

Expert-system for an INtelligent Supply of
Thermal Energy in Industry
and other Large Scale Applications

(Sistema experto para el suministro inteligente de
energía térmica en la industria y otras
Aplicaciones a gran escala)

Guía de auditorías termoenergéticas EINSTEIN

Guía de auditorías termoenergéticas EINSTEIN

Version: 2.0

Last revised: 13/06/2012

Coordinador:

Hans Schweiger energyXperts.NET
Barcelona, Spain / Berlin, Germany

Autores (versión actual):

Author(s)	Institution/Company	Responsible author for chapter(s)	E-Mail
Hans Schweiger Claudia Vannoni Cristina Ricart	energyXperts.NET, Spain / Germany	1, 2.1-2.4, 3.1-3.4, 3.5.1-3.5.3, 3.5.5-3.5.6, 3.6.1-3.6.4, 3.7.4,3.8, 3.10-3.12, 4.1, 4.2, 4.4	hans.schweiger@energyxperts.net claudia.vannoni@energyxperts.net
Bettina Muster Christoph Brunner	AEE Intec, Austria	2.5-2.6, 3.5.4, 3.7.1-3.7.3, 3.7.4.6, 3.9, 4.3	b.muster@aee.at c.brunner@aee.at
Konstantin Kulterer	Austrian Energy Agency, Austria	3.1	konstantin.kulterer@energyagency.at
Alexandre Bertrand Frank Minette	CRP Henri Tudor, Luxembourg	Several sections on cooling and air conditioning	alexandre.bertrand@tudor.lu frank.minette@tudor.lu

Autores (versiones anteriores):

Author(s)	Institution/Company	Responsible author for chapter(s)	E-Mail
Stoyan Danov	energyXperts.NET, Spain	1, 2.1-2.4, 3.1-3.4, 3.5.1-3.5.3, 3.5.5-3.5.6, 3.6.1-3.6.4, 3.7.4,3.8, 3.10-3.12, 4.1, 4.2, 4.4	sdanov@gmail.com
Enrico Facci	University of Rome, Italy	1, 2.1-2.4, 3.5.1-3.5.3, 3.6.13.6.2, 3.7.4, 4.4	enrico.facci@uniroma1.it
Damjan Krajnc	University of Maribor, Slovenia	3.5.4, 3.6.5	dkrajnc@uni-mb.si
Thomas Bouquet Stefan Craenen	COGEN Europe	3.7.4.3	thomas.bouquet@cogeneurope.eu stefan.craenen@cogeneurope.eu



La presente obra está sujeta a licencia Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 3.0 Unported de Creative Commons. Si desea ver una copia de esta licencia, visite la página <http://creativecommons.org/licencias/by-nc-sa/3.0/>

Usted es libre de:

copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:

Reconocimiento. Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoya el uso que hace de su obra).

No comercial. No puede utilizar esta obra para fines comerciales

Compartir bajo la misma licencia. Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta

Descargo de responsabilidad

El contenido de esta publicación es responsabilidad exclusiva de sus autores. No refleja necesariamente la opinión de los países de la Comunidad Europea. La Comisión Europea no es responsable del uso que pueda hacerse de la información aquí contenida.

Agradecimientos

La metodología de auditoría EINSTEIN y su kit de herramientas han sido desarrollados en el marco del proyecto europeo “EINSTEIN (expert-system for an intelligent supply of thermal energy in industry)” y “EINSTEIN-II (expert-system for an intelligent supply of thermal energy in industry and other large scale applications)” con el apoyo financiero de la Comisión Europea.

- EINSTEIN (Contract N°: EIE/07/210/S12.466708, Project Coordinator: Christoph Brunner, Joanneum Research -Institute for Sustainable Techniques and Systems, Austria), 2007-2009.
- EINSTEIN-II (Contract N°: IEE/09/702/SI2.558239 .Project Coordinator: Hans Schweiger, energyXperts.NET, Spain), 2010 – 2012.

Asimismo, algunas partes de este desarrollo han contado también con el respaldo de:

- *Generalitat de Catalunya* (España), Departament d’Educació i Universitats. Becas *Beatriu de Pinòs* n.º 2006 BP-B2 0033 y 2007 BP-B2 00012.



- Ministerio de Ciencia e Innovación (España), Proyecto n° DEX-590000-2008-84



- Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (Austrian society for support to research), Project N° 821907 (“EINSTEIN in Österreich”)



Índice

Introducción	6
1 Metodología de la auditoría termoenergética EINSTEIN: aspectos fundamentales	8
1.1 La energía térmica en la industria y en otras aplicaciones a gran escala.....	8
1.2 Ámbito de aplicación	10
1.3 Un enfoque integral de la eficiencia energética	11
1.4 Ventajas de la auditoría EINSTEIN.....	12
1.5 El kit de herramientas EINSTEIN.....	14
1.6 Descripción general de esta guía	15
2 $E = mc^2$. Conceptos teóricos de EINSTEIN	16
2.1 Energía, eficiencia energética y fuentes de energía renovable	16
2.2 Flujos de energía. Definiciones.....	19
2.3 Niveles de temperatura en el suministro de calor y de frío.....	26
2.4 Modelos de proceso y curvas de demanda.....	27
2.5 Integración del calor y análisis pinch	31
2.6 Valoración del coste total: TCA.....	37
3 Cómo implementar una auditoría energética EINSTEIN.....	41
3.1 Contactos preliminares: Motivar	43
3.2 Recogida de datos antes de la auditoría.....	45
3.3 Preparación de la auditoría: procesamiento de la información preliminar	47
3.4 Pre-evaluación rápida.....	49
3.5 Visita de las instalaciones o segunda obtención de datos detallados a distancia	50
3.6 Análisis de la situación actual	55
3.7 Diseño conceptual de opciones de ahorro y objetivos energéticos preliminares	62
3.8 Cálculo del rendimiento energético y análisis medioambiental	87
3.9 Análisis económico y financiero.....	89
3.10 Informes y presentación.....	91
3.11 Conocimiento colectivo	92
3.12 Seguimiento.....	93
4 Ejemplos prácticos	94
4.1 Procedimiento general.....	94
4.2 Comprobación de la coherencia y estimación de los datos.....	102
4.3 Recuperación del calor: ejemplo de un caso en una empresa lechera	108
Nomenclatura	115
Anexo: Cuestionario básico EINSTEIN	116

“No basta el conocimiento de la ciencia aplicada para que nuestro trabajo aporte más beneficios al ser humano. El principal objetivo de todo progreso técnico debe ser el ser humano y su futuro, debe ser solucionar los grandes problemas, aún sin resolver, de la organización del trabajo y la distribución de bienes, a fin de que las creaciones de nuestra mente sean una bendición y no una maldición para la humanidad. No olvidéis nunca este principio cuando estéis enfrascados en vuestros diagramas y ecuaciones”.

Albert Einstein

Discurso a los estudiantes del Instituto de Tecnología de California en 1931.

Introducción

La demanda de energía térmica (calor y frío) en la industria representa alrededor de un 20 % de la demanda energética total de Europa. La calefacción y refrigeración en los edificios contribuye con otro 27% a la energía final demandada. Aunque la eficiencia energética ha aumentado en la industria europea a lo largo de las últimas décadas, todavía hay un gran potencial por explotar en lo que respecta a la reducción de la demanda energética, que podría materializarse mediante la combinación inteligente de soluciones y tecnologías que ya existen. Si se pretende optimizar el suministro de energía térmica, es necesario adoptar un planteamiento holístico e integral que contemple la posibilidad de reducir la demanda mediante la recuperación del calor y la integración de los procesos, y mediante la combinación inteligente de tecnologías de suministro de calor (y frío) ya existentes y asequibles, dadas las restricciones económicas imperantes.

La *metodología de la auditoría termoenergética EINSTEIN* que se expone en este documento se ha desarrollado en el marco de los proyectos europeos EINSTEIN y EINSTEIN-II (Energía Inteligente - Europa, o IEE según sus siglas inglesas). Este proyecto es el fruto de la colaboración con los socios del proyecto, a saber, AEE INTEC (Austria) y energyXperts.BCN (España), entre los años 2003 y 2007 en el marco de los Programas Solar Heating and Cooling y SolarPACES de la AIE (Agencia Internacional de la Energía), Tarea 33/IV sobre calor solar para procesos industriales (www.iea-ship.org). Los elementos y conceptos básicos que conforman esta metodología ya se habían creado en el marco del proyecto europeo POSHIP (5º Programa Marco) (The Potential of Solar Heat for Industrial Processes) y el proyecto nacional austriaco PROMISE (Produzieren mit Sonnenenergie).

Uno de los aspectos interesantes del grupo de investigación de la AIE para la Tarea 33/IV fue la *colaboración interdisciplinaria* de expertos en *energías renovables* (energía termosolar), por un lado, y de *ingenieros de procesos*, por otro. Durante el trabajo realizado en relación con diversos estudios de casos en el sector industrial en el marco de esta Tarea 33/IV, se puso de manifiesto la ausencia de unas herramientas apropiadas para auditar el suministro de energía térmica en la industria:

- * la *complejidad* del problema que entraña optimizar el suministro de energía térmica exige la combinación de los conocimientos sobre tecnologías de procesos, integración de procesos y técnicas de recuperación del calor, y un amplio conocimiento sobre tecnologías eficientes para generar calor y frío, incluidas las energías renovables.
- * esto suele verse limitado por la *falta de tiempo* para realizar auditorías rápidas o estudios de viabilidad orientativos, y por la *falta de conocimientos* de los técnicos implicados. En el caso concreto de los proyectos de energía termosolar para generación de calor estudiados en la Tarea 33/IV de la AIE, se observó una falta de conocimientos por parte de los expertos en energía térmica solar en lo que se refiere a las tecnologías utilizadas en los procesos industriales y la integración del calor en esos procesos, y sobre aspectos más generales del suministro de calor para aplicaciones industriales. Sin embargo, el problema es más bien general: resulta muy difícil que una persona, especialmente los técnicos con menos experiencia que, a menudo, son los que se encargan de realizar auditorías energéticas, pueda tener una idea general de los innumerables conceptos tecnológicos que confluyen a la hora de crear soluciones verdaderamente integrales y optimizadas.

Así pues, partiendo de la experiencia práctica de un gran número de auditorías energéticas realizadas en diferentes sectores industriales y en otras aplicaciones a gran escala como grandes edificios del sector servicios, las metodologías empleadas por los socios se han ido estandarizando cada vez más para culminar en lo que aquí se presenta como la metodología de auditoría EINSTEIN.

Asimismo, se han desarrollado varias herramientas que permiten acceder rápidamente a la información necesaria y automatizar una parte de los cálculos y decisiones de diseño correspondientes (sistema experto), desde simples hojas de cálculo a herramientas informáticas pensadas para tratar partes concretas del problema. Ahora, la mayoría de estas herramientas se han integrado en la herramienta informática EINSTEIN, en la cual se basa la metodología de auditoría EINSTEIN. La implementación de la metodología en forma de un kit completo de herramientas de auditoría junto con un sistema informático experto la hace más sencilla de aplicar y distribuir, y ayuda a reducir el tiempo (y, por ende, el coste) y a aumentar la estandarización (y, por tanto, la calidad) de las auditorías energéticas.

La herramienta informática EINSTEIN, junto con algunas de sus bases de datos complementarias, se desarrolla como un proyecto de software libre y de código abierto publicado en todos los idiomas¹ del proyecto a través de la página web del propio proyecto o las de los miembros del consorcio. Esperamos que esta forma de distribución fomente su uso entre los auditores, ingenieros, consultores e investigadores que trabajan en el suministro de la energía térmica en el sector industrial y de servicios, y que la versión actual pueda mejorarse poco a poco con nuevas experiencias y aportaciones de la comunidad.

¹ *Inglés, búlgaro, checo, francés, alemán, italiano, polaco, eslovaco, esloveno y español*

1 Metodología de la auditoría termoenergética EINSTEIN: aspectos fundamentales

1.1 La energía térmica en la industria y en otras aplicaciones a gran escala

La demanda de energía térmica (calor y frío) en la industria (datos de 2002: alrededor de 2.300 TWh/8400 PJ) es responsable, aproximadamente, del 28% de la demanda energética total (tabla 1) y del 21% de las emisiones de CO₂ en Europa². La calefacción y refrigeración en los edificios contribuye con otro 27% a la energía final demandada [DG INFSO 2008].

Tabla 1. Distribución de la demanda energética final de la UE en 2002. Fuente: Libro Verde de la eficiencia energética.

2002	Buildings (residential and tertiary)		Industry		Transport		All final demand sectors	
	Mtoe	% of final demand	Mtoe	% of final demand	Mtoe	% of final demand	Mtoe	% of final demand
Solid fuels	12.2	1.1	38.7	3.6	0.0	0.0	50.9	4.7
Oil	96.8	8.9	46.9	4.3	331.5	30.6	475.2	43.9
Gas	155.6	14.4	105.4	9.7	0.4	0.0	261.5	24.2
Electricity (incl. 14 % from RES)	121.3	11.2	91.2	8.4	6.0	0.6	218.5	20.2
Derived heat	22.8	2.1	7.5	0.7	0.0	0.0	30.3	2.8
Renewables	29.0	2.7	16.2	1.5	1.0	0.1	46.2	4.3
Total	437.8	40.4	306.0	28.3	338.9	31.3	1082.6	100.0

Aunque la eficiencia energética ha aumentado en la industria europea a lo largo de las últimas décadas, todavía hay un gran potencial por explotar en lo que respecta a la reducción de la demanda energética, que podría materializarse mediante la combinación inteligente de soluciones y tecnologías que ya existen. En el Libro Verde de la UE sobre la eficiencia energética, se calcula que el ahorro potencial que se puede lograr en la industria (sin cogeneración) alcanzaría los 350 TWh/1260 PJ [Comisión Europea, 2005]. El plan de actuación de eficiencia energética de la Comisión Europea indica que, para cumplir los objetivos de Kyoto asumidos por la UE, el 40 % de ellos deben alcanzarse mediante la mejora de la eficiencia energética.

La mejora de la eficiencia energética no sólo genera unos beneficios ambientales evidentes, sino que también resulta interesante para las empresas del sector industrial desde el punto de vista económico: en muchos casos, la inversión se puede recuperar en cuestión de meses o unos pocos años. En una empresa mediana o pequeña típica, la energía puede representar entre el 3 y el 12 % de los costes de explotación, pero hay un potencial de ahorro de energía del 15 al 30 % [E-Check 2006]. Sin embargo, a menudo no se realizan las inversiones necesarias por alguno de los siguientes motivos:

- × Desconocimiento, por parte de las empresas, de las posibles soluciones de eficiencia energética que existen.
- × Los costes asociados a la energía, a pesar de ser importantes, no se encuentran entre las principales prioridades de las empresas. Las inversiones en energía compiten con las inversiones en la mejora de la producción y de los productos, lo cual impide que se invierta en la conservación de la energía. A pesar de que estas inversiones, en sí, son bajas, tienen que competir por los fondos disponibles.
- × Además, la mayoría de las empresas industriales no perciben el tema de la energía como un problema diferenciado, sino como un componente de problemas más amplios, como son los costes

²Incluida la generación de electricidad en la industria. Fuente: <http://ghg.unfccc.int>. Combustión total de carburantes en las industrias manufactureras y en el sector de la construcción dentro de la UE en 2002: 583.070 millones de toneladas de CO₂

de fabricación, el cumplimiento de la normativa medioambiental, la seguridad y la productividad. La eficiencia energética tiene que competir con otros problemas por los recursos limitados de una empresa. Aunque el capital es el recurso más citado, las horas de trabajo invertidas pueden llegar a tener la misma importancia o incluso más. Los recortes de plantilla hacen que haya menos personal disponible para tratar estos problemas.

- * El escaso (nulo) presupuesto que se destina a las auditorías energéticas.
- * Incluso en los casos en que sí se realizan auditorías energéticas, los auditores suelen tener pocos conocimientos de las opciones tecnológicas y no se atreven o no disponen de los medios para proponer soluciones innovadoras y poco convencionales.

La metodología de la auditoría termoenergética EINSTEIN pretende suplir estas carencias y barreras y contribuir a la implantación generalizada de soluciones integrales eficientes para el suministro de la energía térmica.

1.2 **Ámbito de aplicación**

La auditoría termoenergética EINSTEIN está dirigida especialmente a las industrias y a aplicaciones a gran escala que tienen una gran demanda de energía térmica (calor y frío) dentro de los niveles bajo y medio de temperaturas hasta un máximo de 400 °C, como son:

a) Sectores industriales:

- × Industria alimentaria
- × Industria química
- × Industria papelera
- × Fabricación de maquinaria, equipos y automoción
- ×
- × Industria de transformación de la madera y del plástico
- × Tratamiento de superficies metálicas
- × Industria textil y otros sectores industriales

b) Aplicaciones no industriales:

- × las redes de calefacción y refrigeración urbana, incluida también la integración de las demandas en forma de generación centralizada de electricidad y calor para agrupaciones y redes industriales que integran empresas industriales en otros sectores
- × edificios del sector terciario, como, por ejemplo, grandes edificios de oficinas, centros comerciales y supermercados, hoteles, hospitales, centros de convenciones, centros educativos, balnearios, etc.
- × otras instalaciones que consumen mucha energía térmica, como son las plantas desalinizadoras, las plantas de tratamiento de aguas, etc.

Las ventajas de la metodología EINSTEIN se hacen especialmente evidentes en el caso de las pequeñas y medianas empresas, ya que el coste de una auditoría convencional con una exhaustividad y calidad comparables supone para ellas una importante barrera para la introducción de tecnologías eficientes.

1.3 Un enfoque integral de la eficiencia energética

Para optimizar el suministro de energía térmica, **es necesario un planteamiento holístico e integral** (figura 1) que contemple los siguientes puntos:

- × Las posibilidades de **reducir la demanda** optimizando los procesos y aplicando tecnologías más competitivas y que consuman menos energía.
- × **Medidas que fomenten la eficiencia energética** basadas en la recuperación del calor y la integración de los procesos.
- × Una **combinación inteligente de las tecnologías de suministro de calor y frío que ya existen** (calderas y quemadores eficientes, cogeneración, bombas de calor), **incluido** el uso de **energías renovables** (sobre todo en términos de eficiencia térmica, hay que destacar la biomasa y la energía termosolar).
- × Consideración de las limitaciones económicas existentes.

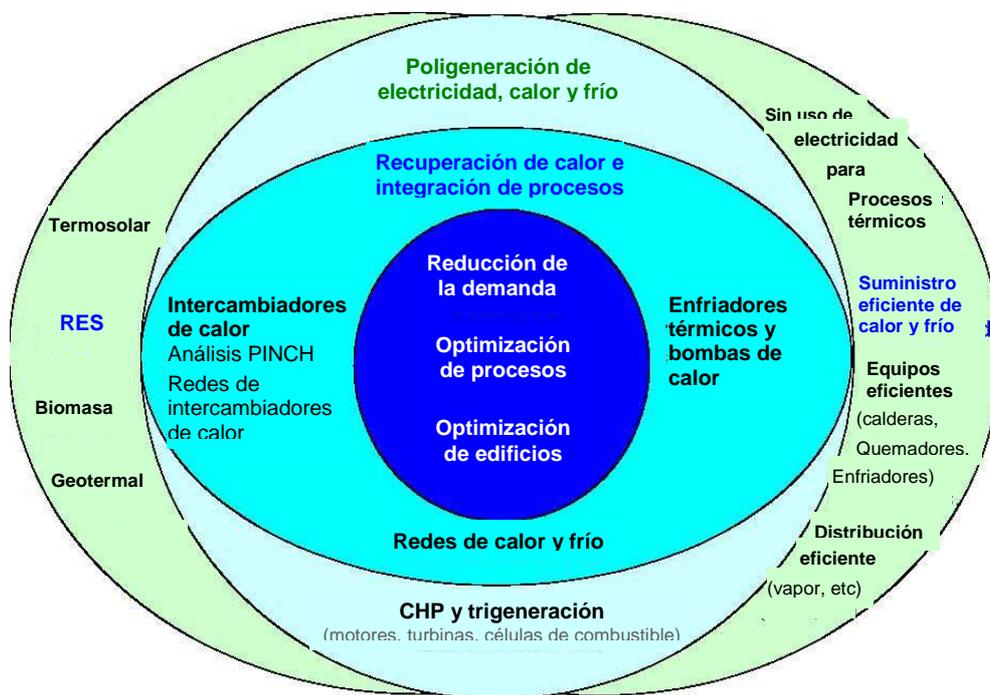


Figura 1: Enfoque holístico de las auditorías termoenergéticas (“visto a través de los ojos de EINSTEIN”), que combina la reducción de la demanda, la recuperación del calor y la integración de los procesos, así como una combinación inteligente de las tecnologías de suministro.

1.4 Ventajas de la auditoría EINSTEIN

A diferencia de muchos de los aspectos del consumo de electricidad industrial (bombas, motores, etc.), donde a menudo se pueden conseguir buenos resultados aplicando una serie de recomendaciones y medidas estándar, la tarea de optimizar *el suministro de energía térmica* en la industria es, técnicamente, más complejo:

- × En muchas empresas y, en particular, en las pequeñas y medianas, se dispone de muy poca información, principalmente global, sobre el consumo de energía real (facturas de combustible, especificaciones técnicas de las calderas, etc.). Por lo tanto, el consumo de cada proceso y subproceso tiene que calcularse y determinarse efectuando mediciones que son lentas y caras de realizar.
- × La explotación de los potenciales existentes de recuperación del calor suele exigir la integración de varios procesos a diferentes niveles de temperatura y con diferentes horarios de funcionamiento (integración de los intercambiadores de calor y la acumulación del calor).
- × Para conseguir unas soluciones óptimas, tienen que combinarse diferentes tecnologías existentes para el suministro del calor.

La complejidad técnica del problema contrasta con la necesidad de contener los costes y de crear, por tanto, una metodología de evaluación que sea rápida. Éste es uno de los principales motivos que hacen que el potencial de ahorro de energía térmica esté mucho menos explotado que el potencial de ahorro de electricidad.

Para superar estas limitaciones, el kit de herramientas EINSTEIN recurre a los conceptos que se describen a continuación y permite procesar datos y generar propuestas de complejidad media en pequeñas y medianas empresas típicas en tan sólo 4 – 8 horas de trabajo de un experto novel. Las principales ventajas del kit de herramientas EINSTEIN se describen también en la figura 2 y son las siguientes:

- × **estandarización del problema y las posibles soluciones:** tanto la recopilación de datos como la elaboración de la propuesta se realizan mediante modelos estandarizados para distintas operaciones (procesos), que representan un proceso industrial genérico aplicable a las ramas industriales y a los tipos de edificios a las que se dirige el proyecto; y módulos estandarizados para los subsistemas de suministro de calor y frío.
- × **cálculos "orientativos": ayudas a la hora de realizar estimaciones y cálculos de datos que no se tienen pero que son necesarios** para conocer la demanda de calor. En muchos casos, se pueden conseguir datos, al menos aproximados, sobre la demanda de calor de los diferentes procesos si se combinan las diferentes informaciones (a menudo incompletas, fragmentadas y, a veces, sólo cualitativas) que se han podido recoger durante las visitas y entrevistas con el personal técnico de la empresa. Los cálculos, normalmente largos y lentos, que son necesarios para procesar esta información se pueden simplificar utilizando tan sólo una parte de los datos. De esta manera, al menos en las etapas previas del diseño, podremos evitar el tener que realizar mediciones in situ, y, en menos de una hora de trabajo de cálculo, lograr un mínimo de precisión gracias a la comprobación interna de los datos.
- × **semiautomatización del procedimiento de auditoría y de la elaboración de propuestas:** la herramienta informática EINSTEIN incorpora bases de datos, por ejemplo, con los parámetros técnicos de los componentes estándar, y ayudas para la toma de decisiones, de manera que un técnico pueda utilizar la herramienta para solucionar problemas complejos sin tener una formación especial. El uso de valores de referencia ayudará al usuario a evaluar la situación antes y después de la intervención propuesta. También se incluyen listas para la comprobación rápida de datos y mediciones estándar. El programa genera automáticamente los informes de las auditorías en un formato que permite que un auditor externo pueda entregarlos directamente al cliente o que el personal técnico pueda entregarlos al propio gerente de la compañía.
- × **comunicación de los datos a través de Internet o mediante un breve cuestionario:** teniendo en cuenta que, en muchos casos, para realizar una primera evaluación rápida basta con procesar muy pocos datos, se ha elaborado un *breve cuestionario*. Este cuestionario permite recoger los datos in situ y, si es necesario, se puede cumplimentar muy fácilmente por teléfono. También se puede acceder al cuestionario a través de una página web que sirve para enviar datos a distancia.



Figura 2: Descripción general de las funciones de la metodología EINSTEIN, una auditoría termoenergética rápida, barata y de gran calidad.

1.5 El kit de herramientas EINSTEIN

La metodología para auditorías EINSTEIN se basa en una aplicación informática que contiene ayudas y directrices para la toma de decisiones y que constituye un **sistema experto³ completo para realizar auditorías termoenergéticas**. Esta sencilla herramienta, junto con la guía de auditoría EINSTEIN, conforma un **kit de herramientas para la auditoría energética** que guía a los consultores a través de los diferentes pasos del procedimiento, desde la auditoría propiamente dicha (preparación de la visita y obtención de los datos) hasta la elaboración, diseño y evaluación cuantitativa (energética y económica) de soluciones alternativas, pasando por el procesamiento de los datos.

La herramienta básica de software del sistema experto y el manual se pueden conseguir gratuitamente en forma de **software de código abierto** (www.sourceforge.net/projects/einstein). Este tipo de software ha resultado ser muy práctico a la hora de difundir conocimientos y de realizar el mantenimiento, reparación de fallos, actualización y mejora del programa gracias a las aportaciones de los usuarios [FLOSS 2002]

El kit de herramientas EINSTEIN permite crear soluciones para ahorrar energía térmica y dinero gracias a un sistema experto que cuenta con una interfaz intuitiva muy fácil de usar.

El sistema experto cuenta con los siguientes módulos:

- a) Un bloque para la obtención y procesamiento de los datos

La obtención de datos se realiza primordialmente a través de un breve cuestionario. Otro módulo ayuda al auditor a realizar una estimación de los datos que no están a su disposición. Asimismo, también cuenta con un enlace a una tabla con información sobre las mejores prácticas y valores de referencia que le ayudará a evaluar la situación técnica de la empresa.

- b) Un bloque para la elaboración de una nueva propuesta.

Este bloque está formado por el módulo de optimización de procesos, el módulo de recuperación de calor, que ayuda a diseñar y optimizar una red adecuada de intercambiadores de calor para la recuperación de calor y la integración de los procesos; y un módulo de suministro de calor y frío, que ayuda a seleccionar y dimensionar el equipo de suministro y los sistemas de distribución de calor o frío más adecuados.

- c) Un bloque para la evaluación energética, económica y ambiental de la nueva propuesta.

El rendimiento energético del sistema viene determinado por un módulo de simulación de sistemas. En función del rendimiento energético, el módulo de *análisis de costes totales* genera automáticamente una evaluación económica y ambiental.

- d) Un bloque para generar informes-propuesta a la empresa.

Se generan informes automáticos en un formato que se puede presentar directamente a la empresa. Estos informes contienen información sobre el diseño técnico de la nueva propuesta, los costes de inversión de la medida y una guía económica para su puesta en marcha.

El sistema experto guía al auditor a la hora de tomar las decisiones pertinentes gracias a los menús de ayuda, sugerencias sobre las mejores opciones, etc. Estas ayudas, junto con la guía actual para la realización de auditorías termoenergéticas, sus recomendaciones y mejores prácticas, constituyen un kit de herramientas que podrán utilizar también personas no expertas.

³Un **sistema experto** es un tipo de programa informático que debe seguir ciertas reglas para analizar información (normalmente facilitada por el usuario del sistema) y que permite analizar problemas y recomendar a los usuarios las acciones que deben realizar.

1.6 Descripción general de esta guía

El capítulo 2 de la presente guía de auditoría es una introducción a los conceptos teóricos que se utilizan en la metodología de auditoría EINSTEIN. Este capítulo es esencial para comprender los detalles de los pasos de una auditoría y de los procedimientos de cálculo.

En el capítulo 3, se describe la metodología de auditoría EINSTEIN paso a paso, siguiendo un orden cronológico desde el primer contacto con la industria hasta la entrega del informe de la auditoría y su seguimiento. En cada uno de los pasos de la auditoría, se destacan los principales aspectos que merecen una especial atención.

En el capítulo 4 se ofrecen unos cuantos ejemplos de aplicación de la metodología de auditoría EINSTEIN. En el anexo encontrará el *Cuestionario Básico* EINSTEIN que puede utilizar para la toma de datos.

Bibliografía del capítulo 1:

Comisión Europea (2005): *Cómo hacer más con menos: Libro Verde sobre la eficiencia energética*, Bruselas, p.31.

E-Check in CRAFT-SME (2006): *Energy Checks from Small and Medium Craft Enterprises*. Proyecto EIE/04/066/S07.38641.

DG INFSO (2008). European Commission – DG INFSO: *Impacts of Information and Communication Technologies on Energy Efficiency*. Final Report, September 2008.

FLOSS (2002). Free/Libre and Open Source Software: Survey and Study. Final report. International Institute of Infonomics, Universidad de Maastricht, Países Bajos, Berlecon Research GmbH, Berlín, Alemania, junio de 2002, proyecto europeo nº IST –29565 (5º PM)

2 $E = mc^2$. Conceptos teóricos de EINSTEIN

2.1 Energía, eficiencia energética y fuentes de energía renovable

2.1.1. El consumo de energía por tipos de energía y por tipos de uso

En la industria y en los grandes edificios del sector servicios, la energía se consume mayoritariamente en forma de electricidad, combustibles (combustibles fósiles, como el gas natural o el fuelóleo, pero también la biomasa y el biogás), y en algunos casos en forma de calor o frío (generado externamente) procedente de la red de calefacción y refrigeración urbana.

El consumo de energía se puede expresar en términos de energía final y en términos de energía primaria:

- × *Energía final*: es la suma de las energías de las diferentes fuentes de energía que entran en la empresa, independientemente de su forma (en EINSTEIN, el contenido de energía de los combustibles se calcula en términos de su poder calorífico inferior o LCV, por sus siglas en inglés).
- × *Energía primaria*: es la cantidad total de energía necesaria para generar este suministro de energía, teniendo en cuenta las pérdidas que se producen en los diferentes pasos del procesamiento, desde la extracción hasta la conversión y el transporte. La diferencia entre el contenido de energía final y de energía primaria es particularmente acusada en el caso de la electricidad: con la tecnología actual que se utiliza para el suministro de electricidad en Europa, se necesitan entre 2,5 y 3 unidades de energía primaria para generar una unidad de electricidad.

La energía puede utilizarse para usos *térmicos* o para usos *no térmicos*. La auditoría termoenergética EINSTEIN se ocupa de los usos térmicos de la energía. Los *usos térmicos* de la energía, según se definen en EINSTEIN, son los siguientes:

- × Calentamiento o enfriamiento para procesos (incluida la energía necesaria para producir reacciones químicas, si éstas son endotérmicas).
- × Calefacción y refrigeración de edificios (espacios de producción y oficinas, etc.).
- × Agua caliente sanitaria (duchas, cocinas, etc.).

Los *usos no térmicos* serían los siguientes:

- × El consumo de energía eléctrica (y de otros tipos) para alimentar dispositivos de iluminación, maquinaria (como motores o compresores) y otros equipos eléctricos, *excepto* los aparatos de aire acondicionado, refrigeradores y calefactores eléctricos, incluidos en la demanda de energía térmica.

Aunque importantes en el balance energético global, EINSTEIN no tiene en cuenta los siguientes usos:

- × Uso no energético de los combustibles, por ejemplo, como materias primas para procesos químicos.
- × El consumo de energía para el transporte de materias primas y productos acabados, y para el desplazamiento del personal hasta y desde el lugar de trabajo.
- × La energía que contienen las materias primas (obtenida de pasos de transformación previos).

El consumo de energía para usos térmicos en la industria europea se aproxima al 70 % del consumo total en términos de energía final, y supera el 50 % en términos de energía primaria. En los edificios también se consume más del 50% de la energía final para satisfacer la demanda de calefacción y refrigeración de locales y de agua caliente sanitaria

2.1.2. Energías renovables

Las fuentes de energía renovable más comunes para la conversión directa en los sistemas de suministro de calor y frío industrial son:

- × La energía termosolar (incluida la CHP: producción combinada de calor y electricidad)
- × La biomasa y el biogás
- × La energía geotérmica

Todas las demás tecnologías de energía renovable tienen una importancia indirecta, ya que sólo pueden reducir el impacto del consumo de electricidad empresarial a escala global (más allá de los límites de la propia empresa). Esta afirmación también puede aplicarse a los sistemas fotovoltaicos, incluso a los instalados en los tejados de las empresas, ya que dichos sistemas suelen estar conectados a la red de energía eléctrica y no inciden directamente en el consumo de electricidad de las empresas.

La energía que la industria utiliza en forma de energías renovables no se tiene en cuenta en el consumo de energía primaria. Sin embargo, no puede obviarse la diferencia entre fuentes de energía renovables y las contribuciones de las diversas fuentes. Así pues, en EINSTEIN se computan de forma separada:

- × La energía termosolar es renovable y casi infinita.
- × La biomasa y el biogás son fuentes renovables pero finitas. El uso de estas fuentes energéticas para uso térmico compite con el uso del mismo material en otros sistemas (p. ej. centrales eléctricas, conversión a biocombustibles) y con el uso del suelo para la producción agrícola.

2.1.3. Impacto ambiental del uso energético de las empresas

En Europa, el consumo de energía industrial representa aproximadamente el 28% del total del consumo de energía final (sin tener en cuenta el consumo de energía para el transporte que ocasiona la producción industrial)⁴. La calefacción y refrigeración de locales en edificios contribuye con otro 27% a la demanda de energía final.

El impacto ambiental del uso de la energía se debe a varios factores:

- × *Emisiones* de diversas sustancias procedentes de la conversión de energía (CO₂, emisiones de otros gases de efecto invernadero, NO_x, CO, emisiones radioactivas, residuos nucleares, etc.)
- × *Consumo* de recursos finitos y no renovables (combustibles fósiles, materias primas)
- × *Riesgos* asociados con el sistema de conversión y el suministro de energía (p. ej. los accidentes nucleares, el transporte de combustibles, etc.)
- × *Consumo de agua* (p. ej. torres de refrigeración)
- × *Uso del suelo* (p. ej. el uso del suelo para biocombustibles o biomasa que compite con su uso para la producción agrícola)

Realizar una valoración exhaustiva del impacto ambiental teniendo en cuenta todos los factores mencionados anteriormente está más allá del alcance del método EINSTEIN. Así pues, se utilizan los siguientes parámetros como principales indicadores para realizar dicha evaluación ambiental:

- × Consumo de energía primaria como principal indicador de la evaluación del impacto ambiental
- × *Generación de CO₂*
- × Generación de residuos nucleares muy radioactivos (relacionados con el consumo de electricidad)
- × *Consumo de agua*

2.1.4 Estrategias orientadas a la demanda y el suministro para reducir el consumo de energía

El consumo de energía en las empresas (y en general) no es una necesidad en sí misma, pero suele ser un medio para alcanzar algunos objetivos, como por ejemplo:

- × Mantener limpios los equipos y superficies
- × Separar dos fluidos mediante destilación

Se puede conseguir este mismo objetivo, el de limpiar por ejemplo, de diversas formas y con unos consumos asociados de energía muy distintos. Las superficies y algunos equipos se pueden limpiar de las siguientes formas:

- × Calentar grandes cantidades de agua hasta los 80 o 90 °C y hacer un lavado diario

⁴ Dato de EuroStat (200).

- * Lavar a una temperatura inferior pero a presión o aplicando detergente
- * Para tener que limpiar menos, realizar los procesos que generen mucho polvo en espacios separados
- * etcétera

En este sentido, tal y como se describe en el apartado 1.3, en las primeras fases de todas las auditorías EINSTEIN, se deben buscar distintos modos de *reducir la demanda* en su origen. En general, esta es la vía más rentable desde el punto de vista económico y, al mismo tiempo, la más ecológica para ahorrar energía.

De esta forma, sólo tiene que cubrirse la demanda de calor y frío *restante* mediante un sistema de suministro de calor y frío optimizado desde el punto de vista energético y ambiental.

2.2 Flujos de energía. Definiciones

Para analizar la demanda de energía térmica, en la metodología EINSTEIN se utilizan las siguientes cantidades básicas:

- *El consumo de energía final (FEC, por sus siglas en inglés) y el consumo de energía final para usos térmicos (FET, por sus siglas en inglés):* valor calorífico inferior (LCV, por sus siglas en inglés) del consumo de combustibles, calor y electricidad (para uso térmico).
- *Suministro de calor/frío útil (USH/USC, por sus siglas en inglés):* Es el calor o frío generado en el sistema de suministro de calor o frío (calderas, quemadores, refrigeradores) y que se distribuye a los diferentes procesos que consumen calor o frío en forma de vapor, aire caliente, agua caliente, agua fría etc.
- *Calor/frío útil para procesos (UPH/UPC, por sus siglas en inglés):* calor o frío aportado a un proceso (medido a la entrada del intercambiador de calor del proceso).

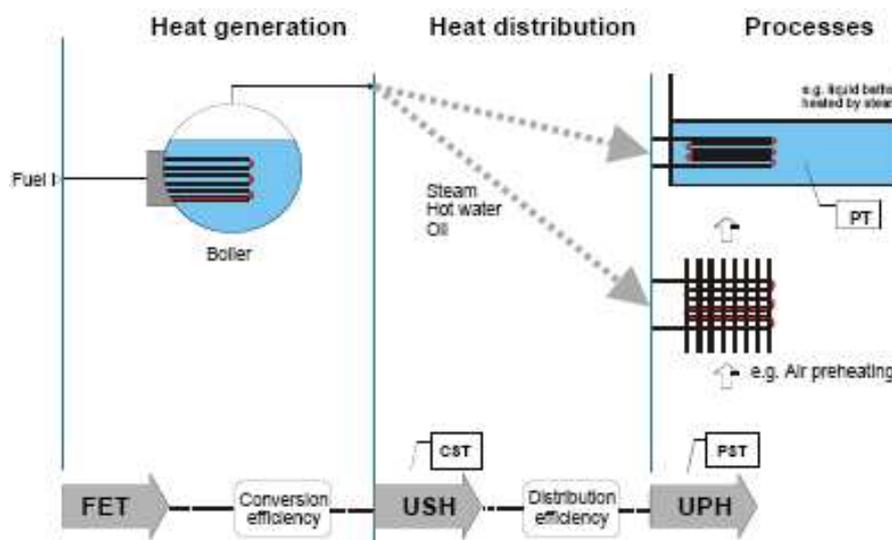


Figura 3: Definiciones, según EINSTEIN, de los flujos de energía en un sistema de suministro de

Las relaciones USH/FET (o USC/FET) y UPH/USH (o UPC/USC) definen la eficiencia de conversión y la eficiencia de distribución del sistema (figura 4).

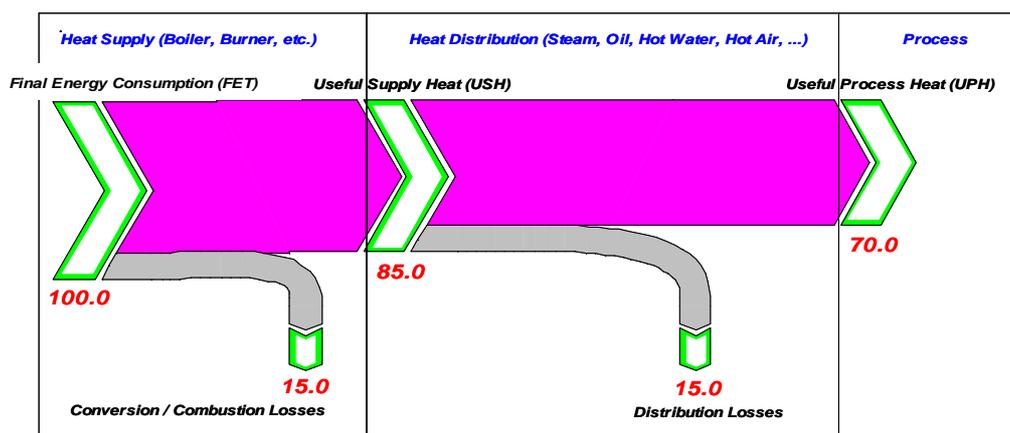


Figura 4: Diagrama de Sankey de los flujos de energía en el que se muestran las eficiencias típicas de conversión y distribución.

Si, además, se tienen en cuenta los diferentes flujos de calor o frío residual, el esquema de flujos de energía se vuelve un poco más complejo (figura 6). En la figura 5 puede verse un ejemplo de proceso industrial con diferentes tipos de recuperación del calor residual.

En EINSTEIN, llamamos *calor residual disponible* (*QWH*, por sus siglas en inglés) al flujo de energía producido por cualquiera de los subsistemas (suministro / distribución / procesos / otros) que no sea la salida principal de ese sistema. Flujos de calor residual podrían ser los siguientes:

- × El calor que contienen los gases de escape de una caldera o el ciclo de rechazo de calor de una máquina de refrigeración
- × Los condensados recuperados de las tuberías de vapor.
- × El calor contenido en el agua residual de un proceso de lavado.

De manera análoga, puede haber frío residual (*QWC*, por sus siglas en inglés) tal como por ejemplo, aire de escape frío procedente de un aire acondicionado

Asimismo, llamamos *calor residual recuperado* (*QHX*, por sus siglas en inglés) o *frío* (*QCX*) a los flujos de energía utilizados como entrada en cualquiera de los subsistemas (suministro / distribución / procesos) y que proceden del sistema de recuperación del calor residual (incluido el suelo y el aire ambiental). Flujos de calor residual recuperado podrían ser los siguientes:

- × Precalentamiento del aire de combustión o del agua que entra en una caldera.
- × Precalentamiento del agua a la entrada de un proceso de lavado.
- × Precalentamiento del retorno de un circuito de distribución de agua caliente.
- × Preenfriamiento del aire en la entrada de un proceso de germinación en la producción de malta

En los siguientes apartados, se ofrece una definición matemática de las cantidades empleadas en los balances energéticos de EINSTEIN.

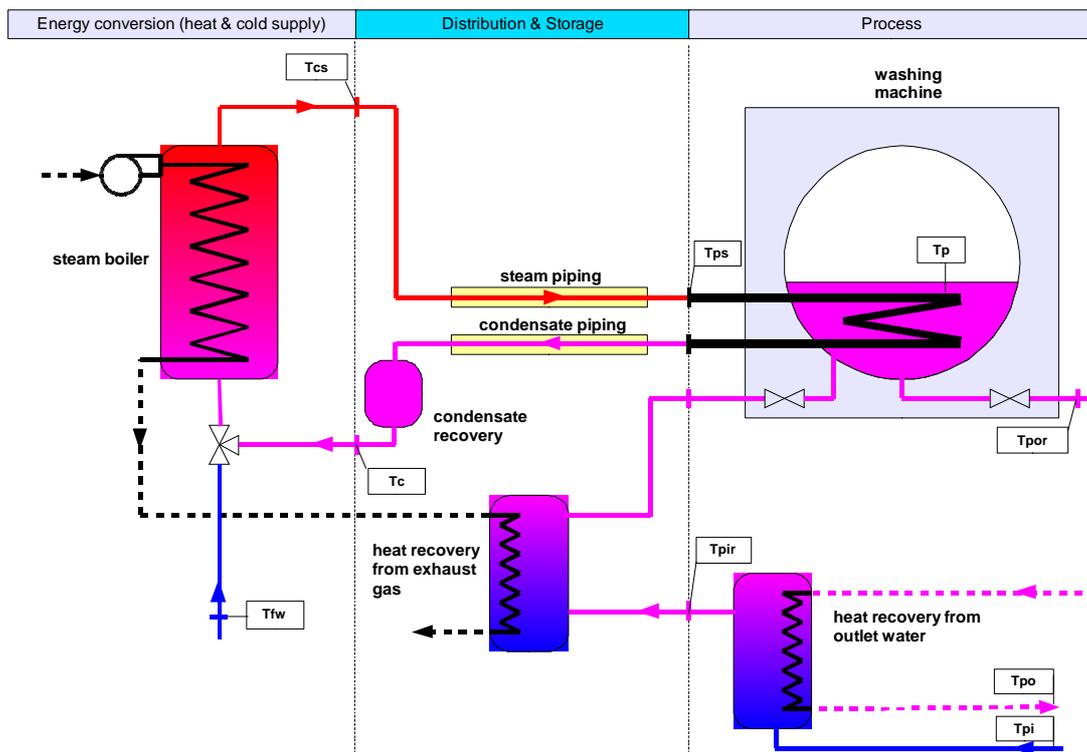


Figura 5: Ejemplo de un proceso de lavado industrial, representado según el modelo EINSTEIN, con diferentes tipos de recuperación de calor (recuperación del calor de los gases de escape de una caldera para precalentar agua; recuperación del calor del agua residual para precalentar agua; recuperación de condensados para precalentar el agua que entra en una caldera).

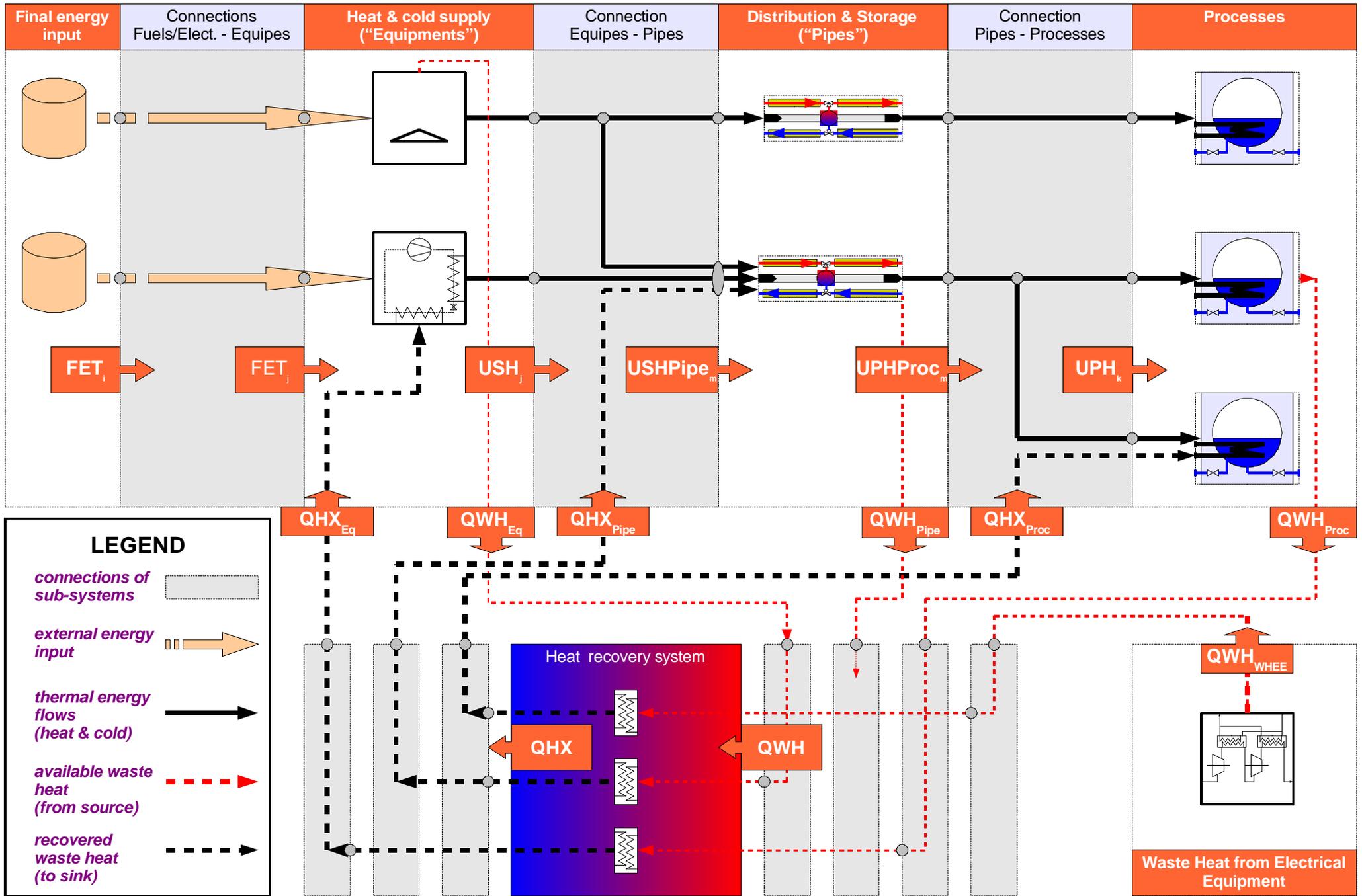


Figura 6: Definiciones de EINSTEIN en un sistema de suministro de calor con recuperación de calor (análogo para un sistema de suministro de refrigeración)

2.2.1. Consumo de energía final y primaria

El total del consumo de energía final (FEC) se utiliza para contabilizar toda la energía final que entra en la empresa en forma de combustibles (expresado en términos de LCV), electricidad y calefacción urbana.

$$E_{FEC} = E_{FEC,el} + \sum_{i=1}^{N_{fuels}} E_{FEC, fuel(i)} + E_{FEC,heat} \quad (2.1)$$

El consumo de energía primaria (PEC, por sus siglas en inglés) se obtiene de aquí, aplicando los diferentes factores de conversión para cada tipo de energía:

$$E_{PEC} = f_{PE,el} E_{FEC,el} + \sum_{i=1}^{N_{fuels}} f_{PE,i} E_{FEC, fuel(i)} + f_{PE,heat} E_{FEC,heat} \quad (2.2)$$

donde $f_{PE,el}$ es el factor de conversión de la energía primaria para la electricidad y $f_{PE,i}$ es el factor de conversión de la energía primaria para los diferentes tipos de combustibles (ver tabla 2 para valores típicos).

Tabla 2. Típicos factores de conversión de energía primaria, para diferentes tipos de recursos energéticos⁵⁵.

Tipo de Combustible	Factor de Conversión de energía primaria
Madera	0.2
Calefacción de distrito con el 70% de CHP con alimentación de gas natural	0.6
Gas Natural	1.1
Fuelóleo	1.1
Electricidad	3.0

La energía se utiliza para usos térmicos (calefacción o refrigeración) y no térmicos (iluminación, motores, etc.). La electricidad utilizada en los refrigeradores para generar frío y aire acondicionado, y en los aparatos eléctricos de calefacción se cuenta como energía para usos térmicos.

Las cantidades de energía correspondientes se denominan de la siguiente forma:

- × PET/FET: Energía primaria/final para usos térmicos.
- × PEO/FEO: Energía primaria/final para otros usos (no térmicos).

Se aplica la siguiente ecuación (y de forma análoga para la energía primaria):

$$E_{FEC} = E_{FET} + E_{FEO} \quad (2.3)$$

La energía final total para usos térmicos es la suma de la energía consumida por los aparatos de calefacción o refrigeración en la fábrica:

$$E_{FET} = \sum_{j=1}^{N_{eq}} E_{FET, j} \quad (2.4)$$

donde N_{eq} es el número de equipos térmicos que hay en la fábrica (calderas, refrigeradores, motores de cogeneración, etc.)

⁵⁵ Schramek E.-R. (editor), Recknagel, Sprenger, Schramek – Taschenbuch für Heizung-und Klimatechnik 07-08, Oldenburg editions, 2007

El caso especial de la cogeneración (CHP):

Desde el punto de vista de la metodología EINSTEIN, la cogeneración se considera un equipo de suministro de calor (para más detalles, véase el punto 3.7). El consumo de energía final de los equipos de cogeneración se considera como el consumo neto compuesto por el consumo de combustibles y el consumo *negativo* en forma de electricidad de producción propia:

$$E_{FET,j} = E_{FET,fuel(j)} - E_{FET,elgen,j} \quad (2.5)$$

Nota: si la eficiencia de conversión eléctrica de un equipo de cogeneración es mayor que el valor de referencia de la red eléctrica de referencia, el consumo de energía en un equipo de cogeneración en términos de *energía primaria* puede llegar a ser negativo!

2.2.2 Suministro de calor y frío útil (USH/USC):

El suministro de calor útil (*USH*, por sus siglas en inglés) o frío (*USC*) es la energía generada por los aparatos de conversión (calderas, quemadores, etc.), medido a la salida del aparato (sala de máquinas). El balance energético es el resultado de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{USH,j} = \dot{Q}_{USH,Eq,j} + \dot{Q}_{QHX,j} \quad (2.6)$$

donde $\dot{Q}_{QHX,j}$ es el calor residual recuperado que se utiliza en este aparato (por ejemplo, precalentamiento del aire de combustión o agua de entrada) y $\dot{Q}_{USH,Eq,j}$ el calor adicional generado en este aparato por conversión de la energía final.

La eficiencia de conversión neta del aparato sería:

$$\eta_{conv,j} = \frac{\dot{Q}_{USH,Eq,j}}{\dot{E}_{FET,j}} \quad (2.7)$$

El total del calor entrante en las diferentes líneas de distribución, viene dada por la siguiente fórmula:

$$\dot{Q}_{USH,pipe,m} = \dot{Q}_{USH,m} + \dot{Q}_{QHX,m} \quad (2.8)$$

donde $\dot{Q}_{USH,m}$ es el suministro de calor útil procedente de los aparatos de conversión a la tubería *m* y $\dot{Q}_{QHX,m}$ el calor residual recuperado que se alimenta directamente en la tubería *m* (p. ej. precalentamiento del retorno, etc.).

El contenido calorífico de las líneas de suministro de calor que no son circuitos cerrados (p. ej. vapor sin recuperación de condensados, preparación y distribución directa de agua caliente) se define a partir de unas temperaturas predeterminadas (externas) de referencia (entrada de agua fría, entrada de aire):

$$\dot{Q}_{USH,pipe,m} = q_{m,o} h_o - q_{m,ret} h_{ret} - q_{m,i} h_i \quad (2.9)$$

donde los subíndices hacen referencia a la salida (s), retorno (ret) y entrada (e), siendo esta última la referencia externa para los circuitos abiertos. Para circuitos cerrados con $q_m = q_{m,o} = q_{m,ret}$, la ecuación (2.9) queda simplificada como sigue:

$$\dot{Q}_{USH,pipe,m} = q_m (h_o - h_{ret}) \quad (2.9a)$$

Para el suministro de frío útil (USC) se utilizan ecuaciones análogas.

2.2.3 Calor y frío útil para procesos (UPH/UPC)

La demanda neta de calor útil para procesos (*UPH*, por sus siglas en inglés) es la diferencia entre la demanda total (bruta) de calor del proceso ($Q_{UPH,gross}$, véase punto 2.4) y el calor residual recuperado internamente⁶.

$$Q_{UPH} = Q_{UPH, gross} - Q_{HX, internal} \quad (2.10)$$

Asimismo, el calor útil (neto) del proceso también se calcula como el calor total externo suministrado al proceso, ya sea a través del sistema de suministro de calor ($Q_{UPH,Proc}$), o mediante calor residual recuperado externamente, alimentado directamente al proceso ($Q_{HX,Proc}$):

$$Q_{UPH} = Q_{UPH,Proc} + Q_{HX,Proc} \quad (2.11)$$

En este caso son de aplicación de nuevo ecuaciones similares para el frío útil para procesos (UPC, por sus siglas en inglés) y para el frío residual recuperado (QCX, por sus siglas en inglés)

2.2.4 Calor/frío residual disponible (QWH/QWC) y calor/frío residual recuperado (QHx/QCX)

Para calcular el potencial de recuperación del calor, es importante diferenciar entre la cantidad total de calor residual y aquellos caudales de calor residual que técnicamente se pueden utilizar. Para los flujos que se utilizan como entrada para otro proceso, el calor residual disponible también está limitado por la temperatura final hasta la que se puede enfriar el flujo, lo cual determina la entalpía mínima h_{min} . El calor residual disponible de un determinado proceso ($Q_{QWH,Proc}$) viene definido por la fórmula siguiente:

$$Q_{QWH,Proc} = m_o (h_{po} - h_{min}) \quad (2.12a)$$

La cantidad de calor residual disponible procedente de los equipos ($Q_{QWH,Eq}$, p. ej. gases de escape) o de las tuberías ($Q_{QWH,pipe}$, p. ej. condensados) se calcula de forma análoga, basándose en la temperatura de entrada de la alimentación en circuitos abiertos como temperatura de referencia.

Además de los flujos de calor residual, el calor residual también puede estar presente (almacenado) en la masa térmica del equipo utilizado en el proceso o los medios que permanecen en el proceso. La cantidad total de calor residual se puede calcular de la manera siguiente, siendo N_s el número total de puestas en marcha y, por tanto, interrupciones del proceso:

$$Q_{QWH,Proc} = m_o (h_{po} - h_{min}) + mc_p (T_p - T_{min}) N_s \quad (2.12b)$$

Para la refrigeración residual son de aplicación ecuaciones análogas.

En un sistema de recuperación de calor complejo con demandas tanto de calefacción como de refrigeración puede existir la posibilidad de intercambio de calor directo entre demandas de refrigeración a alta temperatura y demandas de calefacción a baja temperatura. Por lo tanto, las demandas de refrigeración de todos los subsistemas (procesos, tuberías, equipos), $Q_{D,refrigeración}$, han de añadirse como fuente de calor potencial para la recuperación de calor residual y viceversa, las demandas de calefacción de todos los subsistemas, $Q_{D,calefacción}$, han de añadirse como fuente de frío potencial.

El calor residual recuperado realmente Q_{QHx} depende de la configuración del sistema de recuperación de calor y siempre es menor o igual que las fuentes de calor o frío total disponibles:

⁶ La distinción entre la recuperación interna y externa del calor depende de los límites del proceso y se cree que se utiliza para aparatos pequeños que disponen de intercambiadores de calor internos: por ejemplo, la demanda bruta de calor de un pasteurizador de leche fría sería el calentamiento de 4°C a 72°C, mientras que la demanda neta sería solamente el calentamiento residual tras la recuperación del calor, es decir, de 50°C a 72°C.

$$\sum_{h=1}^{N_{HX}} Q_{QH, h} \leq \sum_{source} Q_{QWH, source} \quad (2.12c)$$

y el total de disipadores de calor disponibles:

$$\sum_{h=1} Q_{QH, h} \leq \sum_{source} Q_{QWC, source} + \sum Q_{D, heating} \quad (2.12d)$$

2.3 Niveles de temperatura en el suministro de calor y de frío

En el análisis EINSTEIN, no sólo se tiene en cuenta la cantidad de energía de cada uno de los subsistemas, sino que también se presta especial atención al análisis del nivel de temperatura (*calidad*) de la energía (demanda y suministro).

Aunque esto complica bastante el análisis de la demanda de calor, es absolutamente necesario para poder diseñar soluciones eficientes desde el punto de vista energético:

- × El potencial de recuperación e integración del calor depende en gran medida de los niveles de temperatura de la demanda y el suministro (calor o frío residual disponible).
- × Muchas de las tecnologías de conversión eficiente de la energía, como son la cogeneración y las bombas de calor, y las fuentes de energía renovables (energía termosolar) se ven limitadas, en la práctica, a niveles de temperatura bajos o medios. Por lo tanto, diseñar un sistema de suministro que aproveche al máximo las fuentes de baja temperatura es una precondition necesaria para poder utilizar estas tecnologías.
- × Si se reducen los niveles de temperatura, la eficiencia de conversión de los equipos convencionales de suministro de calor, mejora y disminuyen las pérdidas de calor durante la distribución, el almacenamiento y los procesos.
- × La generación de frío es más eficiente cuanto más altas sean las temperaturas a las que ha de entregarse la energía de refrigeración y cuanto más bajas sean las temperaturas de rechazo de calor.

Tabla 3. Clasificación de las posibles tecnologías de suministro de calor según el nivel de temperatura.

Intervalo de temperaturas [°C]	Nivel de temperatura del calor	Tecnología de suministro de calor aplicable
< 60	Bajo	Bombas de calor de baja temperatura Termosolar de baja temperatura
< 90	Medio-bajo	Calor residual de los motores de cogeneración (agua de refrigeración) Límite práctico para los colectores planos Bombas de calor de alta temperatura
< 150	Medio	Vapor a baja presión
< 250	Medio-alto	Límite para termosolar de temperatura media
< 400	Alto	Límite práctico para el calor residual de las turbinas de gas, biomasa, etc.

Tenemos que diferenciar entre las siguientes temperaturas en los procesos y los sistemas de suministro de calor:

- Temperatura del proceso (*PT*): temperatura del fluido de trabajo en un proceso.
- Temperatura de suministro del proceso (*PST*): temperatura de entrada del medio de transporte del calor utilizado para calentar o enfriar el proceso (por ejemplo: temperatura del vapor en la entrada del intercambiador de calor del proceso).
- Temperatura de suministro central (*CST*): temperatura del medio de transporte del calor en la salida del suministro de calor o frío central (caldera, refrigerador). La diferencia entre la *CST* y la *PST* representa las pérdidas de temperatura que se producen en la línea de distribución.

2.4 Modelos de proceso y curvas de demanda

2.4.1 Modelos de proceso

En EINSTEIN, los procesos se recrean empleando un modelo de proceso estándar tal como se describió inicialmente en POSHIP⁷ (figura 7). El modelo de proceso genérico siguiente se presenta para procesos de calefacción, pero el mismo modelo –con signo inverso– es de aplicación también para los procesos de refrigeración. La mayoría de los procesos requieren tanto calentar o enfriar un caudal de fluido (p. ej. flujos de aire caliente, agua caliente o refrigerada, renovación de agua de baños, etc.) como calentar o enfriar algún depósito (hornos, baños líquidos). Este último caso se puede subdividir en el precalentamiento/prerefrigeración previo al funcionamiento y en la temperatura de mantenimiento (compensación de las pérdidas térmicas durante el funcionamiento).

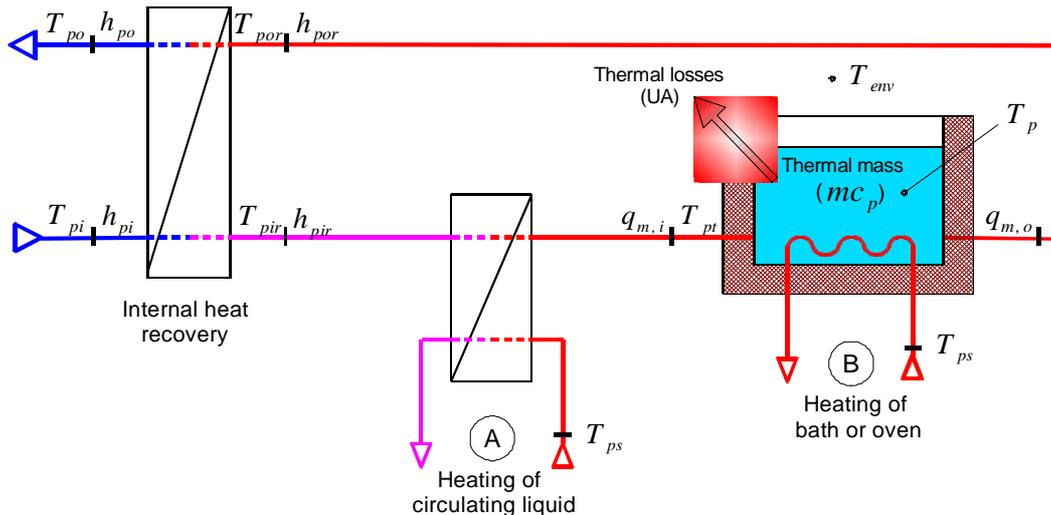


Figura 7: Modelo estándar de proceso estándar EINSTEIN con un flujo entrante y otro saliente

La demanda total de calor de un proceso puede dividirse conceptualmente en los tres componentes mencionados arriba:

a) Calor de circulación (UPH_c)

Es el calor relacionado con el flujo másico del medio entrante (flujo de entrada). Es el calor necesario para calentar el medio entrante a la temperatura del proceso, independientemente del lugar físico donde se añada el calor (antes del proceso o durante el mismo). El calor de circulación se puede definir para los procesos continuos y los procesos por lotes (batch), y es conceptualmente independiente del tiempo que esté circulando el flujo másico. El tiempo de circulación puede ser distinto del tiempo de funcionamiento.

El calor bruto relacionado con el fluido circulante puede calcularse con la fórmula siguiente:

$$Q_{UPH,c}^{gross} = m_c c_p (T_p - T_{pi}) \quad (2.13)$$

donde m_c es la masa total del medio del proceso que circula durante el periodo de tiempo en cuestión (un día o un año). El calor útil neto del proceso para el fluido circulante se obtiene restando la recuperación del calor interno:

$$Q_{UPH,c} = Q_{UPH,c}^{gross} - Q_{HX,internal} = m_c c_p (T_p - T_{pir}) \quad (2.14)$$

⁷ POSHIP: The Potential of Solar Heat for Industrial Processes. Project Funded by the European Commission - Directorate General for Energy and Transport. Programme ENERGIE (5th Framework Programme for Energy, Environment and Sustainable Development), Project No. NNE5-1999-0308.

b) Calentamiento inicial en la puesta en marcha (UPH_s)

El calor necesario para que la masa de proceso que *permanece dentro de los equipos del proceso* (no incluye el calor añadido para que el flujo de entrada alcance la temperatura de proceso en cualquier proceso continuo o por lotes) alcance la temperatura de proceso tras la interrupción de éste (p. ej. por una pausa durante la noche o el fin de semana, o paradas entre lote y lote, etc.):

$$Q_{UPH,s} = N_s (mc_p)_e (T_p - T_s) \quad (2.15)$$

donde $(mc_p)_e$ es la masa térmica efectiva o equivalente del proceso, que tiene en cuenta la inercia térmica no sólo del propio medio contenido en el proceso, sino también de los equipos circundantes, y N_s es el número de puestas en marcha en un determinado periodo de tiempo.

c) Calor de mantenimiento (UPH_m)

Es el calor necesario para mantener constante la temperatura del proceso. Es equivalente a las pérdidas térmicas en los extremos del proceso hacia el aire externo y hacia el suministro de calor latente para procesos químicos o de evaporación.

$$Q_{UPH,m} = [(UA)(T_p - T_{env}) + \mathcal{Q}_L] t_{op} \quad (2.16)$$

donde (UA) es el coeficiente de pérdida térmica de los equipos del proceso, T_{env} es la temperatura ambiente del proceso (normalmente, la temperatura interior de la fábrica), \mathcal{Q}_L es la energía necesaria para reacciones químicas o de cambio de estado, y t_{op} es el tiempo de funcionamiento del proceso.

Resumiendo, el calor útil neto total para un proceso se puede calcular a partir de los tres componentes antes descritos:

$$Q_{UPH} = Q_{UPH,c} + Q_{UPH,m} + Q_{UPH,s} \quad (2.17)$$

El modelo de proceso EINSTEIN, por su simplicidad, se puede adaptar fácilmente a los procesos con varios flujos de proceso entrantes y salientes (figura 8).

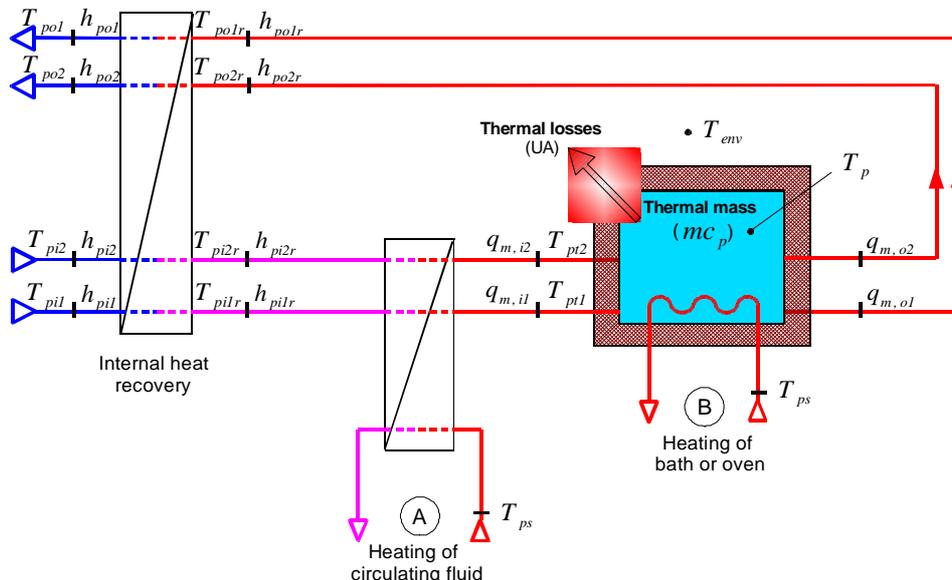


Figura 8: Modelo estándar de proceso EINSTEIN con varios flujos entrantes y salientes

2.4.2. Simplificación de los datos en las auditorías rápidas EINSTEIN

Con el objetivo de agilizar los análisis y reducir la cantidad de información necesaria, los modelos de procesos generales EINSTEIN se simplifican como sigue:

- × nivel de temperatura constante: todas las temperaturas de entrada, procesos y salida (calor residual) se consideran constantes

- × la dependencia temporal viene determinada únicamente por el horario del proceso. Todos los componentes de la demanda de calor varían proporcionalmente en el tiempo

En la mayoría de los procesos industriales, esta aproximación a un nivel de temperatura constante es suficiente. Los procesos reales con temperatura variable pueden aproximarse dividiendo el proceso real en dos o varios subprocesos en el modelo.

2.4.3 Perfiles estándar de la demanda

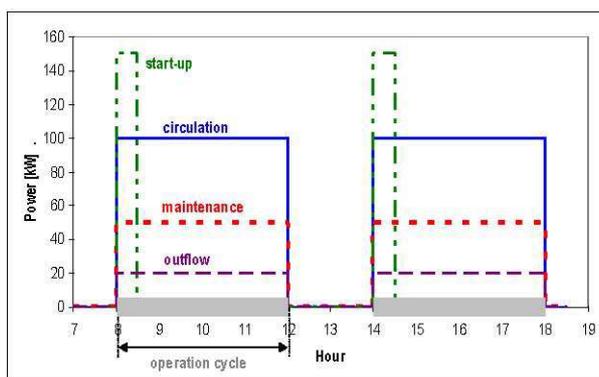
En los procesos estándar de EINSTEIN, la dependencia temporal de la demanda de calor y la disponibilidad de calor residual se rigen por los siguientes horarios:

- × Hora de ejecución del proceso: tiempo durante el cual debe mantenerse una temperatura T_p constante
- × Hora a la que comienza el calentamiento: la hora a la que empieza el calentamiento inicial.
- × Horario de los flujos de entrada
- × Horario de los flujos de salida

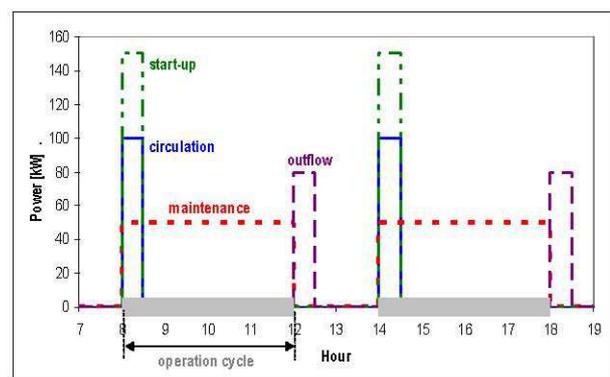
Si el anexo del cuestionario EINSTEIN básico no proporciona un horario detallado (véase el anexo), se tomarán los horarios predeterminados en función de si el proceso es continuo o por lotes (tabla 4)

Tabla 4. Horarios predeterminados del proceso

	Proceso continuo	Proceso por lotes (batch)
Circulación (entrada)	Continuo durante t_{op}	El primer 20 % de la duración total durante t_{op}
Puesta en marcha	El primer 20 % de la duración total durante t_{op}	El primer 20 % de la duración total durante t_{op}
Mantenimiento	Continuo durante t_{op}	Continuo durante t_{op}
Evacuación del fluido residual (salida)	Continuo durante t_{op}	El primer 20 % de la duración total después del t_{op}



(a)



(b)

Figura 9: Perfil de demanda estándar en procesos continuos (a) y por lotes (b)

Ejemplo: proceso con un $t_{op} = 2 \times 4h$.

2.4.4 Demandas de calefacción y refrigeración de edificios en EINSTEIN

Las demandas de calefacción y refrigeración de los edificios pueden modelarse en EINSTEIN como casos especiales del modelo de procesos genérico (Tabla 5).

Tabla 5. Representación de procesos de demanda de calefacción y refrigeración de los edificios.

Componente de	calefacción de locales	refrigeración de locales	Agua caliente
---------------	------------------------	--------------------------	---------------

demanda de procesos			sanitaria
Circulación (Flujo de Entrada)	Calentamiento del aire fresco	Enfriamiento del aire fresco Deshumidificación del aire fresco	Calentamiento del agua fría
Puesta en marcha	Calentamiento/enfriamiento inicial antes de períodos de ocupación		-
Mantenimiento	demanda de energía para calefacción/refrigeración excepto renovación de aire		-
Flujo de salida	aire de escape (útil para recuperación en ventilación controlada solamente)		Agua residual
Temperatura del proceso	temperatura deseada para el interior		Temperatura del agua caliente (puntos de consumo)
Temperatura de suministro del proceso	Temperatura de entrada del medio de transporte de calor en el sistema de calefacción/refrigeración (ej. agua, aire caliente/frío)		Temperatura del agua caliente (distribución)

2.5 Integración del calor y análisis pinch

La forma correcta de integrar el calor (residual) en un sistema se describe mediante la teoría pinch [Schnitzer, Ferner, 1990] desarrollada por Linnhoff et.al. en los años setenta. El análisis pinch permite mostrar la demanda de calor y frío de todo el proceso productivo en un simple diagrama que muestra la demanda energética (calentamiento o enfriamiento) de los procesos y en qué temperaturas se necesita dicha energía. Este análisis permite extraer algunas conclusiones importantes:

- × Teóricamente, ¿cuánta energía se puede ahorrar mediante la recuperación del calor?
- × ¿Cuál es la demanda de calor externo del proceso de producción? ¿En qué niveles de temperatura se requiere dicho calor?
- × ¿Cuál es la demanda de frío externo del proceso de producción? ¿En qué niveles de temperatura se requiere ese frío?

Así pues, el análisis constituye una herramienta muy útil para realizar una primera estimación del ahorro energético potencial que se obtendría con la recuperación del calor (que luego deberá adaptarse por motivos prácticos o económicos). En segundo lugar, el análisis muestra perfectamente los momentos en que la temperatura requiere calor o frío externo, información de vital importancia para integrar los nuevos sistemas de suministro de energía.

2.5.1 Análisis de un sistema mediante la metodología pinch

La teoría pinch separa el proceso de producción en una parte fría con un excedente de calor que, consecuentemente, requiere un enfriamiento, y una parte caliente que requiere un calentamiento. Este proceso se realiza combinando las curvas de entalpía de todos los flujos que necesitan calentarse (curva compuesta de frío) y los que necesitan enfriarse (curva compuesta de calor) en un solo diagrama de temperatura-trabajo (véase figura 10 en que se describe la combinación de flujos fríos). En este sentido, los flujos del proceso son cualquier flujo másico que deba ser calentado (flujos fríos) o que deba ser enfriado (flujos calientes). Además, se pueden incluir los flujos que no sean necesarios para el proceso (como el agua residual que va a parar al efluente) y que se pueden utilizar como agente transmisor de frío o calor a otros flujos.

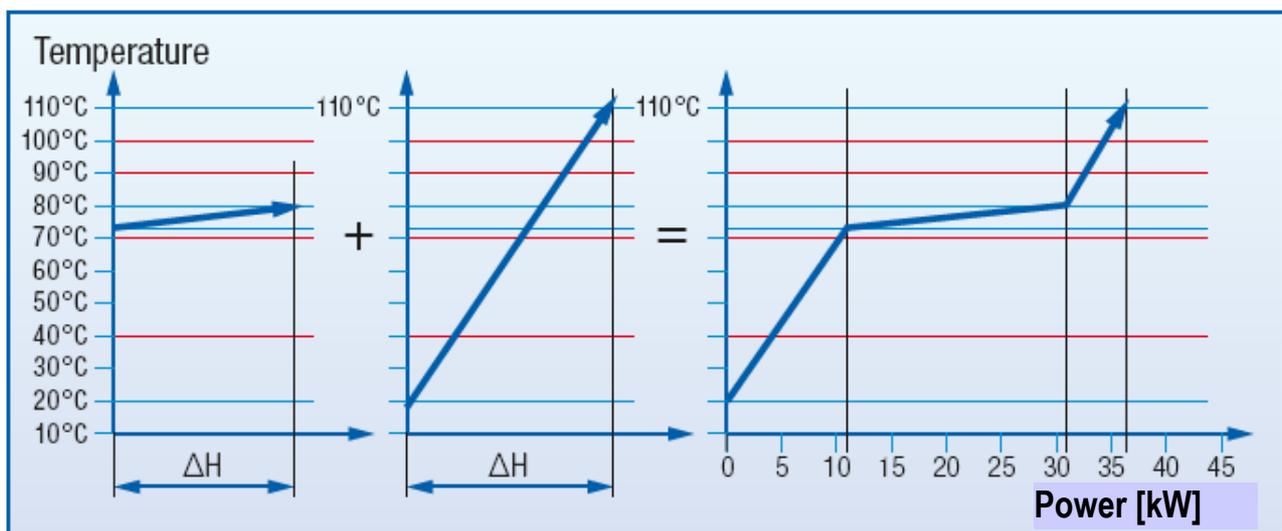


Figura 10. Combinación termodinámica de los flujos fríos. La curva compuesta se elabora sumando los cambios de entalpía de cada flujo en cada uno de los intervalos de temperatura.

Los flujos calientes se combinan de la misma forma. A continuación, ambas curvas se representan juntas en el mismo diagrama de forma que los flujos fríos estén a una temperatura inferior a la de los flujos calientes en todos los puntos del diagrama. Esto se consigue desplazando las curvas a lo largo del eje correspondiente a la energía (eje de abscisas), ya que la diferencia de entalpía siempre representa un valor relativo, no absoluto.

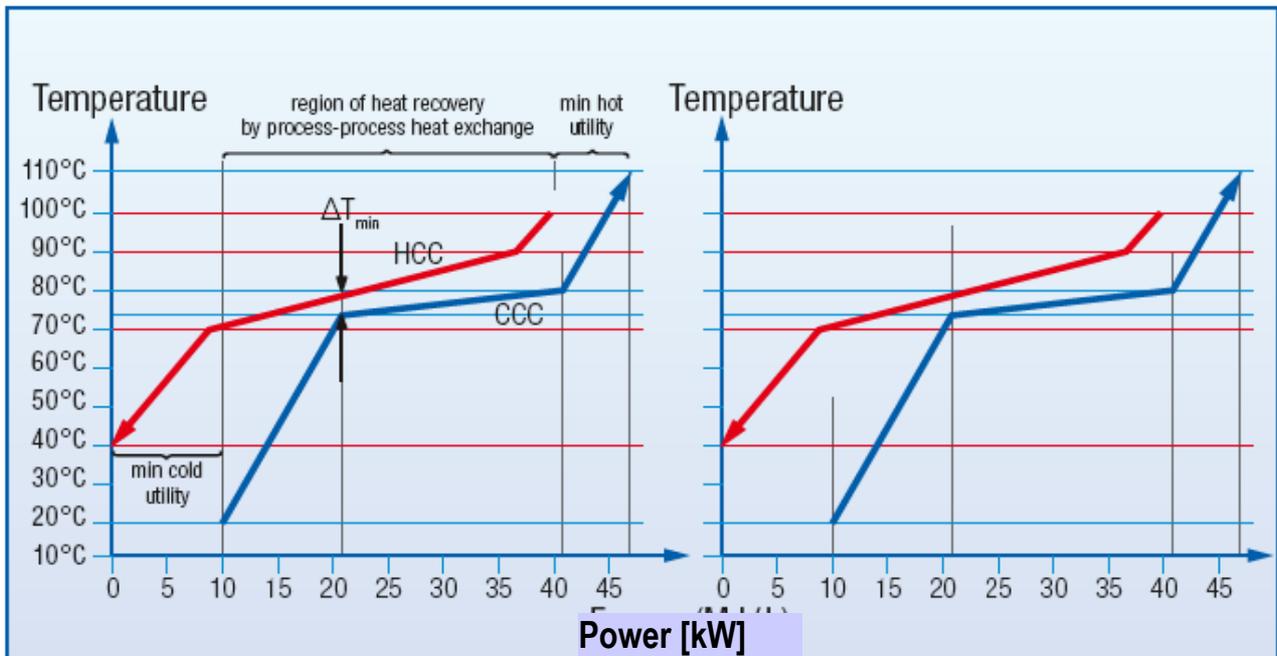


Figura 11. Representación de la combinación de **curvas compuestas de frío y calor**.

Gracias a estas curvas compuestas se pueden determinar algunos hechos esenciales del proceso. Las curvas se separan mediante un punto que corresponde a la menor diferencia de temperatura ΔT_{\min} , que el usuario escoge como ΔT mínima sobre un posible intercambiador de calor del sistema. Esta ΔT_{\min} define el nivel de temperatura del sistema considerado el “cuello de botella” termodinámico (véase la figura 11) del proceso, denominado “pinch”.

La temperatura pinch divide el sistema en dos mitades: en la zona inferior a la temperatura pinch hay un excedente de calor que debe eliminarse mediante enfriamiento o emitirse al exterior; por encima de la temperatura pinch hay una deficiencia energética que debe compensarse mediante un calentamiento adicional. De ahí se siguen tres reglas importantes para la integración de calor:

- × No hay calentamiento externo por debajo de la temperatura pinch (hay suficiente calor residual disponible)
- × No hay enfriamiento externo por encima de la temperatura pinch (se consigue el enfriamiento calentando otros flujos del proceso)
- × No hay intercambio de calor a través del pinch: no utilice una fuente de calor (residual) con una temperatura superior a la temperatura pinch (un rango de temperaturas con déficit de calor) para calentar un disipador cuya temperatura sea inferior a la temperatura pinch (rango de temperaturas que ya tienen un exceso de calor).

La superposición de las curvas de la figura 11 muestra la recuperación máxima de calor de proceso. La demanda de calor mínima $Q_{H,\min}$, y la demanda de frío mínima $Q_{C,\min}$ también pueden identificarse en la figura. La diferencia de temperatura mínima ΔT_{\min} viene determinada por la optimización económica, ya que una ΔT_{\min} inferior aumenta la eficiencia del intercambio de calor pero, al mismo tiempo, aumenta la superficie y, por lo tanto, los costes del intercambiador de calor. Las diferencias energéticas típicas de ΔT_{\min} para un proceso estándar, en diferentes sectores industriales, se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Valores típicos de ΔT_{\min} de varios tipos de procesos [Linnhoff March, 1998]

Sector Industrial	Valores de ΔT_{\min} basados en la experiencia
Refino de crudo	20 – 40 °C
Petroquímico	10 – 20°C
Químico	10 – 20 °C
Procesos a baja temperatura	3 – 5 °C

Los valores teóricos de $Q_{C,\min}$ y $Q_{H,\min}$ serán difíciles de alcanzar en la práctica. Esto es debido a las dificultades para controlar los flujos de proceso que están contaminadas, que son corrosivas o que sencillamente no son accesibles. Sin embargo, el análisis pinch proporcionará una buena perspectiva de lo que es termodinámicamente posible.

Otra forma de reflejar la demanda de calor de los procesos en un sistema es la **gran curva compuesta (GCC)**. Para elaborar una gran curva compuesta, la curva compuesta de calor (HCC) y la curva compuesta de frío (CCC) se desplazan $\frac{1}{2} \Delta T_{\min}$ la una hacia la otra de modo que se toquen en el pinch. La diferencia horizontal entre dos curvas se dibuja en un nuevo diagrama T-H que, a su vez, proporciona la gran curva compuesta. Éste es otro método que muestra un perfil del proceso en forma de fuente/disipador de calor. Si el flujo de calor aumenta al aumentar la temperatura, el proceso actúa como disipador de calor (a esta temperatura se necesita más energía que la proporcionada). En caso de que aumente el flujo de calor al disminuir la temperatura, el proceso actúa como fuente de calor.

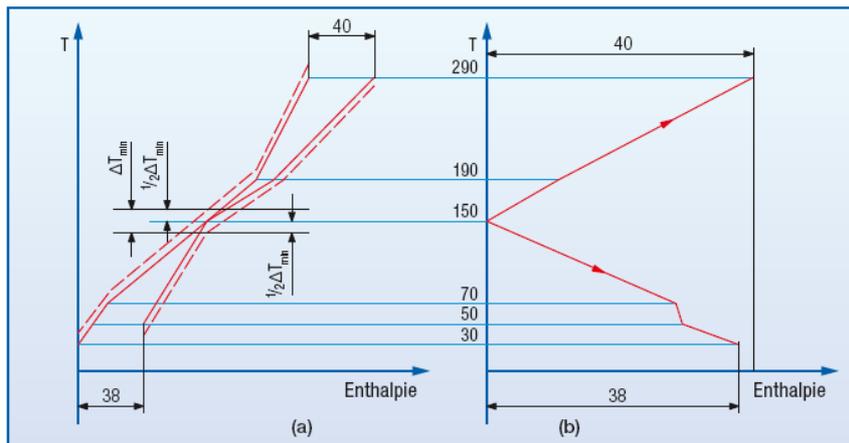


Figura 12: Superposición de las curvas compuestas de calor y de frío (a) y representación de la gran curva compuesta (b)

El principal objetivo de la gran curva compuesta es identificar las fuentes de energía externas ideales que se necesitan para calentar o enfriar los diferentes flujos. Al analizar las fuentes de calor que pueden transferir calor a los disipadores de los procesos, la demanda de calor restante solamente está cubierta por las fuentes de energía externas en caso de que no haya calor residual disponible. Además, podemos ver a qué temperatura debería suministrarse un recurso externo (véase figura 13 y figura 14). Es importante mencionar que la gran curva compuesta depende totalmente de la ΔT_{\min} elegida.

2.5.2 Ejemplos de integración de sistemas externos de suministro energético basados en la gran curva compuesta

Suministro de calor

Para conseguir la mayor eficiencia, el suministro de calor debería situarse en el nivel de temperatura más bajo posible (véase la figura 13). En el caso representado en la figura, hay 2 niveles de temperatura ideales para el suministro de calor H1 y H2.

Máquina frigorífica

Ocurre algo parecido en el suministro de frío para los niveles de temperatura idóneos. La energía frigorífica debería integrarse a la mayor temperatura posible. Los niveles de temperatura de las plantas frigoríficas deberían situarse, por tanto, en K1 y K2 respectivamente. (véase la figura 13)

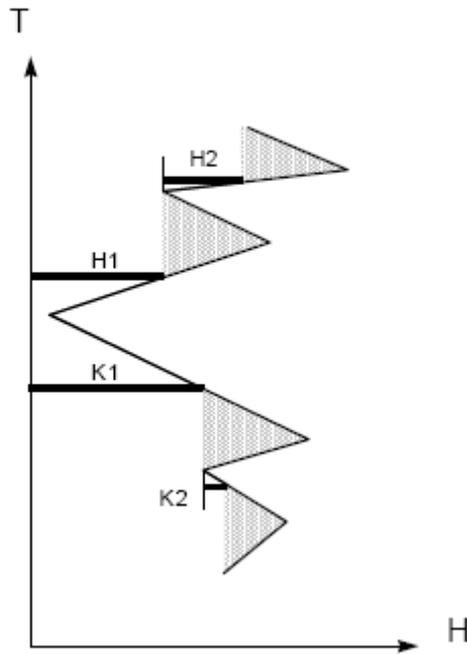


Figura 13: Integración del suministro de calor y frío (fuente: Morand et al. 2006)

Bomba de calor

La gran curva compuesta también muestra las posibilidades termodinámicas ideales para integrar una bomba de calor. Por debajo del punto de pinch, la bomba de calor puede utilizar el calor disponible como energía motriz. El compresor hace aumentar el nivel de temperatura por encima del punto de pinch, a partir del cual hay una demanda energética. El compresor de la bomba de calor, como se muestra detalladamente en el apartado 3.7, funciona a través del pinch. La energía eléctrica se suma al calor de baja temperatura, con lo que se obtiene el calor de alta temperatura por encima del pinch. Gracias a estas relaciones, pueden identificarse los niveles de temperatura idóneos para la bomba de calor (véase la figura 14). Una bomba de calor que funcionase a una temperatura superior no se integraría de forma idónea en la planta y funcionaría con un índice de rendimiento calorífico inferior y una demanda de electricidad superior.

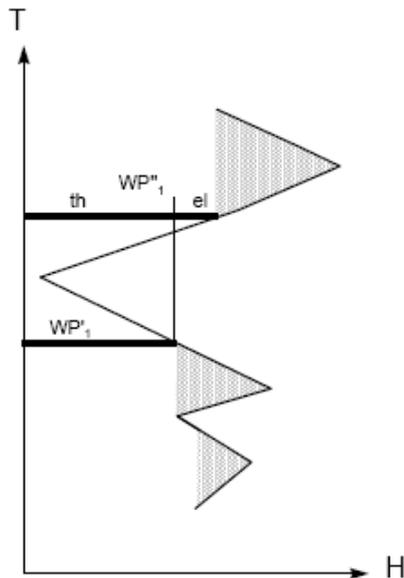


Figura 14: Integración de bombas de calor (fuente: Morand et al. 2006)

2.5.3 Diseño de los intercambiadores de calor

En el análisis pinch, la elección de la ΔT_{min} es decisiva a la hora de diseñar los intercambiadores de calor. Cuanto más baja es la ΔT_{min} , más se puede acercar la temperatura final del flujo frío a la temperatura inicial del flujo caliente (suponiendo que haya un intercambio de calor con flujo contracorriente). La imagen siguiente lo muestra más claramente:

- × En un intercambiador de calor a contracorriente, la temperatura final del flujo frío puede alcanzar, como máximo, la temperatura inicial del flujo caliente menos la ΔT_{min} .
- × En un intercambiador de calor a contracorriente, la temperatura final del flujo caliente puede alcanzar, como mínimo, la temperatura inicial del flujo frío más la ΔT_{min} .

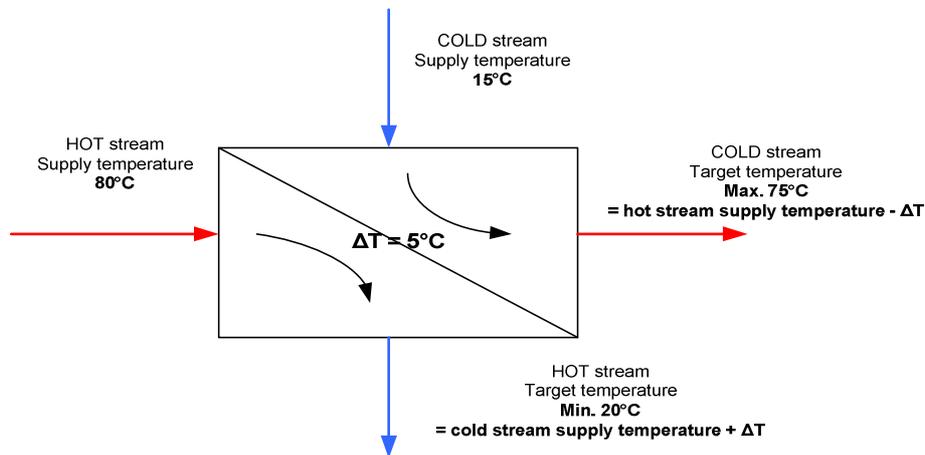


Figura 15: Influencia de la ΔT_{min} en el diseño del intercambiador de calor

Evidentemente, la energía intercambiada entre el flujo frío y el caliente debe ser la misma.

$$H[kW] = m_{hs} * c_{p_{hs}} * (T_{supply_{hs}} - T_{target_{hs}}) = m_{cs} * c_{p_{cs}} * (T_{target_{cs}} - T_{supply_{cs}}) \quad (2.18)$$

Supply (suministro) = temperatura inicial / Target (objetivo) = temperatura final

Índice hs: flujo caliente = fuente de calor

Índice cs: flujo frío = disipador de calor

La fórmula básica para calcular el área necesaria para un intercambio de calor es la siguiente:

$$Q = k * A * \Delta T_m$$

$$A = \text{área_transmisión_calor}$$

$$\Delta T_m = \text{diferencia_temperatura}$$

$$k = \text{coeficiente_transmisión_calor}$$

(2.19)

2.5.4 Influencia de la ΔT_{min} en el análisis pinch

Influencia en el intercambio de calor (termodinámico)

Como ya se ha dicho, la elección de la ΔT_{min} es de vital importancia a la hora de diseñar una red de intercambiadores de calor. Cuanto más bajo es el valor de la ΔT_{min} , más se puede acercar la temperatura final del flujo frío a la temperatura inicial del flujo caliente. A modo explicativo, véase este sencillo ejemplo: el agua residual a 50°C puede calentar agua corriente hasta $(50 - \Delta T_{min})$ °C. Cuanto más baja es la ΔT_{min} , más rápido llega la temperatura del agua a los 50°C tras el intercambio de calor. (Obviamente, este ejemplo sólo es válido si el flujo másico del agua corriente es igual o inferior al del agua residual).

Así pues, queda claro que los cambios en la ΔT_{min} repercuten de forma notable en el diseño del intercambiador de calor. Siguiendo con el ejemplo de calentar agua corriente usando agua residual, tenemos lo siguiente: Si la ΔT_{min} se fija a 5°C, se puede calentar el agua corriente hasta los 45°C. Si la temperatura objetivo es de 60°C, debe buscarse otro flujo caliente que permita calentar de manera óptima el agua residual desde los 45 hasta los 60°C. Si modificamos la ΔT_{min} a 7°C, los criterios utilizados para este flujo caliente cambiarán, ya que el agua corriente se tiene que calentar desde los 43 hasta los 60°C. Esto puede tener una gran influencia a la hora de elegir la mejor solución para satisfacer esta demanda de

calor. Esta es la razón por la cual una red matemática de intercambio de calor debe calcularse otra vez desde cero cuando se cambia el valor de ΔT_{min} .

Influencia en los costes y en el área del intercambiador de calor

En el análisis pinch, las curvas compuestas de calor y frío suelen mostrarse en función de un valor de ΔT_{min} general. En la última etapa del diseño de un intercambiador de calor, el valor de ΔT_{min} se determina en función de las características de los flujos. Un flujo gaseoso tendrá una ΔT_{min} mayor que un flujo líquido, ya que los líquidos suelen tener mejores coeficientes de transmisión térmica. En el apartado "Diseño de los intercambiadores de calor" se muestra que la ΔT_{min} específica de un intercambiador de calor influye en el área necesaria para realizar el proceso de intercambio. Así pues, también influye en los costes de inversión.

Normalmente, en la última etapa del diseño del área de un intercambiador de calor, el valor de ΔT_{min} acaba siendo el resultado de un equilibrio entre la inversión y el ahorro obtenido en los costes de explotación. Al aumentar la ΔT_{min} , disminuye el área del intercambiador de calor y disminuyen los costes de inversión, pero también disminuye el ahorro de energía (figura 16).

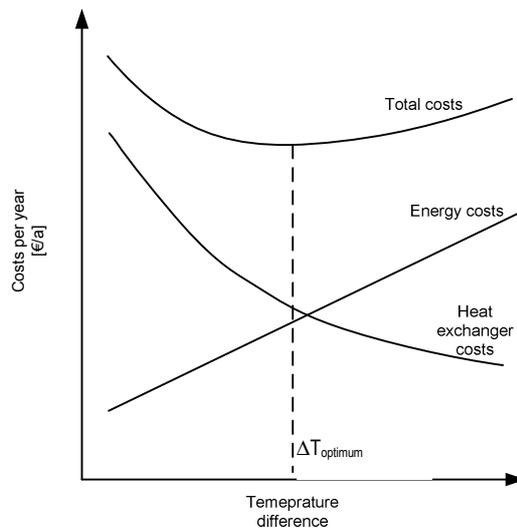


Figura 16: Costes totales en función de la ΔT_{min}

2.6 Valoración del coste total: TCA

La valoración del coste total (TCA, por sus siglas en inglés) es un método que permite realizar un análisis económico convencional basado en parámetros microeconómicos, aunque sirve igualmente para análisis más complejos que tienen también en cuenta parámetros macroeconómicos para realizar un análisis económico en un marco temporal más amplio, teniendo en cuenta, por ejemplo, cuestiones ambientales y de seguridad. Esto significa que una TCA puede englobar otras categorías de costes que no incluiría un análisis convencional, así como integrar aspectos macroeconómicos (como son los costes a largo plazo que resultan decisivos durante el ciclo de vida del objeto de inversión).

Así pues, una valoración del coste total posee las siguientes características si la comparamos con un análisis convencional:

- × *Categorías de costes*: además de todos los costes que se tienen en cuenta en los análisis convencionales, también se consideran los costes indirectos, el ahorro y los ingresos (por ejemplo, los costes derivados de las pérdidas de imagen, etc.).
- × *Imputación de costes*: todos los costes se imputan exactamente a la inversión y no se consideran costes fijos.
- × *Horizonte temporal*: el plazo que abarca un análisis de costes totales es mayor que el de los análisis convencionales, con el fin de incorporar las influencias a largo plazo.
- × *Indicadores*: en una TCA se utilizan indicadores económicos que también pueden reflejar el rendimiento económico a largo plazo de una inversión.

Es evidente que una TCA sirve también para un análisis convencional. Basta con cambiar algunos parámetros. Por eso, EINSTEIN integra un método que se puede aplicar a un análisis convencional, pero que se puede ampliar si es necesario para que incluya parámetros macroeconómicos.

En EINSTEIN, los análisis económicos generalmente comparan los costes del proceso ya existente (suministro de calor y frío existente) con la inversión prevista y otros costes del sistema de suministro de energía que se propone como alternativa. En general, el horizonte temporal del cálculo económico es la propia duración del proyecto (duración de los equipos del sistema de suministro de energía), pero puede adoptar cualquier valor.

El análisis de costes convencional en EINSTEIN (análisis microeconómico)

El cálculo económico se basa en los costes del sistema de suministro de calor y frío existente que se quiere sustituir, y en los costes de las alternativas propuestas. Entre las principales categorías de costes se encuentran las inversiones, los costes energéticos, los costes de funcionamiento y mantenimiento, las contingencias y otros costes puntuales.

Las contingencias son costes o ingresos que pueden surgir y que influyen en el análisis económico, como puede ser un aumento de las cuotas de mercado, beneficios fiscales previstos, etc. Otros costes puntuales pueden ser los costes que surgen una sola vez a lo largo de la duración de un proyecto, como son desgravaciones para inversiones.

Para cada propuesta de sistema de suministro de calor y frío, el flujo de efectivo se calculará anualmente durante la duración del proyecto mediante la ecuación:

$$CF_t = \sum_{i=1}^n EX_i^t - \sum_{i=1}^n S_i^t \quad (2.20)$$

Donde:

t = año de cálculo

CF_t = flujo de efectivo en el momento del cálculo

n = número de categorías de costes

EX = gastos netos del proyecto, que se calculan a partir de los costes del proceso propuesto

S = el ahorro del proyecto, que se calcula a partir de los costes del proceso que se quiere sustituir.

A continuación se calculará el valor actual neto del proyecto durante la duración del mismo mediante la siguiente ecuación:

$$NPV_t = \sum_{i=0}^t \frac{CF_i}{(1+r)^i} \quad (2.21)$$

Donde:

t = año de cálculo

NPV_t = valor actual neto del proyecto en el año t

r = tipo de interés real de la financiación externa

Uno de los parámetros económicos más importantes de un proyecto es la tasa interna de rendimiento (IRR, por sus siglas en inglés). La IRR se define como el rendimiento compuesto, efectivo y anualizado que puede obtenerse del capital invertido y viene determinada por cualquier [tipo de descuento](#) que produce un [valor actual neto](#) cero en una serie de flujos de efectivo. Para cada propuesta, [la tasa interna de rendimiento](#) (IRR) se calcula para cada año de duración del proyecto tras el plazo de amortización:

$$\sum_{i=0}^t \frac{CF_i}{(1+IRR_t)^i} = 0 \quad (2.22)$$

Donde:

t = año de cálculo

IRR_t = tasa interna de rendimiento del año t

En los cálculos de TCA de EINSTEIN, la [tasa interna de rendimiento modificada](#) (MIRR, por sus siglas en inglés) se emplea para determinar la eficiencia de varias alternativas. La MIRR, más preeminente que la IRR, tiene en cuenta el potencial de reinversión de los flujos de efectivo positivos intermedios. Para cada alternativa, la MIRR se calcula para cada año de duración del proyecto tras el plazo de amortización:

$$MIRR_t = q_t^{1/t} - 1 \quad (2.22a)$$

Donde:

q = valor en el año t de los flujos de efectivo positivos, contabilizados según su coeficiente de reinversión (aquí tenemos el tipo de descuento específico de la empresa), dividido por el valor actual neto de los flujos de efectivo negativos, contabilizados según la tasa de financiación (aquí tenemos el tipo de interés de la financiación externa):

$$q_t = \frac{\sum_{i=0}^t CF_i^+ (1+d)^{t-i}}{-\sum_{j=0}^t CF_j^- (1+r)^j} \quad (2.22b)$$

Donde:

CF⁺ = flujos de efectivo positivos

CF⁻ = flujos de efectivo negativos

d = tipo de descuento específico de la empresa (tipo real)

r = tipo de interés de la financiación externa (tipo real)

En el módulo de TCA de la herramienta EINSTEIN, también se obtiene el plazo de amortización (PBP, por sus siglas en inglés) para cada alternativa. El plazo de amortización hace referencia al tiempo necesario para que el rendimiento de una inversión amortice el monto de la inversión inicial, y se calcula de la siguiente manera:

$$\sum_{i=0}^{PBP} \frac{CF_i}{(1+r)^i} = 0 \quad (2.23)$$

Otro parámetro que también se tiene en cuenta para cada alternativa es la relación coste-beneficio (BCR, por sus siglas en inglés).

Como planteamiento alternativo, se calcula el coste total (anual) del sistema de energía como la suma del coste energético en forma de combustibles y electricidad, los costes de explotación y mantenimiento (O&M), y la amortización anual de la inversión.

$$C_{Total} = C_{el} + C_{fuels} + C_{O\&M} + aI_0 \quad (2.24)$$

La amortización anual de la inversión se obtiene como la fracción $a = A/I_0$ del pago A anual (constante) exigido, de manera que transcurrido el periodo en cuestión, se ha amortizado toda la deuda y se ha efectuado el pago de los intereses de la inversión inicial⁸:

$$\sum_{i=1}^N \frac{a}{(1+r)^i} = 1 \quad (2.25)$$

cuyos parámetros se definen de la manera siguiente:

a: amortización anual de la inversión

N: plazo de amortización

Extensión de los parámetros macroeconómicos para una TCA

Si hay que incluir aspectos macroeconómicos y hacerlo de la forma más exhaustiva posible, se pueden ampliar las categorías de costes, los costes de explotación y mantenimiento, las contingencias y demás costes puntuales.

En la categoría de contingencias del nuevo sistema de suministro de energía, estos aspectos podrían incluir el aumento de la cuota de mercado gracias a mejoras macroeconómicas de la región como consecuencia de una producción más sostenible. Los costes puntuales del sistema actual de suministro de energía podrían ser, por ejemplo, la aplicación de medidas paliativas frente a algún peligro medioambiental que podría surgir si no se cambiara el sistema de suministro actual.

Punto de vista de la compañía o microeconómico frente a punto de vista social o macroeconómico

Una de las principales diferencias entre el punto de vista macroeconómico o *social* y el punto de vista microeconómico o *empresarial* es la inclusión (o no) de las subvenciones⁹ y externalidades en los cálculos económicos:

- * Mientas que, para el análisis coste-beneficio de la empresa, la *inversión neta* (=inversión bruta – subvenciones) es el parámetro de coste más relevante de la inversión, desde un punto de vista social se tendría en cuenta el coste de la inversión total (bruta), ya que las subvenciones *son* un coste efectivo para la sociedad. En el caso de no realizarse la inversión propuesta, las subvenciones podrían destinarse a otras medidas alternativas de ahorro de energía o protección ambiental.
- * En cambio, el coste de las externalidades (riesgos ambientales, etc., véase más arriba) no figura en los balances de las empresas, pero debe tenerse en cuenta en un balance social.

Veánse las tablas 7 y 8 siguientes para una comparación de los diferentes puntos de vista para la optimización:

⁸ Esto es equivalente a decir que el valor neto actual de la serie de pagos anuales es idéntico a la inversión inicial. La ecuación (2.25) es estrictamente válida solamente si toda la inversión se ha realizado en un año (año 0).

⁹ De forma análoga, el mismo razonamiento es válido también para los demás mecanismos de apoyo público, como son las reducciones impositivas, primas, etc.

Tabla 7. Parámetros de costes más relevantes en el análisis microeconómico y macroeconómico

	Análisis Micro-económico (punto de vista empresarial)	Análisis Macro-económico (punto de vista de administración pública)
Investigación	Inversión neta (inversión bruta menos subvenciones / financiaciones)	Inversión bruta (el dinero para financiación podría utilizarse en otro caso para otras medidas de protección medioambiental).
Costes energéticos	Costes energéticos incluidas las subidas esperadas del coste energético	
Otras operaciones y costes de mantenimiento	Servicios generales, mantenimiento, mano de obra, requisitos legales, etc.	
Contingencias	Ej. Impacto positivo en la cuota de mercado, ahorro de tarifas del certificado de emisiones de CO ₂ , etc.	
Costes no recurrentes	Ahorro en costes de reparación en los que se incurriría sin cambiar los sistemas de suministro de energía: coste de autorización (permisos de construcción)	

Tabla 8. Indicadores más relevantes y función objetivo sujetos a optimización en los análisis micro y macroeconómicos

	Análisis Micro-económico (punto de vista empresarial)	Análisis Macro-económico (punto de vista de administración pública)
Objetivo principal	Reducción de costes energéticos (costes anuales y anualidad de inversión propia/neta)	Ahorro del consumo de energía primaria
Indicadores relevantes	IRR / MIRR Período de recuperación NPV BCR	Costes anuales adicionales del sistema energético por unidad de energía primaria ahorrada. (Mínimo requerido por IRR como INPUT)
Impacto de las restricciones económicas en los criterios de optimización	Ahorro absoluto máximo Vs. Máximo IRR/MIRR	Ahorro absoluto máximo de energía primaria Vs. Coste mínimo adicional por unidad de energía primaria ahorrada

Bibliografía del capítulo 2:

R. Morand, R. Bendel, R. Brunner, H. Pfenninger (2006): Prozessintegration mit der Pinchmethode, Handbuch zum BFE-Einführungskurs. Bundesamt für Energie, Bern, 2006.

Schnitzer H., Ferner H. (1990): Optimierte Wärmeintegration in Industriebetrieben DBV Verlag, Graz, 1990.

3 Cómo implementar una auditoría energética EINSTEIN

Tanto la auditoría de energía térmica EINSTEIN como el diseño de unos sistemas energéticos mejores empiezan fuera de la empresa, con algunas actividades preliminares y rápidas que pueden iniciarse en el despacho. La fase de **preauditoría** es muy importante, ya que nos ayuda a conocer mejor la situación (el perfil de demanda energética real, los procesos térmicos que hay en marcha, los equipos que se están utilizando, los costes energéticos, etc.) y a prepararnos antes de acudir a la empresa del cliente. Tras realizar una llamada telefónica previa al cliente, hay que enviar, únicamente a la persona de contacto, un cuestionario electrónico a fin de recabar la información que necesitamos. Una vez cumplimentada, esta plantilla puede importarse automáticamente a una herramienta informática de cálculo que permite realizar una evaluación aproximada de la demanda energética y de las áreas susceptibles de mejora.

Así pues, en esta fase preliminar, los pasos que hay que seguir son sencillos y rápidos, aunque no por ello menos importantes, ya que serán fundamentales para ahorrar tiempo más adelante y le ayudarán a prepararse usted y preparar a la empresa para la auditoría energética que realizará in situ.

La segunda fase consta de dos pasos:

- × una visita a pie por la empresa
- × un análisis de los resultados calculados con la herramienta informática Einstein

El objetivo de la visita a la empresa es el de recabar la información que falta, a través de entrevistas y mediciones directas; inspeccionar los esquemas hidráulicos y de la planta, etc. Gracias a esta evaluación preliminar y a la definición de las prioridades de la auditoría, la visita a la empresa no le llevará más que unas pocas horas.

Después de la visita, sólo tendrá que acceder a la herramienta de cálculo de EINSTEIN, con la que podrá gestionar la información recabada y hacer una estimación del ahorro energético y económico. Con la ayuda de EINSTEIN podrá:

- × comprobar la coherencia e integridad de los datos obtenidos;
- × comprobar si falta algún dato y solicitarlo si es preciso;
- × elaborar un desglose detallado del consumo de calor en cada proceso, niveles de temperatura, combustibles, etc.;
- × analizar el rendimiento real de los equipos existentes;
- × realizar una comparativa (benchmarking).

En cuanto sepa con seguridad cuáles son los flujos de energía reales y las ineficiencias de la empresa, EINSTEIN le ayudará a llevar a cabo la tercera fase de la auditoría: **el diseño y evaluación de alternativas energéticas más eficientes**. Esta tarea le permite comparar las diferentes opciones a través de los pasos siguientes:

- × diseño preliminar de medidas integrales de ahorro energético y económico, y definición de los objetivos energéticos;
- × cálculo del rendimiento energético y análisis del impacto ambiental de las soluciones viables;
- × análisis de los aspectos económicos y financieros.

Finalmente, dispondrá en su ordenador de toda la información necesaria para elaborar una presentación clara y eficaz de los resultados del estudio. EINSTEIN le permitirá **elaborar informes** (cuarta fase de la auditoría) de una forma sencilla para usted y convincente para el cliente.



Figura 17. Fases de una auditoría energética EINSTEIN

Las cuatro fases de una auditoría EINSTEIN pueden subdividirse en 10 pasos, que se ilustran en la figura 18. Cada uno de estos pasos se describe con detalle en los siguientes apartados. En cada uno de los pasos de la auditoría, se detallan las diferentes tareas, las instrucciones para realizar dichas tareas y las herramientas Einstein que se pueden utilizar. Si desea más información sobre cómo usar la herramienta informática EINSTEIN, consulte el manual de usuario correspondiente.

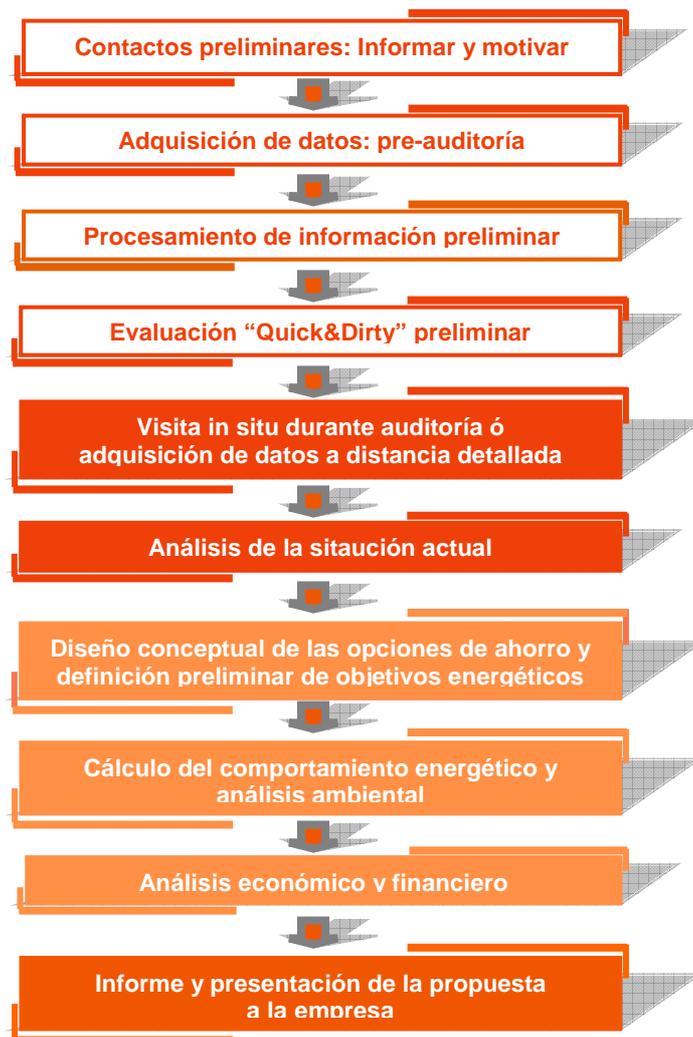


Figura 18. Los diez pasos EINSTEIN para lograr la eficiencia energética

3.1 Contactos preliminares: Motivar

3.1.1 Contacto inicial

El objetivo del primer contacto es despertar el interés del cliente, proporcionarle información y concretar una cita.

Una buena idea es empezar por los contactos personales que ya tenga. Es probable que sepa ya de alguna empresa que desea mejorar su sistema térmico o que quiere ampliar, reestructurar o cambiar la instalación.

Asimismo, en presentaciones públicas o debates puede aprovechar la ocasión para hacer referencia a la metodología EINSTEIN, además de distribuir folletos y conseguir nuevos contactos en ferias, cursos de formación en los que participe, jornadas sobre ahorro de energía en la industria, etc. También puede contactar con las asociaciones locales o Cámaras de Comercio para ver si están interesadas en darle su apoyo (con un artículo en sus boletines informativos, enviando su oferta a las empresas afiliadas, etc.).

Además, puede enviar material informativo a las personas de contacto o a los gestores de energía de un grupo específico de empresas (por ejemplo, de los siguientes sectores industriales: industria alimentaria, industria metalúrgica, industria química, industria papelera, industria maderera, industria textil, etc.). La auditoría EINSTEIN es un producto totalmente nuevo, de modo que puede empezar con sus clientes habituales.

El material informativo debería incluir los aspectos principales de EINSTEIN (detallados en el folleto EINSTEIN, incluyendo, por ejemplo, estadísticas sobre los costes energéticos), así como el posible apoyo financiero que pueda ofrecer, procedente de instituciones públicas, cámaras de comercio, etc.

Pasadas una o dos semanas, habrá llegado el momento de ponerse en contacto con la persona a quien haya enviado la información mediante una llamada de teléfono. Su objetivo será convencer a la empresa para que dé el siguiente paso y le envíe esos primeros datos que le permitan valorar si es una posible candidata a la auditoría EINSTEIN. Además, debería intentar organizar una reunión personal en la empresa y asegurarse de que tienen la intención de rellenar el cuestionario básico.

En primer lugar, compruebe que la persona sea la adecuada. Es algo que puede hacer por adelantado, recabando información en Internet, o en informes medioambientales o de negocios, artículos de prensa, etc. Sería conveniente conocer el puesto, nombre, tratamiento, número de teléfono de la persona de contacto y productos y tamaño de la fábrica antes de ponerse en contacto con la persona en cuestión.

Además, debería pensar en esas primeras frases de introducción y en las ventajas que mencionará, y tener respuestas preparadas ante argumentos del tipo: "No tengo tiempo, no estoy interesado, envíenos más información..."

3.1.2 Cita preliminar (opcional)

Si la empresa está cerca de su despacho, quizá sería conveniente realizar una visita preliminar para establecer un contacto personal y presentar su empresa y la metodología EINSTEIN. Si eso no es posible, haga una segunda llamada telefónica para tratar el tema más en profundidad. Si consigue concertar una cita, asegúrese de que estén presentes las personas adecuadas (p. ej. el director de la planta, el operario responsable de las calderas, el jefe técnico, etc.). Además, puede enviar el cuestionario básico o la herramienta de autoevaluación de EINSTEIN. (Consulte el apartado 3.2 si desea más información al respecto)

Para la primera cita debería recabar toda la información posible de Internet. Además, sería conveniente que averiguara bien quién es el cliente y cuáles son sus expectativas. (p. ej. si tiene problemas técnicos, costes energéticos demasiado altos, si necesita cumplir algún requisito de la empresa, si aspira a destacar, etc.). A continuación, podrá definir las principales ventajas y el objetivo de la reunión: iniciar una auditoría EINSTEIN, hacer una visita rápida a la planta.

En esta primera reunión debería preguntar al cliente si desea empezar presentando a su empresa o si prefiere que usted le presente la suya. Es aconsejable interesarse por su situación específica, deseos, problemas, expectativas. Puede hablar con el cliente de problemas que ya conozca o hacerle preguntas concretas como las siguientes: ¿Han aumentado los costes energéticos? ¿Por qué? ¿Existen problemas técnicos u organizativos con el sistema térmico, p. ej. con las autoridades o con los vecinos, o con las

empresas de servicios públicos? ¿Quién se encarga del mantenimiento? ¿Qué antigüedad tiene la caldera? ¿Falta tiempo, presupuesto o conocimientos? ¿Hay planes de futuro? ¿Quién se responsabilizará de un posible proyecto?

Para presentar la herramienta EINSTEIN puede utilizar la presentación portátil, el folleto promocional y el folleto técnico (que se incluyen en el kit de herramientas). Y, si dispone de ellos, también puede utilizar los resultados del estudio orientativo.

Consejos generales:

- × Empiece la conversación con la información obtenida de Internet o diga "tienen una página web muy interesante, ¿quién la ha hecho?".
- × No responda nunca a una objeción directamente, pregunte si lo ha entendido bien, tome notas y antes piense la respuesta. Intente definir otras ventajas importantes.
- × Trate de hacer preguntas abiertas para poder recabar la mayor cantidad de información posible.
- × No monopolice la conversación. Presente información precisa y breve sobre las principales ventajas de las que la empresa podría beneficiarse.

EINSTEIN Paso 1: Contacto preliminar. Informar y motivar

> Material Promocional

> Posibilidad de auto valoración

3.2 Recogida de datos antes de la auditoría

Antes de iniciar la auditoría energética en una industria (que suele requerir un contrato previo entre la empresa y el auditor), es de gran utilidad recabar información preliminar. Dicha información preliminar puede ayudar a decidir si vale la pena continuar con el proceso de auditoría.

Avisar al usuario antes de una visita o de una entrevista telefónica detallada acerca de los datos que va a necesitar permite ahorrar tiempo tanto al cliente como al auditor. Además, de esta forma obtendrá, con toda probabilidad, información más detallada y completa.

En muchos casos, la obtención de datos a distancia es suficiente para realizar una primera evaluación rápida y orientativa, y hacerse una idea de las posibles medidas que pueden aplicarse para ahorrar energía.

3.2.1 Preparación de la empresa usuaria

Para preparar a la empresa usuaria e informarla del tipo de datos necesarios, se le proporciona una lista de los parámetros más importantes:

- × situación general de la empresa:
 - situación económica (pasada y presente)
 - perspectivas de futuro (evolución prevista del volumen de producción, otros proyectos o cambios importantes)
- × facturas eléctricas y de combustible:
 - descripción general cuantitativa y actualizada del consumo de energía y de las tarifas
 - datos históricos de los años anteriores, si están disponibles
 - datos mensuales, si están disponibles, o información cualitativa sobre la estacionalidad de la demanda
- × descripción del proceso de producción (diagrama):
 - líneas de producción de la empresa
 - flujos de producto y pasos del proceso
- × descripción de los diferentes procesos:
 - procesos que consumen calor y frío
 - cantidades de producto que se procesan
 - niveles de temperatura utilizados (en el suministro de calor, dentro del propio proceso)
 - frecuencia y duración del proceso
- × descripción del sistema de suministro de calor y frío
 - datos técnicos de los equipos (calderas, refrigeradores, etc.)
 - niveles de presión y temperatura en la distribución del calor y en los procesos
- × descripción de los edificios, espacios de producción y almacenes:
 - datos sobre el consumo derivado de la calefacción y refrigeración de espacios, si están disponibles
 - superficie, número de personas que trabajan en las dependencias de la empresa

Este informe preliminar está disponible en la herramienta EINSTEIN y puede enviarse a la empresa. Si opta por una visita preliminar, podría utilizarlo para verificar parte de la información anterior que pueda conseguirse fácilmente. Un breve recorrido puede ser también de utilidad en esta etapa.

3.2.2 Preparación del auditor

El auditor energético de EINSTEIN suele ser un experto en sistemas de energía (suministro de calor y frío), pero no puede ser experto en todos los sectores industriales en los que se verá involucrado. Sin embargo, es de vital importancia adquirir conocimientos básicos sobre los problemas específicos de cada sector, y si es antes de ponerse en contacto con la empresa o al menos antes de hacer la primera visita, mucho mejor.

Hay una gran cantidad de información disponible sobre la mayoría de los sectores y subsectores industriales, pero en muchos casos, acceder a la información adecuada resulta difícil y requiere una gran inversión de tiempo.

El kit de herramientas EINSTEIN proporciona enlaces fáciles y rápidos a la información básica de la mayoría de los sectores, una información en la que se puede profundizar en función del tiempo disponible y de las necesidades específicas, gracias a la gran cantidad de enlaces que hay en Internet y referencias bibliográficas que se incluyen en los documentos adicionales.

El auditor debería tener conocimientos básicos sobre los siguientes temas:

- × ¿Cuáles son los procesos más importantes en términos de consumo energético en una típica empresa del sector industrial o en un edificio?
- × ¿Qué tecnologías existen para los diferentes procesos (*BAT - Best Available Technologies*) y cuáles son sus principales ventajas e inconvenientes?

3.2.3 Listado y cuestionario básico para obtener datos a distancia

La metodología de auditoría EINSTEIN cuenta con un listado (véase sección 3.2.1.) y/o un cuestionario básico para obtener datos, que, más adelante, pueden completarse con información más detallada ("anexos detallados"). La lista y/o el cuestionario pueden enviarse a la empresa, junto con un texto explicativo, para que un técnico lo rellene con los datos correspondientes. El cuestionario está disponible tanto en formato impreso como electrónico (véase el anexo).

Es importante tener en cuenta que, con muy pocos datos, se puede realizar semiautomáticamente una primera evaluación orientativa. Sin embargo, por norma general, cuanto más completos sean los datos, más fiable será el análisis y mejores las recomendaciones correspondientes.

Si no se introducen todos los datos en la herramienta EINSTEIN, ésta intenta estimar los parámetros que faltan, con la información disponible elabora los cálculos posibles y genera una lista de los datos adicionales más importantes que el auditor debería obtener (consulte la descripción del menú "comprobación de la coherencia" en el manual del usuario).

EINSTEIN Paso 2 Toma de datos previos a la auditoría

> Preparación de la Empresa

> Preparación del auditor

> Obtención de datos básicos a distancia

3.3 Preparación de la auditoría: procesamiento de la información preliminar

3.3.1 Procesamiento de los datos previos a la auditoría

La herramienta informática EINSTEIN permite realizar una sencilla comprobación previa de los datos facilitados por la empresa. Tras introducir los datos, automáticamente se crean las estadísticas de suministro y demanda energéticos, se evalúa esta información y se comprueba que los datos sean coherentes.

En esta fase, en la que se procesan por primera vez los datos antes de la auditoría, se puede obtener la siguiente información:

- × una lista de las incoherencias graves que pueda haber en los datos (p. ej. se especifica el consumo de un tipo de combustible que no se utiliza en ninguno de los equipos, etc.)
- × una lista de los datos que faltan y que no se pueden calcular ni estimar a partir de la información disponible.

3.3.2 Completar la información por teléfono o correo electrónico

En caso de detectarse incoherencias graves durante el procesamiento de los datos previos a la auditoría o ante la falta de datos básicos que son imprescindibles incluso para la primera valoración orientativa, el contacto telefónico con la empresa puede ayudar a obtener información adicional o a resolver dudas.

Cada vez que se modifiquen los datos básicos, deberá comprobarse de nuevo su coherencia (apartado anterior).

Tras este paso, debería disponerse al menos de la siguiente información:

- × los principales productos y las cantidades producidas
- × el consumo total de energía de la empresa para usos térmicos
- × los procesos que consumen mayor cantidad de calor y frío y ,al menos, una estimación orientativa del consumo de energía de cada uno de ellos
- × los principales equipos de suministro de calor y frío y sus potencias nominales así como un esquema del sistema de distribución de calor y frío (qué caldera suministra calor a cada proceso, etc.)
- × los niveles de temperatura del suministro de calor y los principales procesos que consumen calor

3.3.3 Obtención de datos de referencia (benchmarks)

En esta fase ya disponemos de información detallada sobre la industria, los procesos que aplica y los productos, por lo que podemos obtener valores de referencia de otras industrias similares (benchmarks).

Éstas son las fuentes donde encontrar ese tipo de información:

- × la herramienta informática EINSTEIN contiene una base de datos que le ayudará a encontrar rápidamente valores de referencia de muchos sectores industriales
- × podrá encontrar más información en los documentos referenciados en *EINSTEIN report on thermal energy auditing practices and Tools* [Vannoni et al., 2008]

Y encontrará más detalles sobre el proceso de benchmarking en el apartado 3.6.5.

Bibliografía del capítulo 3.3.3:

C.Vannoni et al. (2008): EINSTEIN Report: Review of Thermal Energy Auditing Practices and Tools.IEE Project EINSTEIN, Project deliverable D2.2. Disponible para su descarga en www.einstein-energy.net

3.3.4 Adquisición de conocimientos básicos sobre un sector industrial o sobre un tipo de empresa concreta

Con la información que ya tenga del sector industrial o tipo de empresa en cuestión, podrá profundizar en sus conocimientos sobre los tipos de procesos y maquinaria con los que se encontrará cuando realice la auditoría, tal y como se describe en el apartado 3.2.2.

- × Obtenga información sobre la maquinaria específica que se utiliza y las posibles alternativas tecnológicas
- × Obtenga información sobre los equipos y sistemas de suministro específicos que se utilizan y las posibles alternativas tecnológicas

3.3.5 Identificación de las medidas posibles

Con la información que tenga sobre la industria seguramente ya podrá llevar a cabo un ciclo de auditoría completo, desde la obtención de datos hasta la elaboración de una propuesta.

Debería hacerlo aunque los datos no estén completos y, por lo tanto, los resultados no sean muy precisos. De este modo, se hará una primera idea de los niveles de ahorro que se pueden conseguir, de la magnitud aproximada de la inversión necesaria, etc. Asimismo, le será muy útil para una primera conversación con la empresa durante la auditoría.

No le llevará mucho tiempo, ya que la herramienta EINSTEIN puede hacerlo casi todo automáticamente.

Cuando esté estudiando las posibles mejoras, debería consultar documentación sobre las mejores tecnologías disponibles (MTD) para cada sector y para cada problemática. El kit de herramientas de EINSTEIN le ayudará a acceder fácilmente a la información que haya disponible.

3.3.6 Lista de prioridades para obtención de datos y futuras averiguaciones

Si tiene que realizar una auditoría *rápida*, deberá centrarse en lo esencial. Si lo que quiere es una auditoría de gran calidad, no puede olvidarse de los datos importantes. En algunos casos puede surgir un conflicto entre uno y otro objetivo. Por lo tanto, cuando ya sepa lo que quiere proponer a la empresa, sería recomendable definir una lista de informaciones prioritarias que debería obtener durante la auditoría, y en las que debería insistir aunque sea difícil acceder a ellas.

Tras la auditoría, debería disponer de toda la información necesaria para poder evaluar la viabilidad de las tecnologías y soluciones que propondrá o excluirá. Además, evite recabar datos innecesarios, especialmente si acceder a ellos no resulta fácil. Por ejemplo, si desea proponer un sistema termosolar para producir calor de proceso, debería obtener toda la información sobre la superficie de suelo y techo que haya disponible, posibles problemas de sombras, los detalles estructurales de la cubierta, etc. Esta información es necesaria para evaluar la tecnología; en cambio, si la solución más probable es un intercambiador de calor para mejorar la recuperación del calor en algunos procesos, no es conveniente molestar a la empresa pidiéndoles planos detallados de la cubierta. Tampoco vale la pena solicitar muchos detalles técnicos de un proceso que consume únicamente el 0,3 % de la demanda energética total.

EINSTEIN Paso 3

Preparación de la auditoría: procesamiento de la información preliminar

> Proceso de los datos previos a la auditoría

> Comprobar los datos con la empresa

> Comparar los datos (benchmark)

> Adquirir conocimientos sobre los procesos de la empresa

> Identificación de las posibles medidas

> Lista de Prioridades para la auditoría

3.4 Pre-evaluación rápida

Tras procesar la información preliminar, se puede generar una primera evaluación rápida. Este informe debería permitir:

- × identificar los procesos más importantes en cuanto a consumo de calor y frío y cuantificar aproximadamente el consumo de energía
- × realizar un primer análisis cuantitativo de la demanda de calor y frío por niveles de temperatura y horarios; curvas acumulativas de demanda térmica

y en función de este análisis de las demandas de calor y frío:

- × identificar las opciones tecnológicas que permitirían incrementar la eficiencia del suministro de calor y frío
- × dimensionar los equipos necesarios
- × estimar el rendimiento energético y económico que se espera

Este primer esbozo de *lo que puede hacerse* en la industria puede ayudar tanto al auditor como a la empresa usuaria a centrarse, a partir de ese momento, en la información concreta que hará falta para evaluar las opciones tecnológicas más prometedoras.

3.4.1 Cómo elaborar el informe de la pre-evaluación rápida

El informe de pre-evaluación rápida puede generarse de forma automática seleccionando la opción "Generar informe" de la herramienta informática EINSTEIN.

La precisión de las estimaciones económicas que la herramienta informática EINSTEIN facilita sobre el sistema propuesto depende de la calidad de los datos relativos a los costes de los subsistemas y los equipos que se hayan introducido previamente en las bases de datos correspondientes. Estos datos pueden variar mucho en función de las condiciones locales y nacionales, y los valores que se dan por defecto son sólo aproximados y orientativos.

3.4.2 ¡No prometa demasiado al principio!

Como ya hemos dicho anteriormente, a veces, presentar a la empresa un primer informe de evaluación puede ser de gran utilidad para que conozcan las opciones posibles y los futuros pasos a seguir. Las cifras orientativas del informe de pre-evaluación pueden ayudar al personal técnico o a los jefes de zona a convencer a la dirección de la empresa de que hay que proseguir con la auditoría y profundizar en el análisis, o ser útiles, incluso, para pedir financiación.

Sin embargo, hay que ir con cuidado y no presentar datos demasiado detallados (especialmente los datos económicos) si no tienen una base sólida. Debe dejar claro en todo momento que las cifras que se presentan son simples estimaciones y que pueden cambiar al hacerse un análisis más detallado.

EINSTEIN Paso 4 Pre-evaluación rápida

> Elaboración del informe de pre-evaluación rápida

> Presentación del informe a la empresa (opcional)

3.5 Visita de las instalaciones o segunda obtención de datos detallados a distancia

3.5.1 Opcional: presentar y comentar un estudio orientativo

Si decide presentar algunos resultados preliminares de su primer estudio orientativo a la empresa, éste podría ser el momento de empezar a hablar sobre una visita. Puede resumir los resultados que haya podido recopilar a distancia hasta el momento, y explicar sus conclusiones preliminares a la empresa.

3.5.2 Entrevistas y visita de las instalaciones para recoger datos detallados

3.5.2.1 Recogida de datos en las oficinas del cliente

Cuando llegue a una empresa, lo primero que hay que hacer siempre es ir a las oficinas, presentarse, explicar qué puede ofrecerle a la empresa y recoger la información básica. Si es posible, durante este primer contacto, ya debería estar presente algún miembro del personal técnico de la empresa, alguien que conozca los detalles técnicos de los procesos y equipos que hay en la misma.

Puede recurrir al cuestionario básico EINSTEIN o al listado de datos (lleve siempre encima una copia impresa y, si puede ser, ya cumplimentada con la información que haya recopilado en etapas anteriores) para estructurar la entrevista, y solicite la siguiente información:

- × *Información general* de la empresa: qué producen y en qué cantidades; cómo es el proceso de producción; cuáles son sus cifras globales (volumen de negocio, consumo de energía, número de empleados); cuántos turnos tienen y cuándo hacen vacaciones, etc. En este contexto, también es muy importante conseguir información sobre los planes de futuro de la empresa: posibles ampliaciones que puedan hacer cambiar los datos correspondientes a la demanda o, por el contrario, riesgo de cierre de alguna línea de producción o de la fábrica entera debido a la presión de la competencia.
- × *Facturas de combustibles y electricidad, y tarifas energéticas*: intente conseguir información sobre varios años y, si ya la hay, información detallada sobre qué porcentaje del consumo corresponde a cada equipo, proceso o línea de producción.
- × *Datos sobre los procesos*: dado que en muchas industrias sólo se conoce el consumo de energía global, y no el de cada proceso concreto, conseguir información detallada de estos procesos suele ser la única forma de determinar la distribución de la demanda de calor (las formas habituales de conseguir esta información se indican en la figura 19). Por lo tanto, es importante que logre hacerse una idea general de cómo funciona un determinado proceso y de cuáles son los horarios de funcionamiento y la temperatura de dicho proceso.

Asimismo, debe intentar recopilar información adicional sobre los diferentes componentes que contribuyen a la demanda de calor del proceso:

- entrada y salida de fluidos: volumen o masa, y niveles de temperatura (entrada/salida);
- masa o volumen que debe calentarse o enfriarse al poner en marcha un proceso, número de ciclos de operaciones o interrupciones, y temperatura inicial a partir de la cual se calientan o se enfrían los equipos.
- pérdidas térmicas de los equipos en funcionamiento: la energía necesaria para mantener el proceso a una temperatura determinada. Este factor puede estar compuesto por la demanda de energía para compensar las pérdidas térmicas, la demanda de energía para cambiar de estado los fluidos de trabajo (ebullición, secado) o la demanda de energía para reacciones químicas. Ésta suele ser la parte más difícil de determinar, ya que, por ejemplo, no se suelen conocer los coeficientes de pérdida térmica de los equipos del proceso. Indirectamente, puede conseguir alguna indicación que le permita hacer algunos cálculos. Por ejemplo, si sabe que los equipos, tras un determinado periodo de tiempo Δt (p. ej. durante la noche) se enfrían desde la temperatura de proceso T_P a una temperatura final T' , puede estimar el correspondiente coeficiente de pérdida térmica; o también puede intentar calcular este coeficiente si conoce las dimensiones aproximadas de los equipos y el grosor de su aislamiento; en los procesos de secado, la diferencia de humedad entre el producto húmedo y el producto seco le puede dar una idea de cuánto calor se necesita para la evaporación, etc.

La herramienta EINSTEIN le proporciona algunas ayudas para llevar a cabo este tipo de cálculos auxiliares en las situaciones más frecuentes.

- * *datos sobre los equipos de suministro de calor y frío:* realizar un inventario de los equipos existentes y los datos técnicos más relevantes (incluida la antigüedad y estado de conservación, para ver si tiene sentido proponer su sustitución); intente conseguir al menos información indicativa no sólo sobre la *potencia* nominal, sino también sobre la *energía* (calor o frío) que producen estos equipos (horas de funcionamiento, factor de carga parcial), aun si se trata de algo muy cualitativo como, por ejemplo, “lo usamos tan sólo unas cuantas horas al año, es básicamente para emergencias” o “las dos calderas trabajan casi siempre a plena carga y a veces nos quedamos cortos de vapor...”; y no olvide elaborar un esquema en el que se indique claramente qué equipos suministran calor o frío a cada proceso.
- * *datos sobre la distribución y almacenamiento del calor y el frío:* longitud y diámetros de las tuberías y conducciones; temperatura, niveles de presión y caudales; esta información adicional puede ayudarle a hacerse una idea más precisa del consumo de la fábrica; identifique si hay acumulación del calor (volumen, temperatura y niveles de presión, aislamiento).
- * *sistemas actuales de recuperación del calor:* identifique los intercambiadores de calor de que se dispone para la recuperación del calor, incluyendo los datos técnicos y las condiciones de funcionamiento habituales (caudales y temperaturas en el lado caliente y en el lado frío).
- * *energías renovables:* averigüe la superficie disponible (cubiertas y suelos) para un posible uso de energía termosolar (tamaño, orientación, capacidad de carga estática de las cubiertas, distancia desde la sala de máquinas y/o los procesos); evalúe la disponibilidad de biomasa o biogás (ya sea biomasa residual resultante del propio proceso de producción o procedente de proveedores cercanos); ¿hay algún motivo para utilizar energías renovables además de la posibilidad de ahorro económico (p. ej. contribución a la protección del medio ambiente, cuestiones de marketing, etc.) ?
- * *demanda de calor y frío del edificio:* la demanda de calor y frío para edificios en algunas empresas puede llegar a ser una parte importante del total; haga un inventario de los edificios existentes, los sistemas de calefacción y aire acondicionado utilizados; los niveles de temperatura y los horarios de uso, etc.; pida planos o esquemas de los edificios siempre que pueda.
- * *parámetros económicos y financieros:* cuáles son los costes de explotación y mantenimiento de la empresa (además de la factura energética); cómo se financian las inversiones en el sistema de suministro de energía (externamente, internamente); qué exigencias hay en materia de recuperación o rentabilidad de las inversiones.

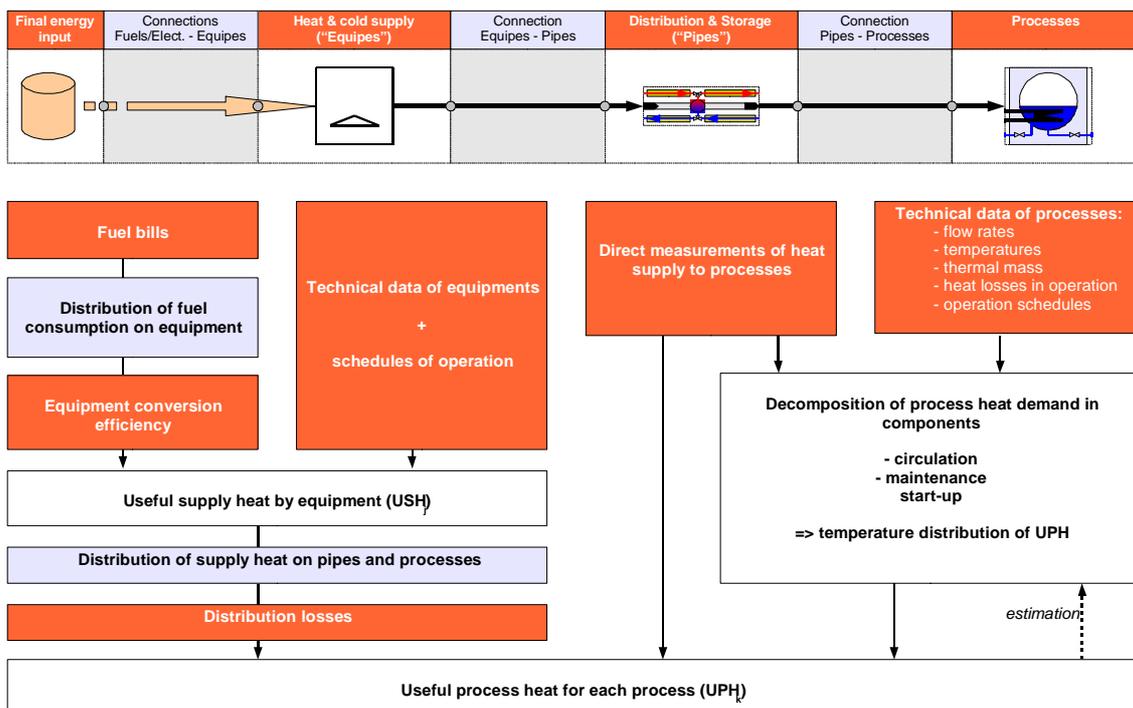


Figura 19: Posibles formas de obtener información sobre la demanda de calor y frío de los diferentes procesos

Haga una lista mental (y mejor, otra en papel) de estas categorías de información. De este modo, no se irá de la fábrica sin haber averiguado toda la información más importante. Sin embargo, la mayor parte de las veces la entrevista no seguirá el orden de su lista mental, sino que irá obteniendo la información de forma fragmentada y desestructurada en el contexto de una conversación informal.

Para evitar despistes, va bien tomar notas durante la visita de forma estructurada, agrupando la información según las categorías antes mencionadas. De este modo, tras media hora o una hora de conversación informal, cuando tenga mucha información acerca de los diferentes procesos y equipos (y de las relaciones familiares del técnico de mantenimiento) o de los problemas con la competencia, podrá comprobar rápidamente qué datos le faltan o si, por el camino, se le ha olvidado preguntar algo importante.

3.5.2.2 Paseo por las instalaciones

Cuando crea que ya tiene toda la información que podía conseguir en las oficinas, pregunte si puede visitar a pie las instalaciones de la fábrica. Asegúrese de ver, al menos, los equipos más importantes de suministro de calor y de proceso. Procure llevar una cámara digital para tomar fotografías que, más adelante, le ayudarán a recordar los detalles.

Aproveche la visita para entender mejor cómo funcionan los diferentes procesos y haga todas las preguntas que no se le haya ocurrido formular durante la visita a las oficinas.

Intente prever los problemas que deberán solventarse para poder efectuar en los sistemas las modificaciones que tenga en mente:

- * posibles puntos de conexión para nuevos equipos o líneas de distribución de calor y frío
- * espacio disponible para nuevos equipos o para almacenamiento

Si, en las oficinas, sólo ha podido hablar con el jefe técnico, aproveche el paseo por las instalaciones para conocer al personal de mantenimiento de la empresa. Le podrá facilitar información muy útil sobre el día a día de la fábrica (por ejemplo, puede preguntar si “por la mañana, cuando empiezan a trabajar, a qué temperatura se encuentra este tanque de almacenamiento”, etc.).

3.5.3 Comprobación rápida in situ de la integridad y la coherencia

Si, durante la entrevista, ha tenido la oportunidad de introducir ya algunos datos en su ordenador portátil utilizando la herramienta informática EINSTEIN, puede utilizar la opción “*consistency check*” (comprobación de la coherencia) y comprobar lo siguiente:

- a) si los datos son coherentes o si hay contradicciones en la información que ha recopilado (p. ej. alguna confusión con las unidades)
- b) si faltan datos importantes (y cuáles son), para poder solicitarlos posteriormente.
- c) puede que ya disponga de suficiente información para ejecutar la herramienta de generación automática de propuestas, que le dará una idea de los órdenes de magnitud de los posibles sistemas de suministro alternativos (p. ej., si sabe cuánto espacio adicional de almacenamiento hace falta para un sistema, puede aprovechar la visita para comprobar si hay el espacio necesario, etc.).

3.5.4 Mediciones durante la visita

En muchos procesos de producción, la demanda energética total anual (y, a menudo, también la mensual) se conoce gracias a las facturas que recibe la empresa de los proveedores de energía, pero la demanda no se puede atribuir a equipos y procesos concretos. Sin embargo, estos datos, al menos para algunos procesos cruciales y para los principales equipos de suministro de calor y frío, son esenciales para poder aplicar la metodología EINSTEIN.

Cualquier dato disponible de las mediciones de la propia empresa realizadas in situ le pueden ayudar a analizar los perfiles energéticos detallados, incluidas las horas de disponibilidad de calor residual y las horas de mayor demanda energética. Por lo tanto, es importante comprobar con la empresa qué datos ya se registran y qué combinaciones de datos pueden utilizarse para analizar el flujo energético.

En muchas empresas será necesario realizar mediciones adicionales para compensar la falta de datos. Dependiendo de las variaciones de los procesos, algunas de las mediciones pueden realizarse durante la primera visita a la empresa. Hay ciertas mediciones rápidas y sencillas que se pueden hacer durante la visita a la empresa para calcular los flujos de calor y frío:

Medición de temperaturas

Las pistolas de infrarrojos permiten realizar una primera lectura de la temperatura de funcionamiento de los depósitos y conducciones que no están aislados. En el caso de que la temperatura del proceso varíe rápidamente, durante la visita pueden instalarse termopares que registren los datos. Al aplicarlos en depósitos o conductos aislados, las lecturas de temperatura nos dan una base para calcular las pérdidas de calor.

Si se conoce el caudal másico (suministro de calor, producto o suministro de frío), medir durante unas horas el flujo de suministro y de retorno puede aportar suficiente información para calcular el calor o frío suministrado por el conducto.

Mediciones del caudal másico

Las mediciones sin contacto de los flujos de agua u otros medios utilizando, por ejemplo, sistemas de ultrasonidos pueden realizarse fácilmente sin interferir en los procesos. Los flujos de energía pueden calcularse rápidamente en combinación con las mediciones de temperaturas. Tenga en cuenta que las mediciones cortas (p. ej. durante tan sólo unas horas) ofrecen una perspectiva limitada del conjunto de la producción, sobre todo si los procesos de producción varían mucho con el tiempo.

La medición de los flujos de energía puede realizarse en el lado primario del suministro (agua caliente, línea de condensados) o en el secundario (medición del medio del proceso). Normalmente, la decisión depende de la disponibilidad de puntos de medición (acceso a las tuberías, aislamiento, estado de las tuberías, regulación etc.). Una breve lista (no exhaustiva) de mediciones posibles dará al usuario una idea de los puntos de medición posibles:

1. *Mediciones en el lado del medio de proceso (“lado secundario”):*
 - × Medición del *medio de proceso* (agua, aire, flujo de producto) que se calienta en el proceso.
 - × Medición del *agua corriente* añadida en un depósito, que se calienta constantemente a una temperatura (p. ej. en plantas de lavado).
2. *Mediciones en el lado del suministro de calor (“lado primario”):*
 - × Mediciones de la línea de suministro de agua caliente y temperaturas, antes y después, del intercambiador de calor (para el suministro indirecto de energía).
 - × Mediciones de la línea de suministro de agua caliente y temperatura del agua caliente (para el suministro directo de energía).
 - × Medición de la línea de condensados de un proceso (o de varios, si su patrón de regulación es tal que los datos de la medición pueden asignarse posteriormente a cada proceso).
 - × Medición del agua de reposición añadida al sistema de suministro de vapor (para identificar la energía utilizada como vapor directo).

3.5.5 Programa de mediciones para el usuario

Si observa que falta información y no puede obtenerla en el momento realizando una medición in situ, puede encargarle a la empresa algunas tareas:

- × Registro de las temperaturas, presiones o contadores de los sensores ya existentes a intervalos periódicos.
- × También puede dejar algún aparato de medición y pedir al personal que anote las lecturas a lo largo de un período de tiempo.
- × Puede pedir al personal de la empresa que lleve a cabo algún “experimento” sencillo (p. ej. determinar las curvas de calentamiento o enfriamiento de algunos equipos, etc.)

3.5.6 Comentar sus impresiones de la visita

Tras la visita, debería comentar a la empresa cuáles han sido sus impresiones y cuáles serían los pasos a seguir a partir de ese momento:

- × Definir y decidir junto con la empresa cuáles son las medidas que le gustaría estudiar con más detalle, y qué opciones descartaría a priori.
- × Acordar un calendario para los próximos pasos: plazo máximo de entrega de la información adicional que necesita de la empresa; plazo máximo de entrega del informe de la auditoría.

EINSTEIN Paso 5. Visita a las instalaciones para la auditoría

> Presentación a la empresa del informe de pre-evaluación rápida

> Realizar entrevistas y visitar el lugar

> Recogida rápida de nuevos datos

> Toma de mediciones

> Definición del programa de mediciones

> Debatir nuevas interpretaciones

3.6 Análisis de la situación actual

3.6.1 Comprobación de la coherencia e integridad de los datos

Un análisis sistemático de la situación actual es el punto de partida para poder identificar las oportunidades de ahorro energético que tiene una empresa. Sin embargo, dividir el consumo total de energía en diferentes componentes y definir cuáles son los principales flujos, fuentes y puntos de fuga normalmente exige recopilar una cantidad bastante importante de datos. Además de la cantidad, también hay que tener en cuenta la precisión y coherencia de los datos, puesto que pueden influir mucho en la fiabilidad de las soluciones alternativas propuestas.

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, a menudo hay diversas formas de conseguir la misma información. Algunos ejemplos podrían ser los siguientes (véase también la figura 19):

- × el consumo de combustibles de una empresa puede obtenerse directamente en forma de energía; o en forma de la cantidad de combustible consumido (en m³, litros, etc.), a partir de la cual tendrá que calcular el consumo de energía utilizando el LCV del combustible.
- × El calor producido por una caldera de agua caliente puede estar determinado, por un lado, por el combustible consumido y, por otro, por la cantidad de agua caliente consumida; asimismo, puede haber un contador de calor instalado a la salida de la caldera para medir directamente el calor aportado.

Al recopilar los datos sobre la situación (demanda energética actual, etc.), puede encontrarse con los siguientes problemas:

- × *Redundancia* de la información y posibles *conflictos* entre datos: hay redundancia si, como en los ejemplos anteriores, tiene dos o más formas diferentes de determinar o calcular el mismo parámetro. Si todas le dan el mismo resultado, no pasa nada. De hecho, esto nos sirve para confirmar que el valor obtenido es correcto. Pero si no es así, si los distintos modos de calcular algo nos dan resultados diferentes, entonces tenemos un problema, porque hemos de elegir uno de esos valores sin saber cuál es correcto y siempre nos quedará la duda de que alguno de ellos lo sea.
- × *Falta de información*: puede que no disponga de la información detallada que necesita para realizar los cálculos. Por ejemplo, quizá conozca la demanda total de calor (calculada a partir del consumo de combustibles) y la demanda del proceso con mayor consumo de calor, pero puede que no tenga información sobre cómo se reparte el resto de la demanda entre los demás procesos.

Comprobar la redundancia y la integridad en un sistema complejo puede resultar una tarea larga y pesada. En general, para hacerlo dispone de las siguientes herramientas:

a) relaciones *matemáticas* y *físicas* entre las diferentes cantidades obtenidas a partir de las leyes de la física (conservación de la energía, segunda ley de la termodinámica) y las *propiedades físicas* de los materiales.

- × *equilibrios de energías y masas* en los equipos y subsistemas (entrada = salida + pérdidas). Los parámetros de eficiencia o los caudales másicos en muchos casos tienen que estar entre 0 y 1 debido a las leyes de la conservación.
- × *restricciones de la segunda ley*: el calor sólo fluye de caliente a frío. Esta condición puede ayudarle a definir los valores mínimo y máximo de algunas cantidades (p. ej. las temperaturas).
- × *las propiedades físicas de los materiales*, sobre todo las de los fluidos y combustibles. Por ejemplo: la energía transportada por un fluido está relacionada con el caudal másico y la diferencia de entalpía específica entre el suministro y el retorno, la cual depende del calor específico y de la fracción de vapor y la evaporación causada por el calor latente (cuando hay cambios de estado).
- × *las horas de funcionamiento* de los procesos y equipos están limitadas por la duración de un día (24 h) y un año (8.760 h) y por los periodos de vacaciones y fines de semana especificados.

b) *los conocimientos técnicos* sobre los valores típicos o límites prácticos de determinadas cantidades:

- * matemáticamente, la eficiencia de una caldera tiene que estar entre 0 y 1 (o entre 0 y algo así como 1,1, si se toma el LCV como referencia). Sin embargo, en la práctica, es muy difícil encontrar una caldera con una eficiencia tan baja como 0.1 o tan alta como 0,999. Éstos son valores que, en la práctica, nunca se alcanzan. Un valor entre 0,7 y 0,95 es el intervalo que podría considerarse como límite práctico para las calderas sin condensación. El mismo razonamiento puede aplicarse a las eficiencias en la distribución de tuberías y conducciones.
- * las *diferencias de temperatura* en los intercambiadores de calor (diferencia de temperatura media logarítmica), teóricamente, según la segunda ley de la termodinámica, tienen que ser superiores a 0 K, pero en la práctica de la ingeniería el límite es incluso mayor, algo así como 3 o 5 K para los intercambiadores de calor líquido-líquido, y de unos 10 K para los intercambiadores de calor líquido-aire o aire-aire. El mismo razonamiento puede aplicarse a la diferencia entre las temperaturas de suministro y de retorno en los circuitos de fluidos: nadie diseñaría un circuito con un fluido de transporte del calor que circule a un caudal másico tan elevado que sólo haya una diferencia de 0,1 K entre el suministro y el retorno. En este caso, los límites prácticos rondarían también un valor de 1 o 2 K.
- * las *pérdidas de calor* de algunos equipos de proceso son difíciles de determinar con precisión. Pero hay un límite superior que viene dado por la superficie total de los equipos (que se puede estimar fácilmente a partir de su tamaño) y el hecho de que la transferencia total de calor (radiación + convección natural) de cualquier cuerpo no aislado y a temperaturas no muy elevadas (por debajo de 100 °C) es inferior a unos 8 W/m²K en interiores y 20 W/m²K al aire libre (viento incluido), si no hay pérdidas adicionales debidas a cambios de estado o reacciones químicas (p. ej. ebullición, etc.).
- * el *tiempo para calentar o llenar/vaciar* algunos equipos de proceso rara vez supera el 50 % de la duración total de un lote, en los procesos por lotes, o más de 2 o 3 horas en los procesos continuos que se paran durante la noche.

Mientras que los límites matemáticos permiten juzgar de manera precisa y clara (sí/no) si el valor de algún parámetro (en el contexto de todos los datos en conjunto) es posible o no, los límites que se establecen a partir de los conocimientos de ingeniería presentan cierto grado de imprecisión. Para estas limitaciones de la ingeniería, EINSTEIN establece la siguiente distinción:

- * *límites prácticos*: es el amplio margen de valores posibles (desde el punto de vista de la ingeniería) que incluye el 99,9 % de los casos prácticos.
- * *rango de valores típicos*: éste es un intervalo de valores mucho más pequeño y que debería ser válido para un 90 % de los casos prácticos (pero teniendo en cuenta que puede haber un 10 % de situaciones fuera de este rango).

En EINSTEIN la comprobación básica de la coherencia consiste en comprobar que los datos de una determinada empresa sean coherentes con las *relaciones matemáticas y físicas*, y con los *límites prácticos* que se deducen de los conocimientos de ingeniería.

Con la ayuda de la herramienta informática EINSTEIN, esta comprobación básica de la coherencia puede realizarse de forma automática. Si existe alguna discrepancia entre los datos introducidos y los límites establecidos, los datos se corregirán automáticamente y se generará una lista de mensajes de error.

La comprobación básica de la coherencia con la herramienta informática EINSTEIN también sirve para *completar* todos los datos que no se han rellenado explícitamente en el cuestionario, pero que se pueden calcular a partir de las mismas correlaciones y restricciones.

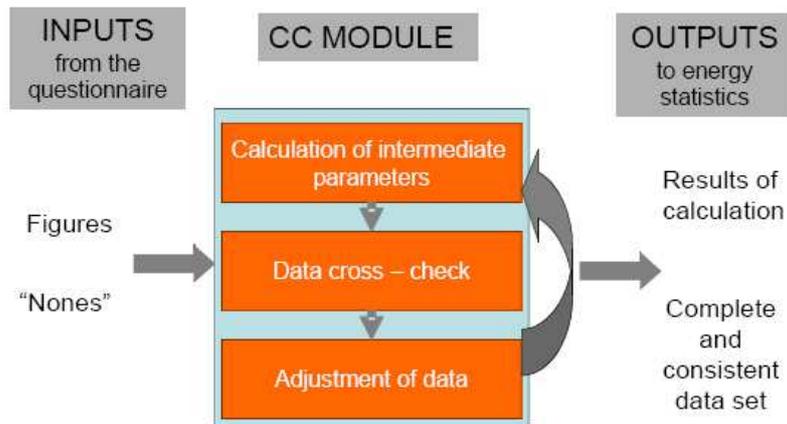


Figura 20: Esquema del procedimiento de comprobación básica de la coherencia en la herramienta informática EINSTEIN. “Ninguno” significa que son datos desconocidos (celdas en blanco).

3.6.2 Obtención de la información que falta

La cantidad de información y el nivel de precisión necesario para una auditoría energética dependen de la exhaustividad con que ésta se realice. Para las evaluaciones preliminares (los estudios orientativos) se necesita menos información, mientras que para un análisis detallado hay que tener en cuenta un gran número de parámetros.

Sin embargo, en muchos casos, no es fácil conocer todos los valores que, en teoría, son necesarios. A veces, sobre todo en empresas pequeñas, es difícil conseguir incluso los datos más básicos y, por lo tanto, después de la comprobación básica de la coherencia y de completar los datos que faltan todavía pueden quedar lagunas, o datos que sólo se pueden determinar con un grado de precisión muy bajo.

Si éste es el caso, para los parámetros que queden pendientes podemos utilizar lo que denominamos el *rango de valores típicos* que determinan nuestros conocimientos de ingeniería. Con la ayuda de estos “valores típicos” estaremos en disposición de completar la mayoría de las lagunas que puedan quedar, pero teniendo en cuenta que, al utilizar estos valores *estimados*, estamos haciendo *suposiciones* que no tienen que corresponderse necesariamente con la realidad.

Así pues, cuando lo hagamos, debemos hacerlo constar claramente en los informes:

“ conclusiones válidas únicamente según las suposiciones A, B y C”.

Y, siempre que sea posible, deberíamos confirmar a posteriori si estas suposiciones son correctas o no.

Si, a pesar de emplear todos sus conocimientos de ingeniería, no es capaz de conseguir al menos una estimación de los datos básicos imprescindibles para realizar el análisis, aún puede hacer lo siguiente:

a) llamar a la empresa y decirles que, con la poca información de que dispone, le es absolutamente imposible elaborar una propuesta razonable.

b) elaborar algunas hipótesis sobre la información que falta: suponga algunos de los parámetros utilizando valores razonables. Puede intentar simular los casos extremos: un escenario óptimo (para el sistema que quiere proponer), uno pésimo y otro intermedio.

A veces, esto es mejor que no hacer nada, pero en tal caso deberán hacerse las advertencias antes mencionadas por duplicado y destacarse en **negrita**.

Cantidad y precisión de los datos necesarios para diferentes niveles de análisis

La metodología EINSTEIN diferencia tres niveles de análisis, cada uno con un mayor nivel de detalle y precisión:

× Nivel 1: Análisis orientativo (Quick&Dirty)

Para un análisis orientativo basta conocer con un mínimo grado de precisión¹⁰ el consumo de energía y el principal nivel de temperatura (temperatura de proceso) de los procesos de la empresa que consumen más energía.

× *Nivel 2: nivel estándar de análisis EINSTEIN*

Para el nivel estándar de análisis EINSTEIN, deben conocerse al menos los siguientes parámetros con el mínimo nivel de precisión:

- el consumo de energía de los principales procesos consumidores de energía y su descomposición en demanda de calor y frío para circulación, mantenimiento y puesta en marcha
- todos los niveles de temperatura (entrada, proceso, salida) y horas de funcionamiento de esos procesos y los correspondientes equipos de suministro de calor y frío
- los flujos de calor residual procedentes de los principales procesos consumidores de energía

× *Nivel 3: análisis detallado*

Para un nivel de análisis detallado debe disponerse, como mínimo y con la precisión exigida, de toda la información que figura en el cuestionario básico EINSTEIN.

La precisión de los datos disponibles, tanto en el sentido cualitativo del nivel de fiabilidad (si confía o no en ellos) y en el sentido cuantitativo del margen de error ($\pm xy\%$), depende mucho de los siguientes factores:

- × *La fuente de información.* A veces, en las grandes empresas, los datos del consumo de energía se miden directamente con aparatos de medición muy precisos y se guardan en sofisticados sistemas de gestión energética, mientras que, en las empresas pequeñas, a menudo sólo se conocen las condiciones de funcionamiento medias de las plantas y el consumo de energía global a partir de las facturas de las compañías suministradoras de energía. Los datos correspondientes a un año o incluso a un solo mes no tienen por qué ser representativos del consumo medio que se vaya a producir en el futuro.
- × *El procedimiento de obtención de datos.* Al recopilar los datos, es fácil que se produzcan errores al introducirlos en una hoja de cálculo o al copiarlos, al pasar los datos a una herramienta de cálculo, etc. (p. ej. ¿han introducido usted o la empresa correctamente los datos en el cuestionario? ¿Puede haber alguna confusión con las unidades de medida? ¿El cuestionario lo ha rellenado la empresa o les ha ayudado usted?, etc.).
- × *El nivel de detalle.* Cuanto más profundo sea el nivel de análisis, más detallados y específicos serán los datos necesarios y, por lo tanto, mayor será el riesgo de que los datos obtenidos sean menos precisos (p. ej. ¿necesita datos anuales u horarios? ¿Le interesa más el consumo global de energía o el consumo de cada proceso?, etc.).

Si hay algún parámetro que le plantee dudas en cuanto a su validez, indíquelo en el informe de la misma manera que destacaría los valores estimados o supuestos que se han mencionado más arriba.

3.6.3 Desglose detallado del consumo

El desglose del consumo de energía por procesos, equipos, combustibles y niveles de temperatura es muy importante para poder tener en cuenta todos los aspectos relacionados con el uso de la energía en la industria analizada. La información estadística resultante sobre su situación actual sirve como punto de partida para las decisiones sobre la aplicación de las medidas y tecnologías de ahorro de energía.

El consumo global de energía permite al auditor situarse rápidamente en cuanto al ritmo de consumo de energía y las posibilidades (un priori) de ahorro energético, si se compara con los datos de referencia de ese sector industrial. Cuando se evalúan diferentes propuestas alternativas para la mejora de la eficiencia energética, como referencia para analizar los efectos de las medidas propuestas se utiliza la demanda energética actual y su composición.

Aquí se mencionan las estadísticas energéticas más importantes y se comenta el uso de los datos.

- × *Desglose de la energía por procesos, equipos y tipos de combustible:* listado de los principales procesos y equipos consumidores de energía, y de los tipos de combustibles responsables del mayor gasto energético. Las mejoras centradas en ellos son las que tendrán una mayor influencia.

¹⁰ Como precisión mínima se entiende un margen de error inferior al +/- 50%.

- * Análisis del consumo de energía por *nivel de temperatura*. Permite evaluar el potencial de recuperación del calor residual y de aplicación de tecnologías eficientes de baja temperatura, como son la termosolar, las bombas de calor, agua de refrigeración procedente de motores de ciclo combinado (cogeneración), etc.
- * Análisis del consumo de energía en términos de *consumo de energía primaria, CO₂ y otras emisiones*: permite evaluar el impacto ambiental de la industria.
- * Desglose por índices específicos de consumo de energía: intensidad de la energía (IE) y consumo específico de energía (CEE): permite comparar con los datos de referencia y establecer unos objetivos de consumo de energía realistas.

Las estadísticas sobre la energía (desgloses) en diferentes escalas de tiempo proporcionan una información muy útil y valiosa:

- * Los *datos anuales* muestran los principales procesos y equipos consumidores de energía, y los tipos de energías, y proporcionan una indicación general sobre aquellos puntos a los que deben dirigirse primero las medidas de mejora de la eficiencia energética.
- * Los *datos mensuales* son necesarios para poder evaluar las variaciones estacionales —y dependientes de la temperatura ambiente— de la demanda (como son la climatización de espacios, los procesos de secado, las variaciones estacionales de la producción como, por ejemplo, en la industria de las bebidas, etc.) y del suministro (p. ej., sistemas termosolares), y son necesarios para ponderar la viabilidad de tecnologías específicas.
- * Los *datos horarios* sobre la demanda y el suministro de calor son importantes a la hora de determinar los picos de consumo, analizar las posibilidades de recuperación del calor residual y, sobre todo, para determinar los requisitos de acumulación de calor y frío.

Todos estos desgloses de la demanda energética de las empresas pueden elaborarse automáticamente con la herramienta informática EINSTEIN, tanto para la situación actual de la industria como para escenarios futuros basados en las diferentes propuestas alternativas.

3.6.4 Análisis del funcionamiento real de los equipos actuales

Los datos técnicos de los equipos son muy importantes para valorar el rendimiento energético del sistema. Los parámetros más relevantes en términos de rendimiento son las eficiencias en la conversión energética y las capacidades calorífica y frigorífica.

En la mayoría de los casos, la única información que se tiene al respecto son los valores nominales que figuran en las fichas técnicas facilitadas por los fabricantes de los equipos o la información que se puede obtener de los datos proporcionados por los propios equipos.

Sin embargo, el rendimiento real de los equipos puede diferir bastante de estos datos por culpa de fallos y mal funcionamiento, condiciones extremas de funcionamiento en aplicaciones específicas u otros factores. Por lo tanto, cuando los datos disponibles lo permitan, puede ser interesante comparar el rendimiento real de los equipos con el rendimiento nominal.

Una manera de evaluar el rendimiento real es medir las entradas y las salidas. Por ejemplo, si se conoce el consumo de combustible y la producción de calor de una caldera gracias a las mediciones, se puede calcular la eficiencia media de conversión.

Para los equipos de combustión, medir los gases de escape sería otra forma de obtener información sobre la eficiencia de conversión de los equipos, ya que el calor que contienen los gases de escape y la combustión incompleta son los principales causantes de las pérdidas en la conversión de la energía.

Si se dispone de mediciones, los cálculos necesarios los realiza automáticamente la herramienta informática EINSTEIN, y en el caso de que aparezcan diferencias importantes entre el rendimiento nominal y el rendimiento real de los equipos, se generarán los mensajes pertinentes para avisar de ello al auditor.

3.6.5 Comparación con los valores de referencia o benchmarks

3.6.5.1 ¿Qué es el benchmarking?

El benchmarking es un proceso estructurado que consiste en comparar y analizar las prácticas de un sector de actividad con el fin de mejorar los procesos de un negocio identificando, compartiendo y utilizando las mejores prácticas. El objetivo del benchmarking es poder comparar la eficiencia energética de una empresa con unos objetivos o valores de referencia (benchmarks) definidos.

En EINSTEIN, se utilizan los siguientes valores de referencia:

- × *Un benchmark* es un intervalo definido por un mínimo y un máximo (B_{\min} , B_{\max}) que describe el nivel óptimo de consumo de energía de las industrias de un determinado sector.
- × Un *objetivo* es un valor (B_{tar}) de intensidad de la energía o consumo específico de energía que aspira a alcanzar una empresa utilizando las mejores tecnologías disponibles que se puede permitir económicamente. Cuando no hay valores objetivo, se supone que las industrias con las mejores prácticas son las que tienen un consumo de energía situado en el 10 % inferior del intervalo $B_{\min}-B_{\max}$.
- × Las buenas prácticas² son tácticas y estrategias documentadas que emplean las empresas de mayor éxito. Se pueden conocer a través de entrevistas en profundidad con encargados de temas energéticos, estudiando la documentación de las empresas, analizando la bibliografía o a través de fuentes indirectas.

3.6.5.2 Clasificación de los indicadores por cantidades de referencia

En el proceso de benchmarking de EINSTEIN se utilizan sistemáticamente tres tipos de índices de referencia en función de la cantidad empleada como referencia:

- × *Intensidad de la energía*: por intensidad de la energía entendemos el consumo de energía por valor monetario del producto. El valor del producto se puede expresar en términos de facturación (precio de venta) o en términos de coste de producción (aproximadamente el precio de venta menos el beneficio industrial). Si no se indica expresamente, se utilizará la facturación (precio de venta). Dado que estos benchmarks hacen referencia a unidades monetarias, deberán indicarse claramente la moneda y el año al que corresponden los datos.
- × *Consumo específico de energía por unidad de producto*. El consumo específico de energía por cantidad producto es el consumo de energía asociado a la línea de producción en cuestión respecto de la cantidad de producto producida con esta energía (medida en unidades, toneladas, litros, etc.; por ejemplo, el consumo total de energía por kg de zumo de concentrado, el consumo de energía por litro de producto químico, etc.).¹¹
- × *Consumo específico de energía por producto semielaborado en operaciones unitarias*: además de los índices para productos acabados, también nos interesan los índices de consumo de energía para operaciones unitarias. El consumo específico de energía por cantidad de producto semielaborado es el consumo de energía asociado a esta operación unitaria respecto de la cantidad de producto (medida en unidades, toneladas, litros, etc.; por ejemplo, el consumo de energía por kg o litro de solución destilada). Cuando se disponga de estos índices, se mencionará la base de referencia (p. ej., en un proceso de secado, el consumo de energía puede indicarse por kg de producto húmedo o por kg de producto seco, lo cual puede dar como resultado valores numéricos diferentes).

3.6.5.3 Clasificación por tipos de energía

- × *Electricidad o combustibles*: En el módulo de benchmarking, los datos sobre el consumo de energía se clasifican en electricidad y combustibles, ya que estos datos son más fáciles de conseguir en la práctica (a partir de las facturas de electricidad y combustibles de la empresa) que la distinción entre energía para usos térmicos y no térmicos.
- × *Consumo total de energía final*: los datos sobre el consumo total de energía se obtienen sumando la energía final que contiene la electricidad y la energía final que contienen los combustibles.
- × *Consumo total de energía primaria*: consumo total de energía en términos de energía primaria. Este parámetro debe usarse, cuando esté disponible, para realizar comparaciones globales entre empresas.

¹¹ El consumo general de energía de la empresa que no se puede asociar a una línea de producción o producto concretos se calculará de manera proporcional al valor de tal producto respecto de la facturación total.

3.6.5.4 Procedimiento de benchmarking en EINSTEIN

Las comparaciones de eficiencia energética en una empresa se efectúan comparando el valor real del indicador específico I (p. ej., el consumo específico de energía por tonelada de producto) con un objetivo de referencia B_{tar} que se basa en la estructura del sector en cuestión. Esto quiere decir que el valor real de I y el valor de referencia B_{tar} se ven afectados de manera similar por los cambios que se producen en la estructura de dicho sector.

El objetivo de referencia B_{tar} se define tal como se indica más arriba. La diferencia entre el valor de I y el de referencia B_{tar} se emplea para medir la eficiencia energética, puesto que indica el nivel de eficiencia energética que se conseguiría en la empresa al aplicar a la planta las mejores tecnologías disponibles. Cuanto mayor es la diferencia, mayor es la eficiencia energética. La relación entre el indicador I real y el valor de referencia B_{tar} (llamada índice de eficiencia energética EEI ; Eq. 3.1) puede usarse como baremo de comparación entre empresas.

$$EEI = \frac{I}{B_{tar}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

donde I es el indicador específico del consumo de energía y B_{tar} el valor de referencia objetivo.

Si sólo se utilizara la mejor tecnología disponible en el sector, el EEI sería igual a 100. Un EEI de 105 significaría que, de media, I es un 5% más alto que el nivel de referencia, de modo que se ahorraría un 5% de energía en una estructura de procesos dada, si se implementara el nivel de tecnología de referencia.

3.6.5.5 Fuentes de datos para los valores de referencia (benchmarks)

Algunos de los datos sobre los valores de referencia se han extraído de documentos de referencia sobre MTD (documentos BREF), así como otra bibliografía y fuentes, para crear una base que permita definir los indicadores y valores de referencia/objetivos, que están en la base de datos predeterminada de la herramienta informática EINSTEIN. En esta base de datos se especifica el origen de cada benchmark.

Los valores de referencia también se pueden consultar en la documentación existente para *sectores industriales o subsectores*, para determinados *productos*, o para determinadas *operaciones unitarias*.

a) clasificación por sectores y subsectores industriales

La base de datos predeterminada de EINSTEIN incluye algunos valores de referencia para los siguientes sectores industriales, identificados con su código NACE. Es posible que se incluyan otros sectores en el futuro, aunque también puede introducirlos el usuario, si lo desea.

b) Clasificación por operaciones unitarias

En la producción industrial de mercancías, una operación unitaria es un paso básico de un [proceso](#). Por ejemplo, en la elaboración de la leche, la [homogenización](#), la [pasteurización](#), la refrigeración y el [envasado](#) son operaciones unitarias que se interconectan para crear un proceso de producción completo. Un proceso de producción puede recurrir a muchas operaciones unitarias para obtener el producto deseado.

Bibliografía capítulo 3.6.5:

BAT Reference Documents (BREFs) for different industrial sectors. Published by the European Union on <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>.

Vannoni et al. (2008): Review of Thermal Energy Auditing Practice and Tools. IEE Project EINSTEIN, Deliverable D2.2, 2008. Available for download on www.einstein-energy.net

- > **Comprobación de la coherencia de los datos**
- > **Adquisición y/o estimación de los datos perdidos**
- > **Desglose detallado del consumo**
- > **Comportamiento real de los equipos**
- > **Comparación mediante Benchmarks**

3.7 Diseño conceptual de opciones de ahorro y objetivos energéticos preliminares

Como ya se ha comentado en el apartado 1.3, el análisis sistemático del potencial de ahorro de energía requiere los siguientes pasos:

- × Reducción de la demanda de calor de los procesos mediante la optimización de dichos procesos
- × Reducción del suministro de calor necesario mediante la recuperación del calor y la integración de los procesos
- × Cogeneración y poligeneración
- × Suministro de la demanda de calor y frío restante mediante tecnologías eficientes, usando fuentes de energía renovables en la medida de lo posible

Como primer paso, debe diseñarse y dimensionarse un sistema alternativo de suministro de calor y frío. Tienen que elaborarse diferentes alternativas posibles que, en los siguientes pasos, se compararán según su rendimiento energético y económico para, finalmente, seleccionar la solución óptima.

El análisis de la demanda de calor y frío y del potencial de recuperación del calor / integración de los procesos permite también definir unos objetivos energéticos a priori, que pueden utilizarse como referencia para evaluar el rendimiento real calculado del sistema.



Figura 21: Generación y evaluación de propuestas alternativas (pasos 7 - 9 de la auditoría EINSTEIN).

3.7.1 Lista de recomendaciones para ahorros energéticos potenciales

Una vez reunidos y documentados los datos sobre la demanda energética, el primer paso tras el análisis y la comparación es mostrar al usuario las posibilidades de ahorro de energía en los procesos productivos que pueden mejorarse desde el punto de vista energético.

Existen numerosos manuales e informes de casos de estudio sobre eficiencia energética que muestran las posibilidades de diferentes medidas para el ahorro en el lado de la demanda. En el informe EINSTEIN *Prácticas y Herramientas de Auditoría de Energía [Vannoni y varios más 2008]* se ha reunido una larga lista de documentos relevantes. En este documento se han listado las medidas por sectores.

Las oportunidades de ordenación implementadas son acciones de gestión de energía que se llevan a cabo de manera regular y nunca menos de una vez al año. A continuación se indican oportunidades típicas de ahorro de energía:

- ajustar y apretar los varillajes de los reguladores de flujo de aire, con especial atención a los reguladores de aire exteriores, reguladores de flujo de aire de zona unitaria para multizona y reguladores de flujo de aire de frente frío y de baipás de la calefacción
- comprobar y ajustar la tensión de las correas y la alineación de acoplamientos en los accionamiento del motor en ventiladores y bombas
- sustituir los filtros del sistema de aire para evitar la obstrucción de los flujos de aire
- cerrar los sistemas de aire de escape y de reposición a áreas tales como cocinas y lavanderías cuando no sean necesarios estos procesos
- apagar luces y otros equipos de generación de calor cuando no sean necesarios
- comprobar y recalibrar componentes de control tales como termostatos de salas y controladores de temperatura del aire y del agua y verificar los ajustes de los relojes de control
- sustituir el aislamiento dañado o el que falte en sistemas de tuberías y conductos
- sustituir o reparar conductos aplastados o con pérdidas en sistemas de aire
- limpiar las superficies de los intercambiadores de calor, las unidades de calefacción y las bobinas de calefacción
- tomar en consideración normas sobre el uso de locales del edificio para permitir la reducción de la toma de aire
- establecer temperaturas mínimas y máximas para la calefacción y para la refrigeración y reajustar los controles correspondientemente
- ajustar los caudales de aire para adaptarse a las condiciones cambiantes de ocupación y a la utilización de los locales del edificio

Bibliografía:

C.Vannoni et al. (2008): EINSTEIN Report: *Review of Thermal Energy Auditing Practices and Tools*. IEE Project EINSTEIN, Project deliverable D2.2. Available for download on www.einstein-energy.net

3.7.2 Optimización de procesos: lista de tecnologías eficientes para operaciones unitarias específicas, posibilidades de ahorro de energía en la demanda

3.7.2.1 Process optimization in industry

Un segundo paso para analizar en mayor profundidad las posibilidades de ahorro en el lado de la demanda consiste en tomar en consideración cada uno de los procesos. Se puede evaluar cada unidad de procesamiento en cuanto a su eficacia y eficiencia. Las posibles medidas para mejorar los procesos son las siguientes:

- cambiar la tecnología empleada
- mejorar el proceso mejorando la regulación

Existen numerosos informes que describen las medidas de eficiencia energética para diferentes sectores y nuevos desarrollos que están constantemente realizando avances de gran utilidad, gracias a los ingenieros, operarios, suministradores tecnológicos e investigadores. La Unión Europea ha elaborado documentos para cada sector que resumen las *mejores tecnologías disponibles*¹² actualmente, cuyo objetivo es —entre otros— conseguir la máxima eficiencia energética.

La Unión Europea publica documentos de referencia sobre BAT (documentos BREF) sobre diferentes sectores y actividades específicas en <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>. Son de especial interés para este proyecto los informes BREF relacionados con lo siguiente:

A. Eficiencia energética:

- Prevención y control integrados de la contaminación, borrador del documento de referencia sobre técnicas de eficiencia energética, junio de 2008

B. Sistemas de suministro de calor y frío:

- Prevención y control integrados de la contaminación (PCIC), Documento de referencia sobre la aplicación de las mejores tecnologías disponibles a los sistemas de refrigeración industrial, diciembre de 2001
- Prevención y control integrados de la contaminación, Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles para grandes instalaciones de combustión, julio de 2006

C. Documentos específicos del sector para diferentes sectores industriales:

En el marco de la tarea 33/IV de la AIE sobre *calor solar para procesos industriales* se ha establecido una *tabla de indicadores*, que constituye una herramienta con información sistemática relativa a la energía y la ingeniería de procesos de los sectores industriales donde pueden aplicarse potencialmente los sistemas de energía termosolar. El objetivo era crear un sistema de soporte que proporcionara al usuario una amplia base de datos con los pasos cruciales que hay que seguir cuando se diseña un sistema termosolar para procesos industriales. En estos pasos, se incluye una descripción general de los procesos, parámetros importantes del suministro de energía en operaciones unitarias, valores de referencia sobre el consumo de energía, tecnologías competitivas, esquemas hidráulicos para la integración solar y estudios de casos de éxito. En el apartado de tecnologías competitivas de la tabla aparece una lista de tecnologías eficientes para distintas operaciones unitarias. Este sistema de soporte ha sido desarrollado por AEE INTEC y la Universidad Tecnológica de Graz (Austria) y ahora está disponible como una Base de Datos (vía Internet) en <http://wiki.zero-emissions.at>

La herramienta EINSTEIN se basa en estas fuentes de información (parcialmente recogidas en el proyecto EINSTEIN). La herramienta EINSTEIN incluye una base de datos de la Unión Europea en la que el usuario puede consultar lo siguiente:

a) Medidas generales de ahorro energético

b) Medidas específicas de ahorro documentadas en función de las operaciones unitarias aplicadas al sistema de producción.

La estructura, basada en operaciones unitarias y vinculada según su importancia, a diferentes sectores, permite buscar en la base de datos tecnologías o metodologías eficientes aplicadas a operaciones unitarias específicas, o medidas de ahorro de energía para tecnologías específicas. La tabla 9 muestra ejemplos de cómo se estructura la información en la base de datos (excepto la asignación a los sectores relevantes en los que dichas tecnologías y medidas de ahorro ya se aplican).

¹² Tal y como se define en el [Artículo 2.11](#) de la Directiva PCIC, se conocen como "mejores técnicas disponibles" el estado más avanzado y eficaz del desarrollo de actividades y sus métodos de funcionamiento que indican la idoneidad práctica de ciertas técnicas para proporcionar, en principio, la base para obtener unos límites de emisiones diseñados para evitar o, si eso no es posible, para reducir las emisiones y el impacto en el medio ambiente. Las "Técnicas" incluyen tanto la tecnología utilizada como la forma utilizada para diseñar, construir, mantener, operar y desmantelar las instalaciones; las técnicas "disponibles" hacen referencia a las que se han desarrollado a una escala que permite su implantación en el sector industrial en cuestión, en unas condiciones económicas y técnicas viables, tomando en consideración los costes y las ventajas, si dichas técnicas se utilizan o producen dentro del Estado Miembro en cuestión, siempre y cuando el operario pueda acceder a ellas de forma razonable; "mejores" hace referencia a las más efectivas para conseguir un elevado nivel de protección general del medio ambiente en su conjunto.

Tabla 9: Ejemplo de información en la base de datos EINSTEIN sobre medidas generales de ahorro y las mejores tecnologías disponibles para la industria alimentaria.

UNIT OPERATION	TYPICAL PROCESS	TECHNOLOGY	ENERGY EFFICIENCY MEASURE
01-CLEANING	0101-Cleaning of bottles and case	General measures	Install heat exchangers to recover thermal energy from condensate in its bottle washing section and fuel oil heater condensate
01-CLEANING	0101-Cleaning of bottles and case	Methodology	Cascaded use of wash water
01-CLEANING	0103-Cleaning of production halls	General measures	Low temperature detergents in washing: Use of final rinsing water for pre-rinsing, intermediate rinsing or the preparation of cleaning solution (often used in CIP systems); turbidity detectors can optimize the reuse of water
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Flash pasteurization	Reuse pasteurizing overflow water
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Use store heat / solar heat for heating system for start up
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	High efficiency pumps, VS drives
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Preheat incoming containers (ambient air, solar)
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Local generation of hot water
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Use of hot water instead of steam (no distribution losses, no HEX losses etc.)
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Insulating high temperature zones of unit
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Thinner glass / more conductive materials lower the driving temperature (temp drop across glass now: 5-15°C)
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Even heating/cooling increase heat transfer and shorten process times
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Immersion, spraying from below, or other heat transfer systems may increase internal convection and allow process time to be shorter
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Aiming at very little temperature increase of containers leaving the unit (normally +20°C compared to entrance temp)
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Evaporatively cooled water, absorption or ejector cooling with waste heat or other strategies may be used for cooling, if necessary
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Microwave pasteurization	Reuse pasteurizing overflow water
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Mechanical pasteurisation	Possible use in conjunction with heat recovery or at variable basis to achieve specified temperatures where variable heat sources are available or flow rates vary. Efficiency at 90% (conversion from electricity). Power from cogeneration can enhance economic/ecological performance.
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Irridation for pasteurisation	Reducing pressure drop over filters is decisive. Strategies using centrifuges
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Ultrasonic pasteurisation	
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Ultraviolet radiation for sterilization	
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Microfiltration for sterilization and clarification	
07-COOKING	0701-Cooking and boiling	General measures	Use of vapour condensers in wort boiling to collect hot water from condensate
07-COOKING	0701-Cooking and boiling	Wort boiling with mechanical vapour recompression	
07-COOKING	0701-Cooking and boiling	Wort boiling with thermal vapour recompression	
07-COOKING	0701-Cooking and boiling	Steineker Merlin wort boiling system	
07-COOKING	0701-Cooking and boiling	Brewing at high specific gravity	

En la base de datos se resumen las mejores tecnologías disponibles y las posibilidades de optimización de procesos en función de las operaciones unitarias y según los sectores. Esto permite al usuario aprender de soluciones que se aplican en otros sectores de la industria para solucionar problemas de ingeniería de procesos similares.

Si desea más información sobre las tecnologías y medidas de eficiencia propuestas, puede seguir un enlace a una *Wiki Web sobre eficiencia energética*. En esta *Wiki Web* se publica la *Tabla de indicadores de procesos industriales* (desarrollada en el marco de la Tarea 33/IV de la AIE). Además periódicamente se actualizan los apartados relativos a las tecnologías competitivas con nuevos detalles sobre tecnologías eficientes y mejores técnicas disponibles.

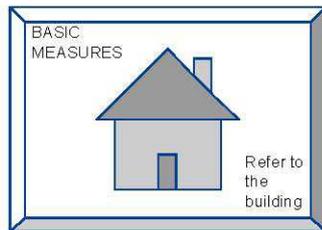
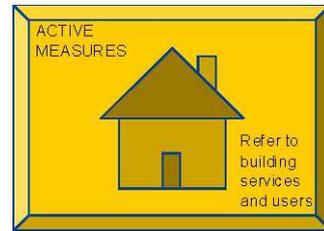
Herramientas del módulo de optimización de procesos

- × Base de datos de las mejores tecnologías disponibles y medidas de optimización de procesos para distintas operaciones unitarias.
- × Herramienta para identificar las posibilidades de optimización de la tecnología y los equipos usados en los procesos.

3.7.2.2 Reducción de la demanda en edificios

Las medidas principales para la mejora de la energía en edificios pueden dividirse en medidas BÁSICAS y medidas ACTIVAS (véase Figura 22).

- Optimización del sistema de calefacción
- Uso de fuentes de energía renovable
- Optimización del sistema de control de la calefacción
- Optimización del sistema de ventilación
- Información al usuario sobre el comportamiento idóneo



- Aislamiento exterior completo
- Optimización térmica de puertas y ventanas
- Hermeticidad al aire
- Provisión externa de sombra
- Refrigeración Natural

Figura 22: Dos niveles de medidas de mejora – Las MEDIDAS BÁSICAS y las ACTIVAS conducen a la eficiencia energética y a un buen ambiente interior (Fuente: AEE INTEC)

Dependiendo de si los edificios están situados en una zona de clima cálido, templado o frío (regulado por la temperatura exterior mínima y media durante el período de calefacción, la temperatura exterior media durante el verano, los días de grado de calefacción y la radiación solar) se pueden sugerir seis medidas principales para conseguir la optimización en el campo de la calefacción y la refrigeración de los edificios (medidas sugeridas para zonas climáticas europeas [Knotzer and Geier, 2010]).

Aislamiento exterior completo

En todos los climas es necesario tener edificios aislados; el espesor de la capa está comprendido entre 5 cm en el sur de Europa y 40 cm en el norte de Europa. Antes del aislamiento es crucial investigar de manera exhaustiva los componentes del edificio (paredes en contacto con el suelo, techos...) para ver si hay capilaridades y humedad absorbida. Si existe alguna de estas situaciones deberá deshumidificarse de inmediato. Por razones físicas de los edificios la capa de aislamiento debe colocarse en el lado exterior de la estructura portante de la carga. Más adelante es más fácil evitar los puentes térmicos, cubrir los marcos de las ventanas con aislamiento, mantener la masa de almacenamiento de calor y el efecto compensador de la humedad de los componentes del edificio dentro del caparazón del edificio. El aislamiento interior se utiliza principalmente en edificios históricos, pero en estos casos es más difícil gestionar los retos físicos del edificio. Con estas medidas se reducen las pérdidas de transmisión de calor y se pueden evitar los puentes térmicos, con la consiguiente reducción de la demanda de energía del edificio hasta el 70%. Asimismo, se puede mejorar el confort térmico dentro del edificio.

Optimización térmica de puertas y ventanas

En todos los climas europeos se tiene la necesidad de disponer de acristalamientos, ventanas y puertas con un mayor aislamiento. Se trata de algo muy importante para los climas templados y fríos, pero se está convirtiendo también en algo más común en los climas cálidos. No solo es importante el valor del propio aislamiento de ventanas y puertas para mejorar la eficiencia energética de los edificios, sino también su fijación al revestimiento –la capa de aislamiento exterior debe cubrir una gran parte del marco de la ventana (in situ) para dejarla más protegida contra el calor y para que las juntas queden protegidas contra corrientes de aire, etc. Con estas medidas, se reducen las pérdidas de transmisión y se gana en energía solar “pasiva” con la consiguiente reducción de la demanda de energía hasta un 25%. El ambiente interior mejora gracias al mayor confort térmico, las menores corrientes de aire y superficies frías y el menor riesgo de condensación.

Hermeticidad al aire

En todos los países europeos, aunque principalmente en climas fríos y templados, existe la necesidad de contar con una envolvente del edificio estanca al aire. Lo más importante es decidir dónde se situará la envolvente estanca al aire (lado interior de la pared exterior o entre la fachada antigua y la nueva, etc.) y cómo se van a integrar las ventanas, las puertas y los huecos del edificio en esa envolvente hermética al aire. Con estas medidas se pueden reducir las pérdidas de infiltración / ventilación y el ambiente interior se

beneficiará de un mayor confort térmico, menos corrientes de aire y menos superficies frías, así como de un menor riesgo de condensación.

Provisión exterior de sombra

Esta medida es necesaria para mantener el confort térmico interior durante la estación cálida. Por supuesto, es importante en climas cálidos, aunque su importancia está creciendo notablemente incluso en climas fríos. Hay varias razones para ello, tales como la mayor carga térmica interior (equipos técnicos, alumbrado), las grandes áreas de ventanas sin posibilidad de sombra contabilizable, etc. Con la provisión externa de sombra se puede reducir la demanda de refrigeración, así como el consumo de potencia para luz artificial mediante el uso combinado de la luz diurna. Además, el ambiente interno se puede mejorar evitando temperaturas excesivas durante el verano y usando alumbrado de luz diurna.

Refrigeración Natural

En climas europeos cálidos los tejados con ventilación y los tejados y fachadas de colores claros son muy útiles para proteger el edificio contra el calor. La ventilación cruzada natural y la refrigeración gratuita nocturna, combinada con el aislamiento externo y la masa de almacenamiento de calor interior, también se utilizan para mantener un clima interior adecuado durante la estación de verano en climas templados fríos. Con todo ello se puede reducir la demanda de refrigeración y se pueden evitar las temperaturas excesivas durante el verano.

Información al usuario sobre el comportamiento idóneo

Todos los procesos de reacondicionamiento de edificios residenciales son en primer lugar un esfuerzo técnico y organizativo, aunque también suponen un esfuerzo social y de comunicación, guiando a los residentes (usuarios) para conseguir mejorar la energía y el ambiente interior. El conocimiento por parte de los usuarios de las acciones durante la renovación y del uso del edificio después de dicha renovación es muy importante para conseguir un rendimiento completo del proceso. Es muy importante proporcionar a los residentes herramientas e información para que puedan saber con qué están tratando (servicios de edificios, demandas de electricidad de diferentes servicios, sistema de ventilación, etc.). Con todo ello, se consigue reducir el uso de energía final, aumentar la eficiencia y hacer más estable el clima interior.

Calefacción solar de locales de edificios de fábricas {Solar space heating of factory buildings}

En el edificio de una fábrica la demanda de energía específica para calefacción varía en función de la temperatura del edificio, del índice de intercambio de aire, de la calidad del aislamiento y de las ganancias internas. Dentro de la IEA Tarea 33/IV AEE INTEC ha simulado diferentes escenarios para un edificio de fábrica de referencia en Austria (demanda de calefacción 70 kWh/(m²a), 1000 m² de área, 6 m de altura, 1 turno de explotación, 15 trabajadores y una ganancia interna por alumbrado de 5 W/m²). Quedó demostrado que en comparación con el edificio de referencia la demanda de calefacción aumenta hasta 105 kWh/(m²a) reduciendo el aislamiento e incluso hasta 150 kWh/(m²a) cuando además de reducir el aislamiento también se incrementa el índice de intercambio de aire. Gracias a las ganancias internas debidas al funcionamiento de las máquinas dentro del edificio la demanda de calefacción se puede reducir hasta aproximadamente 50 kWh/(m²a). Basándose en el trabajo llevado a cabo en la IEA Tarea 33/IV se puede decir que la energía térmica solar es una buena solución para la calefacción de locales de edificios industriales si no hay suficiente calor residual disponible procedente de las operaciones de la compañía (para ver más información se puede consultar Jähmig y Weiss [2007])

Bibliografía y otras lecturas:

Knotzer, A., Geier, S. (2010): *SQUARE -A System for Quality Assurance when Retrofitting Existing Buildings to Energy Efficient Buildings, Energy Improvement Measures and their Effect on the Indoor Environment*, SQUARE project (EIE/07/093/SI2.466701), Work Package 5 Energy Improvement Measures, Deliverable 5.1 report, AEE INTEC, Gleisdorf, Austria

Jähmig, D., Weiss W.(2007): *Design Guidelines – Solar Space Heating of Factory Buildings – With Underfloor Heating Systems*, Booklet prepared as part of the IEA Task 33/IV – Solar Heat for Industrial Processes, published by AEE INTEC, Gleisdorf, Austria

3.7.3 Diseño preliminar de la red de intercambiadores y acumuladores de calor

Tras recopilar los datos necesarios y analizar el potencial de ahorro de energía mediante el uso de tecnologías de proceso eficientes, el siguiente paso de la auditoría será realizar un análisis estructurado del potencial de ahorro de energía mediante la recuperación del calor. Este paso es muy importante, ya que la aplicación de cualquier medida de eficiencia energética antes de cambiar un sistema de suministro de energía garantiza que el concepto general será eficiente a la hora de conseguir un suministro de energía sostenible en el futuro y evitar así sobredimensionar los equipos de suministro.

La integración del calor, desde los años 70 [Linhoff and Hindmarsh, 1983], se considera una metodología bien desarrollada para optimizar los procesos térmicos. Gracias al *análisis pinch* (tal como se describe en el apartado 2.5), se puede calcular el potencial de recuperación de calor en un sistema de flujos energéticos. Basándonos en los datos recopilados sobre los procesos, los equipos de suministro de la empresa y el balance energético, se pueden definir los “flujos de entalpía” que nos muestran, respectivamente, la demanda y el excedente energéticos de un proceso.

En la Tabla 10 se expone un ejemplo de los flujos de energía en una máquina para lavar botellas con los siguientes parámetros:

- × Volumen de los depósitos de la máquina: 5 m³ en total
- × Temperatura del agua fría = 10C
- × Temperatura del agua dentro de la máquina = 60C
- × Entrada de agua fría durante el funcionamiento continuo = 10 m³/d
- × Entrada de calor durante el funcionamiento (calentamiento de la entrada de agua y pérdidas térmicas, evaporación despreciable) = 90 kW
- × Horario de funcionamiento: puesta en marcha de 6:00 a 6:30, funcionamiento continuo de 6:30 a 16:00.
- × Temperatura del agua residual = 50C
- × Temperatura a la que se puede enfriar el agua residual: 5C

Tabla 10: Flujos de entalpía para el ejemplo de una máquina de lavar botellas.

Nombre	Temperatura inicial	Temperatura final	Caudal másico	Potencia necesaria / Calor residual	Horario de funcionamiento
	°C	°C	kg/h	kW	
Puesta en marcha	10	60	10.000	582	6:00 – 6:30
Calentar la entrada continua de agua	10	60	1.053	61	De 6:30 a 16:00
Aporte adicional de calor durante el funcionamiento para compensar pérdidas térmicas	60	60	-	29	De 6:30 a 16:00
Agua residual	50	5	1.053	55	De 6:30 a 16:00
Agua residual tras parar la máquina	50	5	10.000	524	16:00 – 16:30

Dichos flujos se pueden definir para cualquier proceso o equipo. Nos centraremos en los flujos más relevantes desde el punto de vista térmico. Tomando como base esta tabla de flujos, se puede trazar fácilmente la curva compuesta de calor y frío, y averiguar así el potencial máximo teórico de recuperación del calor para una ΔT_{min} dada entre los diferentes intercambiadores de calor del sistema (véase también el apartado 2.5).



Figura 23: Curva compuesta de calor y frío para una empresa lechera con líneas de producción de leche, queso, cuajada y mantequilla

La gran curva compuesta muestra el potencial de recuperación del calor del proceso de una forma algo diferente, pero basándose en los mismos datos de entrada (véase el apartado 2.5 para más detalles). Aquí se representa la diferencia entre la curva compuesta de calor y de frío, y de esta manera se puede ver el aporte externo de calor o frío necesario a diferentes niveles de temperatura.

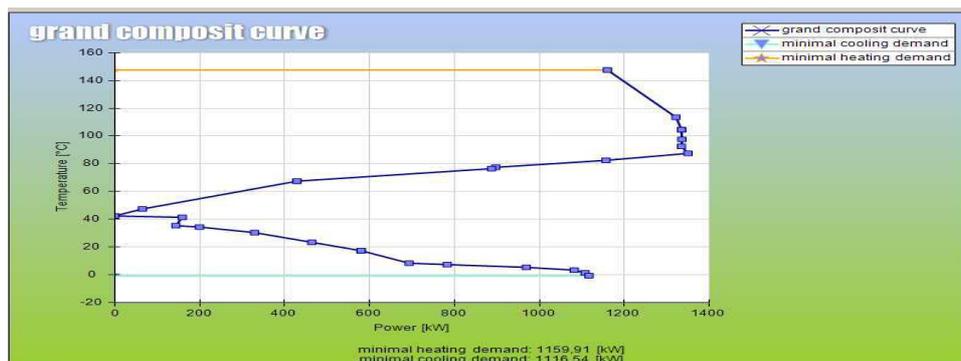


Figura 24: Gran curva compuesta de una empresa lechera con líneas de producción de leche, queso, cuajada y mantequilla

Basándonos en el potencial teórico, deberemos identificar una red técnica y económica de intercambiadores de calor sensible. Aquí hay que tener en cuenta una serie de criterios generales:

- × Uso de calor a ciertos niveles de temperatura para calentar otros flujos hasta un nivel similar de temperatura (debería evitarse la destrucción de energía de gran valor, a altas temperaturas, para aplicaciones de baja temperatura).
- × La potencia del sistema de intercambio de calor.
- × La energía total transferible mediante los intercambiadores de calor.
 - Horarios de funcionamiento de los procesos: qué flujos están en funcionamiento y cuándo pueden utilizarse para realizar un intercambio de calor directo.
 - Acumuladores: ¿son necesarios para el intercambio de calor entre dos flujos determinados?, ¿cuáles son las pérdidas de los acumuladores y cuánta energía se puede transferir en total?
- × Debería darse prioridad a la integración del calor en un mismo proceso y hacerse uso directo del calor residual.
- × El uso de calor que debe ser enfriado mediante una máquina frigorífica para procesos de calentamiento aumenta el ahorro de energía debido al intercambio de calor, ya que se ahorra tanto el suministro de energía externa a la fuente de calor como al dissipador de calor.
- × La distancia entre la fuente de calor (flujo caliente) y el dissipador de calor (flujo frío).

- × Temas prácticos, como los factores de incrustación, la necesidad de un intercambio de calor indirecto a través de un medio de transferencia de calor, los aspectos relacionados con la temperatura y la presión, etc.
- × Costes de la inversión y ahorro en los costes de la energía.

Aunque estos cálculos pueden hacerse a mano, para los sistemas más complejos, requerirían una gran inversión de tiempo. Diversos grupos de investigadores han desarrollado algoritmos para poder generar propuestas automáticas de redes de intercambiadores de calor, sin embargo apenas tienen en cuenta los horarios ni el diseño de los acumuladores. Además, no se da prioridad a la recuperación interna del calor y a un óptimo ahorro de energía en la red en general.

Dentro de EINSTEIN se aplica un método basado en la estrategia de la red de recuperación de energía máxima [Kemp, 2007] que utiliza elementos básicos del *método de diseño pinch* [Linhoff y Hindmarsh 1983] para el diseño automático de una red de intercambiadores de calor. Los intercambiadores de calor se seleccionan basándose en los valores nominales $qmcp$ de las corrientes de energía. Más adelante, dentro de la simulación de la red de intercambiadores de calor, se simula el rendimiento de los intercambiadores de calor con entalpías y temperaturas variables a lo largo del tiempo. En esta simulación, también se calcula el tamaño de un depósito de almacenamiento aproximado.

Conceptos de acumulación

A la hora de desarrollar redes para la recuperación del calor en la industria, es importante tener en cuenta los conceptos de acumulación y de procesos por lotes. En primer lugar, tienen que definirse los horarios de funcionamiento general de cada proceso durante una semana tipo. Nos interesa la hora a la que empieza y acaba cada turno, cuántos lotes se fabrican, la duración de fabricación de un lote, etc. para indicar el horario de funcionamiento real. La figura 25 muestra un ejemplo para una cuba de fermentación de queso.

En la cuba de fermentación, en primer lugar se precalienta la leche; a continuación, la leche permanece en la cuba de fermentación mientras se le añade el agua precalentada; y, finalmente, se extrae el suero y se enfría. Para este delicado proceso, suponemos que la cuba de fermentación se limpia cada 2 lotes. En caso de que haya en funcionamiento dos líneas de fermentación en paralelo, el horario es más continuo, ya que las líneas en paralelo pueden funcionar por turnos.

Obviamente, una gestión del funcionamiento y una planificación inteligente de la demanda de calor pueden reducir, no sólo los picos de carga, sino también aumentar la continuidad de los flujos.

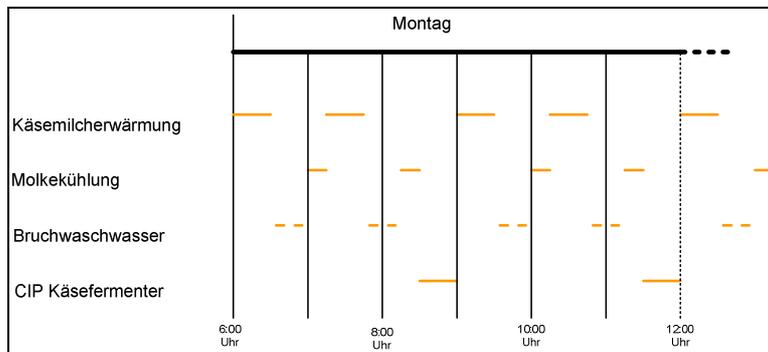


Figura 25: Horario de una cuba de fermentación de queso

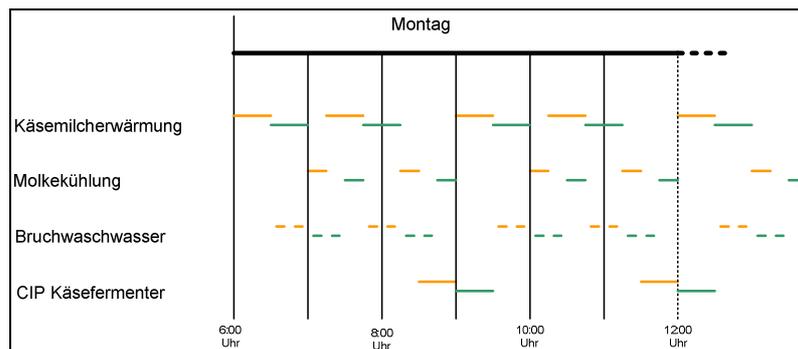


Figura 26: Horario de dos cubas de fermentación de queso que funcionan por turnos

Sin embargo, existen numerosos casos en los que no es posible conseguir una continuidad en los procesos. En nuestro ejemplo de la cuba de fermentación, vemos que se siguen produciendo interrupciones en los horarios de producción. Suponiendo que quisiéramos intercambiar calor entre la leche que hay que precalentar y el suero que se tiene que enfriar, no podríamos realizar el intercambio de calor sin la ayuda de acumuladores.

Así pues, se podrá aplicar un modelo por segmentos de tiempo. Estos segmentos vienen definidos por la hora de inicio y de finalización de los procesos. Pueden ser de cuatro tipos:

1. Sólo está disponible la fuente de calor.
2. Sólo necesita energía el dissipador de calor.
3. La fuente y el dissipador funcionan de forma simultánea.
4. No circula ningún flujo.

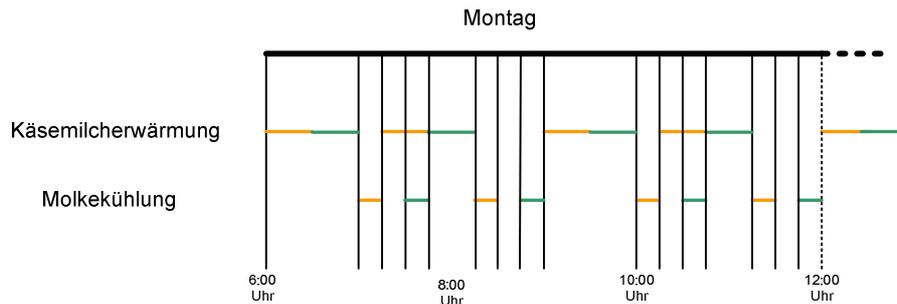


Figura 27: Modelo de segmentos de tiempo aplicado al precalentamiento de la leche y el enfriamiento del suero en la elaboración del queso

Existen algunas metodologías que aplican segmentos de tiempo en toda la red de flujos y luego calculan las redes de intercambiadores de calor para cada segmento de tiempo. Nosotros proponemos una metodología diferente: seleccionar en primer lugar los dos flujos para un intercambiador de calor según los criterios mencionados anteriormente, calcular su capacidad de acumulación según el modelo de segmentos de tiempo y, finalmente, calcular la energía total transferible entre ambos flujos. Esto se aplica a muchas combinaciones de flujos y, finalmente, se selecciona la mejor (la que consigue el mayor ahorro de energía con un intercambiador de calor).

Se puede calcular la diferencia de demanda energética y la disponibilidad en cada segmento de tiempo. Estos excedentes o demandas de energía determinan el diseño del sistema de acumuladores. El diseño se elabora mediante una simulación que tiene en cuenta el potencial de acumulación, el tamaño apropiado de los acumuladores, su volumen actual y las pérdidas respectivas en cada período de tiempo.

Hay que señalar que este primer diseño de los acumuladores está basado únicamente en la simulación energética de un acumulador estándar y que muestra la capacidad de acumulación propuesta para cada intercambiador de calor. Con estas premisas, el experto puede escoger el número de acumuladores que deben instalarse y sus niveles de temperatura.

Intercambiadores de calor y diseño propuestos

Todos los intercambiadores de calor que se propongan en esta etapa conceptual serán a contracorriente, con el objetivo de transferir el máximo de energía posible.

Para realizar una primera estimación del coste de la inversión en el sistema de intercambiadores de calor, hay que definir el área del intercambiador. Tal y como se ha comentado anteriormente (véase el apartado 2.5), existe un equilibrio entre el ahorro de energía y los costes de inversión en función de la elección de la ΔT_{\min} . En este sentido, la documentación existente ofrece algunos valores estándar que sugieren que la ΔT_{\min} debe elegirse basándose en la temperatura y en el estado físico del caudal másico (líquido, gaseoso, en condensación).

Asimismo, tiene que definirse el coeficiente de transmisión térmica para calcular el área de intercambio de calor. Para realizar una primera estimación, se pueden determinar los valores medios de cada estado físico de los flujos. Más adelante, estos valores se tienen que volver a calcular teniendo en cuenta las características reales del caudal.

Las tablas siguientes resumen algunos valores estándar que se aplican en EINSTEIN.

Tabla 11: Valores estándar para la ΔT_{min} y el coeficiente de transmisión térmica α

Estado físico	ΔT_{min} [°C]	Coeficiente de transmisión térmica U [W/m²K]
Líquido	5	5.000
Gas	10	100
Condensación	2,5	10.000

En la práctica, los coeficientes totales de transmisión térmica $U = (1/\alpha_1 + s/k + 1/\alpha_2)^{-1}$ dependen del tipo de intercambiador de calor y de las turbulencias producidas, así como del material de que está hecho el intercambiador de calor. Sin embargo, los coeficientes medios de transmisión térmica de cada flujo del intercambiador de calor que aparecen en la tabla anterior son la base para realizar buenas estimaciones de los coeficientes totales de transmisión térmica en diferentes tipos de intercambiadores de calor. Como valor estándar, se puede utilizar el acero inoxidable como material de los intercambiadores de calor.

Tabla12: Tipos de intercambiadores de calor y coeficientes totales de transmisión térmica

Intercambio de calor	Tipo de intercambiador de calor escogido en EINSTEIN	Coeficiente de transmisión térmica (material = acero inoxidable) U [W/m²K]	Valores medios proporcionados en el VDI Wärmeatlas [W/m²K]
Líquido - Líquido	Intercambiador de calor de placas	2.143	1.000 – 4.000
Gas – líquido	Tubular	97	15-70
Condensación – líquido	Tubular	2724	500 – 4.000
Gas – gas	Tubular	50	5-35
Condensación – gas	Tubular	99	20 - 60

En este caso, para realizar una primera estimación, sólo se tienen en cuenta los intercambiadores de calor de placas y los tubulares. Tras calcular el área de transferencia de calor, la selección del tipo de intercambiadores también es importante para realizar una primera estimación de los costes. Para ello, se pueden utilizar tanto los métodos de cálculo de costes propuestos en la bibliografía existente como los datos proporcionados por los proveedores.

Curvas de disponibilidad y demanda de calor

Tras diseñar los intercambiadores de calor y definir el ahorro obtenido gracias a la recuperación del calor, se pueden representar las curvas de disponibilidad y demanda de calor restante como base para continuar con el diseño de los sistemas de suministro de energía. Las curvas de carga anuales son una buena base para diseñar nuevos equipos de suministro, ya que muestran cuánto calor se necesita y cuántas horas al año. A partir de aquí se pueden determinar el tamaño ideal de los equipos y sus respectivas horas de funcionamiento a plena carga.

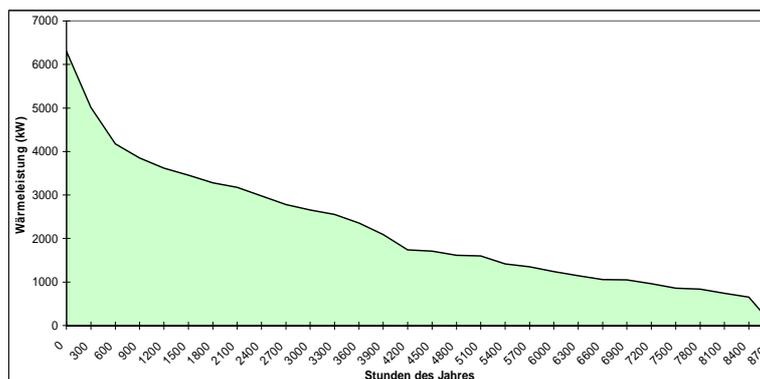


Figura 28: Curva de carga anual

Basándonos en los datos sobre los flujos de energía y su horario de funcionamiento, se pueden representar estas curvas de carga después del análisis pinch. Dado que en los flujos de energía también se definen las temperaturas, se pueden representar las curvas de carga de la demanda de calor hasta diferentes niveles de temperatura. De este modo, el experto puede diseñar unos equipos de suministro adecuados de acuerdo con la demanda de calor que haya a diferentes niveles de temperatura (véase el apartado 3.7.4 para más detalles).

Rediseño de la red de intercambiadores de calor por un cambio en los sistemas de suministro de energía

En algunos casos puede que necesitemos rediseñar la red de intercambiadores de calor porque se han modificado los sistemas de suministro de energía. Éste podría ser el caso si, por ejemplo, un intercambiador de calor utiliza la descarga gaseosa de una caldera que se ha cambiado por una combinación de caldera de biomasa más planta solar. En cualquier caso, el experto tiene que comprobar la red de intercambiadores de calor propuesta después de cambiar el sistema de suministro de energía. En EINSTEIN también se pueden rehacer los cálculos de la red de intercambiadores de calor basándose en el balance energético que tendrán los nuevos equipos de suministro.

Bibliografía adicional:

Brienza, Gandy, Lackenbach (Eds.) (1983): *Heat Exchanger Design Handbook*. Hemisphere Publishing, New York, 1983.

Kemp, I.C. (2007): *Pinch Analysis and Process Integration*. Elsevier, Amsterdam, 2007.

Linnhoff B., Hindmarsh E. (1983): *The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks*, Chemical Engineering Science 38, No.5, 745-763.

Morand R., Bendel R., Brunner R., Pfenninger H. (2006): *Prozessintegration mit der Pinchmethode*, Handbuch zum BFE-Einführungskurs. Bundesamt für Energie, Bern, 2006.

Schnitzer H., Ferner H. (1990): *Optimierte Wärmeintegration in Industriebetrieben*. DBV Verlag, Graz, 1990.

Richard Turton, Richard C. Bailie, Wallace B. Whiting, Joseph A. Shaeiwitz (1998). *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes*. Prentice Hall International Series, Old Tappan, 1998.

Verein Deutscher Ingenieure (2006). VDI Wärmeatlas

3.7.4 Diseño preliminar de sistemas de suministro alternativos (incluidos los cambios de combustibles y cambios en el sistema de distribución)

El objetivo

Una vez examinadas y aplicadas las posibilidades de recuperación del calor y de modificación de la temperatura del proceso (estas modificaciones requieren normalmente una menor inversión de capital que las modificaciones del sistema de suministro de calor y frío y, sin embargo, pueden redundar en una reducción importante de la demanda energética), la siguiente parte esencial de la metodología de auditoría EINSTEIN es la elaboración y diseño preliminar de opciones de suministro alternativas dirigidas a conseguir una mayor reducción del consumo de energía.

Una opción de suministro de calor y/o frío sería sustituir los equipos de suministro y distribución del calor y/o frío por otros que ofrezcan un mayor ahorro de energía y ventajas medioambientales y económicas. El diseño preliminar de estos sistemas alternativos implica elegir los equipos adecuados y evaluar su rendimiento energético en función de la demanda y el excedente de calor y/o frío de los procesos y su distribución temporal.

Por lo tanto, el punto de partida para el diseño del sistema de suministro de calor y frío es analizar (desglosar) la demanda energética total tras el diseño preliminar de la optimización del proceso, y del sistema de recuperación y acumulación del calor, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- * nivel de temperatura de la demanda de calor restante (tras la recuperación de calor)
- * cantidad de demanda de calor y calor residual disponible
- * distribución temporal de la demanda de calor y del calor residual disponible
- * espacio disponible
- * disponibilidad de fuentes de energía alternativas y su coste (biomasa, etc.)

Planteamiento metodológico

La optimización del sistema de suministro de calor y frío en su conjunto se basa en considerar la demanda total de calor y frío como una *cascada de suministro de calor*.

- * los equipos más eficientes suministran el calor funcionando con la carga básica (durante muchas horas) y a niveles de temperatura relativamente bajos.
- * los picos de carga y el resto de la demanda a altas temperaturas se cubre con equipos menos eficientes, adecuados para este fin.

Este planteamiento de suministro de calor en cascada no nos conducirá necesariamente a un resultado óptimo ni tampoco tiene en cuenta las peculiaridades de los distintos sistemas de distribución del calor, pero proporciona una idea aproximada que luego se puede optimizar y adaptar manualmente a cada caso, dependiendo de la experiencia del auditor.

El proceso de diseño del sistema de suministro se desarrolla según los siguientes pasos:

- * Seleccionar el tipo de equipos que se van a utilizar en la cascada de suministro de calor y determinar su orden en la cascada. Este paso tiene que realizarlo el auditor mayoritariamente a mano, aunque la herramienta informática EINSTEIN propone, de manera predefinida, un orden recomendado para los equipos.
- * Dimensionar los equipos de la cascada uno por uno según su tipo. A tal efecto, la herramienta informática EINSTEIN ofrece unos *asistentes de diseño* para varias tecnologías. Este diseño preliminar automático o semiautomático se puede pulir luego manualmente.
- * Selección de la combinación óptima para el conjunto. Este paso se lleva a cabo a posteriori mediante una estrategia de ensayo y error: se pueden diseñar diferentes combinaciones de tecnologías alternativas y luego compararlas en función de su rendimiento energético, medioambiental y económico.
- * En muchos casos, la optimización de la secuencia "recuperación del calor – suministro de calor y frío" requiere tener que repetir la misma secuencia varias veces, ya que un cambio en el sistema de suministro puede provocar cambios en el calor residual disponible y, por lo tanto, afectar también al potencial de recuperación del calor residual.

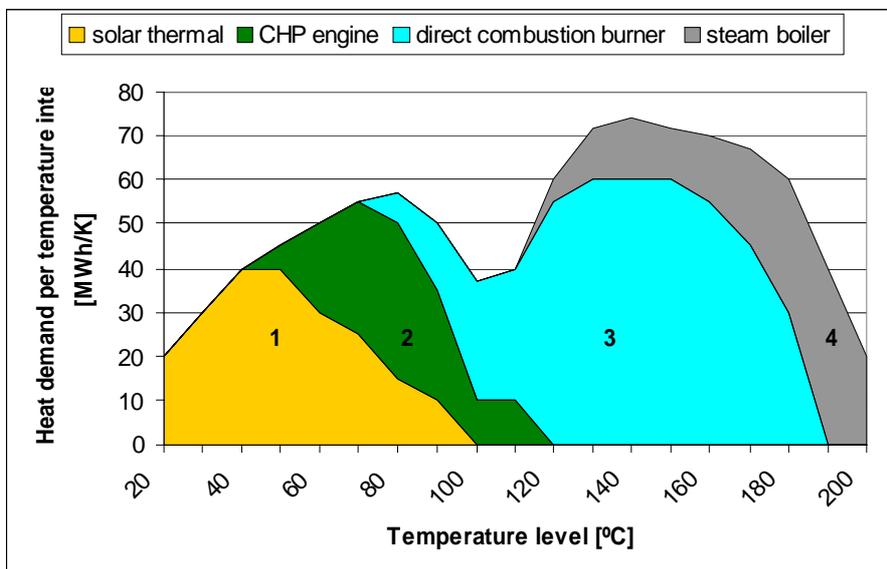


Figura 29: Ejemplo: contribución a la demanda total de calor a diferentes niveles de temperatura por parte de una cascada de suministro de calor formada por diferentes tipos de equipos.

3.7.4.1 Acumulación del calor y del frío

La mayoría de las tecnologías eficientes de suministro de energía (calor y frío), como son la cogeneración, las bombas de calor y las energías renovables, que se describirán en los apartados siguientes, se diferencian de las tecnologías estándar de hoy en día por los siguientes aspectos:

- × Consumen menos energía, lo que se traduce en menores costes de explotación
- × El coste de la inversión inicial suele ser mayor

Aunque la inversión inicial es fija (depende sólo del tipo de equipos), el ahorro energético aumenta a medida que aumentan las horas anuales de funcionamiento de los equipos. Eso significa que la viabilidad económica de estas tecnologías depende mucho del grado de continuidad del funcionamiento (número de horas de funcionamiento).

Por lo tanto, estos equipos deberían utilizarse normalmente para las aplicaciones que constituyen la carga básica, mientras que los picos de carga se pueden cubrir de una manera más rentable con tecnologías más baratas pero energéticamente menos eficientes.

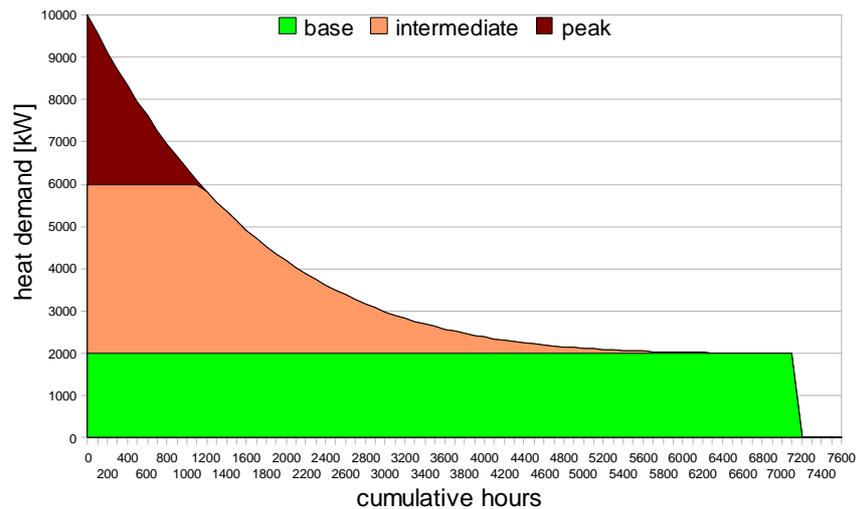


Figura 30: Dimensionamiento de los equipos para la carga básica, media y máxima

En muchos casos, pueden utilizarse acumuladores de calor y frío para reducir los picos de carga e incrementar la fracción de carga básica, permitiendo así, que una mayor proporción de la demanda total quede cubierta con equipos de suministro eficientes.

Por lo tanto, un sistema optimizado de acumulación de calor y frío no es una tecnología independiente, sino que forma parte de las opciones de suministro de frío o calor (HC) eficiente de energía térmica.

Los sistemas más importantes de acumulación térmica (calor y frío) son:

- × la acumulación de agua caliente/fría (almacenamiento de calor sensible; en depósitos a presión, con temperaturas de 150°C o más)
- × la acumulación térmica latente en depósitos de vapor saturado
- × la acumulación de aceite térmico
- × acumuladores sólidos (cerámica, lechos de piedra, etc.)
- × Almacenamiento de calor latente con diversos materiales de cambio de fase (almacenamiento PCM)
- × almacenamiento de hielo y acumulación del frío latente en otros PCM
- × Almacenamiento termo-químico

3.7.4.2 Distribución térmica eficiente

En muchos casos, un cambio en la distribución térmica puede ayudar a reducir el consumo de energía. Deberían estudiarse algunas de las siguientes posibilidades:

- × *reducción del nivel de temperatura*: una disminución del nivel de temperatura en los sistemas de distribución puede ayudar a reducir las pérdidas en conducciones y acumuladores y a aumentar así la

eficiencia de conversión en los equipos de suministro (calderas, etc.). También puede ser necesario reducir el nivel de temperatura para aplicar tecnologías eficientes (p. ej., motores de cogeneración, bombas de calor, energía termosolar).

- × *combustión directa*: en algunos casos (p. ej., procesos de secado, calefacción de baños), la combustión directa o el uso directo de gases de escape (p. ej., los procedentes de las turbinas de gas) puede hacer aumentar la eficiencia del sistema: por un lado, eliminando las pérdidas en la distribución y, por otro, (p. ej., en la calefacción de baños) utilizando el calor de condensación del vapor de agua contenido en los gases de escape. Normalmente, la combustión directa y el uso directo de gases de escape sólo son factibles con combustibles limpios, como el gas natural o el biogás.

3.7.4.3 Generación combinada de calor, frío y electricidad (cogeneración)

En la actualidad, la cogeneración es la manera más eficiente de generar electricidad (excepto la producida a partir de las energías renovables), ya que optimiza la conversión del combustible en energía al producir tanto calor como electricidad, en lugar de sólo calor o sólo electricidad. En términos termodinámicos, no hay nada más eficiente que un sistema de cogeneración, ya que, para cualquier cantidad de combustible dada (ya sea gas natural o biomasa, o cualquier combustible líquido), los sistemas de generación combinada producirán calor y electricidad con unas pérdidas mínimas (normalmente del 10 al 25%). En cambio, un sistema típico que genere sólo electricidad puede llegar a sufrir unas pérdidas del 45% o más.

Para maximizar el ahorro de energía, una instalación de cogeneración debe diseñarse para cubrir la carga de calor de la planta industrial donde está situada. Así, el sistema de generación combinada de calor y electricidad estará optimizado. Cualquier excedente de electricidad se puede enviar a la red eléctrica pública, normalmente a cambio de una prima en la tarifa o algún certificado (hay que tener en cuenta que la legislación de algunos países exige un porcentaje mínimo de consumo propio de electricidad). Desde el punto de vista de la eficiencia, hay que evitar utilizar las plantas de cogeneración para producir sólo electricidad y disipar el *exceso de calor* a la atmósfera, a menos que la eficiencia eléctrica de la planta sea mayor que la eficiencia media de conversión de la red eléctrica de referencia.

Hay muchas formas de calcular el ahorro de energía primaria que se consigue con las instalaciones de cogeneración: se pueden comparar las cantidades de energía ahorrada cotejando la producción que se obtendría con el mismo combustible pero para generar calor y electricidad por separado (por ejemplo, biomasa sólida si el sistema de cogeneración funciona con biomasa sólida), o también se pueden usar los promedios de la red eléctrica (por ejemplo, el parque de generación nacional o de la UCPTE) para hacer los cálculos. Dado que la cogeneración permite producir calor y electricidad al mismo tiempo, el ahorro de energía puede atribuirse tanto al calor producido como a la electricidad generada, o en cierta proporción a ambos. Actualmente, en Europa, encontramos dos enfoques principales:

- × el de la Directiva 2004/8/CE sobre cogeneración, que compara los sistemas de cogeneración con la producción de calor y electricidad por separado (basándose en las eficiencias de referencia para la producción por separado). Este enfoque es “simétrico” en calor y electricidad.
- × el del “*rendimiento eléctrico equivalente*”, utilizado en países como España y Portugal, según el cual se resta la cantidad de energía que sería necesaria para producir el calor en un sistema convencional de la entrada total de combustible y, a continuación, se calcula un rendimiento eléctrico teórico (que puede ser muy alto, normalmente bastante superior al 60 %).

Como, en EINSTEIN, lo que más nos interesa es el suministro de energía *térmica* y, como ya se ha dicho, el funcionamiento óptimo de las plantas de cogeneración debería regirse por la demanda de energía *térmica propia*, nos centraremos en el consumo neto específico de energía primaria por unidad de calor producida mediante cogeneración, que se calcula con la siguiente fórmula:

$$\frac{\Delta E_{PE}}{\Delta Q} = \frac{f_{PE}}{\eta_{th}^{CHP}} \left(1 - \frac{\eta_{el}^{CHP}}{\eta_{el}^{grid}} \right) \quad (3.2)$$

El consumo neto específico de energía primaria puede llegar incluso a ser negativo si la eficiencia eléctrica de la planta de cogeneración es mayor que el rendimiento eléctrico promedio de las centrales eléctricas de la red pública.

Sin embargo, a medio plazo, esta situación cambia, ya que la eficiencia de la red eléctrica va aumentando (gracias al aumento de la eficiencia de las centrales y, esperamos, al aumento de la fracción de electricidad generada a partir de energías renovables). Comparado con el ahorro que se conseguiría con una red eléctrica más eficiente, el ahorro relativo asociado a la cogeneración se hace cada vez menor.

Al igual que ocurre con la mayoría de los equipos eficientes, el uso económico de un sistema de cogeneración exige muchas horas de funcionamiento (normalmente más de 4000 h/a). Por lo tanto, la cogeneración tiene que diseñarse para cubrir la carga básica o en combinación con un sistema de acumulación de calor o frío.

Aparte de la demanda de calor, también se puede cubrir mediante cogeneración la demanda de frío (también llamada trigeneración combinada de calor, frío y energía - CCHP) en combinación con refrigeradores térmicos (p. ej., refrigeradores de absorción o adsorción) que conviertan el calor en frío. Los refrigeradores térmicos normalmente necesitan una entrada de calor a un nivel de temperatura entre 80 y 180 °C, según la tecnología.

La elección de la tecnología más adecuada para la cogeneración depende de la magnitud, la continuidad y el nivel de temperatura de la demanda de calor.

Tabla 13. Tecnologías de cogeneración disponibles

Tecnología de cogeneración	Nivel de temperatura	Eficiencia (eléc./térmica)
Motor de gas o fuelóleo	< 95°C (agua de refrigeración) < 400°C (gases de escape)	(40 % / 45 %)
Turbina de gas	< 400°C	(30 % / 60 %)
Turbina de vapor	< 250°C (límite práctico; dependiendo de la contrapresión)	(20 – 30 % / 65 %)
Ciclo combinado (turbina de gas + generador de vapor con recuperación de calor + turbina de vapor)	< 250°C (límite práctico; dependiendo de la contrapresión en la turbina de vapor)	(50 - 55 % / 35 - 40%)
Turbina ORC (Ciclo Orgánico de Rankine)	< 250°C	(27- 50% / 30-55 %)
Motor Stirling	< 90°C	(10-25 % / 60 – 80 %)
Pila de combustible	< 80°C (membrana de intercambio de protones) < 400°C (pila de combustible de óxido sólido)	(45-60 % / 30 – 50 %)

Bibliografía adicional:

OPET: Proyecto de cogeneración y calefacción urbana. <http://www.opet-chp.net/>

COGENchallenge: Campaña europea de información sobre la cogeneración a pequeña escala. www.cogen-challenge.org

COM 2004/8/CE: Directiva relativa al fomento de la cogeneración sobre la base de la demanda de calor útil en el mercado interior de la energía. <http://www.managenergy.net/products/R81.htm>

Department for Environment, Food and Rural Affairs (Reino Unido): Action in the UK - Combined heat and power (Action in the UK-Cogeneración) <http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/uk/energy/chp/index.htm>

American Council for an Energy Efficient Economy (Estados Unidos): CHP – Capturing wasted Energy (Cogeneración-Recuperación y aprovechamiento de la energía residual) www.aceee.org/pubs/ie983.htm

3.7.4.4 Bombas de calor

Las bombas de calor se utilizan para aumentar la temperatura de algunas fuentes de calor residual (o del calor extraído del aire o el suelo) a un nivel lo bastante alto como para que pueda utilizarse en el sistema de suministro de calor.

Las bombas de calor pueden tener tamaños y diseños muy diversos, pero las más utilizadas en aplicaciones industriales son las siguientes:

- * bombas de calor *por compresión mecánica de vapor*, que normalmente utilizan la energía eléctrica como fuerza motriz
- * bombas de calor por absorción, que utilizan energía térmica en forma de agua caliente o vapor
- * bombas de chorro de vapor, que utilizan el vapor como fuerza motriz

Las aplicaciones industriales típicas son el calentamiento y refrigeración de agua para procesos, procesos de secado, calefacción de espacios, procesos de evaporación y destilación, y recuperación del calor residual.

Los puntos más importantes que hay que tener en cuenta en cuanto a la aplicación de las bombas de calor son los siguientes:

- * *La temperatura del calor producido* Depende del tipo de bomba y del fluido de trabajo, pero suele estar entre 55 y 120 °C. Algunas aplicaciones de compresión que utilizan agua como refrigerante pueden utilizarse a temperaturas más altas, normalmente entre 80 y 150 °C. En plantas de pruebas se han alcanzado temperaturas de 300 °C.
- * *El salto térmico*. El coeficiente de actuación de las bombas de calor depende en gran medida del salto térmico, es decir, la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el calor producido. Cuanto menor es el salto térmico, mayor es el rendimiento. Normalmente, el salto térmico oscila entre 20 K y 40 K en la mayoría de las aplicaciones.
- * *Horas de funcionamiento*. Las bombas de calor, al igual que otras tecnologías eficientes, permiten ahorrar energía y reducir los costes de explotación, pero requieren una importante inversión inicial. Por lo tanto, su aplicación es más recomendable en aquellos casos en que la demanda de calor sea continua y garantice unos factores de utilización mayores.
- * *Temperatura pinch*. La temperatura pinch (véase el apartado 2.5) divide la demanda total de calor en dos partes: a temperaturas por encima del punto de pinch, hace falta una aportación externa de calor, mientras que a las temperaturas que están por debajo, se produce un excedente de calor (o calor residual). Para conseguir un rendimiento óptimo, la bomba de calor tiene que situarse cruzando el pinch, es decir, utilizar calor a una temperatura por debajo del pinch (donde hay un excedente que se puede utilizar) y liberar calor a una temperatura por encima del pinch donde se requiera una aportación externa de calor.
- * *Forma de las curvas de suministro y de demanda de calor*. Las bombas de calor pueden ser una buena opción si, después de recuperar el calor, queda un solapamiento entre la demanda total de calor y el calor residual disponible, o si la diferencia de temperatura (el salto térmico) es lo bastante pequeña.

Más información sobre el tema:

La web del IEA Heat Pump Centre: (www.heatpumpcentre.org.) ofrece información sobre bombas de calor y distribuidores de estos aparatos

3.7.4.5 Energía termosolar

Acoplar el sistema termosolar a los procesos

Los sistemas de calefacción basados en el vapor o el agua caliente procedentes de calderas suelen diseñarse para temperaturas mucho más altas (150 - 180 °C) que las que se utilizan en los procesos (100 °C o menos). En cambio, un sistema termosolar tiene que estar siempre acoplado al sistema de suministro de calor a la menor temperatura posible. Sin embargo, el calor solar debería suministrarse solo después de que se haya efectuado un precalentamiento mediante calor residual. De hecho, la combinación de ambos sistemas ofrece mejores resultados que un sistema termosolar a menor temperatura pero sin

recuperación del calor. El sistema termosolar puede combinarse con el sistema convencional de suministro de calor de varias maneras, incluido el acoplamiento directo a un proceso específico, el precalentamiento de agua y la generación de vapor en el sistema central.

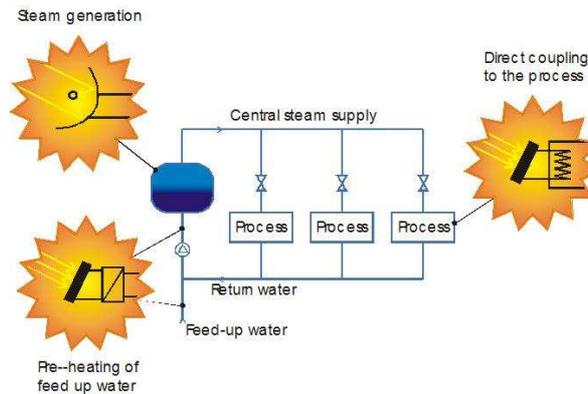


Figura 31. Acoplamiento del sistema termosolar con el sistema convencional de suministro de calor [Schweiger et al., 1999]

Siempre que sea posible, se recomienda *acoplar directamente* los sistemas termosolares a uno o varios procesos, ya que las temperaturas de trabajo son más bajas. El acoplamiento directo puede realizarse básicamente de dos maneras:

- * *Precalentando un fluido circulante* (p. ej. agua de entrada, retorno de los circuitos cerrados, precalentamiento del aire, etc.). En general, en esta aplicación, la temperatura media de funcionamiento del sistema termosolar es menor que la temperatura final que necesita el proceso. Si la circulación no es continua, también se puede estudiar la posibilidad de utilizar un acumulador.
- * *Calentando los baños, depósitos o cámaras calientes* (p. ej. en el secado). Se necesita energía térmica para calentar el fluido a la temperatura de puesta en marcha y también para mantener constante la temperatura del proceso. Los intercambiadores de calor integrados en los depósitos y recipientes de un proceso suelen estar diseñados para funcionar a temperaturas demasiado altas para un sistema termosolar. Cuando no se puede modificar la maquinaria por limitaciones técnicas, puede utilizarse un intercambiador de calor externo acoplado a una bomba de circulación. Si los baños de un proceso están bien aislados, pueden utilizarse para acumular el calor solar. Por ejemplo, mantener la temperatura del sistema termosolar durante las paradas del proceso (habitualmente durante el fin de semana) a través del sistema termosolar, puede reducir la demanda de calor para la siguiente puesta en marcha.

La unidad operativa más adecuada para la integración de un sistema termosolar es: limpieza, secado, evaporación y destilación, blanqueo, pasteurización, esterilización, cocción, pintura, desengrase y refrigeración. Además de los procesos de fabricación, debería incluirse la calefacción y refrigeración de los espacios de las fábricas entre las aplicaciones que requieren energía a niveles de temperatura bajos y medios. Además, los sistemas termosolares también pueden conectarse térmicamente a enfriadores accionados térmicamente (refrigeración solar).

El *acoplamiento de un sistema termosolar a las calderas* también es viable prácticamente en todas las industrias. Esto puede hacerse precalentando el agua de entrada de las calderas de vapor o mediante un generador de vapor solar. En el primer caso, el calor solar puede utilizarse tanto para precalentar el agua corriente a baja temperatura (si no hay otra opción viable de recuperación del calor) como para aumentar más la temperatura de los condensados. La generación de vapor solar es viable únicamente en las plantas que disponen de suficiente insolación o que utilizan concentradores solares.

Captadores solares para producir calor para procesos

El rendimiento instantáneo (η) de un captador solar se define según la siguiente fórmula:

$$\eta = c_0 - (c_1 + c_2 \Delta T) * \frac{\Delta T}{G_T} \quad (3.3)$$

donde c_0 es el rendimiento óptico, c_1 , c_2 son los coeficientes lineal y cuadrático de pérdida de calor (c_1 [W/K m^2]; c_2 [W/K² m^2]), ΔT [K] es la diferencia entre la temperatura media del vector termosolar y la temperatura ambiente, y G_T [W/ m^2] es la cantidad de radiación solar que incide en el captador.

Basándonos en esta definición, se puede deducir fácilmente que el rendimiento depende mucho del lugar (es decir, de la insolación) y de la temperatura de funcionamiento, debido a las pérdidas térmicas que se producen en el captador y en las conducciones.

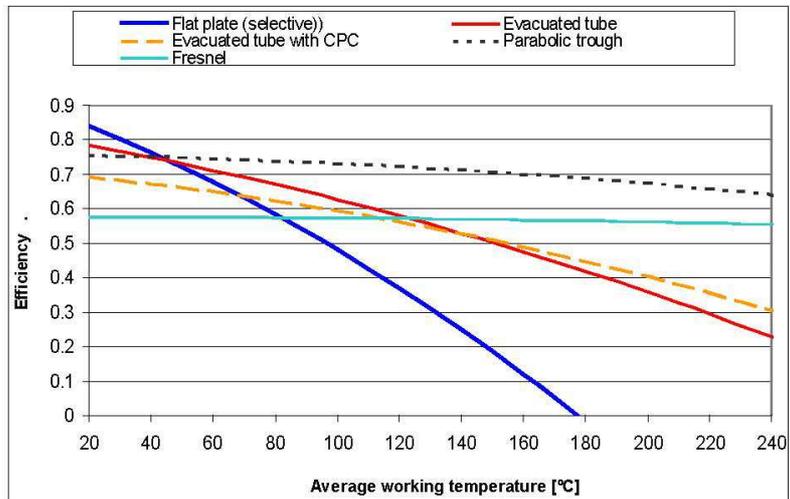


Figura 32: Rendimiento instantáneo de diferentes tipos de captadores solares (referido al área de apertura, radiación del haz con incidencia normal, $G_t = 1000 \text{ W/m}^2$) [EnergyXperts, 2010].

Actualmente, para temperaturas de proceso bajas (hasta 80°C), la opción más viable son los captadores planos (con o sin absorbedores selectivos). Otros tipos de captadores, utilizados principalmente a temperaturas mayores (de hasta 250°C), son los siguientes: captadores planos de alto rendimiento (p. ej. con doble cristal antirreflectante), captadores de tubos de vacío, captadores estáticos cilíndrico-parabólicos compuestos de baja concentración, minicaptadores cilíndrico-parabólicos y reflectores lineales de Fresnel. Además de estos, se están desarrollando otras tecnologías de concentración, como son los captadores con reflectores estáticos.

Dimensionamiento de la planta termosolar

En general hay una relación opuesta entre la fracción solar (es decir, la contribución solar a la demanda de calor total) y el rendimiento térmico solar específico del sistema (calor solar generado por potencia térmica instalada, o por área unitaria de captadores solares). Por lo tanto, a la hora de dimensionar una planta térmica solar hay que hallar un óptimo tecnoeconómico. Como regla empírica, aumentando la fracción solar el rendimiento energético específico disminuye debido a la mayor temperatura de funcionamiento de los captadores solares y debido a la mayor frecuencia de situaciones (especialmente en verano) en las que la disponibilidad de energía solar excede de la demanda.

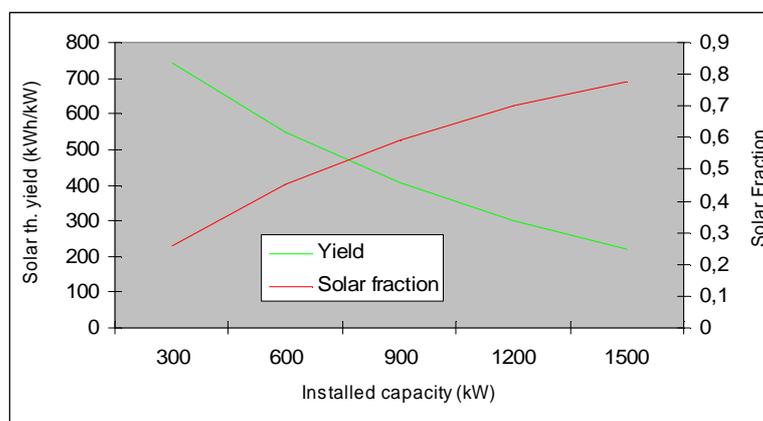


Figura 33. Fracción solar y rendimiento de la energía termosolar en plantas de diferentes dimensiones

Perfil de carga y acumulación del calor solar

Cuando la demanda de calor del proceso es continua durante el día y durante la semana (no se para la producción el fin de semana), la planta termosolar no necesita acumulación del calor y el calor solar puede suministrarse directamente al usuario final (proceso o sistema de suministro de calor). Ésta es la situación más ventajosa, ya que cuanto más simple sea el diseño de un sistema, mayor será el rendimiento energético global y menor será la inversión necesaria.

En los casos en que la carga es continua a lo largo de la semana, pero hay importantes fluctuaciones en lo que se refiere a la demanda diaria, se recomienda acumular entre 30 y 120 l/kW del calor de los captadores. Si el perfil de carga presenta interrupciones significativas (p. ej. durante el fin de semana), entonces la acumulación recomendada sería de 120 - 200 l/kW. No merece la pena plantearse la acumulación para períodos más prolongados (acumulación estacional) salvo en sistemas de gran envergadura (> 3.000 kW).

Conclusiones

A la hora de evaluar la viabilidad de una planta termosolar para procesos, no olvide los siguientes puntos:

- × Las temperaturas del proceso.
- × El perfil de carga (por lotes, continuo).
- × La disponibilidad de los acumuladores de calor intrínseco de proceso.
- × Las posibilidades de acoplar el sistema de energía solar a los equipos industriales existentes (p. ej., intercambiadores de calor, maquinaria, etc.) y de conectarlo a los sistemas convencionales de suministro de calor.
- × El potencial de recuperación del calor.
- × La superficie disponible en cubiertas y suelos para albergar la instalación (se pueden ayudar de imágenes de satélite).

En relación con esto último, la experiencia nos enseña que la superficie disponible para la instalación en las plantas industriales es uno de los principales factores que limitan la viabilidad de las plantas termosolares a gran escala. Por tanto, no olvide averiguar qué espacios son potencialmente utilizables para la instalación.

Tabla 14. Criterios de diseño para plantas termosolares de uso industrial.

Criterio	Influencia de los sistemas termosolares en el rendimiento energético y económico
Temperatura de funcionamiento	Temperaturas de funcionamiento no superiores a 200 °C, mejor rendimiento por debajo de 100 °C.
Clima	Muy favorable en los países del sur y el centro de Europa.
Continuidad de la demanda Variación anual Variación diaria	Las paradas en verano reducen el rendimiento del sistema. Las pérdidas en la ganancia solar son más que proporcionales a la duración de la parada. La demanda continua y la demanda con picos durante las horas de sol son favorables. Las interrupciones breves (algunas horas) pueden compensarse mediante acumuladores de poco volumen sin que el coste del sistema aumente demasiado.
Dimensiones del sistema	El rendimiento económico de los sistemas termosolares depende mucho del tamaño del sistema. Los costes de la energía solar son hasta un 50% más bajos en los sistemas grandes que en los sistemas pequeños.
Rendimiento energético anual	El rendimiento energético anual de un sistema termosolar debería ser de, al menos, 600 kWh/kW para ser rentable económicamente.
Fracción solar	Los sistemas deberían diseñarse para fracciones solares no superiores a un 60 % (para demanda continua).
Superficie disponible en cubiertas y suelos	Debe haber superficie disponible en cubiertas o suelos para conseguir fracciones solares del 5 al 60 %. Una orientación hacia el sur con una inclinación de aproximadamente -10° de latitud es el valor óptimo para maximizar la producción anual de energía. Se pueden tolerar pequeñas desviaciones de estos valores ($\pm 45^\circ$ respecto de la orientación al sur, $\pm 15^\circ$ de la inclinación óptima). Deben evitarse las conducciones demasiado largas.
Estructura de las cubiertas	La necesidad de reforzar las estructuras de los tejados hace aumentar el coste del sistema y, por lo tanto, reduce el rendimiento económico. La carga estática adicional de los captadores solares es de 25 - 30 kg/m ² para los captadores estándar.
Recuperación del calor residual	Lo primero que hay que estudiar son las posibilidades de mejorar la eficiencia energética mediante la recuperación del calor residual. Los sistemas termosolares deben diseñarse de manera que cubran (parte de) la demanda de calor restante.

Referencias sobre las tecnologías termosolares para la producción de calor para procesos:

C.Vannoni, R. Battisti, S. Drigo (2008): *Potential for Solar Heat in Industrial Processes*. Published by CIEMAT, Madrid (Spain) 2008. Website: www.iea-shc.org/task33/index.html

D. Jaehnig, W.Weiss (2007): Design Guidelines – Solar space heating of factory buildings. With underfloor heating systems. Published by AEE INTEC with financial support of the Austrian Ministry for Transport, Innovation and Technology, Gleisdorf (Austria) 2007. Website: www.iea-shc.org/task33/index.html

EnergyXperts.NET (2010): Elaboration based on manufacturer data for group of best market available solar collectors in Spain.

ESTIF (2008): Solar Thermal Action Plan for Europe (STAP). ESTIF Website: www.estif.org/281.0.html

H.Schweiger et al. (2001), POSHIP (Project No. NNE5-1999-0308): *The Potential of Solar Heat for Industrial Processes*, Final Report. Available for download at www.energyxperts.net/docs/POSHIP_FinalReport.zip

W. Weiss, M. Rommel (eds., 2007): *Process heat collectors*. State of the art within Task 33/IV, Editors, Published by AEE INTEC with financial support of the Austrian Ministry for Transport, Innovation and Technology, Gleisdorf (Austria) 2007. Website: www.iea-shc.org/task33/index.html

3.7.4.6 Biomasa y biogás

Tanto la biomasa como el biogás son fuentes de energía renovables capaces de abastecer gran parte del proceso industrial. La biomasa utilizada en los quemadores industriales está compuesta por aserrín y pellets de madera. También se usa la paja, pero requiere equipos técnicos más sofisticados. Se puede utilizar cualquier otro residuo biogénico obtenido en el proceso de producción; sin embargo, su uso dependerá en gran medida del poder calorífico que se pueda conseguir, y éste dependerá a su vez del contenido de agua y de la eficiencia del proceso de secado de la biomasa.

En general, los quemadores de biomasa para aplicaciones de agua caliente y supercaliente son la tecnología punta. Las calderas de vapor que funcionan con biomasa no se han probado tan ampliamente, pero también han dado muy buenos resultados en los últimos años.

La fermentación de los residuos biogénicos para producir biogás abre un abanico de nuevas posibilidades de uso. Una de sus principales ventajas es que, en el caso del biogás, no es necesario secar la biomasa antes de la combustión. De este modo, la eficiencia depende del proceso de conversión, de la producción de metano en la fase gaseosa y de que se limpie el biogás (especialmente importante para el uso en motores). Además de para la generación de calor, el biogás puede usarse también en diferentes tecnologías tales como CHP de caldera de gas (o gas-sólido combinado), turbina de gas y células de combustible.

Detalles sobre el biogás

El biogás es una mezcla de metano, CO₂, H₂S, agua y trazas de otros gases que se producen en condiciones anaeróbicas y tras la acción de los microorganismos en la materia orgánica. El proceso de producción de biogás es complejo y sigue varios pasos de fermentación. La calidad del producto depende del tipo de materia prima, del microorganismo que se utiliza, de los parámetros del proceso (como las temperaturas o el pH) y del tratamiento del biogás que se produce.

En las plantas de biogás más modernas se combinan varias materias primas (cofermentación). Es decir, se fermentan los fertilizantes orgánicos, como los purines, junto con otras materias primas y residuales de origen biológico. Para las aplicaciones industriales, el uso de estos materiales adicionales tiene un gran potencial ya que facilita la producción de biogás in situ, con lo que se reduce la dependencia del suministro externo de energía. La tabla 15 muestra una lista de distintos tipos de materias primas procedentes de diversas fuentes:

Tabla 15: Materias primas para biogás procedentes de distintas fuentes

Agriculture industry	Slaughter houses	Industry (e.g. food)	Canteen kitchen	commune
<ul style="list-style-type: none"> •Residues of harvesting •Energy plants •Liquid manure •Solid and liquid dung 	<ul style="list-style-type: none"> •Slaughter house waste water (grease...) •Slaughter house solid waste (bowels) 	<ul style="list-style-type: none"> •mash •Brewer grains •yeast •Fruit pulp 	<ul style="list-style-type: none"> •Food residues •Kitchen waste •Waste grease 	<ul style="list-style-type: none"> •grass •Biogenic waste •Sewage sludge

Tabla 16: Tecnologías de pretratamiento del biogás

Pre-treatment	examples
Mechanical/physical	Milling, chaffing, ultra sonic
chemical	Acids, base, wet oxidation
Bio-technological	Enzymes, fungi,
Thermal	Steam explosion, thermal pressure hydrolysis

Tabla 17: Composición del biogás en función del tipo de materia prima

components	Wood gas		Sewage gas	landfill gas	biogas	Biogas av.
	air	steam				
CH ₄	3 – 6 %	9 – 11 %	60 – 75 %	45 – 55 %	50 – 75 %	55 %
CO ₂	12 – 16 %	20 – 25 %	30 – 40 %	30 – 40 %	25 – 45 %	43,9 %
H ₂ S			< 1 %	50 – 300 ppm	0 – 1 %	0,05 %
H ₂ O			saturated	saturated	saturated	saturated
H ₂	11 – 16 %	33 – 40 %	traces		0 – 1 %	0,5 %
O ₂			< 1 %		0 – 1 %	0,1 %
N ₂	45 – 60 %	< 3 %	< 4 %	5 – 15 %	0 – 3 %	0,4 %
NH ₃					0 – 0,5 %	0,05 %
CO	13 – 18 %	25 – 30 %	traces		-	-
Heating value [kWh/m³]	1,1 – 1,7	3,3 – 4,2	6 – 7,5	4,5 – 5,5	5 – 7,5	5,5

* Vol% on dry gas

Cada tecnología de proceso tiene unos requisitos que influyen en la calidad y la cantidad del producto. De este modo, algunas requieren procesos de fermentación de un paso y otras de dos pasos; unas, condiciones mesófilas y otras, termófilas; y unas, fermentaciones secas y otras, húmedas. El pretratamiento de la materia prima influye mucho en la producción de biogás, especialmente cuando se trata de materiales celulósicos y hemicelulósicos. En la tabla 16 se muestran las tecnologías de pretratamiento más modernas.

Además de para la generación de calor, el biogás puede usarse también en diferentes tecnologías tales como CHP de caldera de gas (o gas-sólido combinado), turbina de gas y células de combustible. Además de para la generación de calor, el biogás puede usarse también en diferentes tecnologías tales como CHP de caldera de gas (o gas-sólido combinado), turbina de gas y células de combustible. En la mayoría de los casos el biogás tiene que ser acondicionado. Principalmente la eliminación de CO₂, H₂S y H₂O hace subir el valor de calentamiento del biogás haciéndolo aplicable por tanto a diferentes áreas. El gas natural tiene un valor de calentamiento medio de alrededor de 10 kWh/m³ mientras que el biogás tiene típicamente un valor de calentamiento de aproximadamente 6 kWh/m³. Esto significa que para la producción de la misma cantidad de energía (se supone una eficiencia de conversión equivalente de los equipos) hace falta 1,7 veces más biogás que gas natural.

Más información sobre el tema:

Ross, Charles C.; T. J. Drake (1996): *Handbook of Biogas Utilization, Vol. III*, (segunda Edición); Environmental Treatment Systems, Inc. July 1996

3.7.4.7 Calderas y quemadores eficientes

Para evaluar el rendimiento total de una caldera, es recomendable comprobar los datos siguientes cuando se realiza la auditoría energética in situ: año de instalación; datos técnicos (fabricante, potencia nominal, etc.); estado del aislamiento; posibles fugas; estrategia de control de la caldera.

Son varias las medidas que pueden adoptarse para reducir el consumo de energía de un sistema de generación de calor nuevo o ya existente (p. ej. calderas, calderas de vapor, calderas de condensación, etc.). En particular, deberían tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- × El uso de la electricidad para suministrar calor en procesos es muy poco eficiente. La eficiencia de conversión de energía primaria en electricidad utilizada en el proceso (incluidas las pérdidas durante la distribución) es de aproximadamente el 30 %, en comparación con un porcentaje de más del 90 % de los quemadores y calderas de gas más eficientes.
- × La eficiencia de conversión de las calderas de agua caliente es superior al de las calderas de vapor, y para temperaturas bajas incluso pueden usarse calderas de condensación. Además, también se reducen las pérdidas térmicas en la distribución. Asimismo, un circuito de agua caliente permite utilizar otras tecnologías eficientes como la cogeneración, las bombas de calor y la energía termosolar.
- × Si el nivel de presión de vapor disminuye (así como el de la temperatura) se reducen las pérdidas térmicas y los costes.
- × El uso de gas natural o GLP permite la aplicación de tecnologías eficientes, como las calderas de condensación, la combustión directa, etc.
- × La eficiencia de una caldera disminuye rápidamente cuando funciona a una carga inferior al 30%; por lo tanto, sería recomendable instalar dos o más calderas en cascada para satisfacer la demanda total de calor. Hay que evitar sobredimensionar las calderas. En particular, se recomienda el uso de calderas más eficientes para cubrir la carga básica, mientras que las menos eficientes deberían usarse solamente para cubrir los picos de demanda.
- × Optimizar el control puede ayudar a aumentar la eficiencia.
- × Si las calderas u hornos se paran regularmente debido a cambios en la carga, se puede reducir la pérdida de calor causada por el efecto chimenea, que arrastra el aire frío a través de la caldera, mediante el uso de reguladores de tiro.
- × Los principales factores que repercuten en la eficiencia son las pérdidas a través de los gases de combustión y el calor irradiado. Si se disminuye la temperatura de los gases de combustión y se aísla la caldera, la eficiencia aumentará. Reducir el exceso de aire también ayuda a reducir las pérdidas a través de los gases de combustión y, consecuentemente, a mejorar la eficiencia de la caldera.
- × El retorno de los condensados a la caldera de vapor permite recuperar la energía que contienen (hasta el 15 % de la energía necesaria para generar vapor).
- × Para minimizar el calor residual en la purga de agua, se tiene que reducir la corriente de la purga (con un tratamiento preliminar del agua de entrada) y recuperar su calor. Asimismo, el agua de entrada tratada reduce la acumulación de cal. De este modo, se mantiene un buen intercambio de calor entre el gas de combustión y el fluido que se tiene que calentar.
- × La instalación de un economizador (un intercambiador de calor adicional para precalentar el agua de entrada a la caldera mediante la recuperación del calor residual de los gases de combustión) y de un precalentador de aire (recuperador) aumenta la eficiencia total al recuperar el calor residual de las descargas gaseosas.

Más información sobre el tema:

Instituto de Investigación Energética (Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cape Town). *How to save money and energy in boiler and furnaces systems*. Sitio web: <http://www.3e.uct.ac.za>

Lawrence Berkeley National Laboratory Washington, DC for DOE, *Improving Steam system Performance a sourcebook for industry*. Abril de 2004. Sitio web: <http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/steamsourcebook.pdf>

Integrated Pollution Prevention and Control. Documento de referencia sobre mejores tecnologías disponibles para grandes instalaciones de combustión. Julio de 2006. Sitio web: <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>

Ralph L. Vandagriff. *Practical guide to industrial Boiler systems*. 2001. Marcel Dekker, Inc. Sitio web: www.dekker.com

V. Ganapathy ABCO Industries. *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators Design, Applications, and Calculations*. 2003 Marcel Dekker, Inc. Sitio web: www.dekker.com

3.7.4.8 Generación de frío eficiente

Los refrigeradores industriales se usan para enfriar de forma controlada los productos y la maquinaria de una fábrica, o para obtener frío para el aire acondicionado de las áreas de producción. Hay dos grupos de refrigeradores en función del tipo de ciclo de refrigeración:

- × *Los refrigeradores de compresión de vapor* usan fuerza mecánica y funcionan con motores eléctricos (los más utilizados) o turbinas de gas. En función del tipo de compresor que utilizan, los refrigeradores de compresión de vapor se pueden clasificar en refrigeradores con compresor recíproco, de scroll, helicoidales y centrífugos. El coeficiente de eficiencia energética (EER) de las aplicaciones de refrigeración de compresión del vapor suele ser de 4,0 o más.
- × *Los refrigeradores térmicos* usan energía térmica para funcionar, aportada en forma de vapor, agua caliente o gases de escape de la combustión. Los refrigeradores térmicos más comunes son los *refrigeradores de absorción*. El coeficiente de eficiencia energética (EER) de los refrigeradores de absorción se mueve entre 0,5 – 0,8 (efecto simple) hasta 1,0 – 1,3 (doble efecto)¹³.

Los refrigeradores liberan al exterior la energía absorbida del medio enfriado. Pueden liberar la energía al aire (enfriados por aire) o al agua (enfriados por agua). Los refrigeradores enfriados por agua usan normalmente, torres de refrigeración húmedas. Por eso, son termodinámicamente más eficientes que los refrigeradores enfriados por aire debido a la reducción del nivel de temperatura del rechazo de calor, pero suponen un coste adicional y un mayor consumo de agua.

Factores que hay que tener en cuenta en el diseño y las aplicaciones de los refrigeradores:

- × *Temperatura del suministro de frío*. La eficiencia de conversión en la generación de frío depende mucho de la temperatura de evaporación. Si aumenta la temperatura de evaporación, aumentará la eficiencia energética. En muchas aplicaciones, un refrigerador suministra frío a procesos diferentes. Cuando existen procesos con diferentes niveles de frío, hay que agruparlos en función de la temperatura y suministrar frío a la mayor temperatura posible a cada uno de los grupos. Una temperatura más alta del agua enfriada permitirá también un mayor uso de la refrigeración gratuita (véase más adelante)
- × *Diferencia de temperatura entre evaporación y condensación*. La menor diferencia de temperatura entre la refrigeración producida y el nivel de temperatura de rechazo de calor da lugar a un mayor EER. El diseño apropiado de la torre de refrigeración y del circuito de reenfriamiento puede mejorar la eficiencia. En el caso de que el calor de los enfriadores sea rechazado al medio ambiente, la temperatura de condensación o la temperatura del agua de refrigeración que fluye a través de las torres de refrigeración, secas o húmedas no tiene que permanecer a nivel constante. En cambio, el nivel de temperatura del líquido puede adaptarse en función de la temperatura exterior, con el fin de reducir la diferencia entre la evaporación y la condensación del enfriador.
- × *Funcionamiento con carga parcial reducida, uso de cascadas de equipos*. La mayor parte de los enfriadores sufren normalmente una caída de eficiencia en el funcionamiento con carga parcial. Si las cargas de refrigeración varían de forma acusada, por ejemplo, para el aire acondicionado de un edificio, podría ser de utilidad emplear uno o más enfriadores trabajando a potencia nominal para cubrir la carga básica, y emplear un enfriador (preferiblemente usando un turbocompresor, que tiene un mejor comportamiento con carga parcial) para cubrir la demanda de pico de refrigeración. También se puede reducir el funcionamiento con carga parcial y se pueden aumentar las horas de funcionamiento usando almacenamiento en frío (eliminación de picos de demanda).
- × *Disponibilidad de calor de baja temperatura entre 80 y 90 °C*. En este rango de temperaturas, se puede obtener el calor a partir de la recuperación del calor residual de las plantas de cogeneración (p. ej. motores) o de un sistema termosolar. En estos casos, se debería tener en cuenta la

¹³ Tenga en cuenta que los enfriadores de absorción utilizan energía térmica en lugar de energía eléctrica o mecánica en el caso de enfriadores de compresión de vapor mecánicos. Por lo tanto los valores COP no pueden compararse directamente.

posibilidad de instalar refrigeradores térmicos, especialmente en las aplicaciones a gran escala con factores de uso elevados.

- × *Posibilidad de enfriamiento gratuito.* Los refrigeradores deben incorporarse únicamente en casos en que la temperatura de enfriamiento necesaria no se puede conseguir directamente liberando el calor al exterior. En muchos climas, la temperatura ambiente puede ser inferior a la temperatura de demanda de frío durante períodos de tiempo largos (durante la noche o en invierno). Hay diseños de refrigeradores diferentes que permiten un enfriamiento gratuito, en períodos de temperaturas exteriores bajas, y crean una conexión directa entre el medio que se tiene que enfriar y el aire del exterior. El uso de este tipo de refrigeradores puede redundar en un ahorro de energía considerable. Los procesos que más se benefician de la instalación de refrigeradores de frío gratuito son los que tienen cargas relativamente constantes y funcionan en climas con temperaturas nocturnas e invernales bajas.
- × *Uso de refrigerantes ecológicos y naturales.* Al seleccionar un equipo de compresión de vapor, deberían tenerse en cuenta las implicaciones ambientales que tiene el uso de un refrigerante y respetar los acuerdos internacionales existentes al respecto. Se recomienda usar refrigerantes con un PAO (potencial de agotamiento del ozono) y un PCG (potencial de calentamiento global) bajos, así como refrigerantes naturales, como el amoníaco o el dióxido de carbono que, además, tienen unas propiedades termofísicas excelentes que aseguran una gran eficiencia funcional.
- × *Uso del calor residual del refrigerador.* El calor residual del condensador de los refrigeradores y en ciertos casos de la refrigeración del compresor, que suele disiparse en las torres de refrigeración se puede reutilizar para precalentar fluidos que están a una temperatura baja (hasta aproximadamente 50°C utilizando el refrigerador como una bomba de calor; puede haber saltos térmicos de hasta 40K entre la temperatura del agua refrigerada y la temperatura del condensador). El nivel de temperatura del calor rechazado puede incrementarse aún más usando una bomba de calor adicional.

Más información sobre el tema:

BREF de la UE *Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles para los sistemas de refrigeración industrial.* Diciembre de 2001. Comisión Europea.

ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment. ASHRAE, 2008.

EINSTEIN Paso 7. Diseño conceptual de las opciones de ahorro y definición de los objetivos energéticos preliminares

> Lista de recomendaciones para los posibles ahorro de energía

> Optimización de procesos y posibilidades de la demanda de energía

> Análisis del potencial de recuperación de calor teórico

> Prediseño de la red de intercambiadores y acumuladores de calor

> Prediseño de sistemas de suministro alternativos

3.8 Cálculo del rendimiento energético y análisis medioambiental

Para evaluar el consumo de energía de una propuesta de sistema de suministro de calor y frío, hay que aplicar un modelo de cálculo (simulación). A tal efecto, la herramienta informática EINSTEIN ofrece un módulo de simulación de sistemas, para todas las tecnologías.

3.8.1 Módulo de simulación de sistemas EINSTEIN

El cálculo del rendimiento energético interno en EINSTEIN se basa en el calor y frío demandado por las tuberías y conductos de suministro del sistema y en la salida potencial de los equipos de suministro ordenados en forma de cascada de suministro de calefacción y refrigeración.

La demanda de calor depende de la temperatura y del tiempo según las características del proceso y su horario $\dot{Q}_b = \dot{Q}_b(T, t)$. El potencial nominal de salida P_{nom} de los diferentes equipos de suministro térmico suele depender de los niveles de temperatura del suministro y también, en el caso concreto de las bombas de calor, de la disponibilidad de calor residual $\dot{Q}_A = \dot{Q}_A(T, t)$. El calor útil suministrado por cada equipo en una posición determinada j en la cascada de suministro de calor puede calcularse a partir de la demanda de calor y de la potencia nominal:

$$\dot{Q}_{USH,j}(T, t) = \min[P_{nom}(T), \dot{Q}_{D,j}(T, t)] \quad (3.4)$$

donde

$$\dot{Q}_{D,j} = \dot{Q}_{D,j}(T, t) = \sum_{\text{Tuberías conectadas}} \dot{Q}_{D,m}^{res}(T, t) \quad (3.5)$$

y $\dot{Q}_{D,m}^{res}(T, t)$ es el calor o frío residual demandado por la tuberías ó conducto m , después de que esta parte de la demanda total de calor o frío haya sido cubierta por los equipos 1 a $(j-1)$ que le preceden en la cascada de suministro de calor.

En un sistema de simulación EINSTEIN, los cálculos se realizan, de forma predeterminada, en intervalos de 1 hora para todo el año, teniendo en cuenta la variación de la demanda a lo largo del tiempo y de la temperatura durante las diferentes horas del día, variaciones estacionales, fines de semana y vacaciones.

La principal limitación de esta herramienta de cálculo interno es el modelo utilizado de "cascada de suministro de calefacción y refrigeración": los detalles y peculiaridades de la estrategia de regulación y control del sistema real no se toman en consideración dentro de los cálculos de energía¹⁴ y sólo se puede efectuar una aproximación mediante la ordenación apropiada de los equipos en la cascada.

Si se desea un cálculo más detallado y exacto, puede emplearse un software de simulación externo.

3.8.2 Simulación del sistema mediante un software externo específico

Para aquellos casos en los que el módulo de simulación de sistemas de EINSTEIN no ofrezca unos resultados lo bastante precisos, deberá utilizarse un software de simulación externo. Pueden encontrarse algunas referencias sobre herramientas de simulación en el informe EINSTEIN *Review of thermal energy auditing practices and tools* [Vannoni et al., 2008].

¹⁴ Las pérdidas térmicas sufridas durante la distribución se incorporan sólo de forma aproximada en los cálculos utilizando una distribución global media de la eficiencia.

3.8.3 Análisis medioambiental

Como ya se ha dicho en el capítulo 2.1., EINSTEIN utiliza los siguientes parámetros como principales indicadores para realizar dicha evaluación medioambiental:

- * *Consumo de energía primaria* como principal indicador de la evaluación del impacto ambiental
- * *Generación de Co₂*
- * *Generación de residuos nucleares muy radioactivos (relacionados con el consumo de electricidad)*
- * *Consumo de agua*

La magnitud de los parámetros de impacto ambiental se extrae directamente de la composición del consumo de energía final en la industria que se deriva del análisis del rendimiento energético descrito en los anteriores apartados.

El usuario puede configurar los parámetros de conversión en las bases de datos EINSTEIN para los combustibles y para el *mix* representativo de electricidad que se va a aplicar.

En general, se puede decir que el *consumo de energía primaria* es el parámetro preferible como indicador principal y que debería minimizarse, ya que representa una media (en cierto modo ponderada) de los diferentes tipos de emisiones.

El parámetro de las emisiones de CO₂, a menudo utilizado como indicador medioambiental, pasa por alto otros tipos de emisiones, como los residuos radiactivos, y por lo tanto subestima el impacto ambiental (normalmente negativo) que supone abandonar el uso de combustibles en favor de la electricidad, especialmente en países con un elevado componente nuclear en su producción de electricidad.

Bibliografía del capítulo 3.8.2

C.Vannoni et al. (2008): EINSTEIN Report: Review of Thermal Energy Auditing Practices and Tools.IEE Project EINSTEIN, Project deliverable D2.2. Available for download on www.einstein-energy.net

EINSTEIN Paso 8: Cálculo de rendimiento energético y análisis medioambiental

> **Cálculo rápido**

> **Simulación del sistema mediante un software externo específico**

> **Análisis energético y medioambiental**

3.9 Análisis económico y financiero

Para la propia empresa, el análisis económico de la propuesta de suministro energético es una de las cuestiones más trascendentales. Por lo tanto, debe hacerse hincapié en este paso, ya que, cuanto más detallados sean los datos obtenidos para el análisis, mayor será la fiabilidad de los resultados.

Para realizar el análisis económico de un nuevo sistema de suministro de energía, tienen que compararse los costes de explotación (energía) con los de la maquinaria actual. Por lo tanto, un método adecuado consistiría en calcular todos los costes en que se incurrirá en el futuro con el sistema actual de suministro de calor y frío y compararlos con la inversión prevista y otros costes de la alternativa propuesta. La diferencia de costes nos dará el flujo de efectivo que se espera que se produzca gracias a la sustitución de los equipos de suministro.

En general, deben analizarse las siguientes categorías de costes:

- × Costes de inversión:
 - ofertas de proveedores o uso de equipos de segunda mano
 - subvenciones y financiación
 - ingresos que se pueden obtener por la venta de los equipos antiguos
- × Costes de explotación:
 - costes de la energía, incluido el aumento previsto de los precios
 - mantenimiento, mano de obra, seguros, servicios, etc.
- × Contingencias
 - en el caso de que se decida no cambiar el sistema de suministro actual: desventajas fiscales, costes de reparación, costes derivados del cumplimiento de la legislación, repercusión negativa en la cuota de mercado, efectos del comercio de derechos de emisión de CO₂, etc.
 - si, efectivamente, se decide cambiar el sistema de suministro de energía: ventajas fiscales, influencia positiva en la cuota de mercado, mejora de la imagen corporativa
- × Costes no recurrentes
 - reparación de equipos, sustitución de los captadores, mantenimiento irregular, permisos, costes jurídicos, costes de prevención, etc.

En la valoración convencional de los costes, el análisis se centra en los costes de inversión y en los de explotación. Sin embargo, si se quieren englobar todos los costes reales, hay que tener en cuenta las contingencias y los costes no recurrentes, ya que pueden afectar de manera importante al resultado final. El análisis de los costes debe permitir detectar todos los parámetros que influyen en el rendimiento económico de la eficiencia energética y la instalación de un sistema de suministro de energía en los procesos industriales, aparte de los costes de la energía.

Para llevar a cabo una valoración del coste total (TCA) que abarque un período de tiempo más largo y que tenga en cuenta también los parámetros macroeconómicos, hay que incluir las contingencias y los costes no recurrentes.

Es evidente que los siguientes parámetros son cruciales para el resultado de la valoración de los costes:

- × Tipo de interés nominal de la financiación externa
- × Tipo de descuento específico de la empresa
- × Evolución esperada de los precios de la energía
- × Tasa general de inflación
- × Marco temporal escogido para el análisis económico

El resultado del análisis económico incluye la inversión, el plazo de amortización y la relación coste-beneficio, aunque debería incluir también otros parámetros económicos que muestren el rendimiento económico en un período de tiempo más largo. Aquí es muy importante la tasa interna de rendimiento y el

desarrollo del valor actual neto a lo largo de los años. (Para más detalles sobre el cálculo, véase el apartado 2.6).

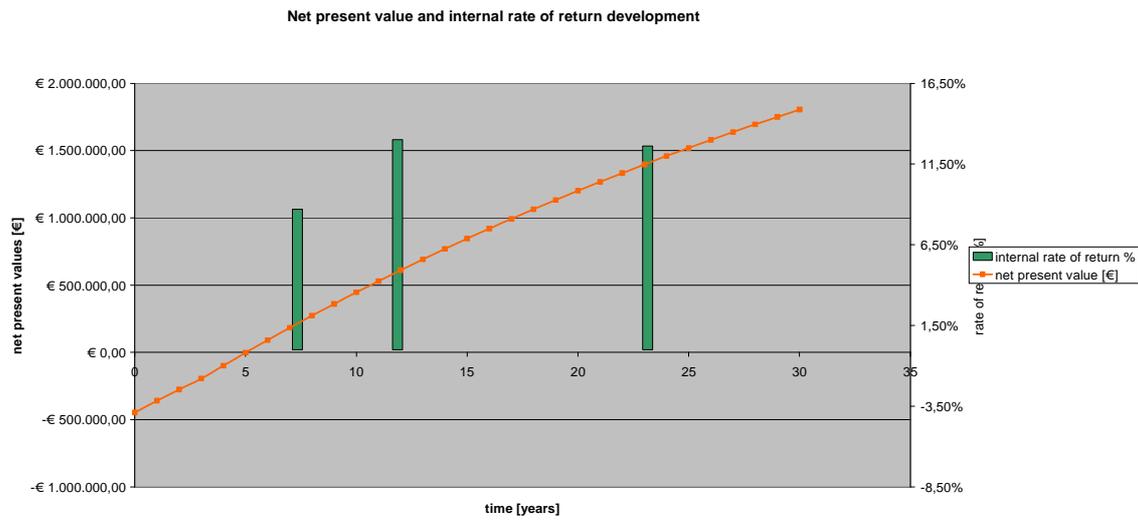


Figura 34: Resultado del análisis económico

EINSTEIN Paso 9. Análisis Económico y financiero

- > Cálculo de los principales parámetros económicos
- > valorar posibilidades de financiación y ayudas
- > Elaboración de un plan apropiado de financiación

3.10 Informes y presentación

3.10.1 Contenido del informe

Una vez concluida la auditoría, hay que redactar un informe, que será el principal documento que se creará durante el proceso.

El informe de la auditoría debería contener, como mínimo, la siguiente información:

- × Un *resumen ejecutivo* en el que se destaquen los principales resultados de la auditoría.
- × Los datos recabados o estimados durante el proceso de auditoría y que se han utilizado como punto de partida para el análisis. Es importante destacar las *estimaciones e hipótesis* del auditor que no estén respaldadas por los datos recabados.
- × El desglose del consumo de energía actual, tal y como se describe en el capítulo xxx, y la comparación con los datos de referencia (benchmarks).
- × Una descripción de las diferentes alternativas analizadas y de sus respectivas características distintivas, subrayando las modificaciones que deberían hacerse en cada caso. Es conveniente asignar un acrónimo breve pero explicativo a cada propuesta alternativa para facilitar su identificación en los gráficos y tablas comparativos.
La descripción de las propuestas alternativas debería ir acompañada de dibujos esquemáticos (cuadros sinópticos y esquemas hidráulicos) que ilustren claramente la posición de los nuevos equipos en el sistema actual.
- × Figuras y tablas comparativas con los principales resultados (energéticos, ambientales y económicos) de cada una de las alternativas estudiadas
- × Un análisis financiero detallado de las soluciones que se propongan finalmente: en algunos casos, resulta conveniente proponer más de una alternativa “ideal” a la empresa y que ellos tomen la decisión final. Además, también debería mencionar la posibilidad de conseguir financiación externa para las inversiones, así como subvenciones y otro tipo de incentivos.
- × Una identificación clara de las posibles dudas tras concluir la auditoría rápida, especialmente si éstas pudieran tener una influencia crucial en la viabilidad de los sistemas propuestos. Destacar los aspectos que deberían analizarse con más detalle antes de tomar una decisión sobre un cambio en el sistema.

La herramienta informática EINSTEIN genera automáticamente un informe estándar de la auditoría que contiene toda esta información. Este informe se genera en forma de una hoja de cálculo (OpenOffice) que se puede editar y modificar para añadir contenido adicional manualmente, etc.

3.10.2 Presentación del informe a la empresa

La presentación del informe a la empresa se hará personalmente, siempre que sea posible. De esta forma podrá explicar sus propuestas, evitar malentendidos y subrayar las ventajas de su propuesta ante quienes toman las decisiones en la empresa.

No obstante, el informe de auditoría EINSTEIN debería ser lo suficientemente claro como para poderlo enviar por correo o e-mail en caso de que no sea posible presentarlo personalmente (p. ej. si la empresa está muy lejos y el presupuesto no permite realizar una segunda visita, etc.).

EINSTEIN Paso 10. Elaboración del informe y presentación a la empresa

> elaboración del informe claro y conciso

> presentación del informe a la empresa

3.11 Conocimiento colectivo

3.11.1 Comparte tu experiencia con la Comunidad

Cada estudio que lleva a cabo es una experiencia con sus propias peculiaridades que debería incorporarse al repertorio de experiencias a las que tanto usted como los demás auditores han de poder tener acceso para próximas auditorías. Este proceso de intercambio de conocimientos puede hacerse de diferentes formas y a diferentes niveles:

- × Compartiendo la información en su empresa, instituto o red. Para futuras auditorías, debe ser posible acceder a la información introducida en la base de datos EINSTEIN y utilizar esos datos como valores de referencia adicionales para industrias similares, como fuente de ideas sobre el tipo de medidas que se pueden proponer, etc.
- × Compartiendo la información con la comunidad de usuarios de EINSTEIN. En las actualizaciones futuras del kit de herramientas EINSTEIN se incorporarán los nuevos proyectos desarrollados por los usuarios. La confidencialidad puede garantizarse haciendo que los datos sean anónimos (la herramienta EINSTEIN ofrece diferentes opciones/niveles de confidencialidad que eliminan automáticamente ciertos datos de los proyectos). Los proyectos se pueden enviar directamente desde la herramienta, a través de la página web de EINSTEIN www.einstein-energy.net , o enviando una copia por e-mail a los desarrolladores de EINSTEIN a la dirección info@energyxperts.net .
- × Usuarios que ayudan a otros usuarios: existe un foro de e-mail para los usuarios de EINSTEIN en el que se pueden intercambiar opiniones pedir ayuda a los participantes o ayudar a quien necesite consejo. Sólo hay que registrarse en el sitio web de la herramienta EINSTEIN: <http://lists.sourceforge.net/lists/listinfo/einstein-users>

3.11.2 Ayúdenos a mejorar la metodología y el software de la herramienta

¡EINSTEIN está cerca de la perfección, pero no del todo! Siempre hay alguna cosa que puede ser mejorada; nuevas informaciones o tecnologías emergentes; aspectos que no se tuvieron en cuenta, en su momento; casos especiales que se salen de las normas EINSTEIN y no pueden ser fielmente representados; etc...

Use la web EINSTEIN (www.einstein.sourceforge.net) para hacernos llegar sus ideas de mejora o aquellos errores que se haya encontrado al manejar la herramienta y que se deberían solucionar.

3.11.3 Conviertase en un promotor de EINSTEIN

La herramienta EINSTEIN se está desarrollando como proyecto de software de código abierto y gratuito. Puede descargar y modificar el código fuente y desarrollar e incluir sus propios módulos.

Cuando el equipo EINSTEIN haya comprobado la calidad y compatibilidad de esos módulos, se incorporarán a la siguiente versión de EINSTEIN.

¿Cómo? Envíe una solicitud para ser desarrollador al equipo de EINSTEIN a través de cualquiera de los canales mencionados anteriormente.

3.12 Seguimiento

3.12.1 De la auditoría a la instalación del nuevo sistema

Tan importante como la auditoría es el seguimiento posterior. El objetivo principal es, lógicamente, convencer a la empresa para que realice la inversión que le propone e instale unos sistemas de suministro de energía más eficientes.

Sin embargo, también se puede aprender de los fracasos: intente averiguar las razones por las que le han rechazado una determinada propuesta que usted consideraba viable tanto energética como económicamente. Si en ese caso concreto la decisión es definitiva, al menos podrá aprovechar lo que haya aprendido a la hora de presentar el próximo estudio.

3.12.2 Rendimiento previsto y real de los nuevos sistemas

Si todo va bien y ha hecho un buen trabajo, la empresa mejorará su sistema de suministro de calor y frío instalando (más o menos) el nuevo sistema que usted les ha propuesto. Puede relajarse, disfrute del éxito y recupere fuerzas para la próxima auditoría.

Pero ante todo tiene que realizar un seguimiento y acumular toda la experiencia práctica que pueda, al menos durante varios años tras la implantación del nuevo sistema, porque es posible que los problemas de algunas tecnologías no se manifiesten hasta al cabo de un tiempo. La mejor forma de hacerlo es mediante un seguimiento sistemático:

- × Intente conseguir un contrato de mantenimiento y mantenga un contacto directo con la planta durante los primeros años de funcionamiento del sistema.
- × Llame a la empresa a intervalos periódicos y averigüe qué tal va todo.
- × Si, además, puede conseguir mediciones sobre el rendimiento del sistema, mucho mejor. Use estos datos para comparar sus predicciones con el comportamiento real.
- × Lleve un registro de los contactos que haya realizado, los problemas que hayan surgido, de su opinión sobre cómo podrían haberse evitado estos problemas, etc.

4 Ejemplos prácticos

4.1 Procedimiento general

Punto de partida:

Tras realizar una presentación sobre las medidas de eficiencia energética y las energías renovables en la industria, mantiene una breve conversación con la directora técnica de la empresa EINSTEIN Container Washing Ltd., la señora Cleanton. Ella expresa su interés por el potencial de las energías renovables para reducir los costes energéticos, ya que el reciente aumento de los precios de la energía ha empezado a convertirse en un componente importante de los costes de la empresa. Intercambian sus respectivas tarjetas de visita y quedan en que usted le enviará más información.

4.1.1 EINSTEIN Paso 1: Motivar

Nada más llegar a la oficina, le envía un e-mail a la Sra. Cleanton con la información sobre EINSTEIN.

Pasados unos días, la llama por teléfono y ella le comenta que está muy interesada en realizar una auditoría energética y le propone que vaya a visitar la empresa, aunque, desgraciadamente, ésta se encuentra a unos 150 km de su oficina. Acuerdan que ella le enviará algunos datos y esquemas de la fábrica para que usted pueda elaborar una propuesta preliminar antes de la visita.

4.1.2 EINSTEIN Paso 2: Recogida de datos antes de la auditoría

Usted le envía a la Sra. Cleanton la “lista EINSTEIN para la empresa” para que se haga una idea de la información que usted le pedirá durante la visita. Además de la lista, le envía también el cuestionario básico EINSTEIN, y le pide que rellene los datos que pueda conseguir fácilmente y se lo envíe por fax o e-mail.

Unos días más tarde, usted recibe el cuestionario, pero con muy pocos datos:

algunos datos generales de la empresa: datos administrativos, cifra de negocio, etc.

período de operación:	260 días/año, 10 h/día, 2 turnos/día sólo un proceso: lavado de contenedores
demanda de agua caliente:	100 m ³ / día a 80 °C
equipos de suministro de calor:	caldera de vapor, no se especifican más datos
combustibles utilizados:	gas natural, no se especifican datos sobre el consumo

Aunque el caso de EINSTEIN Container Washing Ltd. parece sencillo, usted procura conseguir información sobre empresas similares y consulta las recomendaciones de EINSTEIN en materia de MTD para ver si encuentra alguna idea para posibles mejoras. Entre otras recomendaciones, las que se ajustan mejor al caso que nos ocupa son las siguientes:

optimización de procesos de lavado:

- “comprobar si el consumo de agua y/o la temperatura del agua se pueden reducir utilizando otros detergentes”
- “comprobar si se puede reutilizar el agua residual o si se puede crear un circuito cerrado de agua”

recomendaciones sobre el suministro de calor:

- “comprobar si se puede recuperar el calor del agua residual”
- “calentar el agua a baja temperatura es una alternativa a la que se puede aplicar la energía termosolar”

4.1.3 EINSTEIN Paso 3: Procesamiento de la información preliminar

En primer lugar, introduce los datos en la herramienta informática EINSTEIN para ver hasta qué punto le permiten sacar conclusiones más o menos precisas. Gracias a su experiencia sabe que, además de la información que ha obtenido de la empresa, tendrá que hacer algunas estimaciones sobre las posibilidades de utilizar el calor residual y también sobre las tarifas energéticas. Para una primera aproximación, usted hace las siguientes suposiciones (aunque es consciente de que estos datos pueden estar muy desviados y que deben confirmarse antes de presentar una propuesta a la empresa):

- cantidad de agua residual = la misma cantidad que el agua caliente consumida: 100 m³ / día
- temperatura del agua residual: 50 °C
- supone las siguientes tarifas energéticas basado en su experiencia de otras industrias de tamaño similar: tarifa gas natural: 30 €/MWh; tarifa electricidad: 85 €/MWh
- distribución de calor: vapor a 2 bar, temperature de ida 140 °C y de retorno 60 °C, recuperación de condensados 100%.

(vea proyecto ejemplo EINSTEIN Guide 41 Preliminary step)

Cómo sólo quiere una idea orientativa, configura el control de consistencia con el nivel de precisión "quick&dirty" (orientativo) y ejecuta el procedimiento de auditoría EINSTEIN en modo automático ("autopiloto"). Éstos son los resultados:

- ha tenido suerte: hay suficientes datos para realizar un primer estudio orientativo y, además, son coherentes
- para un análisis más detallado, hace falta conocer la potencia nominal de la caldera que hay instalada actualmente
- la demanda de calor anual estimada del proceso es de 2.118 MWh y el consumo de combustible estimado es de 2.552 MWh; el 71 % de la demanda de calor, o unos 1.500 MWh, están por debajo de los 60 °C
- el suministro de calor externo necesario se puede reducir a 1.327 MWh con recuperación del calor
- otras soluciones adecuadas de eficiencia energética son las siguientes:
 - a) un sistema termosolar con una capacidad nominal de 693 kW que cubra el 51 % de la demanda de calor residual
 - b) un motor de cogeneración con una potencia térmica de 333 kW que cubra 70% de la demanda de calor restante
 - c) una bomba de calor con una potencia térmica (calor) de 200 kW que cubra el 22 % de la demanda de calor restante
 - d) nuevas calderas más eficientes

En todos los casos, la caldera antigua ha sido sustituida por unas nuevas más eficientes. Vea los resultados en Figura 35.

(vea el proyecto ejemplo *EINSTEIN Guide 41 Auto-Pilot Results*)

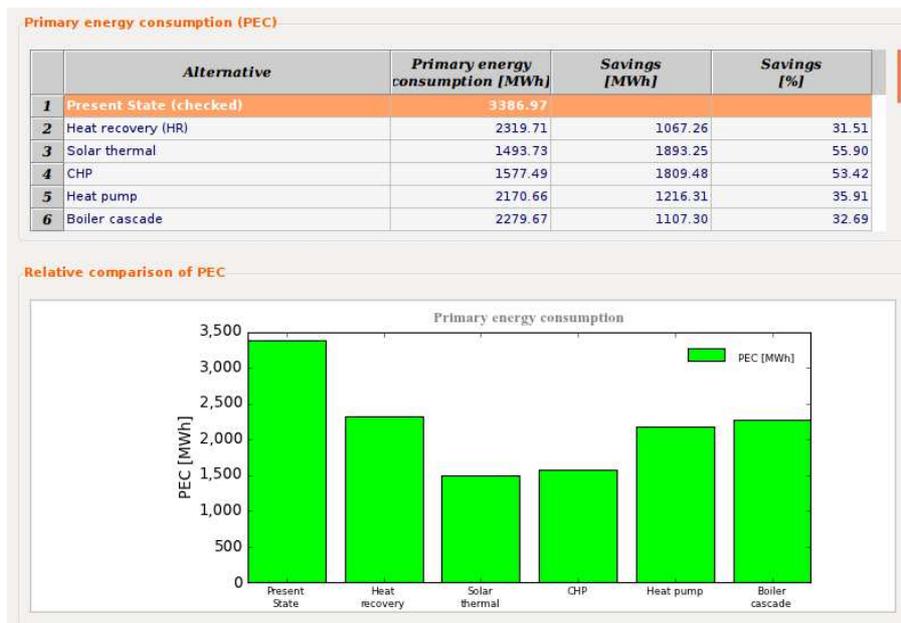


Figura 35: Comparación del consumo actual estimado de energía primaria, y reducción potencial que se obtendría con diferentes medidas de eficiencia energética.

Para confirmar las suposiciones preliminares y confirmar los resultados, llama a la empresa para saber cuál es la potencia nominal de la caldera instalada. Le dicen que en la fábrica hay una caldera de vapor de 3 MW.

Como no es un experto en energías renovables, llama a un compañero de trabajo que trabaja en ese campo para informarse mejor sobre el tema.

Ahora que ya tiene una idea aproximada sobre el consumo de energía de la empresa, puede buscar datos de referencia (benchmarks) para saber si el consumo de energía actual está dentro de lo que se consideran buenas prácticas.

Como resultado de las medidas que ha identificado durante el estudio preliminar, usted establece las siguientes prioridades en cuanto al resto de datos que necesita:

- averiguar la temperatura del agua residual y el grado de contaminación (posibles problemas para la recuperación del calor)
- averiguar las dimensiones de las superficies disponibles y las características estructurales de las cubiertas para la posible instalación de un sistema termosolar
- averiguar la eficiencia en la conversión energética, la antigüedad y el estado de conservación de la caldera de vapor actual para decidir si conviene cambiarla

4.1.4 EINSTEIN Paso 4: Primera evaluación rápida

En el caso que nos ocupa, los datos disponibles son suficientes para presentar y discutir con la empresa una primera propuesta orientativa. Así pues, usted imprime el informe estándar de auditoría de la herramienta informática EINSTEIN, pero decide no enviarlo por e-mail, sino presentarlo personalmente durante la visita a la planta.

4.1.5 EINSTEIN Paso 5: Visita de las instalaciones

Al llegar a la empresa, le recibe la Sra. Cleanton, acompañada de un operario de la planta de lavado. Usted les presenta el estudio preliminar y le informan de que la empresa está muy interesada en aplicar las

medidas de ahorro de energía propuestas, sobre todo las opciones que parecen ofrecer un mayor potencial de ahorro: la recuperación del calor y la energía termosolar.

Por lo tanto, a partir de este momento, se centrará en conseguir más información sobre los temas que están en su lista de prioridades. Consigue la siguiente información adicional:

- la caldera de vapor que hay en la fábrica es muy antigua y la empresa ya estaba pensando en cambiarla. Mientras tanto, la Sra. Cleanton ha recopilado información sobre la factura energética de la empresa: el consumo de gas natural en los últimos tres años se sitúa entre los 2.700 y los 3.100 MWh anuales.
- la empresa dispone de un tejado plano de hormigón de unos 2.000 m² sin problemas estáticos en cuanto a la instalación de un sistema termosolar.
- toda el agua residual se recoge en una pequeña cisterna antes de pasar a una planta de tratamiento de aguas residuales para separar los productos químicos y otros contaminantes. No ha podido conseguir más información sobre su temperatura. Se entera de que el agua residual no es corrosiva y que no contiene cantidades importantes de otros contaminantes, como por ejemplo fibras, que podrían plantear problemas con los intercambiadores de calor.

(vea el proyecto ejemplo *EINSTEIN Guide 41 Visit On-Site*)

Como ha llevado el ordenador portátil a la empresa para realizar una presentación, aprovecha para introducir los datos que acaba de recoger en la herramienta informática EINSTEIN y comprobar si son coherentes con la información preliminar. En este caso, se confirma que lo son. Sin embargo, los nuevos datos sobre el consumo de energía demuestran que la caldera actual tiene una eficiencia muy baja (ha obtenido un valor estimado de eficiencia de conversión del 74 %).

Durante la visita a las instalaciones de la empresa, mide la temperatura del agua residual en el colector correspondiente. Realiza dos mediciones diferentes, una al principio de la visita y otra al final, justo antes de irse. Obtiene los siguientes valores:

- Mediciones de la temperatura del agua residual en la cisterna: (a) 51,3 °C (mientras había tres procesos de lavado funcionando en paralelo); (b) 42,8 °C (en ese momento había tan sólo un proceso de lavado en marcha).

Los valores no se alejan mucho de su estimación inicial. Sin embargo, le sugiere que deberían controlar y registrar los valores de temperatura del agua residual durante una semana, junto con la hora de inicio y fin de los ciclos de lavado y el consumo de agua.

Finalizada la visita a las instalaciones, comenta brevemente sus observaciones con la Sra. Cleanton y le explica que, en su opinión, los principales aspectos del estudio previo de viabilidad siguen siendo válidos. Sin embargo, prefiere esperar a tener los datos de las mediciones que faltan. El operario de la línea de lavado se compromete a hacer estas mediciones durante la semana siguiente, así que usted le promete a la Sra. Cleanton que tendrá el informe definitivo de la auditoría dentro de dos semanas.

4.1.6 Einstein Paso 6: Análisis de la situación

Después de analizar los resultados de las mediciones de la empresa, que finalmente le han enviado por fax, obtiene una temperatura media del agua residual de 45,2 °C, por lo que decide cambiar su estimación inicial de 50 a 45 °C en el estudio definitivo para la empresa. Además, le envían el desglose del consumo de calor de los procesos por temperaturas, según se ilustra en la figura 36.

Asimismo, usted confirma que el sistema actual de suministro de calor trabaja con un nivel muy bajo de eficiencia de aproximadamente el 75 %.

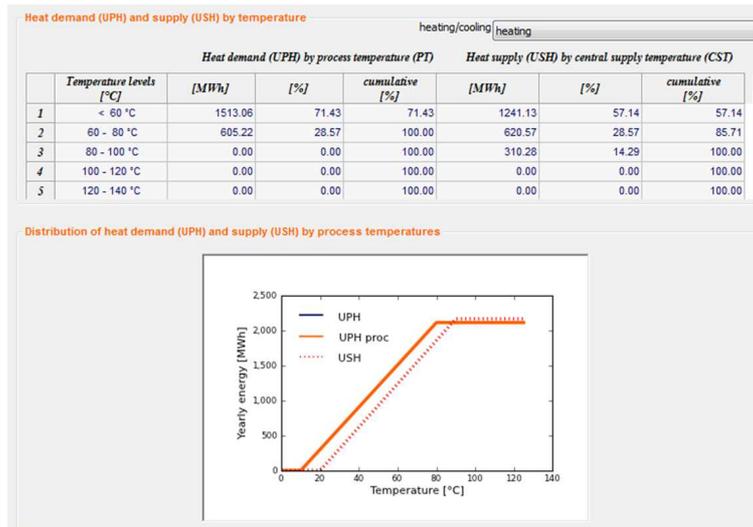


Figura 36: Desglose del consumo de energía (ejemplo): calor para procesos y suministro de calor por nivel de temperatura (Nota: en el caso del suministro de calor se da la temperatura mínima necesaria y no la temperatura real de suministro de vapor).

4.1.7 EINSTEIN Paso 7: Diseño conceptual de las opciones de ahorro

4.1.7.1 Optimización de los procesos

Después de comentarlo con la empresa, llega a la conclusión de que, en este caso, no parece haber posibilidades de mejorar el proceso de lavado propiamente dicho. Así pues, decide centrarse en la recuperación del calor y la optimización del suministro.

4.1.7.2 Recuperación del calor

Como primera medida para mejorar la eficiencia energética, sugiere recuperar el calor del agua residual y de los gases de combustión de la caldera para precalentar la entrada de agua corriente. Utiliza la herramienta informática EINSTEIN para una estimación cuantitativa del potencial de recuperación. La demanda de calor restante se utilizará como base para todas las propuestas de optimización del suministro de calor.

4.1.7.3 Suministro de calor

Como sólo quiere realizar una auditoría rápida, decide quedarse principalmente con algunas de las opciones generadas automáticamente por la herramienta informática EINSTEIN. Sin embargo, decide perfilar un poco mejor la propuesta que combina la recuperación del calor, un sistema termosolar y la sustitución de la caldera actual, ineficiente y sobredimensionada, por una nueva y más pequeña.

La propuesta creada automáticamente propone un sistema termosolar de 624 kW con captadores de tubos de vacío. Vd. decide cambiarlo manualmente de la siguiente manera:

- Redondea la potencia a 600 kW y el volumen de acumulación a 40 m³
- Compara diferentes tipos de captadores: planos y de tubos de vacío
- También estudia una tercera propuesta termosolar con un sistema solar más pequeño (captador plano de 300 kW)

(vea el proyecto ejemplo EINSTEIN Guide 41 Detailed)

Basado en el diseño automático de la herramienta EINSTEIN se propone una caldera nueva de 650 para los tres tipos / tamaños del sistema termosolar.

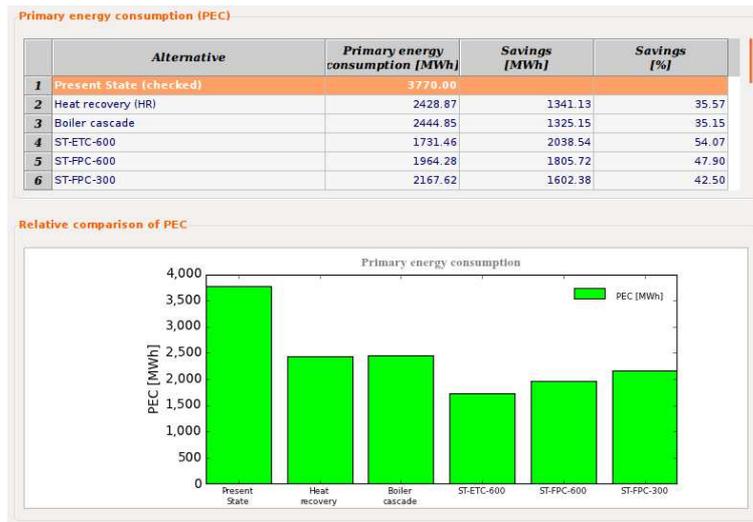


Figura 37: Comparación del consumo actual de energía primaria y reducción potencial que se obtendría con diferentes medidas de eficiencia energética. Todas las propuestas termosolares se basan en la alternativa “recuperación del calor (heat recovery)” e incluyen también la recuperación del calor y la renovación de la caldera.

4.1.8 EINSTEIN Paso 8: Cálculo del rendimiento energético



Figura 38: Suministro semanal de calor por equipo. Alternativa ST-ETC-600.

Para averiguar más cosas sobre el rendimiento estacional del sistema, realiza una simulación con la herramienta interna de cálculo del rendimiento energético de EINSTEIN. Los resultados le indican el rendimiento semanal del sistema (figura 38).

4.1.9 EINSTEIN Paso 9: Análisis económico y financiero

Por último, realiza una comparación económica de las distintas propuestas. Para un análisis rápido acepta los valores de coste de inversión y de operación y mantenimiento (O&M) calculados automáticamente, tal como especificados en la base de datos de EINSTEIN. Añade los valores estimados manualmente para el sistema de recuperación de calor¹⁵.

¹⁵ En este ejemplo se usaron los siguientes valores para el análisis económico: costes de operación y mantenimiento (para usos térmicos en el sistema actual): 1500 EUR; tasa de inflación anual: 2%; tasa de aumento de los precios de energía: 4%; tasa nominal de interés para la financiación externa de las instalaciones: 8%; plazo de

Obtendrá como resultado los datos que aparecen en la Figura 39, Figura 40 y Figura 41. En la Figura 39 se representan los valores para los costes de inversión y las subvenciones.

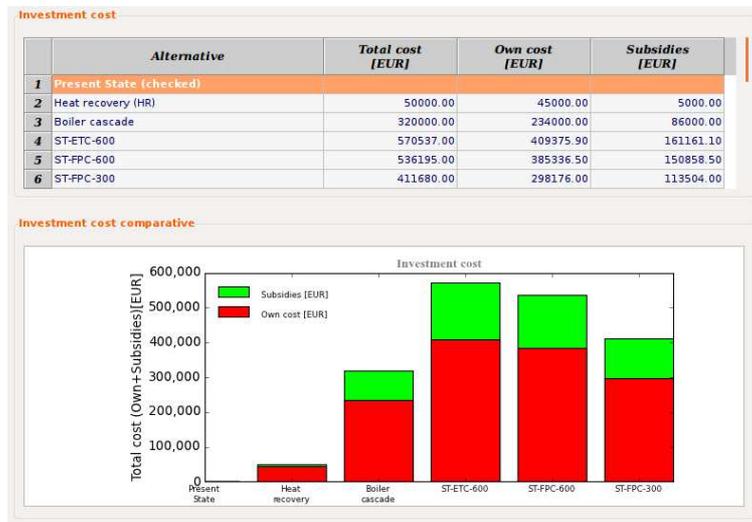


Figura 39: Comparación de los costes de inversión para las diferentes combinaciones de medidas de ahorro energético. Todas las propuestas de solar térmica se basan en la alternativa “recuperación de calor (heat recovery)” e incluyen también recuperación de calor y la sustitución de la caldera.

La Figura 40 muestra el coste anual total para el sistema energético para las diferentes alternativas, formado por los costes de energía, los costes de O&M y una anualidad de la inversión inicial. Se obtiene el mínimo del coste total anual del sistema energético para la alternativa “recuperación de calor (heat recovery)” con un ahorro de energía primaria moderado. El coste total del sistema energético vuelve a subir para las alternativas con sistemas solares grandes y correspondientes niveles altos de ahorro de energía primaria, debido a la contribución de la anualidad de la inversión.

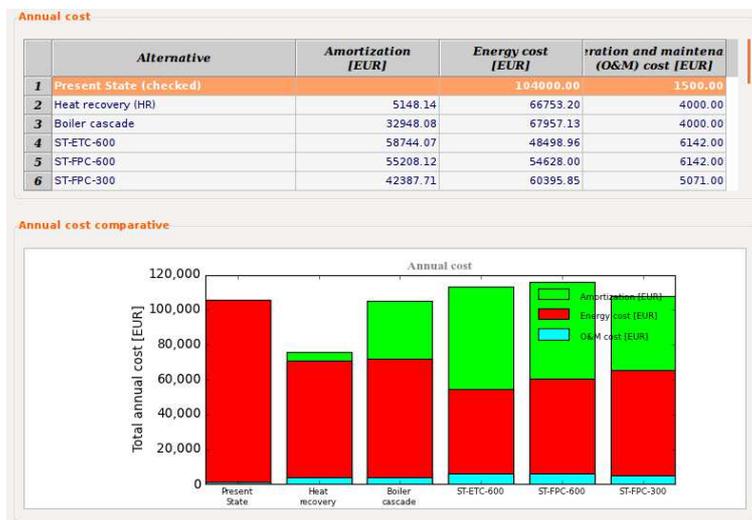


Figura 40: Comparación de los costes anuales (incluyendo una anualidad de la inversión total inicial) para las diferentes combinaciones de medidas de ahorro energético. Todas las propuestas de solar térmica se basan en la alternativa “recuperación de calor (heat recovery)” e incluyen también recuperación de calor y la sustitución de la caldera.

La Figura 41 muestra el coste adicional por unidad de energía ahorrada. La alternativa “recuperación de calor (heat recovery)” supone tanto una reducción del consumo de energía primaria como una reducción de los costes anuales totales del sistema energético. Las alternativas que incluyen un sistema solar térmico (ST) obtienen un mayor ahorro de energía primaria, pero al precio de un coste anual más alto. La alternativa ST-FPC-300 obtiene un ahorro de energía primaria muy alto siendo aproximadamente neutral en costes.

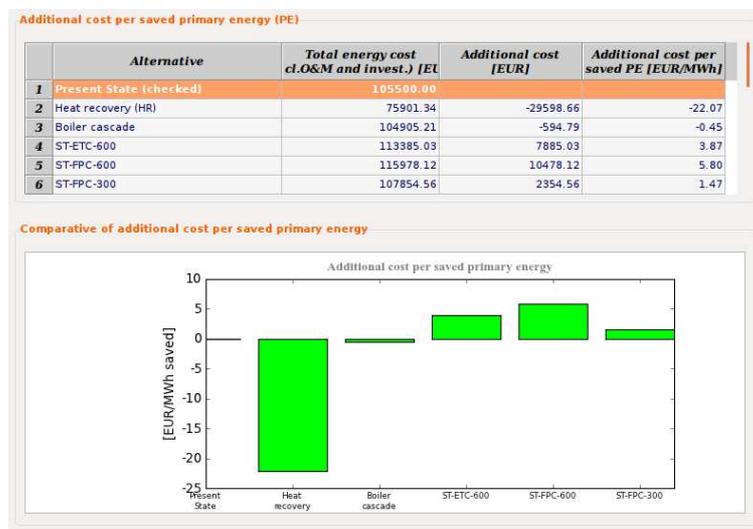


Figura 41: Comparación de los costes totales anuales adicionales para las diferentes combinaciones de medidas de ahorro energético. Todas las propuestas de solar térmica se basan en la alternativa “recuperación de calor (heat recovery) e incluyen también recuperación de calor y la sustitución de la caldera.

4.1.10 EINSTEIN Paso 10: Informes y presentación

Está contento con el resultado. Parece que con la alternativa ST-FPC-300 ha conseguido elaborar una propuesta interesante para la empresa que le permitirá lograr una reducción de costes de 42,5 %. Imprime el informe de la auditoría EINSTEIN, generado automáticamente por la herramienta, y llama a la Sra. Cleanton para concertar una cita en la que le presentará los resultados.

4.2 Comprobación de la coherencia y estimación de los datos

En este apartado encontrará algunos ejemplos de cómo utilizar la herramienta EINSTEIN para comprobar la coherencia de los datos. Para mostrar las opciones más importantes de la herramienta EINSTEIN, utilizaremos un modelo simplificado de una empresa lechera que tiene tan sólo tres procesos. Estos ejemplos están la base de datos del paquete de software EINSTEIN.

4.2.1 Descripción del modelo de empresa lechera

4.2.1.1 Procesos

Se estudian tres procesos típicos de la industria lechera:

- * pasteurización (proceso 1)
- * coagulación (cuajado) (proceso 2)
- * hilado de la mozzarella (proceso 3)

La pasteurización es el proceso que consume más energía. Nuestro modelo de empresa lechera trabaja 280 días al año y produce básicamente dos productos: queso normal y mozzarella. Como productos semielaborados tenemos los siguientes: leche pasteurizada (procedente de la pasteurización), suero de leche y cuajada (ambos procedentes de la coagulación)

Pasteurización

La pasteurización es un proceso de calentamiento controlado que sirve para eliminar de la leche las formas viables de cualquier microorganismo, tanto los patógenos como los que puedan estropear el producto. La pasteurización HTST utiliza una temperatura de 72 a 75 °C durante 15-240 segundos. Para la pasteurización continua se utilizan intercambiadores de calor de flujo continuo, p. ej. tubulares o de placas y armazón, que tienen diferentes secciones para calentamiento, acumulación y enfriamiento.

La pasteurización prevé la recuperación del calor interno y el suministro de calor externo para calentar y enfriar un fluido circulante (leche). El volumen de leche que se pasteuriza diariamente es de 400 m³. El proceso es continuo y dura 5 h/día, desde las 6 hasta las 11. El medio caloportador utilizado en el suministro externo de calor es agua caliente.

La leche entra en el aparato a 4 °C. Luego pasa por un intercambiador interno de calor a contracorriente donde la leche caliente que sale precalienta la leche fría que entra hasta los 38 °C. La leche precalentada se calienta hasta 72 °C mediante agua caliente, permanece a esa temperatura durante un tiempo, luego pasa por el intercambiador de calor y, finalmente, se enfría de nuevo hasta los 38 °C. En el ejemplo, consideramos despreciable la demanda energética atribuible a las pérdidas de calor de la máquina pasteurizadora y a la puesta en marcha.

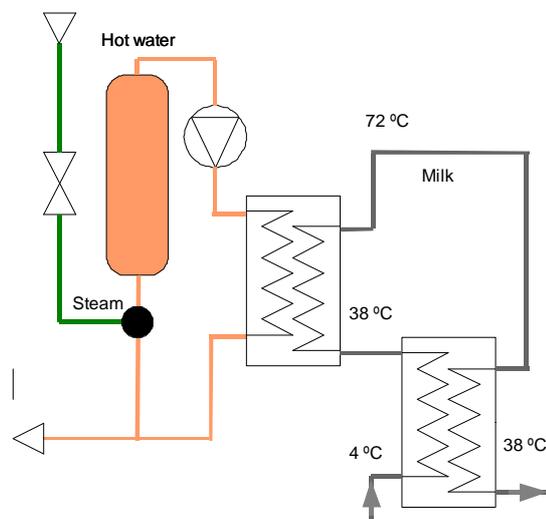


Figura 42: Esquema simplificado de una máquina pasteurizadora

Coagulación

La coagulación se utiliza en la elaboración de leche para separar la cuajada del suero. Este proceso también se denomina cuajado. El cuajado se lleva a cabo en unas cubas donde se añaden fermentos y otros ingredientes con el objetivo de coagular la leche. La cuajada se obtiene mediante la separación del suero, que luego se aparta para otros procesos. La temperatura es uno de los factores esenciales a la hora de cuajar la leche. La temperatura correcta se consigue mediante intercambiadores de calor o inyectando vapor directamente en la cuba.

El cuajado es un proceso por lotes y, en este caso, cada lote dura 1,5 h. Cada día se realizan 4 lotes, entre las 10:00 y las 16:00. Al principio de cada lote hace falta calor para calentar la leche pasteurizada desde la temperatura de entrada (37 °C) hasta la temperatura de procesamiento (40 °C). Durante el proceso de coagulación, hace falta energía térmica para mantener la temperatura constante a 40 °C.

Los 400 m³ de leche diarios pasan a las cubas de coagulación después de ser pasteurizados. Por separación, se obtienen como salida del proceso 240 m³ diarios de suero a 37 °C.

Hilado de la mozzarella

El hilado de la mozzarella es un proceso que exige calentar y fundir el queso. Se coloca la cuajada en un hervidor y se mezcla con agua caliente a alta temperatura, normalmente entre 75 y 95 °C. El agua caliente se utiliza principalmente para fundir el coágulo. Un determinado porcentaje del agua del proceso es absorbida por la propia cuajada para aumentar su elasticidad. El agua caliente se obtiene mediante intercambiadores de calor o inyectando vapor directamente.

El hilado también es un proceso por lotes y, en este caso, cada lote tarda 1 h. Cada día se realizan 4 lotes, entre las 12:00 y las 18:00. Aquí, la energía térmica es necesaria para aumentar la temperatura del agua del proceso de 10 °C a 90 °C. El 50 % de la leche que se pasteuriza cada día se usa, una vez coagulada, para producir mozzarella. Suponiendo que para 100 l de leche hacen falta 26 l de agua caliente para producir 13 kg de mozzarella, para 200 m³/día de leche pasteurizada hacen falta diariamente 50 m³ de agua a 90 °C. La temperatura de salida del agua residual es de 70 °C y suponemos que el flujo es igual al 80 % de la cantidad que entra cada día, es decir, 40 m³.

4.2.1.2 Suministro y distribución del calor

La figura 43 muestra un esquema del suministro y distribución del calor, formado por dos calderas de vapor a gas natural y tres tuberías independientes que van a cada uno de los tres procesos.

La caldera B1 (con una potencia nominal de 3 MW) alimenta únicamente el proceso de pasteurización (P1). Su eficiencia media es del 80 %, mientras que el factor medio de uso es del 80 %. La caldera B1 funciona 6 horas al día, de las 5:00 a las 11:00.

La caldera B2 (con una potencia nominal de 2 MW) alimenta los tres procesos (P1: pasteurización, P2: coagulación; P3: hilado de la mozzarella). Su eficiencia media es del 88%, mientras que el factor medio de uso es del 59,4%. La caldera B2 funciona 8 horas al día, de las 10:00 a las 18:00.

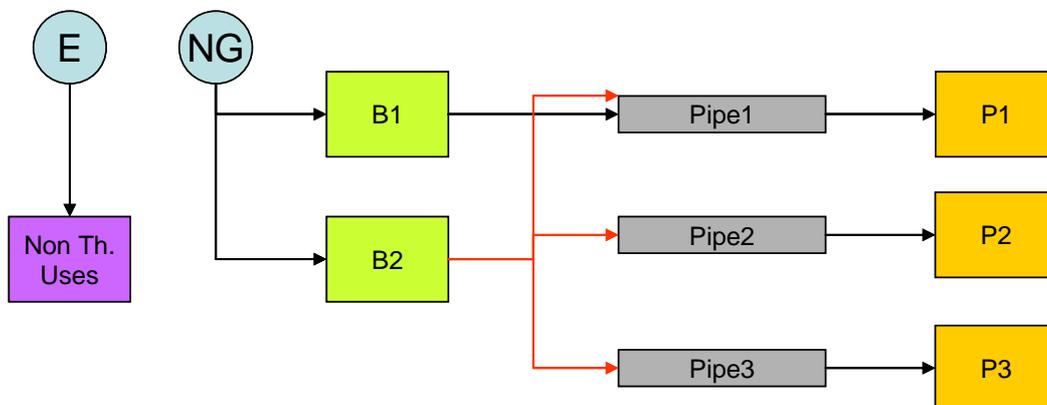


Figura 43: Esquema del sistema de suministro y distribución del calor y los procesos térmicos en la empresa lechera.

El medio utilizado para el suministro de calor es vapor a baja presión y 140 °C, con una temperatura de retorno de los condensados de 60 °C. La longitud de la tubería 1 es de 200 m (por trayecto), mientras que las tuberías 2 y 3 miden 300 m.

La cantidad de gas natural que se utiliza anualmente se deduce a partir de la factura de combustible y es de 811.200 m³. El consumo final de gas natural (GN) para usos térmicos [es decir, el consumo anual (LCV)] es de 8.063 MWh.

La electricidad sólo se emplea en usos no térmicos y su consumo aproximado es de 400 MWh: 300 para hacer funcionar la maquinaria y 100 MWh para iluminación.

4.2.1.3 El caso básico: desglose del consumo de energía con la herramienta informática EINSTEIN.

Después de entrar todos los datos en la herramienta EINSTEIN y ejecutar la comprobación de consistencia, se obtienen los resultados tal como muestra la figura 44.

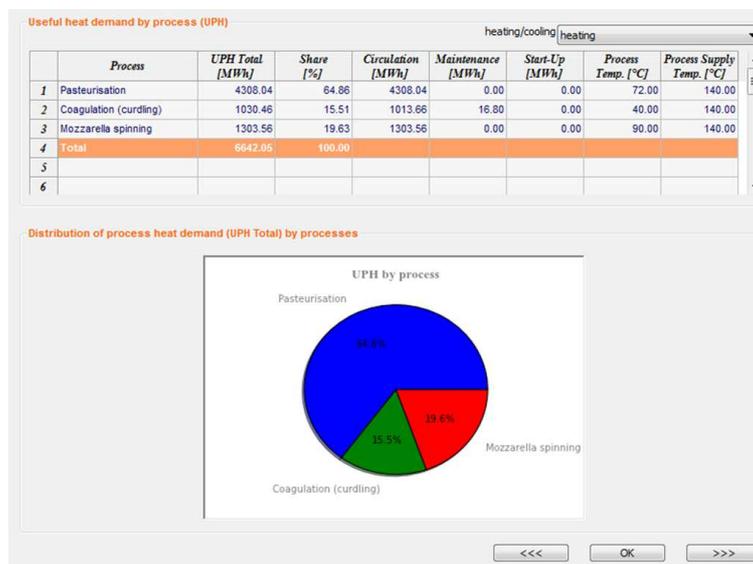


Figura 44: Desglose del consumo de calor para procesos correspondiente al modelo de empresa lechera (ejemplo práctico de la “Guía de auditoría EINSTEIN 42, caso básico”).

Si se introducen correctamente los datos en la herramienta informática EINSTEIN, se obtiene un desglose completo del consumo de energía con los datos que se indican más arriba (figura 41). Los principales flujos de energía del sistema se ilustran en la figura 45.

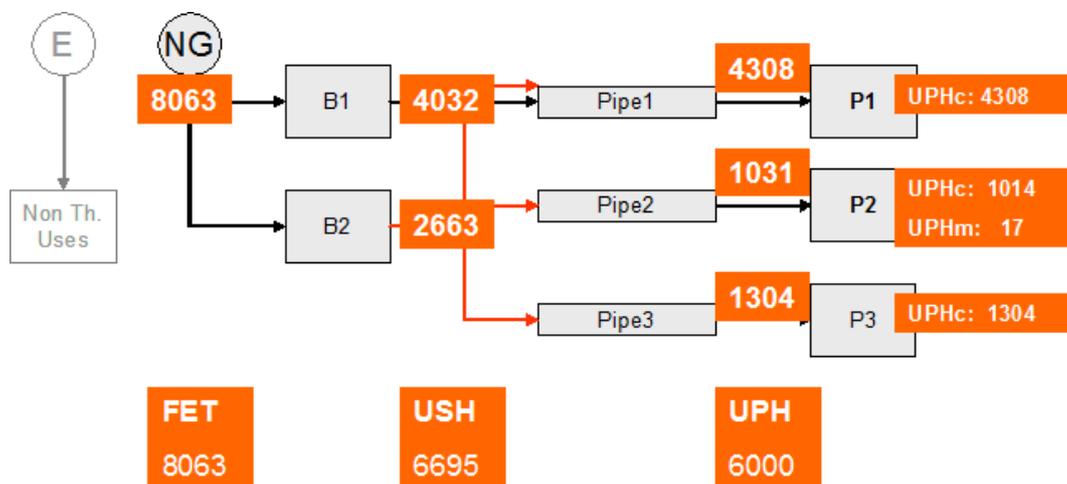


Figura 45: Flujos de energía del sistema (caso básico).

4.2.2 Detección de errores en los datos

Tal y como se describe en el capítulo 2, uno de los primeros pasos de la verificación de datos es ver si son coherentes o si hay contradicciones entre ellos. A continuación se muestran dos ejemplos.

4.2.2.1 Incoherencia entre dos datos que especifican directamente la misma cantidad

A veces, al introducir datos, se cometen errores con las unidades (p. ej. poner kWh en lugar de MWh). En nuestro ejemplo, el consumo total de energía de 8.063 MWh corresponde a un consumo de gas natural de aproximadamente 811.200 m³. Si el usuario se equivoca al leer las unidades e introduce 8.063 kWh en lugar de 8.063 MWh, la herramienta EINSTEIN detectará fácilmente el error (figura 46).

	parameter (values in conflict)	data group (accuracy)	description (calculated from)
1	FECFuel	Fuel[1]	total own fuel consumption (LCV)
2	8.063 MWh	+/- 0.10%	FECFuel;
3	8063.328 MWh	+/- 0.00%	MFuelYear;
4	MFuelYear	Fuel[1]	annual consumption
5	648960.000 kg	+/- 0.00%	MFuelYear;
6	648.934 kg	+/- 0.10%	FECFuel;
7			

Figura 46: Mensaje de error de la herramienta informática EINSTEIN al presentarse datos contradictorios en el consumo de combustible (ejemplo práctico de la "EINSTEIN Guide 42 1a").

4.2.2.2 Incoherencias generales en los datos del sistema

No todos los errores e incoherencias en los datos son tan fáciles de detectar como el del ejemplo anterior. En ocasiones, para detectar una contradicción es necesario calcular los balances energéticos del sistema o evaluar los caudales, los niveles de temperatura, etc. A modo de segundo ejemplo, podemos introducir un consumo total de combustibles muy superior a la suma de todas las demandas de calor de los procesos (usando unos valores razonables para las eficiencias de distribución y conversión).

	parameter (values in conflict)	data group (accuracy)	description (calculated from)
1	USHTotal	USH[-]	Useful Supply Heat (Total)
2	6692.562 MWh	+/- 1.66%	#USHm[1]; #USHm[2]; #USHm[3];
3	17196.800 MWh	+/- 0.58%	#USHj[1]; #USHj[2];
4	USHj[1]	USH[-]	Useful Supply Heat by equipment
5	4032.000 MWh	+/- 0.10%	#USHj[1];
6	0.000 MWh	+/- 0.00%	#USHm[1]; #USHm[2]; #USHm[3]; #USHj[2];
7			

Figura 47: Mensaje de error de la herramienta informática EINSTEIN al detectar datos contradictorios en los balances energéticos; suministro de calor útil total (ejemplo práctico de la "EINSTEIN Guide 42 1b").

4.2.3 Completar los datos con EINSTEIN

En el caso básico del ejemplo anterior, se ha introducido en la herramienta EINSTEIN un conjunto completo de datos, por lo que, para determinar varios parámetros, hay incluso información redundante (que puede provocar errores, tal y como se muestra en los apartados previos).

Sin embargo, como ya sabemos, EINSTEIN es inteligente y no necesita todos los datos para saber qué hacer. Puede calcular lo que falta por su cuenta. No obstante, los datos calculados o estimados sólo son fiables hasta cierto punto, como se muestra en las ventanas de comprobación de los datos. Antes de aceptarlos y proceder con la auditoría, debería decidir si tiene un nivel de fiabilidad compatible con sus objetivos.

En este apartado le enseñaremos a utilizar el módulo de comprobación de la coherencia de EINSTEIN para completar la información sobre la industria cuando los datos de que se dispone son pocos e incompletos.

4.2.3.1 Sólo se conoce el consumo de calor de los principales procesos

En la práctica, es frecuente que sólo se conozca la demanda energética de los procesos que más calor consumen y que se desconozca la de otros procesos menores. Para mostrar cómo hay que proceder en este caso, hemos modificado nuestro ejemplo de tal forma que el consumo de energía del proceso 2 (coagulación) esté indeterminado:

- la demanda de calor de circulación del proceso (caudal entrante del medio de proceso) no está especificada. Esto significa que Q_{UPHc} puede tener cualquier valor, incluso uno muy elevado.
- el factor de carga parcial de la caldera B2 no se ha especificado. Esto significa que también se desconoce el calor suministrado por la caldera B2. Sin embargo, en este caso el calor total suministrado por estos equipos está *limitado* por el consumo total de energía de 8.063 MWh y también por la potencia nominal de la caldera, que se conoce, en combinación con el número máximo de horas de funcionamiento.
- también las longitudes de las tuberías 2 y 3 están desconocidas

La situación general está ligeramente indeterminada: no se puede encontrar una solución exacta al problema, ya que no se conocen con exactitud las pérdidas de calor en las conducciones. Sin embargo, el problema está acotado, ya que se conoce el consumo total de energía y, por lo tanto, EINSTEIN puede estimar el parámetro que falta, es decir, la demanda de calor del proceso 2, calculando la diferencia. En este caso, la demanda de calor del proceso 2 se puede estimar en 467 MWh con un error muy grande de casi 100 %, debido a que se desconocen las pérdidas de calor en las conducciones.

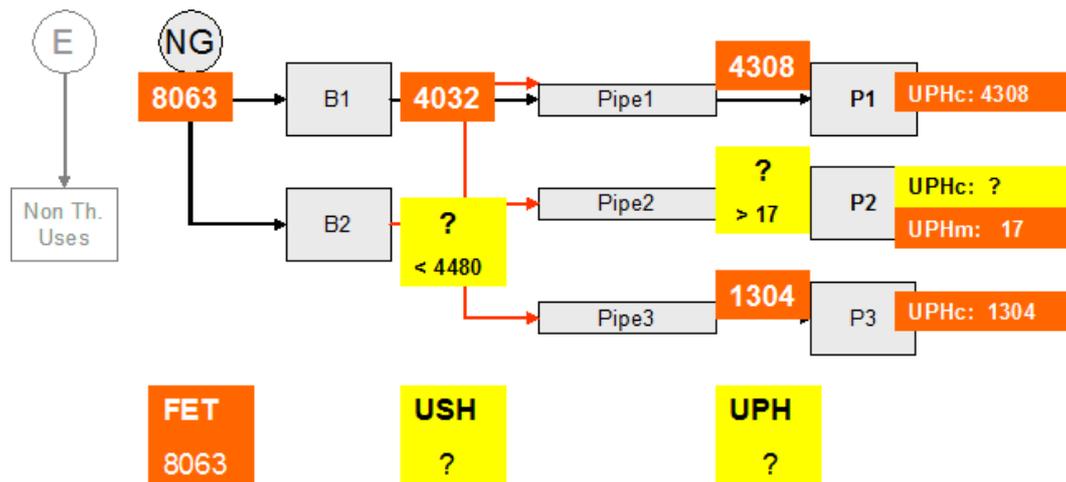


Figura 48: Punto de partida del análisis: el consumo de energía de los procesos menores se desconoce (ejemplo práctico de la "EINSTEIN Guide 42 2a").

4.2.3.2 Se desconoce la demanda total de calor

El problema empeora si no disponemos de información relativa a la demanda energética total y si, tal como ocurría en el punto anterior, tampoco conocemos la demanda de calor del proceso 2. Sin embargo, también en este caso el problema está acotado, ya que la potencia nominal de la caldera 2 todavía impone un máximo absoluto.

En esta ocasión, únicamente pueden ponerse límites muy aproximados a la demanda de calor del proceso 2, del orden de 1.244 MWh, con un error muy grande cerca de 100 %.

Con todo, la incertidumbre relativa en la demanda total de calor (USH) es muy inferior ($8.342 \text{ MWh} \pm 32 \%$). Esto quiere decir que, aunque la demanda de uno de los procesos se desconozca completamente, se puede hacer una primera estimación razonable de la demanda total de calor.

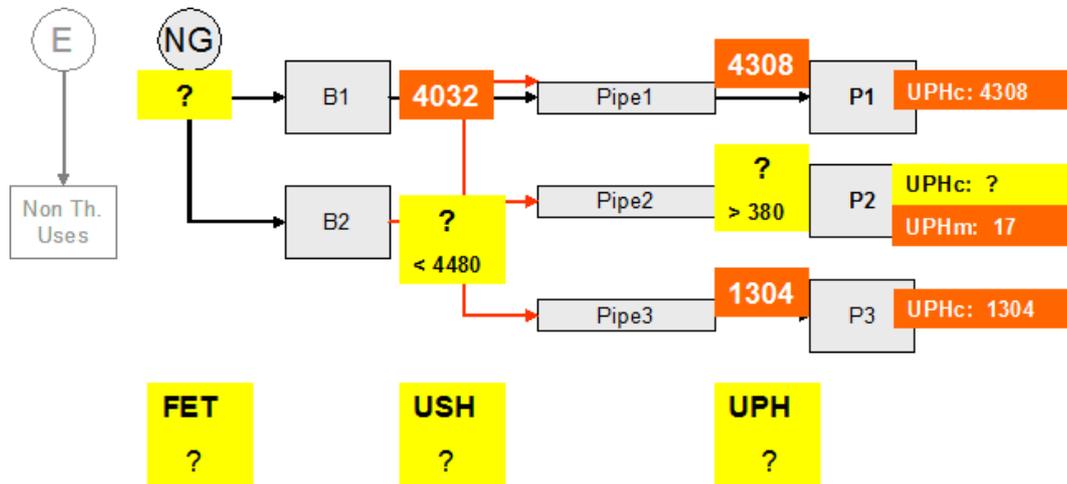


Figura 49: Punto de partida del análisis: se desconocen tanto el consumo total de energía como el consumo de energía de un proceso menor (ejemplo práctico de la "EINSTEIN Guide 42 2b").

4.2.3.3 Se desconocen la demanda total de calor y los datos técnicos de las calderas

La situación se vuelve totalmente indeterminada si tampoco se conoce la potencia nominal de la caldera y por lo tanto, no puede acotarse razonablemente la demanda de calor del proceso 2 (ejemplo práctico de la "Guía de auditoría EINSTEIN 42 2c").

4.2.4 Estimación de datos

Algunos de los resultados de los ejemplos del apartado anterior se pueden mejorar si, además de relaciones matemáticas (balances energéticos), se hacen estimaciones basadas en conocimientos técnicos.

En nuestro caso, esto se ejemplifica de la manera siguiente:

- × se puede suponer que los factores de carga del lado de la caldera se encuentran en un intervalo más estrecho que del 0 al 100 %, ya que estos extremos no son muy probables en la práctica.
- × aún si se desconoce la longitud exacta de las tuberías de distribución, se puede efectuar una estimación aproximada (orden de magnitud).

Esto se puede hacer automáticamente seleccionando la opción de estimación de datos en la herramienta EINSTEIN; en el caso del ejemplo 2b, la demanda de calor del proceso de coagulación (proceso 2) se puede determinar en 74 MWh con suficiente exactitud (error < 30%). Lo único que sigue sin saberse con exactitud es la demanda de calor de circulación de este proceso (debido al desconocimiento del caudal másico del medio entrante a este proceso): $Q_{UPHc} = 737 \pm 37 \%$.

4.3 Recuperación del calor: ejemplo de un caso en una empresa lechera

Se escoge una empresa lechera como ejemplo práctico de uso del Módulo de Recuperación del Calor.

Para obtener un punto de partida para el análisis pinch y para el diseño de una red de intercambiadores de calor, en este módulo se convierten los datos de los procesos en lo que se denomina *flujos de energía* (“*streams*”), que pueden ser fríos (se tienen que calentar y, por tanto, representan una demanda energética) o calientes (se pueden enfriar y, por tanto, sirven como fuente de energía para otros procesos). Estos flujos se ajustan mediante un algoritmo que da como resultado los intercambiadores de calor que deberían usarse en el sistema para conseguir el máximo ahorro de energía a lo largo de un año.

4.3.1 Diagrama de flujo y descripción de los procesos

En primer lugar se pasteuriza la leche y luego se almacena. Para la producción de queso, se precalienta la leche y luego se incorpora a la cuba de fermentación, donde se añade agua de caliente a 65 °C. Asimismo, se aporta calor externo a la cuba. Se extrae el suero y, después de unos pasos de lavado, se enfría desde aprox. 45 °C hasta la temperatura de almacenamiento. Para la evaporación, se calienta el suero con calor externo y luego se introduce en el evaporador, que en este caso es un evaporador térmico con recompresión. Se seca el suero hasta pasar de una masa seca del 6 % a una masa seca del 60 % a lo largo del proceso de evaporación, por lo que el suero concentrado que sale del evaporador tiene 1/10 de la masa del suero inicial. El condensado caliente se recoge a 75 °C, lo cual constituye la mayor cantidad de calor residual del proceso comparado con el calor que pierde el proceso a través del suero concentrado caliente. El concentrado caliente sale del evaporador y se seca hasta adquirir su masa seca definitiva en una secadora por pulverización.

Dado que el proceso de pasteurización ya está bien equipado con un sistema de intercambio de calor interno, la principal prioridad en términos de ahorro de energía debe ser la cuba de fermentación y el evaporador de suero. Por lo tanto, en el siguiente ejemplo sólo se consideran estos procesos.

En la recuperación del calor es importante tener en cuenta los horarios de los flujos. Para este proyecto se ha supuesto el siguiente horario de funcionamiento:

- × Fermentación: 10 lotes al día, de 2 horas de duración cada uno, 5 días a la semana
Precalentamiento de la leche: 30min antes de cada lote
Agua de lavado: 20 min durante cada lote
- × Evaporación: proceso continuo, 14 horas/día, 5 días a la semana

4.3.2 Introducción de los datos del proceso en EINSTEIN

En el módulo de introducción de datos de EINSTEIN, se definen los siguientes procesos (tabla 19):

Tabla 19. Resumen de los procesos.

Proceso	Tipo de proceso	Flujo de proceso entrante	Calor residual saliente	Potencia suministrada al proceso durante el funcionamiento
Pre calentamiento de la leche	lotes	Leche, de 6 °C a 32 °C, 180 m ³ al día 10 lotes	Ninguno (la leche caliente entra en la cuba de fermentación)	ninguna
Pre calentamiento del agua de lavado	lotes	Agua, de 10 a 65 °C 18 m ³ al día 10 lotes	Ninguno (el agua caliente entra en la cuba de fermentación)	ninguna
Cuba de fermentación	lotes	Leche, de 32 a 45 °C 180 m ³ al día 10 lotes	Suero caliente a 45 °C, enfriado a 8 °C ~ 170 m ³ al día	200 kW
Pre calentamiento y evaporación del suero	continuo	Suero, de 8 a 80 °C 180 m ³ al día	Condensado caliente a 75°C, 140 m ³ por día; Concentrado de suero a 50°C, 28m ³ por día	2.400 kW

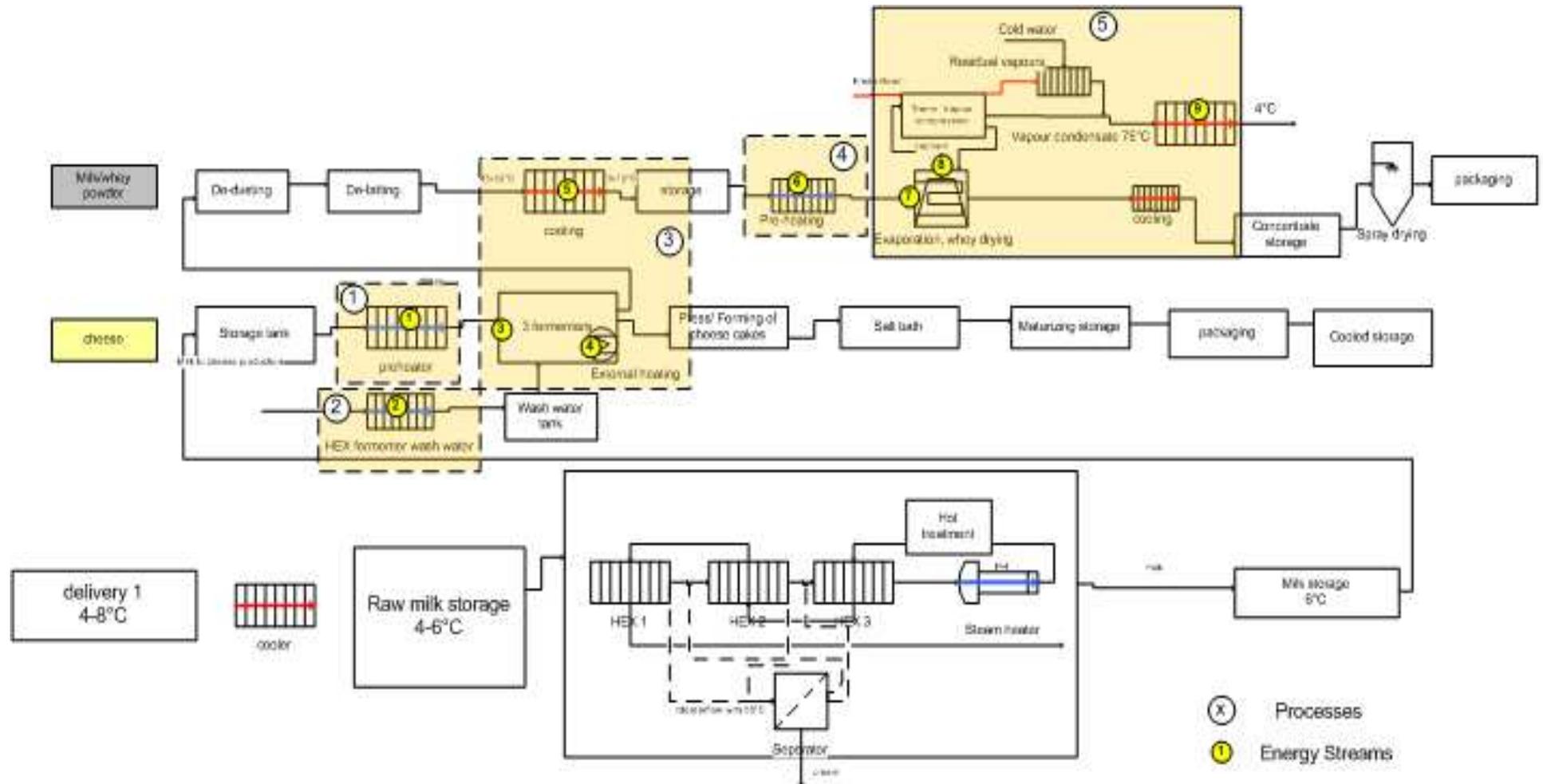


Figura 50: Diagrama de flujo de la producción de queso y suero en polvo en una empresa lechera

4.3.3 Optimización de los procesos

Según la metodología de auditoría y el principio de residuo mínimo, antes de consideraciones sobre la integración del calor deberían implantarse medidas generales de ahorro y de optimización conseguida mediante la aplicación de nuevas tecnologías o MTD. En el ejemplo práctico, habría que estudiar las posibilidades que hay para reducir la demanda de energía en el proceso de evaporación, como por ejemplo la ósmosis inversa o la evaporación en vacío. La reducción de la demanda energética provocará a su vez una reducción del calor residual disponible, pero se conseguirá un proceso más compacto con una demanda energética global más pequeña. La aplicabilidad de las nuevas tecnologías lógicamente depende de los parámetros del proceso y de la buena disposición de la empresa a la hora de efectuar este cambio tecnológico.

Por razones de simplicidad en el presente ejemplo no se ha considerado ninguna medida de optimización de los procesos.

4.3.4 Cálculo de la recuperación del calor

Como primer paso, en el cálculo de la recuperación del calor se generan flujos de energía en base a los datos del proceso introducidos (tabla 20).

Para simplificar, se ha excluido del ejemplo el calor latente contenido en los gases de combustión procedente de la caldera a la temperatura de condensación.

Las curvas compuestas de calor y frío, junto con todos los vectores de entalpía/temperatura de todos los flujos fríos (curva compuesta de frío) y todos los flujos calientes (curva compuesta de calor), respectivamente, muestran las posibilidades generales de intercambio de calor.

La gran cantidad de energía que requiere la evaporación está claramente reflejada en la curva compuesta de frío. Sin embargo, todavía existe un importante solapamiento entre el calor residual disponible y los flujos fríos que tienen que calentarse. El máximo termodinámico para el intercambio de calor según las curvas de pinch está alrededor de los 2.400 kW. La temperatura pinch se encuentra entre los 0 y los 4 °C.

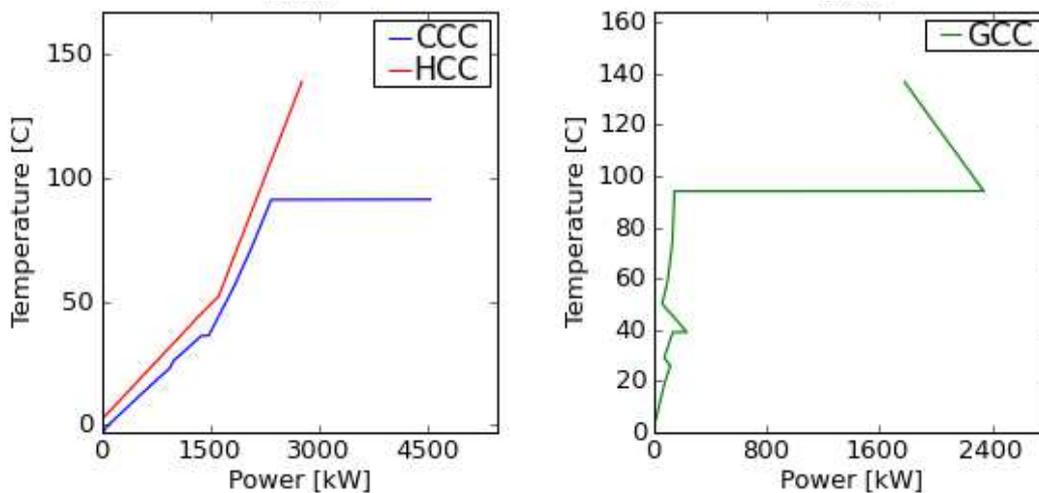


Figura 51: Curva compuesta de calor y frío del proceso antes descrito ($T_{min} = 5 K$)

Tabla 20. Flujos de energía obtenidos como resultado del cálculo:

Flujo N°	Nombre del flujo	Descripción	Temperatura inicial °C	Temperatura final °C	Caliente/ Frío	Entalpía kW	Horas de funcionamiento h/a
1	Precalentamiento de la leche		6	32	Frío	529	2.600
2	Agua de lavado del queso		10	65	Frío	115	780
3	Puesta en marcha de la cuba de fermentación	Calentar la leche de 32 a 45 °C	32	45	Frío	203	2.600
4	Cuba de fermentación durante el funcionamiento	Mantener la temperatura a 45 °C	45	50 (la temperatura para mantener la temperatura de funcionamiento se configura 5 °C más alta para transferir el calor)	Frío	100	5.200
5	Calor residual de la cuba de fermentación	Suero caliente	45	8	Caliente	-753	2.600
6	Precalentamiento del suero en funcionamiento		8	100	Frío	1.376	3.640
7	Evaporación del suero durante el funcionamiento	Evaporación a 100 °C	100	100	Frío	2.200	3.640
8	Calor residual de la evaporación del suero	Agua caliente generada por los condensados	75	4	Caliente	-826	3.640
9	Concentrado de suero después de la evaporación	Concentrado de suero a la salida del evaporador	50	8	Caliente	-98	3640
10	Calor residual sensible de los gases de combustión de la caldera	Calor residual en los gases de combustión de la caldera hasta la temperatura de condensación	140	58	Caliente	-138	5.200
11	Precalentamiento del aire de combustión		25	80	Frío	85	5200

4.3.5 Resultados

4.3.5.1 Estimación del potencial de recuperación de calor basada en el análisis pinch

A partir del pinch análisis se puede efectuar una primera estimación del potencial de recuperación de calor, usando EINSTEIN en modo estimativo ("estimate") para el cálculo de recuperación de calor (Figura 52). El potencial de ahorro en terminus de calor útil de suministro (USH) es de 3.815 MWh.

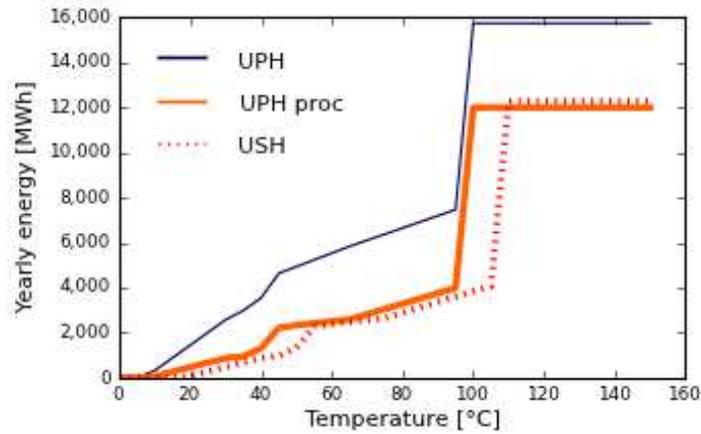


Figura 52: Demanda de calor antes (UPH) y después (UPH_{proc}, USH) de recuperación de calor Heat demand before and after heat recovery. Estimación con EINSTEIN (modo “estimate”).

4.3.5.2 Diseño automático de la red de intercambiadores de calor

El algoritmo de la herramienta EINSTEIN para diseñar los posibles intercambiadores de calor tiene en cuenta criterios como las temperaturas adecuadas para la recuperación del calor, la disponibilidad de calor y buscando parejas de flujos con factores de transporte ($q_m c_p$) similares. Es importante saber que, según criterios termodinámicos, la red de intercambiadores de calor por encima y por debajo del pinch se calcula de forma independiente. La red de intercambiadores resultante varía muy sensiblemente con pequeños cambios en los datos de los procesos que puedan afectar la temperatura pinch. El resultado tal como se muestra en la tabla 21 se ha generado con la configuración del asistente de diseño con los parámetros por defecto.

- Diferencia de temperature mínima = 5K
- Relación entre el ahorro energético y la demanda total de calor: > 1%
- Relación entre el ahorro energético y la potencia del intercambiador > 200 kWh/kW

El dimensionado de los intercambiadores de calor incluye la selección de una acumulación de calor o de frío apropiada (para el caso de flujos no-simultáneos). Para obtener un dimensionado correcto del tamaño de acumulación se requiere una definición correcta de los perfiles de operación en el tiempo (ver capítulo 2.4.3)

Tabla 21. Intercambiadores de calor propuestos

Intercambiadores de calor	Potencia	Flujo caliente	Thi °C	Tho °C	Flujo frío	Tci °C	Tco °C	Acumulación necesaria m ³
Nuevo intercambiador nº 0	529	Calor residual de la cuba de fermentación	45	11	Pre calentamiento de leche	6	32	11,3
Nuevo intercambiador nº 1	722	Condensado de la evaporación del suero	75	13	Pre calentamiento del suero	8	56	0
Nuevo intercambiador nº 2	73	Suero caliente concentrado	50	15	Agua de lavado para el queso	10	45	1,8
Nuevo intercambiador nº 3	85	Gases de combustión caldera	140	58	Pre calentamiento del aire de combustión	25	80	0,7

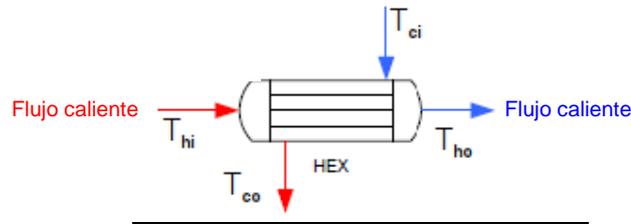


Figure 53: Flujos en un intercambiador de calor

Como es lógico, el calor residual del proceso de evaporación tiene que estar bien integrado en la demanda. Para ello, EINSTEIN sugiere utilizar el nuevo intercambiador nº 1.

Desde el punto de vista exergético, parece razonable utilizar este calor a 75 °C primero para el calentamiento de procesos a niveles de temperatura similares. En segundo lugar tiene sentido utilizar calor residual para precalentar flujos con un flujo de calor específico (factor de transporte $q_m c_p$) similar. Esta estrategia da prioridad a la recuperación de calor interna y asegura que la diferencia de temperatura disponible se utiliza de forma ideal. EINSTEIN sugiere utilizar el condensado caliente del proceso de evaporación para precalentar el suero entrante.

El suero caliente a la salida de fermentación es el segundo flujo en importancia por ser integrado en la red de intercambiadores de calor. La utilización de este flujo es muy interesante desde el punto de vista económico ya que de esta forma se puede reducir también la demanda de enfriamiento: el suero necesita ser enfriado antes de ser acumularlo. Se sugiere utilizar este flujo para el precalentamiento de leche hasta 32°C (intercambiador nº 0). Esto es una solución muy usual en empresas lecheras.

Se sugiere usar el suero caliente concentrado a la salida del evaporador para precalentar el agua de lavado para el queso (intercambiador nº 2). Su rendimiento es bajo en comparación con los demás intercambiadores, pero todavía cumple los criterios mínimos de la configuración del asistente de diseño.

Finalmente se sugiere otro intercambiador de calor para el precalentamiento del aire de combustión de la caldera mediante el enfriamiento de los gases de combustión hasta el punto de rocío. La viabilidad práctica de esta medida y la viabilidad de recuperar además también el calor de condensación depende del tipo de combustible utilizado.

Así pues, EINSTEIN ofrece una primera propuesta consistente en una red de intercambio de calor pensada para conseguir el máximo ahorro de energía. Hay que comprobar si los intercambiadores de calor que propone el asistente de diseño automático son factibles y técnicamente viables atendiendo a la normativa, la distancia física entre los flujos de energía, el espacio necesario o cuestiones de higiene.

Por otra parte, siempre se debería comprobar si todavía existe un potencial para la optimización manual y el ajuste fino de la red de intercambiadores propuesta. En el ejemplo dado el ahorro en calor útil de suministro, obtenido mediante la red de intercambiadores propuesta, es de 4.146 MWh. Este valor ya es casi 10% superior que el valor sugerido por el análisis estimativo del apartado anterior.

Nomenclatura

Abreviaciones y siglas

BCR	relación coste-beneficio
CF	flujo de efectivo
CST	temperatura de suministro central
CHP	producción combinada de calor y electricidad
COP	coeficiente de rendimiento (ratio de calor útil entrante de una conducción energética)
EHD	demanda de calor equivalente
EEI	índice de eficiencia energética
EEI	coeficiente de eficiencia energética (ratio de frío útil entrante de una conducción energética)
EX	gasto neto del proyecto
FEC	consumo total de energía final
FET	consumo de energía final para usos térmicos
FEO	consumo final de energía para otros usos no térmicos
IRR	tasa interna de rendimiento
LCV	poder calorífico inferior
MIRR	tasa interna de rendimiento modificada
NPV	valor actual neto
PBP	plazo de amortización
PEC	consumo total de energía primaria
PEO	consumo primario de energía para otros usos no térmicos
PET	consumo de energía primaria para usos térmicos
PSW	precalentamiento del suministro de agua
PT	temperatura del proceso
QCX	frío residual recuperado
QHX	calor residual recuperado; caudal de calor que hay en los intercambiadores de calor
QWC	frío residual disponible
QWH	calor residual disponible
ST	temperatura de suministro
UPC	frío útil para procesos
UPH	calor útil para procesos
USC	suministro de frío útil
USH	suministro de calor útil

Símbolos

A	área
c	Coeficiente de la curva de eficiencia de recolección
c_p	calor específico
d	tipo de descuento específico de la empresa
E	energía
f	factor de conversión
h	entalpía específica
k	conductividad térmica

m	masa
N	número (p. ej. combustibles)
Q	calor
\dot{Q}	flujo térmico
q_m	caudal másico
r	tipo de interés real de la financiación externa
S	ahorro del proyecto
T	temperatura
t	tiempo
U	coeficiente total de transmisión térmica
α	eficiencia
λ	

Índices

c	circulante, condensado
cs	suministro central
e	efectivo
el	eléctrico
elgen	electricidad de producción propia
env	ambiental
eq	equipos
ESources	fuentes de energía
f	final
fuel	combustibles
fw	agua de entrada
hs	flujo de calor
HX	intercambiador de calor para recuperación del calor
i	entrada, entrante, índice utilizado para las fuentes de energía (tipo de combustible, electricidad)
j	índice utilizado para los equipos térmicos
L	calor latente (utilizado para evaporación (+), condensación (-), y reacciones químicas endotérmicas o exotérmicas)
m	índice utilizado para la distribución de tuberías o conductos
o	salida, saliente
op	en funcionamiento
p	proceso
pi	proceso de entrada
pir	proceso de entrada tras recuperación del calor
po	proceso de salida
por	proceso de salida tras recuperación del calor
pt	objetivo proceso
PE	energía primaria
PS	proceso de suministro
m	mantenimiento
min	mínimo
ref	referencia
ret	retorno
s	puesta en marcha
tch	refrigerador térmico
w	residual

Anexo: Cuestionario básico EINSTEIN