



UC | Universidad de Cantabria



DMLab[®]: software para el cálculo y dimensionado de elementos de máquina

I. Ulacia^{1*}, A. Iñurritegui¹, J. Larrañaga¹, A. Arana¹

¹ Dpto. de Mecánica y Producción Industrial. Mondragon Unibertsitatea, Arrasate-Mondragón, España.

[*iulacia@mondragon.edu](mailto:iulacia@mondragon.edu)

La ingeniería de elementos de máquina abarca el diseño y dimensionado de componentes críticos, como engranajes, acoplamientos, rodamientos, husillos y mecanismos de leva-seguidor, que son fundamentales en la mayoría de sistemas mecánicos modernos. La comprensión y el cálculo preciso de estos elementos resulta esencial no solo para la práctica profesional, sino también para la formación de futuros ingenieros en contextos académicos. Sin embargo, a medida que aumenta la complejidad de los sistemas de diseño y análisis, se hace necesario contar con herramientas accesibles que permitan a los estudiantes aplicar los conceptos teóricos en escenarios reales.

DMLab[®] es el resultado de años de investigación del grupo de investigación en diseño mecánico, cuyo esfuerzo ha dado como fruto un software intuitivo y potente para el cálculo y dimensionado de elementos de máquina en entornos educativos y profesionales. Este software permite que los usuarios comprendan y apliquen los principios de diseño mecánico mediante un enfoque práctico y basado en casos de estudio. Entre los módulos destacados, DMLab[®] incluye el análisis de sistemas de leva-seguidor, engranajes, husillos a bolas y rodamientos. Cada módulo de DMLab[®] proporciona un entorno interactivo donde los usuarios pueden experimentar con configuraciones y parámetros, optimizando el diseño según los requerimientos de cada aplicación.

Además, una de las funcionalidades clave de DMLab[®] es su capacidad para generar automáticamente programas de simulación por elementos finitos, facilitando el análisis más detallado de los elementos de máquina y permitiendo que los estudiantes e investigadores experimenten con herramientas de alta precisión, estándar en la industria, que van más allá de los cálculos analíticos tradicionales. Gracias a sus capacidades, DMLab[®] no solo facilita el aprendizaje de los fundamentos teóricos, sino que también apoya el desarrollo de competencias prácticas, permitiendo a los estudiantes una comprensión más profunda y aplicada de los elementos de máquina en escenarios de uso real.

1. Introducción

El estudio de los elementos de máquina se centra en el análisis y diseño de componentes clave —como engranajes, acoplamientos, rodamientos, husillos y mecanismos leva-seguidor— que desempeñan un papel central en numerosos sistemas mecánicos actuales. Su cálculo riguroso y su comprensión profunda son competencias imprescindibles tanto en el ámbito profesional como en la formación académica de ingenieros. En este contexto, la enseñanza de estos elementos requiere enfoques pedagógicos que integren fundamentos teóricos con experiencias prácticas, de modo que los estudiantes adquieran una perspectiva holística sobre su funcionamiento e integración en sistemas mecánicos más amplios. A su vez, la complejidad creciente de las herramientas de diseño y simulación impone la necesidad de recursos didácticos que faciliten la asimilación de estos conocimientos y su aplicación a situaciones reales.

Diversos estudios han destacado la importancia de implementar estrategias didácticas en la enseñanza de los elementos de máquina. Por ejemplo, Pleguezuelos et al. de la UNED [1] desarrollaron metodologías específicas para mejorar la comprensión de los sistemas leva-seguidor en la formación de ingenieros. Asimismo, en el Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica se han presentado enfoques innovadores para la enseñanza del diseño de máquinas, integrando recursos digitales y simulaciones mediante herramientas de desarrollo propio, como por ejemplo la herramienta desarrollada por Lopez et al. de la UPM, Edimpo [2]. Estas iniciativas han sido valoradas positivamente tanto por el alumnado como por el profesorado, evidenciando su impacto en la mejora del aprendizaje, por lo que representan una vía interesante a seguir explorando en el ámbito de la enseñanza del diseño de máquinas.

De manera similar, herramientas comerciales como KissSoft, utilizada para el diseño y análisis de engranajes, Camnetics, especializada en sistemas de leva, y MitCalc, que opera en entorno Excel, han sido incorporadas en entornos académicos y de investigación para reforzar el aprendizaje de los estudiantes. Además, la herramienta en línea Mechanicus desarrollada por FVA ha permitido ampliar el acceso a simulaciones avanzadas en la enseñanza de elementos de máquina. Estos softwares proporcionan modelos de referencia que permiten el análisis detallado de componentes mecánicos, facilitando el desarrollo de habilidades prácticas en la simulación y optimización de elementos de máquina. Existen, además, herramientas altamente especializadas como IGD o Meshparts para el análisis avanzado mediante elementos finitos de engranajes o elementos rodantes respectivamente, que complementan el ecosistema de diseño mecánico.

Sin embargo, estas soluciones comerciales carecen de una integración holística que permita abarcar múltiples elementos de máquina en un solo entorno, obligando a los usuarios a utilizar distintas herramientas para diferentes componentes. Esta fragmentación dificulta la comparación de resultados y la validación conjunta de diseños complejos, ya que cada software opera con su propia metodología de cálculo y criterios de dimensionado. Asimismo, el uso de múltiples plataformas implica costos adicionales de adquisición y licencias, así como una curva de aprendizaje prolongada para los estudiantes e ingenieros en formación.

Otra limitación significativa es que muchos de estos programas no ofrecen la posibilidad de generar automáticamente modelos para simulación por elementos finitos, una herramienta clave para validar los cálculos analíticos y predecir el comportamiento real de los componentes. Sin esta capacidad, los usuarios deben recurrir a software externo para realizar análisis más detallados, lo que introduce inconsistencias y aumenta el tiempo requerido para evaluar soluciones de diseño. Además, el enfoque industrial de estas herramientas prioriza la optimización de diseños para producción, dejando en segundo plano la flexibilidad y adaptabilidad necesarias en un entorno educativo. Para la enseñanza, es crucial contar con plataformas que permitan modificar parámetros libremente, realizar pruebas exploratorias y comprender la influencia de distintos factores en el desempeño de los elementos de máquina.

En este contexto, surge DMLab[®] como una solución innovadora que integra distintos elementos de máquina en un único software, facilitando su comprensión y aplicación en un entorno unificado. Fruto de años de investigación en diseño mecánico, este software intuitivo y potente permite el cálculo y dimensionado de componentes en entornos educativos y profesionales.

DMLab[®] no solo refuerza la enseñanza de la ingeniería mecánica mediante cálculos y simulaciones, sino que también integra estos modelos de análisis en un entorno común. Sus módulos abarcan sistemas de leva-seguidor, engranajes, husillos a bolas y rodamientos, ofreciendo una plataforma interactiva donde los usuarios pueden modificar parámetros y evaluar su impacto en el diseño.

Además, su capacidad para generar automáticamente programas de simulación por elementos finitos permite análisis detallados, favoreciendo la validación de modelos teóricos en investigación. De este modo, el software no solo fortalece el aprendizaje en el aula, sino que también se convierte en una herramienta clave en la formación de profesionales especializados en el diseño y análisis de sistemas mecánicos avanzados.

2. Desarrollo de la herramienta

2.1. Arquitectura de la solución adoptada

Las premisas con las que se ha desarrollado la herramienta son las siguientes:

- El código fuente que se desarrolla en el equipo de investigación se realiza en Matlab. Aunque puede que no sea la óptima desde el punto de vista de rendimiento informático, la facilidad de aprendizaje para ingenieros mecánicos hace que sea la primera opción a la hora de programar. Sin embargo, debido a la necesidad de compartir código y unificarlo, también hace que el usuario final, sea alumno o investigador, termine pasando tiempo comprendiendo y desarrollando código, con lo que no se optimiza el uso y análisis de la herramienta desarrollada.
- Se requiere que la herramienta pueda ser utilizada en cualquier plataforma, tales como web, PC o dispositivos móviles como teléfonos móviles o tabletas. Esto implica que su arquitectura debe diseñarse de manera que pueda ejecutarse en múltiples entornos sin necesidad de realizar adaptaciones complejas para cada uno.
- Es fundamental garantizar que los usuarios accedan solo a los módulos que necesitan y tengan habilitados. Esto no solo permite una experiencia más eficiente y personalizada, sino que también mejora la seguridad del sistema, evitando accesos no autorizados a información o funcionalidades que no correspondan a ciertos perfiles de usuario. Además, esto facilita la escalabilidad de la herramienta, ya que se pueden agregar o restringir módulos según las necesidades específicas de cada usuario o grupo de trabajo.

Con estas premisas, se han separado el motor de cálculo (*back-end*) de la interfaz de usuario (*front-end*). Tal y como se muestra en la Figura 1, el *front-end*, desarrollado en Flutter, se conecta al *back-end* a través de un autenticador de usuario basado en .NET, el cual le permite acceder a los módulos a los que tiene acceso dependiendo de los permisos que tenga en la base de datos. Para garantizar la seguridad en el almacenamiento de contraseñas de los usuarios, estas se guardan de manera cifrada con un proceso que incorpora un "salt" aleatorio y un algoritmo HMAC. Este método impide ataques de fuerza bruta mediante tablas precomputadas, ya que cada contraseña debe ser calculada individualmente. Además, se emplean hashes de 512 bits, lo que incrementa la seguridad y dificulta el descifrado por parte de atacantes.

Flutter utiliza un motor de alto rendimiento para renderizar cada componente de la interfaz, ofreciendo un desempeño similar al de aplicaciones nativas [3]. Su arquitectura compila código en C/C++ para Android e iOS y el código en Dart se traduce a código nativo mediante compilación anticipada (AOT), optimizando los tiempos de ejecución [4]. Además, Flutter proporciona *hot-reload*, permitiendo a los desarrolladores visualizar cambios en tiempo real y acelerar el desarrollo. Dart, el lenguaje de Flutter, integra características avanzadas de JavaScript y mantiene una sintaxis similar a Java, facilitando su adopción.

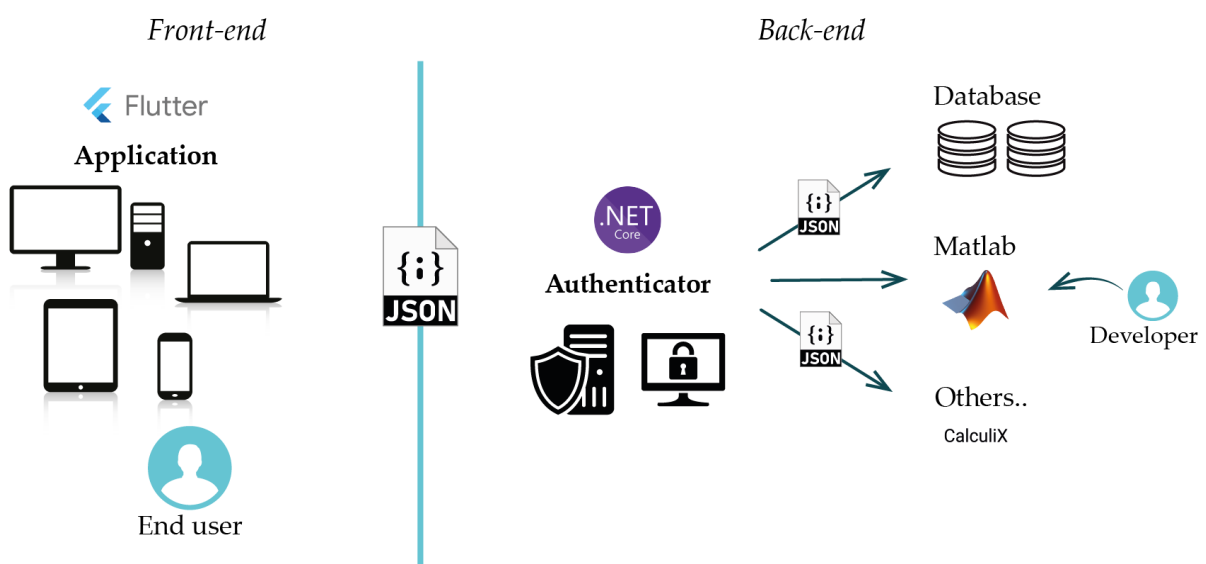


Figura 1: Arquitectura del software DMLab®.

Entre las particularidades que explica este proyecto, la más destacada es que tiene dependencias de software de terceros y que las distintas partes de la aplicación utilizan tecnologías diferentes. Además, es un factor clave que en los distintos módulos puedan trabajar personas con distintos conocimientos y especialidades.

El diseño basado en microservicios desacopla las dependencias o enlaces que puedan existir entre los distintos componentes, permitiendo que los trabajadores se concentren en su área de especialización [5]. Como resultado, se aumenta la productividad y se reducen los tiempos de desarrollo de nuevos softwares. Para que estos microservicios puedan comunicarse entre sí, solo necesitan ser capaces de hablar un único idioma en común.

Para la transmisión de datos entre los servicios, se ha definido una estructura de datos específica. Se ha elegido JSON como formato para almacenar y transportar los datos. JSON es un formato ligero, siempre que la estructura de los datos esté bien definida y no sea demasiado compleja.

En el desarrollo de software moderno, las aplicaciones basadas en microservicios requieren entornos flexibles, escalables y eficientes. Cada microservicio es una unidad independiente que puede desarrollarse, desplegarse y escalarse de manera autónoma. Sin embargo, gestionar múltiples microservicios con sus respectivas dependencias y configuraciones en diferentes entornos puede ser complejo y propenso a errores. La contenedorización resuelve este problema encapsulando cada microservicio con todas sus dependencias en un entorno aislado, asegurando que funcione de manera consistente en cualquier infraestructura.

Entre las principales ventajas de la contenedorización destaca la portabilidad, ya que los contenedores pueden ejecutarse en cualquier sistema con Docker sin necesidad de configuraciones adicionales. También mejora la modularidad, permitiendo actualizar, escalar o modificar microservicios individuales sin afectar al resto del sistema. Además, favorece la eficiencia en el desarrollo y despliegue, ya que los entornos de producción y desarrollo pueden replicarse con exactitud, reduciendo problemas derivados de diferencias en configuraciones locales. Finalmente, la escalabilidad es un factor clave, ya que los contenedores pueden desplegarse dinámicamente según la demanda, optimizando el uso de recursos y mejorando la estabilidad del sistema.

En el contexto de este proyecto, la contenedorización permite gestionar distintos componentes como la API, bases de datos y funciones MATLAB de manera independiente. La Figura 2 muestra un ejemplo de esta contenedorización aplicada a los microservicios de tres módulos específicos: *cam*, *gear* y *ballscrew*. Gracias a herramientas como Docker-Compose, se pueden definir y orquestar múltiples contenedores en un solo archivo de configuración, facilitando su despliegue automatizado. Además, el uso de volúmenes asegura la persistencia de datos cuando es necesario, evitando la pérdida de información al reiniciar los contenedores. En conjunto, estas prácticas garantizan un desarrollo más ágil, fiable y escalable en la implementación de microservicios.

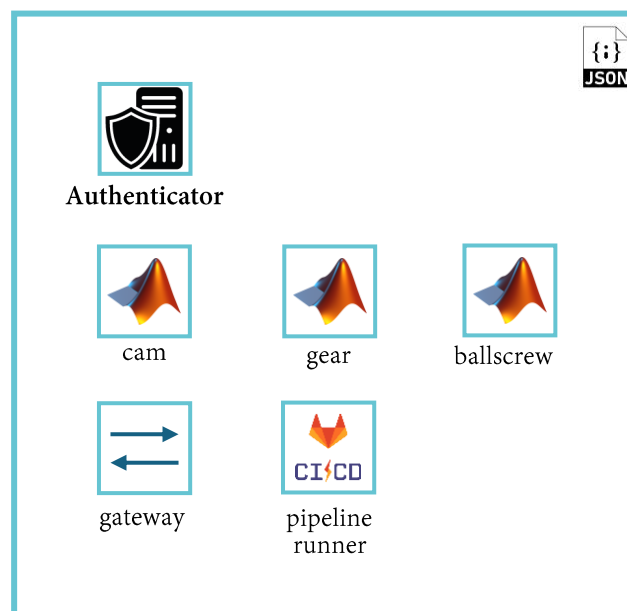


Figura 2: Esquema de la contenerización de microservicios empleando Docker.

2.2. Módulos desarrollados

Todos los módulos de DMLab[®] siguen una misma estructura (Figura 3), dividiendo la información en parámetros de entrada y resultados en forma de datos, generalmente graficados para su análisis por parte del usuario. Cada módulo combina cálculos analíticos con procedimientos específicos de modelado y simulación por elementos finitos. Los cálculos analíticos se organizan según las etapas fundamentales del diseño y análisis de cada componente, incluyendo el análisis cinemático, la distribución de carga, la rigidez y, finalmente, la estimación de vida a fatiga. Estos cálculos analíticos se realizan con las ecuaciones clásicas que se pueden encontrar en cualquier libro de texto de elementos de máquina como por ejemplo [6] y que se utilizan en docencia.

En cuanto a la generación de modelos de elementos finitos, se parte de la geometría analítica previamente diseñada, la cual se discretiza automáticamente siguiendo el procedimiento descrito por los autores en [7]. Una vez completada esta discretización, la herramienta permite ejecutar las fases estándar del análisis por elementos finitos, tales como la definición de condiciones de contorno, aplicación de cargas y asignación de propiedades de los materiales a partir de una base de datos. DMLab[®] también permite la generación automática de archivos de entrada (input decks) compatibles con distintos software de elementos finitos, tanto comerciales (Abaqus, Ansys, Marc) como de código abierto (CalculiX, Akantu).

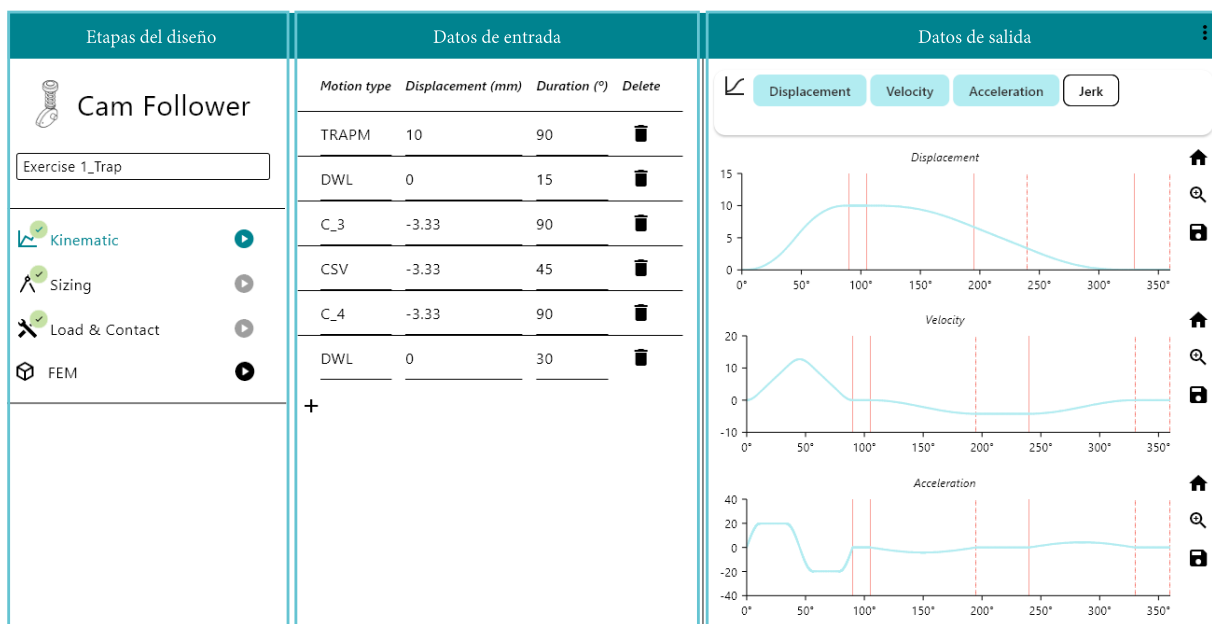


Figura 3: Ejemplo del módulo de levas en el que se observan las zonas en las que se divide la interfaz gráfica.

Actualmente, DMLab[®] cuenta con cinco módulos: leva-seguidor, engranajes, acoplamientos dentados, husillos a bolas y rodamientos (Figura 4). A continuación, se describen sus principales funcionalidades:

Sistemas leva-seguidor

Este módulo comienza con la definición de las curvas de movimiento que determinan el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y el choque (*jerk*) del seguidor. Se pueden seleccionar curvas de movimiento estándar, como las armónicas (simples y dobles), cicloidales, elípticas y polinomiales (desde grado 2-3 hasta 4-5-6-7 con control de *jerk*), así como curvas modificadas (trapezoidal, senoidal, cicloidal) que optimizan parámetros como velocidad, aceleración o *jerk*.

Una vez establecida la cinemática, se calcula el perfil de la leva mediante inversión cinemática empleando el método analítico-vectorial y se analizan parámetros clave como el ángulo de presión y los radios de curvatura a lo largo del ciclo de trabajo. Finalmente, se calculan las presiones de contacto para evaluar la resistencia a fatiga superficial.

Transmisiones por engranajes

Este módulo permite el diseño y análisis de engranajes considerando tanto la macro como la microgeometría. Incluye herramientas para la definición de perfiles de herramienta, la corrección del perfil y el análisis cinemático del punto de contacto. Además, permite calcular la distribución de carga en los dientes, así como las tensiones en el pie y las presiones de contacto en toda la línea de acción para evaluar el comportamiento del engranaje en condiciones reales de operación.

Acoplamientos dentados

El módulo de acoplamientos dentados permite la generación del perfil del dentado, tanto interior como exterior. También calcula las tensiones en la base del diente y las presiones de contacto, considerando posibles desalineaciones entre los componentes acoplados. La herramienta considera el número de dientes en contacto dependiendo únicamente de la desalineación, siguiendo métodos clásicos de cálculo. También tiene la posibilidad de incluir este coeficiente en base a cálculos más detallados de elementos finitos.

Husillos a bolas

Este módulo ofrece cálculos analíticos para la estimación de la vida útil del husillo en base a la norma ISO 3408-Parte 5. Se puede definir la capacidad de carga dinámica mediante datos de catálogo o calcularla según la normativa establecida. Adicionalmente, permite analizar las frecuencias naturales del sistema, considerando la rigidez de los distintos cuerpos y los rodamientos asociados.

Rodamientos

Este módulo sigue una metodología similar a la del análisis de husillos a bolas, permitiendo el cálculo de vida útil y la evaluación de las condiciones operativas de los rodamientos bajo distintas cargas y configuraciones.

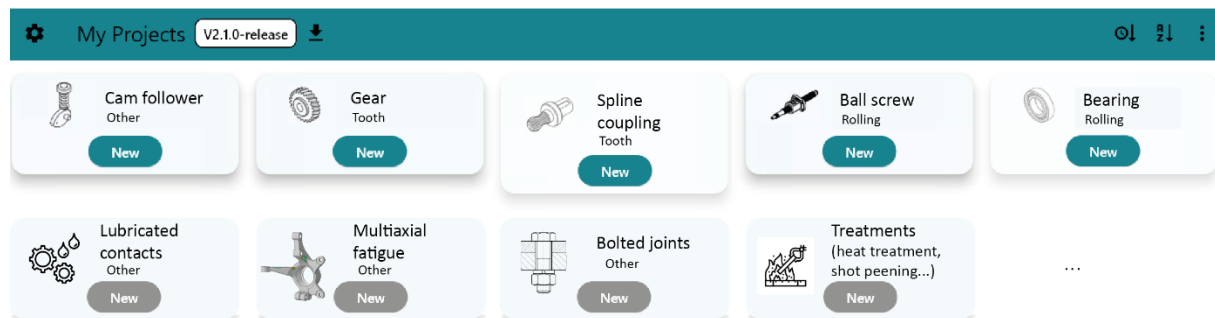


Figura 4: Interfaz inicial con los módulos operativos (arriba) y los nuevos módulos en desarrollo (abajo).

Siguiendo la filosofía de desarrollo de DMLab[®], se prevé la implementación de nuevos módulos para ampliar sus capacidades. Entre ellos se incluyen:

- Uniones roscadas, con análisis de precarga y distribución de esfuerzos.
- Resolución de problemas de contacto lubricado (lubricación elasto-hidrodinámica y mixta) para evaluar el comportamiento tribológico de superficies en contacto.
- Evaluación a fatiga multiaxial, considerando las tensiones combinadas en distintos planos.
- Tratamientos térmicos y superficiales, como el shot peening, para mejorar la resistencia a fatiga de los componentes.

Estas nuevas funcionalidades permitirán abordar una mayor variedad de problemas en el diseño y análisis de sistemas mecánicos, consolidando a DMLab[®] como una herramienta versátil y avanzada en el ámbito de la ingeniería.

2.3. Despliegue y licenciamiento

Hasta el momento, en el ámbito docente, la herramienta ha sido utilizada exclusivamente por los profesores del grupo de investigación en el Máster de Ingeniería Industrial, dentro de la asignatura "Diseño, Cálculo y Verificación de Máquinas", desde el año 2022.

En el ámbito de la investigación, su uso se ha extendido a diversos profesores y doctorandos del grupo de investigación, quienes la emplean para el desarrollo y validación de modelos en distintos proyectos. En las secciones 3 y 4 se presentan ejemplos específicos de su aplicación tanto en docencia como en investigación.

No obstante, el objetivo a futuro es ampliar su alcance y permitir que profesores e investigadores de otras universidades la utilicen, con el fin de evaluar su usabilidad y consolidarla como una herramienta versátil para la comunidad de ingeniería mecánica, tanto en docencia como en investigación. Para facilitar su adopción y despliegue, se ha redactado un End-User License Agreement (EULA) que regula su uso y distribución.

3. Ejemplo de aplicación en docencia

A continuación, se presenta un ejemplo de aplicación de la herramienta DMLab[®], desarrollada en un entorno docente. En concreto, se describe una práctica de laboratorio de la asignatura "Diseño, Cálculo y Verificación de Máquinas", del Máster en Ingeniería Industrial. En esta actividad, los estudiantes, organizados en grupos, deben diseñar y calcular los elementos de una máquina automática —principalmente levas y engranajes— utilizando la herramienta DMLab[®]. Posteriormente, estos elementos son fabricados y puestos a prueba en el laboratorio. El objetivo principal de la práctica es optimizar el diseño para lograr la mayor cadencia posible de funcionamiento, respetando las condiciones geométricas y dinámicas del sistema, lo cual supone un desafío técnico que fomenta tanto la creatividad como la toma de decisiones fundamentadas.

3.1. Contexto y enunciado de la práctica

La máquina objeto de estudio (Figura 5) ha sido diseñada y construida por el grupo de investigación para fines didácticos. Se trata de un sistema automático que ejecuta dos movimientos principales con el fin de clasificar pasadores en distintos alojamientos (8). El conjunto está accionado por un motor eléctrico de 1,5 kW (1), controlado mediante un variador de frecuencia, que transmite el movimiento mediante un acoplamiento flexible (2) a un tren de engranajes (3 y 4). Estos engranajes mueven dos levas (5 y 6), encargadas de coordinar el funcionamiento del sistema.

La leva izquierda (5) acciona un mecanismo que desplaza un empujador (9) encargado de insertar los pasadores. La leva derecha (6), por su parte, regula el posicionamiento de los orificios donde se insertan dichos pasadores, los cuales descienden por gravedad desde un cargador superior (7). El mecanismo de inserción se basa en una doble deslizadera cuya separación varía según la posición de una barra inclinada (10), lo que permite controlar con precisión el desplazamiento horizontal necesario para cada inserción.

La práctica permite que cada grupo de estudiantes proponga una secuencia de inserción diferente, lo cual promueve la personalización del diseño y fomenta el aprendizaje activo. Además de definir dicha secuencia, los alumnos deben justificar sus decisiones de diseño a partir de los principios estudiados, considerando tanto la cinemática como la dinámica del sistema.

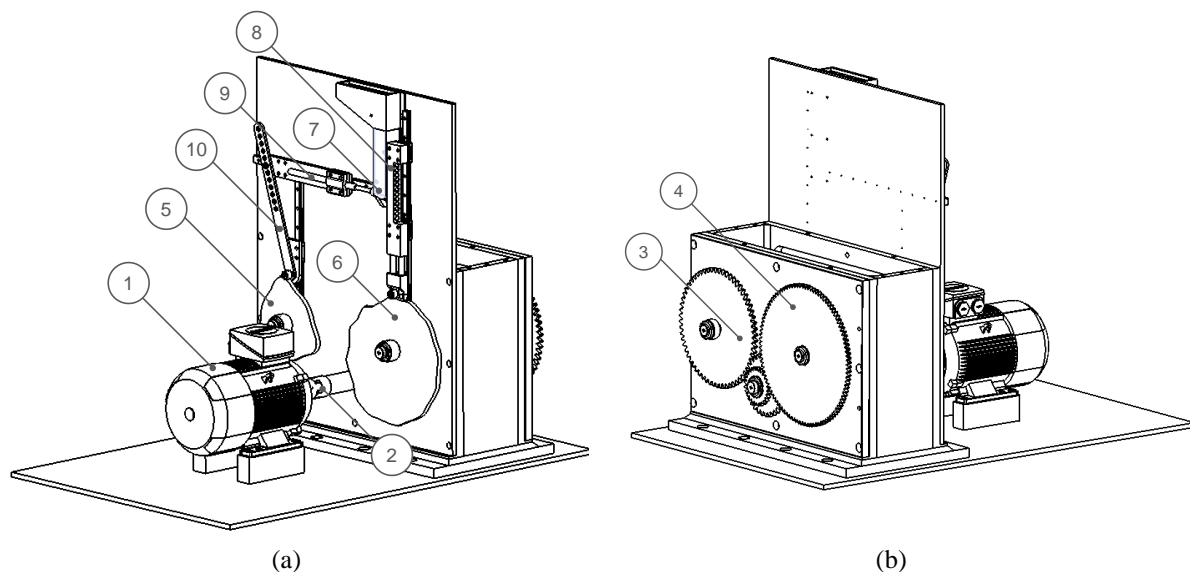


Figura 5: Diseño de la máquina didáctica para poner en práctica el conocimiento de levas y engranajes: (a) vista frontal, lado levas y (b) vista trasera, lado engranajes.

3.2. Cálculo y diseño de los perfiles de leva empleando DMLab[®]

Uno de los primeros pasos en el proceso es garantizar el sincronismo dentro de la cadena cinemática, representada mediante modelos de caja negra. Para ello, es fundamental analizar las distintas posibilidades de sincronización entre ambos movimientos y la relación de velocidades entre ambas levas.

En el caso de las levas, el trabajo comienza con la definición y representación de los diagramas de movimiento, velocidad y aceleración de los perfiles de leva de los dos mecanismos. La leva responsable del movimiento vertical (6), encargada de posicionar los alojamientos, debe detenerse en cada posición para permitir la inserción del pasador sin colisiones. Por ello, los alumnos deben seleccionar curvas de movimiento que comiencen y terminen con aceleración nula. Generalmente, el factor limitante es el ángulo de presión, ya que el espacio disponible es reducido. En consecuencia, las curvas más empleadas son las senoidales modificadas, que presentan

un máximo de velocidad menor. Por otro lado, la leva que controla el movimiento horizontal (5), encargada de insertar los pasadores, no debe detenerse durante la inserción y debe estar sincronizada para moverse cuando el cargador se encuentra en reposo. En esta fase, los alumnos analizan las posibilidades de solapamiento de movimientos para optimizar el funcionamiento del mecanismo.

Posteriormente, se verifica que los perfiles cumplan con los requisitos técnicos, asegurando que el ángulo de presión sea inferior a 30° en todo momento y que el radio de curvatura cumpla en todo momento que sea mayor al radio del seguidor empleado ($r_c > R_r$).

Además, se lleva a cabo un análisis de las fuerzas y presiones de contacto, determinando la seguridad frente a fatiga superficial y estimando la vida útil del seguidor de leva. Para ello, los alumnos deben seleccionar los resortes comerciales para asegurar el contacto en todo momento y alcanzar la máxima cadencia posible. La dinámica del mecanismo horizontal, supone un reto superior a los ejercicios resueltos en clase, en la que normalmente se trata de un único movimiento y el resorte debe hacer frente a la inercia de la masa de ese sistema. Además, la incertidumbre de la fricción añade realismo y complejidad al cálculo.

Finalmente, se equilibra el centro de masas de la leva para optimizar su comportamiento dinámico y se genera el plano de fabricación de las levas, asegurando que cumple con los requisitos de diseño y fabricación.

La Figura 6 muestra unas imágenes del proceso seguido en el cálculo y diseño de las levas extraídas del módulo de levas.

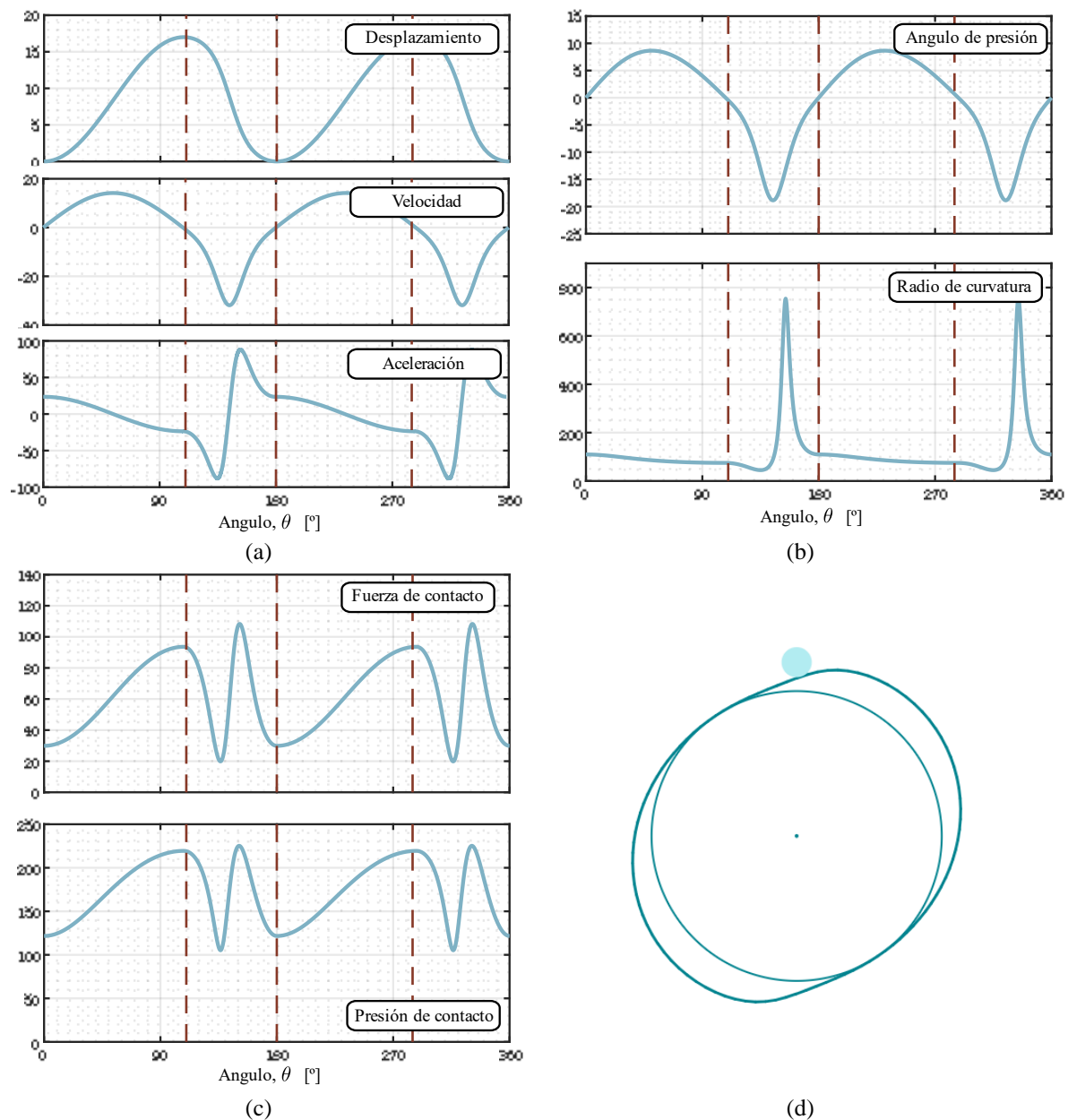


Figura 6: Imágenes del proceso de cálculo de una de las levas (a)-(c) y el perfil de leva obtenido (d): (a) cinemática, (b) ángulo de presión y radio de curvatura, (c) fuerzas y presiones de contacto.

3.3. Cálculo y diseño de los perfiles de los engranajes empleando DMLab®

El diseño de engranajes comienza con la determinación de la relación de velocidades entre ambas levas, lo que define la relación de transmisión requerida para cada engrane. El motor alcanza su máxima potencia a 1450 rpm y cuenta con un variador de frecuencia para ajustar su velocidad según las necesidades de cada alumno. Sin embargo, en la mayoría de los casos, es necesario reducir la velocidad al máximo en ambos sistemas de engranajes.

Dado que la distancia entre ejes está fijada, los alumnos comprenden de manera práctica la importancia de corregir el perfil del diente. El programa facilita el cálculo de esta corrección y permite visualizar su efecto en los patrones de deslizamiento. Por ello, el primer paso suele ser igualar los deslizamientos máximos entre el piñón y la rueda (Figura 7(b)).

A partir de ahí, comienza el dimensionado. Un aspecto crítico es determinar el par requerido en cada transmisión. Este par depende de la fuerza de contacto calculada en el análisis dinámico de las levas, la cual está influenciada en gran medida por el resorte seleccionado para compensar las aceleraciones negativas y la velocidad de giro. Dado que esta fuerza varía a lo largo del ciclo, el dimensionado se vuelve un desafío adicional. En general, al tratarse de pares pequeños, los alumnos suelen emplear el valor máximo en sus cálculos, aunque algunos aplican la regla de Palmer-Miner para estimar la vida a fatiga.

Una vez definido el par, se calculan las tensiones en el pie del diente (Figura 7(d)) y las presiones de contacto para evaluar el factor de seguridad en distintas configuraciones de módulo, número de dientes y correcciones.

Finalmente, antes de generar el plano de fabricación de los engranajes, los alumnos deben analizar la posición del chavetero con respecto a los dientes, para garantizar la sincronización de los movimientos de ambas levas durante el montaje.

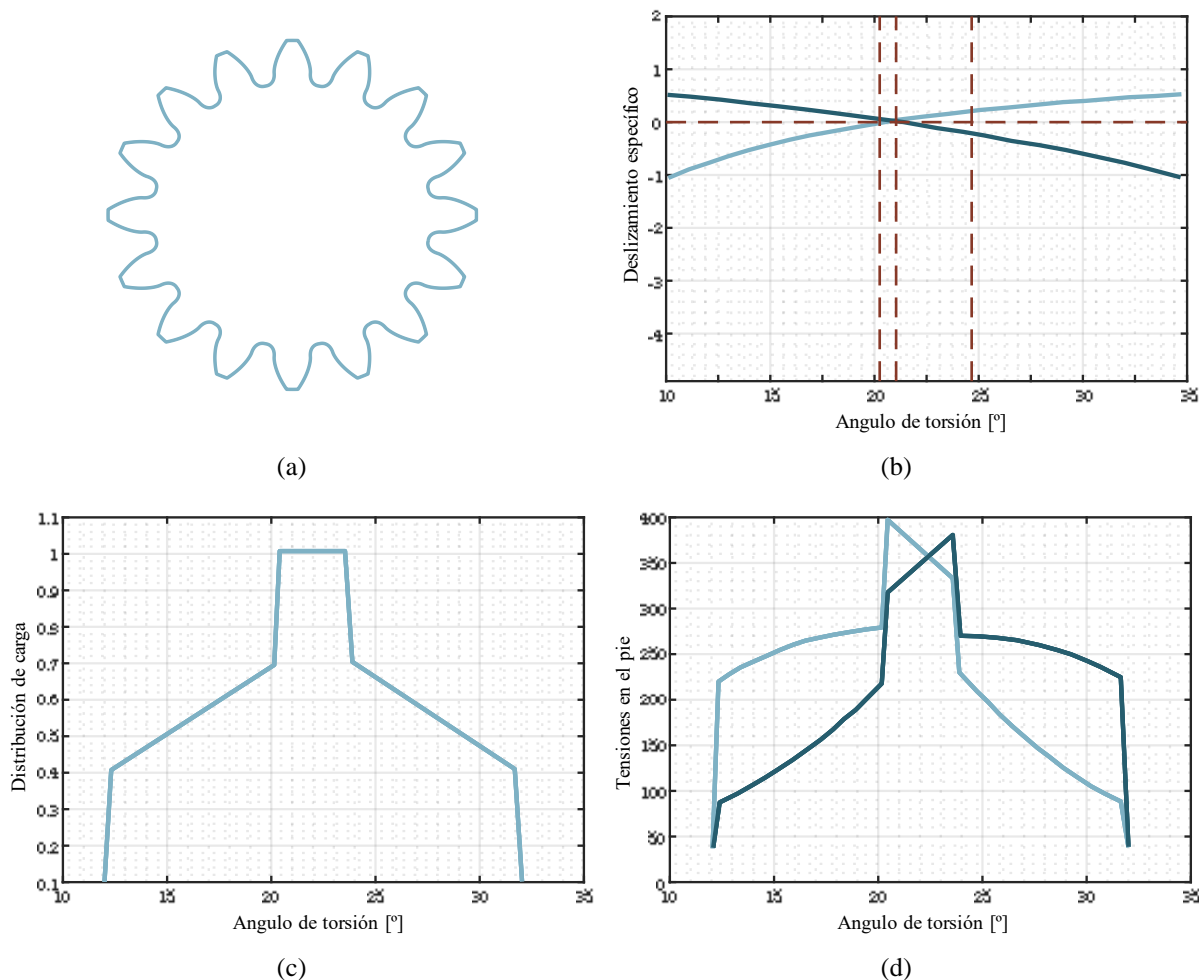


Figura 7: Imágenes del proceso de cálculo de engranajes: (a) geometría del piñón, (b) deslizamientos, (c) distribución de carga y (d) tensiones en el pie.

3.4. Resultados obtenidos en los ensayos

Finalmente, llega el momento más esperado por los alumnos: poner a prueba lo que han diseñado. El proceso comienza con la medición de los perfiles fabricados en la máquina de medir por coordenadas (Figura 8(a)). Dado el elevado número de grupos y piezas, se opta por el corte por chorro de agua fino, lo que conlleva tolerancias significativamente mayores a las requeridas en aplicaciones reales (Figura 8(b)). En algunos casos, la excentricidad de los engranajes ha sido tan elevada que ha generado interferencias en el proceso de engrane, permitiendo a los alumnos visualizar este fenómeno de manera práctica. Por ello, se mantiene este método de fabricación, ya que facilita la identificación de errores y cierra el ciclo de aprendizaje en cálculo, diseño, fabricación y ensayo en un tiempo reducido.

Tras analizar los perfiles fabricados, los alumnos montan las piezas en la máquina, asegurando el sincronismo de ambos movimientos mediante un giro manual del sistema (Figura 8(c)). Luego, ajustan manualmente la precarga inicial de los resortes, lo que les permite evaluar la incertidumbre del valor y_0 utilizado en sus cálculos dinámicos.

Por último, analizan el funcionamiento de la máquina midiendo los desplazamientos de las levas para verificar el sincronismo real obtenido. Además, varían la velocidad del motor para identificar el punto en el que el seguidor pierde contacto con la leva (Figura 8(d)) y compararlo con los cálculos teóricos. De esta forma, pueden estimar un coeficiente de rozamiento real en condiciones de operación.

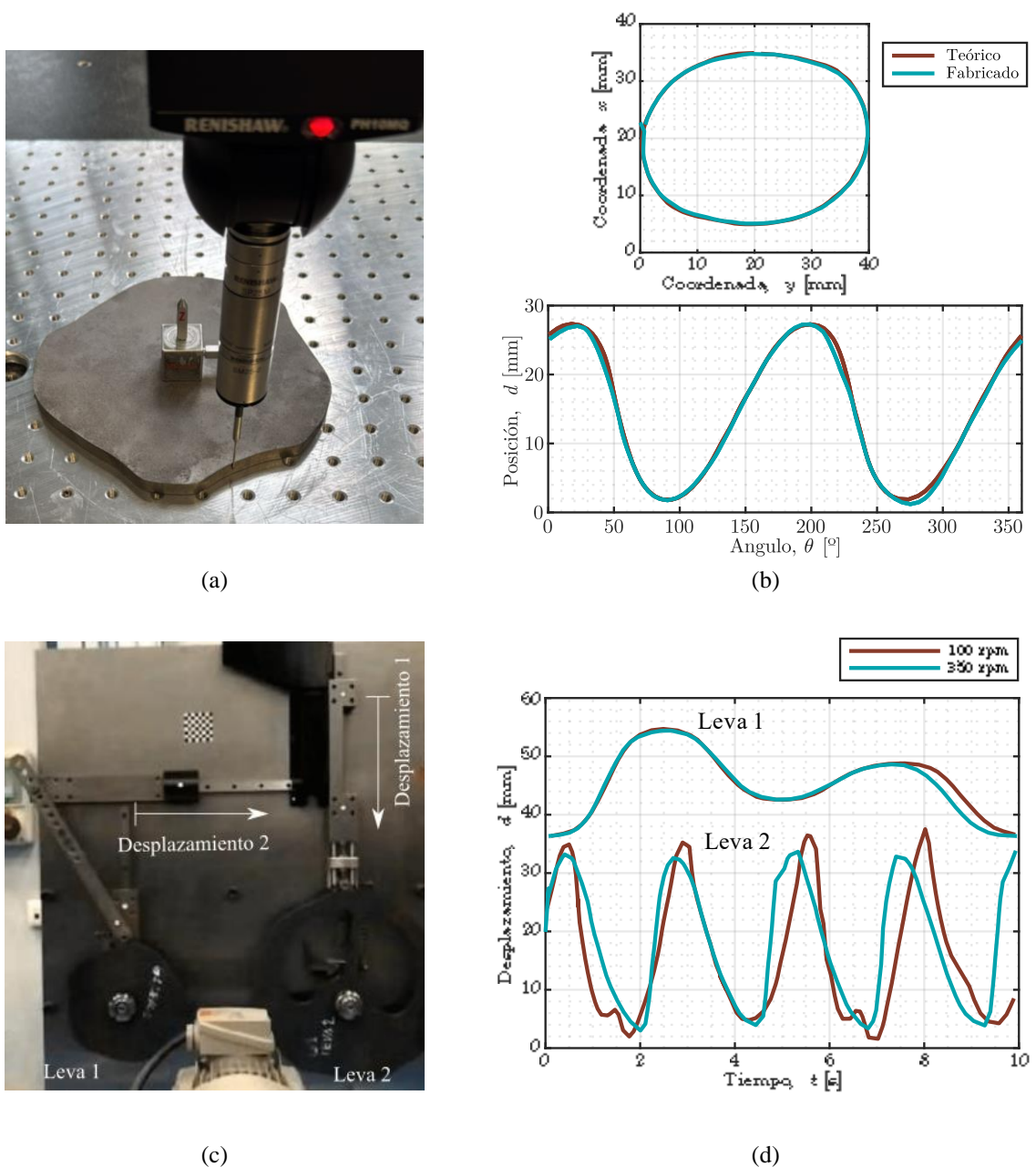


Figura 8: Imágenes de los ensayos con las piezas fabricadas: (a) medición del perfil de leva en máquina de medir por coordenadas, (b) ejemplo de perfiles medidos, (c) montaje en máquina y (d) ciclo de trabajo medido.

4. Ejemplo de aplicación en investigación

Además de su aplicación en docencia, DMLab[®] es utilizado por profesores, doctorandos y alumnos del grupo de investigación de Diseño y Mecánica Estructural, principalmente para la generación de modelos de elementos finitos que optimicen el diseño de distintos elementos de máquina. Aunque las estrategias de mallado han evolucionado con el tiempo, en la actualidad se sigue la metodología descrita en [7].

A continuación, se presentan algunos ejemplos de aplicación, clasificados en elementos dentados y elementos de rodadura. El propósito no es realizar un análisis detallado de cada caso, sino ilustrar algunas de las capacidades de la herramienta. Para un estudio más profundo, el lector puede consultar las referencias indicadas.

4.1. Elementos dentados. Engranajes, acoplamientos dentados y piñón-cremallera

En los últimos años, el grupo de investigación ha utilizado ampliamente la herramienta para generar modelos de elementos finitos en dentados de perfil evolvente.

Por ejemplo, en [8] se analizaron diversas estrategias de mallado y la influencia del número de dientes en la modelización de engranajes en 2D (Figura 9(a)). Como continuación de este estudio, en el congreso CNIM 2025 [9] se ha ampliado el análisis comparando los resultados obtenidos con software de elementos finitos comerciales (Abaqus y Marc) y de código abierto (CalculiX). Esto permite generar modelos sin necesidad de licencias comerciales, ampliando el alcance de la herramienta.

Dentro del ámbito de los engranajes, DMLab[®] también se ha empleado para modelizar dilataciones térmicas y variaciones en la distribución de tensiones [10], así como para simular el efecto de las picaduras en la dinámica de transmisiones [11].

Asimismo, la herramienta ha sido aplicada a geometrías 3D complejas, como los acoplamientos dentados con grandes abombamientos [12]. En este caso, la geometría se genera a partir de la envolvente de dos parámetros y presenta una particularidad respecto a los casos anteriores: la sección varía a lo largo de todo su ancho, incluyendo regiones con interferencias de tallado o abombamientos pronunciados. Gracias a la metodología por bloques desarrollada [7], cada sección puede mallarse de forma independiente y unificada, garantizando una representación precisa con un mallado optimizado.

Recientemente, se ha utilizado para analizar la rigidez de engrane en accionamientos piñón-cremallera con el objetivo de integrarla en los lazos de control de estos actuadores [13]. Esto ha permitido validar la aplicabilidad de la herramienta a distintas configuraciones de geometría dentada de perfil evolvente de manera ágil y eficiente.

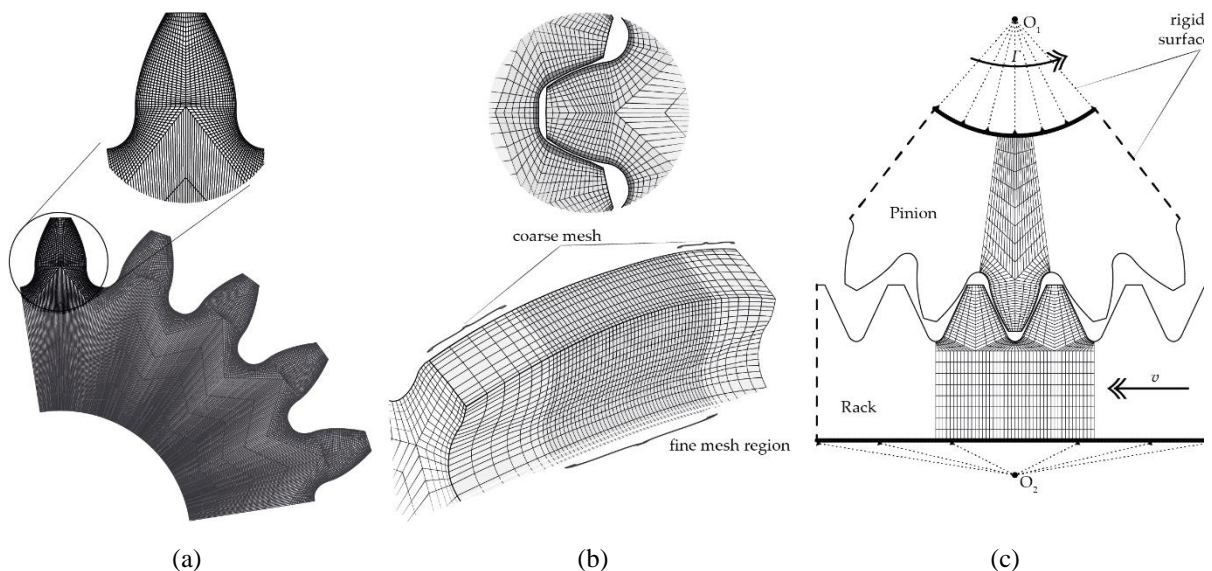


Figura 9: Ejemplos de aplicación de los modelos de elementos finitos de elementos dentados: (a) engranaje en 2D [9], (b) acoplamiento dentado [12] y (c) piñón cremallera [13].

4.2. Elementos de rodadura. Rodamientos y husillos a bolas

Por otro lado, el grupo de investigación también ha empleado la herramienta para generar modelos de elementos de rodadura como son rodamientos y husillos a bolas.

En este contexto, uno de los principales retos es modelizar el contacto entre la bola y la pista. Para ello, se pueden emplear estrategias de mallado estructurado (Figura 10(a)) o sustituir los elementos rodantes por conectores con una rigidez equivalente (Figura 10(b)), a los que denominamos CCM (de las siglas en inglés *Connector-based equivalent Contact Model*).

El primer paso fue verificar la validez de esta hipótesis y comparar las curvas de fuerza-desplazamiento de rodamientos de contacto angular con bolas sólidas [14].

Una vez validada la metodología, se ha podido extender esta estrategia de simulación a husillos a bolas, donde introducir bolas sólidas resulta computacionalmente inviable. Gracias a estos modelos, se ha podido optimizar la distribución de carga por bola, tanto mediante la corrección de paso como modificando el tamaño de la bola [15].

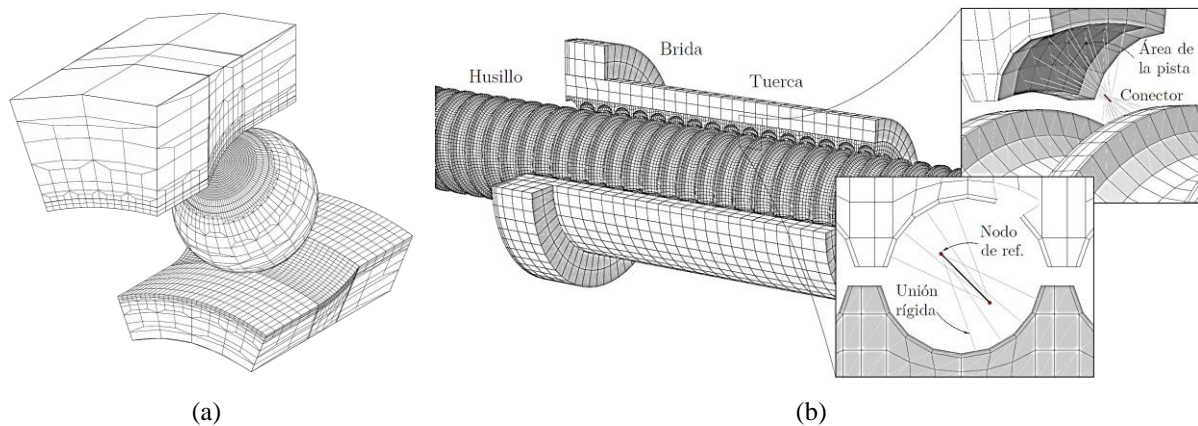


Figura 10: Ejemplos de aplicación de los modelos de elementos finitos de elementos de rodadura: (a) rodamiento de contacto angular [7] y (b) husillo a bolas [15].

5. Conclusiones y desarrollos futuros

5.1. Conclusiones

En este trabajo, se ha desarrollado una plataforma innovadora que facilita la oferta de microservicios a usuarios en múltiples plataformas, eliminando la necesidad de contar con ordenadores o dispositivos con altas capacidades de computación. Esta accesibilidad representa un avance significativo, ya que permite a un mayor número de usuarios aprovechar herramientas avanzadas sin la limitación de hardware específico.

La arquitectura modular de la plataforma ha permitido el desarrollo de 5 módulos, cada uno diseñado para satisfacer necesidades específicas y fomentar la flexibilidad en su implementación. Esta modularidad no solo mejora la escalabilidad del sistema, sino que también permite una rápida adaptación y personalización de los servicios ofrecidos, beneficiando tanto a usuarios como a desarrolladores.

En el ámbito educativo, la plataforma ha sido utilizada para facilitar la interiorización de conceptos relacionados con mecanismos de levas y engranajes de forma práctica. Los estudiantes han podido fabricar y ensayar las piezas diseñadas por ellos, lo que enriquece su experiencia de aprendizaje y fomenta la aplicación práctica de la teoría.

En cuanto a la investigación, la plataforma ha proporcionado herramientas valiosas para la generación de modelos de elementos finitos, especialmente en el análisis de elementos de máquina de dentados y elementos de rodadura. Esto ha permitido a los investigadores llevar a cabo simulaciones más precisas y eficientes, contribuyendo al avance del conocimiento en estas áreas.

5.2. Desarrollo futuros

De cara al futuro, se prevé la implementación de nuevos módulos que aborden temas como el contacto lubricado, la fatiga multiaxial, uniones roscadas, y tratamientos térmicos y superficiales (tal y como se ha mostrado en los módulos inferiores de la Figura 4). Además, se buscará ampliar la base de usuarios y colaborar con otros grupos de investigación para la generación de nuevos módulos, enriqueciendo así la plataforma con diversas perspectivas y necesidades. También se trabajará en la mejora de la usabilidad de la plataforma, con el objetivo de ofrecer una experiencia de usuario aún más intuitiva y accesible.

6. Agradecimientos

Nos gustaría expresar nuestro más sincero agradecimiento a los alumnos y miembros del grupo de investigación en Diseño y Mecánica Estructural que han contribuido al desarrollo de las N líneas de código que conforman DMLab®. Sin su dedicación y entusiasmo, este proyecto no habría podido materializarse.

Del mismo modo, extendemos nuestro reconocimiento a los alumnos del Máster en Ingeniería Industrial, quienes, a lo largo de las diferentes etapas de evolución de la herramienta, han sido partícipes, muchas veces sin ser conscientes, de su mejora continua.

También deseamos destacar la valiosa colaboración de los desarrolladores informáticos que nos han apoyado en este proceso, en especial a Loredi Altzibar y Aritz Urdangarin, cuyo trabajo ha sido fundamental en el desarrollo de la plataforma.

Finalmente, agradecemos a la Mondragon Goi Eskola Politeknikoa por su respaldo en la consolidación de esta iniciativa, facilitando el registro de la marca y gestionando los trámites necesarios para su licenciamiento.

Para más información y descargas: dmlab.mondragon.edu

7. Referencias

- [1] Pleguezuelos, M., *et al.*, “Proyecto colaborativo para la mejora de la docencia en el análisis cinemático y dinámico de levas mediante hojas de cálculo”, *Actas del XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Madrid (2022).
- [2] López, A., *et al.*, “Aprendizaje activo de Diseño de Máquinas basado en casos de estudio y software didáctico propio”, *Actas del XXIV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Las Palmas de Gran Canaria (2023).
- [3] <https://flutter.dev/>, visitado en 14/02/2025.
- [4] Tran, T., “Flutter Native Performance and Expressive UI/UX”, Bachelor’s Thesis, Metropolia University of Applied Sciences, Helsinki (2020).
- [5] Newman S., *Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems*. O’Reilly Media (2015).
- [6] Niemann G., Winter H., *Maschineelement*, vol. 2, Springer, Berlin (1989).
- [7] Larrañaga, J., *et al.*, “Efficient multiblock approach for automated and refined 3D hexahedral mesh generation: applied to machine elements”, *Actas del Mechanism and Machine Theory Symposium*, Guimaraes (2024).
- [8] Inurritegui, A., *et al.*, “Modelizado bidimensional de engranajes cilíndricos por elementos finitos”, *Actas del XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 911-922, Madrid (2018).
- [9] Inurritegui, A., *et al.*, “Comparativa del modelado 2D de engranajes por elementos finitos en software comercial y open source”, *XXV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Santander (2025). Aceptado
- [10] Larrañaga, J., *et al.*, “Influence of thermal distortion on spur gear tooth contact”, *Actas del AGMA Fall Technical Meeting*, Chicago (2018).
- [11] Elizegi, J., “Gainazal nekearen ondorioak karbono altzairuzko engranaje zilindrikoetan”, Tesis Doctoral, Mondragon Unibertsitatea, Mondragon (2022).
- [12] Inurritegui, A., *et al.*, “Numerical-experimental analysis of highly crowned spherical gear couplings working at high misalignment angles”, *Mechanism and Machine Theory* **183**, 105260 (2023).
- [13] Ulacia, I., *et al.*, “Influence of mesh stiffness in rack and pinion positioning”, *Actas del Mechanism and Machine Theory Symposium*, Guimaraes (2024).
- [14] Sangalli, L., *et al.*, “Numerical characterization of local and global non-uniformities in the load distribution in ball screws”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **118**, 1411–1425 (2022).
- [15] Sangalli, L., *et al.*, “Numerical study on the effectiveness of the optimization of the load distribution in ball screw actuators”, *Mechanism and Machine Theory* **203**, 105781 (2024).