

# TERA: UNA METODOLOGÍA MULTIDISCIPLINAR PARA EVALUACIÓN, OPTIMIZACIÓN Y COMPARACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS Y DE PROPULSIÓN

---

Pablo Bellocq; Pericles Pilidis; Vishal Sethi<sup>1</sup>

---

## **Resumen**

Como respuesta a las normativas ambientales cada vez más estrictas y a las constantes variaciones del precio del petróleo, los fabricantes de sistemas de potencia y propulsión e investigadores proponen alternativas más eficientes y amigables al medio ambiente. Todos estos sistemas son más complejos que los actuales y presentan un desafío desde el punto de vista de la fiabilidad y de la disponibilidad, resultando en grandes incertidumbres ante las posibles inversiones.

Este artículo presenta una metodología llamada TERA que permite evaluar, optimizar y comparar de forma sistemática el desempeño y los riesgos de diversos ciclos de potencia y propulsión. Esta técnica está basada en modelos detallados de funcionamiento de los equipos que componen los sistemas de potencia, unido a una capa de simuladores económicos, ambientales y otros modelos que describen las condiciones locales en las cuales operará el sistema.

Los resultados de un análisis TERA pueden dar un marco de referencia a inversores, investigadores, legisladores y otros agentes para evaluar inversiones necesarias para alcanzar un menor impacto ambiental, un mayor beneficio económico y unos mercados energético y de transporte más eficientes.

**Palabras-clave:** turbinas de gas; ciclos innovadores; selección de equipamiento; impacto ambiental; cuantificación de riesgos;

## **Introducción: Ciclos innovadores de propulsión y generación de energía**

En las últimas décadas se ha comenzado a estudiar científicamente el impacto de la actividad humana sobre el medio ambiente. Si bien hasta el momento no se ha podido demostrar que la actividad humana sea responsable de un cambio climático, la comunidad internacional ha comenzado a reglamentar las emisiones gaseosas y a incentivar la reducción del uso de combustibles fósiles.

El Parlamento Europeo puso en funcionamiento desde el año 2005 el *Emission Trading Scheme* (ETS) que obliga a las empresas emisoras de CO<sub>2</sub> a comercializar bonos de emisiones. Este

---

<sup>1</sup> Ing. Pablo Bellocq, Investigador Doctoral, [p.a.bellocq@cranfield.ac.uk](mailto:p.a.bellocq@cranfield.ac.uk)  
Dr. Pericles Pilidis, Catedrático de Performance de Turbinas de Gas, [p.pilidis@cranfield.ac.uk](mailto:p.pilidis@cranfield.ac.uk)  
Dr. Vishal Sethi, Profesor de Turbomaquinaria e Investigador, [v.sethi@cranfield.ac.uk](mailto:v.sethi@cranfield.ac.uk)  
Departamento de Energía y Propulsión - Cranfield University

esquema solo incluye a las empresas con usinas fijas e incluirá a las aerolíneas a partir del 2012. En los Estados Unidos existe un esquema nacional de similares características, llamado *Acid Rain Program*, y otros a nivel de estado.

Por otro lado el precio del petróleo presenta grandes variaciones, muchas veces imprevisibles, generando incertidumbre sobre las inversiones en los mercados energéticos. Como respuesta a esta situación, las OEM (*Original Equipment Manufacturer*) y la comunidad científica proponen constantemente una gran variedad de nuevos conceptos para la generación energética y propulsión que pretenden disminuir o eliminar las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases contaminantes.

Entre ellos se incluyen: motores de avión con arquitecturas novedosas, nuevas plantas nucleares, sistemas de captura de CO<sub>2</sub> y una gran variedad de sistemas que aprovechan fuentes de energías renovables.

Una característica común a todos estos nuevos sistemas es que son más complejos, voluminosos y pesados que los basados en tecnologías convencionales. Inevitablemente esto resulta en un incremento en el costo de adquisición, mantenimiento y operación, y representan un desafío desde el punto de vista de la fiabilidad y de la disponibilidad. Más aún, la experiencia industrial de operación y mantenimiento para la mayoría de estos conceptos es muy poca, o irrelevante. Todo esto hace que la selección del equipamiento más adecuado, o de la tecnología en la cual invertir recursos en I+D sea un proceso muy dificultoso y con gran incertidumbre. En todos los casos el riesgo es elevado y las condiciones locales tienen gran influencia sobre el rendimiento de una inversión y el desempeño ambiental de una tecnología.

Para poder evaluar sistemáticamente, comparar y resaltar los riesgos de nuevos ciclos de energía y propulsión, Cranfield University propone una metodología de análisis multidisciplinar llamada TERA: *Technoeconomic, Environmental and Risk Analysis*. Esta herramienta está siendo desarrollada y utilizada dentro del sector energético, transporte de petróleo y gas, transporte marítimo y aviación en la Comunidad Europea. En el centro de TERA hay una serie de modelos detallados de componentes y ciclos que son acoplados a modelos ambientales, económicos y de riesgos. El objetivo primordial de esta herramienta es cuantificar los potenciales y riesgos de prometedoras, pero inciertas tecnologías para poder realizar inversiones eficientes.

Los resultados de un análisis TERA son de utilidad para:

1. OEMs:
  - a. Dado que ayuda a conocer las tecnologías con mayor potencial y así poder decidir en qué tecnología invertir el presupuesto de I+D.
  - b. Asiste en el proceso de optimización de productos indicando los espacios de diseño más convenientes de cada tecnología para la aplicación deseada.
2. Usuarios de ciclos de potencia o propulsión: Debido a que permite evaluar el desempeño económico y ambiental de las opciones disponibles en el mercado para su aplicación y condiciones de operación. De esta forma se puede identificar la mejor opción de compra.
3. Organismos de gobierno:
  - a. Ya que ayuda a comparar las tecnologías susceptibles de recibir subvenciones de investigación y compra de equipos.
  - b. Muestra numéricamente los límites de la tecnología actual y los posibles beneficios de nuevas tecnologías. Esta información puede ser usada como referencia para fijar política de emisiones, objetivos futuros y para asistir en la toma de decisiones en diversos niveles. Por ejemplo, con un análisis TERA se puede cuantificar el gasto de combustible y las emisiones gaseosas extra que producirían un motor 1dBA menos ruidoso. De esta

forma se puede dar un peso ambiental y económico a una magnitud subjetiva como es la molestia auditiva y permite evaluar si es más conveniente exigir menos ruido o construir un nuevo aeropuerto lejos de zonas habitadas.

### Los Orígenes de TERA

El departamento de *Power and Propulsion* de Cranfield University tiene desde sus inicios un grupo especializado en el modelado de turbinas de gas y anexos que trabaja con sistemas energéticos y de propulsión con gran variedad de clientes en diversos contextos. Esto incluye trabajos sobre plantas de generación aero-derivativas [1], uso de gases sintéticos en plantas de generación [2 a 4], degradación y diagnóstico [5 y 6], mitigación de impacto ambiental [7 y 8] y turbinas de gas para aplicaciones nucleares [9] entre otros.

La mayor parte del trabajo realizado es para clientes industriales. En esta categoría se incluye la investigación sobre ciclos novedosos para generación de potencia y propulsión, ciclos de hidrógeno y de captura de CO<sub>2</sub>, avances en turbinas de gas para aplicaciones nucleares, inyección de vapor, turbo maquinaria para ciclos convencionales y sistemas de energías renovables, ciclos de pistón entre otros.

El interés por la turbina de gas fue naturalmente unido desde el principio a la consideración y modelado de aspectos económicos y ambientales por ser estos elementos claves para los clientes. En los años 90, junto con los desarrollos en el área informática, se comenzó a trabajar en la integración multidisciplinar de módulos de simulación y métodos computacionales de optimización. Estos elementos dan origen a la metodología a TERA.

Actualmente se llevan a cabo trabajos de desarrollo y aplicaciones de TERA para la propulsión marina, aérea, la generación de electricidad y el transporte de fluidos mayoritariamente para la industria petroquímica. Además, este grupo de trabajo lidera el desarrollo de TERA para la aviación civil en los proyectos correspondientes al *6th y 7th European Framework*. En estos proyectos colabora con los principales fabricantes de motores, aviones y componentes, así como institutos de investigación y universidades para mejorar los motores existentes y distinguir las nuevas tecnologías con mayor potencial.

### Descripción de la metodología TERA

La metodología TERA está basada en un simulador multidisciplinar compuesto por diversos módulos integrados, a través de un sistema optimizador con interfase gráfica que permite evaluar y optimizar diseños. A continuación, se describe la estructura del simulador y los modelos comunes a todas las plataformas por medio de ejemplos de utilización.

#### *Estructura*

La Figura 1 muestra un esquema del simulador utilizado para evaluar motores de aviación. Cada uno de los rectángulos representa un módulo, contenido en un archivo ejecutable que lee uno o varios archivos con parámetros de entrada, simula un aspecto particular del sistema y escribe uno o varios archivos de salida. Las flechas corresponden al flujo de información entre los módulos. Estos deben ser ejecutados en un orden particular, dado que la salida de algunos módulos constituye la entrada de otros. El sistema optimizador tiene las funciones de alimentar a los módulos con los parámetros de entrada correspondientes al diseño que se desea evaluar, ejecutar las simulaciones en el orden necesario y almacenar y procesar la información de salida.

En el ejemplo de la Figura 1, el primer módulo en ser ejecutado es el de performance del motor. Éste lee tres archivos de entrada que definen la configuración del motor (motor turbofan, turbo hélice, turbofan con intercooler y recuperador de calor, etc.), el diseño particular a ser evaluado (relación de compresión, velocidad de giro de los ejes, eficiencia de componentes en punto de diseño, etc) y la misión a cubrir. Luego de simular el funcionamiento del motor en los puntos de

certificación y en ciertos puntos de la misión, escribe los archivos necesarios para poder calcular las dimensiones y masa del motor, la performance del avión en la misión, las emisiones gaseosas y acústicas, y el costo de adquisición y operación del equipo. El siguiente módulo en ser ejecutado es el de dimensiones que diseña los elementos claves del motor para luego calcular el peso, las dimensiones exteriores, el costo de adquisición y los elementos necesarios para evaluar el mantenimiento del motor. Luego, el módulo de la aeronave calcula el funcionamiento del motor a lo largo de toda la misión y escribe la información necesaria para los módulos de emisiones gaseosas y de costos. Posteriormente, el módulo de emisiones gaseosas calcula los gases emitidos a lo largo de la misión y el módulo atmosférico estima el impacto ambiental de la misión. El módulo acústico es ejecutado para calcular el ruido producido en los puntos de certificación, y finalmente el módulo de costos calcula el costo de compra, operación y mantenimiento.

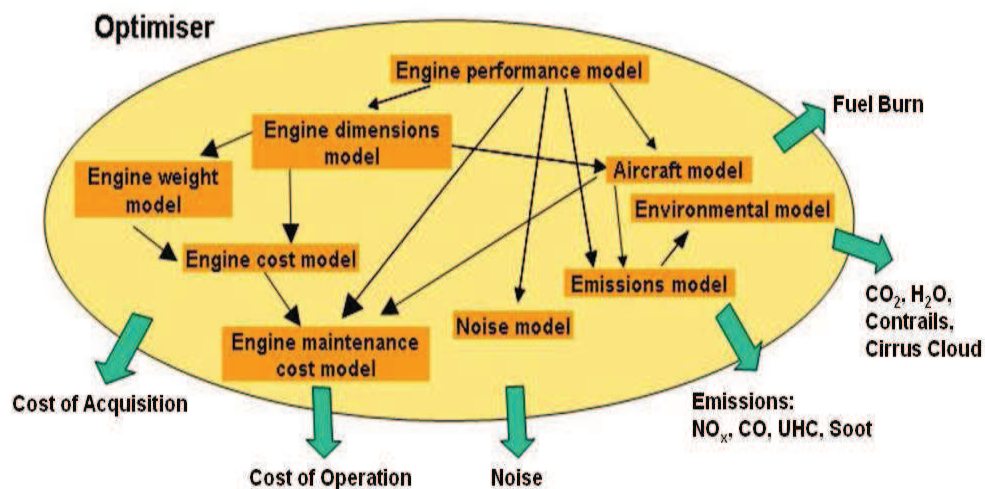


Figura 1: Diagrama de módulos del TERA para aviación

### Los equipos y su utilización

El corazón de TERA consiste en una descripción termodinámica detallada de la turbina de de gas que permite simular su funcionamiento en condiciones de diseño y fuera de diseño, transitorios y condiciones degradadas. Para este propósito, se ha desarrollado TURBOMATCH, un software de simulación modular en el que se puede definir un ciclo de potencia en base a sus componentes y características. Este programa permite simular virtualmente cualquier ciclo de potencia, ya sea utilizando componentes contenidos en sus librerías o unido a módulos (Ej.: paquetes de elementos finitos) que describan componentes novedosos.

Este módulo se acopla a otros que describen el resto de los equipos que componen el sistema. En el caso de sistemas de transporte (marítimo y aéreo) un modelo del vehículo es necesario. En este sentido se desarrolló un modelo de performance de aeronave (HERMES) y otro para embarcaciones (POSEIDON). Estos están basados en la dinámica de los vehículos en el medio que se mueven y tienen la capacidad de evaluar diferentes trayectorias en diversas condiciones atmosféricas transportando distintas cargas.

El caso descrito a continuación corresponde a la plataforma TERA para aplicaciones de transporte marítimo y es extraído de la Referencia [10]. Los detalles más significativos de la embarcación, el funcionamiento del motor en cuanto al diseño y las características de la hélice están resumidos en las Tablas 1 a 3 respectivamente.

Length at water level ( $L_{wl}$ )	185.55m
Maximum beam (B)	25.0m
Average design draft (T)	6.4m
Block coefficient ( $C_b$ )	0.55
Mid-ship coefficient ( $C_m$ )	0.93
Water plane coefficient ( $C_{wp}$ )	0.69
Service speed ( $V_s$ )	29.0 knots
Froude number (Fn)	0.3469
Displacement (S)	17000 tonnes
Wetted Surface ( $S_w$ )	4950m <sup>2</sup>

**Tabla 1:** Anatomía de la embarcación <sup>[10]</sup>

Gas turbine rating ( $P_{PT}$ ) (x2)	25MW
Turbine entry temperature (TET)	1500K
Compressor pressure ratio ( $PR_c$ )	17.8
Intake mass flow ( $W_i$ )	68kg/s
Exhaust mass flow ( $W_e$ )	69.5kg/s
Exhaust gas temperature ( $T_{exh}$ )	829K
Thermal efficiency ( $\eta_{th}$ )	0.374
Specific fuel consumption (SFC)	224g/KWh
Specific power ( $c_p$ )	0.367MJ/kg

**Tabla 2:** Funcionamiento del motor en punto de diseño <sup>[10]</sup>

Propeller diameter ( $D_p$ )	5.1m
Pitch diameter ratio ( $P/D_p$ )	1.154
Expanded area ratio ( $A_E/A_0$ )	0.763
Propeller rotational speed ( $N_{prop}$ )	150rpm
Number of blades ( $N_{blade}$ )	5
Open water efficiency ( $\eta_{op}$ )	0.695

**Tabla 3:** Características de la hélice <sup>[10]</sup>

TERA es utilizado para evaluar el desempeño del sistema propulsor en diversas condiciones atmosféricas. Para esto se define una trayectoria y tres escenarios diferentes:

Escenario 1 (S1): Mar calmo, vientos moderados y casco de la embarcación limpio.

Escenario 2 (S2): Tormenta y casco de la embarcación limpio.

Escenario 3 (S2): Tormenta y casco de la embarcación sucio.

Para simplificar la explicación se omiten los detalles climatológicos de la tormenta.

Las figuras 2 y 3 presentan la velocidad de la embarcación, la potencia desarrollada por el motor, el gasto de combustible y la temperatura de entrada a la turbina obtenidos por medio de las simulaciones TERA.

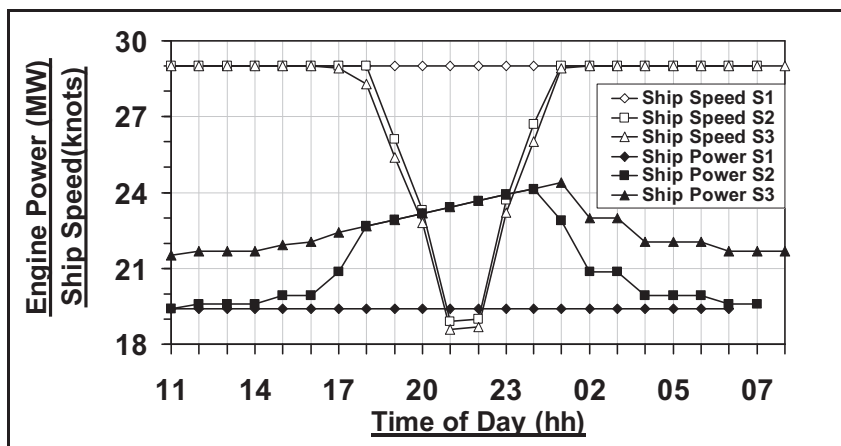


Figura 2: Potencia desarrollada por el motor y velocidad de la embarcación <sup>[10]</sup>

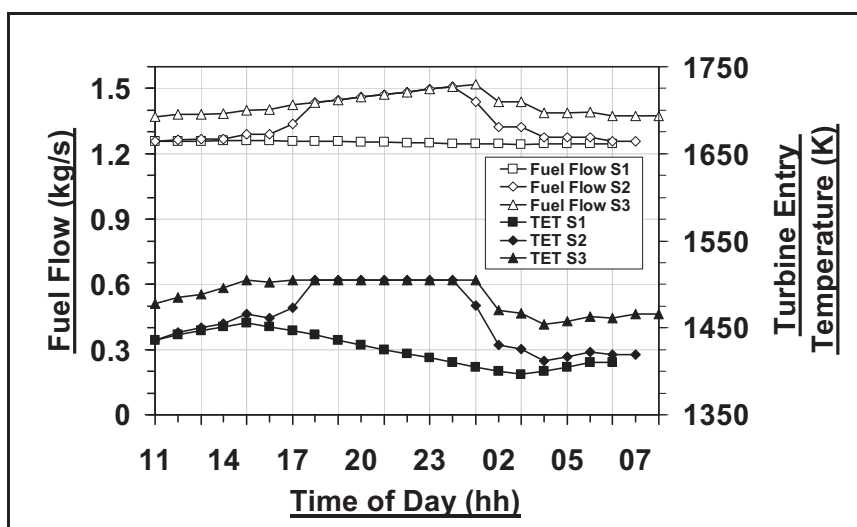


Figura 3: Flujo de combustible en la turbina de gas y TET <sup>[10]</sup>

En la Figura 2 se puede ver como el barco deja el puerto de partida sobre las 11hs y llega a las 7hs. La velocidad en el viaje es constante (29 nudos) así como la potencia entregada por los motores (ligeramente superior a los 19 MW). En la Figura 3 se observa que la temperatura de entrada a la turbina varía a lo largo del viaje así como el flujo de combustible (la variación en este último parámetro es menor y casi imperceptible en la figura). Esto responde a la variación de eficiencia térmica de la turbina debido al cambio en temperatura del aire a lo largo del día en la posición geográfica de la embarcación.

El escenario 2 muestra el caso de una tormenta que comienza justo al dejar puerto y aumenta en intensidad. En la figura 3 se puede ver que desde el principio del viaje los motores deben entregar más potencia para poder mantener una velocidad constante. Sobre las 17hs, la tormenta incrementa en intensidad llevando a la turbina hasta su límite de potencia que está marcado por una temperatura de entrada a la turbina cercana a los 1500K. Desde las 18hs en adelante, se puede observar como el motor trabaja a la máxima temperatura pero la potencia entregada crece a medida que atardece (debido al cambio en la temperatura del aire), sin embargo no es suficiente para mantener la velocidad del barco y ésta baja hasta alcanzar un mínimo cercano a los 19 nudos. Sobre las 22hs la tormenta comienza a decaer y la embarcación recupera velocidad hasta alcanzar nuevamente los 29 nudos. Cuando esta velocidad es alcanzada la potencia del motor disminuye al hacerlo la resistencia del mar, dado que la tormenta baja en intensidad. Finalmente llega a puerto con mar calmo pero con un retraso en tiempo con respecto al escenario 1.

El escenario 3 corresponde a las mismas condiciones de navegación que el escenario 2, pero en este caso el casco del barco está sucio por lo que ofrece una mayor resistencia hidrodinámica. Se puede observar que en todo momento del viaje se requiere una mayor potencia para propulsar el barco a la misma velocidad que en los escenarios anteriores. Cuando se alcanza la máxima potencia el efecto del casco sucio se manifiesta en una velocidad más baja que en el escenario 2 y por lo tanto un mayor tiempo de viaje.

La tabla 4 muestra tiempos de viaje y cantidades de combustibles gastadas en los tres escenarios.

Escenario	Combustible Consumido	Tiempo de navegación
1	93.3 toneladas	20h 41min
2	106.7 toneladas	21h 56min
3	113.3 toneladas	22h 04min

*Tabla 4: Combustible consumido y tiempos de navegación<sup>[10]</sup>*

#### *Análisis económicos y cuantificación de riesgos*

El tipo de información obtenida anteriormente (ciclos de operación, gastos de combustible, tiempos, etc.) puede ser utilizada para realizar diversos análisis económicos. El ejemplo que se presenta a continuación, basado en las Referencias [11 y 12], muestra la evaluación económica y de riesgos de la inversión en una planta de ciclo combinado para la generación de electricidad. La planta de generación analizada era una turbina de gas *heavy duty* de última generación (en el momento del estudio) y su ciclo de vapor asociado.

La Figura 4 muestra el flujo de caja a lo largo del ciclo de vida de una planta de ciclo combinado en cuatro escenarios diferentes. El caso A representa un escenario de referencia y muestra una curva típica de una gran inversión. En los primeros años se puede ver un creciente flujo de caja negativo correspondiente a los gastos iniciales de instalación. Sobre el tercer año se alcanza el mínimo y luego de la entrada en servicio de la unidad, las ventas de energía producen un gradiente positivo. Al sexto año, la inversión llega a su punto de equilibrio y comienza a dar ganancias. A medida que pasan los años, el equipo envejecido da cada vez menos ganancias hasta el punto en el que sale de operación. Las zonas en las que el crecimiento del flujo de caja cambia bruscamente corresponden a operaciones de sustitución de componentes principales, tales como los alabes de turbinas, etc. En estos períodos la planta no produce ingresos y se incurre en elevados costos de sustitución de piezas. Los otros tres escenarios mostrados en la Figura 4 corresponden a:

- Caso B: aumento en el costo de compra de bonos de emisiones gaseosas
- Caso C: aumento en el precio de combustible
- Caso D: aumento en el costo de operación y mantenimiento por factores no contemplados en etapa de proyecto.

Estos tres escenarios muestran como el desempeño de la inversión se degrada cuando las realidades económicas del proyecto varían respecto a lo esperado. Sería posible simular una gran cantidad de situaciones y deducir la sensibilidad de la inversión frente a los factores externos. El módulo económico incluido en TERA también incluye métodos estocásticos (que simula hasta 100.000 posibles escenarios utilizando el método de Montecarlo) en los que se le asigna una distribución de probabilidad a los factores claves como son: el precio de la electricidad y el petróleo, diversos factores que influyen en el costo de operación y mantenimiento, tasa de interés, accidentes, costo de bonos de emisión de carbono, entre otros.

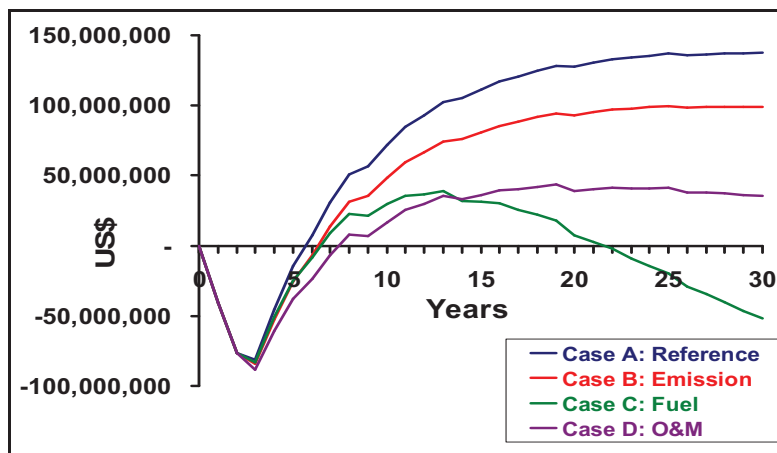


Figura 4: Flujo de caja – Central de ciclo combinado [11] & [12]

La Figura 5 presenta el resultado de un análisis estocástico realizado para esta planta de generación. Se muestra la distribución de probabilidad (Frequency) del Valor Actual Neto (VAN) de la inversión y su probabilidad acumulada. Se puede ver que la probabilidad de alcanzar un VAN de US\$ 600.000.000 es cercana al 30% y que las probabilidades de que el VAN sea positivo son superiores al 80%.

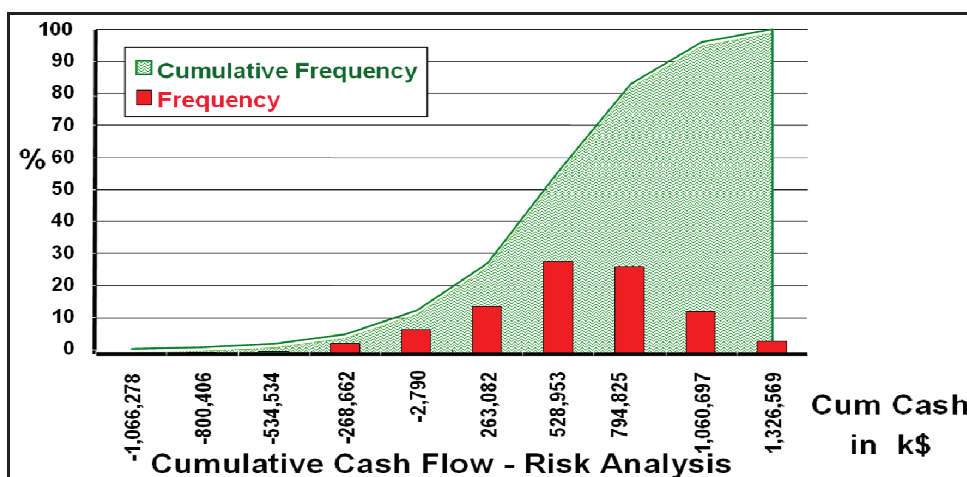


Figura 5: Cuantificación de riesgos – Inversión en Ciclo Combinado [11] & [12]

*Análisis de emisiones e impacto ambiental*

La información producida por los modelos de la planta de potencia y del vehículo, en el caso del transporte, pueden ser también utilizados para predecir sus emisiones e impacto ambiental.

A continuación, se presenta el análisis tomado de las Referencias [13 y 14] que muestra las emisiones de un puente aéreo que une Londres con Tokio. Éste es cubierto por aviones civiles de gran envergadura y su frecuencia es de 10 viajes de ida y vuelta al día. En primera instancia se utiliza el modelo del motor y de la aeronave para calcular la operación del motor en cada momento de la trayectoria. Los resultados son utilizados por el módulo de emisiones que simula la cámara de combustión del motor y calcula las especies químicas emitidas en cada momento del vuelo. Luego, éstos son utilizados por un modelo de la atmósfera, que incluye aspectos meteorológicos, para calcular la concentración de gases emitidos que permanecerá en cada lugar de la atmósfera.



La Figura 6 muestra una posible representación de la información anteriormente obtenida. Ésta, muestra la concentración de NOx que se encontraría en la atmósfera luego de pasado un año del día de los vuelos. A los efectos de simplificar la visualización, en el ejemplo no se tienen en cuenta las interacciones de estas emisiones con las provenientes de otras líneas aéreas ni las producidas en días sucesivos. Todos estos efectos pueden ser considerados en el módulo ambiental. Se puede observar que las zonas de mayor concentración corresponden a los lugares de origen y destino (donde el motor opera a temperaturas más elevadas), desplazados hacia el centro de Rusia por la dinámica propia de la atmósfera.

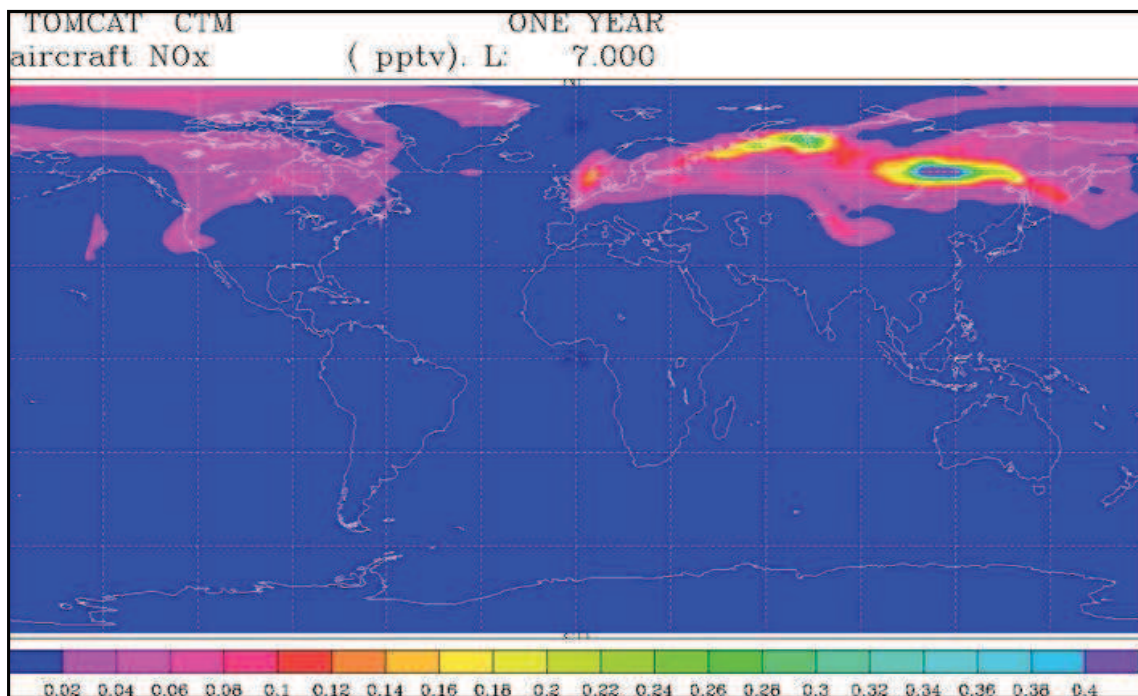


Figura 6: Emisiones de NO<sub>x</sub> (partes por trillón en volumen - pptv) producidas por 10 viajes diarios de ida y vuelta Londres – Tokyo<sup>[13]</sup>

*Optimización y estudios comparativos.*

Una característica esencial de la plataforma TERA es que los módulos están unidos por un optimizador. Éste permite optimizar diseños para lograr los mejores resultados para una aplicación concreta. También permite comparar diferentes tecnologías optimizadas para una aplicación, creando las bases para una comparación justa y realista.

La Figura 7 muestra los resultados de un estudio de optimización y comparación de dos alternativas tecnológicas [15]. En este caso se compara el desempeño de un turbofan convencional (TF) contra un turbofan con intercooler y recuperador (ICR). Esta comparación se realiza para distintos tamaños de aeronaves. ACSF = 1 (*Aircraft Scaling Factor*) corresponde a un avión de largo alcance con peso máximo en despegue de aproximadamente 400 ton. ACSF = 2 corresponde a un avión dos veces menor (200 ton en despegue aproximadamente), siendo ACSF el denominador por el cual el peso del avión de referencia es dividido para obtener el del avión menor. La distancia recorrida en la misión también es reducida proporcionalmente. ΔFWT se define como:

$$\Delta FWT = 100 \left( \frac{\text{CombustibleMisión}_{ICR} - \text{CombustibleMisión}_{TF}}{\text{CombustibleMisión}_{TF}} \right)$$

y representa la diferencia porcentual de gasto de combustible en la misión utilizando un motor ICR con respecto a un TF. Cuando este parámetro es positivo, el motor TF consume menos combustible que el ICR y viceversa.  $K_w$  es un factor tecnológico que representa la máxima temperatura tolerada en la salida de la cámara de combustión. Está directamente relacionado con el diseño de nuevos materiales, tecnologías de fabricación, recubrimientos y refrigeración de alabes.

Ambos motores fueron optimizados para minimizar el consumo de combustible para cada tamaño de aeronave. Se observa que de forma general el motor ICR consume menos que el TF para aeronaves chicas y este análisis permite deducir el punto en el que son iguales para un nivel tecnológico dado. A grandes rasgos, este resultado es debido a que motores pequeños no pueden alcanzar relaciones de compresión muy altas y en estos casos el beneficio del intercooler y recuperador es significativo. En motores de mayor tamaño se pueden alcanzar relaciones de compresión mayores (por lo tanto mayores eficiencias térmicas) y en estos casos el tamaño y complejidad añadida de los intercambiadores representa una penalidad más que una ventaja.

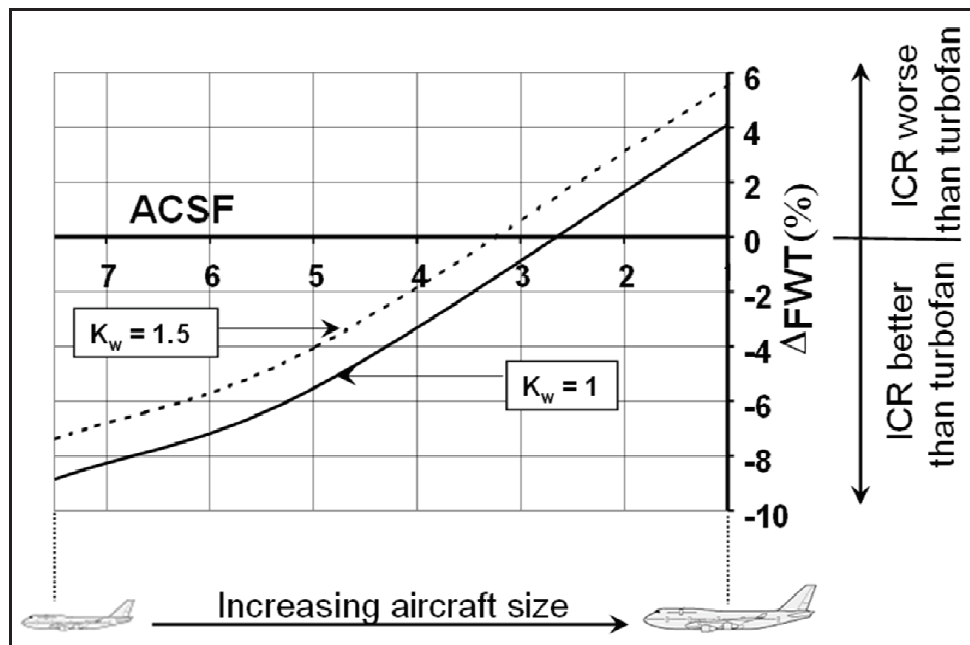


Figura 7: Comparación entre motores ICR y TF para aviación civil <sup>[15]</sup>

## Conclusiones

Este artículo presenta la metodología TERA, para evaluación y optimización de ciclos de potencia innovadores, y cuatro ejemplos de aplicación. Cranfield University trabaja actualmente en plataformas TERA para las siguientes aplicaciones: generación de electricidad, transporte marítimo, transporte aéreo y transporte de fluidos (típicamente petróleo y gases).

La plataforma de simulación TERA consiste en tres niveles de modelos. El primero centrado en modelos de performance de la turbina de gas, equipamiento anexo y performance de vehículos en el caso de sistemas de transporte. El segundo nivel incorpora modelos económicos y de cuantificación de riesgo. El tercero está enfocado a la predicción del impacto ambiental de los ciclos a través de la simulación de las emisiones gaseosas y la atmósfera. Estos modelos están acoplados en una plataforma de simulación que permite optimizar diseños, comparar diseños optimizados para una aplicación deseada y estudiar la sensibilidad de los parámetros económicos y de diseño que afectarán el desempeño de un sistema o proyecto.

Los resultados de un análisis TERA pueden dar un marco de referencia a inversores, investigadores, legisladores y otros agentes para evaluar inversiones necesarias para alcanzar un menor impacto ambiental y un mercado energético y de transporte más eficiente.

### Referencias

- [1] Morquillas J. M. and Pilidis P, "Recycling of Gas Turbines from Obsolete Aircraft", ASME Paper 90-GT-309 Presented in Brussels, Belgium, June 1990.
- [2] Dechamps, P., Croix, P. J., Mathieu, P., Pilidis, P., "Influence of Syngas Properties on Aero-derivative and Industrial Gas Turbine Engines". Presented in ECOS 92, Zaragoza, Spain, June 1992.
- [4] Ulizar, I. and Pilidis, P., "A Semiclosed Cycle Turbine with Carbon Dioxide-Argon As Working Fluid", ASME Paper 96-GT-345, Birmingham, U.K., June, 1996 & Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol 119, July 1997.
- [5] Ulizar, I. and Pilidis, P., "Handling of a Semiclosed Cycle GT With A Carbon Dioxide-Argon Working Fluid", ASME Paper 99-GT-374, Indianapolis, USA, June, 1999 & ASME Journal of Engineering for gas turbines and power, vol.122, no.3, July 2000.
- [6] Sampath, S., Ogaji, S.O.T. and Singh, R. "Improving Power Plant Availability Through Advanced Engine Diagnostic Techniques" Proceedings of the 2002 International Joint Power Generation Conference, June 24-26, 2002, Phoenix, AZ, U.S.A.
- [7] Zwebek, A. and Pilidis, P., "Degradation Effects on CCGT Plant Performance: Part II: Steam Turbine Cycle Component Degradation Effects", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines + Power, Vol. 125, July 2003.
- [8] Gabrielli, R. and Singh, R., "Economic and Scenario Analyses of New Gas Turbine Combined Cycles with no Emissions of Carbon Dioxide", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Vol 127, Issue 3, 2005.
- [9] Singh, R., Pilidis, P., Jackson, A. J. B., Codeceira Neto, A. and Whellens, M. W., "Key components for CO2 Abatement: Gas Turbines", Report to the IEA, October, 1999.
- [10] Pradeep Kumar, K. N., Tourlidakis, A., Pilidis, P. "HTGR Closed Cycle Gas Turbine Plant Analysis: Options & Procedures for startup with Hot Gas Injection" GT -2002-30146, ASME TURBO EXPO 2002: Land, Sea, and Air, June 3-6, 2002 Amsterdam, The Netherlands.
- [10] Tsoudis, E., Pilidis, P. et al, "An Assessment method of Marine Gas Turbine Propulsion Systems", AES Conference, London 2007.
- [11] Gayraud, S., "Technical and Economic Assessments for Industrial Gas Turbines Selection" MSc Thesis, School of Engineering, Cranfield University, 1996.
- [12] Gayraud, S., "Design of a Decision Support System for Combined Cycle Schemes" MPhil Thesis, School of Engineering, Cranfield University, 1998.
- [13] Le Dilosquer, M., Lee, S. H. and Singh, R. "An integrated approach to the Impact of High Altitude NOx Emissions from Subsonic Aircraft on the Atmosphere", 2nd International Symposium on Aeronautical Science and Technology (ISASTI'96), June 24-27, 1996, Jakarta, Indonesia. 2, pp 1317-1327.
- [14] Le Dilosquer, M., "Influence of Subsonic Aero Engine Design and Flight Routes on Atmospheric Pollution", PhD Thesis, School of Engineering, Cranfield University, 1998.
- [15] Whellens, M. W., "Multidisciplinary Optimisation of Aero-engines using Genetic Algorithms and Preliminary Design Tools