

ANEXOS

A la Propuesta de Creación del

INSTITUTO UNIVERSITARIO DE
INVESTIGACIÓN MIXTO “CIRCE” DE LA
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

MEMORIA CIENTÍFICA Y PUBLICACIONES

Entidades Promotoras Solicitantes:

- Universidad de Zaragoza
- Fundación CIRCE – Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos -

Denominación Completa del Instituto:

INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN MIXTO
“CIRCE” DE LA UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

ÍNDICE

A.1	Introducción.....	3
A.2	Memoria Científica Área de Eficiencia Energética	7
	Termoeconomía y diagnóstico termoeconómico en centrales termoeléctricas.	8
	Integración agua-energía	6
	Exergoecología	10
	Evaluación de recursos de biomasa	13
	Línea de técnicas de eliminación de CO ₂	18
A.3	Memoria Científica Área Térmica	20
	Monitorización, simulación y optimización de centrales termoeléctricas.....	24
	Centrales de combustión en lecho fluido a presión.	34
	Combustión y cocombustión de biomasa.	39
	Captura de CO ₂ en centrales térmicas.	44
	Integración de Energías Renovables.....	51
	Sistemas eléctricos de potencia	53
	Análisis Integral de Recursos Energéticos	56
A.4	Plan de Investigación y Ampliación de los Laboratorios del Instituto.....	59
A.5	Patentes y Publicaciones Científicas de Impacto de los Miembros del Instituto.....	85

A.1 INTRODUCCIÓN

El campo de Investigación Científica del Instituto de Investigación Mixto CIRCE es: ***ENERGIA, EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD***

LA ENERGÍA ES LA CLAVE. El nivel de vida actual y nuestras expectativas de crecimiento requieren gran cantidad de energía para calefacción, refrigeración, alumbrado, todo tipo de procesos industriales, usos domésticos, entretenimiento, ... Sin embargo, nuestras fuentes energéticas son limitadas y contaminantes. En efecto, casi un 80 % de la energía mundial proviene de carbón, petróleo y gas natural, que son recursos fósiles finitos. Esto significa que se formaron hace millones de años, que no es posible regenerarlos y que por tanto llegará un día (actualmente no muy lejano) en que se agoten. Por otro lado, el uso de combustibles fósiles supone una agresión al medio ambiente, principalmente a través de la emisión de gases contaminantes. Y aunque los tecnólogos hemos aprendido a suprimir los más perjudiciales (óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre) todavía queda uno que supone un problema mucho más serio y global. Con nuestra ingente actividad energética, los hombres hemos aumentado el contenido de dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera. Este es un gas químicamente inocuo, pero cuyas propiedades físicas hacen que se altere el balance de radiación de la Tierra, se eleve la temperatura y cambie el clima con consecuencias previsiblemente catastróficas, lo que se conoce como “efecto invernadero” o “calentamiento global”.

Por supuesto, los remedios para esta situación no son simples ni bien conocidos, y de hecho escapan del ámbito tecnológico. Pero en cualquier caso, nuestro grupo trabaja desde hace tiempo en varias líneas de investigación relacionadas con los conceptos claves del problema energético.

La “Eficiencia Energética” como eje central del Instituto

Un primer alivio es aumentar el rendimiento de las transformaciones energéticas, con lo que la misma necesidad se satisface con menos energía. En esta área contribuimos en muchos aspectos, principalmente con herramientas novedosas de diagnóstico y optimización energéticas y participando en estudios y en diseño de centrales termoeléctricas avanzadas.

En cumplimiento de sus objetivos el Instituto centrará sus actividades en la eficiencia energética y las energías renovables, eje central hasta la fecha de los Grupos de la Universidad de Zaragoza que promueven el Instituto y de todas las actividades de la Fundación CIRCE.

Las actividades de investigación del Instituto abarcarán 4 ejes principales en el ámbito energético:

- Evaluación de recursos y procesos energéticos
- Instalaciones energéticas y generación de electricidad
- Transporte y distribución de energía
- Uso final de los recursos energéticos.

Evaluación de Recursos y Procesos Energéticos

La experiencia de más de dos décadas de los equipos de investigación involucrados permitirá realizar desde el Instituto proyectos de investigación y desarrollo integrales, desde la evaluación previa de los recursos energéticos hasta la producción y distribución de la energía y su consumo final. En este ámbito las principales líneas de actuación previstas son:

- Análisis de costes energéticos y medioambientales
- Servicio Integral de Energías Renovables
- Evaluación de recursos forestales y agrícolas para usos energéticos
- Evaluación de los recursos exergéticos a escala global

Instalaciones Energéticas y Generación de Electricidad

El Instituto podrá contar con amplia experiencia en tecnologías de generación de energía, incluyendo instalaciones termoeléctricas de combustible fósil, uso de la biomasa a gran y pequeña escala, generadores eólicos y otras fuentes energéticas renovables.

Las actividades de investigación del Instituto en este ámbito estarán orientadas al diagnóstico de instalaciones y al diseño e integración de nuevos equipos y procedimientos, siempre bajo la doble perspectiva de mejorar la eficiencia energética y disminuir el impacto medioambiental. Los investigadores promotores del Instituto han participado activamente en el desarrollo de los últimos conceptos en este sector: centrales térmicas avanzadas

(PFBC, IGCC), cocombustión con biomasa, oxicomcombustión, ciclos combinados, control e integración de la generación eólica, integración de varias fuentes de energías renovables, etc... Las principales actividades en materia de generación son:

- Monitorización y simulación de calderas de potencia y equipos de intercambio
- Diagnóstico, simulación y optimización de ciclos combinados y turbinas de gas
- Combustión y cocombustión de biomasa
- Oxicomcombustión y otras técnicas de captura de CO₂.
- Desalación y reutilización de aguas combinada con producción de electricidad y poli-generación
- Sistemas de información para plantas de potencia
- Generación eólica
- Integración y optimización de energías renovables
- Vectores energéticos alternativos: hidrógeno y pilas de combustible
- Sistemas de generación distribuida activa.

Transporte y Distribución de Energía

La investigación del Instituto en este terreno es eminentemente aplicada. Entre los distintos servicios de desarrollo e innovación del instituto caben destacar:

- Actualización tecnológica de subestaciones eléctricas. Diseño de las instalaciones de telemando y telecontrol
- Estudio del impacto de la conexión a la red eléctrica de las energías renovables
- Análisis de la integración de las energías renovables para la mejora de aleatoriedad en la producción eléctrica y el impacto en red
- Ingeniería de sistemas eléctricos de generación, transporte, distribución y uso de la energía eléctrica.
- Sistemas Eléctricos de Potencia
- Microrredes de integración de recursos energéticos.

Uso Final de los Recursos Energéticos

El Instituto tiene como objetivo fomentar activamente el uso racional de la energía, promoviendo entre los usuarios finales el ahorro de la misma y la utilización de sistemas y

procesos eficientes, así como la máxima explotación de las energías renovables. Las actividades se centran en:

- Análisis, desarrollo y diseño de tecnologías de aprovechamiento energético eficiente y de fuentes renovables.

- Asesoramiento a PYMES y sector residencial sobre el uso de la biomasa a pequeña escala.

- Desarrollo y aplicación de tecnologías de eficiencia energética en sistemas eléctricos y térmicos.

- Realización de estudios de mejora de la eficiencia energética.

- Uso racional de la energía en edificios.

- evaluación de los recursos energéticos racionales y globales: agua, energía y combustibles fósiles y minerales.

Las tres Áreas de I+D+i del Instituto se presentan más en detalle en las páginas siguientes.

A.2 MEMORIA CIENTÍFICA ÁREA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

El tipo de investigación del Área de eficiencia energética (AEE de aquí en adelante) del Instituto CIRCE es la aplicación, generalmente dentro del marco de la generación eléctrica industrial, de una investigación básica generada propiamente dentro del Área, con el objetivo final de aportar luces al dilema energético y medioambiental asociado a él que se avecina en este siglo XXI. El AEE, debido a su evolución natural, trata varias ramas dentro de la línea básica presentada anteriormente, como son la Termoeconomía/ diagnóstico termoeconómico, la integración agua-energía, el uso de la biomasa, desde el punto de vista de la evaluación de recursos potenciales, y las técnicas de reducción de CO₂. Estas dos ramas últimas se elaboran en íntima colaboración con el área térmica del Instituto CIRCE.

El AEE está constituida en la actualidad por un equipo de 16 personas: un catedrático (Antonio Valero), un profesor contratado doctor (Javier Uche), un profesor ayudante (Sergio Usón), 6 investigadores contratados (Fernando Sebastián, Alicia Valero, Jesús Escosa, Gema Raluy, Luis Manuel Blasco y Bernardo Llamas), 1 becario FPU del Ministerio de Educación y Ciencia y 6 becarios de iniciación a la investigación. Dos de los investigadores contratados son además profesores asociados a tiempo parcial en la Universidad de Zaragoza, en el Departamento de Ingeniería Mecánica.

Desde 1993, fecha del inicio en las actividades de la Fundación CIRCE, y bajo el nombre de Área Termoeconómica, se han desarrollado una gran cantidad de proyectos de I+D+I de convocatoria pública competitiva, incluyendo los Programas Marco de la UE y el Programa Nacional de I + D + I. Pero quizás las colaboraciones con empresas privadas bajo convenios de colaboración o contratos privados en proyectos de I + D ha sido superiores en número y participación activa del equipo que los proyectos subvencionados. No obstante, esto último no ha sido óbice ni mucho menos para que el AEE no haya tenido una elevadísima productividad científica en términos de tesis doctorales defendidas, artículos científicos en revistas de alto índice de impacto científico y en actas de congresos y otras reuniones internacionales de prestigio.

A continuación, se repasará de forma breve pero concisa las actividades, hitos y perspectivas concretas en cada una de las grandes ramas descritas anteriormente. Se describirán los proyectos y contratos obtenidos, publicaciones más importantes y tesis doctorales diri-

gidas, desde una evolución cronológica que permita de alguna forma justificar la evolución de dichas actividades con la realidad tecnológica, empresarial e incluso política de cada momento histórico.

La enumeración de proyectos, publicaciones y tesis doctorales dirigidas permite apreciar que la primera línea (Termoeconomía/diagnóstico termoeconómico) es la más desarrollada y aplicada, con más de 20 años de desarrollo teórico y aplicación ingenieril, mientras que la segunda y la tercera (integración agua-energía y evaluación recursos biomasa) son líneas ya consolidadas pero no tanto como la primera, con unos 10 años de desarrollo y aplicaciones prácticas, y finalmente la cuarta (tecnologías de reducción de CO₂) es muy emergente en términos del reto tecnológico e industrial clave para esta década, pero es tratada sólo parcialmente en el AEE, por las razones mencionadas anteriormente.

Todas las ramas tienen una aplicación específica en centrales termoeléctricas (con la pequeña excepción de la segunda línea que también incluye las centrales de producción de agua por desalación y reutilización), donde se han implementado numerosos programas de monitorización, simulación, mejora y optimización energética. La primera línea es quizás la de continuidad más dificultosa, debido a la estructura del mercado eléctrico “cliente” y por consiguiente la previsible falta de financiación prevista en un futuro próximo, pero ha sido sin duda la mayor fuente de éxitos científicos y tecnológicos obtenidos. La segunda línea abierta en los últimos diez años es el diseño de sistemas integrados en el binomio agua-energía, factor clave en el desarrollo sostenible del siglo XXI, con financiación de proyectos públicos, publicaciones y tesis realizadas, prácticamente en el mismo estado del arte de la línea de evaluación de recursos biomásicos. Por último, el AEE ha comenzado recientemente a investigar diversos aspectos relacionados con la reducción del CO₂ generado en la combustión de plantas térmicas; hasta la fecha, las actividades se han limitado a tareas de divulgación y coordinación en proyectos globales.

Termoeconomía y diagnóstico termoeconómico en centrales termoeléctricas.

El equipo investigador del AEE del Instituto CIRCE, dirigido por el catedrático del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Zaragoza y Director de la Fundación CIRCE D. Antonio Valero, lidera la corriente de pensamiento denominada “Termoeconomía”, en la cual conceptos de Termodinámica Fundamental y de Economía Aplicada se funden en una nueva disciplina encaminada hacia la optimización de los procesos industriales. En ella, la confrontación de la Termodinámica (en particular el Segundo

Principio) con la Economía sirvieron primero para crear la base teórica de la Termoeconomía y la elegir la exergía en particular como la propiedad que se convierte en la correa de transmisión dentro de ese proceso de búsqueda de la eficiencia energética y la reducción de recursos naturales necesarios para producir bienes y servicios.

La base teórica desarrollada ha generado una gran productividad científica, tal y como es lógico en una nueva disciplina creada en el grupo, con 19 tesis doctorales y más de 100 publicaciones científicas en revistas y congresos, amén de premios internacionales (3 premios Eduard F. Obert otorgados por la American Society of Mechanical Engineering - ASME-). El desarrollo básico de la misma se centró principalmente en los años 80 y principios de los 90, aunque el desarrollo de nuevos aspectos y mejoras ha sido continuo hasta la actualidad.

Sin embargo, el mejor valedor de la Termoeconomía y el Análisis Termoeconómico es su aplicación directa y en forma más exhaustiva en sistemas convencionales de producción de energía. La metodología es válida para sistemas muy complejos, como ha quedado claramente demostrado con la instalación y puesta en marcha de un sistema de diagnóstico termoeconómico en tiempo real en dos instalaciones completamente diferentes pero representativas:

- la Central de Gasificación Integrada con Ciclo Combinado de Puertollano (ELGOGÁS, 330 MWe), que puede considerarse como la unidad de generación eléctrica más compleja en el mundo por su diseño y forma de operación (no en vano es considerada una central de régimen experimental en su explotación), y
- la Central Térmica Teruel de carbón pulverizado (ENDESA, 1.050 MWe), el prototipo de una central térmica convencional de quema de carbón nacional de finales de los años 70, similar a muchos otros grupos generadores instalados en España y Europa en la época y operativos en la actualidad, a pesar de su creciente oposición por su alto contenido de emisiones.

La optimización del funcionamiento de una central termoeléctrica tiene dos vertientes: la medioambiental, con la maximización de la eficiencia que conlleva las mínimas emisiones de CO₂, y la económica, para la minimización del coste del kWh generado. Ambos objetivos, perfectamente conciliables, requieren recuperar la información relevante del proceso, procesarla con las técnicas y modelos adecuados, y difundir cada resultado a los

agentes con capacidad de decisión en cada escala temporal: operación (corto plazo), explotación (medio plazo) y mantenimiento (largo plazo). Garantizar la fiabilidad de dicha información y ergonomía en el manejo son claves en el éxito de las herramientas propuestas. Para lograr estos objetivos, la aplicación de la Termoeconomía con el apoyo de técnicas de monitorización (de la que se hablará en lo sucesivo como monitorización) y diagnóstico de la operación han demostrado su capacidad a lo largo de estos años.

Mediante la monitorización se pretende proporcionar parámetros a los operadores de planta para que puedan identificar desviaciones en el proceso de forma casi instantánea; y también elaborar informes sobre la actividad de los equipos y sistemas dentro de un espacio temporal de mayor amplitud, que den indicaciones para la toma de decisiones más estratégicas. La monitorización señala desviaciones bruscas de la eficiencia, el paso siguiente es cuantificarlas y resaltarlas de una forma automática. Para ello se emplearán técnicas de diagnóstico termoeconómico. Del mismo modo que la monitorización, el diagnóstico se realiza en Tiempo Real con la pretensión de dar recomendaciones específicas sobre la operación; así como mediante informes estrictos sobre un periodo de tiempo mayor que sirvan como base a la toma de decisiones de mantenimiento, modificaciones de equipos o incluso sustitución de los mismos.

El tercer pilar de este desarrollo es la integración de todo ello dentro del sistema de información de la planta y el tratamiento de esta cantidad ingente de información. El principio a obedecer es que los datos deben ponerse en las manos de las personas que puedan actuar sobre ellos. Teniendo en cuenta esta premisa, se puede por ejemplo distribuir la información a través de la Intranet corporativa correspondiente, utilizando la tecnología Web y el protocolo HTTP, esto se corresponde con la tendencia actual en las grandes empresas y supone un ahorro en los costes de difusión de la información y la capacidad de dar a cada persona los datos que necesita.

Cambiando de tercio pero no de línea básica de investigación, de forma natural la aplicación del análisis termoeconómico a la valoración de recursos naturales era casi inmediata. Así, en el año 1998, Valero propone el término Exergoecología, como la aplicación del análisis exergético (a través de la Segunda Ley de la Termodinámica) en la evaluación de los flujos y recursos naturales en la Tierra. El consumo de recursos naturales implica la destrucción de sistemas organizados y su dispersión, lo que es en realidad generación de entropía (o destrucción de exergía). Por ello el análisis exergético describe perfectamente el consumo y agotamiento del capital natural. Naredo y Valero (1999) plantean las bases

para una teoría general del coste físico de los procesos económicos, así como el desarrollo de la teoría del coste exergético y el cálculo del "*coste exergético de reposición de los recursos minerales*".

Dichas bases dieron origen a dos tesis doctorales y a dos tesis doctorales más en marcha para, como afirma Naredo (1999), paliar un poco el vacío existente en la valoración objetiva del capital natural. En esta línea, la aplicación ingenieril es algo más compleja y está más centrada en la investigación básica, pero como podremos ver en la segunda línea de investigación del AEE, es posible encontrarle una aplicabilidad práctica útil para la Administración competente en materia de aguas, uno de los recursos naturales de mayor escasez y deterioro previstos en el siglo XXI.

Esta línea de investigación es lo suficientemente importante y productiva para realizar un breve pero pormenorizado listado de creaciones intelectuales y proyectos de investigación aplicada desarrollados desde hace ya casi 20 años, que puede considerarse el inicio de la actividad en esta línea.

Los inicios de esta disciplina pueden situarse en el año 1986, cuando a partir del análisis exergético se definen el coste exergético, el coste termoeconómico y la Termoeconomía¹. En dicha época, se defendieron 4 tesis doctorales que desarrollaban diversos aspectos relativos al análisis exergético aplicado a instalaciones industriales, así como los primeros desarrollos teóricos aplicados de la Termoeconomía². En cuanto a la participación en proyectos de investigación, los primeros frutos llegaron con colaboraciones con otras Universidades³ y los primeros trabajos con la C. T. Teruel (Andorra, ENDESA), que había sido hasta ahora el vivero de ingenieros industriales térmicos que salían de la Universidad de Zaragoza⁴.

¹ A. Valero, M.A. Lozano, M. Muñoz. A general theory of exergy saving: I. On the exergetic cost. AES Vol. 2-3, ASME Book H0341C, pp.1-8 (1986).

A. Valero, M.A. Lozano, M. Muñoz. A general theory of exergy saving: II. On the thermoeconomic cost. AES Vol. 2-3, ASME Book H0341C, pp.9-16 (1986).

A. Valero, M.A. Lozano, M. Muñoz. A general theory of exergy saving: III. Energy saving and Thermoeconomis. AES Vol. 2-3, ASME Book H0341C, pp.17-22 (1986).

² Lozano, M.A. (1987) METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS EXERGÉTICO DE CALDERAS DE VAPOR EN CENTRALES TÉRMICAS.

Muñoz, M. (1987) BASES TERMOECONÓMICAS PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS TÉRMICOS.

Guallar, J. (1987) ANÁLISIS EXERGÉTICO E INTEGRACIÓN TÉRMICA DE PROCESOS EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

Alconchel, J. A. (1988) MODELIZACIÓN EXERGÉTICA DE CICLOS DE VAPOR EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

³ Análisis exergoeconómico de la industria láctea Central Lechera Asturiana (1988-1989). Consejería de Industria Comercio y Turismo del Principado de Asturias

⁴ Estudio sobre metodología y sistema para la optimización del consumo de auxiliares en centrales térmicas (1989-1993). OCIDE, ENDESA

La evolución de la Termoeconomía siguió con el desarrollo de su formulación matemática simbólica, plasmada principalmente en la tesis doctoral de César Torres⁵, y del desarrollo matemático de la misma a través de la Teoría del Coste Exergético⁶, presentada en un artículo que puede clasificarse como incunable, y la Teoría Estructural⁷, que permite una formulación matemática general que incorpora un modelo lineal que acompaña las metodologías termoeconómicas aplicadas en el grupo de trabajo del profesor Valero. Hay que recordar que desgraciadamente la nomenclatura es uno de los hándicaps que tienen las diversas formulaciones de la Termoeconomía lideradas por otros grupos de investigación (podemos reseñar por ejemplo los grupos de los profesores Frangopoulos, Von Spakowsky, Tsatsaronis, Sciuba en sus respectivas universidades). En esta época, este importante paso en el desarrollo conceptual de la Termoeconomía permitió la defensa de otras 2 tesis doctorales en aspectos particulares de la misma⁸. En este período (1990-1993), la interacción con las empresas de generación eléctrica (ENDESA y ELCOGÁS) que luego permitirán la implantación real del diagnóstico termoeconómico desarrollado teóricamente en este período de tiempo, se plasmó poco a poco en dos proyectos de investigación de índole pública y privada respectivamente⁹.

A partir del año 1995, y con la base teórica desarrollada y probada suficientemente, comenzó el período de la aplicación práctica de la metodología propuesta en el ámbito científico. El proyecto “estrella” que permitió la implantación de todos los desarrollos teóricos es el del diagnóstico termoeconómico en tiempo real de la central térmica de gasificación integrada y ciclo combinado (GICC) de Puertollano (ELCOGÁS, S. A.), que dada su magnitud y empaque ha contado con la necesidad de varios proyectos de investigación ejecutados¹⁰, y consecuentemente varias formas de financiación (europea y privada). En la C. T. Teruel, a pesar de su sistema de adquisición y almacenamiento de datos mucho más arcaico desde el punto de vista tecnológico, se pusieron las bases también para la implanta-

⁵ Torres, C. (1991) EXERGOECONOMÍA SIMBÓLICA. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS TERMEOCONÓMICO DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS.

⁶ M.A. Lozano, A. Valero. (1993) Theory of exergetic cost. Energy, The International Journal 18, No. 9, pp. 939-960.

⁷ A. Valero, L. Serra, M.A. Lozano (1993) Structural Theory of Thermoeconomics. ASME Book no. H00874, pp. 189-198.

⁸ Royo, J. (1994). LAS ECUACIONES CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS TÉRMICOS. LA ENERGÍA LIBRE RELATIVA

Serra, L. (1994) OPTIMIZACIÓN EXERGOECONÓMICA DE SISTEMAS TÉRMICOS

⁹ Proyecto DECADES (1993-1994). OCICARBON, Agencia Internacional de la Energía Atómica.

Soporte Informático de Simulación para Plantas GICC (1993-1994). ELCOGAS S.A.

¹⁰ Diagnóstico Termoeconómico GICC Puertollano (1995-1999). Programa Thermie/Elcogas, S.A.

Diagnóstico Termoeconómico de la planta GICC de Puertollano. Fase I (1995-1997). ELCOGAS SA.

Diagnóstico Termoeconómico de la planta GICC de Puertollano. Fase II (1997-1998). ELCOGAS SA.

Diagnóstico Termoeconómico de la planta GICC de Puertollano. Fase III (1998-1999). ELCOGAS SA.

ción del sistema de diagnóstico termoeconómico con una colaboración plurianual y varios proyectos de investigación privados, que incluyeron la estancia en planta de varios ingenieros investigadores de la Fundación CIRCE en la Central Térmica¹¹. En el ámbito científico, esta época tan productiva desde el punto de vista “ingenieril” también generó nuevo conocimiento, plasmado en 2 tesis doctorales¹², la primera de ellas relacionada con todo el background obtenido en el sistema implantado en Puertollano, y la segunda relacionada con el diagnóstico específico de las turbinas de vapor en centrales convencionales. Se editaron también varios artículos científicos en revistas JCR con varias aplicaciones nuevas de la Termoeconomía como la optimización global basada en la optimización local de los componentes de planta¹³, y la utilización del diagnóstico termoeconómico con la ayuda de la representación matricial y desglosando las causas y efectos a nivel desagregado, que permita analizar y centrarse así en la mejora de los equipos que realmente están provocando las mayores ineficiencias en planta, y por tanto el consumo adicional de energía primaria¹⁴.

Con respecto a la Exergo-ecología (definida así en el año 1998 por Antonio Valero), o aplicación de la Termoeconomía a la contabilidad de los recursos naturales, ha sido una línea de investigación “en paralelo” a la línea de aplicación industrial expuesta hasta ahora. Lógicamente, esta línea de investigación básica no ha contado de una financiación estable, aunque ha contado con apoyos económicos parciales para el desarrollo de la investigación¹⁵. Como resultado principal podemos resaltar de nuevo 2 tesis doctorales, la primera más enfocada hacia la definición de un ambiente de referencia adecuado y representativo para la contabilización exergética de los recursos naturales¹⁶, y la segunda enfocada a la contabilización de tres recursos que constituyen el capital natural de la Tierra: el agua, los

¹¹ Gestión de Datos. Asistencia y Apoyo Técnico en la Gestión de Datos de Explotación y Medio Ambiente en la C.T. Teruel (1995-1998). ENDESA (C.T. Teruel).

Árboles Lógicos. Instalación y Puesta en Marcha del Sistema de Diagnóstico en Tiempo Real C.T. Teruel (1997). ENDESA. Rendimiento de la Central Térmica Teruel operando con unidades de desulfuración (1998-1999). ENDESA.

¹² Pisa, J. (1996). ANÁLISIS TERMOECONÓMICO APLICADO AL DISEÑO DE PLANTAS IGCC.

Zaleta, A. (1997) CONCEPTOS SOBRE EL DIAGNÓSTICO Y LA EVALUACIÓN TERMOECONÓMICA DE TURBINAS DE VAPOR.

¹³ M. A. Lozano, A. Valero, L. Serra (1996) Local optimization of energy Systems. AES Vol. 36, ASME Book no. G0122, pp. 241-250

Torres, C., Serra, L., Valero, A., Lozano, M.A. (1996) The productive structure and thermoeconomic theories of system optimization. AES-Vol. 3, pp.42-436

¹⁴ Torres, C.; Valero, A.; Serra, L.; Royo, J. (1999) Structural Theory and Thermoeconomic Diagnosis. Part I: On Malfunction and Dysfunction Analysis. Proceedings of ECOS'99, Volumen I, pp.368-373.

Lerch, F.; Royo, J.; Serra, L. (1999) Structural Theory and Thermoeconomic Diagnosis. Part II: Application to an Actual Power Plant Proceedings of ECOS'99, pp. 374-379.

Valero, A.; Torres, C.; Lerch, F. (1999) Structural Theory and Thermoeconomic Diagnosis. Part III: Intrinsic and Induced Malfunctions. Proceedings of ECOS'99, Volumen I, pp.35-41.

¹⁵ COSTURBIS. Trabajos de Investigación con la Fundación Argentaria dentro del Marco del Programa Economía y Naturaleza. (1996-1997). Fundación Argentaria.

¹⁶ Ranz, L. (1999) ANÁLISIS DE LOS COSTES EXERGÉTICOS DE LA RIQUEZA MINERAL TERRESTRE. SU APLICACIÓN PARA LA GESTIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD.

combustibles fósiles y los recursos minerales¹⁷. En el apartado de artículos y comunicaciones a Congresos, esta línea también ha sido productiva, destacando sobre todo la aplicación al recurso natural “agua”¹⁸, pero en definitiva han sido en muchos casos artículos enfocados a la concienciación social, comprobando en ellos que el ritmo actual de consumo de los recursos naturales es tan elevado que predice escenarios futuros tan pesimistas como los más recientes informes sobre el cambio climático y sus implicaciones económicas y sociales, y por tanto dicha metodología puede aplicarse para evaluar y tratar en lo posible de frenar los actuales patrones de consumo de recursos naturales.

Unos años más tarde, después de la implantación del sistema de diagnóstico termoeconómico (SDG) en Puertollano y la central IGCC de ELCOGÁS, las posibilidades y mejoras a introducir, en algunos casos derivados de las mejoras tecnológicas e informáticas (plataformas web principalmente), permitió la continuación de la línea de trabajo con ELCOGÁS, a través de varios contratos de investigación, privados la mayoría de ellos, y en algunos casos con financiación estatal, que perdura hasta la actualidad¹⁹. Por otra parte, y con la experiencia adquirida, llegó la hora de la implantación en la Central Térmica “nodriza” del grupo de investigación, la C. T. Teruel, con ya ostensibles mejoras en su instrumentación y sistema de adquisición y control de datos a partir de los últimos años. El proyecto en conjunto se llevó a cabo a través de un proyecto principal²⁰ y varios proyectos de mantenimiento y actualización informática de la instalación²¹, teniendo en cuenta además la especial idiosincrasia de ENDESA en cuanto a su plataforma informática que impide ciertos desarrollos individualizados en sus centrales térmicas para su control y estrategia interna de mejora.

¹⁷ Botero, E. (2000). VALORACIÓN EXERGÉTICA DE RECURSOS NATURALES, MINERALES, AGUA Y COMBUSTIBLES FÓSILES.

¹⁸ Zaleta, A., Ranz, L., Valero, A. (1998) Towards a unified measure of renewable resources availability: The exergy method applied to the water of a river. *Energy Conversion and Management* Vol. 39, No. 16-18, pp. 1911-1917.

Valero, A., Botero E., and Serra L. (2002) The World's Renewable Water Resources and Ice Sheets. Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Vol 1, pp. 158-164. Aceptado para *ENERGY International review*. Duvronik, Croatia.

¹⁹ Suministro, instalación y configuración de un servidor Intranet en la Planta IGCC de Puertollano de Elcogás, S.A. (2001) ELCOGAS, S.A.

Servicio Integral de Valorización de Datos Planta. ELCOGAS, S.A. (2001). ELCOGÁS, S.A.

LIMON – Desarrollo del sistema de monitorización de planta (2002). ELCOGAS, S.A.

MONEFE - Monitorización y Optimización de la eficiencia de equipos principales. (2004-2006) Ministerio de Educación y Ciencia, programa PROFIT (Fomento de investigación Técnica). ELCOGÁS, S.A. CIRCE

²⁰ Adaptación del sistema de adquisición de datos de la C. T. Teruel de ENDESA e implantación del sistema de diagnóstico termoeconómico (SDG) (2002-2004). ENDESA, C. T. Teruel.

²¹ Ampliación de los trabajos del Sistema SDG (2004-2005). ENDESA, C. T. Teruel..

Actualización de las aplicaciones de la U. P. T Teruel que acceden a FIX. (2005-2006). ENDESA, C. T. Teruel.

Con respecto al desarrollo intelectual en estos últimos años se ha centrado sobre todo en relación a aspectos mejorables del diagnóstico termoeconómico, podemos destacar la tesis doctoral²² de Vittorio Verda, la primera en cotutela con el Politécnico de Turín, que estudia en el efecto de las consignas (*set points*) en el diagnóstico de las unidades de generación eléctrica, o bien un nuevo método de diagnóstico basado en la modelización "sencilla" de un sistema complejo (como la IGCC de Puertollano) y el estudio de las desviaciones de los parámetros más significativos de cada equipo y sus efectos sobre el resto que dio pie a tesis doctoral de Luis Correas²³. También es destacable el énfasis en el diagnóstico específico de la caldera de una central de carbón pulverizado, con datos reales de planta y la creación del módulo de diagnóstico implantado en la central con el proyecto SDG Teruel (ver nota 20), que permitió la defensa de la tesis doctoral de Víctor Rangel²⁴, y la realización presente de la tesis doctoral, a punto de ser defendida, de Sergio Usón²⁵, enfocada al diagnóstico local de malfunciones en los equipos de una central térmica a partir de la ingente cantidad de datos históricos de control de la C. T. Teruel. Todas ellas han dado también frutos en el sentido de obtener publicaciones de gran mérito, pero que no incluimos para no alargar innecesariamente la lista de referencias y por otra parte no desmerecer unos de otros trabajos si se incluyeran referencias de solo algunos trabajos.

Una forma quizás más objetiva de vislumbrar e importante papel que representa la Escuela de Zaragoza de Termoeconomía dentro de CIRCE es presentar el extracto del artículo "*A brief commented history of exergy from the beginning to 2004*" submitted to the Intl. Jnl. of Thermodynamics, Octubre 2006, de E. Sciubba y G. Wall, quienes en el apartado 7 de termoeconomía escriben:

A brief commented history of exergy From the beginnings to 2004

²² Verda, V. (2001) THERMOECONOMIC DIAGNOSIS OF AN URBAN DISTRICT HEATING SYSTEM BASED ON COGENSATIVE STEAM AND GAS TURBINES.

²³ Correas, L. (2001). DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO DE LA OPERACIÓN DE UN CICLO COMBINADO.

²⁴ Rangel, V. (2005). DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO DE CALDERAS INDUSTRIALES: REPRESENTACIÓN MICROSCÓPICA DE LA TEORÍA DEL COSTE EXERGÉTICO.

²⁵ Usón, S. (prevista en 2007). ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO CAUSAL DE MALFUNCIONES EN UN CICLO DE POTENCIA.

Enrico Sciubba[⊗]

Dept. of Mechanical &
Aeronautical Engineering
University of Roma 1 “La
Sapienza”
Roma, Italy

enrico.sciubba@uniroma1.it

Göran Wall

Independent Researcher

Exergy-SE,

Mölndal, Sweden

gw@exergy.se

Abstract

This paper presents a brief critical and analytical account of the development of the concept of exergy and of its applications. It is based on a careful and extended (in time) consultation of a very large body of published references taken from archival journals, textbooks and other monographic works, conference proceedings, technical reports and lecture series. Our comments try to identify the common thread that runs through all of the references, to put different issues into perspective, to clear dubious points, to suggest logical and scientific connections and priorities. It was impossible to eliminate our respective biases that still affect the “style” of the present paper:

7 – Thermo-Economics

The idea of linking Thermodynamics and costing considerations was explored first by Lotka (1921) and Gilbert (1956): the clear concept that emerged from their very general papers was that entropic considerations ought to be somehow accounted for in monetary cost calculations. Beckmann (1953), Henatsch (1957) and Szargut (1957) explicitly addressed the problem of the correct cost allocation between co-generated products (steam and power).

It was at the beginning of the 60'es that, almost simultaneously and by independent investigators, the joint application of exergy analysis and engineering economics was proposed, under the name of *Exergo-Economics* (in Europe, Baehr et al. 1965, Bergmann & Schmidt 1967, Brodyanski 1965, Fratscher 1965, Elsner 1965, Nitsch 1965, Rabek 1964, Szargut & Petela 1964) and *Thermo-Economics* (in the US, El-Sayed 1970, Evans 1961, Evans & Tribus 1965, Tribus 1961, Tribus & Evans 1962). The basic idea of this method is to apply the usual procedures of Engineering Accounting, linking the prices of components to their operating parameters and to their exergetic efficiency, and pricing not the unit mass, but the specific exergy content of a stream (material or energy). The exergy of the outputs is a process-dependent function of the exergy of the inputs:

$$E_o = \Pi(E_i) \quad (8)$$

Where the matrix Π is called the *transfer function* of the process, and depends on the process configuration, i.e., on the connectivity of the system. Π is easily obtained by properly assembling the exergy “balances” (including the exergy destructions) of the individual components (Sciubba 1995c).

If we attribute a monetary cost to the exergetic inputs, this cost will be incrementally increased in the various steps of the process, due to the hardware and operating costs that “add to the value” of the successive production steps. Since in general the production chain is not strictly linear, some outputs from a certain component may be split and constitute the inputs for two or more of the remaining components; conversely, two or more outputs may constitute the input to a different component. Therefore, to compute the cost of the final outputs (the product streams) we need to properly allocate the hardware costs (capital & maintenance, for instance) among the various outputs of each component: this can be done mathematically (as shown by Valero et al. 1986) by augmenting the matrix Π with a proper set of auxiliary “cost allocation equations”. The result is again a matricial function in the form

$$C_o = B(E_i, C_i) \quad (9)$$

Since both E_i and C_i are in turn functions of thermodynamic parameters x_j , material properties π_k , hardware design variables d_i and allocation criteria a_m (where each suffix varies in its proper range), the cost function C_o can be rewritten formally as

$$C_o = \Phi(x_j, \pi_k, d_i, a_m) \quad (10)$$

Notice that Thermo-Economics can be used in two different ways:

[⊗] Corresponding author: enrico.sciubba@uniroma1.it

a) for a given configuration, one can use eqtn. 10 to find the specific cost $c_{O,n}$ (€/J) of the unit of exergy of each product. The extensive cost $C_{O,n}$ (€/kg, €/J, €/unit) is then found by multiplying $c_{O,n}$ by the proper flux of that product (kg/s, J/s, units/s). This is the original Tribus formulation, and constitutes a noticeable improvement with respect to the usual engineering accounting methods, that do not take into account the exergy destructions in each component. The method is especially useful when more than one product is co-generated by the same production line;

b) if the configuration can be changed (by inserting additional components, eliminating others or simply varying the connectivity of the process), or if some of the process parameters or design variables can be changed, one can find the “optimal” design point by means of a constrained optimization procedure, in which the “fixed” arguments in eqtn. 10 act as constraints, and the parameters that can vary are the independent variables of the optimization. Lagrange multipliers were used by the first Authors (see for instance Evans 1988, Gaggioli et al. 1988, Kotas 1985): the multipliers turn out to be the marginal costs of the respective products. Later, more general, powerful and effective multi-variable optimization techniques have been applied (Fietzel et al. 1985, Frangopoulos 1992, Sorin et al. 1992, Uche et al. 2003).

The word Thermo-Economics (TE) was first used by Myron Tribus in his MIT lectures, and the original developments are due mainly to El-Sayed & Evans, and independently to Elsner & Fratscher. A substantial contribution was provided by Gaggioli, Reistad and Wepfer in the US, who had to struggle at the time to find access to archival energy journals for TE-related topics.

A more modern approach, based on an elegant and very general matricial notation, was developed only much later, by (Valero et al. 1986 a,b,c; Valero et al. 1992 a,b,c), and goes under the name of Structural Thermo-Economics. It is based on the construction of an “exergetic cost matrix” assembled on the basis of the process connectivity and of the rules of exergy costing (basically: the exergy “embodied” in the output is the sum of the exergetic inputs less the exergy destruction in the component), and is formally entirely equivalent to eqtn. 9 above.

A formally slightly different method was proposed by Szargut (1971, 1986), Tsatsaronis (1990), Tsatsaronis & Krane (1992), but in essence their approach is embedded in Valero’s formulation.

An extension to explicitly include into the accounting a modelled set of environmental externalities has been later proposed by Frangopoulos & von Spakowski (1993) and, independently, by Szargut (1987). Further extensions, to account for unsteady operating conditions and to include life-cycle effects have been proposed by Frangopoulos & von Spakowski (1993) and Tober et al. (1999) respectively.

The present formalization of the theory and applications of TE is due entirely to Valero and coworkers, who in a series of milestone publications (quoted above) provided not only a solid theoretical foundation, but also opened the way to a series of important applications to process and system analysis. Of importance is also the slightly different and more industry-oriented approach proposed by Tsatsaronis et al. (2003), Czesla & Tsatsaronis (2003), as well as the efforts by Szargut (1987) to include taxation effects into the pricing structure.

The early papers on this topic constitute a difficult reading, because of the uncertainties associated with the determination of the exergy unit costs, the different and often contrasting terminology employed, and the not always crisply defined general framework of the analysis. Bergmann & Schmidt (1967), Beyer (1978, 1979a, 1979b), Borel (1974), El-Sayed (1970), El-Sayed & Evans (1969a & b), Fratscher (1973), Grubbstroem (1980, 1985), Gruhn (1965), Kalinina & Brodyanskyi (1973, 1974), Panzer (1965), Ponyatov (1968), Szargut (1957, 1969) are the most relevant papers in this field.

After the publication of Valero’s works in 1986, the interest in TE increased steadily, and today most energy journals offer at least 2 or 3 papers on TE in each issue. The applications are very diverse in scope, breadth and depth: Alvarez et al. (2003) (fuel cell GT

cycle), Avgousti et al. (1989), Ben et al. (1989), Borgert & Velasquez (2003, 2004) (Kalina cycle), Frangopoulos & Nakos (2003), Kakaras et al. (2003) (fuel cells), Jassim & Khir (2004) (rotary air regenerator), Modesto et al. (2003) (industrial cogeneration), Nikulshin et al. (2003) (energy supply networks), Gallo & Gomes (2003) and Rivero et al. (2003) (combined cycles), Sahoo et al. (2004) (absorption systems), Torres et al. (1989), De Oliveira et al. (2003) (trigeneration systems), Rucker & Bazzo (2003), Silva et al. (2003) (cogeneration), Velasquez & Sandrini (2003) (steam from biomass).

8 – The extension of the concept and the inclusion of externalities: 1980-2003

A concise modernization of the exergy theory, with a strong emphasis on possible applications to the analysis of complex systems was presented by Göran Wall (1977), who called exergy “a useful concept in resource management”, to meet the increasing needs of a sustainable development (though the word “sustainable” had not yet been coined at that time).

In Wall’s paradigm, the concepts of human and industrial ecology are the only tools capable of modeling the social metabolism, i.e. the use of natural resources as carriers of exergy in the society. Exergy (destruction) can be seen as the driving force of the evolution of all systems, from the smallest living cell to the largest cosmic object, and it is of the utmost importance that its supply, distribution and use, for all purposes, are performed in such a way that its destruction be minimized. Through the work of Wall, exergy applications have been extended to include problems such as “natural resource accounting” considering both energy and material resources, life cycle exergy analysis, environmental indicators and evaluation of an environmental taxation that encourages sustainable development.

Customarily, the production cost of a commodity is expressed by a “Production Function” f whose operands are the products of the unit costs of each production factor by an intensive measure of the factor itself (J for energy, kg for materials, € for capital and environmental cost, work-hours for Labour):

$$c_j = f(C, M, E, L, O) \quad 1)$$

Where

Capital Factor	Production	C=	$f_K * K$	f_K = unit cost of Capital K = Capital (in monetary units)
Material Factor	Production	M=	$S(f_{Mi} * m_i)$	f_{Mi} = unit cost of the i -th material m_i = mass flow rate of the i -th material (kg/s)
Energy Factor	Production	E=	$S(f_{Ek} * en_k)$	f_{Ek} = unit cost of the k -th energy flow en_k = energy content of the k -th stream (kJ/s)
Labour Factor	Production	L=	$S(f_j * W_j)$	f_j = unit cost of the j -th Labour input W_j = Labour (in workhours)
Environmental “Production Factor”	“Pro- duction Factor”	O ²⁶ =	$S(f_p * m_p)$	f_p = unit environmental cost of the p -th effluent m_p = mass flow rate of the p -th effluent (kg/s)

Table 1 – Classical cost-formation model: five Production Factors

It has been shown (Fratscher 1965 & 1967, Grubbström 1980 & 1985, Momdjan & Sciubba 1993, Szargut 1978, Wall 1978c) that it is possible to construct a physical costing paradigm in which the energy-, material and Environmental cost-related “Production Factors” are represented in terms of exergy.

It is clear that once the three factors E, M and O, which are *per se* incommensurable with each other, are made homogeneous by adopting exergy as the common quantifier for all streams that flow “in” and “out of” the process, the irreversibilities in the production chain are better accounted for: this the basis for the Cumulative Exergy Content (Szargut 1978) and of the Extended Exergy Accounting (Sciubba 2000, see below). There is no problem in

²⁶ The symbol “O” here denotes the initial letter of the Greek word ὄικος (=home) whence all the “eco-” prefixes have stemmed

expressing Energy- and Material inputs and outputs in terms of exergy: how to assign a proper Exergy cost to Environmental effects is still the topic of some fundamental debate (Szargut 1973 & 1974, Frangopoulos & von Spakovsky 1993, von Spakovsky & Frangopoulos 1993, Sciubba 1999, Valero 1995a & 1998).

8.1 – Process conversion efficiency

Aoki (1992) studied the behaviour of complex processes at steady state; Lior (2002) studied the implications of exergy analysis on some possible trends in the energy conversion systems; Michalek & Stritzel (1990) analysed some material-processing technologies; Sciubba & Ulgiati (2005), in a much broader context, provided an exergy analysis of a corn-to-ethanol distillation process. Tekin & Bayramoglu (2001) provided an analysis of the sugar production process; Wang et al. (2003), Chen et al. (2003a,b) studied the exergy generation of a class of turbulent flows in a pipe.

8.2 – Process structure optimization

Aceves-Saborio et al. (1989) studied the design optimization of heat exchangers; Aglieri-Rinella et al. (1991) provided an exergy-based optimization of a steam generator for industrial applications; Bejan & Siems (2001) applied exergy destruction minimization to the identification of the quasi-optimal design of an aircraft, considered as an energy conversion system; Chinneck (1983) applied a sort of exergy-enhanced network theory to devise the optimal structure of some thermal processes; Dekhtyarev (1978) and El-Sayed (2002) used an exergy analysis as a guide to preliminary design optimization of cyclic processes, while Doldersum (1998) applied the same approach to identify the optimal process modifications (revamping) of thermal processes. The important problem of optimal synthesis had been discussed previously already by El-Sayed & Gaggioli (1988), Evans et al. (1981), Gaggioli et al. (1991) and Sama (1995a,b): notice however that an exergy-based approach to the optimal design of a HEN had been previously proposed by Pehler (1983). Based on these two latter works, Maiorano & Sciubba (2000) and Maiorano et al. (200x) proposed an exergy-guided intelligent design assistant for Heat Exchanger Networks (HEN). In the same line, Monanteras & Frangopoulos (1999) devised an optimal design procedure for a fuel cell-based powerplant. Szargut (2002c) presented a slightly more general formulation for optimal design, which can be in principle applied to any process.

8.3 – Exergy-based diagnostics

In two seminal works, Torres et al. (2002) and Valero et al. (2002) elaborated on an original proposal previously made by Buerger (1974), and developed a method to identify malfunctions in a component of a process by studying their impact on the exergy efficiency of other connected components. Further work in this area was published by Carraretto et al. (2003). A similar method has been also distilled into an Artificial Intelligence procedure by Biagetti & Sciubba (2002, 2004). Lazzaretto & Toffolo (2003), Verda (2003), Verda et al. (2003), Zaleta et al. (2003) developed a TE-based diagnostic method, in which the fault is identified by a “localised” increase in the thermo-economical cost-formation chain of the process.

Numerosos autros citados²⁷ se han doctorado con el Prof. Antonio Valero y la mayor parte de los demás autros citados a partir de 1986 han publicado algún trabajo conjunto con él²⁸.

Fuera del ámbito del desarrollo de aspectos sin pulir del diagnóstico termoeconómico, el análisis termoeconómico ha ampliado su paraguas de actuación, incluyendo las pilas

²⁷ C. Torres, M.A. Lozano, L. Serra, L. Correas, A. Zaleta y T. Álvarez, entre otros.

²⁸ E. Levis, G. Tsatsaronis, M. Von Spakovsky, C. Frangopoulos, E. Sciubba, G. Wall, J. Szargut, V. Brodyanskyi, Y. El Saied, A. Lazzaretto, e tc...

de combustible como nueva tecnología que puede optimizarse desde este tipo de análisis (ver la tesis de Tomás Tejedor como ejemplo²⁹). Y finalmente, también se han explorado nuevas formas de contabilización y cálculo de costes exergéticos, sin tener en cuenta ciertas asunciones realizadas en la Teoría Estructural, que permitieron la realización de una tesis ciertamente innovadora, defendida por Ángel Moreno³⁰.

Para acabar con esta línea, y volviendo a la rama “ambientalista” de la exergoecología, aunque la realización de proyectos de investigación se explicará en la siguiente línea de investigación, dedicada a los estudios en profundidad de un recurso natural (agua) y sus interacciones con la energía, podría decirse que se ha relanzado de nuevo esta línea, en clara conexión también con otras líneas presentadas posteriormente como la de las tecnologías de reducción de emisiones de CO₂, con la finalización próxima de dos tesis doctorales³¹, y la realización de varios artículos y publicaciones de gran prestigio³², así como la presentación reciente de un proyecto multidisciplinar (incluyendo a nombres tan destacados en el mundo científico como José Manuel Naredo –premio nacional de Medio Ambiente- y Miguel Angel Zapatero –IGME- como investigadores externos) en la convocatoria de proyectos de I+D+I del Plan Nacional de Energía para valorizar exergéticamente los recursos naturales de España³³.

Integración agua-energía

La proyección internacional del Prof. Valero permitió que el entonces viceministro de agua y energía de los Emiratos Árabes Unidos, D. M. K. Al-Gobaisi, lo invitara en 1996 al Congreso Internacional de la creación de la EOLSS (enciclopedia universal del desarrollo sostenible, auspiciada por la UNESCO) en Bahamas, y le propusiera aplicar las metodologías desarrolladas del diagnóstico termoeconómico a la planta combinada de producción de energía eléctrica combinada con la destilación de agua de mar más grande el

²⁹ Tejedor, T. (2003). PRINCIPIOS BÁSICOS DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE. ANÁLISIS TERMOCÓNOMICO DE PLANTAS Y SISTEMAS DE PILAS DE COMBUSTIBLE PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

³⁰ Moreno, A. (2000) MÉTODO GANYMEDE DE CONTABILIDAD DE COSTES EXERGOECONÓMICOS.

³¹ Valero, A. (prevista en 2007). ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN EXERGÉTICA DEL CAPITAL NATURAL DE LA TIERRA.

Martínez, A. (prevista en 2007). EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES DE LA TIERRA. ANÁLISIS COMPARATIVO DE SUS COSTES EXERGÉTICOS Y DE SU EMERGÍA.

³² Valero, A., Botero, E., and Valero D., A. (2005). Exergy accounting of natural resources. Exergy, Energy System Analysis, and Optimization, Encyclopaedia of Life Support Systems (EOLSS), EOLSS Publishers, Oxford, UK; Online Encyclopaedia: <http://www.eolss.net>.

Valero, A. (2006) Exergy accounting: Capabilities and drawbacks. Energy 31, pp. 164-180.

³³ Evaluación de recursos energéticos del Planeta: metodología y aplicación al caso Español. Solicitado en la convocatoria del 2007 en el Plan Nacional de I+D+I de Energía, con el código 67191.

mundo (6 grupos de 132 MWe acoplados a desaladoras de tipo MSF con 57.600 m³/día de capacidad cada una). De ahí surgió un contrato privado³⁴ que permitió aplicar la metodología a una nueva tecnología, entrar en contacto con el mundo de la desalación y su integración con la producción energética, con el principal resultado científico de la tesis doctoral de Javier Uche³⁵, actual director del AEE, y la publicación de numerosos artículos científicos³⁶.

Pero quizás lo más importante de este comienzo fue la visión de las grandes oportunidades de ahorro que pueden obtenerse en la integración adecuada de las tecnologías de producción de agua y energía, abriendo por tanto una nueva línea de investigación, que por otra parte no tiene competencia alguna en el mundo ya que no existen grupos de investigación trabajando en concreto en el tema: hay desgraciadamente una compartimentación de los expertos en temas de agua (ingenieros hidráulicos y químicos) y los expertos en materia de energía (ingenieros térmicos y eléctricos) que no permite ver esa visión global tan necesaria. La primera actuación importante tras el primer proyecto de colaboración con ICWES, fue un segundo proyecto³⁷, también con este centro internacional (quizás demasiado ambicioso), de elaboración de un software de propósito general (es decir, multiplataforma) que permitiera el diseño y análisis termodinámico (y posteriormente termoeconómico) de instalaciones de producción de agua y energía. El software permite dicho diseño a partir de una herramienta gráfica muy simple y su posterior análisis y diagnóstico, comparando dos situaciones de la planta creada simplemente con la modificación de algún parámetro diferenciador de ambas situaciones. El software está en continuo proceso de depuración, en muchos casos con nuevas ampliaciones de su capacidad casi ilimitada, e incorpora desarrollos propios únicos como nuevos sistemas de resolución de ecuaciones no lineales en java, o un generador automático de la estructura productiva, paso previo necesario para cualquier análisis termoeconómico posterior. Está prevista la entrega final al cliente y su posible venta con fines educativos a finales de este año.

³⁴ ICWES-01. Analysis, Diagnostics, Management and Measurement of Performance Processes using both Conventional and Thermoeconomic Techniques (1996-1999). ICWES (International Centre for Water and Energy Systems, Abu Dhabi, EUA).

³⁵ Uche, J. (2000). ANÁLISIS TERMOECONÓMICO Y SIMULACIÓN DE UNA PLANTA COMBINADA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA Y AGUA.

³⁶ Uche, J.; Serra, L.; Valero, A. (2001) Thermoeconomic Optimization of a Dual Purpose Power and Desalination Plant. Desalination 136, pp. 147-158.

³⁷ ICWES-02. BBLOCKS: A general purpose building block software for the simulation and the thermoeconomic analysis of dual purpose power and desalination plants (1999-2004). ICWES (International Centre for Water and Energy Systems, Abu Dhabi, EUA).

Una tercera incursión en esta línea de investigación vino motivada por el entorno político en Aragón y España tras la aprobación del Plan Hidrológico Nacional (2001) con la inclusión del Trasvase del Ebro hacia el Levante y las Cuencas Internas de Cataluña. El Gobierno de Aragón, a través del Departamento de Presidencia y Relaciones Institucionales, requirió asesoramiento científico en forma de numerosos informes asépticos de aspectos técnicos³⁸ como la desalación y reutilización de aguas, y costes energéticos del Trasvase, así como la evaluación ambiental de ambas alternativas con el Análisis de Ciclo de Vida, una metodología que permite computar los efectos ambientales de la construcción y demolición de infraestructuras, además de los generados en la fase de explotación (la única que es analizada, si lo es). A pesar del origen del cliente y por tanto del “previsible” sesgo de los resultados presentados, la calidad científica de los trabajos ha sido reconocida por entidades como la Unión Europea (DG Environment) o publicaciones de alto impacto científico³⁹. Destacar también que la línea de evaluación ambiental de las tecnologías de producción de agua, y su integración gradual con las diversas formas de producción energética vinculadas a dichas tecnologías, es una nueva aportación científica que se ha desarrollado dentro de un proyecto del Plan Nacional de I+D+I en el período 2002-2004⁴⁰, y cuyos resultados van a focalizarse en una tesis doctoral también próxima a su defensa, la de la investigadora Gema Raluy⁴¹. Finalmente, la colaboración con el Gobierno de Aragón en esta línea, en este caso con el Departamento de Medio Ambiente, se ha centrado en la coordinación técnica y científica de dos Congresos Internacionales realizados en Zaragoza en los años 2001 y 2005, con de más de 500 participantes de toda Europa⁴².

En esta línea, el diseño de sistemas integrados y eficientes de sistemas de poligeneración, es decir, que produzcan de forma integrada y lo más eficiente posible agua, electricidad, pero también calor y frío (hablamos en definitiva de una extensión de la trigeneración

38 Estudios "Desalación y otras técnicas de utilización del agua", "Incrementos de coste en el Trasvase del Ebro no considerados o insuficientemente valorados en el PHN", "Análisis de rentabilidad del regadío en el Levante a costes reales del trasvase", "La energía del trasvase y el trasvase de la energía", "Sostenibilidad del PHN desde el punto de vista económico" y "Análisis de ciclo de vida de la Osmosis Inversa en comparación con el Trasvase del Ebro". Incluyeron 2 visitas al Parlamento de Bruselas.

39 G. Raluy, L. Serra, J. Uche (2005) Life-cycle assesment of water production technologies. Part I: Life-cycle assessment of different commercial desalination technologies (MSF, MED, RO). *Int Journal of LCA* 10 (4), pp. 285-293.

G. Raluy, L. Serra, J. Uche, A. Valero (2005) Life-cycle assessment of water production technologies. Part II: Reverse Osmosis technology versus the Ebro River Water Transfer. *Int Journal of LCA* 10 (5), pp. 346-354.

40 ECOENERAGUA. Producción sostenible de agua y energía. Evaluación técnica, económica y análisis de ciclo de vida de tecnologías de desalación combinadas con sistemas de producción de energía. (REN2001-0292/TECNO). Min. CICYT, Plan Nacional de I+D (2002-2004).

41 Raluy, G. (prevista en 2007). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE AGUA DULCE.

42 Conferencia internacional "El PHN y la gestión sostenible del agua. Aspectos medioambientales, reutilización y desalación". Zaragoza, 13-14 Junio 2001, Ibercaja.

Seminario ENCORE (Environmental Conference of European Regions). Zaragoza, 27-28 Octubre 2005, Centro Internacional del Agua y Medio Ambiente (CIAMA), La Alfranca.

con el agua como vector energético extra) es un nuevo desarrollo muy necesario en sectores tan emergentes pero a la vez tan insostenibles como el turismo del litoral mediterráneo, a pesar de la escasa coyuntura económica favorable actual, debido al escaso diferencial de precios entre la energía primaria y final en España. El agua como cuarto vector energético tiene por su fisonomía ciertas potencialidades, como su almacenamiento sin grandes inversiones ni riesgos potenciales para la salud pública. El estudio de estos esquemas multiproducto, por ejemplo con el apoyo de la Termoeconomía para el cálculo de costes, permite mejorar ostensiblemente los rendimientos y reducir por tanto los consumos energéticos primarios para producir estas cuatro demandas. La principal contribución en esta línea se está desarrollando en dos proyectos del Plan Nacional de I+D+I concedidos en 2004 y 2005⁴³, que está permitiendo el desarrollo de una tesis doctoral con su financiación (Carlos Rubio, profesor visitante de la Universidad Michoacana), en la preparación como coordinador de un Proyecto Integrado en la convocatoria del 6º Programa Marco de poligeneración (DGTREN) en 2004⁴⁴, y la preparación de varios papers aceptados en revistas científicas⁴⁵. A título anecdótico, resaltar que este año se ha ofertado en la Universidad de Zaragoza un postgrado on-line de poligeneración, como fruto de todo el conocimiento generado en los últimos años.

Para finalizar con las diversas formas de actuación en la línea de integración agua-energía, hay una nueva culminación reciente: la aplicación de la Termoeconomía, y en particular la exergoecología, con efectos prácticos sobre el recurso natural “*agua*”. Concretamente, la cuantificación de los costes exergéticos de las tecnologías necesarias para reponer en cantidad y calidad las masas de agua, van a servir de base para aplicar el coste ambiental, una partida que según la implantación progresiva de la Directiva Marco del Agua (DMA) será necesaria repercutir a los usuarios (junto con el coste del servicio y de oportunidad), en virtud de la aplicación del artículo 9 de dicha Directiva (a partir del 2010). El

⁴³ POLIGENERAGUA (producción de energía eléctrica, calor, frío y agua de forma sostenible en el sector servicios). (ENE2004-08261-C02-01/CON). MEC, Plan Nal. de I+D+I (2004-2005).

POLIMED (Producción de electricidad, calor, frío y agua dulce de forma sostenible en el sector turístico). ENE 2005-08283. MEC, Plan Nacional de I+D+I (2005-2008)

⁴⁴ IP-POLYMED (“Polygeneration for the Tourism Sector at the Mediterranean Litorals and Archipelagos”). FP6-518292. DGTREN, 2004. Proyecto de 10.4 millones de Euros (6 de subvención)

⁴⁵ J. Uche, L. Serra, A. Sanz (2004). Integration of desalination with heat-cold-power production in the agro-food industry. *Desalination* 166, pp. 379-392.

estudio se está realizando para Cataluña⁴⁶, pero de alguna forma ha sentado las bases de la denominada Hidronomía Física, o medición de los costes hídricos a través de su contenido energético y exergético en particular.

Exergoecología

Desde hace algún tiempo se viene hablando sobre la necesidad de integrar la naturaleza en las cuentas económicas tradicionales como una forma de modificar los patrones de consumo de recursos naturales que están afectando las condiciones de vida en el planeta. Se habla por tanto de evaluar bajo la denominación de capital natural los recursos naturales y los servicios de los ecosistemas (minerales, plantas y animales de la Biosfera vistos como productores de oxígeno, filtros de agua, inhibidores de la erosión o proveedores de otros servicios). El concepto de capital natural es una aproximación a la evaluación ecosistémica, alternativo a la visión tradicional de toda vida no humana como un recurso natural pasivo, y también a la idea de “*salud ecológica*”. Dicho capital es complementario a las otras formas de capital incluidas en la función de producción y diversos autores se han detenido a analizar las relaciones entre estas formas de capital.

En el análisis económico tradicional, el capital natural sería clasificado como “tierra” y no como “capital” ya que este término siempre se ha asociado a actividades humanas, sin embargo se ha argumentado que debe tratarse como capital ya que puede ser mejorado o degradado por sus acciones, y además permitiría valorar su capacidad productiva. Algunos economistas y políticos creen que la medida del capital natural debe tener un papel en la economía del siglo XXI, modificando incluso indicadores clave como la inflación o el Producto Interior Bruto.

El problema clave subyacente siempre es la valoración económica más o menos acertada de los recursos naturales. La economía ambiental utiliza metodologías de valoración que son más o menos discutibles y, desde la economía ecológica, se desarrollan alternativas para medida indirecta de la sostenibilidad como son las mochilas ecológicas o requerimiento total de materiales, o las huellas ecológicas o requerimientos de espacio.

⁴⁶ Determinación de los costes exergéticos del agua en Cataluña para la estimación de costos ambientales. Convenio de colaboración con la Agencia Catalana del Agua (2006-2008).

La pregunta que surge entonces es ¿se puede valorar el capital natural en unidades físicas como una forma de “tener en cuentas” a la naturaleza? Autores como Naredo y Valero (1999) han buscado en la Termodinámica y más exactamente en el Segundo Principio la respuesta a esta cuestión. La estructura de la Termodinámica descansa sobre dos pilares fundamentales:

- El Primer Principio, la Ley de la conservación de la materia y la energía.
- El Segundo Principio, o Ley de la entropía, que señala el sentido hacia donde fluye la energía, indicando que todas sus transformaciones conllevan pérdidas de calidad: la cantidad de la energía se conserva en sus transformaciones, pero la energía utilizable, con respecto a algún referente, denominada también exergía, tiende siempre a disminuir.

La finalidad de esta línea de investigación es por tanto desarrollar herramientas metodológicas que permitan realizar la valoración física de los recursos naturales y el capital natural de la tierra, y aplicar dichas herramientas para realizar una primera valoración del capital natural contenido en las reservas de minerales, el agua y los combustibles fósiles españoles, como ejemplos paradigmáticos cercanos de evaluación de un recurso natural escaso a partir de su calidad energética. Por una parte, en este proyecto se continúa el trabajo iniciado por los autores en el campo de la valoración termodinámica de los recursos minerales del planeta, teniendo en cuenta las condiciones físicas que hacen el recurso mineral útil a la economía, pero considerando también el grado de desarrollo tecnológico que han alcanzado los procesos reales de obtención de minerales, y que los aleja de la condición ideal según el Segundo Principio. Adicionalmente, se plantea una valoración termodinámica de los combustibles fósiles y los recursos de agua renovables del planeta: para los primeros, dado que la teoría termodinámica tradicional ya brinda las herramientas para medir en unidades físicas las reservas de combustibles, y que su coste de reposición está dado por la eficiencia con la cual se fija la energía solar en el planeta, se propone determinar el coste físico que tiene la externalidad asociada al uso a esta componente del capital natural y descontar dicho coste de manera anticipada. En el caso del agua, se propone valorar el recurso por el coste físico, medido en unidades energéticas, que tendría reponerlo con las condiciones físicas y químicas con las cuales lo entrega el ciclo hidrológico. Reseñar que este enfoque integrador de valorar minerales, combustibles y agua desde el punto de vista del Segundo Principio.

El equipo investigador, a partir del trabajo inicial de Zaleta, Ranz y Valero (1998), que permite la evaluación de la exergía total contenida en una corriente fluvial a través de sus componentes térmica, mecánica, cinética, potencial y química (de composición y de concentración), y del trabajo de Valero, Serra y Botero (2001) con la evaluación exergética del hielo contenido en la Antártida, complementados con el excelente trabajo de Naredo y Gascó con sus “Cuentas del Agua”, cuyo apartado de calidad cuenta con la misma base física (eso sí, simplificada en cuanto a los parámetros de cuantificación exergética) está desarrollando una metodología que permita la cuantificación de los costes exergéticos de reposición en cantidad y calidad de las masas de agua que componen los ecosistemas acuáticos. El Ambiente de Referencia a adoptar para el cálculo de exergías se estudiará en detalle y se convendrán los oportunos convenios, que no serán idénticos a los adoptados en las siguientes tareas para otros recursos naturales propios de la corteza o incluso para otros objetivos finales dentro del marco de los recursos hídricos. Los costes exergéticos calculados provienen de los costes energéticos de las tecnologías actuales existentes que permiten aumentar la cantidad del recurso agua (desalación y gestión de la demanda), así como aquellas que permiten la mejora de la calidad del mismo (reutilización, depuración) e incluso su nuevo uso derivado de tal mejora. La aplicación específica de esta metodología se está realizando para el caso particular de Cataluña.

La valoración exergética de los combustibles fósiles, se plantea desde otra perspectiva, ya que su valor numérico es muy cercano a un parámetro muy conocido y de fácil medición: el poder calorífico. Sin embargo, hay otros factores que son tanto o más importantes que el factor de concentración temporal de este recurso, como puede ser los efectos derivados de su utilización, o en otro ámbito, el análisis de ciclo de vida de las instalaciones asociadas a su uso, si se quiere comparar por ejemplo las tecnologías de producción eléctrica convencionales y las basadas en energías renovables. Por tanto, la metodología adoptada aquí tiene como objetivo valorar dichos efectos negativos derivados de su uso y manipulación, especialmente las emisiones de CO₂ que provocan el efecto invernadero. Afortunadamente, el equipo investigador es experto también en el diseño de tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂,⁴⁷ con lo que es posible restar con gran fiabilidad el coste de eliminación de dichos productos de la combustión (o coste de reposición ambien-

⁴⁷ El IP que solicita este proyecto lo es también del proyecto ENE2004-06053: “Investigación de tecnologías cuasi-cero emisiones de CO₂. Viabilidad técnica, económica y jurídica. Aplicación al caso Español y carbones nacionales”.

tal), y obtener de esta forma la denominada tonelada limpia (“*clean ton*”) de un combustible fósil, ya descontado su efecto pernicioso con el entorno.

Para la evaluación de los recursos naturales minerales, generalmente muy dispersos en cuanto a su concentración en la corteza terrestre (y en algunos casos de muy difícil acceso), los costes exergéticos de reposición deben contener la suma de los costes extractivos y de las diferentes tecnologías que permitan extraer el mineral en una concentración adecuada para su uso posterior. Además, en el caso de los minerales, el conocimiento de la composición actual, anterior y futura de la corteza está reducida a un espesor muy pequeño, en todo caso ya alcanzable con las nuevas técnicas de sondeo y perforación. La metodología a presentar aquí se centrará especialmente en los minerales más abundantes de la corteza, teniendo en cuenta que las tecnologías actuales de explotación de los minerales son muy diversas para cada uno de ellos, incluso para el mismo mineral.

Evaluación de recursos de biomasa

Este grupo de trabajo que estudia la biomasa desde el punto de vista de la evaluación de recursos y aplicabilidad en el uso doméstico e industrial, está incluido desde finales del 2005 en el AEE, pero ha pertenecido al Área Térmica hasta entonces⁴⁸. Dirigido por el profesor universitario Javier Royo, ha trabajado en el último decenio en varios frentes, que se exponen a continuación.

El grupo cuenta con una dilatada experiencia anterior tanto en la evaluación de recursos de biomasa residual forestal y agrícola como en el estudio de las tecnologías para su aprovechamiento energético (producción de electricidad y calor). Respecto del primer aspecto, se desarrolló el “*Estudio de recursos de biomasa de la provincia de Teruel*” para el grupo ENDESA (1996), enfocado a obtener una primera aproximación a las posibilidades de instalación de una planta de producción de energía eléctrica utilizando este tipo de combustibles. Posteriormente, en 1997, se realizó para Gobierno de Aragón el Atlas de biomasa para usos energéticos de Aragón, que incluía la evaluación de todo tipo de biomasa residual seca, dada la extensión de la zona a estudiar y su carácter generalista se realizó te-

⁴⁸ Es posible por tanto encontrar inevitablemente ciertos solapamientos con la memoria científica correspondiente al Área Térmica (AT) y el Área de Formación (AF), fruto de su estancia en el AT en el primer caso y de la inclusión de investigadores dentro del AF en el segundo, dentro del desarrollo histórico de esta línea de investigación.

niendo en cuenta datos estadísticos. En el marco del proyecto “*Co-combustión en la central térmica de Escucha*” (2FD97-0764, cofinanciación CICYT-FEDER) se desarrolló, entre 1999 y 2001, una metodología de evaluación de recursos de biomasa de origen forestal, aplicándose a los montes repoblados existentes en una zona de 50 km alrededor de dicha central. Parte considerable del proyecto se dedicó a la determinación de la influencia de la extracción de los residuos forestales sobre la pérdida de fertilidad (nutrientes) del suelo, comparando la composición de los diferentes horizontes bajo dos condiciones: extracción de residuos o descomposición y reintegración de los nutrientes al suelo.

Finalizando el recuento de proyectos de valorización de recursos biomásicos⁴⁹, es destacable también el proyecto: “*Metodologías para evaluar el potencial de biomasa residual agrícola y forestal y sus posibles aplicaciones energéticas. Validación en la provincia de Teruel*” (LIGNOSTRUM, AGL2002-03917, 2002-2004), que tuvo por objetivo general la implementación de una metodología consistente y reaplicable que permita cuantificar y caracterizar los residuos forestales y agrícolas que se podrían o deberían aprovechar en un territorio. La finalidad última es posibilitar la recuperación y reciclado de los residuos mencionados mediante la utilización del sistema energético más adecuado, tendente al incremento de su utilización con todas las importantes ventajas medioambientales y socioeconómicas que ello conllevaría. Para ello es necesario sentar las bases que permitan seleccionar, en función del tipo de residuo y de la cantidad que de él se pueda disponer, la tecnología y la aplicación energética más idónea para que después, al tener en cuenta otros aspectos como las infraestructuras energéticas de las que se dispone en un territorio, se pueda determinar la instalación que permitiría su valorización energética de forma óptima. Aspectos fundamentales de orden metodológico son: la estimación de los residuos – forestales y agrícolas- mediante técnicas SIG y de teledetección, trabajo de campo y el establecimiento de relaciones estadísticas significativas; la caracterización energética de los residuos evaluados; y, finalmente, la optimización del sistema tecnológico a emplear en función de la cantidad y tipología de los residuos existentes y de la infraestructura energética del territorio.

En cuanto a la experiencia en tecnologías de aprovechamiento energético de la biomasa, hay que resaltar nuevamente el proyecto “*Co-combustión en la central térmica de*

⁴⁹ Se ha realizado también en el año 2005 y 2006 un gran proyecto de evaluación de recursos de biomasa para una gran empresa eléctrica que por razones de confidencialidad no puede incluirse.

Escucha”, destacando cuatro importantes actividades, amén de algunas publicaciones muy interesantes⁵⁰:

- Evaluación de las posibilidades de combustión conjunta de biomasa forestal con carbones de bajo rango en centrales térmicas convencionales que, debido a las ventajas que presenta, está llamado a convertirse en una de las principales alternativas para la producción de electricidad a partir de biomasa a media-gran escala en el área mediterránea.
- Instalación y análisis de una caldera basada en la tecnología de cámara torsional. Esta tecnología, novedosa en Europa, presenta importantes ventajas - alto rendimiento, ausencia de corrosiones y de ensuciamiento, posibilidad de utilizar muy diversos tipos y tamaños de biomasa- para la producción de calor a media-baja escala.
- Instalación de una planta de pretratamiento de biomasa (astillado, secado, molienda y clasificación), que permite determinar el grado de pretratamiento óptimo y el estudio de los costes asociados a estos procesos.
- La Fundación CIRCE ha diseñado un quemador de combustible biomasa pulverizada con prerrotación de las corrientes de aire primario y secundario de 0.5 MWt de potencia de diseño.

Además, el grupo de trabajo ha estudiado también las posibilidades de co-gasificación con biomasa, en concreto con un proyecto PROFIT con Elcogás: “*Eliminación de Residuos Agroindustriales, Sólidos Urbanos y Agrícolas por Cogasificación en la Planta GICC de ELCOGAS en Puertollano*” (FIT-140100-2001-136), que consistió en la determinación del potencial de biomasa residual seca existente en los alrededores de la planta con vistas a su co-gasificación y analizar las implicaciones que dicho proceso tendría sobre la operación de la planta.

⁵⁰ Royo, J.; Sebastián, F.; Canalís, P., Rodríguez, N. The Torsional Chamber as an Alternative to the Technologies Usually Employed in Biomass Co-firing. Power Gen Europe 2004, Barcelona.

Canalís, P., Royo, J., Sebastián, F. Influence of co-combustion in the efficiency of a pulverized coal boiler. Proceedings of the 14th European Biomass Conference & Exhibition - Biomass for Energy Industry and Climate Protection - Paris 17-21 Oct. 2005 pp. 1146-1149.

Canalís, P.; Palacio, J.; Pascual, J.; Royo, J.; Sebastián, F.; Tapia, R. Co-firing of Low Rank Coal and Biomass: a Promising Pilot Experience. Int. Conference of new renewable energy technologies for sustainable development, Azores (Portugal, 2002).

En cuanto a las líneas de actuación actuales, hay que centrarse en dos grandes proyectos de investigación, son los siguientes:

- “*Desarrollo, demostración y determinación de la viabilidad de la producción de energía en España a partir de la biomasa de cultivos energéticos (PSE-Cultivos Energéticos)*” financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (Programa PSE PROFIT, referencias PSE-6-2005 y PSE-120000-2006-9). Este proyecto multidisciplinar, considerado estratégico para el Gobierno Español, y con 38 socios participantes, es un proyecto que abarca todos los aspectos del aprovechamiento de la biomasa como materia prima para reducir los impactos ambientales asociados a la generación eléctrica, el uso doméstico e incluso el transporte. En concreto, la participación del grupo de investigación dentro del consorcio del PSE se centrará en el desarrollo de nuevos cultivos energéticos y el apoyo en el cultivo en diversas zonas de Aragón, en el diseño y aplicación de pequeños sistemas de calefacción doméstica alimentados con biomasa, diseño de sistemas de co-combustión apropiados, y finalmente en el análisis de ciclo de vida de las instalaciones reales propuestas por otros socios participantes en el consorcio estratégico del PSE.
- “*Determinación del potencial real de reducción de emisiones de efecto invernadero en España mediante co-combustión (ACV-COCO)*”, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (Programa Nacional I+D+I, ENE 2005-00304/ALT, 2006-2008). Consiste en la evaluación de recursos biomásicos para cada tipo de central térmica convencional a estudiar, la elección de la mejor tecnología de co-combustión para esa central y finalmente la evaluación con ACV (análisis de ciclo de vida) de todo el sistema propuesto, para comprobar su viabilidad medioambiental. El proyecto culminará con la realización de la tesis doctoral de Fernando Sebastián⁵¹, responsable actual de esta sección o grupo de trabajo.

El grupo de investigación ha participado además en otros proyectos de investigación que les han permitido conocer la realidad energética, industrial y socioeconómica

⁵¹ Sebastián, F. (prevista en 2007). COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL SECA EN UNA CÁMARA TORSIONAL. OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO EN FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL COMBUSTIBLE.

española. Es una línea de investigación abandonada actualmente por este grupo y llevada a cabo en el Área de Formación: la realización de auditorías energéticas. De todas formas, se dan unas pinceladas de la actividad científica desarrollada por este grupo en el período 1996-2002.

Un balance energético es un documento contable en el que básicamente se analizan las disponibilidades de todas las clases de energía, las diversas transformaciones operadas sobre las mismas y, finalmente, las cantidades empleadas por parte de los diferentes sectores consumidores, de los que se pueden extraer importantes conclusiones:

- Relaciones de intercambio energético con el exterior. Dependencia del mismo y nivel de exportación.
- Porcentaje de energía primaria dedicada a la generación de energía eléctrica.
- Establecimiento de la dependencia de la economía con relación a las diversas fuentes energéticas, en particular del petróleo y de la electricidad.
- Primera indicación de la eficiencia energética, al señalar pérdidas en transformación y transporte.

Los balances energéticos que se pretende seguir realizando serán del tipo denominado energía final, única base estadística adoptada por los servicios de la Comisión de las Comunidades Europeas para sus propios trabajos de análisis y de previsión energética, en el que todas las operaciones son contabilizadas sobre la base del contenido energético real de cada fuente y forma de energía, sin hipótesis de sustitución ni cálculo de equivalencia.

Muy relacionada con los balances energéticos se encuentra la realización de estudios del potencial de ahorro y eficiencia energética. Con ellos se pretende conocer no sólo las posibilidades de ahorro de energía, sino también otras informaciones relacionadas con el uso racional de la energía, como son por ejemplo las posibilidades de sustitución de energías convencionales por energías renovables.

Los objetivos de estos estudios son:

- Primero, analizar los potenciales de ahorro energético y económico que se pueden alcanzar con medidas amortizables en un plazo de tiempo razonable en una determinada coyuntura económica y energética. El conocimiento de estos valores ayuda en la elaboración de estrategias empresariales y fomenta la realización de futuras inversiones por parte de los agentes económicos y sociales.
- Segundo, mediante la divulgación de las medidas de ahorro de aplicación general y de los resultados que se pueden conseguir con ellas, contribuir a la formación y sensibilización del mayor número de usuarios posible.

Los proyectos más importantes realizados por este grupo en el período mencionado anteriormente en esta temática son los siguientes:

- “*Estructura energética de Aragón. Los balances energéticos regionales en el periodo 1984-1997*”, financiado por el Gobierno de Aragón.
- “*Estudio de evaluación del ahorro y eficiencia energética de Aragón*”, financiado por el Gobierno de Aragón.
- “*PYMENERGY - Adaptación de las PYMES a las Tecnologías de Ahorro Energético y Energías Renovables*”, financiado por el Fondo Social Europeo (Iniciativa ADAPT) y el Gobierno de Aragón.
- “*COSTURBIS. Modelización de los costes energéticos y medioambientales: planificación integrada para la sostenibilidad de núcleos urbanos*”, financiado por la CICYT (AMB99-0664).

Línea de técnicas de eliminación de CO₂

En esta línea de investigación, de la misma forma que en la línea anterior, existe un cierto solapamiento lógico con el Área Térmica, ya que las actividades de diseño y desarrollo tecnológico se llevan a cabo en dicha área, mientras que las actividades de difusión

se llevan a través del AEE, fundamentado en el hecho de que el profesor Antonio Valero es vicepresidente de la plataforma tecnológica europea⁵² del CO₂.

Simplemente, resaltar aquí la participación activa en dos proyectos básicos:

- “*Estudio técnico y económico de procesos de captura de CO₂ en centrales térmicas*” (Plan Nacional de Energía de I+D+I, ENE2004-06053/CON, 2004-2007), del que el profesor Antonio Valero es investigador principal, y.
- “*Consortio Estratégico Nacional en Investigación Técnica del CO₂*” (CENIT CO₂), con un presupuesto total de 9 millones de Euros y duración en el período 2006-2009. La participación activa del AEE reside en los módulos 1 (coordinación general) y módulo 7 (difusión y comunicación), con contratos de colaboración con Unión FENOSA y con ENDESA respectivamente para cada módulo.

⁵² Zero-Emission Fossil Fuel Power Plants Technology Platform (ZEFPP), con sede en Bruselas.

A.3 MEMORIA CIENTÍFICA ÁREA TÉRMICA

El tema general de investigación del área térmica del Instituto CIRCE es la energética aplicada, con el objetivo genérico, ya mencionado en otras partes de esta memoria, de contribuir a la resolución de la encrucijada económica, técnica y medioambiental en que se encuentra la sociedad actual. El área térmica se encarga del estudio e investigación, en varios niveles, de algunos temas clave en el campo, a saber: eficiencia y optimización de plantas energéticas, uso de la biomasa, captura de CO₂.

El área térmica está formada actualmente por 24 personas: un catedrático, tres profesores titulares y una profesora titular de escuela universitaria (respectivamente, Cristóbal Cortés, Inmaculada Arauzo, Luis Miguel Romeo, Enrique Teruel y Antonia Gil), dos profesores ayudantes doctores (Luis Ignacio Díez y Begoña Peña), 4 becarios FPI homologados, 5 becarios de iniciación a la investigación, 6 investigadores contratados de la Fundación CIRCE (dos de ellos doctores) y dos técnicos de laboratorio.

En términos meramente numéricos, desde 1993 se han llevado a cabo 25 proyectos de I+D de convocatoria pública competitiva, incluyendo 8 de los 4^o, 5^o y 6^o Programas Marco de la UE, 10 de la CECA y del Fondo de Investigación del Carbón y 4 del Programa Nacional de I+D. Las colaboraciones con empresas privadas en proyectos de I+D también superan la veintena. En el área térmica se han realizado 9 tesis doctorales y sus miembros han publicado 20 artículos científicos en revistas incluidas en el JCR (entre ellas *Progress in Energy and Combustion Science*, *International Journal of Thermal Sciences*, *Applied Thermal Engineerig*, *Powder Technology*, *Heat and Mass Transfer*, *Fuel*, *Energy* y *Chemical Engineering Science*) y más de 75 en otras revistas y en actas de congresos, incluyendo reuniones internacionales de prestigio como el *International Mechanical Engineering Congress* de ASME, la *Pittsburgh Coal Conference* y los congresos de *Eurotherm*, la *International Heat Transfer Conference* y el *Power-Gen Europe*.

Adicionalmente, el Prof. Antonio Valero es vicepresidente de la plataforma europea “Zero Emissions Fossil Fuels Power Plants” ZEP y desde CIRCE es el Responsable de la Seretaría de la Plataforma Española del CO₂, así como de la secretaría del Proyecto CENIT- CO₂ que agrupa a los más importantes Centros de Investigación Españoles y las empresas dedicadas a la captura y almacenamiento de CO₂

A continuación, revisamos brevemente las actividades concretas emprendidas en cada una de las grandes líneas, su historia, los logros, el estado actual de la investigación, y las perspectivas y propuestas de trabajo futuro.

Líneas de investigación del área térmica del Instituto CIRCE.

La tabla 1 las resume, destacando actividades, proyectos y contratos obtenidos, publicaciones más importantes y tesis doctorales dirigidas, y a la vez, dando una panorámica desde los comienzos del área térmica hasta la actualidad.

La distribución de publicaciones y tesis doctorales dirigidas permite apreciar que las dos primeras líneas son las tradicionales y establecidas, mientras que las dos segundas, aun contando ya con suficiente financiación, todavía son incipientes en términos de trabajo y resultados.

Las dos líneas tradicionales han estado dedicadas a las centrales termoeléctricas y calderas de potencia convencionales, y a las centrales de combustión en lecho fluido presurizado, donde se han emprendido numerosos estudios e investigaciones sobre monitorización, simulación, mejora y optimización energética. La primera línea continúa con alguna actividad, pero la concerniente a la PFBC está en abandono, por el abandono industrial de la idea y la consiguiente falta de financiación. Sin embargo, ha sido fuente de grandes resultados, no sólo aplicados a la planta sino también científicos, gracias a la construcción de un modelo experimental del separador ciclónico y la predicción numérica de algunos aspectos del flujo. Una línea abierta en los últimos cinco años es la investigación experimental aplicada en combustión y cocombustión de biomasa, que ya cuenta con financiación de proyectos públicos, algunas publicaciones y tesis en marcha, y un laboratorio construido a escala semiindustrial. Por último, el área térmica ha comenzado recientemente a investigar diversos aspectos de la captura de CO₂ en plantas térmicas; hasta la fecha, las actividades se han limitado a diversos tipos de estudios, pero es inminente la construcción de una segunda instalación experimental. Un *overview* de todas estas actividades puede ser el siguiente.

línea de investigación	actividades principales	contratos y proyectos	publicaciones más relevantes	tesis doctorales
Monitorización, simulación y optimización de centrales termoeléctricas.	Monitorización y simulación de plantas en tiempo real.	Joule III CT95-0005	<i>ASME-WAM</i> 1989, 1990, 1992, 1995, 2001	Cristóbal Cortés, 1991
	Simulación de proceso. Simulación CFD de combustión y hogares.	BRITE-EuRAM 95-2141	<i>Pittsburgh Coal Conf.</i> 1993	Inmaculada Arauzo, 1996
	Molinos de carbón.	CECA 7220-EA-016, 7220-ED-753, 7220-DE-096, 7220-PR-047, 7220-PR-048, 7220-PR-075, 7220-PR-130	<i>Prog. Ener. Comb. Sci.</i> 1996	Eva María Llera, 2003
	Ensuciamiento y otros problemas operativos. Control de sopladores.	FP5 ERK5-CT-1999-25, NNE5-2001-830, NNE5-2001-128	<i>Int. J. Therm. Sci.</i> 2001	Luis Ignacio Díez, 2003
	Estudios de refrigeración de la admisión de turbinas de gas.	Endesa 1988,1995-98, 2000-01	<i>Energy</i> 2004, <i>Fuel</i> 2005	Raquel Gareta, 2005
	Optimización de centrales de lecho fluido circulante.	FIT-120401-2001-5	<i>Eng. Appl. Artif. Intell.</i> 2005	Javier Pallarés, prevista 2006
Centrales de combustión en lecho fluido presurizado	Estudio de suciedad en ciclones y otros problemas operativos en plantas PFBC.	Endesa CT Escatrón 1989, 1994-98	<i>ASME-WAM</i> 1994	Luis Miguel Romeo, 1997
	Modelado semiempírico del lecho fluido.		<i>Rev. Gén. Therm.</i> 1998	Antonia Gil, 2000
	Estudio experimental y teórico de ciclones de pata prolongada.		<i>Int. Conf. on FBC</i> 1999	José Velilla, 2005
			<i>Powder Technol.</i> 2001, 2002	
			<i>Chem. Eng. Technol.</i> 2002	
			<i>Prog. Ener. Comb. Sci.</i> 2006	(1 estudiante de doctorado)

Tabla 1. Resumen de actividades científicas del área térmica del Instituto CIRCE.

línea de investigación	actividades principales	contratos y proyectos	publicaciones más relevantes	tesis doctorales
Combustión y cocombustión de biomasa.	Estudios experimentales de secado, molienda, combustión y cocombustión de biomasa.	FIT-120104-2001-17, 120000-2004-31 FP5 NNE5-2001-291	<i>Power-Gen Europe</i> 2001 <i>PACAM</i> 2004	(4 estudiantes de doctorado)
	Modelización de secaderos.	FP6 STREP SUSTDEV 1.2.5 No. 019829	<i>ISHTEE</i> 2004	
	Modelos CFD de combustión y cocombustión de biomasa.	RFC-CR-03007 PNI+D 2FD97-0764, ENE2004-05137/ALT, ENE2006-13617/CON	<i>ASME.-ESDA</i> 2006	
Captura de CO ₂ en centrales térmicas	Estudio técnico y económico de procesos de captura de CO ₂ en centrales térmicas.	PNI+D ENE2004-06053/CON PNI+D ENE2005-03286/ALT	<i>Energía</i> 2004 <i>ASME-IMECE</i> 2005	(2 estudiantes de doctorado)
	Repowering acoplado a la captura de CO ₂ en centrales.	FIT-120000-2004-180, 120000-2004-51	<i>ICREPQ</i> 2005	
	Captura de CO ₂ con carbones de alto azufre.	CENIT CO2 (Endesa Generación, Unión Fenosa Generación, Aries Ingeniería 2006)	<i>GHGT</i> 2006	
	Ciclos de carbonatación-calcinación. Estudio técnico y económico. Prediseño de equipos.			
	Estudios experimentales de oxidación-combustión en lecho fluido.			

Tabla 1. Resumen de actividades científicas del área térmica del Instituto CIRCE (continuación).

Monitorización, simulación y optimización de centrales termoeléctricas.

Esta ha sido la línea principal, continuando hasta la actualidad con algunos trabajos. Ha incluido varias actividades de investigación aplicada, en relación contractual con Endesa y para sus departamentos de I+D e ingeniería y la central térmica Teruel, pero también financiadas por el 4º y 5º Programas Marco de la UE y por la CECA/Fondo del carbón, en colaboración con diversas empresas e instituciones de investigación europeas, e igualmente en relación con otras grandes centrales termoeléctricas nacionales y algunas extranjeras, como Sines (Portugal), el grupo 5 de Gardanne (Francia), la central de cocombustión de Alholmens Kraft (Finlandia) y la central de Dürnröhr (Austria).

Los inicios se remontan al proyecto de investigación electrotécnica (PIE) *Control de la fusión de escorias* (también con financiación parcial de la CECA). En él se estudiaron sobre la instalación real (CT Teruel) los problemas de escorificación en las paredes del hogar de la caldera, debidos a las características del carbón y a un dimensionado muy escaso de la cámara de combustión. Para diagnosticar el problema, se modelaron diversos medidores comerciales de flujo de calor radiante⁵³ y se ensayaron, dejando finalmente instalada una red experimental de 43 sensores en una de las calderas. Las señales se analizaron estadísticamente y se validaron frente al balance de energía en el lado vapor, diseñándose además un sistema de monitorización para indicar la suciedad relativa. Adicionalmente, se ensayaron diversas estrategias operativas para aliviar el problema y sus efectos. De entre ellas, la más provechosa resultó ser una adecuada modificación de las secuencias de soplado por vapor de las superficies. Estos trabajos constituyeron el tema de tesis doctoral del Prof. Cristóbal Cortés.⁵⁴

Con el objeto de continuar estas actividades, se emprendió el proyecto PIE *Sistema Inteligente de Soplado* (SIS), en colaboración con la CT Teruel y la empresa Disel SA (Indra), cuyo producto final fue un programa informático *on-line* para recomendar el momento y la secuencia óptimas de activación de los sopladores. En efecto, a pesar de la monitorización que se había incorporado con el anterior proyecto, se observaba una tendencia del operador a derrochar vapor sobre zonas limpias o depósitos muy tenaces. Ello exigía estu-

⁵³ V. p. ej. S. B. H. C. Neal, E. W. Northover, R. J. Preece, "The measurement of radiant heat flux in large boiler furnaces. I. Problems of ash deposition relating to heat flux." *Ibid.*, "– II. Development of flux measuring instruments" *International Journal of Heat and Mass Transfer* **23**, 1015-1022, 1023-1031 (1980).

⁵⁴ C. Cortés, *Fusión de escorias en calderas de potencia con carbón de bajo rango. Análisis, diagnóstico y estrategias preventivas de operación*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza (1991).

diar estas maniobras y el subsecuente comportamiento de la escoria, medido en términos de la señal de flujo de calor. Para modelar esta última y construir el sistema, se hizo uso de la técnica de redes neuronales artificiales,⁵⁵ del concepto de optimización del rendimiento por ganancias de absorción,⁵⁶⁻⁵⁷ y de un algoritmo de reglas simples para guiar las secuencias y el tiempo de soplado. Los ahorros derivados de la implantación del sistema en el grupo 1 de la CT Teruel se estimaron por medida directa del caudal de vapor, resultando que como mínimo pagaban un sistema estándar en menos de un año, instrumentación incluida. Por ello, la dirección de la central decidió implantarlo a su costa en los grupos 2 y 3, incluyendo el *software* y equipos de medida, dos redes de 30 sensores cada una. El sistema sigue actualmente en servicio, habiéndose modificado varias veces, según detallaremos luego.

A lo largo de estas investigaciones, se publicaron diversos artículos en conferencias, en volúmenes de ASME y en revistas nacionales. En 1996, la revista *Progress in Energy and Combustion Science* solicitó una revisión sobre el tema de la monitorización de depósitos y control de la limpieza en carga de grandes calderas de potencia, que fue publicada a finales de ese año.⁵⁸

Además de la respuesta térmica del hogar, el SIS incluía una monitorización de los sobrecalentadores radiantes y convectivos, del recalentador y de los economizadores, efectuada por balance al lado vapor,⁵⁹ que también evidenciaba potenciales ahorros en esas secciones. No obstante, el cálculo preciso era difícil por la radiación en bancos mixtos y la complejidad del circuito de gases, tanto en cuerpo de caldera como en el tren de precalentamiento de aire.

Este último se estudió exhaustivamente como parte del proyecto *Ocicarbón Adaptación de la operación de calderas de potencia y su circuito aire-gases al empleo de carbones distintos de los de diseño*, donde, entre otras actividades, se modelaron térmicamente los precalentadores rotativos y se estudió la predicción de caudales de aire y gas mediante

⁵⁵ D. E. Rumelhart, J. L. McLelland, *Parallel Distributed Processing. Explorations in the Microstructure of Cognition*, Vol. 1. MIT Press (1986).

⁵⁶ R. E. Chappell, J. W. Locke, "A Mathematical Approach to Automation of Sootblower Controls" *Proceedings of the American Power Conference* **XXVII**, 412-422 (1965)

⁵⁷ W. F. Cantieri, J. W. Locke, "The boiler cleaning control subloop." *Transactions of the AIEE* **81**, 1041-1046 (1963).

⁵⁸ A. Valero, C. Cortés. "Ash Fouling in Coal-Fired Utility Boilers. Monitoring and Optimization of On-load Cleaning." *Progress in Energy and Combustion Science* **22**, 189-200 (1996).

⁵⁹ V. p. ej. T. C. Heil, R. M. Nethercutt, S. A. Scavuzzo, "Boiler Heat Transfer Model for Operator Diagnostic Information" ASME Paper 81-JGPC-PWR-14 (1981).

medidas de presión, balances de energía y las curvas características nominales de los ventiladores. Igualmente se determinaron medidas de ahorro, como el descenso de la presión del aire primario de transporte, que fueron llevadas a la planta. Las actividades formaron parte de la tesis doctoral de la Prof. Inmaculada Arauzo.⁶⁰

En 1995 surgió por primera vez la oportunidad de integrarse en un proyecto europeo, en concreto, del programa Joule III, denominado *Performance Prediction in Advanced Pulverized Coal Fired Boilers*. Se trataba en efecto de aplicar los avances en modelización termofluidodinámica de calderas a plantas reales, para lo cual se formó un consorcio con parejas de participantes de la academia y de la industria de distintos países: Instituto Superior Técnico de Lisboa (Prof. M^a Graça Carvalho), Electricidade de Portugal (CT Sines), Corporación Eléctrica Pública de Grecia, Universidad de Atenas (Prof. Bergeles), RWE Energie AG, Universidad de Stuttgart (Prof. Schnell), International Combustion/ Rolls Royce, Imperial College de Londres (Prof. Lockwood), Mitusi Babcock, Enel, Endesa (CT Teruel) y la Fundación CIRCE (Prof. Cortés).

El interés de los investigadores europeos se centró mayormente en el modelado CFD de la termofluidodinámica del hogar, para calderas de fuegos frontales (Portugal, España) y tangenciales (Grecia), con aplicación a operación (compañías eléctricas) y diseño (Mitsui Babcock), además de un subproyecto específico muy interesante en el que se experimentaba y se modelaba la interacción de chorros paralelos rotantes (Rolls/Imperial College). Aparte de colaborar con el IST en la validación de sus modelos mediante las medidas de flujo de calor (pues las calderas de Sines y Teruel son similares), la fundación CIRCE estudió los instrumentos necesarios para un modelado térmico por secciones agrupadas, que pudiera hacerse en tiempo real con propósitos de monitorización, simulación *what if* y optimización.⁶¹

Como resultado,⁶² se revisó la precisión de todas las medidas de planta y se determinaron las posibilidades de ampliarlas, especialmente en el lado gases, intentando alcanzar un equilibrio adecuado entre el coste y complejidad de la instalación y el beneficio obtenido de las nuevas capacidades de monitorización. Endesa procedió a instrumentar sus calde-

⁶⁰ I. Arauzo, *Optimización de consumo de auxiliares en centrales térmicas*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza (1996).

⁶¹ P. A. Roberts (Ed.), "Performance Prediction in Advanced Pulverised Coal Fired Utility Boilers" Summary Report Contract JOF3-CT95-0010. European Commission (1999).

⁶² C. Cortés, "Assessment of Measurement Techniques and Evaluation of Results from Boiler Tests at Teruel Power Station." Final Technical Report. Project JOF3-CT95-0010, en *Joule III Programme*, Vol. 4. *Performance Prediction in Advanced Pulverised Coal Fired Utility Boilers*. European Commission (1998)

ras de la CT Teruel siguiendo la mayor parte de las recomendaciones, y así se aliviaron en gran medida los problemas que planteaba el cálculo del flujo de gas en el interior del paso convectivo y el circuito acoplado de precalentadores.

Las técnicas desarrolladas para la monitorización y simulación se detallan luego en relación con otros proyectos europeos. En lo referente a las actividades de instrumentación, el proyecto Joule se complementó con la participación entre 1996 y 1999 en un segundo consorcio internacional, integrado en el programa BRITE III y llamado *ACORDE-Development of Advanced Control Methodologies Using Reliable Multidetector Sensors for Boilers*, compuesto por EdP, el IST, Endesa, la Fundación CIRCE, AEA Technology (desarrolladores de CFX), la ingeniería holandesa KEMA y la informática griega OMAS. El consorcio fue coordinado por la española Tecnatom SA

En 1997 se comenzó a solicitar regularmente proyectos al programa de la CECA, que aun financiados parcialmente, suponían nuevas posibilidades de investigación en centrales termoeléctricas y contactos nacionales e internacionales. El área objetivo 7220-ED-753 de 1997 constituyó un proyecto de investigación básica en deposición de materia mineral de carbón, integrado entre otras entidades por el Instituto del Carbón del CSIC, el Imperial College de Londres (departamento de materiales) y el CIEMAT. La Fundación CIRCE colaboró con el grupo del Prof. Bernstein de la Universidad Técnica de Dresde en un estudio sobre indicadores semiempíricos de escoriación y ensuciamiento, constituyendo un subproyecto denominado *Slagging and fouling characteristics of coal blends. Correspondence between laboratory tests and plant performance*.

La Universidad de Dresde desarrolló y estudió sus propios métodos de caracterización de combustibles en un reactor de flujo laminar (*drop tube*), en un combustor experimental de 800 kW, y mediante analítica convencional, utilizando carbones turolenses y hullas colombianas y sudafricanas, con la novedad de que se intentaba reproducir la circunstancia habitual en que no se queman carbones individuales, sino mezclas de calidades muy diferentes. En paralelo, la Fundación CIRCE emprendió una investigación sobre el efecto de los mismos combustibles en la operación real de las calderas de la C. T. Teruel, que incluyó: a) el estudio de la incertidumbre en la estimación de las propiedades del carbón realmente alimentado a las calderas y b) la comprobación en planta de los indicadores clásicos y de los desarrollados por el Prof. Berstein en sus laboratorios. Las medidas del *drop tube* (en concreto, la cantidad y tenacidad de los depósitos formados sobre una superficie de prueba) no resultaron estar completamente de acuerdo con la experiencia real. Esto

se debía a que el caudal de combustible que utiliza el aparato es ínfimo, y por tanto la medida poco reproducible cuando se trata de mezclas. Aparte de este resultado negativo, se obtuvieron indicaciones muy valiosas sobre cómo utilizar otros índices semiempíricos para predecir tendencias en la operación de la caldera.

El proyecto fue también parcialmente financiado por el gobierno autónomo aragonés, bajo el título *Estudio de la combustión de lignitos con alto contenido en cenizas para la minimización de problemas operacionales*, en que se colaboró con dos centros locales del CSIC, el Laboratorio de Tecnologías de la Combustión (Litec) y el Instituto de Carboquímica. En la convocatoria CECA de 1998 se obtuvo la participación junto a estas instituciones en lo que iba a constituir la continuación: el proyecto denominado *Advanced characterisation methods for slagging/fouling behavior of low rank coals*, integrado en el área objetivo 7220-PR-048. Allí participaban también, en actividades de modelado fundamental y experimentación, los antiguos laboratorios nacionales británicos del carbón, ahora llamados CRE Group y el Centre d'Etudes et de Recherches de la Combustion (CERCHAR), perteneciente a Charbonnages de France.

En el proyecto se analizándose los datos históricos de Endesa sobre pruebas en las calderas de la C. T. Teruel con diversos tipos de mezclas de carbones, revisándose los métodos tradicionales y avanzados de caracterización y modelización del ensuciamiento, y desarrollándose un modelo semiempírico de escorificación que utiliza como datos de entrada las informaciones normalmente disponibles en una planta termoeléctrica acerca de las mezclas de carbones. El modelo se validó satisfactoriamente con datos de la operación real de la caldera y sus resultados pueden usarse como indicadores mejorados de la escorificación en caso de cambio en la calidad de los carbones o en la composición de las mezclas. Estas actividades, junto a las de anteriores proyectos, constituyeron una tesis doctoral defendida en 2003.⁶³

Por su parte, las tareas de modelado de calderas para monitorización y simulación que se habían comenzado con el Joule se continuaron con proyectos CECA. En el subproyecto *Procedimientos de combustión de mezclas* (PROCOMENZ), integrado en el área 1997/7220-ED-096, se continuó junto con Endesa en el estudio de la instrumentación de la planta y se planificaron y se acometieron pruebas reales en la instalación para desarrollar y

⁶³ E. Llera, *Desarrollo de un modelo semiempírico de escorificación de calderas alimentadas por mezclas de carbones*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza (2003)

validar sistemas de instrumentos y modelos. Igualmente, se adquirió el programa CFX,⁶⁴ comenzando a utilizarlo para simular el hogar. Las actividades continuaron con el proyecto integrado 1999/7220-PR-075 *On-line management system for the advanced control of utility boiler efficiency* (SICOBO), coordinado por Tecnatom y con la participación entre otros de la empresa CINAR asociada al Imperial College y de OMAS. Paralelamente, también se obtuvo participación en el área 1998/7220-PR-047, con un subproyecto denominado *On-line monitoring and control of ash fouling through artificial intelligence techniques*. Esta área era coordinada por CRE y contaba con la participación entre otros del CERCHAR.

Los resultados de estos estudios fueron numerosos en el terreno académico e industrial. Así, se desarrolló junto con Tecnatom un sistema de monitorización y simulación termomecánica *on-line* programada e integrada en el sistema informático mediante bibliotecas de vínculo dinámico. Se hizo uso de los trabajos previos sobre instrumentación y modelado del circuito aire-gases y de modelos agrupados de intercambiadores convectivos y mixtos.⁶⁵⁻⁶⁶ Las simulaciones de hogar CFD conseguían reproducir razonablemente los flujos de calor medidos y la temperatura estimada de gases de salida bajo condiciones limpias (tras cambio de carga), pero no permitían un cálculo lo suficientemente rápido para los propósitos del sistema, lo que se agravaba por el amplio rango de valores y variación temporal que exhibían las señales de flujo de calor a utilizar como condiciones de contorno. Por ello, se acoplaron simulaciones precalculadas del flujo frío y las partículas con un modelo zonal de la radiación y un modelo simple de la combustión del carbón.⁶⁷

El simulador se validó con datos de planta y se demostraron muy buenas capacidades de monitorización del rendimiento global y de la suciedad en hogar, paneles y bancos de tubos radiativos, convectivos y mixtos, así como precalentadores de aire-gases. La aplicación SICOBO corre actualmente en la consola del operador de la CT Teruel. Estos trabajos constituyeron la tesis de Luis Ignacio Díez ⁶⁸ y dieron lugar a posteriores publicaciones.⁶⁹

⁶⁴ AEA Technology plc, *CFX-4.2* (1998).

⁶⁵ L. I. Díez, C. Cortés, I. Arauzo, A. Valero, "Combustion and Heat Transfer Monitoring in Large Utility Boilers." *International Journal of Thermal Sciences* **40**, 489-496 (2001)

⁶⁶ C. Cortés, L. I. Díez, A. Campo, "Modeling large-size boilers as a set of heat exchangers: tips and tricks." *HTD Vol. 269-4 Combustion and Energy systems. Book n° 100529*. The American Society of Mechanical Engineers, pp. 41-48 (2001).

⁶⁷ V. p. ej. G. Hesselmann, S. E. Fish, P. A. Linsell, "The Integration of CFD Generated Data into Engineering Performance Models" Report n° E/96/21. Mitsui Babcock Ltd. (1996).

⁶⁸ L. I. Díez, *Monitorización y simulación en tiempo real de calderas de potencia de carbón pulverizado*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza (2003).

⁶⁹ Principalmente: L.I. Díez, C. Cortés, A. Campo, "Modeling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques. *Applied Thermal Engineering* **25**, 1516-1533 (2005).

Dentro de esta línea se obtuvieron también dos proyectos del 5º programa marco. El primero se denominó *Visual sensing for optimized control of burner bank performance and enhanced plant lifetime* (VISCON). Bajo la coordinación de Tecnatom, en él se trató de ampliar las capacidades de los detectores de *flicker* de llama de carbón, estudiando el espectro para obtener nuevas capacidades de diagnóstico, y de aplicar los resultados a una planta real, de nuevo, la caldera de la C. T. Teruel. Los sensores fueron desarrollados por la compañía danesa HN Miljoudvikling Aps y ensayados con carbones turolenses en el combustor experimental del Imperial College (antes de la jubilación del Prof. Lockwood) y en colaboración con CINAR. Se participó junto con los socios en la especificación y supervisión de la instalación experimental en Teruel, que comprendía 4 sensores instalados en una fila de quemadores. Igualmente, se supervisaron las medidas en la planta y se analizó la relación de los nuevos indicadores (“estabilidad” y “longitud” de llama, previsión de formación de inquemados y contaminantes), con las medidas convencionales.

El segundo proyecto, coordinado por el CERCHAR, se denominó *Cost Abatement for Effective NO_x Reduction in PF Coal Fired Plants* (CAFENOX). Su objetivo respondía al adelanto de fechas con que el gobierno francés aplicó la directiva 2001/80/EC en lo que concierne al NO_x. Dadas las características de los carbones y las calderas de combustible pulverizado francesas (dos plantas de 600 MWe), ello exigía el proyecto inmediato de unidades SCR. Ahora bien, los costes de inversión y de explotación pueden reducirse sensiblemente adoptando medidas primarias. El proyecto tenía como objetivo el análisis de estas medidas tomando como caso de estudio el grupo 5 de la planta de Provenza (Gardanne), que cuenta con un generador diseño Combustion Stein (Alstom), y es propiedad de Charbonnages de France.

Bajo la coordinación del CERCHAR, se efectuaron experimentos en planta y en los laboratorios del IFRF Research Station y de la Universidad de Atenas (Prof. Karakas), para evaluar las medidas primarias en calderas tangenciales, en lo referente a emisiones, rendimiento de la combustión y ensuciamiento. Las estrategias incluían modificaciones del fuego concéntrico e introducción de aire de *overfire*. La Fundación CIRCE (Prof. Cortés) se encargó del modelado CFD completo de la cámara de combustión tangencial, incorporando un modelo desacoplado de la cinética del NO_x⁷⁰ y validando la sensibilidad en NO_x e in-

⁷⁰ Esencialmente, NO_x térmico en equilibrio de radicales de oxígeno, *prompt* por cinética global desacoplada, y tres reacciones acopladas a la combustión de los volátiles y del *char* del combustible para modelar la subsiguiente formación de HCN y NO y el efecto de reducción natural por escalonamiento.

quemados al cambio de condiciones. Los resultados del modelado concordaron razonablemente con las medidas de NO_x promedio en sección de salida y local por sonda de inserción, tras el ajuste de un parámetro de amplia incertidumbre en una aplicación real, el contenido en nitrógeno de los volátiles realmente evolucionados en la llama. Con ello, se consiguió una herramienta numérica utilísima para análisis de estrategias operativas.

El proyecto CAFENOX estuvo relacionado con un CECA denominado CARNO-*Development of a carbon-in-ash notification system*, cuyo objetivo fue validar y mejorar la predicción CFD de inquemados mediante la aplicación de modelos avanzados de la cinética del *char*. Coordinado por CRE, la Fundación CIRCE (Prof. Arauzo) se encargó de la implementación numérica a partir de datos de laboratorio y a contrastar con medidas en una planta real. Estos trabajos han originado, por el momento, una tesis doctoral ⁷¹ y una publicación de importancia.⁷²

Para realizar estos proyectos, se adquirieron capacidades de cálculo CFD, en dos vertientes. En primer lugar, el software/hardware, inicialmente CFX paralelizado sobre máquinas aisladas de varios procesadores, y recientemente, Fluent 6.2 sobre un pequeño cluster de PCs de tipo Beowulf, lo que supone una mejora de uno o dos órdenes de magnitud en velocidad de proceso y más opciones de modelos estándar preprogramados. Ahora bien, las capacidades HW/SW, si bien necesarias, no son lo esencial, por lo que su adquisición fue acompañada por la adecuada formación de becarios e investigadores. En concreto, además del estudio de manuales y bibliografía apropiada y de los cursos rutinarios del suministrador del software, el personal del área térmica se ha formado mediante estancias y cursos en varios centros: el Instituto von Karman (3 becarios doctorales) y el centro CFD y el departamento de energética de la Universidad de Leeds (Javier Pallarés).

Otro tema de esta línea de investigación, dirigido por el Prof. Romeo, ha sido el cálculo adecuado del ahorro de energía y la optimización de la inversión de sistemas de refrigeración del aire de admisión de turbinas de gas. El estudio fue acometido para el departamento de ingeniería de Endesa en relación a grandes plantas comerciales de ciclo combinado, pero también se extendió a instalaciones de cogeneración con turbina de gas (Endesa, FIT-120401-2001-5). El resultado final fue una metodología de cálculo general que

⁷¹ J. Pallares, *Predicción de inquemados en cenizas en calderas de carbón pulverizado. Análisis y evaluación de estrategias de operación*. Tesis doctoral (en realización). Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza (2006).

⁷² J. Pallarés, I. Arauzo, L. I. Díez, "Numerical prediction of unburned carbon levels in large pulverized coal utility boilers" *Fuel* **84**, 2364-2371 (2005).

equilibra el realismo de los datos ambientales detallados y la operación de la turbina de gas con la economía que requiere un estudio de viabilidad rápido.⁷³

La experiencia de monitorización de calderas de potencia también se aplicó dentro de los proyectos del 5º programa marco denominados BIOMAX (Prof. Cortés) e INTCON (Prof. Romeo), que trataron de calderas de biomasa o de mezcla de biomasa y carbón. Del primero hablaremos en la línea de combustión y cocombustión de biomasa. En cuanto al segundo, *Intelligent Process Control System for Biomass Fuelled Industrial Power Plants* (NNE5-2001-128), se aplicaron y extendieron las técnicas de redes neuronales para predecir la suciedad y planificar la limpieza en carga de calderas, tomando como caso de estudio una planta sueca de biomasa de tamaño moderado, perteneciente a la compañía Termiska Processer AB. Los resultados conformaron una tesis doctoral ⁷⁴ y fueron objeto de varias publicaciones.⁷⁵⁻⁷⁶

La predicción de la suciedad de superficies de transferencia en estos modelos y en los anteriores aplicados a centrales de carbón (SIS) se basa en patrones de respuesta fija ajustados paramétricamente de forma empírica, lo que supone variados inconvenientes: imprecisión, falta de datos de ajuste (ya que se descartan los patrones aberrantes), y ausencia del carácter parcialmente aleatorio que posee la respuesta real. Para mejorarlos, se emprendió un esfuerzo multidisciplinar (Prof. Cortés y Prof. Teruel) utilizando series de datos históricos de los medidores de flujo de calor de la CT Teruel. El resultado fue un nuevo modelo más elaborado en que las señales se simulan mediante tres redes neuronales para la probabilidad de (alguna) eficiencia de soplado, la eficiencia misma alcanzada y la evolución dinámica de la señal.

El método resultó ser muy preciso y efectivo; la estructura general y los resultados se publicaron en una revista internacional de prestigio.⁷⁷ Además, a fin de continuar los desarrollos (que carecían ya de financiación), se promovió y se consiguió junto con el Prof. Spliethoff de la Technischen Universität München un proyecto del Fondo de investigación

⁷³ R. Gareta, L. M. Romeo, A. Gil, "Methodology for the economic evaluation of gas turbine air-cooling systems in combined cycle applications" *Energy* **29**, 1805-1818 (2004).

⁷⁴ R. Gareta, *Sistema de supervisión basado en modelos inteligentes para gestionar los ciclos de limpieza en una caldera de biomasa*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza (2005).

⁷⁵ L. M. Romeo, R. Gareta, "Neural Network for Evaluating Boiler Behaviour" *Applied Thermal Engineering* **26**, 1530-1536 (2006).

⁷⁶ L. M. Romeo, R. Gareta, "Hybrid System for Fouling Control in Biomass Boilers". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. En imprenta (2006-2007).

⁷⁷ E. Teruel, C. Cortés, L. I. Díez, I. Arauzo, "Monitoring and Prediction of Fouling in Coal-Fired Utility Boilers Using Neural Networks" *Chemical Engineering Science* **60**, 5035-5048 (2005).

del carbón ⁷⁸ denominado *Intelligent monitoring and selective cleaning control of deposits in pulverized coal boilers* (CLEAN SELECTIVE, RFCR-CT-2006-00008). En él participan entre otros Endesa y la CT Teruel y la empresa alemana de sopladores y sistemas de limpieza Clyde Bergemann.

El objetivo es desarrollar y mejorar los modelos de redes neuronales para utilizarlos *off-line* en el diseño de un sistema de control que actúe sobre los sopladores y optimice el rendimiento de la planta. El cálculo de rendimiento utilizará los modelos ya desarrollados sobre respuesta térmica de la caldera, con el *input* adicional de la suciedad predicha por las redes. Adicionalmente, se quiere implantar el sistema en operación real de la CT Teruel, al menos en modo consejero, y, si es posible, generalizar el método a secciones convectivas con monitorización de la absorción total. El proyecto, para el que se cuenta adicionalmente con un investigador doctor y un becario doctoral, se encuentra actualmente recién comenzado en base a los desarrollos preliminares comentados.

Esta línea de trabajo sobre centrales termoeléctricas incluye otros proyectos, publicaciones y resultados de menor entidad, teniendo bastantes de ellos el carácter de prestación de servicio tecnológico a la Empresa. No obstante, merece la pena incluir aquí otra actividad de interés y actualidad, la relacionada con el desarrollo de plantas de carbón de combustión en lecho fluido circulante (CFB) de gran tamaño.

Esta tecnología ha tenido un éxito comercial notable,⁷⁹ si bien posee una limitación intrínseca: la dificultad de escalar a tamaños grandes debido a la baja temperatura e intensidad de la combustión que hacen crecer grandemente la superficie necesaria de evaporación. Así, mientras que el carbón pulverizado permite cómodamente 850-900 MWe con vapor supercrítico y ofrece por encima de 1 GWe, la mayor planta CFB, todavía en construcción, se limita a 450 MWe, y la mayor parte no superan los 300 MWe con vapor subcrítico. La ventaja de añadir la economía de escala a las bondades del CFB es evidente.

Por ello, los grandes fabricantes desarrollan sus estudios y diseños para una central CFB en el entorno de unos 800 MWe. El área térmica del CIRCE participa en estos desarrollos integrada en un gran proyecto del Fondo de investigación del carbón denominado *Utility scale CFB for competitive coal power* (CFB800, RFCR-CT-2005-00009). Este es

⁷⁸ Programa europeo que continua con los fondos CECA de I+D.

⁷⁹ Y en este sentido puede considerarse única, entre todos los grandes conceptos de utilización avanzada del carbón que intentaron desarrollarse entre finales de los 1970 y de los 1990.

promovido por Foster Wheeler Energia Oy y el ente público de investigación VTT (Finlandia) con la participación de Siemens Power Generation AG y Endesa Generación.

Dentro de una gran *roadmap* de desarrollo en diversas áreas, el objetivo del CIRCE es optimizar el ciclo de vapor y su integración con la parte fría de caldera. Para ello se ha construido un simulador del proceso en ASPEN y se están simulando diversas ideas y variaciones sobre el diseño original. Adicionalmente, como parte de estudios más avanzados, se están intentando introducir técnicas formales de optimización no lineal y con variables enteras. El trabajo es dirigido por el Prof. Cortés y conforma el tema de una tesis doctoral prevista para 2007.

Centrales de combustión en lecho fluido a presión.

Entre 1994 y 1998 se mantuvo una colaboración muy fructífera con la central de combustión en lecho fluido a presión (PFBC) de Escatrón, perteneciente a Endesa. Las actividades, en principio de investigación aplicada y servicio a planta, fueron muy variadas, centrándose buena parte de ellas en diversas mejoras de la operación, en evaluación de pruebas y ensayos, y en el problema principal que planteaba la tecnología con los carbones utilizados: el ensuciamiento y atasco de los ciclones.

Como uno de los resultados principales, se completó el modelado semiempírico del lecho presurizado para su integración en un simulador de la central. El simulador se construyó con las correlaciones y modelos semiempíricos de la bibliografía para el lecho fluido, y técnicas estándar para las turbinas de gas y vapor, y los resultados se ajustaron y se validaron con datos de operación real. También se construyó un modelo cuasi tridimensional de la combustión en el lecho. El trabajo dio lugar a varias publicaciones,⁸⁰ así como a la tesis doctoral del Prof. Romeo.⁸¹

En cuanto a los ciclones, el peculiar mecanismo fisicoquímico que provocaba sinterización de la ceniza a 850 °C había sido identificado y estudiado por el Instituto de Cerámica y Vidrio de la Universidad de Santiago de Compostela, e intentado manejar en la práctica por ABB Carbon mediante diversas soluciones, ninguna de las cuales alcanzó un gran

⁸⁰ Notablemente: L. M. Romeo, C. Cortés, "Simulation of a full-scale pressurized fluidized bed combustor by using semiempirical pilot plant correlations." *Revue Générale de Thermique* **37**, 862-873 (1998).

⁸¹ L. M. Romeo, *Simulación de una central térmica de lecho fluido a presión*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza (1997).

éxito. En relación a este problema, el área térmica del CIRCE realizó dos aportaciones significativas.

Por una parte, un nuevo medio de detectar el atasco, por medida de la caída de presión en el cuerpo del ciclón. En efecto, los depósitos se acumulaban formando una costra simétrica en las paredes, lo que previsiblemente debía conducir a una *disminución* de las pérdidas de carga, por reducción del diámetro “efectivo” del separador. Los ciclones se instrumentaron en consecuencia y se analizó la señal, confirmándose la tendencia. Las medidas se caracterizaron, y a partir de entonces, el operador de Escatrón cuenta con un preaviso sobre la posibilidad de incidentes, cuando la caída de presión desciende por debajo de un determinado umbral. Esto resulta muy útil frente a la indicación convencional, basada en el enfriamiento de la termosonda de la línea de extracción de cenizas, inherentemente muy lenta. Con la nueva detección, las maniobras de desatasco de emergencia pueden iniciarse antes, y también, el disparo del grupo, ahorrándole daño a la turbina de gas. En este sentido, se obtuvo evidencia indirecta del efecto complementario: una pérdida de eficacia de separación, que se mostraba mediante una fuerte correlación negativa entre las nuevas medidas y la del opacímetro de humos en chimenea.

En segundo lugar, como única solución práctica del problema, se propuso la refrigeración completa con aire del cuerpo del ciclón, para disminuir la temperatura del metal y, de acuerdo con los estudios del Instituto de Cerámica y Vidrio, suprimir la sinterización. Por supuesto, ello supondría un descenso de la temperatura de los gases y una pérdida de potencia en la turbina de gas, que tendría que repotenciarse de alguna manera, previsiblemente con gas natural. La estimación preliminar mostraba un balance económico positivo, pero la solución no fue del agrado de ABB o de la central, por motivos obvios, y aunque se calculó detalladamente la refrigeración y se propuso una prueba en una de las líneas para estimar con más fiabilidad la pérdida de potencia, finalmente no se acometió.

En 1995 estaba claro que pocas más actividades podían realizarse para estudiar el problema de los ciclones con las medidas de planta. Entonces, se propuso la construcción de una instalación experimental. La idea se basaba en los trabajos del Prof. Glicksman del MIT,⁸² que había mostrado cómo podía preservarse la semejanza fluidodinámica entre el lecho presurizado y caliente (de la central de Tidd) y un modelo de flujo frío a presión cer-

⁸² L. R. Glicksman, P. A. Farrell, “Verification of the simplified hydrodynamic scaling parameters for commercial pressurized fluidized bed combustors. Part I—Bubbling fluidized beds. *Proceedings of the ASME 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, Vol. 2, pp. 981-990 (1995).

cana a la atmosférica. Simplemente, se trataba de repetir lo mismo con el ciclón y sistema de extracción.⁸³ Esta vez, la idea fue del agrado de Endesa y, financiada al 50 % por la Fundación CIRCE, la instalación se diseñó y se construyó en los talleres de la CT Escatron.

Una vez elegida la escala de 1/5 por motivos de economía y la capacidad de reproducir detalles finos del flujo, se procedió al diseño, construcción y operación preliminar. El flujo en el ciclón de la unidad PFBC había sido considerado por ABB como la mera composición de un separador ciclónico del tipo caracterizado clásicamente ⁸⁴ con un flujo bifásico fluidizado y diluido dentro de la pata prolongada de extracción. Esto resultó estar completamente equivocado, observándose claramente que el vórtice se prolongaba dentro de la pata (construida en metacrilato) debido a la succión. Con esta información, se procedió a componer un escalado físico aproximado, que, en breve, despreciaba el número de Stokes por la alta carga de sólidos (y así permitía utilizar ceniza real) y conservaba el de Froude, el *swirl* y el caudal relativo de extracción.

Bajo esas condiciones, se efectuaron medidas de presión en entrada/salida de ciclón y a lo largo de la pata, y por comparación con datos de la instalación real, se demostró que los adecuados coeficientes adimensionales coincidían, confirmando (hasta donde era posible hacerlo) la semejanza fluidodinámica.⁸⁵ Naturalmente, ello implicaba la posibilidad de estimar la eficiencia de separación real, si bien no pudo confirmarse dada la práctica imposibilidad de medir esos datos dentro de la vasija del combustor en carga. En cualquier caso, se tomaron medidas para calcular la eficiencia del ciclón experimental, mediante estimación adecuada del periodo de arranque, pesadas y separación gravimétrica de los sólidos recogidos en los filtros.

Posteriores investigaciones resultaron por supuesto en nuevos estudios y correlaciones sobre la caída de presión y la eficiencia de ciclones de alta carga de sólidos.⁸⁶ Igualmente, se analizó a través de las medidas de presión de la pata la inestabilidad en la extracción y el fenómeno clásico de inversión del vórtice en la parte inferior o “longitud natural”

⁸³ Aunque finalmente resultó que la idea estaba equivocada, pues las relaciones de escalado aproximado eran completamente diferentes, por supuesto, al serlo también los flujos.

⁸⁴ V. p. ej., A. J. ter Linden, “Investigations into cyclone dust collectors.” *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers* **160**, 233-251 (1949). y H. J. van Ebbenhorst Tengbergen, “Vergleichsuntersuchungen an Zyklonen” *Staub Reinhaltung der Luft* **25**, 486-490 (1965).

⁸⁵ A. Gil, L. M. Romeo, C. Cortés, “Cold flow model of a PFBC cyclone.” *Powder Technology* **17**, 207-220 (2001)

⁸⁶ A. Gil, L. M. Romeo, C. Cortés, “Effect of the Solid Loading on a Pressurized Fluidized Bed Combustor Cyclone with Pneumatic Extraction of Solids.” *Chemical Engineering & Technology* **25**, 407-415 (2002)

del ciclón,⁸⁷ también influenciado por la concentración de partículas.⁸⁸ Además de estas publicaciones, parte de los trabajos constituyeron la tesis doctoral de la Prof. Gil.

Muy tristemente, Endesa decidió terminar cualquier investigación relacionada con las plantas PFBC a finales de 1998, y el laboratorio experimental se terminó por desmontar a finales de 1999. Sin embargo, como quiera que aún quedaban abundante material empírico e ideas por explotar, y necesitando de un puente para abrir la línea de biomasa, en 2001 se decidió continuar con más estudios sin financiación, principalmente para ofrecer una tesis doctoral de mínima calidad al becario de investigación José Velilla, que había realizado su proyecto fin de carrera en la instalación.

En efecto, intrigados por la naturaleza del flujo en la pata de extracción, nuestras medidas no se habían limitado a las presiones, sino que se había conseguido que la Fundación CIRCE financiara un sensor bidireccional de hilo caliente, se había diseñado una pata especial para efectuar mediciones estacionarias en flujo limpio, estas se habían efectuado, procesado para determinar la dirección de la componente axial, y publicado en el último de los artículos antes referidos. Atendiendo a una queja de un revisor anónimo de *AICHE Journal*, la idea general era ahora la simulación CFD del ciclón y del flujo en la pata prolongada, con objeto de validar los métodos numéricos en tal contexto mediante las medidas disponibles.

Sorprendentemente, resultó que el revisor no sabía gran cosa sobre la verdadera dificultad de modelar numéricamente un ciclón, pero a la vez abrió posibilidades insospechadas de investigación por la vía numérica, que se formalizaron en una tesis de mayor calado que el contemplado inicialmente.⁸⁹ En resumen, la bibliografía dejó claro que el flujo rotante en el ciclón y en la pata no podía modelarse fielmente mediante un simple modelo de turbulencia κ - ε y esquemas numéricos de primer orden. Por ello se adoptó un modelo de esfuerzos de Reynolds, el así llamado SSG,⁹⁰ que por su relativa sencillez ha sido incorporado de serie en muchos programas CFD comerciales, junto con una malla estructurada adecuada y una discretización de la advección de segundo orden.

⁸⁷ R. McK. Alexander, "Fundamentals of cyclone design and operation." *Proceedings of the Australasian Institute of Mineral Metallurgy*, n° 152, 203-228 (1949)

⁸⁸ A. Gil, C. Cortés, L. M. Romeo, J. Velilla, "Gas-particle flow inside cyclone diplegs with pneumatic extraction" *Powder Technology* **128**, 78-91 (2002).

⁸⁹ J. Velilla, *Estudio del flujo en el interior del conducto de extracción de sólidos de un ciclón de una central térmica de lecho fluido a presión*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza (2005).

⁹⁰ G. G. Speziale, S. Sarkar, T. Gatski, "Modelling the pressure-strain correlation of turbulence: an invariant system dynamic approach." *Journal of Fluid Mechanics* **227**, 245-272 (1991).

La sorpresa fue que la solución no convergía a un valor estacionario. Abundando en la bibliografía, ello también sucedía con algunas simulaciones κ - ε , y parecía capturar el fenómeno conocido como *precesión del núcleo del vórtice* (*precessing vortex core*, PVC), por el que el flujo espiral ascendente dentro del ciclón es inestable y efectúa un movimiento de precesión local que se percibe como una rotación en el plano transversal.⁹¹ De hecho, según se supo luego, el origen del fenómeno de inversión del vórtice no era la mera depresión creada por fuerza centrífuga, como se había considerado clásicamente,⁹² sino la *adhesión transitoria e inestable de esta estructura a la pared del ciclón*.⁹³ En el ciclón de Escatrón, donde ya se había detectado un flujo espiral inesperado, parecía probable que este fenómeno se manifestara también en la pata.

En consecuencia, la simulación se cambió para que ejecutara un transitorio, lo que posiblemente se conoce a veces como resolver las ecuaciones URANS (*Unsteady, Reynolds-Averaged Navier Stokes*). Desde un punto de vista fundamental, y comparando con los métodos de grandes remolinos (LES), el procedimiento plantea dudas sobre el significado de lo que se está haciendo, naturalmente, pues la frecuencia de las fluctuaciones “capturadas” se solapa con las de la propia turbulencia. Sin embargo, en nuestro caso, el acuerdo con los datos experimentales de velocidad y presión mejoró notablemente considerando que estos constituían realmente promedios temporales de un fenómeno periódico. Resolviendo un intervalo de 200 ms, se consiguió una convergencia adecuada para pasos de 5×10^{-5} s, que detectaba claramente el movimiento seudoperiódico (frecuencia predominante en torno a 100 Hz).

Los campos calculados de velocidad y presión aparentaban un completo realismo representando la observación experimental del PVC tal como se ha descrito más arriba. Además, las predicciones parecían reproducir razonablemente la posición de la inversión del vórtice anteriormente determinada en la instalación experimental mediante las medidas de presión, y también explicar el fenómeno de la formación de un anillo de restos de polvo observado en la pared transparente de la pata.

⁹¹ T. O'Doherty, A. J. Griffiths, N. Syred, P. J. Bowen, W. Fick, “Experimental Analysis of Rotating Instabilities in Swirling and Cyclonic Flows.” *The International Journal of Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing* 7, 245-268 (1999). Realmente el movimiento conjunto es a su vez helicoidal.

⁹² V. p. ej. Alexander, Op. Cit. (1949).

⁹³ A. C. Hoffmann, L. E. Stein, *Gas Cyclones and Swirl Tubes. Principles, Design and Operation*. Springer Verlag (2002).

Posteriores medidas experimentales y cálculos CFD confirmaron plenamente nuestras simulaciones.^{94,95} Si bien la investigación podría haber continuado con algunas ideas evidentes (simulación LES, medidas con promedio de fase detectada por presión), no pudo hallarse financiación para ello y finalmente se abandonó. Con todo, a principios de 2006 escribimos una revisión sobre el tema para *Progress in Energy and Combustion Science*, a petición de su editor, el Prof. Chigier. El artículo ⁹⁶ fue aceptado con correcciones por parte de tres expertos en el tema; uno de ellos, A. C. Hoffmann, un autor de gran peso en la bibliografía de ciclones,⁹⁷ se identificó y se discutió abiertamente con él. El trabajo está actualmente en fase de revisión.

Combustión y cocombustión de biomasa.

En 1999-2000, se comenzó a experimentar el declive de la investigación en carbón, con una reducción notable de la financiación privada (terminando un camino iniciado por la ley del sector eléctrico), y la anunciada reducción de los fondos CECA y comunitarios destinados a esa área. Aunque algunos desarrollos podían continuar sin financiación directa (p. ej., simulaciones CFD, aplicación de redes neuronales, control avanzado), la línea de investigación debía ampliarse o transformarse.

El campo más relacionado con la combustión de carbón y más prometedor en aplicaciones y proyectos era evidente: la combustión de biomasa. En 2000-2001, el área térmica del CIRCE implantó el Laboratorio de Cocombustión de Biomasa. Esta actividad fue parcialmente financiada por el Plan Nacional de I+D dentro del proyecto *Cocombustión en la Central de Escucha* (2FD7-0764). La instalación consiste en un quemador de tipo ciclónico de 800 kW, escalado a partir de diseños en el rango mínimo de 1.5-2 MW por la empresa suministradora.⁹⁸ El foco disipador es una caldera pirotubular de agua caliente modificada a tal efecto, y del equipo utilizado para pruebas en la CT Escucha, se trasladaron y se pusieron en servicio el molino de cuchillas/martillos y el secadero rotativo de biomasa, así como la analítica de gases efluentes, que incluye O₂, CO, CO₂, SO₂ y NO_x. El laboratorio

⁹⁴ W. Peng., A. C. Hoffmann, H. W. A. Dries, M. A. Regelink, L.E. Stein, "Experimental study of the vortex-end in centrifugal separators: The nature of the vortex end." *Chemical Engineering Science* **60**, 6919-6928 (2005).

⁹⁵ W. Peng., A.C. Hoffmann, H.W.A. Dries, M.A. Regelink, K-K. Foo, "Neutrally bouyant tracer in gas cleaning equipment: a case study." *Measurement Science and Technology* **16**, 2405-2414 (2005).

⁹⁶ C. Cortés, A. Gil., "Modeling the gas and particle flow in cyclone separators" Aceptado en *Progress in Energy and Combustion Science* (2006-2007).

⁹⁷ V. Op. Cit.

⁹⁸ En concreto, Agrest SRL, que utiliza el concepto de "cámara torsional" desarrollado en los años 1950-60 por el ingeniero argentino Jacobo Agrest para la combustión de biomasa, v. p. ej. A. K. Gupta, D. G. Lilley, N. Syred, *Swirl Flows*. Abacus Press (1985), Cap. 5 "Cyclone separators and combustors."

se utiliza para explorar la viabilidad técnica genérica de esa forma de combustión de biomasa residual, sus mezclas y mezclas con carbón y coque de petróleo.

Paralelamente, en 2001 se obtuvo un proyecto PROFIT junto a una PYME de calderería para desarrollar quemadores de cascara de almendra pulverizada. Se diseñó y se construyó en la nave de la empresa un prototipo de quemador de rotación de unos 125 kW, en disposición horizontal y con cámara adiabática, que funcionaba adecuadamente (≤ 200 ppm CO) para tamaños finos ($\leq 200 \mu\text{m}$). Si bien las condiciones de desarrollo fueron, digamos, muy empíricas, y estuvieron bastante lejos de las de un laboratorio científico, el proyecto generó el conocimiento y la confianza necesarios para configurar el siguiente. Un principio fundamental fue que la nueva línea debía poseer una fuerte componente experimental, pues de otra manera no se podría avanzar gran cosa ni en investigación básica ni en aplicaciones industriales..

Para ello se aprovecharon evidentemente las instalaciones del combustor ciclónico, y a la vez se amplió el laboratorio para permitir investigaciones de tipo más fundamental. Para la financiación inicial, se consiguió la integración en un proyecto de la última convocatoria del 5º Programa Marco, denominado *Maximum Biomass Use and Efficiency in Large-Scale Cofiring* (BIOMAX, NNE5-2001-291). Este fue coordinado por la institución finlandesa de investigación VTT y trató de la optimización de la cocombustión de mezclas de carbón y biomasa en grandes centrales.

Los objetivos de nuestro grupo fueron diseñar, construir y operar un quemador estándar de rotación de sólidos pulverizados, para experimentar la combustión de diversas biomasa y mezclas, así como los efectos de ensuciamiento que podían esperarse. El combustor se diseñó en base al modelo común de combustor vertical con fuego dirigido hacia abajo, de 500 kW de potencia (IFRF, IST, Imperial College, etc.). El quemador se escaló a partir de una unidad industrial típica de 12 MW de carbón, con criterio de tiempo de residencia constante, y para un combustible de baja potencia calorífica ($\text{PCS} \approx 30 \text{ MJ/kg}$) y alto contenido en volátiles (30-40 %), dotado de ignición por gas natural, cámara de remanso de aire secundario, vanos de rotación y garganta refractaria. El cuerpo superior del combustor está constituido por tres anillos desmontables recubiertos con hormigón refractario y refrigerados por agua, con accesos para sondas. La parte inferior posee otros tres anillos refrigerados, alojando el central un banco de tubos de aire instrumentado con el propósito de estudiar la deposición sobre bancos de intercambio. Para muchos de los elementos, se utilizaron técnicas CFD como ayuda al diseño fluidodinámico y térmico.

El equipo fue fabricado y montado bajo nuestra dirección por una empresa de calderería, se puso en marcha tras las inevitables modificaciones, y se ha aprendido a operarlo en condiciones estables y representativas (≤ 50 ppm CO para $\lesssim 100-300 \mu\text{m}$), quemando carbón alto en volátiles, diversas biomásas de calidad (cáscara de almendra, residuos forestales y orujillo de oliva) y mezclas de biomasa y carbón.

Paralelamente, se inició un programa de estancias del personal en centros extranjeros. Como primera actividad, durante el presente curso académico 2005-06, la Prof. Gil realizó una estancia en VTT (Finlandia), estudiando la combustión de biomasa y carbón en los laboratorios de lecho fluido de la institución. Esta estancia formó parte de las acciones del programa IRDI de la Universidad de Zaragoza. (Impulso y Reconocimiento de la Dedicación Investigadora del personal docente e investigador).

En el Laboratorio de Cocombustión de Biomasa reside la línea actualmente más activa del área térmica del CIRCE, en la que participan 4 becarios de investigación y la mayor parte de investigadores contratados y profesores. Por supuesto, en el plano científico, la línea de investigación debe considerarse incipiente, con resultados todavía preliminares, como manifiesta la tabla 1. No obstante, se cuenta con la financiación y objetivos científico-técnicos perfectamente definidos a través de los siguientes proyectos:

- *Development of Advanced Monitoring Methods to Improve Boiler Availability and Performace* (ADMONI, RFC-CR-03007). Proyecto del Fondo del Carbón coordinado por VTT y con la participación de socios europeos. El objetivo es el estudio de la cocombustión de biomasa en pequeñas proporciones en centrales convencionales de carbón. En concreto se ejecutan pruebas experimentales de *burnout* y suciedad de superficies con carbones y biomásas del ámbito europeo.
- *Optimización de la utilización de biomasa en centrales térmicas de carbón: Pretratamientos y cocombustión* (PNI+D ENE2004-05137/ALT). Proyecto del Plan Nacional de Energía con el objetivo de caracterizar el proceso completo de utilización de la biomasa en centrales existentes: pretratamiento, compuesto básicamente de secado y molienda, y cocombustión con carbón.
- *Global process to improve Cynara Cardunculus exploitation for energy applications* (BIOCARD, FP6 STREP SUSTDEV 1.2.5 No. 019829). Proyecto del 6º Programa Marco coordinado por Tecnatom y con la participación de socios españoles y europeos. Nuestro grupo coordina el área de combustión de la materia vegetal residual

del cardo perenne (*Cynara Cardunculus*) una vez separadas las semillas para producir biodiesel. Así, se estudia la cocombustión en grandes centrales (CIRCE), las parrillas (Universidad Técnica de Dinamarca) y los lechos fluidos (VTT). El tema posee un interés práctico notable, ya que la planta parece óptima para la producción de biodiesel en clima mediterráneo, pero la biomasa herbácea y el método de cosecha y manejo introducen propiedades muy negativas para la combustión. Además de las pruebas en laboratorio, se prevén modelos CFD de los quemadores de rotación operando con carbón y biomasa.

- TERMOPIV: Combustión y transferencia de calor analizadas con PIV avanzado (ENE2006-13617/CON). Proyecto del Plan Nacional de Energía liderado por el grupo del Prof. Lecuona de la Universidad Carlos III de Madrid. El objetivo es aplicar las técnicas de velocimetría por imagen de partículas (*Particle Image Velocimetry*; PIV) para medir en un flujo con a) fuertes gradientes de temperatura, b) combustión de partículas y c) rotación y sus inestabilidades asociadas, lo que plantea ese triple desafío, y muchas oportunidades. El papel de nuestro grupo es el diseño del equipo, posiblemente de menor tamaño que el actual, que implemente una llama estable y posea acceso óptico y otras condiciones para la medida PIV.

El plan científico de todos estos proyectos se concibe de manera global en relación con el laboratorio, y comprende las siguientes actividades, actualmente en distinto grado de realización:

- Secado de biomasa. Se trata primeramente de adaptar un equipo concebido para el uso industrial al uso científico. Para ello: 1) Estudio de parámetros adimensionales para escalar el experimento y fijar rangos de tamaño de partícula, flujos, velocidades de rotación del secadero, etc. 2) Modificación del diseño de alimentación y evacuación de sólidos para asegurar la medida adecuada de su caudal y la estanqueidad. 3) Introducción y puesta a punto de técnicas de medida avanzadas: termopares con transmisión inalámbrica para temperatura interior al trommel, humedad en gases a altas temperaturas (200 °C en este contexto), sondas de humedad y temperatura miniatura con almacenamiento de datos para seguir el producto y sistema de toma de muestras rápidas en el trommel giratorio.

Posteriormente, se trata de diseñar la matriz de experimentos y efectuar series de medidas completas. Con el escalado ya obtenido, es sencillo entonces estimar los pa-

rámetros de una instalación a escala real. A la vez, un objetivo científico de gran alcance y actualidad es la validación (y el posible desarrollo) de modelos avanzados de flujos dispersos de partículas. En este sentido, se cuenta con contactos con algunos investigadores del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería de la UPC (CIMNE) activos en esta área.

- Molienda de biomasa. El molino existente se ha transformado en una instalación de doble etapa capaz de moler diversos tipos de biomasa a los tamaños requeridos y de efectuar la clasificación de forma eficaz. Paralelamente se está desarrollando la instrumentación y el control. Las actividades previstas y posibilidades de plan científico son similares a las del secadero, con el añadido del desarrollo de modelos de molienda de sólidos, un campo todavía más arduo y poco trabajado que el de los flujos dispersos de partículas.
- Modificaciones en el combustor e instrumentación convencional. Se está diseñando el calentamiento del aire secundario a 250-300 °C con el objeto de acelerar el precalentamiento del equipo previo al arranque y asegurar una operación todavía más estable y acorde a la realidad industrial.

Otro punto crítico con carbón micronizado y biomasa es el sistema de alimentación de sólidos. Se ha diseñado y se está implantando un sistema de doble tolva y tolvines separados, con el doble objetivo de asegurar la bondad del flujo de cada combustible y su mezcla en suspensión, y permitir la determinación de los caudales máscicos por pesada continua.

Por otro lado, para estudios más rigurosos de deposición y corrosión, con examen microscópico y analítico de las capas formadas sobre superficies de simulación, se está desarrollando una sonda portátil removible, que evite la deposición de capas poco representativas durante arranques, cambios de combustible y situaciones anómalas.

- Instrumentación avanzada del combustor. Un segundo objetivo del proyecto TERMOPIV, aun a medio-largo plazo, consiste evidentemente en la adquisición de técnicas avanzadas de medida termofluidodinámica, en colaboración con los investigadores de la Carlos III.

- Simulación CFD del combustor. En una primera etapa se acomete mediante Fluent el modelado geométrico y de flujo frío para establecer el dominio (campos lejanos y condiciones de contorno), la independencia de malla, el modelo más adecuado de turbulencia y la estabilidad de las soluciones numéricas y el paso temporal. Una segunda etapa debería incorporar el flujo de partículas, su evolución fisicoquímica (desvolatilización y combustión), la difusión de masa y la difusión y radiación de calor.

Preliminarmente, de forma parecida a lo que sucedió con los ciclones, el flujo doble rotante parece bastante inestable. Simulado mediante κ - ε , la “cebolla” central de recirculación (o más técnicamente la ruptura de torbellino de tipo 0) es inestable, induciéndose en la cámara PVC y evolución de torbellinos en el plano axial-radial.

Ello abre varias vías posibles, no excluyentes, a saber: Simulación avanzada de la turbulencia (LES) y comparación con bibliografía (o más remotamente medidas propias) para confirmar los detalles del flujo. Significado (discutible) de una simulación conjunta estacionaria. Estudio de la posible interacción de la inestabilidad debida al flujo con modos propios del flujo reactivo de densidad variable. Todas estas posibilidades suponen campos de estudio muy actuales, complejos y de altísimo interés científico.

La ejecución de todas las actividades experimentales ha exigido también una infinidad de actividades rutinarias (pero necesarias) de organización del laboratorio: gestión del miniparque de combustibles; diseño e implantación de seguridades antiexplosión y antiincendio; organización y unificación de los instrumentos de medida, maniobra y control de la instalación; desarrollo e implantación de protocolos de operación, seguridad y realización de medidas.

Captura de CO₂ en centrales térmicas.

Análogamente a la línea anterior, estas actividades han surgido naturalmente del campo de la energética aplicada, y si bien su estado es aún más incipiente, la importancia que el tema está cobrando hoy en día hace prever que pronto alcancen el estatus de una línea independiente de investigación. Las investigaciones en captura de CO₂ del área térmica se coordinan estrechamente con las del área de eficiencia energética.

Dejando a un lado las actividades de acompañamiento en formación, gestión y organización y los estudios técnico-jurídicos sobre captura de CO₂ de que también se encarga la Fundación CIRCE, esta línea se sustenta en los proyectos que muestra la tabla 1; principalmente estudios de gabinete financiados por el PROFIT (FIT-120000-2004-51 y 180), Endesa y el Plan Nacional (ENE2004-06053/CON) más un proyecto completamente experimental del Plan Nacional (PNI+D ENE2005-03286/ALT). También se trabaja para el Consorcio Estratégico Nacional en Investigación Técnica del CO₂ (CENIT CO₂), si bien el grueso de actividades científicas previstas se refiere a la cocombustión con biomasa en centrales, según se ha descrito en la línea anterior.

Los principales puntos del plan científico son los siguientes:

- Estudios de captura de CO₂ en centrales. Se simula el funcionamiento técnico a nivel de proceso de las principales propuestas/previsiones tecnológicas. Esto incluye oxicomcombustión y captura en postcombustión, adaptación de plantas existentes y concepto de nuevas plantas. Como novedad, se incide en el acople con *repowering* mediante turbinas de gas, tanto convencional (gas natural) como renovable (gasificación de biomasa).

Puesto que los estudios tienen el carácter de prospectiva genérica, las simulaciones hacen uso de parámetros y curvas de funcionamiento conocidos o razonablemente supuestos. Los resultados son fácilmente traducidos a cifras de rendimiento energético y emisiones específicas. También se calculan parámetros económicos con vistas a la optimización de conceptos, si bien los términos de inversión y escalación de costes son todavía más inciertos que los parámetros de funcionamiento técnico.

- Ciclo de carbonatación-calcinación.^{99,100} Esta técnica posee un especial interés regional/nacional pues se cree que podrá ser efectiva con carbones de alto contenido en azufre, como los de las cuencas de Teruel y Mequinenza, asistiendo o incluso haciendo innecesaria la desulfuración de gases, siendo que otras técnicas más establecidas o viables de captura en postcombustión (como la absorción con aminas) serán seguramente de poca aplicación debido al efecto negativo del SO₂.

⁹⁹ J.C. Abanades, J.E. Oakey, D. Alvarez and J. Hämäläinen, "Novel combustion cycles incorporating capture of CO₂ with CaO" *Greenhouse Gas Control Technologies. Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. J.Gale, Y. Kaya (Eds.), Vol. I, 181-186 (2003).

¹⁰⁰ J. M. Escosa, C. Cortés, L. M. Romeo, "Repowering of fossil fuel power plants and reversible carbonation/calination cycle for CO₂ abatement" *Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE 2005, Thermodynamics and the Design, Analysis and Improvement of Energy Systems*, CDROM, paper No. 79883, ASME (2005).

El estudio posee un doble alcance. Por un lado, se utiliza un simulador de proceso exactamente en la misma forma y con los mismos objetivos que acabamos de ver, si bien con algo más de detalle de componentes.

En segundo lugar, se trabaja en el prediseño “duro” de componentes, a su vez dividido en dos fases. En la fase de desarrollo de conceptos, cada uno se somete al estudio de gabinete más profundo disponible.¹⁰¹ La segunda fase, más realista, intenta prever el *roadmap* tecnológico hasta la eventual fabricación comercial, incluyendo las leyes de escala previsible basadas en la anterior fase conceptual y los posibles hitos de tamaño de las instalaciones (medidas básicas de laboratorio, instalación piloto, planta semiindustrial/demostración, comercial).

- Oxidación en lecho fluido. Es el objeto de trabajo del proyecto del Plan Nacional *Oxidación. Desarrollo de una tecnología eficaz para la reducción de emisiones de CO₂*. Con este fin, se ha diseñado un laboratorio completo de lecho fluido burbujeante de unos 100 kW de calor. Los equipos están concebidos para su uso con combustibles sólidos y sorbente/material de relleno, estableciendo la oxidación con aire ambiente o con una mezcla artificial de CO₂ y O₂ que simula las condiciones de oxidación. (La recirculación de CO₂ puro está prevista de forma eventual al final del proyecto). El lecho es del tipo provisto con camisa de refrigeración y se ha dotado de un número elevado de accesos para sondas de presión, temperatura, toma de muestra y ópticas, a fin de permitir estudios avanzados.

Tras la futura construcción de la instalación, el primer objetivo del proyecto es aprender a operarla en estas condiciones de oxidación simulada y utilizando carbón, biomasa y mezclas, a la par que se comprueba un juego básico de instrumentación P/T, y se verifican las partes del diseño específicamente dedicadas a preservar la mezcla gaseosa del interior. A posteriori se trata obviamente de caracterizar la oxidación y la transferencia de calor en presencia de aire y en condiciones de oxidación, a fin de conseguir de primera mano información experimental sobre las

¹⁰¹ Por ejemplo, la necesidad de calcinar en atmósfera de CO₂ y con gran área de transferencia calentador-partículas para minimizar el volumen parece eliminar los lechos fluidos y hacer atractivos los flujos con rotación. Entonces, se revisa la literatura básica de transferencia de calor sobre el tema, se efectúan estimaciones basadas en correlación y, si procede, se refinan las previsiones con un cálculo elaborado, como CFD.

diferencias. Esta es muy escasa en la bibliografía actual sobre el tema, especialmente en lo que concierne a lechos fluidos.¹⁰².

Nuestra involucración en temas de captura CO₂ mantiene un liderazgo racional y europeo claro. El Prof. Antonio Valero es actualmente vicepresidente de la plataforma europea “Zero Emissions Fossil Fuels Power Plants” ZEP, como ya mencionado anteriormente en esta Memoria, y fue elegido por la Comisión Europea entre más de doscientos proponentes como representante español en el “Advisory Council” de la Plataforma, constituido por 25 miembros relevantes del sector energético industrial europeo como el petróleo, el gas, la producción de electricidad, de los Centros de investigación, de los fabricantes de bienes de equipo. Su legado principal ha sido redactar el “documento de visión” de la plataforma y “construir una agenda estratégica de investigación”.

En el mismo camino, el Prof. Antonio Valero ostenta la representación de la secretaría española del CO₂, tal como mencionado, así como la secretaría del Proyecto CENIT CO₂ que, como ya se ha dicho, es el proyecto español de mayor envergadura económica en temas de captura y almacenamiento de CO₂ actualmente en curso.

Por todo ello, el Grupo CIRCE ocupa en estos temas una posición destacada de liderazgo tecnológico tanto a nivel nacional como europeo.

¹⁰² V. p. ej. una inusualmente breve revisión en B.J.P. Buhre, L.K. Elliot, C.D. Sheng, R.P. Gupta, T.F. Wall, “Oxy-fuel combustion for coal-fired power generation” *Progress in Energy and Combustion Science* **31**, 283-307 (2005).

Memoria Científica Área Eléctrica

El tema general de investigación del área eléctrica del Instituto CIRCE es la eficiencia energética aplicada a la generación, el transporte y distribución y el uso de la energía eléctrica, poniendo especial interés a las energías renovables. El área eléctrica se encarga del estudio e investigación, en varios niveles, de algunos temas clave en este campo, a saber: integración de energías renovables, sistemas eléctricos de potencia, análisis integral de recursos energéticos.

El área eléctrica está formada actualmente por 37 personas: cuatro profesores titulares y dos profesores titulares de escuela universitaria (respectivamente, Mariano Sanz, Andrés Llombart, Miguel García-Gracia, Julio J. Melero, José Sanz y Antonio Montañés), un profesor asociado doctor (Jesús Sallán), un profesor ayudante (Mari Paz Comech) y un profesor asociado (Miguel Angel García), 2 becarios FPI homologados, 14 becarios de iniciación a la investigación, 11 investigadores contratados de la Fundación CIRCE y dos técnicos de laboratorio.

En términos meramente numéricos, desde 1997 se han llevado a cabo dieciséis proyectos de I+D de convocatoria pública competitiva, incluyendo dos del 6º Programa Marco de la UE, y tres del Programa Nacional de I+D. Las colaboraciones con empresas privadas en proyectos de I+D superan los 25 proyectos. En el área eléctrica se han realizado cuatro tesis doctorales y sus miembros han publicado varios artículos científicos en revistas incluidas en el JCR (entre ellas *IEEE Transactions on Power Delivery*, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *IEEE Transactions on Magnetics* o *Electric Power System Research* y otros muchos en revistas no indexadas y en actas de congresos, incluyendo reuniones internacionales de prestigio como el *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines*, *European Wind Energy Conference*, y *International Conference on Renewable Energy and Power Quality*.

Además, se han realizado cuatro patentes, tres de ellas en explotación, y se está en proceso de elaboración de varias patentes más.

A continuación, se revisan brevemente las actividades concretas emprendidas en cada una de las grandes líneas y las perspectivas y propuestas de trabajo futuro.

Líneas de investigación del área eléctrica del Instituto CIRCE.

Las líneas de investigación del área eléctrica del Instituto CIRCE se resumen en la tabla 2, en esta se reflejan actividades, proyectos y contratos obtenidos, publicaciones más importantes y tesis doctorales dirigidas.

La primera línea de investigación ha sido la *integración de energías renovables*, se divide en dos áreas principales: *desarrollos de etapas electrónicas de gestión energética y conexión a red y optimización de recurso y almacenamiento*. En la primera de ella se estudia la relación óptima entre los distintos componentes de un sistema integrado, mientras que en la segunda se investigan etapas electrónicas que permitan la gestión energética de una manera eficiente y una conexión a red de alta calidad.

La segunda línea por orden de aparición es la investigación en sistemas eléctricos de potencia, esta línea estudia la conexión a red de aerogeneradores, el modelado de estos y su comportamiento ante huecos de tensión y, por otro lado, más desde el punto de vista de la red, las protecciones eléctricas donde se desarrollan modelos y se simulan las protecciones junto con la red y la generación tradicional y renovable.

Por último, se lanzó la línea de análisis integral de recursos energéticos con dos áreas principales: *desarrollo de sistemas de medida y análisis de calidad de red y control de producción de aerogeneradores*. En la primera se está desarrollando un nuevo sistema de medida para el análisis de aerogeneradores y calidad de red, además de nuevas técnicas de detección y clasificación automática de eventos eléctricos. En la segunda se han desarrollado dos patentes para el control de producción de aerogeneradores.

línea de investigación	actividades principales	contratos y proyectos	publicaciones más relevantes	tesis doctorales
Integración de energías renovables	Optimización de sistemas integrados	DGA Ref. P110/97 4.1030/Z/99-169 ALTENER	IEEE Industrial Electronics Society Conference (IECON) 2006	Andrés Llombart 2000 Jesús Sallán 2001
	Desarrollo de sistemas electrónicos de potencia para control energético y conexión a red	FIT-120201-2000-5 FIT-120402-2001-8	ICREPO (2005 – 2006) IECON 2002	José Sanz, prevista 2007
	Simulación de sistemas en régimen dinámico y estático	FIT-120000-2004-182	IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2000 9th European Conference on Power Electronics and Applications, 1999 P200201386	
Sistemas Eléctricos de Potencia	Simulación del impacto en red de la energía eólica	UZ 2000 CONSI+D – Ref. P058/99	IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 1996, 1997, 1997 IEEE Transactions on Power Delivery, 2002	Miguel García-Gracia – año 1996 William Osal, 2006
	Desarrollo de modelos dinámicos de aerogeneradores	FIT-120201-2001-15 MCYT 2001	IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation – 2003	Miguel Angel García prevista 2007
	Protección del sistema eléctrico	DPI2003-09731 ENE2006-15717-C02-01	European Transactions On Electrical Power – 2005 Electric Power System Research, 2006 IEEE Transactions on Power System, 2007 European Wind Energy Conference – 2006 y 2003	Mari Paz Comech prevista 2007
Análisis Integral de Recursos Energéticos	Análisis dinámico del funcionamiento de aerogeneradores	DPI2003-09731 FIT-120100-2003-73	European Wind Energy Conference – 2006 y 2003	Juan José Pérez Aragüés prevista 2008
	Análisis de calidad de red	FIT-120000-2004-137	ICREPO – 2004, 2005 y 2006	4 investigadores contratados en proceso de realización de Tesis
	Desarrollo de sistemas de medida	CIT-020500-2005-30	Patentes: P200201386 P200602486	
	Control de producción en aerogeneradores			

Tabla 2. Resumen de actividades científicas del área eléctrica del Instituto CIRCE

Integración de Energías Renovables.

La línea de investigación *integración de energías renovables* se divide en dos áreas principales: *desarrollos de etapas electrónicas de gestión energética y conexión a red y optimización de recurso y almacenamiento*. Dentro de estas áreas se han realizado varios proyectos de investigación financiados por la Comunidad Autónoma de Aragón, la Comunidad Europea y los Programas Nacionales de Fomento de Investigación Tecnológica. Estas investigaciones dieron lugar a resultados interesantes que fructificaron en relaciones con empresas y otras fundaciones para la continuación de la línea de trabajo. En estos momentos se está trabajando en la definición de un proyecto para el 7º Programa Marco de la UE.

El origen de esta línea se remonta a 1990 cuando Mariano Sanz Badía actual Subdirector de CIRCE y fundador de la División Eléctrica entrega su Tesis Doctoral¹⁰³. Durante los años 90 se comienzan varias Tesis en el área de *desarrollos de etapas electrónicas de gestión energética y conexión a red*, aunque los primeros resultados se empiezan a obtener a partir de 1997 con la consecución de dos proyectos de investigación: “Estudio y mejora de la conexión a red de los aerogeneradores eléctricos” y “Sistema de regulación y control del funcionamiento de los aerogeneradores eléctricos para la mejora de su eficiencia energética” financiados por la Administración Autonómica.

En estos proyectos se abordaba el problema de la mejora del impacto en red desde el punto de vista de la mejora de la regulación y el control de la máquina, mediante el desarrollo de nuevas etapas de electrónica de potencia. Estos estudios originaron los primeros modelos de aerogeneradores desarrollados por el grupo y dieron lugar a varias publicaciones, entre ellas las tesis doctorales de Andrés Llombart¹⁰⁴, y Jesús Sallán¹⁰⁵.

Desde febrero de 1998 con el contrato “Análisis de la Energía entregada a la red de distribución eléctrica por las Centrales Eólicas” para la empresa CEASA y continuando en el tema con otro contrato de similares características para la empresa Neg-Micon Eólica

¹⁰³ M. Sanz, Análisis de los efectos perturbadores de las configuración estáticas de potencia en la red de alimentación. Estudio y elaboración de un sistema corrector. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad de Zaragoza, 1990.

¹⁰⁴ A. Llombart, Investigación sobre fuentes de intensidad AC/DC de alta eficiencia energética y mínima influencia en red. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad de Zaragoza, 2000.

¹⁰⁵ J. Sallán, Estudio y desarrollo de nuevos sistemas de generación y conexión a red para máquinas asíncronas de rotor en cortocircuito impulsadas por turbinas eólicas para su funcionamiento a velocidad variable. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad de Zaragoza, 2002.

S.A. Estos últimos contratos fueron el origen de la última línea de investigación (Análisis Integral de Recursos Energéticos).

En enero se obtiene financiación para el desarrollo del proyecto: “Investment Promotion for Renewable Energy Integration”, por la Comisión Europea a través del programa ALTENER, en colaboración con la Universidad de Zaragoza, la empresa de origen Belga Ecowatt, así como con el apoyo del Departamento de Agricultura y Medio Ambiente y del Departamento de Economía, Hacienda y Fomento de la Diputación General de Aragón, la Confederación Hidrográfica del Ebro y diversas comunidades de regantes. En este proyecto se analizó la viabilidad de la integración de las energías renovables en instalaciones de bombeo para riego en varias zonas de Aragón. Obteniéndose las configuraciones óptimas de bombeo y generación eólica e hidráulica óptima para cada una de ellas. Este proyecto marca el comienzo del área *optimización de recurso y almacenamiento* que es la segunda y última en esta línea de investigación.

En enero 2001 se realiza el proyecto “Optimización de sistemas integrados de energías renovables para el abastecimiento de núcleos aislados” financiado por PROFIT (FIT-120402-2001-8), en colaboración con TAIM-TFG. En este proyecto se ha desarrollado una metodología de trabajo para optimizar la integración de energías renovables para la generación de energía eléctrica en sistemas aislados de pequeña y media potencia (50 kW 10 MW). Con este proyecto se ha buscado incrementar la penetración de las energías renovables de carácter aleatorio, mediante sistemas de control integrado. El sistema integrado debe cubrir la totalidad de la demanda de una zona mediante fuentes exclusivamente renovables, debe ser estable y poseer una capacidad mínima (idealmente nula) de almacenamiento de energía eléctrica. El proyecto, todavía en la fase final de realización ha dado como resultado más interesante una patente¹⁰⁶. El desarrollo de este proyecto dio lugar a un contrato con la empresa Taim-TFG (2004-2006) para el desarrollo del sistema de conexión a red de un aerogenerador de 300 kW especialmente diseñado para la conexión a redes débiles y en sistemas aislados.

En enero de 2004 se realizó el estudio: Optimización de la generación dispersa en redes débiles. El proyecto, financiado por el programa PROFIT, analiza el problema de la

¹⁰⁶ M. Sanz, Sistema de regulación de energía eléctrica de alta eficiencia y calidad de onda, N° de solicitud 200201386, País de prioridad: ESPAÑA, Entidad titular: Taim-TFG, SA.

penetración de la energía eólica en redes débiles analizando posibles soluciones de almacenamiento energético y gestión conjunta de diversas fuentes de energías renovables.

Sistemas eléctricos de potencia

El grupo GISEP está especializado en simulación de sistemas eléctricos de potencia y, principalmente, en estudios de estabilidad de la red y en estudios de protecciones.

Se podrían destacar cuatro grandes líneas de actuación:

- Desarrollo de software y simulación dinámica de diferentes tecnologías de aerogeneradores (DFIG y jaula de ardilla) y dispositivos FACTS.
- Modelado de parques eólicos, simulación según el “Procedimiento de Medida y Evaluación de la respuesta de las Instalaciones Eólicas ante huecos de tensión” y verificación de la conformidad con los requisitos de respuesta indicados en el P.O.12.3.
- Cálculo de ajustes y automatización del procedimiento de ensayo y puesta en servicio de protecciones en subestaciones.
- Protección de sistemas eléctricos de potencia
- Optimización, prevención y detección de problemas de coordinación de protecciones mediante la herramienta informática CAPE (Electrocon).

La herramienta fundamental del grupo es la simulación, sin embargo, todos sus desarrollos mantienen una viva y estrecha relación con los trabajos y medidas en campo. Así, por ejemplo, el desarrollo de modelos de aerogeneradores ha sido ampliamente contrastado con medidas reales, o en el caso de los estudios de protecciones, se abarca desde el ajuste, al ensayo y puesta en servicio del relé. Un claro ejemplo de este hecho es el proyecto *Impacto de la generación de origen eólico en el funcionamiento y en la operación del sistema eléctrico peninsular* financiado por PROFIT, en colaboración con Empresarios Agrupados y Red Eléctrica de España S.A. En este proyecto se desarrolló el modelo de aerogenerador con rotor en cortocircuito que se contrastaron con medidas de campo y se establecieron a partir de ellos y de simulaciones mediante PSS/E una primera aproximación a los condicionantes técnicos para la penetración de la energía eólica en la red eléctrica. Concretamente, este equipo de trabajo estuvo especialmente involucrado en la realización de medi-

das experimentales, y no en la parte de los estudios de simulación y conclusiones. O el proyecto *Análisis multipunto del impacto en red de la energía eólica*. Financiado por CICYT. En este proyecto se analizan las características más favorables de conexión de los aerogeneradores a la red eléctrica. Además, se analiza la necesidad de nuevos sistemas de medida para afrontar el análisis del problema en campo.

El grupo GISEP está especialmente especializado en sistemas eléctricos de potencia y su protección. Esta línea de investigación se inicia con el estudio científico de medios aislantes o dieléctricos, financiado por proyectos de investigación de la Universidad de Zaragoza y Diputación General de Aragón que dieron como fruto las publicaciones ¹⁰⁷, ¹⁰⁸, ¹⁰⁹, ¹¹⁰. En estos trabajos se desarrolló una técnica novedosa de caracterización en el dominio temporal de sistemas eléctricos.

El grupo está asimismo especializado en el modelado simulación, y caracterización de sistemas eléctricos¹¹¹, habiendo trabajado con diferentes paquetes de software en base EMT (Electromagnetic Transient), tales como PSCAD o EMTP, en diversos trabajos de investigación, algunos de los cuales han sido desarrollados para el sector industrial.

Entre los trabajos desarrollados por el grupo, cabe destacar el modelado de componentes del sistema eléctrico¹¹², y en particular de aerogeneradores de Gamesa y Acciona Windpower para el análisis de estabilidad transitoria en la red de REE, que han sido difundidos a los operadores de otros países donde sus tecnologías están implantadas (E.E.U.U., Australia, Irlanda, UK, etc).

¹⁰⁷ M. García-Gracia, J. Letosa, J.M. Artacho, J.M. Forniés-Marquina, "A time domain method for determining the relaxation time spectrum.", IEEE Transactions on Magnetics, **33** (2),pp.1464-1467, March 1997

¹⁰⁸ J.M. Forniés-Marquina, J. Letosa, M. García-Gracia, J.M. Artacho, "Error propagation for the transformation of time domain into frequency domain", IEEE Transactions on Magnetics, **33** (2),pp.1456-1459, March 1997

¹⁰⁹ J. Letosa, M. García Gracia, J.M. Forniés-Marquina, J.M. Artacho, "Performance limits in TDR technique by Monte Carlo simulation", Transactions on Magnetics, **32** (3), May 1996.

¹¹⁰ M.García Gracia, J.Letosa, J.M. Artacho, J.M.Forniés-Marquina, , A.M.Bottreau., "Direct deconvolution signal in time domain reflectometry", IEEE Transactions on Magnetism, 31 (3),pp.1610-1613, May 1995

¹¹¹ M. García-Gracia, J. Letosa, J.M. Artacho, J.M. Forniés-Marquina, "The Behavior of the Impulse Response Function of a Dielectric in the Presence of Noise", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volumen:10, Número: 3, Fecha: Junio 2003

¹¹² Ignacio Clavería, Miguel García-Gracia, Miguel Angel García, Luis Montañes, "A time domain small transformer model under sinusoidal and non-sinusoidal supply voltage", EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER, 2005; **15**: 311-323

Entre los trabajos desarrollados por el grupo, cabe destacar el modelado de aerogeneradores de Gamesa y Acciona Windpower para el análisis de estabilidad transitoria en la red de REE, que han sido difundidos a los operadores de otros países donde sus tecnologías están implantadas (E.E.U.U., Australia, Irlanda, UK, etc).

Los trabajos realizados en estudios dinámicos y de simulación abarcan desde el desarrollo de modelos dinámicos de aerogeneradores hasta estudios de impacto de la generación eólica en la red de transporte y distribución.

Parte importante de la actividad del grupo es la protección del sistema eléctrico de potencia donde destaca a nivel industrial la implantación en Endesa de una nueva herramienta de simulación y ajuste de protecciones. A nivel científico destaca el desarrollo de algoritmos para protecciones¹¹³

Las herramientas informáticas utilizadas para la ejecución de dichos trabajos son las siguientes:

- PSS/E: Herramienta de simulación a frecuencia fundamental. El objetivo es el estudio de variaciones de tensión e intensidad en la red ante diferentes tipos de contingencias: faltas, huecos de tensión, desconexión de equipos, etc. Permite el estudio tanto en régimen estacionario como en régimen dinámico. La principal ventaja de este programa frente a otros de la misma gama es su robustez, así como la posibilidad de la ampliación de las funciones originales del programa, permitiendo a su vez trabajar con grandes redes. Es el software utilizado por las grandes compañías eléctricas.
- PSCAD/EMTDC: Es un software de simulación en valor instantáneo. El objetivo son los estudios en régimen permanente y dinámico o transitorio. Se caracteriza por el nivel de detalle de sus modelos (de mayor orden que en las herramientas de frecuencia fundamental), lo que permite simular con una precisión elevada.
- CAPE: Esta herramienta está orientada al análisis del sistema de protección de la red eléctrica. Sus principales funciones son la coordinación de protec-

¹¹³ Miguel García-Gracia, W. Osal, MP. Comech, "The differential equation algorithm using mutual coupling", Electric Power System Research, Aceptado para publicar y disponible en web 2006.

ciones, el análisis de cortocircuitos, de flujo de cargas y permite además el modelado de la red eléctrica de forma sencilla con la ayuda del módulo para el cálculo de parámetros de líneas aéreas. CAPE posee una extensa base de datos de protecciones de sobreintensidad y de distancia, que permite ser ampliada. Herramienta adoptada por REE y Endesa.

Análisis Integral de Recursos Energéticos

La línea de investigación de análisis integral de recursos energéticos tiene su origen en 1998 a raíz de la firma de diversos contratos con empresas aragonesas para el análisis del funcionamiento de aerogeneradores. Este trabajo consistía en verificar las características más comunes de funcionamiento de los aerogeneradores y, además, indagar en ciertos aspectos que en aquellos momentos permanecían oscuros:

- Gestión de la energía reactiva
- Análisis del proceso de arranque/parada
- Influencia en las fluctuaciones de tensión de red

En enero de 2000 se comenzó el estudio “Impacto de la generación de origen eólico en el funcionamiento y en la operación del sistema eléctrico peninsular” financiado por PROFIT, en colaboración con Empresarios Agrupados y Red Eléctrica de España S.A. En este proyecto se desarrolló el modelo de aerogenerador con rotor en cortocircuito que se contrastaron con medidas de campo y se establecieron a partir de ellos y de simulaciones mediante PSS/E una primera aproximación a los condicionantes técnicos para la penetración de la energía eólica en la red eléctrica. Concretamente, este equipo de trabajo estuvo especialmente involucrado en la realización de medidas experimentales, y no en la parte de los estudios de simulación y conclusiones.

Estos estudios dieron resultados satisfactorios según se ha comentado con anterioridad y apuntaron diversas líneas de actuación que fueron seguidas en las líneas de I+D mencionadas en los apartados anteriores. Además de esto, también evidenciaron una falta de sistemas de medida que se adaptaran a las necesidades de este tipo de estudios. Es por esto que una de las áreas de trabajo dentro de esta línea de investigación ha sido el desarrollo de

sistemas de medida adaptados a las necesidades de análisis de la energía eólica y de la calidad de la red eléctrica.

Diciembre de 2003 – Noviembre de 2006: Análisis multipunto del impacto en red de la energía eólica. Financiado por CICYT. En este proyecto se analizan las características más favorables de conexión de los aerogeneradores a la red eléctrica. Además, se analiza la necesidad de nuevos sistemas de medida para afrontar el análisis del problema en campo, y se estudian las especificaciones necesarias y las tecnologías más adecuadas para llevar a cabo el sistema.

Finalmente, en enero de 2005 se consiguió una ayuda para *Proyecto de Investigación de un sistema multipropósito de caracterización de aerogeneradores y medida de calidad de energía eléctrica*, financiado por el programa PROFIT. Se está desarrollando, junto con la empresa Instrumentación y Componentes S. A. un equipo de medida especialmente ideado para el análisis del funcionamiento de aerogeneradores y su interacción con la red eléctrica. En estos momentos se está redactando una patente para proteger la idea, aunque todavía no está presentada, antes de su lanzamiento al mercado en cooperación con la mencionada empresa.

La segunda área de trabajo dentro de esta línea de investigación es el control de producción de aerogeneradores. Esta línea comenzó en junio de 2001 a través de un contrato de I+D con título: “Control de producción en aerogeneradores eléctricos”, este proyecto fue realizado para la empresa MADE Tecnologías Renovables S. A. (en aquel momento perteneciente al grupo ENDESA y actualmente dentro del grupo GAMESA) que lo ha financiado íntegramente durante los dos primeros años de desarrollo. Posteriormente se consiguieron dos ayudas del PROFIT en años consecutivos 2003 y 2004 para dicho desarrollo. Desde principio del año 2006 Gamesa Eólica está financiando la continuación del proyecto.

En este proyecto se han desarrollado modelos de comportamiento de aerogeneradores en el marco temporal de los diez minutos. Estos modelos han sido publicados en congresos y la metodología de control de producción ha producido dos patentes. Una primera con la

empresa MADE¹¹⁴, fruto de los tres primeros años de realización del proyecto, y una segunda con Gamesa Eólica S.A.¹¹⁵ fruto de los dos últimos años de desarrollo.

¹¹⁴ D. Mariano Sanz Badía, D. Francisco J. Val Tomás, D. Andrés Llombart Estopiñán, *Método para el control de producción en aerogeneradores eléctrico*, N. de Patente: ES2198212, Fecha de concesión: 03-03-2005, en explotación por Gamesa Eólica S.A.

¹¹⁵ D. Andrés Llombart Estopiñán et al. Título: Método de apoyo a la toma de decisiones en la gestión y mantenimiento de aerogeneradores. N. de solicitud: P200602486, Fecha de prioridad: 29 -09 – 2006 Entidad titular: Gamesa Eólica S.A.

A.4 PLAN DE INVESTIGACIÓN Y AMPLIACIÓN DE LOS LABORATORIOS DEL INSTITUTO

El Instituto Mixto tendrá su sede en el edificio “ CENTRO CIRCE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA” previsto para principios del año 2008. Al objeto de potenciar las líneas de investigación científicas del Instituto, se prevé una importante ampliación de los laboratorios existentes, contando así el Instituto con laboratorios propios de última generación. La principales Líneas de I+D y el Plan de ampliación y equipamiento de los principales laboratorios del Instituto Mixto de Investigación CIRCE para los años 2008 y 2009 se describe a continuación:

1) –Líneas de Investigación y Plan de Ampliación del LABORATORIO I+D+i BIOMASA Y COMBUSTIÓN

1. Líneas de I+D+i en biomasa y co-combustión.

El objetivo del Laboratorio de I+D+i Biomasa y Combustión de CIRCE es contribuir a la penetración de la biomasa en el mercado energético nacional, abordando las barreras tecnológicas que la retrasan. Para lograrlo, la Fundación CIRCE dispone de un grupo de investigación experimental y aplicada dirigido a la solución de problemas operativos específicos, optimización de equipos y procesos y desarrollo de nuevos conceptos relacionados con la combustión de biomasa, carbón y otros residuos.

Las líneas de trabajo que se desarrollan actualmente son las siguientes:

1. Determinación para cada combustible biomásico de la tecnología de co-combustión o de combustión más idónea. Cada recurso posee diferente composición química y presenta distintas características físicas (densidad, cohesividad, contenido de humedad, etc.). La selección de la tecnología de co-combustión o de combustión más apropiada, efectuando para ello ensayos que permitan determinar y optimizar los parámetros de operación de modo que se reduzcan costes y emisiones y se maximice la eficiencia del proceso, puede suponer que un proyecto supere el umbral de la rentabilidad y se pueda hacer realidad.

2. Optimización de los pretratamientos de biomasa y de las técnicas de alimentación a caldera.

En muchos casos, la transformación energética del recurso garantizando una elevada eficiencia y unos niveles de disponibilidad, operación y costes adecuados requiere de la optimización de dos procesos previos a su transformación en caldera. Por una parte, de las operaciones de adaptación y homogeneización de las características del combustible (humedad y tamaño de partícula fundamentalmente) a los requerimientos del equipo de conversión, los denominados pretratamientos, ya que aunque mejoran la eficiencia en caldera pueden suponer un consumo energético y/o económico demasiado elevado. Por otra parte, del sistema de alimentación que permita asegurar el flujo continuo de combustible a la caldera ya que, en muchos casos, de ello depende el éxito económico del proceso.

3. Diseño de quemadores para combustión de biomasa.

La utilización de biomasa en centrales de carbón pulverizado de un modo eficiente requiere, en algunos casos, de la instalación de quemadores específicos para el recurso biomásico que permitan garantizar la combustión eficiente de dicho recurso en una caldera no diseñada en función de sus características. En el diseño del quemador no sólo se deben tener en cuenta las particularidades de cada combustible, sino que también se debe considerar como le afectan las interacciones de los quemadores de carbón restantes mediante simulaciones CFD.

4. Estudios sobre deposición de cenizas y corrosión por ensuciamiento a altas temperaturas.

La utilización de algunos recursos biomásicos puede presentar problemas de operación y de mantenimiento debido, fundamentalmente, a su composición elemental. La evaluación y caracterización de la deposición y la corrosión que puede provocar un combustible o una mezcla de combustibles son estudios fundamentales a la hora de instalar una planta de producción de energía con estos recursos, o modificar una ya existente. La determinación de las mezclas de combustibles o de los parámetros de operación que minimicen estos impactos es básica para aumentar el rendimiento, disminuir los costes de inversión y los de operación y mantenimiento, aumentar la fiabilidad de operación y mejorar los parámetros medioambientales del mismo.

5. Servicios a empresas e instituciones

El laboratorio también presta asesoramiento técnico sobre las tecnologías de combustión de biomasa disponibles en el mercado y colabora en el desarrollo de los nuevos prototipos planteados o requeridos por las empresas de la zona, fomentando no sólo el uso de la biomasa como alternativa a los combustibles fósiles convencionales, sino también el desarrollo tecnológico de la región.

La existencia de un laboratorio de I+D+i combustión, al que las empresas de pequeño y mediano tamaño puedan acudir, les permite llevar a cabo sus propios desarrollos tecnológicos, a un coste muy inferior y asumiendo unos riesgos mínimos.

Además del desarrollo de la tecnología, el laboratorio constituye un excelente centro para la formación de personal de alto nivel. Su relación con la Universidad de Zaragoza permite la formación a todos los niveles, desde técnicos procedentes de FP hasta los doctores en ingeniería.

El laboratorio trabaja bajo las premisas de confidencialidad y privacidad tanto de la información como de los resultados y desarrollos realizados, siendo las empresas las dueñas de los productos impulsados.

2.-Equipos actuales en el laboratorio

Para desarrollar las líneas de investigación mencionadas el laboratorio está actualmente dotado de una serie de equipos de combustión que combinan el carácter científico requerido para realizar experimentos a escala de laboratorio y la capacidad para simular condiciones de operación a escala industrial, permitiendo además la operación con diferentes tipos de combustible y condiciones de recepción del mismo.

El laboratorio cuenta actualmente con una superficie de unos 90 m² y está ubicado en la Nave 3 del Edificio Betancourt, sede de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial (EUITI). Dispone de una serie de equipos experimentales relacionados con la combustión y co-combustión de biomasa y su pretratamiento (figura 1):

- Combustor ciclónico de diseño Agrest ("cámara torsional") de 800 kWt de potencia nominal, capaz de procesar biomasa de cualquier calidad y tamaño de partícula elevado (~ 1 cm), así como otros sólidos,
- Combustor tipo swirl, orientado verticalmente hacia abajo, de diseño propio basado en la tecnología del carbón, potencia nominal de 500 kWt para carbón, biomasa o mezclas en condiciones similares a las de una central térmica (altos volátiles, ~ 100 micras de tamaño medio).
- Secadero de biomasa, de tipo rotativo ("tromel"), de capacidad en torno a unos 50 kg/h de biomasa húmeda de gran tamaño de partícula
- Instalación de molienda de biomasa, dotada de molinos de impacto y corte, clasificador por cedazos (Plansichter) y filtros.

El laboratorio incluye además todo el equipamiento auxiliar necesario para operar estos equipos, principalmente: disipador común para los combustores refrigerado por agua en circuito cerrado con aerocondensador, carcassas y circuitos de refrigeración auxiliar, tolvas

de alimentación y alimentadores volumétricos para sólidos en bruto y pulverizados, filtros de depuración de gases, equipo de seguridad antidetonante y antiincendios, almacenes de combustible cerrados.

La experimentación hasta la fecha ha estado relacionada con la viabilidad y la marcha general de la combustión de biomasa y mezclas, la emisión de contaminantes a la atmósfera, la optimización del secado y la molienda, y el ensuciamiento en bancos de alta temperatura. Para ello se dispone de instrumentación estándar montada en los equipos citados (presión, temperatura, caudal y toma de muestras), así como de un laboratorio analítico sencillo para los combustibles (análisis inmediato, TGA y potencia calorífica). Algunos instrumentos singulares son:

- Banco de deposición de alta temperatura, formado por un haz de tubos refrigerado por un circuito adicional de aire, e instrumentado en caudal y temperatura de gases y metal.
- Analizador de gases en chimenea, con extracción y tratamiento automático de la muestra, conexiones de calibración y detectores en continuo para CO, CO₂, O₂, SO₂ y NO.
- Células de carga para calibración gravimétrica de alimentadores. Termometría inalámbrica para el aire del secadero. Registro de temperatura del producto en el secadero mediante sondas móviles miniatura.



Figura 1. Laboratorio de cocombustión de la Fundación CIRCE

En el laboratorio se plantea la ejecución de diferentes líneas de I+D en cumplimiento de los siguientes proyectos de Investigación.

- *Proyectos científico-tecnológicos singulares y de carácter estratégico (2006-2009). Ministerio de Educación y Ciencia*

- *Proyectos de Captura CO₂ – Subproyecto Postcombustión. Dimensionamiento, diseño, construcción y pruebas de una planta de demostración para la captura de CO₂ mediante el ciclo de calcinación-carbonatación con lecho fluido oxyfuel.*

- *Proyectos del Plan Nacional de I+D+i (2004-2007). Ministerio de Educación y Ciencia:*

- *Proyectos de OXICOCO. Desarrollo de una Tecnología Eficaz para la Reducción de Emisiones de CO₂.*

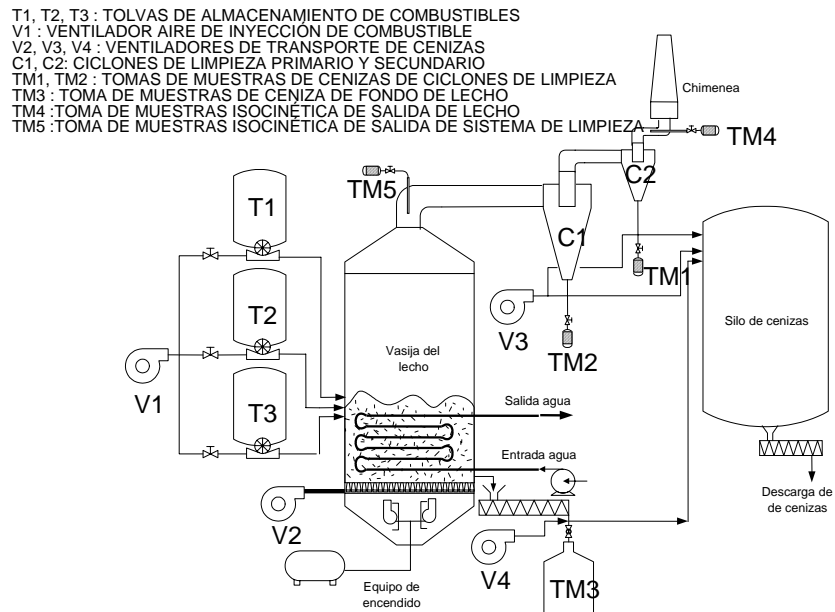


Figura 3. Esquema del combustor/carbonatador de lecho fluido

3. Planta de filtrado de partículas biomasa/caliza.

Dentro del proyecto "CENIT-CO₂. Consorcio Estratégico Nacional en Investigación Técnica del CO₂" se va a poner en marcha una instalación de filtrado de biomasa-caliza mediante ciclones. El esquema aproximado sería el siguiente (figura 4) :

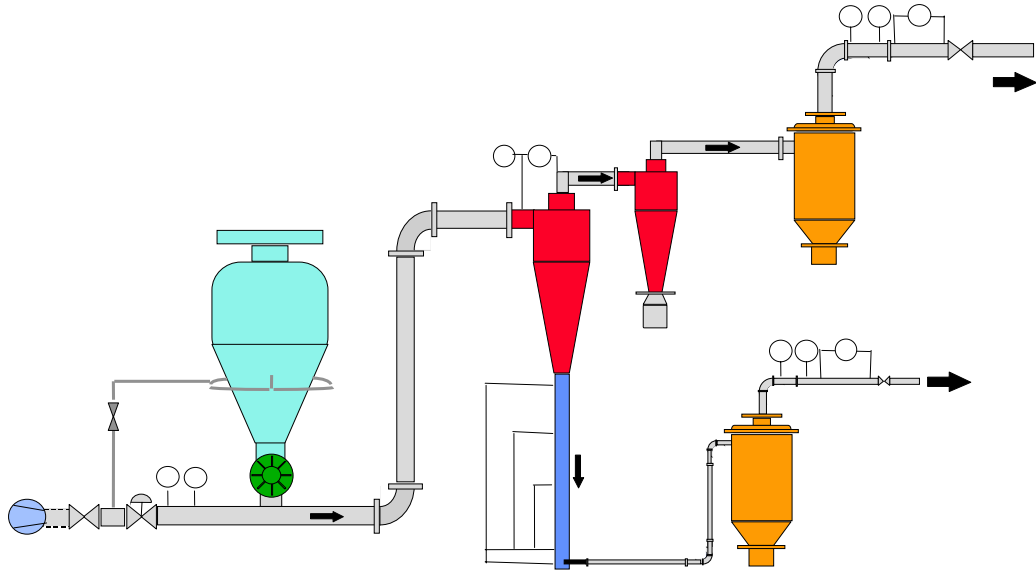


Figura 4. Planta de filtración biomasa-caliza

4. Planta de medidas con instrumentación avanzada en flujo frío.

Dentro del proyecto TERMO-PIV, se va a construir una planta piloto en flujo frío para efectuar sembrado de partículas y medidas de velocimetría mediante diferentes técnicas. Inicialmente se pretende construir un modelo a escala en metacrilato en flujo frío del quemador de premezcla existente en el laboratorio, así como de todos los elementos auxiliares (dosificación y recuperación del trazador, instrumentación, impulsión y evacuación de aire).

2) - Líneas de Investigación y Plan de Ampliación del LABORATORIO IER – INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

1. Líneas de I+D+i en integración de energías renovables

La actividad investigadora desarrollada en el laboratorio se divide en cuatro líneas de investigación:

- Producción energética mediante la utilización conjunta de diferentes fuentes de energías renovables
- Sistemas de control y conexión a red de las energías renovables
- Impacto de la generación renovable en la calidad del suministro eléctrico
- Análisis integral de los recursos energéticos

Generalmente las fuentes de generación distribuida y renovable se sitúan de forma dispersa a lo largo del medio rural. Actualmente existen graves problemas para su incorporación a la red eléctrica, por lo que la mejora de su integración provocaría de manera inmediata un triple efecto beneficioso en los ámbitos económico y social aragoneses:

- Al tratarse de nuevas tecnologías a escala de potencia media-baja son fácilmente abordables por las PYME. Además, este tipo de producto no resulta del todo interesante para las grandes multinacionales por lo que se eliminan posibles competidores que podrían en peligro el desarrollo de las primeras.

- Al tener que instalarse en el medio rural se produce generación de empleo en las zonas más necesitadas.
- Incrementando la calidad y cantidad de suministro en las zonas rurales se asegura el desarrollo sostenible de este tipo de zonas al eliminar la barrera del acceso de la energía seriamente amenazado por el impacto ambiental de las redes eléctricas en el medio ambiente rural

En cuanto a los beneficios científicos cabe destacar que las distintas soluciones que se están estudiando en las distintas líneas de investigación presentadas requieren del máximo nivel científico-tecnológico, por lo que el desarrollo de las mismas busca el desarrollo en ese ámbito de manera ineludible.

A continuación, se van a presentar cada una de las líneas de investigación científicas a desarrollar en el laboratorio.

1.- Producción energética mediante la utilización conjunta de diferentes fuentes de energías renovables

Hasta el momento la integración de energías renovables, entendida como la utilización conjunta de dos o más de ellas, ha consistido en desarrollar sistemas de producción de energía eléctrica aislados de pequeña potencia. Las energías que normalmente entran en juego son la solar y la eólica, apoyadas en la mayoría de los casos por grupos electrógenos. El sistema se basa en almacenar la energía renovable obtenida y utilizar el grupo en caso de emergencia. En raras ocasiones se ha estudiado la integración de la hidráulica (por problemas de disponibilidad) o de la energía de la biomasa (por problemas de mínimos técnicos).

Sin embargo, la integración de energías renovables tiene otra potencialidad que no solo aumentar la capacidad de producción, puede permitir disminuir el sistema de almacenamiento (abaratando costes), aumentar notablemente la capacidad de producción (introduciendo todas las energías disponibles en la zona) y mejorar los inconvenientes de las energías “aleatorias” desarrollando un control conjunto del sistema integrado.

Objetivos científicos de la línea de investigación

- Solucionar el problema de penetración de las energías renovables en el sistema eléctrico y, en especial en las redes débiles, a través de tecnologías innovadoras como resultado de actividades de I+D.

Planes de actuación científica a medio plazo

- Investigación para el control conjunto de las distintas fuentes de energía renovables que permita optimizar el uso de las energías eólica y solar sin menoscabo de la estabilidad del sistema
- Desarrollo de proyectos de I+D para el control de sistemas mixtos de generación y unidades de almacenamiento energético en un nudo de la red y su extensión al caso en el que los sistemas de generación están distribuidos a lo largo de una red débil
- I+D para integrar y optimizar la gestión de sistemas complementarios de generación y almacenamiento distribuidos espacialmente para mejorar la penetración en las redes débiles
- Análisis de soluciones de protección coordinadas de redes débiles con generación dispersa

2.- Sistemas de control y conexión a red de las energías renovables

Las ventajas de la generación eólica a velocidad variable junto con la necesidad imperiosa de mejorar las características de conexión de este tipo de sistemas a la red eléctrica

está provocando el uso de sistemas electrónicos de potencia como interfaz entre el generador y la red eléctrica. El diseño de las etapas de potencia y del control de este tipo de sistemas electrónicos constituye uno de los frentes de actuación de cualquier centro de investigación que realice desarrollos científicos en el sector eólico.

Objetivos concretos de la línea de investigación

- Investigación para el desarrollo de nuevos sistemas de control de los generadores utilizados en aplicaciones eólicas, que permitan incrementar su eficiencia, prestando especial atención a los generadores asíncronos de rotor en cortocircuito.
- Diseñar configuraciones innovadoras de potencia que permitan realizar la conexión a red del aerogenerador en las mejores condiciones, con un alto nivel de robustez, fiabilidad y calidad de la energía generada, y con un coste inferior al de las soluciones actuales.

Planes de actuación científica a corto y medio plazo

- Actividades de I+D+i para el desarrollo de un prototipo de 300 kW en colaboración con la empresa TAIM-TFG
- Ampliación del laboratorio para pruebas compuesto por cuatro bancadas motor-generador (22 kW – 90 kW) eléctrico con las configuraciones electrónicas adecuadas donde poder ensayar a niveles de potencia razonablemente altos las distintas políticas de control desarrolladas tanto en el caso de un solo aerogenerador como el caso de políticas de control integradas.

3.- Impacto de la generación renovable en la calidad del suministro eléctrico

Con esta línea de investigación se está dando respuesta a uno de los problemas más relevantes asociados a la generación dispersa (generación eólica, cogeneración, solar,...) como es el de su impacto desde el punto de vista de la calidad del suministro eléctrico. Por la significativa implantación de energía eólica, el principal inconveniente puesto de manifiesto para un mayor desarrollo de esta energía es su “*negativo*” impacto sobre la red.

Objetivos concretos de la línea de investigación

- El objetivo fundamental de esta línea de investigación es el desarrollo de técnicas de mitigación (mediante el uso de herramientas de simulación) del impacto de las energías renovables en la red eléctrica y la mejora de su comportamiento respecto a la calidad del suministro eléctrico. Para la consecución de estos objetivos se está trabajando en los siguientes temas:
- Desarrollo de modelos de aerogeneradores (nuevas tecnologías) para su inserción en los programas de simulación. Cabe decir que actualmente la tarea de planificación y análisis de la red eléctrica por parte de las compañías eléctrica se fundamenta en el uso de estos paquetes informáticos a los que se ha hecho referencia, en concreto PSS/E y CAPE.
- Análisis de las condiciones técnicas de conexión de las energías renovables a la red eléctrica en función de las características de la generación y de la red eléctrica (redes débiles, generación dispersa ..)
- Análisis de los nuevos requerimientos en las protecciones eléctricas para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico.

Planes de actuación científica a corto y medio plazo

- Investigación y Desarrollo de algoritmos para el diseño de sistemas de protección
- Investigación y Desarrollo de un sistema de análisis del comportamiento de aerogeneradores frente a huecos

4.- Análisis integral de recursos energéticos

El conocimiento real de las características de funcionamiento de los distintos sistemas de producción energética, así como de su interacción con la red eléctrica es algo fundamental para poder aportar soluciones al mismo. Hace 6 años cuando el grupo se enfrentó a su primer trabajo de análisis de las características de funcionamiento de un aerogenerador se llegó a la conclusión de que no existía en el mercado un sistema de medida que permitiera realizar esta tarea de una forma cómoda y eficaz.

Esta línea de investigación da servicio tanto al resto de líneas del grupo que necesitan de datos reales con los que contrastar sus estudios y corroborar el funcionamiento de los prototipos desarrollados como a distintas empresas del sector energético a través del Laboratorio de Metrología Eléctrica (acreditado ENAC desde 1997 para calibraciones eléctricas), que lleva cuatro años dando servicio a distintas empresas del sector eólico en temas como análisis del potencial eólico, estudios de datos de viento ... y, además está en vías de acreditación para la medición de curva de potencia y en distintos temas relacionados con la calidad de red.

Objetivos concretos de la línea de investigación

Dentro del marco expuesto el objetivo principal de la línea de investigación es el análisis de las características de funcionamiento y de la interacción con la red eléctrica de

las distintas fuentes de energías renovables. Como objetivo derivado de este se estableció el desarrollo de equipos de medida innovadores.

El objetivo principal de la línea de investigación es el diseño y desarrollo de una herramienta de análisis integral de calidad de energía eléctrica multipunto sincronizada. Por análisis integral se entiende no solo las señales eléctricas sino también aquellas magnitudes que intervienen en el proceso de producción de energía como es el caso de la velocidad y dirección de viento en los aerogeneradores o el caudal y la presión del agua en las centrales minihidráulicas.

Planes de actuación científica a corto y medio plazo

- I+D+i para el desarrollo de un prototipo de equipo de medida que se viene desarrollando en la línea de investigación
- I+D para el desarrollo de sistemas de control de calidad de producción innovador.

2.-Equipos actuales y funcionalidad en el laboratorio

Para desarrollar las líneas de investigación mencionadas, el Grupo de investigación dispone actualmente de dos laboratorios dotados de una serie de equipos que combinan el carácter científico requerido para realizar experimentos a escala de laboratorio, la capacidad para simular condiciones de operación a escala industrial y la capacidad de realizar medidas acreditadas con sello ENAC.

Los laboratorios cuentan actualmente con una superficie de unos 150 m² y están ubicado en el laboratorio de máquinas eléctricas (PRIER) y el laboratorio de teoría de circui-

tos (AIRE) del Departamento de Ingeniería Eléctrica, en el edificio Torres Quevedo del Campus Politécnico de la Universidad de Zaragoza.

El laboratorio PRIER, que alberga las actividades correspondientes a las tres primeras líneas de investigación explicadas en el apartado anterior, cuenta con un sistema experimental de técnicas de control con electrónica de potencia, que permite la modelización de varios de los sistemas de generación existentes en el mercado. Este laboratorio está actualmente formado por cuatro bancadas, cada una con un conjunto motor-generator de la jaula de ardilla, de potencias que van de los 22 a los 90 kW, y que permiten la simulación de los sistemas de generación a velocidad variable eólica e hidráulica así como otros de velocidad constante.

Las dos bancadas de 22 kW están formadas por una configuración, cuyo esquema de bloques de la etapa de potencia, se observa en la siguiente figura:

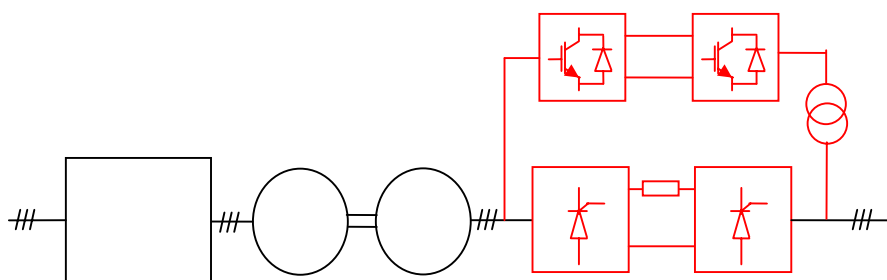


Figura 1. Esquema de bloques de las bancadas de 22 kW

El motor asíncrono de jaula de ardilla es impulsado por un regulador de velocidad que puede hacerse funcionar simulando el comportamiento de un aerogenerador o de una turbina hidráulica, incluyendo las características propias del lugar en el que se vaya a realizar la instalación real.

Las restantes bancadas disponen del material necesario para completar la configuración anterior.

Las cuatro bancadas se alimentan desde un transformador de 500 kVA, que da servicio en exclusiva al laboratorio, la configuración permite realizar generación tanto con devolución a red como de forma aislada, creando un anillo interno de consumo.

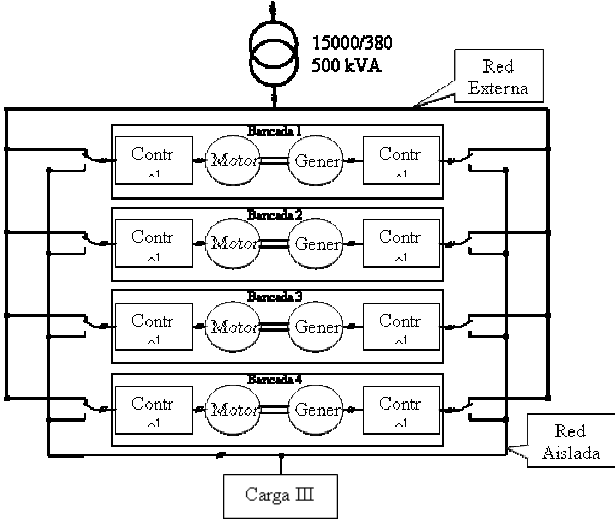


Figura 2.- Esquema general de conexión de las cuatro bancadas



Figura 3.- Aspecto general del laboratorio



Figura 4.- Detalle de la bancada de 90 kW del laboratorio

Además este laboratorio cuenta actualmente con una bancada de pruebas de sistemas de protección en la que están implementadas dos posiciones correspondientes a una línea y un transformador respectivamente, para una tensión de 45 kV. Estas posiciones están equipadas con los sistemas de protección típicos:

- Posición de línea
 - Protección de distancia
 - Protección sobreintensidad
 - Protección diferencial
- Posición de transformador
 - Regulador de tensión
 - Protección de sobreintensidad de alta
 - Protección de sobreintensidad de baja
 - Protección diferencial

El laboratorio AIRE (Análisis Integral de Recursos Energéticos) tiene como objetivo fundamental la caracterización del funcionamiento, de sistemas de producción eléctrica a partir de fuentes renovables.

Dentro de este objetivo genérico se enmarcan especialmente dos líneas de trabajo:

- 1.- La caracterización de aerogeneradores en el marco de las normas internacionales IEC/UNE 61400-12, curva de potencia, e IEC/UNE 61400-21, calidad de suministro.
- 2.- La medida y evaluación de la calidad de la energía eléctrica obtenida a partir de fuentes renovables, entendiéndose por calidad de energía la correspondiente a las directrices dadas en la familia de normas internacionales de compatibilidad electromagnética (CEM) IEC/UNE 61000.

Para cumplir el objetivo principal y los derivados de las dos líneas de trabajo se está desarrollando un equipo de medida multipropósito propio. Este equipo de medida habrá de cumplir los requisitos de los equipos de medida de Clase A dados por la norma IEC/UNE 61000-4-30. Sus características operativas serán las siguientes:

- Capacidad de realizar medidas de curva de potencia de aerogeneradores, de forma autónoma, según la norma IEC/UNE 61400-12. Para realizar este tipo de trabajo se deben combinar medidas eléctricas y meteorológicas. Esto se hace mediante la conexión y sincronización con un datalogger externo. Todo el proceso se realiza de forma automática, desde el comienzo de la medida hasta la elaboración del informe según la norma previamente citada.
- Capacidad de realizar las medidas necesarias para caracterizar la calidad de suministro de aerogeneradores según la norma IEC/UNE 61400-21.

- Funcionamiento como analizador de calidad de suministro eléctrico de Clase A según los parámetros dados por la norma 61000-4-30.
- Capacidad de medida sincronizada y simultánea en varios puntos de una red eléctrica para caracterizar la evolución de transitorios y perturbaciones en redes débiles (Utilizando varias unidades sincronizadas entre sí). Esta característica se enmarca dentro del proyecto nacional de investigación DPI2003-09731 de título “Análisis multipunto del impacto en red de la energía eólica”.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las características implementadas en el equipo de medida.

Característica	Normativa	Estado actual
Curva de potencia de aerogeneradores	IEC/UNE 61400-12	Finalizado
Calidad de suministro de aerogeneradores	IEC/UNE 61400-21	En desarrollo
Analizador de calidad de red	IEC/UNE 61000 IEC/UNE 61000-4-30	En desarrollo Implementado el módulo de armónicos
Medida multipunto Sincronizada	No aplicable	En desarrollo

El Laboratorio de Metrología Eléctrica tiene una tradición de más de 7 años con acreditación ENAC en calibración de tensión, corriente y resistencia. En la actualidad, el laboratorio está en fase de reconversión y ampliación habiéndose separado en dos áreas diferenciadas, el área de calibración y el área de ensayos.

El área de ensayos del Laboratorio de Metrología tiene como finalidad realizar servicios de medidas o verificación de sistemas eléctricos *in-situ*. La creación de esta área fue consecuencia de la racionalización y unificación de todos los servicios prestados al exterior por el grupo de trabajo.

Dentro del trabajo que se está desarrollando en el marco del área de ensayos del Laboratorio de Metrología eléctrica se engloban las siguientes líneas, todas ellas íntimamente ligadas al desarrollo del proyecto AIRE:

- Elaboración de procedimientos para la evaluación de la curva de potencia y la calidad de suministro de aerogeneradores según las normas IEC/UNE 61400-12 e IEC/UNE 61400-21.
- Elaboración de procedimientos para la evaluación de la calidad de red según las normas IEC/UNE 61000.
- Elaboración de procedimientos de calibración de analizadores de calidad de red según las normas IEC/UNE 61000.
- Evaluación de procedimientos para la calibración y/o verificación in-situ de sensores meteorológicos.

En las tres primeras líneas de trabajo se pretende obtener la correspondiente acreditación ENAC cumpliendo la normativa en vigor.

Para lograr los objetivos expuestos, se dispone de una serie de equipos tal como se refleja en el anexo 1 a este documento. Además, se está desarrollando un programa de inversiones en equipos de medida y calibración con los más altos requisitos técnicos.

3. Proyectos actuales

De todos los proyectos actualmente desarrollados por el Grupo de Investigadores, una gran parte de ellos conlleva experimentación en los laboratorios PRIER y AIRE, un trabajo que es indispensable desarrollar para la consecución de los objetivos del proyecto. A continuación se lista un breve resumen de cada uno de ellos, en los que incluye la planificación de las pruebas experimentales necesarias.

Plan Nacional de I+D+i (2000-2003) Proyecto: Análisis multipunto del impacto en red de la energía eólica.

Experimentación en laboratorio PRIER

- Corroboración de modelos eléctricos de aerogeneradores
- Análisis experimental de la influencia de las oscilaciones de potencia en la calidad de red
- Análisis del funcionamiento general del sistema de medida diseñado

Experimentación en laboratorio AIRE

- Diseño de las distintas partes del sistema de medida
- Pruebas de funcionamiento y calibrado del sistema

Proyecto: Desarrollo del sistema de conexión a red de un aerogenerador de 300 kW

Experimentación en laboratorio PRIER

- Diseño montaje y verificación de las etapas de potencia
- Diseño y prueba de las políticas de control

Proyecto: Modelado y análisis del sistema de protección del anillo de 132 kV de Zaragoza

Experimentación en laboratorio PRIER

- Verificación de los ajustes de las protecciones
- Verificación de los modelos de red

Proyecto: Diseño de una SET bajo el protocolo de comunicación IEC 61850

Experimentación en laboratorio PRIER

- Pruebas de comunicaciones entre equipos
- Análisis de protocolos de comunicación

Proyecto: Desarrollo de un sistema de medida para certificación de curva de potencia y análisis de calidad de red.

Experimentación en laboratorio AIRE

- Diseño de las distintas partes del sistema de medida
- Realización de los programas informáticos que van a gestionar las distintas funciones del sistema
- Pruebas de funcionamiento y calibrado del sistema

4. Plan de Ampliación del Laboratorio

El Plan de ampliación de los laboratorios está dimensionado de forma coherente con las nuevas necesidades de I+D del Instituto derivado de la puesta en marcha de nuevas líneas de investigación propias siguiendo la línea de los planes nacionales y europeos de I+D, como nuevos desarrollo de I+D dirigidos a las empresas del sector y las nuevas líneas de verificación y ensayo acreditadas.

El detalle de los elementos planteados en el plan de ampliación se representa en la figura 5, recuadrando en rojo los elementos de nueva adquisición que corresponden a:

- Sistema de ensayo de red para la bancada 1 de 22 kW

- Sistema de ensayo de red para la bancada 2 de 22 kW
- Sistema de ensayo de red para la bancada 3 de 35 kW
- Sistema de ensayo de red para la bancada 4 de 90 kW
- Sistema de ensayo de red para la bancada 5 de generador síncrono.
- Sistema de ensayo de red para la bancada 6 de generador de rotor bobinado.

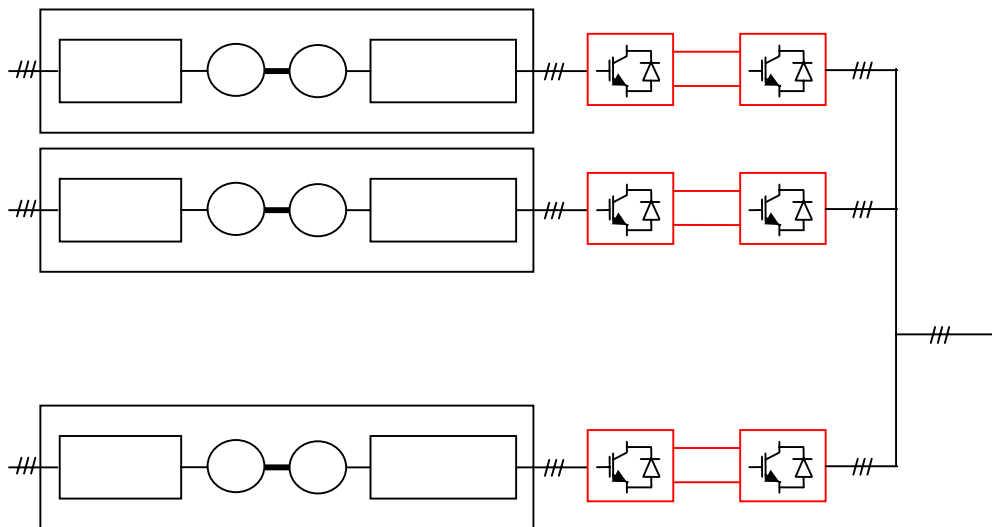


Figura 5. Sistema de ensayo de red

Para los ensayos experimentales previstos debe dotarse al laboratorio con sistemas de almacenamiento a base de supercondensadores, baterías y generación de hidrógeno

Estos sistemas se alimentarán desde el bus de continua de las diversas bancadas, que estarán controlados para asegurar la entrega de potencia constante, o bien adecuada a la carga, de forma que la energía sobrante se utilice para la carga de los supercondensadores y las baterías, o bien la generación de hidrógeno. En momentos en los que se necesite suministrar energía extra, ésta será obtenida de los sistemas de almacenamiento. De esta forma, se obtiene un método de altas prestaciones para asegurar la calidad de la energía y evitar los problemas ocasionados por los cortes o microcortes.

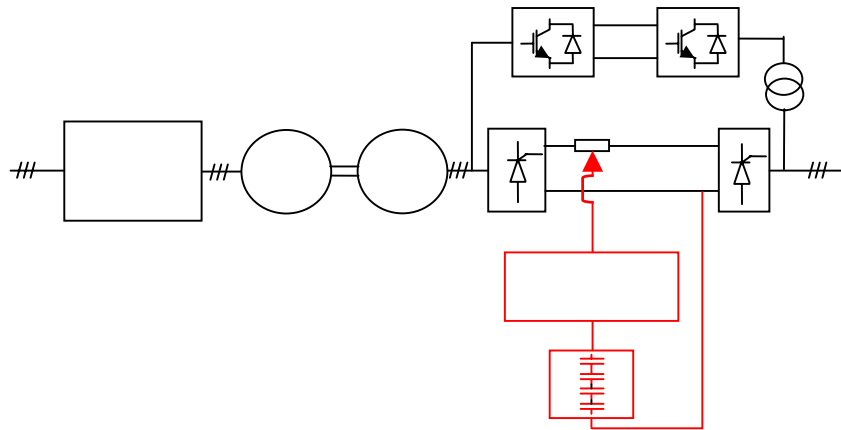


Fig. 6 Carga/descarga de baterías/condensadores

1. Bancada síncrona

Se considera necesario, dada la evolución del mercado de aerogeneradores añadir una bancada con un generador síncrono.

2. Generación solar + sistema de conexión a red

Dadas las características de la energía solar es factible pensar en disponer en el tejado del laboratorio de un sistema fotovoltaico de 10 kW con el que poder experimentar.

3. Laboratorio de protecciones eléctricas

Actualmente se dispone de 2 posiciones de 45 kV. Sin embargo, la casuística existente es muy variada. Se piensa ampliar el número de posiciones a 10 para poder realizar los trabajos de I+D de una manera adecuada. Asimismo, esto permitiría afrontar el problema de la implantación de la norma IEC 61850 de una manera más amplia y precisa.

A.5 PATENTES Y PUBLICACIONES CIENTÍFICAS DE IMPACTO DE LOS MIEMBROS DEL INSTITUTO

- Patentes de los Miembros Promotores del Instituto: Listado por Autor

MIGUEL GARCIA GRACIA

Autores: (p.o. alfabético): J.Barquillas Pueyo, J.M.Forniés Marquina, M.García Gracia, J. Letosa Fleta.

Título: Dispositivo de control automático de selección y cambio de escalas de un medidor de ondas estacionarias.

Nº de Registro: 9200484AÑO: 1992

Entidad Titular: Universidad de Zaragoza

Países: ESPAÑA

Autores: (p.o. alfabético): J.M. Artacho Terrer, J.M.Forniés Marquina, M.García Gracia, J. Letosa Fleta.

Título: Medidor automático de la relación de ondas estacionarias con autoescala y salida digital.

Nº de Registro: 9300162AÑO: 1993

Entidad Titular: Universidad de Zaragoza

Países: ESPAÑA

MARIANO SANZ BADÍA

Inventores (p.o. de firma): Mariano.Sanz

Título: Modelo centralizado de alarmas para procesos industriales

Entidad titular: AITEL S.A

Países a los que se ha extendido: España

Empresa/s que la están explotando: AITEL S.A.

Inventores (p.o. de firma): Mariano Sanz

Título: Sistema sensor modular de rotura de hilos en máquinas textiles

N. de solicitud: 239643 País de prioridad: España

Fecha de prioridad: 1978

Entidad titular: AITEL S.A.

Países a los que se ha extendido: España

Empresa/s que la están explotando: AITEL S.A.

Inventores (p.o. de firma): Mariano Sanz

Título: Dispositivo controlador del rendimiento obtenido en el funcionamiento de motores de inducción

N. de solicitud: 255111 País de prioridad: España

Fecha de prioridad: 1980

Entidad titular: AITEL S.A.

Países a los que se ha extendido: España

Empresa/s que la están explotando: AITEL S.A.

Inventores (p.o. de firma): J. Cruz, M.Sanz

Título: Cocina de calentamiento inductivo de superficie fría

N. de solicitud: 539790 País de prioridad: España

Fecha de prioridad: 1985

Entidad titular: Balay S.A.

Países a los que se ha extendido: Francia, Alemania, Gran Bretaña, Estados Unidos

Empresa/s que la están explotando: Balay S.A.

ANDRÉS LLOMBART ESTOPIÑÁN

Inventores (p.o. de firma): D. Mariano Sanz Badía, D. Francisco J. Val Tomás, D. Andrés Llombart Estopiñán

Título: Método para el control de producción en aerogeneradores eléctricos.

N. de solicitud: 200201386 País de prioridad: ESPAÑA Fecha de prioridad: 14-06-2002

Entidad titular: MADE Tecnologías Renovables S.A.

Países a los que se ha extendido: PCT, Argentina y Chile

Empresa/s que la están explotando: MADE Tecnologías Renovables S.A.

Inventores (p.o. de firma): D. Mariano Sanz Badía, D. José Román Wilhelmi Ayza, D. Andrés Llombart Estopiñán, D. José Jesús Fraile Mora, D. Pedro Angel García Gutiérrez.

Título: Sistema de transferencia de energía eléctrica por acoplamiento inductivo

N. de solicitud: P 200300985 País de prioridad: ESPAÑA Fecha de prioridad: 15-01-2003

Entidad titular: CISTERRA S.L.

Países a los que se ha extendido: España

Empresa/s que la están explotando:

BEGOÑA PEÑA PELLICER

Inventores (p.o. de firma): Begoña Peña, Gorka Aramendi, Asunción Rivero

Título: Método de Monitorización de la Formación de Rebabas en los Procesos de Taladrado de Piezas

N. de solicitud: P2004-02295 País de prioridad: España Fecha de prioridad: 04-09-04

Entidad titular: Fundación Fatronik

Países a los que se ha extendido: España

- Listado de las Principales Publicaciones de Impacto de los Miembros Promotores del Instituto: Listado por Año

Ver páginas siguientes

AÑO	Título del ARTICULO	AUTOR	Otros AUTORES	REVISTA	Índice de IMPACTO
1992	On weighted T-systems	E. Teruel	P. Chrzas-towski J.M. Colom M. Silva	Lecture Notes in Computer Science	Sí 0,402
1993	Liveness and home states in Equal Conflict Sytems	E. Teruel	M. Silva	Lecture Notes in Computer Science	Sí 0,402
1994	Well-formedness of Equal Conflict systems	E. Teruel	M. Silva	Lecture Notes in Computer Science	Sí 0,402
1996	ECS: a class of a modular and hierarchical cooperating systems	L. Recalde	E. Teruel M. Silva	Lecture Notes in Computer Science	Sí 0,402
1996	Ash fouling in coal-fired utility boilers. Monitoring and optimization of On-load cleaning	A. Valero	C. Cortés	Progress in Energy and Combustion Science	Sí 3,371
1996	Structure theory of Equal Conflict Systems	E. Teruel	M. Silva	Theoretical Computer Science	Sí 0,743
1997	Choice-free Petri nets: a model for deterministic concurrent systems with bulk services and arrivals	E. Teruel	J.M. Colom M. Silva	IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics	Sí 0,821
1998	Linear algebraic and linear programming techniques for the analysis of P/T net systems	M. Silva	E. Teruel J.M. Colom	Lecture Notes in Computer Science	Sí 0,402
1998	Modeling and Analisis of Sequential Processes that Cooperate through buffers	L. Recalde	E. Teruel M. Silva	IEEE Trans. Robotic and Automation	Sí 2,126
1998	On linear algebraic techniques for liveness analysis of P/T systems	L. Recalde	E. Teruel M. Silva	Jnl. Of Circuits, Systems, and Computers	Sí 0,248
1998	Petri Nets and Production systems	M. Silva	E. Teruel R. Valette H. Pingaud	Lecture Notes in Computer Science	Sí 0,402
1999	Autonomous continuous P/T systems	L. Recalde	E. Teruel M. Silva	Lecture Notes in Computer Science	Sí 0,402
1999	Policies for the Setting up of Alternative Energy Systems in European SME's: A Case Study"	L.M. Romeo	S. Scarpellini	Energy Conversion and Management Journal	Sí 1,244
1999	Rapid Computation of the Exit Temperature of Hot Combustion Gases Flowing Inside Chimneys	C. Cortés	A. Campo	Applied Thermal Engineering	Sí 0,777
2000	Selection and Competition of Turing Patterns	Begoña Peña	Carlos Pérez-García	Europhys	Sí 2,228
2000	Substantial reduction of the heat losses to ambient air by natural convection from horizontal in-tube flows: impact of an axial bundle of passive baffles	A. Campo	C. Cortés	Heat and Mass Transfer	Sí 0,253
2000	Thermoeconomic Optimization of a Dual-Purpose Power and Desalination Plant	J. Uche	L. Serra A. Valero	Desalination	Sí 0,518
2001	Cold Flow Model of a PFBC cyclone	A. Gil	L.M. Romeo C. Cortés	Powder Technology	Sí 1,219
2001	Combustion and Heat Transfer Monitoring in Large Utility Boilers	L.I. Díez	C. Cortés I. Arauzo A. Valero	International Journal of Thermal Sciences	Sí 0,436
2001	Hybrid desalting systems for avoiding water shortage in Spain	J. Uche	L. Serra A. Valero	Desalination	Sí 0,658
2001	Phase Instabilities of Distorted Hexagonal Ppterns	Begoña Peña	Carlos Pérez-García	Int.J. Bif & Chaos	Sí 0,838
2001	Stability of Turing Patterns in the Brusselator Model	Begoña Peña	Carlos Pérez-García	Phys. Rev.	Sí 2,235
2001	Structure theory of multi-level deterministically synchronized sequential processes	L. Recalde	E. Teruel M. Silva	Theoretical Computer Science	Sí 0,743
2001	Thermoeconomic Optimization of a Dual Purpose Power and Desalination Plant	J. Uche	L. Serra A. Valero	Desalination / Dual Purpose power-desalination plants	Sí 0,955

AÑO	Título del ARTICULO	AUTOR	Otros AUTORES	REVISTA	Índice de IMPACTO	
2002	An Improvement for the Selection of Surge Arresters Based on the Evaluation of the Failure Probability	Luis Montañés	Miguel García-Gracia Mariano Sanz Miguel Ángel García	IEEE Transactions on Power Delivery	Sí 0,479	
2002	Comparison of heat transfer coefficients correlations for thermal desalination units	J. Uche	J. Artal L. Serra	Desalination	Sí 0,517	
2002	Effect of the solid loading on a PFBC cyclone with pneumatic extraction of solids	A. Gil	L.M. Romeo C. Cortés	Chemical Engineering and Technology	Sí 0,678	
2002	Gas-particle flow inside cyclone diplegs with pneumatic extraction	A. Gil	C. Cortés L.M. Romeo J. Velilla	Powder Technology	Sí 1,219	
2002	Semi-analytic solution of the two-dimensional turbulent energy equation in round tubes using an analytic velocity profile and its experimental validation	A. Campo	C. Cortés	Heat and Mass Transfer	Sí 0,253	
2002	Structural Theory and Thermoeconomic Diagnosis. Part I: On Malfunction and Dysfunction Analysis	C. Torres	A. Valero L. Serra J. Royo	Energy Conversion and Management	Sí 1,244	
2002	Structural Theory and Thermoeconomic Diagnosis. Part II: Application to an Actual Power Plant	A. Valero	F. Lerch L. Serra J. Royo	Energy Conversion and Management	Sí 1,244	
2003	Software for the analysis of water and energy systems	J. Uche C. Torres	L. Serra L.A. Herrero Adolfo Sanz-	J.A. Turégano A. Valero David Míguas Alberto P.	Desalination Phys. Rev.	Sí 0,694 Sí 2,202
2003	Transverse Instabilities in chemical Turing patterns of stripes	Begoña Peña	Carlos Pérez-García Ancheler-gues			
2003	Well-defined Generalized Stochastic Petri Nets: A Net-level Method to Specify Priorities	E. Teruel	G. Franceschinis M. De Pierro	IEEE Trans. Software Engineering	Sí 1,967	
2004	Building Operations Maps: An Effective Tool for Improving Gasifier Operations in IGCC Power Plants	S. Usón	A. Valero V. Rangel	Int. J. Thermodynamics		
2004	Economic optimisation of gas turbine inlet air-cooling systems in combined cycle applications	R. Garetta	L.M. Romeo A. Gil	Energy	Sí 0,685	
2004	Integration of desalination with heat-cold-power production in the agro-food industry	J. Uche	L. Serra A. Sanz	Desalination	Sí 1,057	
2004	Life Cycle Assessment of Desalination Technologies integrated with Energy Production Systems.	R.G. Raluy	L. Serra J. Uche A. Valero	Desalination	Sí 0,955	
2004	Life-cycle assessment of desalination technologies versus the Ebro River Water Transfer	L. Serra	G. Raluy J. Uche A. Valero	Energy	Sí 0,685	
2004	Modulated standing waves resulting from a Hopf-Wave interaction in a chemical model	Begoña Peña	Carlos Pérez-García Michael Bestehorn	Int.J. Bif & Chaos	Sí 1,019	
2004	On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Part 2. Malfunction definitions and assessment	A. Valero	L. Correas A. Zaleta A. Lazzaretto V. Rangel	V. Verda M. Reini, V. Rangel Elsevier Energy	Sí 0,685	
2004	Petri nets and manufacturing systems: An examples-driven tour	L. Recalde	J. Ezpeleta M. Silva E. Teruel	Lecture Notes in Computer Science	Sí 0,402	

AÑO	Título del ARTICULO	AUTOR	Otros AUTORES	REVISTA	Índice de IMPACTO
2005	A Time Domanin Small Transformer Model Under Sinusoidal and Non-sinusoidal Supply Voltage	Ignacio Clavería	Miguel García-Gracia Miguel Ángel García Luis Montañés	European Transactions on Electrical Power	Sí 0,056
2005	Desalted water provided by a poligeneration scheme for the tourist sector	F. Colella	J. Uche N. Dejo	Desalination	Sí 0,955
2005	Fluidized bed combustion of refuse-derived fuel in presence of protective coal ash	Ferrer, Eduardo	Aho, Martti Silvennoinen, Jaani Nurminen, Riku-Ville	Fuel Processing Technology	Sí 1,171
2005	Fundamentals of exergy cost accounting and Thermoconomics. Part I: Theory	A. Valero	L. Serra J. Uche	Journal of Energy Resources and Technology	Sí 0,185
2005	Fundamentals of exergy cost accounting and Thermoconomics. Part II: Applications	A. Valero	L. Serra J. Uche	Journal of Energy Resources and Technology	Sí 0,185
2005	High-temperature fuel cells for fresh water production	P. Lisbona	J. Uche L. Serra	Desalination	Sí 0,955
2005	Importance of coal ash composition in protecting the boiler against chlorine deposition during combustion of chlorine-rich biomass	Aho, Martti	Ferrer, Eduardo	Fuel	Sí 1,674
2005	Life Cycle Assessment of Desalination Technologies integrated with Renewable Energies	R.G. Raluy	L. Serra J. Uche	Desalination	Sí 0,955
2005	Life Cycle Assessment of Water Production Technologies. Part 1: Life Cycle Assessment of Different Commercial Desalination Technologies (MSF, MED, RO)	R.G. Raluy	L. Serra J. Uche	International Journal of Life Cycle Assessment	Sí 1,483
2005	Life Cycle Assessment of Water Production Technologies. Part 2: Reverse Osmosis Desalination versus the Ebro River Water Transfer	R.G. Raluy	L. Serra J. Uche A. Valero	International Journal of Life Cycle Assessment	Sí 1,483
2005	Life Cycle Assessment of Water Treatment Technologies: wastewater and water-reuse in a small town	M. Ortiz	G. RAluy L. Serra J. Uche	Desalination	Sí 0,955
2005	Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators	C. Cortés	A. Gil	Progress in Energy and Combustion Science	Sí 3,371
2005	Modelling of Pulverized Coal Boilers: Review and Validation of On-Line Simulation Techniques	L.I. Díez	C. Cortés A. Campo	Applied Thermal Engineering	Sí 0,777
2005	Monitoring and Prediction of Fouling in Coal-Fired Utility Boilers Using Neural Networks	E. Teruel	C. Cortés L.I. Díez I. Arauzo	Chemical Engineering Science	Sí 1,735
2005	Monitoring of drilling for burr detection using spindle torque	Begoña Peña	Gorka Aramendi Asun Rivero Luis N. López de Lacalle	Int.J. of Machine Tools and Manufacture	Sí 1,183
2005	Numerical Prediction of Unburned Carbon Levels in Large Pulverized Coal Utility Boilers	J. Pallarés	I. Arauzo L.I. Díez	Fuel	Sí 1,674

AÑO	Título del ARTICULO	AUTOR	Otros AUTORES	REVISTA	Índice de IMPACTO
2005	Quick estimate of the heat transfer characteristics of annular fins of hyperbolic profile with the power series method	I. Arauzo	A. Campo C. Cortés	Applied Thermal Engineering	Sí 0,777
2005	The Rise and Fall of the Ebro Water Transfer	J. Albiac	M. Hanne- mann J. Calatrava J. Uche J. Tapia	Natural Resources Journal	Sí 0,556
2005	Thermoeconomic Diagnosis: Zooming Strategy Applied to Highly Complex Energy Systems. Part 2: On the Choice of the Productive Structure*	V. Verda	L. Serra A. Valero	journal of Energy Resources Technology - Published Quarterly by Asme	Sí 0,185
2006	Exergy costs and Inefficiency diagnosis of a dual-purpose power and desalination plant	J. Uche	A. Valero L. Serra	Journal of Energy Resources and Technology	Sí 0,185
2006	Forecasting of electricity prices with neural networks	R. Garetá	L.M. Romeo A. Gil	Energy Conversion and Management	Sí 1,244
2006	Life Cycle Assessment of MSF, MED and RO Desalination Technologies	R.G. Raluy	L. Serra J. Uche	Energy	Sí 0,685
2006	Modeling the flow inside cyclone separators	C. Cortés	A. Gil	Progress in Energy and Combustion Science	Sí 3,371
2006	Neural Network for Evaluating Boiler Behaviour	L.M. Romeo	R. Garetá	Applied Thermal Engineering	Sí 0,777
2006	Oxy-co-gasification of coal in an integrated gasification combined cycle (IGCC) power plant	A. Valero	S. Usón	Energy	Sí 0,685
2006	Standing Waves Pattern Formation in Two-Dimensional Reaction-Diffusion Systems	Begoña Peña	Carlos Pérez-García Michael Bestehorn	Europhys	Sí 1,72
2006	Thermoeconomic analysis of a fuel cell hybrid power system from the fuel cell experimental data	T. Álvarez	A. Valero J.M. Montes	Elsevier, Energy	Sí 0,685
2007	Deposition and corrosion behaviour of cynara-coal blends in fluidized bed combustion	Martti Aho	A. Gil Raili Taipale Pasi Vainikka Hannu Vesal	Fuel	Sí 1,674