

Experiencia sobre el empleo del estudio de caso y herramientas de simulación para mejorar la comprensión del ciclo termodinámico de motores a reacción

Pedro Piqueras, Joaquín de la Morena, Pau Bares y Enrique José Sanchis

^aDepartamento de Máquina y Motores Térmicos, Universitat Politècnica de València

Cduatcev''

Vj g'ewt tgpv'y qtnlf guetkdguc"o gjv qf qnqi { "cko gf "cv'ko rtxkpi 'yj g'wvf gt uacpf kpi "qhl'vj g'lgv'gpi kpg" e{erg'dl' "eqo dkpki "c'ecug'uwf { "cpf "c'uko wrv'kq' "gpxkt qpo gpv'Vj ku'o gjv qf qnqi { "ku'f gxgrg' gf "lqt" yj g'Rt qrwukq' "uadlgev' 'xcwi j v'cv'vj g'vj kf { "gct'qp' "Cgt qur ceg'Gpi kpggtkpi 'f gi tgg'OK' "rctv'kwct. "yj g' uwf gpv'ct g'cungf "vq' "cpcrf / g' "vj g'f gvc'kgf "ko rcev'qhl'vj g'o ckp' "y q' "dqwpf ct { "eqpf kkapu'lt qo "vj g' r qkpv'qhl'kgy "qhl'vj g'gpi kpg'r gt lqto cpeg'<cnkwf g'cpf "hki j v'xgrqek' "qt "Ocej OVj g'ecug'uwf { "ku'f qpg' kp"i t qwr'u'qhl'kxg' "uwf gpv'u' "vj cv'vgco y qtm'l'unku' "ct g'cnuq' "f gxgrg' gf OVj g'o gjv qf qnqi { "j cu'dggp' "crrrkf "qxgt 'vj g'rcw'l'kxg' "gct u' "ij qy kpi 'r qukxkg' t gumnu'dqvj 'kp' vgt o u'qhl'ecf go k' r' gt lqto cpeg'cpf" uwf gpv'u'gpi ci go gpv'qp' "cxgt ci g'OI qy g'xgt. "uqo g'r qkpw'qhl'ko rtxxgo gpv'ct g'lf gpv'kkg' "OQp' "vj g'qp'g" j cpf. "kpet gculpi 'f kxgt uk' { "qhl'uwf gpv'u' y kj 'f h'gt gpv'dcemi t qwpf u'j cu'e'j cmgpi gf "vj g'y c { "kp' y j k'ej" yj g'uwf { "ku'lti cpl'gf. "cpf' t gumnu'ij qy 'vj cv'o qt g'f kxgtug' i t qwr'u'vgpf "vq' g'v'y qt ug' t gumnu'eqo rct gf" vq'qy gt u'Qp' "vj g'qy gt" j cpf. "yj gt g'ku'c' b' k'eqpp'gev'kq' "dgy ggp' "vj g'o gjv qf qnqi { "cpf' "vj g'qti cpl'cv'kq' "qhl'qv' gt "uadlgeu' "kp' "vj g'uc'o g'ct gc "k'p'kf g'vj g'f gi tgg'OCp' "w'rf cvg' "qhl'vj g'o gjv qf qnqi { "ku'rt q'rq'ug' "vq' ko rtxxg' "vj g'ug' "y q' "c'ur'geu'O"

"

Mg'y qtf u'<Ecug'uwf { 'Eqo r'wgt/c'kf gf 'hgct'kpi. 'Cgt qur ceg'Gpi kpggtkpi. 'Vj gto qf { pco k'E' {erg' "cpcrf'uku'"

"

Tguwo gp''

Gp" guag" "tcdclq" ug' f guetkdg" wpc" o gvaf qnqi { "g' "gpl'qecf c" "c" o glqct "r" "eqo r' tgpuk'p" f gn' ekerq' vgt o qf kp" o k'eq'f g'o qv'q' t gu'c' t g'ceek'p'o g'f kcp'v'g' "rc' "eqo d'kpc'ek'p' "f g'wp' "g'uwf k'q'f gn'ecua' "l' "wp' "gpv'qt pq" f g' "uko wr'ek'p'O'Nc' "o gvaf qnqi { "ug' "f gu'ct qn' "rctc' "g'uwf kcp'v'gu'f g' "rc' "cuki pc'w'c' "f g' "Rt qrwuk'p' "f gn' I tcf q' "gp' "kpi g'p'kt { "Cgt qur ceg' "Gpi kpggtkpi" rctv'kwct. "ug' "r' "kf g'c' "h'qu' "g'uwf kcp'v'gu' "s'wg' "c'p'c'k'eg' "eqp' "f g'vc'ng' "g'itko r'cev'q'f g'rc' u'f qu'rt k'p'ek' "c'rg' u'eq'p'f k'ek'q'p'gu'f g'eq'v'qt pq' "s'wg' "c' "l'gev'c'p' "c' "rc' "u'rt gu'ek'q'p'gu'f gn'o qv'q' <"cnkwf "l' "xgrqek' cf "f g' "xw'rq' "q' "Ocej "OGn' "g'uwf k'q'f gn'ecua' "ug' "j ceg' "gp' "i twr' qu'f g'ek'p'eq' "g'uwf kcp'v'gu' "l' "j c' b' qu'ct cf q' t' gumn'cf qu' r' quk'k'x'qu' "vc'pv'q' "gp' "t' g'p'f ko k'gpv'q' "c'ecf' "o k'eq' "eqo q' "gp' "ewc'pw' "c' "rc' "ko r' r'k'ek'ek'p' "f gn'lc'mo pcf q' "gp' "i g'p'gt c'NOP q' "q'di'ac'pv'g. "ug' "j cp' "kf gpv'k'k'ecf q' "c'ni wp'qu'c'ur'gev'qu'c' "o glqct ORq' "wp' "rc'f q. "gn'lc'wo gpv'q' "f gn'p'Ào gt q' "rc' "f kxgt u'kf cf "f gn'lc'mo pcf q' "j c' "f g'uc'k'cf q' "rc' "qt i cpl'k'ek'ek'p' "f gn'lc'cdclq. "o qu'ct cpf q' "r' g'q' t gu'ct gumn'cf qu' "gp' "i twr' qu'eq'p' "g'uwf kcp'v'gu' "s'wg' "v'gp' "f p' "wp' "d'ci c'lg' "f h'gt gpv'g' "cn'j c' d'k'w'c'rd' Rq' "v'qt q' "rc'f q. "j c' "l' "wpc' "r' c't gpv'g' "f g'ueq'p'g'z'k'p' "gpv'g' "rc' "o gvaf qnqi { "wuc'f c' "l' "rc' "qt i cpl'k'ek'ek'p' "f g' "q' t cu' "cuki pc'w'c' u'f g' "rc' "o kuo c' "a' tgc' "f g' "eqp'q'eko k'gpv'q' "f gn'lc' tcf q'O'Ug' "r' t' q' r' q'p'g' "wpc' "c'ew'c'k'k'ek'ek'p' "f g' "rc' "o gvaf qnqi { "rctc' "o glqct "c' o d'qu'c'ur'gev'qu'O"

Rc'ndtcu'erc'xg'<"G'uwf k'q'f g' "ecua' "Crt g'p'f k'cl'g' "c'uk'w'kf q' "r' q' "qt'f g'p'cf qt. "kpi g'p'kt { "Cgt qur ceg' "Gpi kpggtkpi" Cp' "rk'ku'f g' "Ekerq' "vgt o qf kp" o k'eq' "

1. Introducción

La investigación y desarrollo de sistemas de propulsión es una de las principales tareas de la industria aeronáutica y una competencia central de sus ingenieros. Desde el desarrollo de los primeros motores de reacción basados en el concepto de turbina de gas a principios de la década de 1940, durante la Segunda Guerra Mundial, se han realizado mejoras significativas a nivel de arquitectura y tecnológico hasta el día de hoy. Desde el punto de vista del ciclo termodinámico, la mayoría de estas mejoras tienen como objetivo lograr el mejor equilibrio posible entre el empuje y el consumo específicos de combustible proporcionado por el motor (Singh, 2012). Teniendo en cuenta que este desafío de diseño solo puede entenderse utilizando como herramienta principal el análisis del ciclo (Mattingly, 1987), los planes de estudio de cualquier grado de Ingeniería enfocado en aplicaciones Aeronáuticas incluyen una asignatura donde se discute en profundidad esta problemática. En el caso del grado de Ingeniería Aeroespacial de la Universitat Politècnica de València, estos contenidos se imparten por primera vez en la asignatura de *Rtqrwnukp*, que está programada durante el segundo semestre del tercer curso (Universitat Politècnica de València, *Rrcp'f g'guwf kqu'f gn'I tcf q'gp'fpi gpkgt'f' Cgt qgur cekl*). En esta etapa, los alumnos ya han estudiado los fundamentos de los ciclos termodinámicos y la mecánica de fluidos durante el año anterior. Por lo tanto, la asignatura de *Rtqrwnukp* se centra en las implicaciones de las características del ciclo termodinámico en el rendimiento de los motores de las aeronaves, incluyendo los motores alternativos y los de reacción. En este ámbito, las sesiones presenciales se dedican a la introducción de las diferentes tipologías de motores, la definición de los principales parámetros de rendimiento en función del ciclo, como el empuje específico, la eficiencia térmica, la eficiencia propulsora y el consumo de combustible, y sus interrelaciones en motores de reacción (Sforza, 2012). Finalmente, se discute el cálculo de estos parámetros para ciclos de motor específicos.

Sin embargo, el cálculo detallado de estos ciclos en un aula requiere de mucho tiempo, por lo que el tiempo disponible para un análisis detallado del impacto de las condiciones de contorno y los parámetros de diseño es limitado. Esto supone una dificultad en la comprensión del funcionamiento de dichos ciclos por parte de los estudiantes. En primer lugar, mientras que todos los motores a reacción se basan en el mismo ciclo termodinámico base (ciclo Brayton), las condiciones de vuelo (principalmente altitud y Mach de vuelo) imponen diferentes condiciones para el cálculo de los rendimientos térmico y propulsivo, conduciendo a emplear variantes específicas de motor según el rango de estos parámetros con el objetivo de maximizar el rendimiento global. Esto solo se puede comprender después de ver el impacto de una amplia variación de estos parámetros, lo que no es posible en los ejercicios hechos a mano en el aula. En segundo lugar, cada variante de motor tiene sus propias peculiaridades desde el punto de vista del cálculo, y no todas estas variantes se pueden ver con detalle durante las clases presenciales. En este sentido, el uso de estudios paramétricos permite a los estudiantes lograr una mayor comprensión del orden de magnitud esperado en los diferentes parámetros involucrados en el diseño y cálculo del ciclo de un motor a reacción.

Además, durante las últimas décadas se ha hecho evidente la necesidad de incorporar metodologías de enseñanza activa como forma de incrementar el interés y la motivación de los estudiantes y, por tanto, la eficiencia del proceso de enseñanza-aprendizaje. Así, se pasa de un concepto de enseñanza centrado en la transmisión de conocimientos por parte del docente, a un enfoque en el que el alumno se convierte en el actor principal (Wright, 2011).

En este sentido, el uso de herramientas computacionales hace que el análisis del ciclo termodinámico sea más eficiente, ya que permite realizar estudios más exhaustivos a corto y medio plazo y, por lo tanto, su uso es común en la industria, especialmente en las primeras fases del diseño de un nuevo motor (Zhu, 2017). Además, los alumnos se sienten más atraídos por la actividad al romper la barrera que representan los complejos y tediosos cálculos manuales. A partir de una serie de condiciones de contorno, que dependen principalmente de la aplicación seleccionada, se puede analizar un gran número de arquitecturas de motor en un período de tiempo reducido (Gao, 2011). Como resultado, se puede proporcionar una primera definición de parámetros clave en la tecnología estudiada, como la relación de compresión global, la tasa de derivación o la temperatura en la entrada de la turbina (Klein, 2015), de forma justificada en base al análisis del ciclo.

Por tanto, utilizar este tipo de software en el ámbito de la asignatura de *Rtqrwnukp* representa como una doble oportunidad. Por un lado, ofrece a los estudiantes la posibilidad de aprender una herramienta específica que se utiliza en la industria de motores de aviación. También ayuda a involucrar a los estudiantes, ya que sienten que el esfuerzo que invierten en aprender la herramienta puede ser útil no solo para la asignatura sino también para sus futuras carreras profesionales (Gutiérrez-Romero, 2017). Por otro lado, desde una perspectiva puramente académica, permite al alumno disponer de una gran cantidad de cálculos de parámetros de ciclo con un esfuerzo reducido. Como resultado de aprendizaje inmediato, esto les permite profundizar en la comprensión del ciclo en sí, específicamente en lo que respecta a un mejor conocimiento de los rangos de variación de los parámetros de prestaciones, y los efectos que implican los

diferentes aspectos de diseño y operación. Además, el análisis detallado del ciclo a través de herramientas computacionales tiene un alto potencial para diseñar actividades guiadas por el razonamiento y el pensamiento crítico, capaces de acercar al alumno a los desafíos de la vida real. Se ha demostrado en diferentes campos de conocimiento que el aprendizaje asistido por ordenador puede ser útil de muy diferentes maneras, ya que los estudiantes participan más activamente en comparación con los métodos tradicionales (Edmons, 1980). Por ejemplo, Zhu et al. (2019) desarrollaron un código en Matlab para generar geometrías de palas de turbinas y compresores para su uso en el entorno de enseñanza de Ingeniería Aeroespacial. Gámez-Montero et al. (2020) combinaron el aprendizaje asistido por ordenador con estrategias de clase inversa para mejorar la comprensión de los principios de funcionamiento de las turbomáquinas, mostrando una mejora en la satisfacción de los estudiantes. Patterson (2020) utilizó técnicas de aprendizaje automático en un entorno de mecánica de fluidos computacional (CFD), con el objetivo de ayudar a los estudiantes a comprender cómo optimizar un perfil aerodinámico para reducir la resistencia aerodinámica. Minichiello et al. (2020) presentaron una herramienta de velocimetría de imágenes de partículas basada en dispositivos móviles, y concluyó que contribuía a mejorar la participación de los estudiantes. Martín et al. (2019) utilizaron técnicas de aprendizaje asistido por ordenador en temas relacionados con la combustión, destacando los beneficios en los procesos de aprendizaje de los estudiantes.

Otro aspecto importante de la educación superior radica en su relación con la sociedad, que exige que los estudiantes adquieran conocimientos técnicos, con la misma profundidad que en épocas anteriores, apoyados en una serie de habilidades transversales útiles para su posterior desempeño laboral (Barnfield, 2014). El objetivo es lograr un equilibrio armónico entre los conocimientos técnicos y las capacidades, habilidades, aptitudes, actitudes y destrezas necesarias para afrontar los retos que plantea el entorno profesional. Competencias como la capacidad para trabajar en equipo, la gestión de proyectos o la comunicación oral suelen estar entre las más demandadas por las empresas, muchas veces por encima de los conocimientos técnicos, habitualmente ya presupuestos (Robinson, 2005). Estas competencias transversales son claves para los estudiantes como futuros ingenieros, ya que son necesarias para su desarrollo futuro en la industria, como prueba el hecho de que los empleadores las demandan, y las metodologías centradas en su aprendizaje son bien recibidas por los estudiantes (Debnath, 2012).

En este sentido, los estudios de caso son una de las herramientas que se pueden utilizar para ayudar a los estudiantes a desarrollar dichas habilidades. La metodología del estudio del caso tiene como objetivo discutir casos de la vida real utilizando como base los conceptos teóricos desarrollados sobre un tema determinado (Kreber, 2001), y ha sido ampliamente utilizada en varios campos de la educación superior como la educación médica o jurídica (Baumberger-Henry, 2005). Sin embargo, varios trabajos han evaluado también la idoneidad de este método en otros campos. Iahad et al. (2013) mostraron un efecto positivo de la implementación de estudios de casos sobre la participación de los estudiantes en la educación en Administración de Empresas. Burko (2016) discutió diferentes aplicaciones potenciales del aprendizaje basado en estudios de casos en la Educación Física para estudiantes de pregrado, concluyendo que la versatilidad de la metodología permite su implementación combinada con otras herramientas como el aprendizaje basado en problemas y las actividades en equipo. Colyer (2013) realizó un análisis similar para el entorno de enseñanza de la Química, concluyendo que uno de los mayores desafíos está relacionado con hacer que la implementación sea robusta y objetiva, ya que los antecedentes y la perspectiva del profesor pueden sesgar tanto el trabajo de los estudiantes como su evaluación. Varma y Garg (2005) exploraron la capacidad del aprendizaje basado en estudios de casos para desarrollar habilidades relacionadas con la resolución de problemas y la comunicación en la educación en ingeniería de software. Anwar y Ford (2001) propusieron una serie de estudios de casos breves centrados en analizar problemas de la vida real y posibles soluciones en el campo de la ingeniería electromecánica. Zuwała y Sztékler (2018) implementaron el aprendizaje basado en estudios de casos en diferentes temas relacionados con la producción de energía y los combustibles alternativos en títulos de Grado y Máster, concluyendo que se producía una mejora significativa en el conocimiento técnico de la asignatura. El hecho de trabajar en grupo en un proyecto es percibido por los estudiantes como un paso adelante como ingenieros, potenciando su compromiso y satisfacción con la experiencia de aprendizaje (Iacob, 2019). Además, estudios precedentes muestran una interacción positiva entre el aprendizaje basado en estudios de casos y el uso de herramientas tecnológicas (Charte, 2020).

2. Objetivos

En el trabajo actual, se presenta una estrategia de aprendizaje basada en un estudio de caso respaldado por una herramienta computacional para el análisis del ciclo termodinámico de motores de aeronaves. En particular, se selecciona la plataforma GasTurb™ (GASTURB GMBH) debido a su buena relación entre facilidad de uso y versatilidad. La metodología propuesta gira en torno a una actividad computacional a nivel de sistema, que tiene como

objetivos principales lograr obtener un conocimiento más profundo de las tendencias de diseño de motores a reacción, desarrollar habilidades de trabajo en equipo y tomar conciencia de cómo los conceptos básicos de ingeniería se involucran en desafíos globales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) impulsados por Naciones Unidas (<https://sdgs.un.org/goals>). Teniendo esto en cuenta, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar una serie de actividades conducentes al aprendizaje del alumnado de la herramienta GasTurb™.
- Definir la temática del estudio del caso en relación con algunos de los objetivos principales de aprendizaje de la asignatura.
- Diseñar los mecanismos de seguimiento y evaluación de la actividad.
- Realizar un análisis estadístico sobre la correlación entre los resultados de la actividad y los del resto de actos de evaluación de la asignatura, como muestra del aprendizaje global del alumnado.
- Evaluar el grado de satisfacción del alumnado a través de una encuesta.
- Analizar los resultados obtenidos a través de la metodología y proponer en base a dicho análisis una serie de mejoras futuras.

3. Desarrollo de la innovación

En esta sección se describe el uso del software comercial GasTurb™ como parte esencial del proceso de enseñanza-aprendizaje en la asignatura de *Rtqr wntk»p*. En primer lugar, se enumeran los objetivos de aprendizaje que se espera lograr mediante el uso de esta herramienta y, a continuación, se detalla la metodología de enseñanza propuesta.

3.1. Objetivos de aprendizaje y enfoque

Según se describe a lo largo la introducción, la asignatura de *Rtqr wntk»p* se centra en el análisis del ciclo termodinámico de los motores empleados en propulsión de aeronaves y cómo la definición de los parámetros característicos del ciclo afecta las prestaciones del motor y su impacto ambiental. En este sentido, se conoce que las condiciones de vuelo, principalmente altitud y velocidad de vuelo, son críticas en la respuesta del motor, ya que definen la presión y temperatura totales del aire admitido. De hecho, muchas opciones de diseño de motores, incluida la arquitectura en sí, están influenciadas por estas condiciones. Por ello, la metodología descrita en el presente trabajo está diseñada para que los estudiantes comprendan mejor las implicaciones de las condiciones de vuelo en el proceso termodinámico de cada uno de los componentes del motor y, en consecuencia, en las decisiones de diseño del mismo. Se consideran los siguientes objetivos de aprendizaje específicos:

- Estudiar el impacto de la altitud sobre la relación de temperaturas del ciclo y su consecuente efecto sobre el empuje específico y sobre los rendimientos térmico y propulsivo.
- Analizar el impacto de la velocidad de vuelo sobre la resistencia del motor, incluida en la definición del empuje específico, y sobre los rendimientos térmico y propulsivo.
- Evaluar el impacto del Mach de vuelo sobre la relación de compresión global del motor y, de ahí, sobre la selección de la relación de compresión del compresor.
- Comprender la relación entre la optimización del empuje específico y la del consumo específico del motor.
- Identificar el interés del concepto de motor ramjet a Mach de vuelo elevado.

Mediante el logro de estos objetivos, los estudiantes son finalmente capaces de identificar tendencias de diseño de los motores empleados en la vida real para ciertas aplicaciones, previamente descritas a lo largo de la asignatura, en función del impacto de las condiciones de contorno características de cada aplicación sobre el rendimiento del motor.

Además de estos objetivos técnicos, existen otros beneficios que también deben considerarse. Por un lado, GasTurb™ es una herramienta de cálculo computacional que se utiliza actualmente en la industria durante la fase de prediseño de un motor. Por lo tanto, su aprendizaje puede verse directamente como una habilidad útil para aquellos estudiantes cuyo trabajo se desarrolle en el ámbito del diseño de motores a reacción en el futuro, mientras que ayudará al resto a comprender esta fase de prediseño con herramientas computacionales de última generación. Por otro lado, dado que la actividad se realiza en grupos de cinco estudiantes, se ve como una oportunidad para ayudarles a desarrollar competencias relacionadas con el trabajo en equipo y las capacidades organizativas, las cuales son fuertemente demandadas por la industria en los últimos años (Robinson, 2005). Para ello, se programa una serie de reuniones en etapas intermedias del trabajo con el fin de ayudar a los estudiantes a organizarse, enfocar el trabajo a realizar en los aspectos más importantes a cubrir y, en general, orientarlos a lo largo del desarrollo del proyecto y ayudarles a organizarse como equipo de trabajo.

3.2. Formación en el uso de la herramienta

Durante el curso, se dedican dos sesiones de laboratorio en aula de informática al aprendizaje y formación en el programa GasTurb™, de forma que se garantice una base sólida común para que los alumnos puedan afrontar la actividad grupal final.

La primera de estas sesiones está dedicada a los aspectos básicos del software. La sesión comienza con dos tutoriales dedicados a los siguientes aspectos:

- Selección de configuración del motor y configuración de entrada / parámetros operativos.
- Definición de “Valores compuestos”, que son nuevos resultados por fórmulas definidas por el usuario a partir de los parámetros calculados por defecto.
- Ejecución de casos únicos, iteraciones y estudios paramétricos.
- Post-procesado de datos, incluyendo los resultados numéricos y diagramas de ciclo termodinámico (presión-volumen, temperatura-entropía y entalpía-entropía) para casos individuales, así como gráficos de contorno bidimensionales para estudios paramétricos.

Tras mostrarle a los estudiantes la herramienta y sus funcionalidades, se les pide que conformen parejas y realicen un estudio sobre la configuración de un motor turboeje como el ciclo de motor de avión con mayor similitud al ciclo básico de Brayton estudiado en la asignatura Termodinámica del curso anterior. En concreto, los estudiantes deben analizar los efectos de la relación de compresión general y la relación de temperaturas sobre la potencia específica y el rendimiento térmico del motor. Este estudio se realiza dos veces: primero, asumiendo procesos ideales en el compresor, cámara de combustión, turbina y transmisión de potencia a través del eje; y, a continuación, introduciendo rendimientos realistas para los procesos enumerados anteriormente. El objetivo de este estudio es confirmar que con un ciclo casi-ideal el rendimiento térmico está mayoritariamente ligado a la relación de compresión global, mientras que en un ciclo real aparece una relación de compresión óptima, diferente según el parámetro de mayor interés.

La segunda sesión de laboratorio está dedicada al análisis del ciclo de un motor a reacción. En particular, se estudia el impacto del diseño de la tobera sobre el rendimiento de un turboreactor. Primero, se revisan los fundamentos del flujo compresible en una tobera con geometría convergente o convergente-divergente. A continuación, los profesores definen cómo hacer uso de la herramienta de iteración disponible en GasTurb™ para asegurar que la geometría de la tobera se adapte para alcanzar una expansión completa cuando se selecciona una sección convergente-divergente. Posteriormente se describe el procedimiento para activar un proceso de postcombustión entre la turbina y la tobera. Finalmente, se vuelve a pedir a los alumnos que trabajen en parejas y realicen dos estudios de modo autónomo. El primero de ellos se centra en la comparación del empuje específico y de los rendimientos del motor (térmico, propulsor y global) en función del tipo de geometría de la tobera seleccionada: convergente (con tobera adaptada o bloqueada) o convergente-divergente (en este caso, solo con tobera adaptada). El segundo de los estudios está dedicado al análisis de la postcombustión. En este caso, se pide a los estudiantes que evalúen el impacto del proceso de postcombustión en dos pasos. Inicialmente, asumen una sección de garganta de la tobera constante, idéntica a la del caso sin postcombustión, y luego varían la sección de la garganta para garantizar el mismo flujo de aire a través del motor que en el caso sin postcombustión. El objetivo principal es que los estudiantes comprendan que un aumento significativo del empuje neto solo se logra si se modifica la sección de la garganta, destacando la necesidad de una tobera de geometría variable en motores supersónicos con postcombustión y desacoplando el diseño del ciclo (empuje específico) del dimensionamiento (flujo másico) como una forma de establecer variables extensivas (empuje).

3.3. Estudio de caso

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo principal del estudio es analizar el efecto de las condiciones de contorno (altitud y velocidad de vuelo), que son las principales magnitudes que varían entre las distintas aplicaciones de aeronaves desde el punto de vista termodinámico, a su vez crítico en el diseño del motor. Partiendo de este punto, el estudio propuesto está pensado para que el alumnado se inicie en el uso de GasTurb™, siendo guiados para poder llegar a conclusiones reales sobre la influencia de las variables de estudio en el ciclo real del motor.

En este sentido, el estudio de caso se inicia una vez los estudiantes han completado las dos sesiones de laboratorio. El total de estudiantes, alrededor de 130 estudiantes por curso, se dividen en grupos de 5 personas. Cada grupo debe realizar las siguientes fases para completar el proyecto:

- 30 *ƒ g p w h k e c t " r " ƒ g r g p f g p e k " ƒ g " r q u " r c t " o g v t q u " v g t o q f k p " o k e q u " r t l k p e k r c r g u " ƒ g " w p " o q w t " w t d q l g v " t g u r g e v q " ƒ g " r " c n k w f " q " r " x g r q e k f c f " ƒ g " x w g r q 0 "*



c0 Guwf kq'f g'rv 'kplmgpek'f g'rv 'cnkwf''

d0 Guwf kq'f g'rv 'kplmgpek'f gn'Ocej 'f g'xwngq.'eqpuf gt cpf q''r''ko r qtwpek'f g'rv 't gvek'p'f g'
eqo rt gpubp'f

40 Lunhlect. 't c|qpcpf q'cf gewcf co gpv. 'hu'lt guwncf qu'dvplf qu'b gfkpv g'ritc'p' rku'f gn'ekery'vgt o qf kp^a o leq'f

Es importante destacar que, a pesar de que la finalidad del trabajo es idéntica para el conjunto del alumnado, los objetivos son suficientemente abiertos como para que cada grupo puede realizar un análisis diferente utilizando enfoques diversos.

El estudio es evaluado mediante la exposición del trabajo realizado en una presentación de 20 minutos, donde cada uno de los miembros que componen cada grupo deben resumir y explicar cómo han realizado los cálculos y qué conclusiones han obtenido de ellos. De esta manera, no solo son evaluados los procedimientos de cálculo aplicados, sino también la capacidad de cada estudiante para sintetizar su trabajo y destacar los aspectos más importantes de la respuesta del motor en un ciclo determinado.

Vcdx '30I w'f 'i gpgt cr' rctc'f g'kpl' 'hu'qdl g'kxqu'f gn'guwf kq'f g'ricuq''

Tarea	Descripción
Configuración general en GasTurb™	- Selección del motor - Configuración y optimización de tobera - Definición de parámetros calculados
Estudio de altitud	- Condiciones atmosféricas estándar - Definición del rango - Configuración del estudio en GasTurb™
Resultados sobre la altitud	- Gráficas de prestaciones - Gráficas de operación de componentes - Ejemplos de diagrama H-S
Análisis del efecto de la altitud	- Relación entre parámetros de diseño y prestaciones - Razonamiento sobre el efecto de la altitud
Estudio del Mach	- Definición del rango - Configuración del estudio en GasTurb™
Resultados del Mach	- Gráficas de prestaciones - Gráficas de operación de componentes - Ejemplos de diagrama H-S
Análisis del efecto del Mach	- Relación entre parámetros de diseño y prestaciones - Razonamiento sobre el efecto del Mach de vuelo
Estudio de Mach y relación de compresión	- Definición de los rangos - Configuración del estudio en GasTurb™
Resultados del Mach vs relación de compresión	- Mapas 2D de prestaciones frente a Mach y relación de compresión - Mapas 2D de prestaciones frente a la relación de compresión global
Análisis de la interacción entre Mach y relación de compresión	- Análisis de la interacción de Mach y relación de compresión global - Discusión de la optimización de la relación de compresión global para empuje y consumo específicos
Síntesis	- Identificación de las tendencias y relaciones causa-efecto principales - Extrapolación los resultados a diseños de motores reales - Preparación de la defensa final

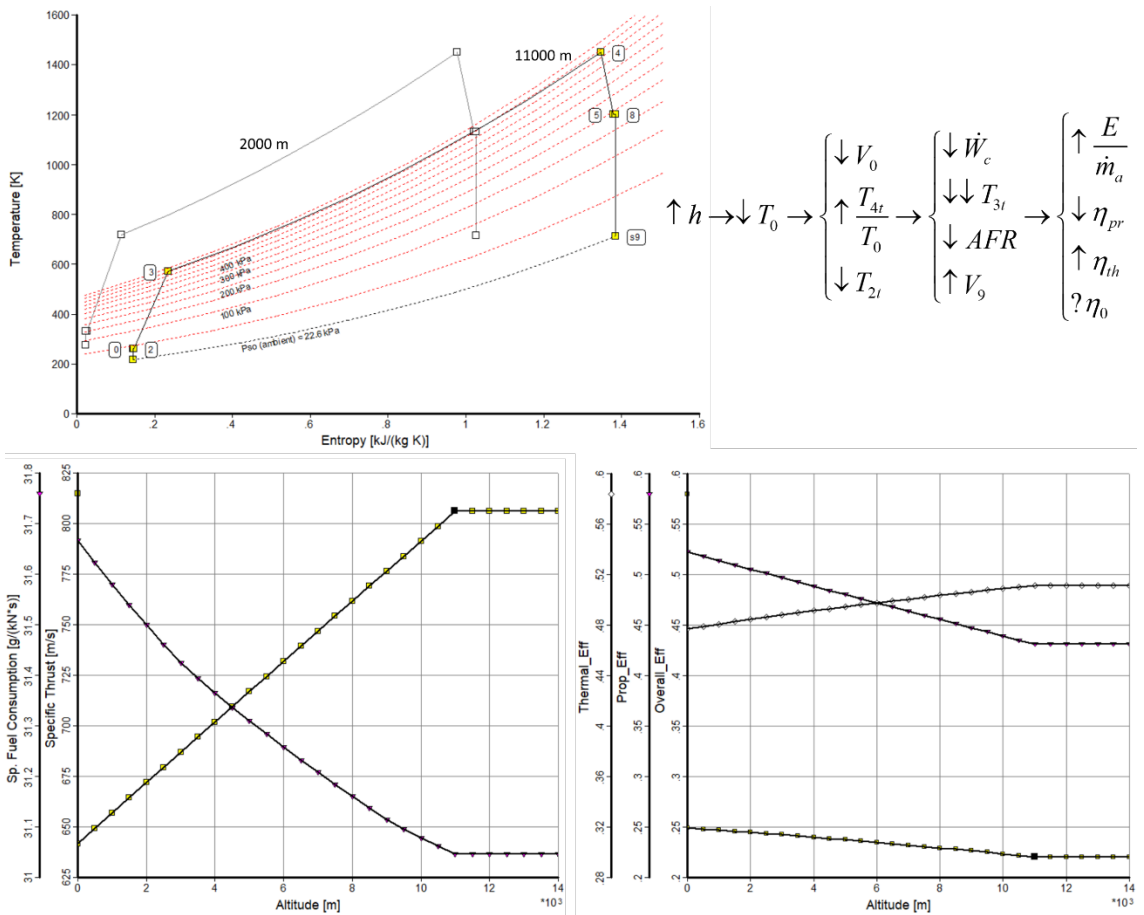
Para poder realizar un seguimiento adecuado del trabajo, los grupos deben programar al menos dos tutorías grupales intermedias con el profesorado. El objetivo de estas reuniones intermedias es asegurar la consecución de los objetivos enumerados en la Sección 3.1. Durante la primera reunión, que se mantiene transcurridas aproximadamente dos semanas desde el lanzamiento de la actividad, se exige a los grupos que hayan completado su organización interna, detallando la división de tareas entre los miembros del grupo. En esta reunión se hace hincapié en la necesidad de prever y plantear soluciones a las posibles dificultades que puedan aparecer en los distintos cálculos que tendrán que abordar de manera progresiva a lo largo de la actividad. Cuando se ha debatido sobre la organización interna del grupo, los puntos descritos en la Tabla 1 permiten guiar a los estudiantes en la deducción de la relación entre los parámetros

de diseño y su influencia respecto a la altitud o la velocidad de vuelo. La segunda reunión se programa cuando los resultados técnicos de la actividad ya se encuentran muy avanzados, siempre al menos una semana antes de la entrega final. Durante esta tutoría, cada uno de los grupos debe justificar sus cálculos, razonar el resultado final y su relación con las actividades específicas realizadas por otros miembros del grupo. Así, en esta reunión se persigue ayudar al estudiante en la identificación de la relación entre la evaluación de prestaciones obtenida y los parámetros de diseño del motor estudiados durante el curso.

4. Resultados

4.1. Ejemplos de trabajos anteriores

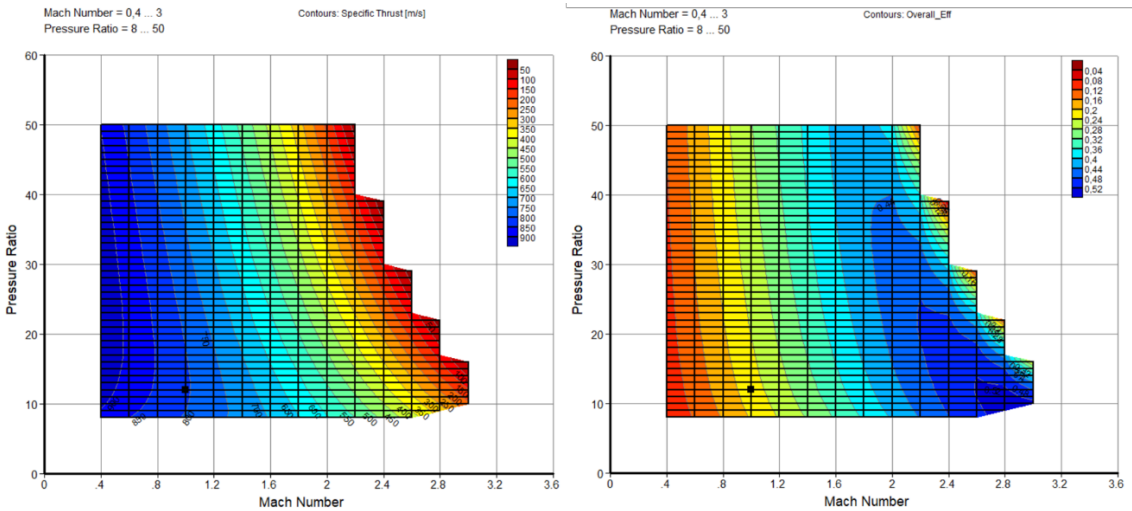
Un modo de analizar la idoneidad de la metodología sugerida para alcanzar los objetivos propuestos es analizar el resultado de trabajos realizados durante cursos previos. En esta línea, se analizan a continuación ejemplos de resultados presentados en dos trabajos del último curso académico.



Hki wt c'30Glgorru'f'g't gwnxf qu'qdvplf qu'gp'grigwvf kq'f'g'rc'cnkvf'f'g'xwgru'

La Figura 1 muestra resultados relativos al análisis del efecto de la altitud sobre el ciclo termodinámico de un motor a reacción. Como puede observarse, en este caso, se ha dirigido la discusión a la influencia de la temperatura ambiente, que decrece a razón de 6.5 K/km hasta la tropopausa. Al disminuir la temperatura ambiente, manteniendo constante la limitación de temperatura de entrada a la turbina, es posible extraer mayor trabajo en la expansión de los gases quemados, al tiempo que se reduce la velocidad de vuelo (manteniendo constante el número de Mach). También se puede observar una reducción del trabajo específico consumido por el compresor al tener una temperatura de entrada menor, lo que conlleva un aumento del dosado. A su vez, ello significa que la turbina necesita extraer menos energía del gas para mover el compresor, dejando más energía disponible para la aceleración de fluido en la tobera. Como

consecuencia, se obtiene una mejora en empuje específico y rendimiento térmico hasta alcanzar la tropopausa, así como una reducción del consumo específico y de los rendimientos propulsivo y global. Estos resultados dirigen al alumno a identificar una de las razones por las que las aeronaves comerciales vuelan alrededor de 11000 m.

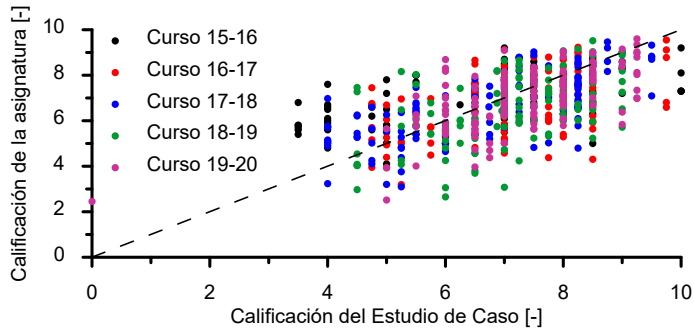


Hli wt c'40Gigo rrg'f g'hqu't'guwncf qu'qdvplf qu'gp'gn'guwf kq'f gn'Ocej'f'g'xwgrq'O'

La Figura 2 muestra un extracto de otra resolución del estudio de caso donde se analiza el efecto del número de Mach a través de la relación de compresión. Como se puede observar, el empuje específico decrece a medida que el de Mach de vuelo aumenta. La tasa de reducción es más significativa a medida que el Mach de vuelo se incrementa. Como resultado, la relación de compresión óptima del compresor se reduce. En cambio, a medida que aumenta el número de Mach vuelo se observa que el rendimiento global del turborreactor aumenta, hasta llegar al punto crítico a partir del cual decrece rápidamente. Este efecto está causado por la reducción del rendimiento térmico cuando la temperatura de salida del compresor se acerca a la limitación impuesta por la entrada de la turbina, a pesar de los beneficios en rendimiento propulsivo. Esta conclusión indica que la relación de compresión del compresor necesita analizarse de forma conjunta con el Mach de vuelo para mantener la relación de compresión global optimizada para cada relación de temperaturas del ciclo determinada. De este modo, el rendimiento térmico puede ser optimizado y, por lo tanto, se optimiza el balance entre empuje específico y rendimiento propulsivo. A su vez, la reducción en relación de compresión del compresor óptima al aumentar el Mach de vuelo refuerza el interés natural por el empleo de motores ramjet en régimen de vuelo alrededor de Mach 3.

4.1. Resultados docentes

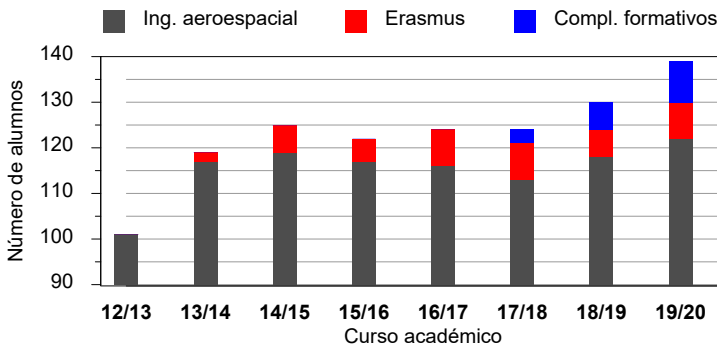
La Figura 3 resume las calificaciones obtenidas por el alumnado durante los cinco últimos cursos académicos. En el eje horizontal se muestra la nota obtenida en el estudio de caso mientras que en el eje vertical se ha graficado la nota final de la asignatura. Se han utilizado diferentes colores para distinguir cada uno de los cursos académicos. La primera conclusión que se puede derivar de la gráfica es que la nota obtenida en la actividad de grupo es más alta que la nota final. No obstante, también es importante destacar que existe cierta correlación entre ambas notas, puesto que el alumnado que obtiene una buena calificación final suele también obtener una excelente evaluación en el estudio de caso realizado en grupo. Teniendo en cuenta que la nota del trabajo solo aporta un 20% de la nota final, es razonable asumir que las altas calificaciones de esta parte del alumnado están también influenciadas por el aprendizaje obtenido tras realizar la actividad. También es interesante destacar que la media de la nota del estudio de caso se corresponde con la media de la nota final de la asignatura en cada año académico, con una variabilidad de tan solo ± 0.5 puntos.



Hli vt c'50Eqt t gix ekop'gpt g'ix'ect hkecekop'c'ncp/cf c'gp'gic'Gawf kq'f'g'Ecuq'f'ix'ect hkecekop'hkpcif'g'ix'c'uki pcwt c''

No obstante, se han detectado diversos aspectos que sugieren la necesidad de rediseñar la dinámica del estudio de caso con el fin de obtener el máximo aprovechamiento al esfuerzo dedicado por el alumnado. Ello se debe al incremento del número de alumnos que cursan la asignatura, así como su diversidad, la cual también se ha incrementado significativamente durante los últimos cursos. En la Figura 4 se muestra el total del alumnado desde el curso 2012/13 dividido en tres categorías:

- Alumnos de Ingeniería Aeroespacial, que han seguido el itinerario establecido dentro de la titulación desde primer curso.
- Alumnos de complementos formativos, que cursan la asignatura como parte del proceso de adaptación a Grado desde las antiguas titulaciones de Ingeniero Técnico Aeronáutico, o bien como parte del curso de nivelación para el ingreso al Máster de Ingeniería Aeronáutica para alumnos procedentes de otras titulaciones (Universitat Politècnica de València, *Ego r rigo gpwqu'hqt o cvxqu'rct c'gri'Oª wgt 'Wpkxgt ukct kq'gp'kpi gpkgt 'f' Cgt qpª wkec*).
- Alumnos procedentes de otras instituciones académicas como parte de programas de intercambio (Programa Erasmus y similares).

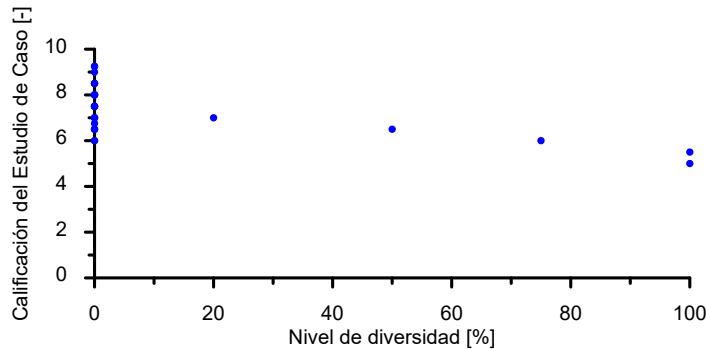


Hli vt c'60Gxqmwelop'f'glic'no pcf q'f'g'ix'c'uki pcwt c'Rtr wukop'o'

Como se puede apreciar con claridad, el número de alumnos se ha incrementado desde 101 alumnos correspondientes al año de implantación de la asignatura en el actual plan de estudios, cuando se diseñó la actividad, hasta un total de 139 en el último curso académico, lo que supone un aumento porcentual cercano al 38%. Aunque lenta, junto al alto número inicial de alumnos, esta progresión ha conducido a su vez a un aumento invisibilizado de las dificultades para llevar a cabo un seguimiento riguroso y cercano del trabajo realizado por cada uno de los grupos. La respuesta natural, ha sido el aumento del tamaño de grupo, de típicamente 4 a 5, lo que reduce la carga de trabajo del profesorado a niveles asumibles para abarcar a todos los grupos con ciertas garantías. No obstante, si bien se mantiene el seguimiento sobre el grupo, se ha observado una menor implicación individual del alumnado en la actividad al diluirse la carga de trabajo entre más miembros, dificultándose la autogestión del grupo. Además, la reciente aparición y gradual crecimiento en número de los alumnos de complementos formativos se ha traducido en un aumento significativo del porcentaje de alumnos con una formación de base diferente a la habitual, además de comúnmente de menor nivel y exigencia previa.

Junto con los estudiantes de intercambio, cuya situación es muy similar, alcanzan en la actualidad un total alrededor al 15% de los alumnos matriculados.

La Figura 5 analiza el resultado alcanzado en el estudio de caso en función del grado de diversidad del grupo, calculado como el porcentaje de estudiantes que provienen de otras titulaciones con respecto al total de componentes, para el último curso 2019/20. De los resultados mostrados cabe extraer dos conclusiones. Por un lado, los alumnos con origen diferente tienden a concentrarse en un número reducido de grupos que, por tanto, alcanzan altos niveles de diversidad. Por otro lado, la calificación alcanzada por dichos estudiantes con la metodología propuesta es claramente inferior al de la mayoría de sus compañeros. Ello refuerza la tesis de la necesidad de replantear la actividad, más allá de la opinión generalmente positiva del alumnado, según se aborda a continuación.



Hli wt c'70Pqvc'f gn'guwf kq'f g'ecuq'f' t gpv'c'ri'pkxgrif g'f kxgt ulf cf'f gn'cno pcf q'

4.2. Satisfacción del alumnado

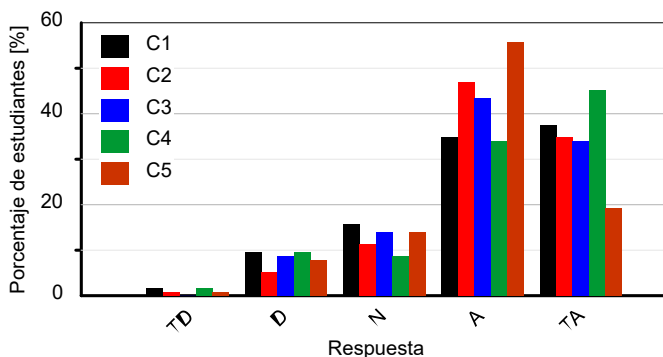
Tal como se había mencionado en la Introducción, solo es posible un aprendizaje efectivo por parte del alumnado si éste lo percibe como una tarea interesante y agradable, siendo conscientes de los beneficios que les reporta. Además, uno de los principales retos de las actividades en grupo es la organización de entre sus miembros, así como la gestión de los problemas internos que puedan surgir derivados de la interacción mutua. Para poder analizar el impacto de la actividad propuesta sobre el alumnado, desde hace dos cursos académicos se realiza una encuesta al finalizar la asignatura, con las siguientes cuestiones:

- C1: Las tareas a realizar han sido adecuadamente distribuidas entre las personas del grupo.
- C2: Los posibles conflictos surgidos durante la actividad han sido adecuadamente trabajados y solucionados.
- C3: Se ha mantenido un clima de cooperación entre las personas del grupo aportando ideas y mejorando el trabajo final.
- C4: El trabajo en grupo me ha ayudado a entender mejor y aprender los conceptos estudiados en la asignatura.
- C5: En general, estoy satisfecho con el desarrollo del trabajo y el conocimiento adquirido durante el mismo.

Como puede observarse, las tres primeras cuestiones están orientadas a estudiar los aspectos organizativos de los grupos, mientras que las dos últimas tratan de identificar el grado de satisfacción y promover una autoevaluación por parte del alumnado del aprendizaje alcanzado. Para cada cuestión se ofrecían diferentes posibilidades, desde *wxw gpv'f g'cewgtf q* (TA) a *wxw gpv'gp'f g'cewgtf q* (TD), con una respuesta *pgwtcn*(N) y ofreciendo la posibilidad de no contestar a la pregunta si no se sentían con información suficiente. La encuesta se realizó anónimamente a través de la plataforma docente online *Rqtlqto cv*, desarrollada por la Universitat Politècnica de València, y estuvo disponible para todo el alumnado matriculado en la asignatura.

La Figura 6 resume los resultados obtenidos en la encuesta durante los dos últimos cursos académicos. Las respuestas muestran mediante un gráfico de barras el porcentaje de estudiantes que ha marcado cada opción para cada una de las cuestiones descritas anteriormente (C1-C5). Como puede observarse, la mayor parte del alumnado se muestra satisfecho con la organización y la metodología propuestas; más de un 60% de las respuestas respondieron *wxw gpv'f g'cewgtf q* o *f g'cewgtf q*. Sin embargo, también se observa que los resultados de la cuestión C5, relativa a la satisfacción con la actividad y los conocimientos adquiridos, son ligeramente inferiores a los del resto de ítems. En concreto, esta cuestión fue evaluada con el menor porcentaje de respuestas *wxw gpv'f g'cewgtf q*, con un 19%. Un análisis cuantitativo, asignando 5 a *wxw gpv'f g'cewgtf q* y 1 a *wxw gpv'gp'f g'cewgtf q*, resulta también interesante para revelar la

satisfacción media para cada cuestión. En este caso, la cuestión C5 obtendría una puntuación final de 3,75, mientras que el resto de los puntos obtendrían una puntuación media entre 4 y 4,1. Estos resultados indican que la futura reorganización de la actividad, además de los aspectos identificados previamente, debe ir orientada también a mejorar la satisfacción general del alumnado sobre la sensación de aprendizaje que se deriva del estudio de caso.



Hki wt c'80Gpewguc'f'g'lc'vklc'eelep'f'g'rqv'c'wmo'pqu'eqp'rv'c'evklcf'f'g'ilecuo'

5. Trabajo futuro y posibles mejoras

A pesar de los satisfactorios resultados globales de la actividad, se ha identificado la necesidad de introducir algunas posibles mejoras que conduzcan al alumno hacia un aprendizaje mayor, en un proceso más eficiente y satisfactorio. Estas mejoras se incluyen en un Proyecto Emergente de Innovación y Mejora Educativa actualmente en curso. Se detallan a continuación algunas de las líneas de actuación:

- La asignatura de *Rtqrwnkwp* debería ser un curso introductorio al diseño de motores y operaciones en Ingeniería Aeroespacial, y representa el punto de partida de asignaturas posteriores, especialmente para la especialización de Aeromotores. Sin embargo, la actividad presentada no desarrolla todo su potencial al no estar conectada con asignaturas posteriores. Actualmente, se está desarrollando una segunda versión de la actividad en la que los análisis realizados puedan ser complementados en las asignaturas de *Eqo dwnkwp* (cuarto año, primer semestre) y *Cgt qtt gcevqt gu'l' Cgt qce Aunkc* (cuarto año, segundo semestre). El objetivo de esta nueva definición de la actividad es que el alumnado amplíe el estudio de prestaciones de los motores al ámbito del control de emisiones, tanto de tipo químico como acústico, identificando el potencial de la tecnología actual y los retos que se plantean en la actualidad. De ahí, se vincula el conjunto de la actividad con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) formulados por la ONU, en particular los relacionados con la *Ceeekwp'rq'gn'Erko c y Gpgti'Uqungpkdng'l'pq'Eqpvc o kpcpvgo*
- Otro aspecto sujeto a mejora es la composición de los grupos. Hasta ahora, durante el desarrollo de la actividad los propios alumnos eligen la composición de los grupos, lo que lleva ciertos inconvenientes asociados. Por un lado, puede existir una falta de homogeneidad en la experiencia y los conocimientos previos de los miembros de cada grupo. Los programas de intercambio, así como los estudiantes que provienen de otros centros, agravan esta situación puesto que no tienen los mismos vínculos sociales con el resto de estudiantes y suelen asociarse entre ellos, creando grupos con diferentes conocimientos previos. Además, como los estudiantes que componen los grupos suelen conocerse con anterioridad los posibles conflictos que pueden surgir no son percibidos hasta que la situación es crítica. Para el desarrollo de la actividad en los próximos años se está desarrollando un método de selección de grupos guiado por el profesorado para poder abordar estos inconvenientes.
- Finalmente, una posibilidad planteada es ofrecer al alumnado mayor flexibilidad a la hora de decidir la temática a desarrollar en el estudio de caso, permitiendo a cada grupo elegir el análisis termodinámico que prefiere desarrollar, acompañando dicha elección de una justificación técnica. Sin embargo, esta opción entraña la posibilidad de que cada grupo alcance un conocimiento técnico distinto dependiendo del estudio elegido. Por lo tanto, sería necesaria una reestructuración de la asignatura para asegurarse que todas las competencias básicas de la misma son cubiertas.

6. Conclusiones

En este artículo se ha detallado una metodología de aprendizaje para el estudio de un caso didáctico en el curso de elementos propulsivos mediante el uso de la herramienta computacional GasTurbTM. La metodología ha sido aplicada para entender el ciclo termodinámico de motores a reacción, como parte de los contenidos desarrollados en la asignatura de *Rtqrwubp* destinado a alumnos del Grado en Ingeniería Aeroespacial. La metodología está dividida en dos partes: en la primera parte se realizan dos sesiones de laboratorio donde los estudiantes deben familiarizarse con el software empleado. En la segunda parte, se organizan grupos de 5 personas y se propone un análisis de los datos obtenidos en estudios paramétricos sobre la influencia de la altitud y el Mach de vuelo. Durante la aplicación de la metodología se han extraído las siguientes conclusiones:

- La metodología propuesta ha sido adecuadamente implementada como parte del curso de *Rtqrwubp*. Los resultados muestran que los estudiantes que realizan la actividad obtienen un alto nivel de conocimiento del ciclo de operación de motores a reacción gracias al uso de estudios paramétricos y un análisis adecuado de los resultados.
- Existe una correlación significativa entre los resultados alcanzados en el estudio del caso y los de otros actos de evaluación de la asignatura, lo que se puede ver como un indicador de la mejora del aprendizaje del alumnado implicado en la actividad.
- El análisis y desarrollo de casos de estudio es una herramienta útil para desarrollar las habilidades de trabajo en grupo. El análisis de los beneficios de la actividad ha sido monitorizado mediante reuniones intermedias que permiten conocer el nivel organizativo de cada grupo.
- Se ha realizado una encuesta a las personas inscritas en el curso, mostrando una satisfacción generalizada con la actividad. La encuesta muestra una mayor satisfacción con los aspectos organizativos que con la tarea en sí, por lo que la actividad puede ser mejorada para ser más atractiva para el alumnado y mejorar así su aprendizaje.
- Se han identificado aspectos a mejorar, tanto en la gestión de la diversidad dentro de los grupos como en la relación entre la temática del estudio del caso y lo desarrollado en asignaturas sucesivas de la misma área de conocimiento, lo que ha dado lugar a la propuesta de un Proyecto Emergente de Innovación y Mejora Educativa, actualmente en curso.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Universitat Politècnica de València a través del proyecto PIME 20-21/204.

Referencias

- ANWAR, S. y FORD, P. (2001) "Use of a case study approach to teach engineering technology students". *International Journal of Electrical Engineering Education*; vol. 38: pág. 1–10.
- BARNFIELD, H. y LOMBARDO, M.M. (2014) "FYI: For Your Improvement - Competencies Development Guide". Los Ángeles, California (Estados Unidos): Lominger Korn Ferry.
- BAUMBERGER-HENRY, M. (2005) "Cooperative learning and case study: Does the combination improve students' perception of problem-solving and decision making skills?" *Nurse Education Today*; vol. 25: pág. 238–246.
- BURKO, L.M. (2016) "Using the Case Study Method in Teaching College Physics". *Physics Teaching*; vol. 54: pág. 413–415.
- CHARTE, D., CHARTE, F., DEL JESUS, M.J. y HERRERA, F. (2020) "An analysis on the use of autoencoders for representation learning: Fundamentals, learning task case studies, explainability and challenges". *Neurocomputing*; vol. 404: pág. 93–107.
- COLYER, C.L. (2013) "Confchem conference on case-based studies in chemical education: You (want to) call yourself a case study teacher?" *Journal of Chemical Education*; vol. 90: pág. 260–261.

- DEBNATH, M, PANDEY, M, CHAPLOT, N, GOTTIMUKKULA, M.R., TIWARI, P.K. y GUPTA, S.N.(2012) “Role of soft skills in engineering education: Students’ perceptions and feedback” en Nair, C.S., Patil, A. y Mertiva, P. *Gpj cpeki "Ngctpkpi "cpf"Vgcej kpi "j tqwi j "Uwf gpv'Hggf dceñ* Hull (Reino Unido): Chandos Publishing, DOI: 10.1016/B978-1-84334-645-6.50004-5.
- EDMONDS E. (1980) “Where Next in Computer Aided Learning?” *British Journal of Educational Technology*; vol 11: pág. 97–104.
- GAMEZ-MONTERO, P.J., PEÑA, M, y OLMEDO-TORRE, N. (2020) “Flipped learning and threshold concepts in the Turbomachinery section of Fluid Engineering course”. *Computer Applications in Engineering Education*.
- GAO, J.H. y HUANG, Y.Y. (2011) “Modeling and simulation of a aero turbojet engine with GasTurb”. *Proceedings of the International Conference on Intelligence Science and Information Engineering Modeling (ISIE 2011)*; pág. 295–298.
- GASTURB GMBH. *I cuVwt d'VO*, <<https://www.gasturb.de/>> [marzo 2021]
- GUTIÉRREZ-ROMERO, J.E., ZAMORA-PARRA, B. y ESTEVE-PÉREZ, J.A. (2017) “Acquisition of offshore engineering design skills on naval architecture master courses through potential flow CFD tools”. *Computer Applications in Engineering Education*; vol. 25: pág. 48–61.
- HISYAM M. y HASHIM, M. (2015) “The Practice of Employability Teamwork Skills”. *International Journal of Vocational Education and Training Research*; vol. 1, pág. 1: 16.
- IACOB, C. y FAILY, S. (2019) “Exploring the gap between the student expectations and the reality of teamwork in undergraduate software engineering group projects”. *The Journal of Systems and Software*; vol. 157. 110393 DOI: 10.1016/j.jss.2019.110393.
- IAHAD, N.A., MIRABOLGHASEMI, M., MUSTAFFA, N.H., LATIF, M.A., y BUNTAT, Y. (2013) “Student Perception of Using Case Study as a Teaching Method”. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*; vol. 93: pág. 2200–2204.
- KLEIN, D. y ABEYKOON, C. (2015) “Modelling of a turbojet gas turbine engine”. *Proceedings of the 2015 Internet Technologies and Applications Conference (ITA)*. Wrexham (Reino Unido): IEEE; pág. 200–206.
- KREBER, C. (2001) “Learning Experientially through Case Studies? A Conceptual Analysis”. *Teaching in Higher Education*; vol. 6: pág. 217–228.
- MARTIN, J., GARCÍA, A., DE LA MORENA, J. y MONSALVE-SERRANO, J. (2019) “Utilización de modelos matemáticos para el aprendizaje de aspectos avanzados de Combustión en alumnos de Ingeniería”. *V Congreso Nacional de Innovación Educativa y Docencia en Red (IN-RED 2019)*, Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, pág. 437 – 448.
- MATTINGLY, J.D., HEISER W.H., PRATT D.T. (1987). *Cl et ch'gpi kpg'f guki p*. Reston, Virginia (Estados Unidos): AIAA Education Series.
- MINICHIELLO, A., ARMIJO, D., MUKHERJEE, S., CALDWELL, L., KULYUKIN, V., TRUSCOTT, T., ELLIOTT, J. y B HOURASKAR, A. (2020) “Developing a mobile application-based particle image velocimetry tool for enhanced teaching and learning in fluid mechanics: A design-based research approach.” *Computer Applications in Engineering Education*.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. *Umackpc dng" F gxgrro gpv" I qcu*, <https://sdgs.un.org/goals> [diciembre 2020].
- PATTERSON, N.J. (2020) “Machine learning driven interpretation of computational fluid dynamics simulations to develop student intuition”. *Computer Applications in Engineering Education*; vol. 28: pág. 490–496.
- ROBINSON, M.A., SPARROW, P.R., CLEGG, C. y BIRDI, K. (2005) “Design engineering competencies: Future requirements and predicted changes in the forthcoming decade”. *Design Studies*; vol. 26: pág. 123–153.
- SFORZA P.M. (2012) *Vj gqt{ "qh" Cgt quwceg" Rtqrwnkqp*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann (Elsevier). DOI: 10.1016/b978-1-85617-912-6.00003-7.

Gzr gt kgpek 'uqdt g'gn'go rrgq'f gn'guwf kq'f g'ecuq'f 'j gttco kgpvcu'f g'wbo wrekp'rctc'o glqtct 'r' 'eqo rtgpubp'f gn'eknq'
vgt o qf kp' o keq'f g'o qvt gu'c 't gceekp

SINGH, R., AMEYUGO, G. Y NOPPEL, F. (2012) "Jet engine design drivers: past, present and future" en Young, T. M. y Hirst, M. *Kppqxcwqp'kp'Cgtqpcwkeu*. Oxford: Woodhead Publishing Limited. DOI: 10.1533/9780857096098.1.56.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. *Ego rrgo gpvqu' lqto cvkxqu' rctc" gn' O^a wgt" Wp'kxgt ukxt kq" gp" Kpi gpkgt f" Cgtqp^a wkec.*
<http://www.upv.es/titulaciones/MUIAERO/menu_urlc.html?//www.upv.es/titulaciones/MUIAERO/info/U0838605.pdf>. [marzo de 2019]

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. *Rwcp"fg" guwf kqu'f gn' I tcfq" gp" Kpi gpkgt f" Cgtqgurcekn*
<http://www.upv.es/titulaciones/GIA/menu_1014617i.html> [marzo 2021]

VARMA, V, y GARG, K. (2005) "Case studies: The potential teaching instruments for software engineering education". Proceedings of the Fifth International Conference on Quality Software (QSIC'05), Washington DC (Estados Unidos): IEEE Computer Society, pág 279–285.

WRIGHT, G.B. (2011) "Student-centered learning in higher education". International Journal of Teaching and Learning in Higher Education; vol. 23: pág. 92–97.

ZHU, C., LI, M, SHI, C. y YOU, Y. (2019) "An inverse design tool for two-dimensional blade generation in aerospace engineering education". Computer Applications in Engineering Education; vol. 27: pág. 380–386.

ZHU, R., LIANG, Q. y ZHAN, H. (2017) "Analysis of Aero-engine Performance and Selection Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation". Procedia Engineering vol. 174: pág.1202–1207.

ZUWALA, J. y SZTEKLER, K. (2018) "Implementation of case study method as an effective teaching tool in engineering education". IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON; Santa Cruz de Tenerife: IEEE, pág. 89–94.