



Programa de prácticas orientado a la simulación computacional y validación experimental de un cuadrilátero articulado

Pedro Urda Gómez¹, Miguel Rodríguez Gómez², Diego Erena Guardia³

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla, purda@us.es

² Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Cantabria, miguelrodriguez13@us.es

³ Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla, deg@us.es

En este trabajo se presenta un programa de prácticas para la asignatura de Teoría de Máquinas y Mecanismos en el Grado en Ingeniería Mecánica. El objetivo de dicho trabajo es adentrar a los alumnos de grado en una primera toma de contacto con la simulación computacional de mecanismos planos. Para ello se ha fabricado una maqueta de una bomba para la extracción de petróleo, la cual ha sido instrumentada con diversos sensores y un pequeño motor eléctrico. A través de un sistema de adquisición de datos desarrollado íntegramente con software libre, el alumno puede poner en funcionamiento la máquina y realizar una adquisición de señales mediante los sensores instalados en el sistema. Con los conocimientos teóricos estudiados en clase, el alumno llevará a cabo una simulación computacional de dicho mecanismo con la ayuda de MATLAB. Los resultados obtenidos de la simulación serán comparados con aquellos medidos experimentalmente. A la finalización de las prácticas los alumnos habrán adquirido los conocimientos fundamentales necesarios para realizar simulaciones computacionales más complejas, además de haberse familiarizado con la instrumentación de un sistema mecánico y la adquisición y tratamiento de señales reales en máquinas y mecanismos.

1. Introducción

La asignatura de Teoría de Máquinas y Mecanismos forma parte del bloque de asignaturas básicas y obligatorias en muchos planes de estudio, como pueden ser los Grados en Ingeniería Mecánica, Diseño Industrial y Desarrollo del Producto, Ingenierías Eléctrica y Electrónica, Ingeniería de Tecnologías Industriales y las Ingenierías Químicas. En particular el programa de prácticas presentado en este artículo se va a aplicar a las titulaciones de mecánica y diseño como proyecto piloto.

Para ello se han tenido en cuenta las tendencias docentes observadas en los últimos años y adaptadas al tiempo en que vivimos. Por un lado, se encuentra el desarrollo de las competencias específicas en el marco de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) que engloba de forma general el uso de software informático que permite el uso y tratamiento de datos. Actualmente el uso de las TIC como herramienta complementaria a los métodos tradicionales de enseñanza ha demostrado ser beneficiosa desde el punto de vista de la calidad de la docencia [1][2][3].

Por otro lado, el aprendizaje basado en proyectos, conocido como PBL de sus siglas en inglés *Project-Based Learning* es una metodología docente basada en la utilización de un problema real, que se utiliza como punto de partida y sobre el que se aplican procedimientos de razonamiento y deductivos para encaminar al alumno hacia una solución mediante un pensamiento crítico y, aunque guiado en primera instancia, independiente [4][5]. Con el auge de esta metodología, es posible encontrar algunas publicaciones que corroboran las bondades del método [6][7][8].

Este trabajo trata de aunar tanto las competencias TIC como la metodología PBL. En el caso que nos atañe, el bloque de prácticas de la asignatura representa un 25% de los 6 créditos ECTS totales de la asignatura. Dado el tipo de asignatura, es posible diseñar un conjunto de prácticas que combinen los conceptos anteriormente mencionados de una forma directa. En este caso se ha optado por el diseño de un bloque de 6 sesiones de dos horas y media en las que el alumno aprenderá a utilizar un software de tipo matemático para la resolución de problemas y el procesamiento y representación de datos y al mismo tiempo resolverá un problema real. En este caso concreto se ha optado por diseñar, fabricar y monitorizar una bomba petrolera a escala, es decir, un cuadrilátero articulado. El mecanismo está monitorizado con distintos tipos de sensores que arrojarán valores de posición, velocidad y aceleración angular y además incluye un motor eléctrico para conseguir el movimiento. Utilizando como base esta maqueta, se han diseñado una serie de sesiones que se describirán más abajo. Estas sesiones están pensadas para que el alumno a lo largo del curso aplique los conocimientos adquiridos en la parte de teoría a un mecanismo real. En este punto es importante reseñar que la asignatura está enfocada a la resolución de problemas de mecanismos en el plano y en instantes especificados. Con estas prácticas además se pretende introducir al alumno en el comportamiento cíclico de una máquina, esto es posible gracias a la introducción de software de tipo matemático que ayude a resolver las ecuaciones de lazo y sus derivadas de forma iterativa para conocer el comportamiento del mecanismo en cualquier punto del ciclo.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es implantar un sistema de prácticas en la asignatura de Teoría de Máquinas en la que el alumno se enfrente por primera vez a un problema académico y sencillo pero muy próximo a la realidad o a posibles problemas futuros que puedan encontrarse como ingenieros. De forma que se puedan identificar los conceptos desarrollados en las sesiones teóricas en un mecanismo real. Pero además de ello, se da al alumno una visión más global del diseño de un mecanismo, desde la toma de decisiones de materiales, dimensiones, sensores de medida hasta el estudio de los diferentes parámetros cinemáticos y dinámicos en función del tiempo y no solo para un instante dado, utilizando para ello software matemático.

Con todo ello se espera una mejora del rendimiento académico a través de la reducción de fuentes de errores relacionadas con la resolución analítica/numérica de problemas. También se espera un fomento de la cultura digital a través de diferentes tipos de software ampliamente utilizados en el mundo ingenieril. Y como consecuencia de lo anterior los alumnos adquirirán y aplicarán competencias transversales, como es el uso de lenguajes de programación, para resolución de problemas matemáticos o la monitorización de un sistema mediante elementos electrónicos. Por último, uno de los objetivos principales es la motivación del alumno, gracias a poder aplicar conceptos teóricos en problemas reales aplicados y poder interactuar con un mecanismo real que cumple una función específica.

3. Metodología

El programa de prácticas que se propone se divide en seis sesiones de dos horas y media de duración cada una. Cumpliendo así con el crédito y medio asignado al bloque práctico dentro de la asignatura. Dentro de este apartado se van a desarrollar cada una de las seis sesiones definidas. Las dos primeras sesiones coinciden con el inicio del curso y por tanto de la asignatura, momento en el cual el alumno aún está introduciéndose y asimilando los

conceptos básicos y fundamentales de la misma, por ello las dos primeras sesiones se emplearán para enseñar a manejar el software matemático Matlab con un enfoque aplicado a la resolución de problemas de cinemática y dinámica, de forma que posteriormente puedan utilizarlo en las sesiones venideras de forma autónoma. En las cuatro sesiones posteriores se trabajará con un mecanismo diseñado específicamente para este programa de prácticas. Es un mecanismo a escala de una bomba petrolera, instrumentado con diferentes sensores y un motor eléctrico. Mediante un software de control y adquisición programado en C++ y los sensores instalados en la máquina, es posible obtener una medida directa de las velocidades y aceleraciones de cada una de las barras que componen dicho mecanismo.

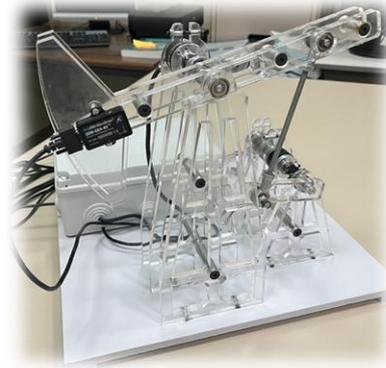


Figura 1: Maqueta del mecanismo a utilizar en el programa de prácticas.

3.1. Sesión 1. Introducción a Matlab.

Esta primera sesión se ha diseñado de forma flexible para que pueda ser llevado a cabo, tanto de forma presencial como de forma remota o autónoma. Esto es así porque debido al calendario y al gran número de alumnos de la asignatura, en ocasiones no es posible realizar las seis sesiones de forma presencial. El objetivo de la primera sesión es que el alumno se familiarice con el software matemático Matlab, para ello se facilita a los alumnos mediante la plataforma de la universidad un tutorial básico del uso de Matlab, donde de manera guiada pueden hacerse con el control básico del programa. En él se incluyen desde la definición de vectores y las diferentes operaciones que pueden hacerse con ellos, hasta la resolución de sistemas de ecuaciones no lineales y la representación de resultados. Junto con este documento se facilita una serie de códigos a modo de ejemplo para que el alumno tenga una referencia en esta primera toma de contacto. Esta sesión puede realizarse de forma completamente autónoma por el alumno, independientemente de si es posible realizar la sesión de forma presencial o telemática. En cualquiera de los casos el profesor estará disponible para resolver dudas y los posibles errores que aparezcan.

3.2. Sesión 2. Matlab orientado a la Teoría de Máquinas y Mecanismos.

En esta práctica de la asignatura de Teoría de Máquinas y Mecanismo se continuará trabajando con el software de cálculo Matlab. Esta sesión se plantea como una prueba en la que se evalúan los conocimientos adquiridos en la sesión anterior. De esta forma el alumno se ve forzado a comprender y trabajar previamente con el entorno del software. Para ello en esta sesión se facilita al alumno un listado de tareas a realizar. Todas las tareas propuestas están orientadas a la preparación del alumno para las sesiones venideras. En ellas se utilizará este software para la resolución cinemática y dinámica de la máquinas. Un ejemplo de las tareas propuestas se indica en la tabla inferior.

Tabla 1: Ejemplo de tareas propuestas.

Tarea	Enunciado
3	Manejo de señales temporales
3.1	Obtenga un vector que contenga la siguiente función, donde t es el vector de tiempos definido en la tarea T1.2
3.2	Represente la función obtenida en función del tiempo. La gráfica obtenida debe tener rótulos en ambos ejes, título, leyenda y la una cuadrícula.
3.3	Obtenga una nueva función temporal que tenga el triple de frecuencia que la anterior y una amplitud cuatro veces menor. Representela gráficamente
3.4	Obtenga una nueva señal resultado de la suma de las dos anteriores y representela gráficamente
4	Resolución de sistemas de ecuaciones
4.1	Se pide resolver el siguiente sistema de ecuaciones utilizando una estimación inicial de 0 en ambas variables.
4.2	Se pide resolver el siguiente sistema de ecuaciones donde s_1 y s_2 son las dos señales temporales obtenidas en la T3.1 y T3.3 respectivamente. Represente la evolución temporal de las variables x , y , z conjuntamente en una misma gráfica frente al vector de tiempos

3.3. Sesión 3. Adquisición y tratamiento de datos.

En esta práctica nos adentramos en el mundo de la simulación dinámica computacional de máquinas. Trabajaremos sobre una recreación a escala de un mecanismo para la extracción de petróleo. La Figura 1 muestra una representación simplificada del mecanismo en cuestión. Durante la sesión se explicará el funcionamiento de cada uno de ellos y su aplicación al campo del estudio cinemático y dinámico de un mecanismo real. Como objetivos planteados en esta sesión se pretende introducir al alumno en el funcionamiento cíclico de una máquina, así como familiarizarse con un sistema real de adquisición de datos y el posterior tratamiento digital de la señal.

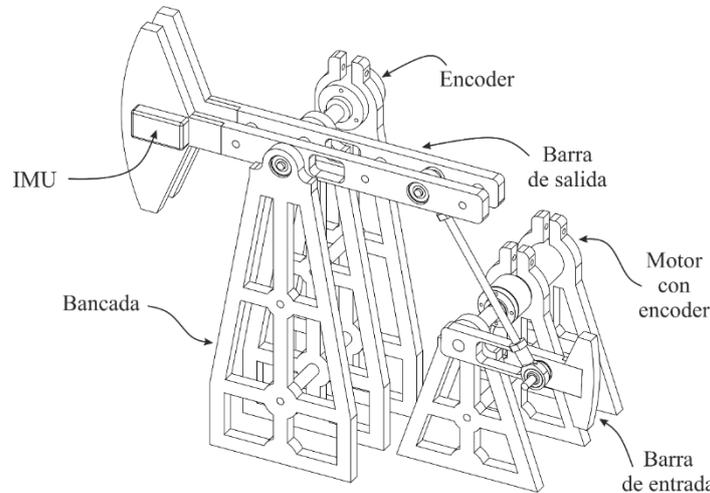


Figura 2: Maqueta del mecanismo con identificación de elementos.

Durante la sesión de prácticas cada pareja de alumnos pasará por la maqueta del mecanismo y realizará un ensayo. Para ello deberá elegir una velocidad y un sentido de giro de la barra de entrada, así como una posición inicial de análisis de su mecanismo. Para ello podrá valerse de la información arrojada por los sensores instalados en el mecanismo. El ensayo durará aproximadamente 20 segundos y quedará registrado en un fichero datos con la siguiente estructura de columnas:

Tabla 2: Parámetros recogidos por el sistema de adquisición.

t	Pulsos θ_4	Pulsos θ_2	ω_{motor}	M_2	a_{xIMU}	a_{yIMU}	a_{zIMU}	ω_{xIMU}	ω_{yIMU}	ω_{zIMU}
---	-------------------	-------------------	------------------	-------	------------	------------	------------	-----------------	-----------------	-----------------

donde, t es el vector de tiempos, Pulsos θ_2 y Pulsos θ_4 son los pulsos medidos por el encoder de la barra 2 y el de la barra 4 respectivamente, a_{xIMU} , a_{yIMU} , a_{zIMU} , ω_{xIMU} , ω_{yIMU} , y ω_{zIMU} son las aceleraciones lineales y velocidades angulares de la barra 4 registradas respectivamente por cada eje del sensor inercial en m/s^2 y rad/s , M_2 es el par desarrollado por el motor y ω_{motor} es la velocidad de giro del motor en r.p.m. registradas por la controladora del motor.

Cada grupo cargará dicho fichero de resultados en MATLAB y realizará un preprocesado que servirán para preparar los datos medidos experimentalmente de cara a la posterior simulación cinemática y dinámica del mecanismo. Esta tarea se llevará a cabo con ayuda de un fichero facilitado por el profesor, el cual contendrá ciertas indicaciones que ayudarán a realizar el trabajo de la sesión. El grado de ayuda ofrecido irá disminuyendo en cada sesión, buscando así una mayor autonomía por parte del alumno.

Como tarea principal planteada en esta sesión, se pide representar las diferentes variables medidas en función del tiempo y así obtener las velocidades y aceleraciones de las barras mediante el empleo de métodos numéricos estudiados por el alumno en otras asignaturas. Además de ello, se planteará al alumno el empleo de filtros digitales para suprimir parte del ruido de alta frecuencia capturado por los sensores. Finalmente, se realizará una comparación de alguna de las señales calculadas numéricamente por los alumnos con su correspondiente medición real a través de un sensor. Un ejemplo de los resultados esperados se muestra en la figura 3.

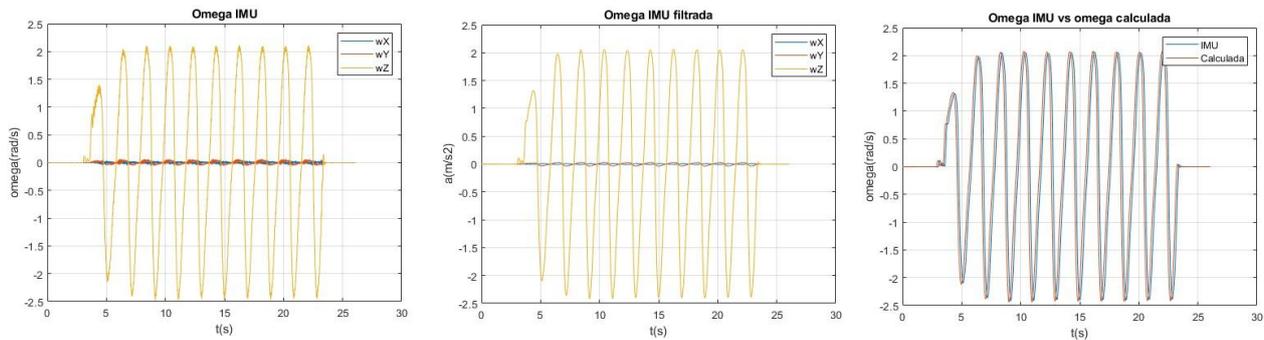


Figura 3: Ejemplo de los resultados obtenidos: señales sin filtro, con filtro y comparativa estimación vs. medición.

Por último, se generará un fichero de texto, según la Tabla 3, que servirá como datos de entrada para las posteriores sesiones.

Tabla 3: Cabecera del fichero de salida de datos.

t	θ_2	θ_4	ω_{21}	ω_{41}	α_{21}	α_{41}	a_{xIMU}	a_{yIMU}	a_{zIMU}	ω_{xIMU}	ω_{yIMU}	ω_{zIMU}	M_2	ω_{mot}
---	------------	------------	---------------	---------------	---------------	---------------	------------	------------	------------	-----------------	-----------------	-----------------	-------	----------------

3.4. Sesión 4. Problema de posición.

En esta práctica continuamos con la realización del proceso de análisis cinemático y dinámico del mecanismo. Para ello empezaremos por resolver el problema de posición de nuestra máquina, obteniendo la evolución temporal de las coordenadas que definen la posición del sistema en cada instante de tiempo. Los resultados obtenidos serán comparados con los datos experimentales registrados en la sesión anterior a fin de verificar la validez del modelo que se programe.

Durante la sesión de prácticas cada pareja de alumnos realizará las mediciones oportunas para realizar un esquema normalizado y digital del mecanismo en algún tipo de software CAD de libre elección. Tras esto plantearán las ecuaciones de lazo para poder obtener la trayectoria de los puntos de interés del mecanismo a lo largo de un ciclo completo. Estos puntos serán: punto A (articulación entre la barra de entrada y la barra acopladora), la trayectoria del punto B (articulación de la barra acopladora con el balancín), el centro de gravedad de la barra 3 (localizado en su centro geométrico) y el punto P (punto donde se sitúa la IMU). En este punto se pide al alumno que utilizando la función *fsolve* resuelva la ecuación vectorial del lazo para diferentes instantes de tiempo, es decir, diferentes valores de θ_2 . A la finalización de este apartado debemos tener una matriz, que contengan los valores de las coordenadas θ_2 , θ_3 y θ_4 . Una vez obtenidos estos resultados es posible calcular las coordenadas x y y de los puntos de interés y representarlas en graficas separadas correctamente rotuladas (ver Figura 4). En este punto además es posible incluir en dichas graficas las trayectorias obtenidas según las mediciones experimentales de la Tabla 3 e incluirlas en las gráficas anteriores para comparar los resultados.

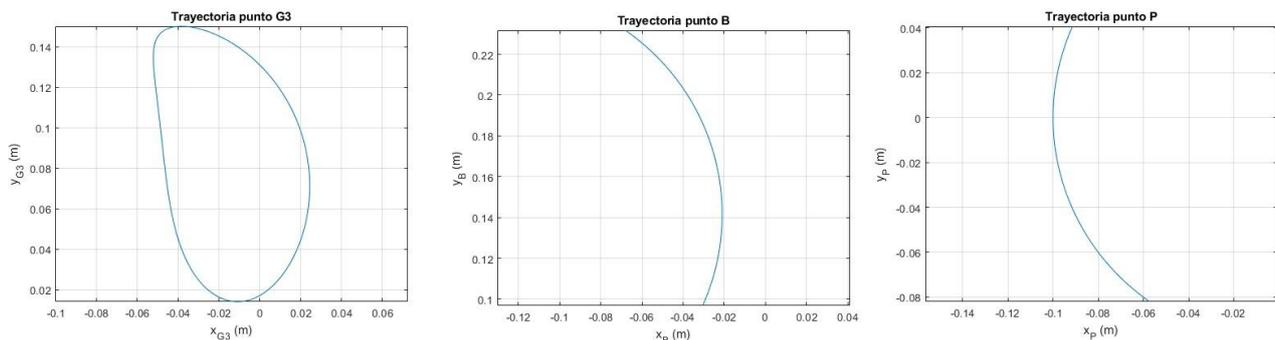


Figura 4: Trayectorias analíticas de los puntos de interés.

3.5. Sesión 5. Problema cinemático.

Partiendo del código de Matlab programado en la sesión anterior empezaremos por plantear las ecuaciones que permiten resolver de forma numérica las velocidades y aceleraciones de todas las barras de nuestro mecanismo. Tras ello, dentro del bucle principal del código desarrollado durante la sesión anterior, incluiremos dos nuevas llamadas a la función *fsolve*, en este caso para resolver la ecuación vectorial del lazo de velocidades y de aceleraciones respectivamente. Por su mayor complejidad, este apartado será guiado por el profesor. A la finalización de este apartado debemos tener tres matrices que contengan los valores de las coordenadas θ_2 , θ_3 y θ_4

(obtenidas en la sesión anterior), las velocidades angulares, ω_{21} , ω_{31} y ω_{41} y las aceleraciones angulares, α_{21} , α_{31} y α_{41} para cada instante de tiempo de nuestro ciclo.

Posteriormente se pide representar en una misma gráfica la velocidad angular de la barra de salida calculada analíticamente junto con la velocidad angular medida experimentalmente (ver Figura 5) y la aceleración absoluta del punto P, punto donde se encuentra instalado el sensor inercial, para los resultados analíticos y experimentales en las tres direcciones medidas. El alumno podrá comprobar de esta forma la validez del modelo planteado.

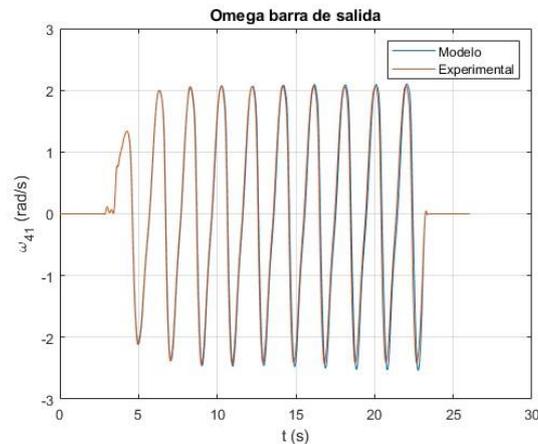


Figura 5: Evolución de la velocidad angular de la barra de salida.

3.6. Sesión 6. Problema dinámico inverso.

Como conclusión al programa práctico de la asignatura, se plantea la resolución computacional del problema dinámico inverso. Con ello conseguiremos obtener computacionalmente el par entregado por el motor en cada instante del ciclo de funcionamiento de la máquina. Siguiendo la misma metodología utilizada hasta este momento, resolveremos con ayuda de Matlab la ecuación de la dinámica de nuestro sistema y compararemos el resultado obtenido del par con el que se midió experimentalmente durante la segunda sesión. Utilizando para ello el principio de las potencias virtuales.

Para desarrollar esta última práctica los alumnos deben tener los códigos desarrollados en las sesiones anteriores funcionando correctamente. Para comenzar se planteará debidamente sobre papel la ecuación del Principio de las Potencias Virtuales que gobernaría nuestro sistema. Se asume que la única acción externa que actúa sobre el mecanismo es el par motor M_2 . Una vez incluidos los parámetros físicos, como son masas y momentos de inercia que serán facilitados por el profesor, el alumno debe programar la ecuación anteriormente mencionada y resolverla para diferentes instantes de tiempo, obteniendo por tanto una evolución del par empleado que deberá representarse en una gráfica juntamente con el par obtenido en la sesión inicial de forma experimental.

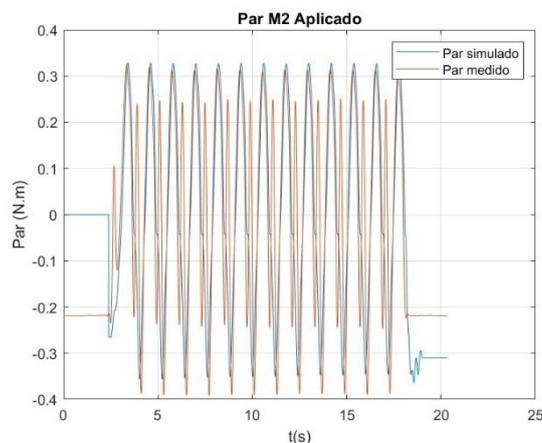


Figura 6: Evolución del par aplicado por el motor en la barra de entrada.

4. Evaluación

A excepción de la primera sesión de prácticas, el resto de las sesiones se evaluarán a su finalización por el profesor. Las sesiones están diseñadas para que el alumno pueda desarrollar en tiempo y con cierto margen todas las tareas previstas. Por este motivo al final de la sesión el profesor revisará grupo a grupo el correcto desempeño de estas. Esto es posible gracias a que los grupos de prácticas serán reducidos, con un máximo de 12 alumnos por sesión. Dado que el trabajo de cada sesión depende directamente de la anterior se fuerza al alumno a terminar la práctica de forma autónoma. En este caso solo se puntuarán las tareas realizadas durante las sesiones presenciales. El peso de cada una de las sesiones es el mismo. Teniendo el bloque de prácticas un peso de un 20% en el total de la nota final de la asignatura, motivando así al alumno a esforzarse en las mismas.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado un programa completo de prácticas enfocado en la resolución de un problema real haciendo uso de software de tipo matemático. De esta forma se amplían de forma transversal los conocimientos del alumno a la vez que se relacionan los conceptos de diferentes asignaturas. Además, con este tipo de prácticas se ofrece al alumno una visión más global y realista de la resolución de problemas en la industria a la que están enfocados.

Cabe señalar que la máquina ha sido fabricada íntegramente por los profesores de la asignatura con los medios de los que se dispone en el laboratorio de mecanismos. Obviamente el sistema cuenta con ciertas imprecisiones debidas al proceso de fabricación y de montaje que repercuten en los resultados obtenidos durante los experimentos. Este hecho que a priori puede parecer contraproducente para el desarrollo de las prácticas ha sido considerado precisamente, al contrario, como una oportunidad de que los alumnos se enfrenten a una máquina con errores estructurales similares a los que se podrán encontrar más adelante en su vida profesional. Durante las sesiones de prácticas se invita a los alumnos a observar las fuentes de error en el montaje de la máquina y que intenten localizar en las señales medidas las consecuencias de dichas imperfecciones en el montaje. En base a la experiencia que hemos tenido los profesores de la asignatura, consideramos que se ha tratado de un punto dentro del desarrollo de la práctica muy enriquecedor para nuestros alumnos.

A la fecha de escritura de este documento se está iniciando este programa por primera vez, por ello aún no hay datos del funcionamiento y la respuesta de los alumnos al mismo. Para ello durante el transcurso del cuatrimestre se realizarán una serie de encuestas a los alumnos tanto al inicio como al final de las prácticas para tener una retroalimentación de cómo se reciben las mismas. Ya que este bloque de prácticas es un giro de 180 grados respecto a lo que se venía haciendo hasta el momento. Si los resultados finales en términos de valoración del programa y de aprendizaje de los alumnos son favorables, el objetivo a medio plazo es continuar diseñando maquetas con la misma filosofía para en un futuro disponer de una diferente por cada grupo de alumnos en cada grupo de prácticas.

6. Referencias

- [1] Corral Abad, E., Gómez García, M. J., Díez-Jiménez, E., Moreno-Marcos, P. M., & Castejón Sisamon, C. (2021). Improving the learning of engineering students with interactive teaching applications. *Computer Applications in Engineering Education*, 29(6), 1665–1674. <https://doi.org/10.1002/cae.22415>
- [2] Freire Macías, E., & Cuesta Rojo, F. (2011). Innovando en la docencia en ingeniería (Universidad de Sevilla & Facultad de Ciencias de la Educación, Eds.).
- [3] Majid, M. A., Huneiti, Z. A., Al-Naafa, M. A., & Balachandran, W. (2012). A study of the effects of using MATLAB as a pedagogical tool for engineering mathematics students. 2012 15th International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL), 1–9. <https://doi.org/10.1109/ICL.2012.6402183>.
- [4] Fernandes H.V.J., "From student to tutor: A journey in problem-based learning", *Currents in Pharmacy Teaching and Learning* 13, 1706–1709 (2021).
- [5] Yew E.H.J., Goh K., "Problem-Based Learning: An Overview of its Process and Impact on Learning", *Health Professions Education* 2, 75–79 (2016).
- [6] Dolmans D.H.J.M., Gijssels W.H., Moust J.H.C., Grave W.S. de, Wolfhagen I.H.A.P., Vleuten C.P.M. van der, "Trends in research on the tutor in problem-based learning: conclusions and implications for educational practice and research", *Medical Teacher* 24, 173–180 (2002).
- [7] Yew E.H.J., Schmidt H.G., "Evidence for constructive, self-regulatory, and collaborative processes in problem-based learning", *Advances in Health Sciences Education* 14, 251–273 (2009).
- [8] Dochy F., Segers M., Van den Bossche P., Gijbels D., "Effects of problem-based learning: a meta-analysis", *Learning and Instruction* 13, 533–568 (2003).