XXV CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
Santander, 10-13 junio 2025

Influencia de los errores de fabricación en transmisiones planetarias: Efecto del número de planetas y secuencia del engrane

Alberto Diez-Ibarbia[1]*, Javier Sanchez-Espiga[1], Miguel Iglesias[1], Ana de-Juan[1], Pablo Garcia-Fernandez[1], Alfonso Fernandez-del-Rincon[1], Fernando Viadero[1]

[1] *Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica, Universidad de Cantabria, alberto.diez@unican.es, javier.sanchez@unican.es, miguel.iglesias@unican.es, ana.dejuan@unican.es, pablo.garcia@unican.es, alfonso.fernandez@unican.es, fernando.viadero@unican.es*

En este trabajo se presenta un análisis estadístico del reparto de carga entre planetas en transmisiones planetarias, representado mediante el "Mesh load factor" (Kγ). Este estudio da continuidad a investigaciones previas de los autores, en las que se evaluó el impacto de los errores de espesor en los dientes y los errores tangenciales de montaje de los planetas en el portaplanetas. La principal contribución de este trabajo es la extrapolación del análisis a sistemas con un mayor número de planetas y distintas configuraciones, lo que a su vez genera diversas secuencias de engrane. Para ello, se emplea el Método de Monte Carlo, que permite obtener una solución probabilística a partir de un modelo determinístico. En este contexto, el modelo numérico desarrollado previamente por los autores incorpora como variables de entrada valores aleatorios de ambas tipologías de errores, generados mediante una distribución normal definida por un umbral de tolerancia de fabricación equivalente a tres veces su desviación típica. Como resultado se obtiene el parámetro Kγ, que cuantifica la carga relativa del planeta más solicitado con respecto a su valor teórico en condiciones ideales en las que todos los planetas están cargados equitativamente. A partir de un número representativo de casos, se determina la función de distribución del parámetro Kγ y se evalúa la probabilidad de que transmisiones planetarias a fabricar no cumplan con los límites establecidos por la norma IEC 61400, específica para su aplicación en aerogeneradores. Finalmente, se analiza la interacción y el efecto combinado de las dos tipologías de errores consideradas, así como la influencia del incremento en el número de planetas y de las distintas secuencias de engrane en el comportamiento del factor Kγ y, en consecuencia, en el comportamiento global de la transmisión.

1. Introducción

Las transmisiones mediante engranajes son componentes esenciales en numerosas aplicaciones debido a su durabilidad, compacidad, robustez y a su capacidad para transferir potencia con una alta eficiencia y fiabilidad [1], [2], [3], [4], [5]. Su principal función es transmitir y adaptar la energía de la fuente de potencia, buscando minimizar las pérdidas energéticas en el proceso. En muchas aplicaciones, este proceso se realiza mediante transmisiones de engranajes planetarios, que permiten adaptar las condiciones de operación a diversos requisitos de par y velocidad. Esta versatilidad, junto con otras características, explica su amplio uso [6], [7], [8], [9], [10]. Sin embargo, las transmisiones planetarias, al tener más componentes que las transmisiones de engranajes ordinarias, presentan un comportamiento más complejo, el cual, a su vez, es más susceptible de ser afectado por los errores de fabricación inherentes de sus componentes.

La demanda energética mundial continúa en aumento [11], [12]. Para abordar esta creciente demanda de manera sostenible, la Unión Europea, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por la Organización de las Naciones Unidas, está promoviendo un crecimiento continuo del mercado de las energías renovables[11]. Este impulso genera nuevos retos y desafíos para la sociedad, los cuales deben ser resueltos por la comunidad científica.

La energía renovable más extendida actualmente es la eólica [11], [12], cuyos aerogeneradores utilizan mayoritariamente transmisiones planetarias para adecuar la potencia eólica de entrada a las condiciones de velocidad y par requeridas por el generador eléctrico. En este sentido, los fabricantes buscan proporcionar aerogeneradores con una mayor densidad de potencia, que produzcan más energía de forma sostenible y sean más fiables y rentables [11], [12]. Por lo tanto, mejorar su rendimiento, fiabilidad y funcionamiento en operación, tendrá un gran impacto en la evolución de la sociedad hacia una tecnología mejor y más ecológica.

El proceso de fabricación de cualquier componente, incluidas las transmisiones mediante engranajes, no garantiza una repetibilidad perfecta de las características del producto final. Esto se debe a la naturaleza estocástica del proceso, influenciado por errores sistemáticos y aleatorios. Los errores sistemáticos suelen estar relacionados con la calibración de la máquina, las condiciones ambientales, entre una amplia variedad de factores, mientras que los errores aleatorios están asociados con fenómenos intangibles e incontrolables del proceso. Esta incertidumbre en los procesos de fabricación plantea un desafío significativo para predecir las características del producto final. Por lo tanto, es esencial incluir estas variables probabilísticas en los modelos numéricos deterministas, con el objeto de predecir y estimar la incertidumbre asociada[13], [14], [15]. Para llevar a cabo este análisis, un enfoque es emplear métodos estadísticos. Concretamente, en este trabajo se ha implementado el relativo al Método de Monte Carlo, por ser ampliamente utilizado en diversos sectores industriales para analizar el efecto de la incertidumbre de algunos parámetros en su funcionamiento[16], [17].

El impacto de los errores de fabricación en las transmisiones mediante engranajes es un tema crucial en el diseño y estudio del comportamiento de dichas transmisiones. Estudios previos han demostrado que los errores de fabricación y montaje pueden afectar significativamente el reparto de carga entre los planetas, lo que a su vez puede influir en la durabilidad y el comportamiento global de la transmisión [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28]. En investigaciones previas, los autores evaluaron el impacto de los errores de espesor en los dientes y los errores tangenciales de montaje de los planetas en el portaplanetas, los errores de excentricidad y los errores de paso [29], [30]. Estos trabajos han demostrado la importancia de la presencia de errores en el reparto de carga en las transmisiones de engranajes desde el punto de vista cuasiestático y dinámico, así como la influencia de la geometría de las transmisiones en su funcionamiento.

El objetivo principal de este trabajo es analizar el impacto de varios tipos de errores de fabricación en el reparto de carga en transmisiones planetarias de cuatro planetas y diferentes configuraciones con respecto a la fase en la que ocurren los contactos (en fase, en fase secuencial o en contrafase), cuantificado mediante el "Mesh load factor" (K_γ). Este parámetro cuantifica la carga relativa del planeta más solicitado con respecto a su valor teórico en condiciones ideales en las que todos los planetas están cargados equitativamente, siendo crítico para el diseño de estos sistemas mecánicos[31].

Para lograr este objetivo, y empleando el Método de Monte Carlo, el modelo numérico desarrollado por los autores incorpora como variables de entrada valores aleatorios de varias tipologías de errores, generados mediante una distribución normal definida por un umbral de tolerancia de fabricación equivalente a seis veces su desviación típica. Para definir dicho umbral, se sigue la norma DIN 3967 [32], que establece las tolerancias de los errores de espesor según la geometría del engranaje. A partir de un número representativo de casos, se determina la función de distribución del parámetro K_γ y se evalúa la probabilidad de que las transmisiones planetarias a fabricar no cumplan con los límites establecidos. En el caso de las transmisiones planetarias diseñadas específicamente para aerogeneradores, el estándar que certifica su idoneidad en cuanto al parámetro K_γ admisible es la norma IEC 61400 [33]. Finalmente, se analiza la interacción y el efecto combinado de las tipologías de errores consideradas, así como la influencia del incremento en el número de planetas y de las distintas secuencias de engrane en el comportamiento del factor K_γ y, en consecuencia, en el comportamiento global de la transmisión.

De todo lo anterior se puede deducir que la principal contribución de este trabajo es la extrapolación del análisis a sistemas con un mayor número de planetas y distintas configuraciones, lo que genera diversas secuencias de engrane, evaluando su impacto en el parámetro K_γ de forma probabilística.

En la Sección 2 se detallan los métodos empleados para este análisis. La Sección 3 presenta los parámetros de los casos de estudio. En la Sección 4 se discuten los resultados obtenidos. Finalmente, la Sección 5 ofrece las conclusiones derivadas del análisis.

2. Metodología

Para abordar el análisis de la influencia de los errores de fabricación en las transmisiones planetarias, se ha optado por un enfoque que permita identificar las configuraciones y tolerancias de fabricación que minimicen los efectos negativos de los errores dependiendo de la secuencia de engrane. Para ello, se ha llevado a cabo una campaña de simulación a partir de la cual, utilizando el modelo determinista desarrollado por los autores, se obtiene una solución estocástica. Este enfoque permite evaluar de manera probabilística el impacto de los errores de fabricación en el funcionamiento de las transmisiones planetarias y ofrecer recomendaciones prácticas para el diseño y fabricación de transmisiones planetarias más duraderas.

En esta sección, se presenta la información relacionada con el modelado de transmisiones planetarias utilizada en este trabajo. Inicialmente se sintetiza el funcionamiento del modelo 2D desarrollado por los autores, posteriormente se especifican los aspectos más relevantes del modelado de los errores de fabricación analizados y finalmente se presentan los aspectos de simulación y los procedimientos estadísticos aplicados, con especial énfasis al método de Monte Carlo (MCM).

2.1. Modelo de transmisiones planetarias

En este estudio, se ha utilizado el modelo de transmisiones mediante engranajes planetarios desarrollado por los autores [22], [34], [35], [36], [37]. Es un modelo bidimensional y se basa en un planteamiento híbrido que combina modelos de elementos finitos con formulaciones analíticas. Este modelo proporciona el equilibrio adecuado entre la precisión en la respuesta y el coste computacional asociado a los cálculos, lo cual es crucial para llevar a cabo la gran cantidad de simulaciones necesarias para este análisis, tal y como se discutirá en la Sección 2.3. El uso de otros enfoques más complejos aumentaría enormemente el esfuerzo computacional y lo haría inasequible para esta tarea, y el uso de enfoques más simplificados podría llevar a soluciones imprecisas.

El procedimiento de cálculo se resume a continuación:

1. Se definen los perfiles de los engranajes y se monta la transmisión, considerando ciertas tipologías de errores, como es el de posicionamiento de los planetas analizado en este trabajo.
2. Un algoritmo calcula las distancias entre los flancos activos potenciales en una posición angular dada, activando el cálculo de las fuerzas de contacto solo donde se produce solapamiento geométrico entre dientes. Estas fuerzas pueden ser influenciadas por la existencia de otras tipologías de errores de fabricación, como las modificaciones del perfil del diente o los errores de espesor de dientes. Éstos últimos son objeto de estudio en este trabajo.
3. Se emplea un enfoque híbrido para determinar las fuerzas de contacto, utilizando dos modelos de elementos finitos (FE) diferentes para el cálculo de deformaciones globales y una formulación analítica para definir el contacto local. El primer modelo de FE, denominado global, representa el cuerpo del engranaje y un número de dientes en función de la relación de contacto. El segundo modelo es el flanco activo del diente con una cierta profundidad. Las deformaciones de este segundo modelo se sustraen de las correspondientes al primero. Para incorporar el carácter distribuido del contacto (es una presión, no una fuerza puntual) se utiliza una formulación analítica no lineal propuesta por Weber y Banaschek [38]. De esta forma, se evita que el carácter puntual de la resultante de la fuerza de contacto distorsione los resultados de deformación.
4. Se aplican cargas unitarias en ambos modelos de FE para determinar la rigidez lineal de los dientes y cuerpos de los engranajes.
5. Se realiza un proceso de cálculo iterativo del contacto no lineal.
6. Se resuelve el problema de equilibrio en la transmisión planetaria. Este problema iterativo abarca la transmisión de potencia entre la entrada y la salida, el equilibrio de par en los planetas y el equilibrio de carga en los soportes de los engranajes, considerando la rigidez del soporte del engranaje solar, entre otros factores.

Este modelo permite analizar las transmisiones planetarias considerando los errores de fabricación y las diferentes configuraciones de montaje con arreglo a su secuencia de engrane y número de planetas. Las configuraciones utilizadas en este estudio son:

- Equiespaciadas y el contacto de todos los planetas en fase (ESIP)
- Equiespaciadas y el contacto de los planetas en fase secuencial (ESSP)
- Equiespaciadas y el contacto de los planetas en contrafase (ESSP-CP)

2.2. Formulaciones de los Errores de Fabricación

Los errores de fabricación considerados en este estudio incluyen errores de espesor en los dientes de los planetas y errores tangenciales de posicionamiento de los planetas en el portasatélites. Estos errores se han modelado de manera que reflejen las variaciones típicas encontradas en los procesos de fabricación. Los errores de espesor se han definido como la diferencia entre el ancho ideal y el ancho real de los dientes, mientras que los errores tangenciales se han modelado como desplazamientos en la posición de montaje de los planetas con respecto a su posición teórica [29], [30]:

- El error de espesor de dientes se basa en la medición de la cuerda del diente, siguiendo el procedimiento definido por Wildhaber [39]. Para evaluar el este error se mide la distancia entre dos puntos de la superficie del diente que están en el mismo plano perpendicular al eje del engranaje (cuerda) y se compara con los teóricos. Para su modelización, se toma el error promedio de todos los planetas y, considerando las variaciones a partir de ese valor, se modifica el solapamiento geométrico entre los flancos activos en los engranajes planetarios. El error de espesor de dientes no modifica el ángulo de presión ni la distancia de montaje, aunque sí produce un avance o retraso en el contacto entre los flancos activos debido a un cambio en la posición del perfil del diente.
- Los errores de posicionamiento de los planetas en el portasatélites se refieren a la diferencia entre la posición real del eje y su posición teórica. Estos errores pueden dividirse en tangenciales y radiales, siendo los tangenciales más significativos debido a su mayor impacto en el funcionamiento de la transmisión [36]. Los errores tangenciales afectan los contactos entre el sol y los planetas, y entre los planetas y el anillo exterior, generando un avance o retraso en el inicio del contacto y modificando tanto el ángulo de presión como la distancia de montaje.

2.3. Procedimientos de Simulación y Análisis

Para evaluar el impacto de los errores de fabricación de forma probabilística en un modelo determinista, se ha utilizado el Método de Monte Carlo (MMC). Este método se presentó en [40] como un enfoque estadístico para resolver ecuaciones diferenciales e integro-diferenciales que definen problemas en diversos campos científicos.

En este trabajo, el MMC se utiliza para analizar la influencia de los errores de fabricación en la transmisión planetaria de un aerogenerador de 5 MW. Para ello, se realiza una campaña de simulaciones con el objetivo de obtener las funciones de distribución de probabilidad de los valores del factor K_γ. Este enfoque permite evaluar cómo los errores de fabricación afectan al funcionamiento y la durabilidad de las transmisiones planetarias de forma probabilística, proporcionando información valiosa para mejorar la fiabilidad de los aerogeneradores.

Las variables aleatorias de entrada seleccionadas en este trabajo son el tamaño de los errores tangenciales de posicionamiento de los planetas y de espesor de dientes en cada planeta. El análisis se ha centrado en tres configuraciones de transmisiones planetarias como se ha mencionado anteriormente. Estas configuraciones permiten evaluar cómo la secuencia del engrane afecta el funcionamiento de la transmisión. Además, se han considerado diferentes tamaños máximos de errores de fabricación (el mismo en ambas tipologías), siguiendo las tolerancias establecidas por la norma DIN 3967 (Tabla 1).

Tabla 1: Tolerancia para el error de espesor de los dientes en función de la calidad para engranajes de diámetro primitivo en 280 y 560mm (DIN 3967).

Calidad	Tolerancia (μm)
21	10
22	16
23	25
24	40
25	60

Se considera que estas variables siguen una distribución normal, definida por un valor medio nulo y una desviación típica (σ) calculada a partir de las tolerancias especificadas en la Tabla 1. Concretamente, para la generación de errores de forma aleatoria, se establece que la tolerancia de fabricación es igual a 6σ (99,7% de los casos). Además, se eliminan los casos aleatorios en los que se supera la tolerancia máxima.

Para que la solución obtenida mediante la aplicación del MMC sea adecuada, es esencial considerar el número de variables aleatorias de entrada en la determinación del número de casos a analizar. En este caso, para determinar el número de casos a simular que optimice el binomio precisión-coste computacional, se realizó un análisis de convergencia del valor medio del error del Kɣ, de su desviación estándar, de su coeficiente de asimetría y de su Kurtosis para más de 100.000 simulaciones. A partir de dicho análisis se definió el número de simulaciones por función de distribución de Kɣ en 50.000 para cada tolerancia de error y cada configuración de engrane, dado que la función se estabiliza y la variación de los cuatro parámetros del error se encuentran por debajo del umbral elegido (error del parámetro estadístico relacionado con el Kɣ menor a 0.01).

3. Configuraciones estudiadas

Para evaluar de manera exhaustiva la influencia de los errores de fabricación en las transmisiones planetarias, se han definido varias configuraciones de estudio que permiten analizar diferentes escenarios y parámetros clave de diseño. Estas configuraciones se han seleccionado cuidadosamente para representar condiciones reales de operación y fabricación en transmisiones utilizadas en aerogeneradores, asegurando así la relevancia y aplicabilidad de los resultados obtenidos.

Las transmisiones planetarias analizadas en este estudio se han diseñado considerando una potencia nominal de 5 MW para las configuraciones de 3 planetas y de 6,67 MW para las de 4 planetas, similar a la de los aerogeneradores en operación actualmente. De esta forma se consigue que el nivel de carga ideal soportado por los planetas sea igual para todas las configuraciones y, por tanto, los resultados sean comparables. En particular, se han considerado tres configuraciones principales: una con planetas equiespaciados y en fase (ESIP), otra con planetas equiespaciados y en fase secuencial (ESSP) y otra con planetas equiespaciados y en contrafase (ESSP-CP).

La Tabla 2 presenta los parámetros geométricos de los dientes de los engranajes, mientras que la Tabla 3 muestra el número de dientes de los engranajes que componen las transmisiones planetarias para las tres tipologías de configuraciones analizadas en el caso de contener 3 y 4 planetas.

Tabla 2: Parámetros de la geometría de los dientes.

Parámetro	Magnitud
Módulo (m)	10 (mm)
Addendum	1·m
Dedendum	1,25·m
Ángulo de presión	20º
Arco de redondeo	0,05·m

Tabla 3: Número de dientes de los engranajes que componen las transmisiones planetarias de 3 y 4 planetas para las tres tipologías de configuraciones analizadas [41].

	3 Planetas		4 Planetas		
	ESIP	ESSP	ESIP	ESSP	ESSP-CP
Zr (Número de dientes del anillo)	-171	-170	-172	-171	-170
Zp (Número de dientes del planeta)	50	49	52	50	49
Zs (Número de dientes del sol)	69	70	68	69	70

Estas configuraciones de transmisiones planetarias se han seleccionado para que sus resultados sean comparables entre sí y con las presentadas en trabajos previos de los autores con 3 planetas [29], [30]. De esta forma se puede evaluar cómo el número de planetas y la secuencia del engrane afectan al reparto de carga y el factor Kγ.

Para cada configuración, se han considerado diferentes tamaños de errores de fabricación en los planetas, siguiendo las tolerancias establecidas por la norma DIN 3967 (Tabla 1). Los diámetros primitivos de los planetas analizados oscilan entre los valores 520 y 490 mm para las configuraciones objeto de estudio. Además, las calidades de los planetas consideradas son las 23, 24 y 25, que suponen una tolerancia máxima de error de espesor de los dientes de 25, 40 y 60 µm respectivamente, para engranajes de diámetro primitivo en 280 y 560mm. Esto permite evaluar cómo la tolerancia máxima y precisión de los procesos de fabricación afecta en el funcionamiento de la transmisión mediante el factor Kγ.

Estas configuraciones permiten realizar un análisis detallado y comparativo del impacto de los errores de fabricación de forma probabilística en diferentes escenarios, proporcionando una comprensión profunda de cómo las variaciones en los parámetros de fabricación pueden influir en el funcionamiento de las transmisiones planetarias.

Además, se han comparado los resultados obtenidos con la normativa que deben cumplir para su certificación de uso, estableciendo la probabilidad de transmisiones que no cumplirán con el estándar de certificación. En el caso de las transmisiones planetarias diseñadas específicamente para aerogeneradores, el parámetro Kɣ admisible viene definido por la norma IEC 61400, de la que se muestra la información relevante para el estudio en la Tabla 4.

Tabla 4: Valor de *Kγ* gamma máximo en función del número de planetas de la transmisión definido por la IEC 61400. Sombreado en verde las aplicables al estudio.

Nº de planetas	Kγ
3	1,1
4	1,25
5	1,35
6	1,44
7	1,47

4. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas para evaluar el impacto de los errores de fabricación en las transmisiones planetarias. Los resultados se han analizado en función de las configuraciones de estudio definidas previamente, considerando el número de planetas, la secuencia del engrane y la tolerancia del proceso de fabricación.

La mayoría de los resultados se van a mostrar en forma de funciones de distribución del factor Kγ. Este parámetro cuantifica la carga relativa del planeta más cargado con respecto a su valor ideal. Para homogeneizar la leyenda de colores y trazos, se ha utilizado el color negro/azul/naranja para las gráficas correspondientes a 25/40/60 micras y el trazo continuo/discontinuo/punto-raya para las configuraciones ESIP/ESSP/ESSP-CP respectivamente.

En la Figura 1, Figura 2 y Figura 3 se muestra la función de distribución del parámetro Kγ de las configuraciones ESIP (trazo continuo), ESSP (trazo discontinuo), y ESSP-CP (trazo de punto y raya), para los tres niveles de tolerancia máxima (25, 40 y 60 micras) de error tangencial y de espesor, siendo en color azul las relativas a 3 planetas y en negro las de 4.

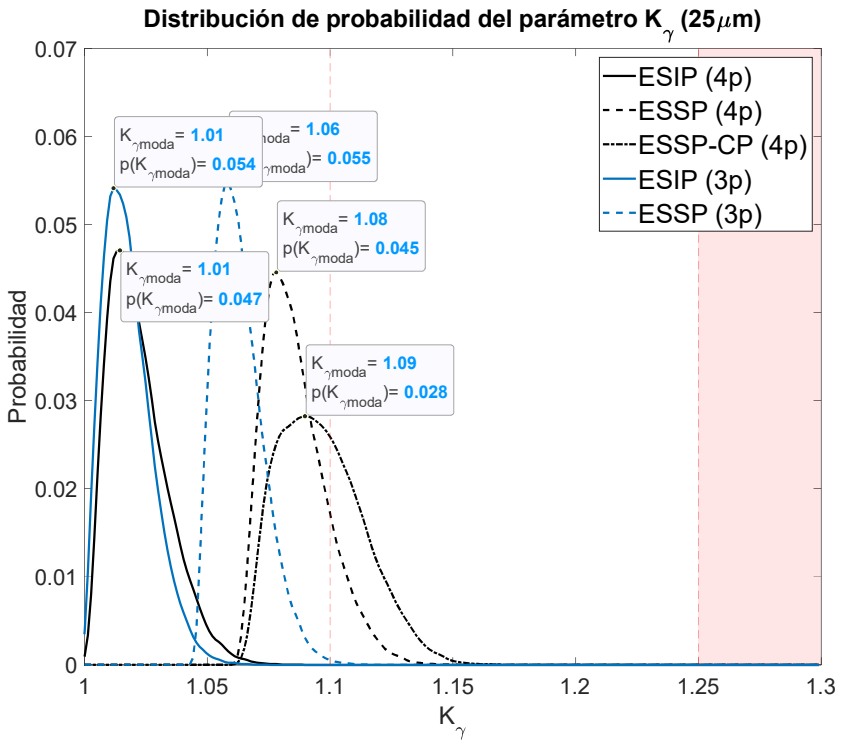

Figura 1 Función de distribución del parámetro Kγ para la tolerancia de 25 micras en las tres configuraciones estudiadas (ESIP trazo continuo, ESSP trazo discontinuo y ESSP-CP en trazo de punto y raya), con 3 planetas (azul) y 4 planetas (negro).

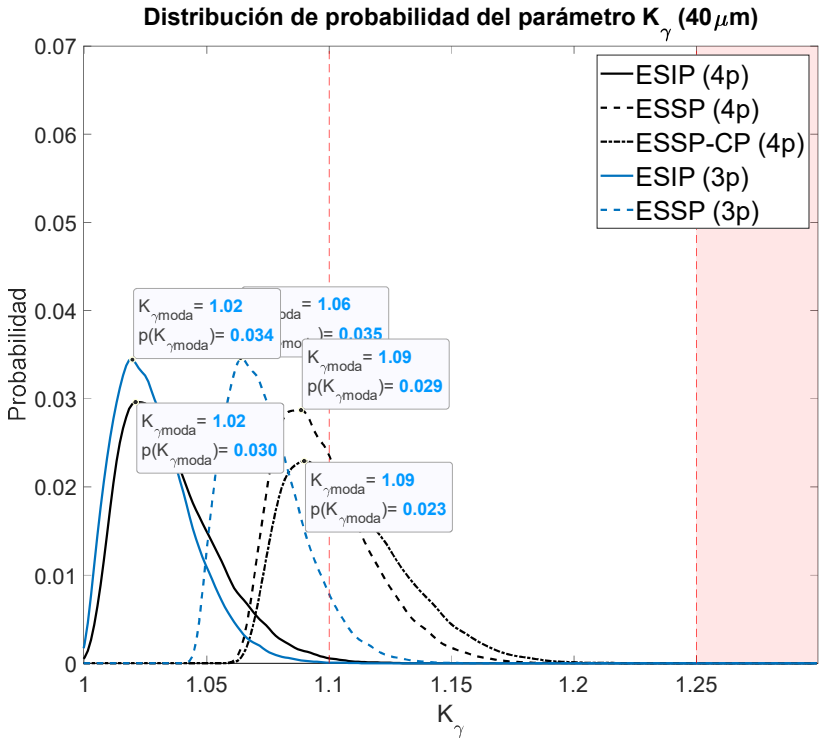

Figura 2 Función de distribución del parámetro Kγ para la tolerancia de 40 micras en las tres configuraciones estudiadas (ESIP trazo continuo, ESSP trazo discontinuo y ESSP-CP en trazo de punto y raya), con 3 planetas (azul) y 4 planetas (negro).

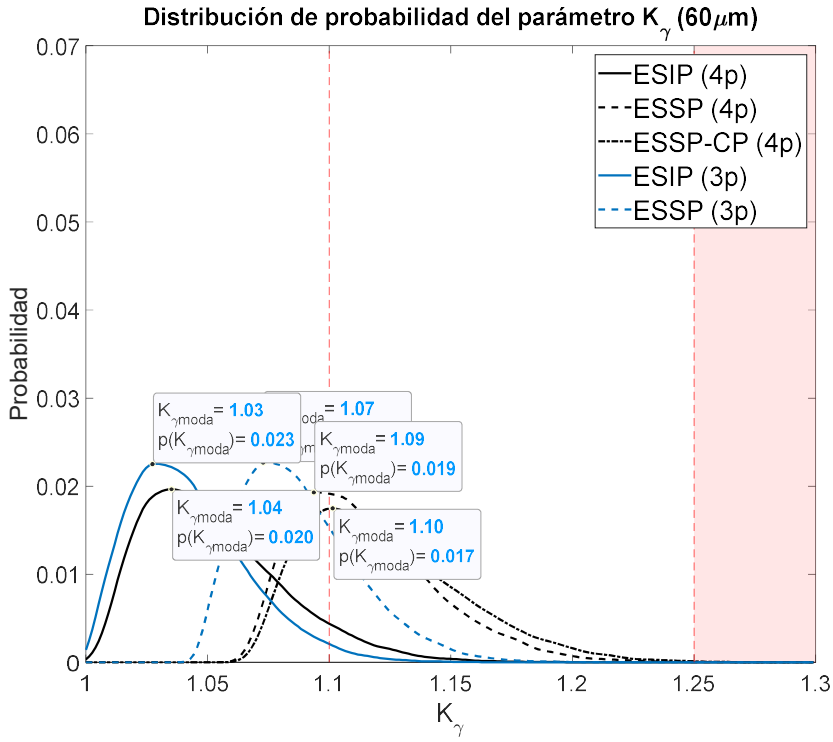

Figura 3 Función de distribución del parámetro Kγ para la tolerancia de 60 micras en las tres configuraciones estudiadas (ESIP trazo continuo, ESSP trazo discontinuo y ESSP-CP en trazo de punto y raya), con 3 planetas (azul) y 4 planetas (negro).

4.1. Impacto de la configuración de engrane

A partir de las tres figuras, se comprueba que la ESIP presenta mejores resultados probabilísticos que las otras dos configuraciones, independientemente del número de planetas. Concretamente se observa que los valores de Kγ

son mayores en el caso ESSP-CP, tal y como se presenta en [42], seguidos de los de la ESSP y por último los correspondientes a la ESIP.

Al comparar la ESIP y la ESSP, se observa que tienen funciones de distribución muy similares en dispersión y forma, pero con un desplazamiento hacia la derecha en los tres niveles de tolerancia. Se puede concluir que el desfase en el engrane de los planetas, resulta en un desequilibrio inherente en la ESSP que se refleja en valores de Kγ más altos en comparación con la configuración ESIP.

Al comparar la ESSP con la ESSP-CP, se puede observar que, para tolerancias bajas, la dispersión de la función de distribución es considerablemente menor en la ESSP, con un valor de moda muy similar, pero con una notable menor probabilidad. Al aumentar la tolerancia, la función de distribución de la ESSP se va equiparando a la ESSP-CP. Por lo que, si el proceso de fabricación tiene una calidad baja, la decisión entre ESSP y ESSP-CP puede resultar similar, no siendo así para calidades mejores donde es recomendable apostar por la ESSP.

Para el caso de 4 planetas, tanto en la ESSP-CP como en la ESSP, el valor mínimo de Kγ se encuentra por encima de 1,06, mientras que en la ESIP empieza en 1. Esto indica que la configuración juega un papel relevante en este parámetro, lo cual es debido al desfase en el engrane de los planetas, presentando un desequilibrio inherente que se refleja en esos valores de Kγ más altos en comparación con la configuración ESIP.

4.2. Impacto de la tolerancia máxima de fabricación

Independientemente del número de planetas, en las tres configuraciones, los resultados muestran que la tolerancia máxima de los errores de espesor y los errores tangenciales de posicionamiento tienen un impacto significativo en el reparto de carga entre los planetas, mostrado a través del factor Kγ. En particular, se observa que a medida que aumenta la tolerancia de los errores, el valor de la moda aumenta sensiblemente, pero su probabilidad es notablemente menor, indicando que el planeta más cargado va a tener mayor probabilidad de estar más solicitado con un error de fabricación mayor. También se observa que la dispersión de los valores de Kγ aumenta, resultando en una mayor variabilidad en la carga máxima del planeta principalmente acentuada hacia Kγ mayores.

En el caso de 4 planetas, tanto para la ESIP como para la ESSP, el hecho de no superar el umbral para ninguna de las tolerancias máximas sugiere que, aun ajustando el proceso de fabricación a tolerancias mayores (disminución de la calidad), las transmisiones resultantes van a seguir cumpliendo el estándar, pudiendo suponer un ahorro en costes de fabricación.

4.3. Impacto del número de planetas

Para 4 planetas, se observa que todos los valores de Kγ se mantienen por debajo del umbral establecido por la norma IEC 61400 (1,25), salvo en el caso de 60 micras de la ESSP-CP, cuya probabilidad de superar el umbral propuesto por la norma IEC 61400 ya no es cero. Esto indica que la configuración ESSP-CP es más sensible a los errores de fabricación y puede requerir un control más estricto de las tolerancias para garantizar un rendimiento óptimo.

Para el caso de 3 planetas, se observa que los valores de Kγ están más cerca del umbral establecido por la norma IEC 61400 (1,1) que en el caso de 4 planetas. Esto denota que hay una mayor probabilidad de fallo para las transmisiones de 3 planetas que para 4.

4.4. Probabilidad de fallo

Para poder analizar este último aspecto, se ha analizado el valor del Kγ a partir del cual falla el 1% de las transmisiones y el 0,1% de ellas. En otras palabras, 99 de cada 100 transmisiones van a tener un Kγ menor al expuesto en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y 999 de cada 1.000 transmisiones van a tener un Kγ menor al expuesto en la Tabla 5.

Tabla 5: Valor del Kγ a partir del cual falla el 1% y el 0,1% de las transmisiones de 3 y 4 planetas estudiadas y su probabilidad de fallo.

	3 Planetas						4 Planetas								
	ESIP			ESSP			ESIP			ESSP			ESSP-CP		
	25	40	60	25	40	60	25	40	60	25	40	60	25	40	60
Máximo Kγ del 99% transmisiones	1,047	1,074	1,112	1,092	1,074	1,157	1,057	1,092	1,136	1,122	1,156	1,199	1,140	1,173	1,216
Máximo Kγ del 99,9% transmisiones	1,059	1,094	1,142	1,104	1,139	1,187	1,070	1,114	1,172	1,137	1,178	1,234	1,155	1,198	1,252
Probabilidad de fallo (%)	0	0	2,3	0,2	6,8	27,6	0	0	0	0	0	0,029	0	0	0,113

Por un lado, los valores de Kγ siguen una tendencia lineal, pudiendo extrapolarlo para cualquier valor de tolerancia máxima. Esto implica que, dentro de la misma configuración, con dos valores de Kγ se puede obtener una previsión del Kγ para otra tolerancia máxima, siempre que el rodamiento siga teniendo un comportamiento lineal. Además,

se puede observar que la diferencia entre configuraciones se mantiene aproximadamente constante, lo cual también permite, a partir de una configuración, extrapolar valores para las otras dos.

Por otro lado, en el caso de 4 planetas, configuración ESSP-CP y 60 micras de tolerancia máxima hay transmisiones que superan el umbral establecido por la norma, mientras que la ESIP y la ESSP esto no sucede. En el caso de 3 planetas, se supera el umbral establecido por la norma para ambos tipos de configuraciones (ESIP y ESSP) y tolerancias más pequeñas que en el caso de 4 planetas. Esto denota que hay una mayor probabilidad de fallo para las transmisiones de 3 planetas que para 4.

Para cuantificarlo, en la Tabla 5 se muestra la probabilidad de fallo de la transmisión, es decir, de superar el umbral establecido por la normativa.

Se confirma que, para las transmisiones de 4 planetas, la ESIP no falla con ninguno de los tres niveles de tolerancias estudiados, la ESSP presenta una probabilidad de fallo del 0,029% para una tolerancia de 60 micras, siendo la ESSP-CP la que mayor probabilidad de fallo tiene con un 0,113%.

En el caso de transmisiones de 3 planetas análogas, la ESIP no falla con ninguno de los dos primeros niveles de tolerancias, pero con 60 micras tiene un 2,3% de probabilidad de fallo. Mientras la ESSP presenta una probabilidad de fallo para todos los niveles de carga analizados, un 0,2% para una tolerancia de 25 micras, y 6,2% y 27,8% de probabilidad de fallo para 40 y 60 micras respectivamente.

De los resultados se puede concluir que las configuraciones de transmisiones de 3 planetas tienen una mayor probabilidad de fallo que sus análogas de 4 planetas, aunque sus valores de $K\gamma$ netos sean menores.

4.5. Síntesis de los resultados

El análisis realizado ha demostrado que los errores de fabricación en las transmisiones planetarias, específicamente los errores de espesor y los errores tangenciales de posicionamiento, tienen un impacto significativo en el reparto de carga, expresado mediante el factor $K\gamma$.

Los resultados indican que:

- La secuencia del engrane juega un papel crucial en el comportamiento de las transmisiones planetarias:
  - La configuración con planetas equiespaciados y en fase (ESIP) mostró una mayor robustez frente a los errores de fabricación. La mayoría de los valores de $K\gamma$ se mantuvieron por debajo del umbral establecido por la IEC 61400.
  - La configuración con planetas equiespaciados y en fase secuencial (ESSP) presentó peores resultados en términos de valor de $K\gamma$ que la anterior. El inherente desfase en el engrane de los planetas introduce un desequilibrio que afecta negativamente el reparto de carga. Los valores de $K\gamma$ fueron más altos y la probabilidad de superar el umbral de la IEC 61400 fue mayor que en la ESIP. Este efecto se amplificó con el aumento de las tolerancias de fabricación.
  - La configuración con planetas equiespaciados y en contrafase (ESSP-CP) presentó los peores resultados de $K\gamma$ del estudio, pero equiparándose a los correspondientes a la ESSP para tolerancias de fabricación altas.
- El aumento de la tolerancia de los errores de fabricación afecta a los valores de $K\gamma$ en términos probabilísticos, produciendo:
  - Un aumento sensible en el valor de la moda, pero su probabilidad es notablemente menor.
  - Una mayor dispersión de los valores de $K\gamma$.
  - En el caso de 4 planetas, tanto para la ESIP como para la ESSP, no se supera el umbral para ninguna de las tolerancias de fabricación.
- Las transmisiones de 3 planetas presentan valores de $K\gamma$ sensiblemente menores que las de 4 planetas. Sin embargo, su probabilidad de fallo debido al incumplimiento de la normativa es sustancialmente mayor.

5. Conclusiones

Desde una perspectiva práctica, los resultados sugieren que, como era de esperar, las transmisiones planetarias con configuraciones ESIP son preferibles en aplicaciones donde la robustez frente a los errores de fabricación es crítica. Estas configuraciones ofrecen una distribución de carga más equilibrada y una menor variabilidad en los valores de $K\gamma$, lo que puede traducirse en una mayor durabilidad de las transmisiones. Por otro lado, las transmisiones ESSP presentó peores resultados en términos de valor de $K\gamma$ que la anterior por el inherente desfase en el engrane, lo que sugiere que la secuencia del engrane debe ser cuidadosamente considerada y controlada durante el diseño y la fabricación de las transmisiones. Sin embargo, la mayoría de los resultados correspondientes a la ESSP cumplen con el estándar, presentando ventajas desde un punto de vista dinámico que la primera no, pudiendo ser

una alternativa interesante dependiendo de las condiciones de operación y si se tiene un control estricto de las tolerancias de fabricación.

El aumento de la tolerancia de fabricación va a resultar en que el planeta más cargado va a tener mayor probabilidad de estar más solicitado con un error de fabricación mayor y en una mayor variabilidad en la carga máxima del planeta. Sin embargo, hay configuraciones que no superan el umbral para ninguna de las tolerancias máximas, sugiriendo que, aun ajustando el proceso de fabricación a tolerancias mayores (disminución de la calidad), las transmisiones resultantes van a seguir cumpliendo el estándar, pudiendo suponer un ahorro en costes de fabricación.

El aumento del número de planetas de 3 a 4 ha supuesto un ligero empeoramiento del Kγ neto, pero una mejora sustancial en el cumplimiento de la norma. Además, se ha demostrado que, para transmisiones de 4 planetas, la decisión del tipo de configuración puede ser tan relevante como las tolerancias del proceso de fabricación, influenciando en gran medida el cumplimiento de la norma.

Estos hallazgos subrayan la importancia de la elección del tipo de configuración y número de planetas en el diseño de transmisiones, en consonancia con el control de calidad de sus procesos de fabricación para minimizar los efectos negativos de los errores y garantizar un funcionamiento óptimo de las transmisiones planetarias.

Agradecimientos y declaraciones

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto PID2023-149926OB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039 /501100011033 y por FEDER, UE.

6. Referencias

[1] A. Diez-Ibarbia, A. Fernandez-Del-Rincon, M. Iglesias, A. De-Juan, P. Garcia, y F. Viadero, «Efficiency assessment in spur gears with shifting and profile modifications», *Mechanisms and Machine Science*, vol. 43, pp. 193-201, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-44156-6_20.

[2] E. Fatourehchi *et al.*, «Effect of mesh phasing on the transmission efficiency and dynamic performance of wheel hub planetary gear sets», *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*, vol. 232, n.º 19, pp. 3469-3481, oct. 2018, doi: 10.1177/0954406217737327.

[3] R. Karki y R. Billinton, «Cost-effective wind energy utilization for reliable power supply», *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, n.º 2, pp. 435-440, 2004, doi: 10.1109/TEC.2003.822293.

[4] D. P. Gaver, F. E. Montmeat, y A. D. Patton, «Power System Reliability I—Measures of Reliability and Methods of Calculation», *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 83, n.º 7, pp. 727-737, 1964, doi: 10.1109/TPAS.1964.4766068.

[5] A. M. Al-Shaalan, *Reliability Evaluation of Power Systems*. 2019. doi: 10.5772/intechopen.85571.

[6] F. Viadero, A. Fernández, M. Iglesias, A. De-Juan, E. Liaño, y M. A. Serna, «Non-stationary dynamic analysis of a wind turbine power drivetrain: Offshore considerations», *Applied Acoustics*, vol. 77, pp. 204-211, 2014, doi: 10.1016/j.apacoust.2013.10.006.

[7] P. García *et al.*, «Access systems to marine energy production units. Review and new challenges», en *European Conference on Mechanism Science (EUCOMES 2018)*, 2018.

[8] M. De Carlo y G. Mantriota, «Electric vehicles with two motors combined via planetary gear train», *Mech Mach Theory*, vol. 148, jun. 2020, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103789.

[9] E. Mucchi y G. Dalpiaz, «Elasto-dynamic analysis of a gear pump-Part III: Experimental validation procedure and model extension to helical gears», *Mech Syst Signal Process*, vol. 50-51, pp. 174-192, 2015, doi: 10.1016/j.ymssp.2014.05.048.

[10] M. Awadallah, «Dynamic modelling and simulation of a manual transmission based mild hybrid vehicle», *Mech Mach Theory*.

[11] «Global Wind Workforce Outlook», 2024.

[12] «GWEC.NET Associate Sponsors Podcast Sponsor Leading Sponsor Supporting Sponsor Co-leading Sponsor».

[13] A. M. Al-Shaalan, *Reliability Evaluation of Power Systems*. 2019. doi: 10.5772/intechopen.85571.

[14] R. Billinton y R. Karki, «Application of Monte Carlo simulation to generating system well-being analysis», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, n.º 3, pp. 1172-1177, 1999, doi: 10.1109/59.780954.

[15] R. Billinton, H. Chen, y R. Ghajar, «Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy», *Microelectronics Reliability*, vol. 36, n.º 9, pp. 1253-1261, 1996, doi: 10.1016/0026-2714(95)00154-9.

[16] Billinton R Karki R, «Application of Monte Carlo simulation to generating system well-being analysis», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, n.º 3, pp. 1172-1177, 1999, doi: 10.1002/etep.157.

[17] J. Zhang y F. Guo, «Statistical modification analysis of helical planetary gears based on response surface method and Monte Carlo simulation», *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 28, n.º 6, pp. 1194-1203, 2015, doi: 10.3901/CJME.2015.0610.079.

[18] N. Driot, E. Rigaud, y J. Perret-Liaudet, «Gdn-12 Variability of Critical Rotational Speeds of Gearbox Induced By Misalignment and Manufacturing Errors(Gear Dynamics and Noise)», *The Proceedings of the JSME*

international conference on motion and power transmissions, vol. I.01.202, n.º 0, pp. 63-67, 2001, doi: 10.1299/jsmeimpt.i.01.202.63.

[19] S. Sundaresan, K. Ishii, y D. R. Houser, «A procedure using manufacturing variance to design gears with minimum transmission error», *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 113, n.º 3, pp. 318-324, 1991, doi: 10.1115/1.2912785.

[20] A. Fernández-Del-Rincón, M. Iglesias, A. De-Juan, A. Diez-Ibarbia, P. García, y F. Viadero, «Gear transmission dynamics: Effects of index and run out errors», *Applied Acoustics*, vol. 108, 2016, doi: 10.1016/j.apacoust.2015.11.012.

[21] M. Iglesias, A. Fernandez del Rincon, A. De-Juan, P. Garcia, A. Diez-Ibarbia, y F. Viadero, «Planetary transmission load sharing: Manufacturing errors and system configuration study», *Mech Mach Theory*, vol. 111, pp. 21-38, may 2017, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.12.010.

[22] J. Sánchez-Espiga, A. F. del Rincón, M. Iglesias, A. de-Juan, y F. Viadero, «Impact of position and tooth thickness errors on planetary transmission under different meshing phase», en *European Conference on Mechanism Science (EUCOMES 2020)*, 2020.

[23] M. Pleguezuelos, M. B. Sánchez, y J. I. Pedrero, «Analytical model for meshing stiffness, load sharing, and transmission error for spur gears with profile modification under non-nominal load conditions», *Appl Math Model*, vol. 97, pp. 344-365, 2021, doi: 10.1016/j.apm.2021.03.051.

[24] J. Kim, Y. Park, G. Lee, y J. Kim, «An Experimental Study on the Effect of Carrier Pinhole Position Errors on Planet Gear Load Sharing», vol. 17, n.º 10, pp. 1305-1312, 2016, doi: 10.1007/s12541-016-0155-0.

[25] A. Bodas y A. Kahraman, «Influence of Carrier and Gear Manufacturing Errors on the Static Load Sharing Behavior of Planetary Gear Sets», *JSME International Journal Series C*, vol. 47, n.º 3, pp. 908-915, 2004, doi: 10.1299/jsmec.47.908.

[26] P. Velex y M. Maatar, «A mathematical model for analyzing the influence of shape deviations and mounting errors on gear dynamic behaviour», *J Sound Vib*, vol. 191, n.º 5, pp. 629-660, 1996, doi: 10.1006/jsvi.1996.0148.

[27] H. Ligata, A. Kahraman, y A. Singh, «An Experimental Study of the Influence of Manufacturing Errors on the Planetary Gear Stresses and Planet Load Sharing», *Journal of Mechanical Design*, vol. 130, n.º 4, p. 41701, 2008, doi: 10.1115/1.2885194.

[28] M. Iglesias, A. Fernández del Rincón, A. M. De-Juan, P. Garcia, A. Diez, y F. Viadero, «Planetary gear profile modification design based on load sharing modelling», *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 28, n.º 4, 2015, doi: 10.3901/CJME.2015.0307.025.

[29] J. Sanchez-Espiga, A. Diez-Ibarbia, A. Fernandez-del-Rincon, M. Iglesias, y F. Viadero, «Mesh Load Factor Uncertainty Analysis in a 5-MW Wind Turbine Planetary Gearbox Affected by Inherent Manufacturing Errors», *Wind Energy*, vol. 28, n.º 1, ene. 2025, doi: 10.1002/we.2967.

[30] A. Diez-Ibarbia, J. Sanchez-Espiga, A. Fernandez-del-Rincon, J. Calvo-Irisarri, M. Iglesias, y F. Viadero, «Probabilistic analysis of the mesh load factor in wind-turbine planetary transmissions: Tooth thickness errors», *Mech Mach Theory*, vol. 185, p. 105341, jul. 2023, doi: 10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2023.105341.

[31] «ISO 6336 - Calculation of load capacity of spur and helical gears - Application for industrial gears», n.º 1, 1996.

[32] «Din Standard-3967: System of Gear Fits Principles: Backlash, Tooth Allowances, Tooth Thickness Tolerances», 1978.

[33] «IEC61400 – 4: Design Requirements for wind turbine gearboxes», 2012.

[34] J. Sanchez-Espiga, A. Fernandez-del-Rincon, M. Iglesias, y F. Viadero, «Influence of errors in planetary transmissions load sharing under different mesh phasing», *Mech Mach Theory*, vol. 153, p. 104012, 2020, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104012.

[35] J. Sanchez-Espiga, A. Fernandez-del-Rincon, M. Iglesias, y F. Viadero, «Planetary gear transmissions load sharing measurement from tooth root strains: Numerical evaluation of mesh phasing influence», *Mech Mach Theory*, vol. 163, p. 104370, 2021, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104370.

[36] M. Iglesias, A. Fernández, A. De-Juan, R. Sancibrián, y P. García, «Planet position errors in planetary transmission: Effect on load sharing and transmission error», *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 8, n.º 1, pp. 80-87, mar. 2013, doi: 10.1007/s11465-013-0362-7.

[37] M. Iglesias, A. Fernandez del Rincon, A. de-Juan, A. Diez-Ibarbia, P. Garcia, y F. Viadero, «Advanced model for the calculation of meshing forces in spur gear planetary transmissions», *Meccanica*, vol. 50, n.º 7, 2015, doi: 10.1007/s11012-015-0130-3.

[38] K. Weber C. Banaschek, *The deformation of loaded gears and the effect on their load carrying capacity*. London, 1951.

[39] E. Wildhaber, «Measuring Tooth Thickness of Involute Gears», 1923.

[40] N. Metropolis y S. Ulam, «The Monte Carlo Method», *J Am Stat Assoc*, vol. 44, n.º 247, pp. 335-341, 1949, doi: 10.1080/01621459.1949.10483310.

[41] «ISO 21771-1:2024(en), Cylindrical involute gears and gear pairs — Part 1: Concepts and geometry», 2024.

[42] J. Sanchez-Espiga, M. Fuerst, A. Fernandez-del-Rincon, M. Otto, F. Viadero, y K. Stahl, «On the behaviour of n-planets planetary gear sets influenced by geometrical design factors», *Mech Mach Theory*, vol. 205, 2025, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2024.105860.