),Err_v(:,3),'.-','MarkerSize',10);
hold on;
plot(Err_v(:,1),Ideal_v,'MarkerSize',10);
grid on;
xlim([0 150]);
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
legend('Dinámico','Estático');
saveas(fig2,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig2,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend('Dynamic','Static');
saveas(fig2,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig2,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d.png',Vanos,
    L, intervalos));

```

```

hold off;

fig3=figure;
plot(Pico_c(:,1),Pico_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
plot(Err_c(:,1),Err_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores medios');
plot(Err_c(:,1),Ideal_c,'MarkerSize',10);
grid on;
xlim([0 150]);
legend({'Valores extremos','Valores medios','Estático'},'Location','northwest');
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig3,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Picos_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d',Vanos, L, intervalos));
saveas(fig3,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Picos_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values','Mean values','Static'},'Location','northwest');
saveas(fig3,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig3,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos));
hold off

fig4=figure;
plot(Pico_v(:,1),Pico_v(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
plot(Err_v(:,1),Err_v(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores medios');
plot(Err_v(:,1),Ideal_v,'MarkerSize',10);
grid on;
legend({'Valores extremos','Valores medios','Estático'},'Location','northwest');
xlim([0 150]);
ylim('auto');
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig4,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Picos_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d',Vanos, L, intervalos));
saveas(fig4,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Picos_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d.png',Vanos, L, intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values','Mean values','Static'},'Location','northwest');
saveas(fig4,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig4,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Picos_velocidades_vanos_estatico.png_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos));
hold off

fig5=figure;
plot(Pico_c(:,1),Pico_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Err_c(:,1),Err_c(:,2),Err_c(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
    medios');
plot(Err_c(:,1),Ideal_c,'MarkerSize',10);
grid on;
legend({'Valores extremos','Valores medios','Estático'},'Location','northwest');
xlim([0 150]);
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig5,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparativa_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig5,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparativa_velocidades_crucetas_estatico.png_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values','Mean values','Static'},'Location','northwest');

```

```

saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\Comparativa_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos));
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\Comparativa_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos));
hold off

fig6=figure;
plot(Pico_v(:,1),Pico_v(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Err_v(:,1),Err_v(:,2),Err_v(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
    medios');
plot(Err_v(:,1),Ideal_v,'MarkerSize',10);
grid on;
legend({'Valores extremos dinámico','Valores medios
    dinámico','Estático'},'Location','northwest');
xlim([0 150]);
ylim('auto');
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\Dinamico\Comparativa_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d', Vanos, L, intervalos));
saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\Dinamico\Comparativa_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values','Mean values','Static'},'Location','northwest');
saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\Comparativa_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\Comparativa_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos));
hold off

%% Box plot

fig1=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
boxplot(T_c(:,2),T_c(:,3));
hold on;
plot(Err_c(:,1)./10,Ideal_c,'MarkerSize',10);
grid on;
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
set(gca,'XTickLabel',10:10:140);
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\Dinamico\Desviaciones_velocidades_crucetas_estatico_box_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\Dinamico\Desviaciones_velocidades_crucetas_estatico_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\Desviaciones_velocidades_crucetas_estatico_box_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos));
saveas(fig1, sprintf('Datos
    Brutos\Traducido\Dinamico\Desviaciones_velocidades_crucetas_estatico_box_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos));
hold off

fig2=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
boxplot(T_v(:,2),T_v(:,3));
hold on;
plot(Err_v(:,1)./10,Ideal_v,'MarkerSize',10);
grid on;
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
set(gca,'XTickLabel',10:10:140);
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\Dinamico\Desviaciones_velocidades_vanos_estatico_box_%d_%d_%d', Vanos, L,
    intervalos));

```

```

saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_estatico_box_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_estatico_box_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos));
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Desviaciones_velocidades_vanos_estatico_box_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos));
hold off;

```

3.5. Uniforme_vs_distribuido.m

Genera los tratamientos estadísticos de las series de viento dinámico y las compara.

```

%% Uniforme_vs_distribuido.m

% Compara los datos del sistema uniforme y el distribuido

clc
clear all

%% Procesamiento de datos

Tu_c=[]; %Matriz vanos-def max-ángulo en crucetas
Tu_v=[]; %Matriz vanos-def max-ángulo en vanos
Td_c=[];
Td_v=[];

L=450;
Vanos=4;
intervalos_u=1;
intervalos_d=4;
simulaciones=30;
diametro=0.02772;

%% Load Uniforme
for simulacion=1:simulaciones

    Ru=load(sprintf('Datos
        Brutos\\Dinamico\\Dinamico_%d_%d_%d.mat', Vanos, L, intervalos_u, simulacion));
    Mu_v=[];
    Mu_c=[];

    Mu_v(:,1)=Ru.vano(end) (:, 1, 1); %Velocidades
    Mu_v(:,2)=max(abs(Ru.vano(end) (:, 4, :)), [], 3); %Deformaciones máximas
    Mu_v(:,3)=simulacion*ones(length(Mu_v(:,1)), 1);
    Erru_v(simulacion, :)= [simulacion mean(Mu_v(:,2)) std(Mu_v(:,2))];
    Picou_v(simulacion, :)= [simulacion max(Mu_v(:,2))];

    Mu_c(:,1)=Ru.cruceta(end) (:, 1, 1); %Velocidades
    Mu_c(:,2)=max(abs(Ru.cruceta(end) (:, 4, :)), [], 3); %Deformaciones máximas
    Mu_c(:,3)=simulacion*ones(length(Mu_c(:,1)), 1);
    Erru_c(simulacion, :)= [simulacion mean(Mu_c(:,2)) std(Mu_c(:,2))];
    Picou_c(simulacion, :)= [simulacion max(Mu_c(:,2))];

    Tu_c=vertcat(Tu_c, Mu_c);
    Tu_v=vertcat(Tu_v, Mu_v);

end

ErrTu_c=[mean(Erru_c(:,2)) std(Erru_c(:,2))];
PicoTu_c=[mean(Picou_c(:,2)) std(Picou_c(:,2))];

ErrTu_v=[mean(Erru_v(:,2)) std(Erru_v(:,2))];
PicoTu_v=[mean(Picou_v(:,2)) std(Picou_v(:,2))];

%% Load Distribuido
for simulacion=1:simulaciones

```

```

Rd=load(sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Dinamico_%d_%d_%d_%d.mat',Vanos,L,intervalos_d,simulacion));
Md_v=zeros(length(Rd.vano{end}),4);
Md_c=zeros(length(Rd.cruceta{end}),4);

Md_v(:,1)=Rd.vano{end}(:,1,1); %Velocidades
Md_v(:,2)=max(abs(Rd.vano{end}(:,4,:)),[],3); %Deformaciones máximas
Md_v(:,3)=simulacion*ones(length(Md_v(:,1)),1);
Errd_v(simulacion,:)=simulacion mean(Md_v(:,2)) std(Md_v(:,2));
Picod_v(simulacion,:)=simulacion max(Md_v(:,2));

Md_c(:,1)=Rd.cruceta{end}(:,1,1); %Velocidades
Md_c(:,2)=max(abs(Rd.cruceta{end}(:,4,:)),[],3); %Deformaciones máximas
Md_c(:,3)=simulacion*ones(length(Md_c(:,1)),1);
Errd_c(simulacion,:)=simulacion mean(Md_c(:,2)) std(Md_c(:,2));
Picod_c(simulacion,:)=simulacion max(Md_c(:,2));

Td_c=vertcat(Td_c,Md_c);
Td_v=vertcat(Td_v,Md_v);

end

ErrTd_c=[mean(Errd_c(:,2)) std(Errd_c(:,2))];
PicoTd_c=[mean(Picod_c(:,2)) std(Picod_c(:,2))];

ErrTd_v=[mean(Errd_v(:,2)) std(Errd_v(:,2))];
PicoTd_v=[mean(Picod_v(:,2)) std(Picod_v(:,2))];

%% CDF y Probabilidad

fig1=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
hu_c=histogram(Tu_c(:,2),'Normalization','cdf');
hold on
hd_c=histogram(Td_c(:,2),'Normalization','cdf');
grid on
xlabel('Desplazamiento máximo [m]');
ylabel('P(x)');
hold on;
cdfplot(Tu_c(:,2));
hold on
cdfplot(Td_c(:,2));
title('');
legend({'Uniforme','Distribuido','Uniforme','Distribuido'});
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\CDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos_u,intervalos_d));
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\CDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos_u,intervalos_d));
xlabel('Maximum Displacement [m]')
legend({'Uniform','Distributed','Uniform','Distributed'});
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\CDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos_u,intervalos_d));
saveas(fig1,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\CDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d_%d.png',Vanos,
    L, intervalos_u,intervalos_d));
hold off;

fig2=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
hu_c=histogram(Tu_c(:,2),'Normalization','pdf');
hold on
hd_c=histogram(Td_c(:,2),'Normalization','pdf');
grid on
xlabel('Desplazamiento [m]')
ylabel('P(x)');
legend({'Uniforme','Distribuido'});
saveas(fig2,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\PDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig2,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\PDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));

```

```

xlabel('Displacement [m]')
legend({'Uniform','Distributed'});
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\PDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig2, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\PDF_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d_%d.png',Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
hold off

fig3=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
histogram(Picou_c(:,2),'Normalization','pdf');
hold on
histogram(Picod_c(:,2),'Normalization','pdf');
grid on
xlabel('Desplazamiento máximo [m]')
ylabel('P(x)');
legend({'Uniforme','Distribuido'});
saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\PDF_picos_crucetas_%d_%d_%d_%d',Vanos, L, intervalos_u,
    intervalos_d));
saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\PDF_picos_crucetas_%d_%d_%d_%d.png',Vanos, L, intervalos_u,
    intervalos_d));
xlabel('Maximum Displacement [m]')
legend({'Uniform','Distributed'});
saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\PDF_picos_crucetas_%d_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\PDF_picos_crucetas_%d_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
hold off

fig4=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
histogram(Picou_c(:,2),'Normalization','cdf');
hold on
[fu,xu]=ecdf(Picou_c(:,2));
histogram(Picod_c(:,2),'Normalization','cdf');
plot(xu,fu);
hold on
[fd,xd]=ecdf(Picod_c(:,2));
plot(xd,fd);
grid on
xlabel('Desplazamiento máximo [m]')
ylabel('P(x)');
legend({'Uniforme','Distribuido','Uniforme','Distribuido'});
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\CDF_picos_crucetas_%d_%d_%d_%d',Vanos, L, intervalos_u,
    intervalos_d));
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\CDF_picos_crucetas_%d_%d_%d_%d.png',Vanos, L, intervalos_u,
    intervalos_d));
xlabel('Maximum Displacement [m]')
legend({'Uniform','Distributed','Uniform','Distributed'});
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\CDF_picos_crucetas_%d_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\CDF_picos_crucetas_%d_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
hold off

%% Plots

fig5=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
plot(Picou_c(:,1),Picou_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Erru_c(:,1),Erru_c(:,2),Erru_c(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
    medios');
hold on
plot(Picod_c(:,1),Picod_c(:,2),'*','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Errd_c(:,1),Errd_c(:,2),Errd_c(:,3),'*','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
    medios');

```

```

grid on;
legend({'Valores extremos uniforme','Valores medios uniforme','Valores extremos
distribuido','Valores medios distribuido'},'Location','northwest');
xlim([0 simulaciones+1]);
xlabel('Simulación');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig5,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d',Vanos, L,
intervalos_u));
saveas(fig5,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
intervalos_u));
xlabel('Simulation');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values uniform','Mean values uniform','Peak values distributed','Mean values
distributed'},'Location','northwest');
saveas(fig5,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d',Vanos,
L, intervalos_u));
saveas(fig5,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_simulaciones_crucetas_%d_%d_%d.png',Vanos,
L, intervalos_u));
hold off

fig6=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
plot(Picou_v(:,1),Picou_v(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Erru_v(:,1),Erru_v(:,2),Erru_v(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
medios');
hold on
plot(Picod_v(:,1),Picod_v(:,2),'*-', 'MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Errd_v(:,1),Errd_v(:,2),Errd_v(:,3),'*-', 'MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
medios');
grid on;
legend({'Valores extremos uniforme','Valores medios uniforme','Valores extremos
distribuido','Valores medios distribuido'},'Location','northwest');
xlim([0 simulaciones+1]);
ylim([8 18]);
xlabel('Simulación');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig6,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_simulaciones_vanos_%d_%d_%d',Vanos, L,
intervalos_u));
saveas(fig6,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_simulaciones_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
intervalos_u));
xlabel('Simulation');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values uniform','Mean values uniform','Peak values distributed','Mean values
distributed'},'Location','northwest');
saveas(fig6,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_simulaciones_vanos_%d_%d_%d',Vanos,
L, intervalos_u));
saveas(fig6,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_simulaciones_vanos_%d_%d_%d.png',Vanos,
L, intervalos_u));
hold off

%% Variación de ángulos
clear all
clc

Tu_c=[]; %%Matriz vanos-def max-ángulo en crucetas
Tu_v=[]; %%Matriz vanos-def max-ángulo en vanos
Td_c=[];
Td_v=[];

L=450;
Vanos=4;
intervalos_u=1;
intervalos_d=4;
simulaciones=10;
diametro=0.02772;

```

```

angulos=0:10:90;

for simulacion=1:simulaciones

    Ru=load(sprintf('Datos
        Brutos\\Dinamico\\Angulos\\Dinamico_%d_%d_%d_%d.mat',Vanos,L,intervalos_u,simulacion));
    Mu_v=[];
    Mu_c=[];

    Mu_v(:,1)=Ru.vano{end}(:,1,1); %Velocidades
    Mu_v(:,2)=max(abs(Ru.vano{end}(:,4,:)),[],3); %Deformaciones máximas
    Mu_v(:,3)=(simulacion-1)*10*ones(length(Mu_v(:,1)),1);
    Erru_v(simulacion,:)=angulos(simulacion) mean(Mu_v(:,2)) std(Mu_v(:,2));
    Picou_v(simulacion,:)=angulos(simulacion) max(Mu_v(:,2));

    Mu_c(:,1)=Ru.cruceta{end}(:,1,1); %Velocidades
    Mu_c(:,2)=max(abs(Ru.cruceta{end}(:,4,:)),[],3); %Deformaciones máximas
    Mu_c(:,3)=(simulacion-1)*10*ones(length(Mu_c(:,1)),1);
    Erru_c(simulacion,:)=angulos(simulacion) mean(Mu_c(:,2)) std(Mu_c(:,2));
    Picou_c(simulacion,:)=angulos(simulacion) max(Mu_c(:,2));

    Tu_c=vertcat(Tu_c,Mu_c);
    Tu_v=vertcat(Tu_v,Mu_v);
end

for simulacion=1:simulaciones

    Rd=load(sprintf('Datos
        Brutos\\Dinamico\\Angulos\\Dinamico_%d_%d_%d_%d.mat',Vanos,L,intervalos_d,simulacion));
    Md_v=[];
    Md_c=[];

    Md_v(:,1)=Rd.vano{end}(:,1,1); %Velocidades
    Md_v(:,2)=max(abs(Rd.vano{end}(:,4,:)),[],3); %Deformaciones máximas
    Md_v(:,3)=(simulacion-1)*10*ones(length(Md_v(:,1)),1);
    Errd_v(simulacion,:)=angulos(simulacion) mean(Md_v(:,2)) std(Md_v(:,2));
    Picod_v(simulacion,:)=angulos(simulacion) max(Md_v(:,2));

    Md_c(:,1)=Rd.cruceta{end}(:,1,1); %Velocidades
    Md_c(:,2)=max(abs(Rd.cruceta{end}(:,4,:)),[],3); %Deformaciones máximas
    Md_c(:,3)=(simulacion-1)*10*ones(length(Md_c(:,1)),1);
    Errd_c(simulacion,:)=angulos(simulacion) mean(Md_c(:,2)) std(Md_c(:,2));
    Picod_c(simulacion,:)=angulos(simulacion) max(Md_c(:,2));

    Td_c=vertcat(Td_c,Md_c);
    Td_v=vertcat(Td_v,Md_v);
end

%% Plots Ángulos

fig5=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
plot(Picou_c(:,1),Picou_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Erru_c(:,1),Erru_c(:,2),Erru_c(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
medios');
hold on
plot(Picod_c(:,1),Picod_c(:,2),'*','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Errd_c(:,1),Errd_c(:,2),Errd_c(:,3),'*','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
medios');
grid on;
legend({'Valores extremos uniforme','Valores medios uniforme','Valores extremos
distribuido','Valores medios distribuido'},'Location','northwest');
set(gca,'XTick',0:10:90)
set(gca,'XTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
char(176)),sprintf('90 %c', char(176))});
xlim([0 90]);
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig5,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_crucetas_%d_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));

```

```

saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values uniform', 'Mean values uniform', 'Peak values distributed', 'Mean values
    distributed'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_crucetas_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig5, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_crucetas_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
hold off

fig6=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
plot(Picou_v(:,1), Picou_v(:,2), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
errorbar(Erru_v(:,1), Erru_v(:,2), Erru_v(:,3), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores
    medios');
hold on
plot(Picod_v(:,1), Picod_v(:,2), '*-', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
errorbar(Errd_v(:,1), Errd_v(:,2), Errd_v(:,3), '*-', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores
    medios');
grid on;
legend({'Valores extremos uniforme', 'Valores medios uniforme', 'Valores extremos
    distribuido', 'Valores medios distribuido'}, 'Location', 'northwest');
set(gca, 'XTick', 0:10:90)
set(gca, 'XTickLabel', {sprintf('0 %c', char(176)), sprintf('10 %c', char(176)), sprintf('20 %c',
    char(176)), sprintf('30 %c', char(176)), sprintf('40 %c', char(176)), sprintf('50 %c',
    char(176)), sprintf('60 %c', char(176)), sprintf('70 %c', char(176)), sprintf('80 %c',
    char(176)), sprintf('90 %c', char(176))});
xlim([0 90]);
ylim('auto');
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]', char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulos_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
xlabel(sprintf('Angle [%c]', char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values uniform', 'Mean values uniform', 'Peak values distributed', 'Mean values
    distributed'}, 'Location', 'northwest'); saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig6, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_vanos_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
hold off

%% Comparación con estático
P=load(sprintf('Datos brutos\\Curva_%d_%d.mat', Vanos, L));

Ideal_c=P.P_c{Vanos};
Ideal_v=P.P_v{Vanos};

%% Plots comparacion estático

fig3=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
plot(Picou_c(:,1), Picou_c(:,2), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
errorbar(Erru_c(:,1), Erru_c(:,2), Erru_c(:,3), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores
    medios');
hold on;
plot(Picod_c(:,1), Picod_c(:,2), '*-', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
errorbar(Errd_c(:,1), Errd_c(:,2), Errd_c(:,3), '*-', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores
    medios');
hold on;
plot(Ideal_c(:,1), Ideal_c(:,2), 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');

```

```

grid on;
xlim([0 90]);
legend({'Valores extremos dinámico uniforme','Valores medios dinámico uniforme','Valores
extremos dinámico distribuido','Valores medios dinámico
distribuido','Estático'},'Location','northwest');
set(gca,'XTick',0:10:90)
set(gca,'XTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
char(176)),sprintf('90 %c', char(176))});
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig3,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_crucetas_estatico_%d_%d_%d_%d',Vanos, L,
intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig3,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_crucetas_estatico_%d_%d_%d_%d.png',Vanos,
L, intervalos_u, intervalos_d));
xlabel(sprintf('Angle [%c]',char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values uniform dynamic','Mean values uniform dynamic','Peak values distributed
dynamic','Mean values distributed dynamic','Static'},'Location','northwest');
saveas(fig3,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_crucetas_estatico_%d_%d_%d_%d',Vanos,
L, intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig3,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_crucetas_estatico_%d_%d_%d_%d.png',Vanos,
L, intervalos_u, intervalos_d));
hold off

fig4=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
plot(Picou_v(:,1),Picou_v(:,2),'-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Erru_v(:,1),Erru_v(:,2),Erru_v(:,3),'-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
medios');
hold on;
plot(Picod_v(:,1),Picod_v(:,2),'*','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Errd_v(:,1),Errd_v(:,2),Errd_v(:,3),'*','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
medios');
hold on;
plot(Ideal_v(:,1),Ideal_v(:,2),'MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
grid on;
xlim([0 90]);
legend({'Valores extremos dinámico uniforme','Valores medios dinámico uniforme','Valores
extremos dinámico distribuido','Valores medios dinámico
distribuido','Estático'},'Location','northwest');
set(gca,'XTick',0:10:90)
set(gca,'XTickLabel',{sprintf('0 %c', char(176)),sprintf('10 %c', char(176)),sprintf('20 %c',
char(176)),sprintf('30 %c', char(176)),sprintf('40 %c', char(176)),sprintf('50 %c',
char(176)),sprintf('60 %c', char(176)),sprintf('70 %c', char(176)),sprintf('80 %c',
char(176)),sprintf('90 %c', char(176))});
xlabel(sprintf('Ángulo [%c]',char(176)));
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig4,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_vanos_estatico_%d_%d_%d_%d',Vanos, L,
intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig4,sprintf('Datos
Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_vanos_estatico_%d_%d_%d_%d.png',Vanos,
L, intervalos_u, intervalos_d));
xlabel(sprintf('Angle [%c]',char(176)));
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values uniform dynamic','Mean values uniform dynamic','Peak values distributed
dynamic','Mean values distributed dynamic','Static'},'Location','northwest');
saveas(fig4,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_vanos_estatico_%d_%d_%d_%d',Vanos,
L, intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig4,sprintf('Datos
Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_angulo_vanos_estatico_%d_%d_%d_%d.png',Vanos,
L, intervalos_u, intervalos_d));
hold off

% Variación de velocidad
clear all

```

```

clc

Tu_c=[]; %Matriz vanos-def max-ángulo en crucetas
Tu_v=[]; %Matriz vanos-def max-ángulo en vanos
Td_c=[];
Td_v=[];

L=450;
Vanos=4;
intervalos_u=1;
intervalos_d=4;
simulaciones=14;
diametro=0.02772;
velocidades=10:10:140;

for simulacion=1:simulaciones

    Ru=load(sprintf('Datos
        Brutos\Dinamico\Velocidades\Dinamico_%d_%d_%d_%d.mat',Vanos,L,intervalos_u,simulacion));
    Mu_v=[];
    Mu_c=[];

    Mu_v(:,1)=Ru.vano{end}(:,1,1); %Velocidades
    Mu_v(:,2)=max(abs(Ru.vano{end}(:,4,:)), [],3); %Deformaciones máximas
    Mu_v(:,3)=(simulacion-1)*10*ones(length(Mu_v(:,1)),1);
    Erru_v(simulacion,:)= [velocidades(simulacion) mean(Mu_v(:,2)) std(Mu_v(:,2))];
    Picou_v(simulacion,:)= [velocidades(simulacion) max(Mu_v(:,2))];

    Mu_c(:,1)=Ru.cruceta{end}(:,1,1); %Velocidades
    Mu_c(:,2)=max(abs(Ru.cruceta{end}(:,4,:)), [],3); %Deformaciones máximas
    Mu_c(:,3)=(simulacion-1)*10*ones(length(Mu_c(:,1)),1);
    Erru_c(simulacion,:)= [velocidades(simulacion) mean(Mu_c(:,2)) std(Mu_c(:,2))];
    Picou_c(simulacion,:)= [velocidades(simulacion) max(Mu_c(:,2))];

    Tu_c=vertcat(Tu_c,Mu_c);
    Tu_v=vertcat(Tu_v,Mu_v);
end

for simulacion=1:simulaciones

    Rd=load(sprintf('Datos
        Brutos\Dinamico\Velocidades\Dinamico_%d_%d_%d_%d.mat',Vanos,L,intervalos_d,simulacion));
    Md_v=[];
    Md_c=[];

    Md_v(:,1)=Rd.vano{end}(:,1,1); %Velocidades
    Md_v(:,2)=max(abs(Rd.vano{end}(:,4,:)), [],3); %Deformaciones máximas
    Md_v(:,3)=(simulacion-1)*10*ones(length(Md_v(:,1)),1);
    Errd_v(simulacion,:)= [velocidades(simulacion) mean(Md_v(:,2)) std(Md_v(:,2))];
    Picod_v(simulacion,:)= [velocidades(simulacion) max(Md_v(:,2))];

    Md_c(:,1)=Rd.cruceta{end}(:,1,1); %Velocidades
    Md_c(:,2)=max(abs(Rd.cruceta{end}(:,4,:)), [],3); %Deformaciones máximas
    Md_c(:,3)=(simulacion-1)*10*ones(length(Md_c(:,1)),1);
    Errd_c(simulacion,:)= [velocidades(simulacion) mean(Md_c(:,2)) std(Md_c(:,2))];
    Picod_c(simulacion,:)= [velocidades(simulacion) max(Md_c(:,2))];

    Td_c=vertcat(Td_c,Md_c);
    Td_v=vertcat(Td_v,Md_v);
end

%% Plots Velocidades

fig5=figure('Position', get(0, 'ScreenSize'));
plot(Picou_c(:,1),Picou_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Erru_c(:,1),Erru_c(:,2),Erru_c(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
medios');
hold on
plot(Picod_c(:,1),Picod_c(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Errd_c(:,1),Errd_c(:,2),Errd_c(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
medios');
grid on;

```

```

legend({'Valores extremos dinámico uniforme','Valores medios dinámico uniforme','Valores
    extremos dinámico distribuido','Valores medios dinámico
    distribuido'},'Location','northwest');
set(gca,'XTick',0:10:150)
xlim([0 150]);
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig5,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_crucetas_%d_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig5,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_crucetas_%d_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values uniform dynamic','Mean values uniform dynamic','Peak values distributed
    dynamic','Mean values distributed dynamic'},'Location','northwest');
saveas(fig5,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_crucetas_%d_%d_%d_%d',Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig5,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_crucetas_%d_%d_%d_%d.png',Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
hold off

fig6=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
plot(Picou_v(:,1),Picou_v(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Erru_v(:,1),Erru_v(:,2),Erru_v(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
    medios');
hold on
plot(Picod_v(:,1),Picod_v(:,2),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores extremos');
hold on
errorbar(Errd_v(:,1),Errd_v(:,2),Errd_v(:,3),'.-','MarkerSize',10,'DisplayName','Valores
    medios');
grid on;
legend({'Valores extremos dinámico uniforme','Valores medios dinámico uniforme','Valores
    extremos dinámico distribuido','Valores medios dinámico
    distribuido'},'Location','northwest');
set(gca,'XTick',0:10:150)
xlim([0 150]);
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylim('auto');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig6,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_vanos_%d_%d_%d_%d',Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig6,sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_vanos_%d_%d_%d_%d.png',Vanos, L,
    intervalos_u, intervalos_d));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values uniform dynamic','Mean values uniform dynamic','Peak values distributed
    dynamic','Mean values distributed dynamic'},'Location','northwest');
saveas(fig6,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_vanos_%d_%d_%d_%d',Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig6,sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_vanos_%d_%d_%d_%d.png',Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
hold off

%% Comparación con estático
angulo=11; %Último ángulo

R=load(sprintf('Datos Brutos\\%d_%d.mat',Vanos,L));
diametro=0.02772;
angulo_i=0:pi()/20:pi()/2;
q_x=diametro*10*50*(140*sin(angulo_i)/120).^2;
q_z=-diametro*10*50*(140*cos(angulo_i)/120).^2;
mag=diametro*10*50*(140/120)^2;
S_v=[]; %Matriz de la superficie de vano
S_c=[]; %Matriz de la superficie de cruceta

for a=1:angulo

```

```

M_c=[];
M_v=[];
%Crucetas
for i=1:(Vanos-1)
    t_0=R.cruceta{a}(1,1,i);
    for j=1:length(R.cruceta{a}(:, :, i))
        %Calcula def total
        R.cruceta{a}(j,5,i)=sqrt(R.cruceta{a}(j,2,i)^2+R.cruceta{a}(j,3,i)^2+R.cruceta{a}(j,4,i)^2);
        %Transforma tiempo en carga
        R.cruceta{a}(j,1,i)=R.cruceta{a}(j,1,i)-t_0;
        R.cruceta{a}(j,1,i)=mag*R.cruceta{a}(j,1,i);
        %Transforma carga en velocidad
        R.cruceta{a}(j,1,i)=sqrt(R.cruceta{a}(j,1,i)/diametro/10/50)*120;
    end
end

%Vanos
for i=1:Vanos
    t_0=R.vano{a}(1,1,i);
    for j=1:length(R.vano{a}(:, :, i))
        %Calcula def total
        R.vano{a}(j,5,i)=sqrt(R.vano{a}(j,2,i)^2+R.vano{a}(j,3,i)^2+R.vano{a}(j,4,i)^2);
        %Transforma tiempo en carga
        R.vano{a}(j,1,i)=R.vano{a}(j,1,i)-t_0;
        R.vano{a}(j,1,i)=mag*R.vano{a}(j,1,i);
        %Transforma carga en velocidad
        R.vano{a}(j,1,i)=sqrt(R.vano{a}(j,1,i)/diametro/10/50)*120;
    end
end
M_v(:,1)=R.vano{a}(:,1,1); %Velocidades
M_v(:,2)=(a-1)*9*ones(length(M_v(:,1)),1); %Ángulo
M_v(:,3)=max(abs(R.vano{a}(:,4,:)), [], 3); %Deformaciones máximas
S_v=vertcat(S_v,M_v);

M_c(:,1)=R.cruceta{a}(:,1,1); %Velocidades
M_c(:,2)=(a-1)*9*ones(length(M_c(:,1)),1); %Ángulo
M_c(:,3)=max(abs(R.cruceta{a}(:,4,:)), [], 3); %Deformaciones máximas
S_c=vertcat(S_c,M_c);
end

V_v=scatteredInterpolant(S_v(:,1),S_v(:,2),S_v(:,3));
V_c=scatteredInterpolant(S_c(:,1),S_c(:,2),S_c(:,3));
V_v.Method='natural';
V_c.Method='natural';

rango_angulo=horzcat(transpose(10:10:140),60*ones(length(10:10:140),1));
Ideal_c=V_c(rango_angulo);
Ideal_v=V_v(rango_angulo);

%% Plots comparacion estático
fig3=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
plot(Picou_c(:,1),Picou_c(:,2),'.-', 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
errorbar(Erru_c(:,1),Erru_c(:,2),Erru_c(:,3),'.-', 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores
medios');
hold on;
plot(Picod_c(:,1),Picod_c(:,2), '*-', 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
errorbar(Errd_c(:,1),Errd_c(:,2),Errd_c(:,3), '*-', 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores
medios');
hold on;
plot(Erru_c(:,1),Ideal_c(:,1), 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
grid on;
legend({'Valores extremos dinámico uniforme', 'Valores medios dinámico uniforme', 'Valores
extremos dinámico distribuido', 'Valores medios dinámico
distribuido', 'Estático'}, 'Location', 'northwest');
set(gca, 'XTick', 0:10:150)
xlim([0 150]);
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylim('auto');
ylabel('Desplazamiento [m]');

```

```

saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values uniform dynamic', 'Mean values uniform dynamic', 'Peak values distributed
    dynamic', 'Mean values distributed dynamic', 'Static'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig3, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_crucetas_estatico_%d_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
hold off

fig4=figure('Position', get(0, 'Screensize'));
plot(Picou_v(:,1), Picou_v(:,2), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
errorbar(Erru_v(:,1), Erru_v(:,2), Erru_v(:,3), '-.', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores
    medios');
hold on;
plot(Picod_v(:,1), Picod_v(:,2), '*-', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
hold on
errorbar(Errd_v(:,1), Errd_v(:,2), Errd_v(:,3), '*-', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores
    medios');
hold on;
plot(Erru_v(:,1), Ideal_v(:,1), 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Valores extremos');
grid on;
legend({'Valores extremos dinámico uniforme', 'Valores medios dinámico uniforme', 'Valores
    extremos dinámico distribuido', 'Valores medios dinámico
    distribuido', 'Estático'}, 'Location', 'northwest');
set(gca, 'XTick', 0:10:150)
xlim([0 150]);
xlabel('Velocidad [km/h]');
ylim('auto');
ylabel('Desplazamiento [m]');
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
xlabel('Speed [km/h]');
ylabel('Displacement [m]');
legend({'Peak values uniform dynamic', 'Mean values uniform dynamic', 'Peak values distributed
    dynamic', 'Mean values distributed dynamic', 'Static'}, 'Location', 'northwest');
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d_%d', Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
saveas(fig4, sprintf('Datos
    Brutos\\Traducido\\Dinamico\\Comparadas\\Comparativa_velocidades_vanos_estatico_%d_%d_%d_%d.png', Vanos,
    L, intervalos_u, intervalos_d));
hold off

```


DOCUMENTO II

PLANOS



Lista de planos

Plano 1. Cruceta pivotante horizontal

