

BASES TERMONECONOMICAS DEL AHORRO DE ENERGIA

Antonio Valero Capilla

Dpto. de Termodinámica y Físico-química

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

Universidad de Zaragoza.

1. INTRODUCCION

En un artículo anterior⁽¹⁾, veíamos la conveniencia de realizar un análisis exergético más que energético de los procesos de producción con vistas a ahorrar energía.

Veíamos que la causa real de que haya pérdidas exergéticas eran las irreversibilidades de los procesos de transformación energética. Así veíamos que las pérdidas innecesarias de calor, los elevados saltos térmicos, todas las faltas de lubricación, así como los procesos de mezcla, incluidos los de polución, eran la causa real de la pérdida de rendimiento en estos procesos.

Por ello se recomendaba realizar auditorías exergéticas de las empresas, más que energéticas.

El objeto del presente artículo es profundizar más en esta idea y ver la relación que tiene la Exergía con la Economía del ahorro de energía.

2. FUNDAMENTOS DE LA AUDITORIA EXERGETICA. AHORRO TERMODINAMICO DE ENERGIA.

Supongamos una empresa determinada que compra energía del exterior, que produce un determinado producto (sólo uno por el momento) y que vende parte de la energía residual que produce.

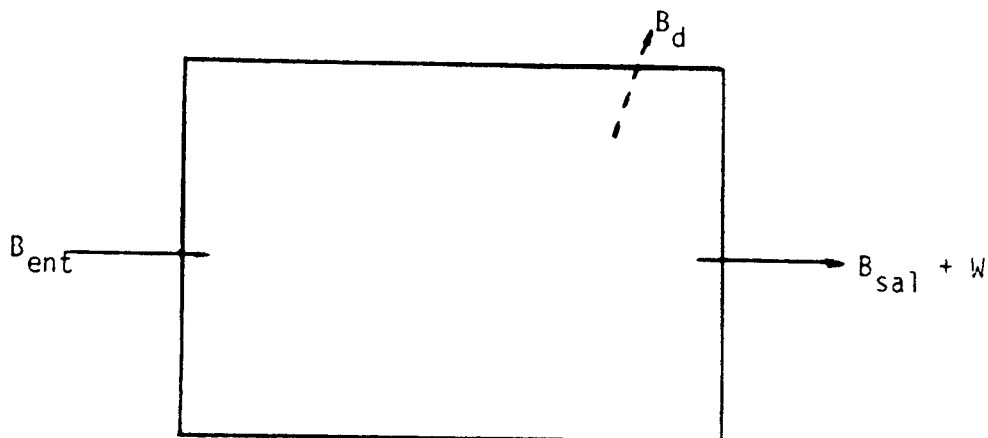


Fig. (1)

Realizando un balance de exergía global del sistema podremos poner:

$$B_{ent} = B_{sal} + W + B_d \quad (I)$$

Donde B_{ent} es la exergía que adquirimos del exterior, que puede calcularse fácilmente sabiendo la cantidad y tipo de energía comprada.

B_{sal} es la exergía que vendemos, que puede evaluarse de la misma forma que la anterior.

W es el contenido exergético del producto producido, y que puede evaluarse independientemente del tipo de proceso de producción llevado a cabo para obtenerlo, siendo el trabajo mínimo necesario para fabricarlo*.

B_d : es la exergía destruida en el proceso de producción, que puede calcularse por diferencia entre la exergía que entra y la que sale de la ecuación (I) anterior.

A partir de este análisis, ya podemos establecer una auditoría global de la empresa, obteniendo el rendimiento exergético de producción como

$$\begin{aligned} \eta &= (\text{Exergía producida}) / (\text{Exergía consumida}) = \\ &= (B_{sal} + W) / B_{ent} = (B_{ent} - B_d) / B_{ent} = \\ &= 1 - B_d / B_{ent} \end{aligned} \quad (II)$$

* Este concepto lo desarrollaremos más adelante en un artículo posterior.

Siendo B_d/B_{ent} la pérdida de rendimiento global que se tiene al acometer dicho proceso de producción.

Lógicamente si todo funcionara perfectamente -perfecta lubricación, máquinas perfectas, intercambiadores de calor ideales, etc.- obtendríamos que B_d sería nulo con lo que el rendimiento exergético sería del 100%.

Pero sabemos que esto no es así, debido a las irreversibilidades que se producen en el proceso, -por otra parte necesarias muchas veces-. Es por ello que $B_d \neq 0$, y justamente vale (véase (1)):

$$B_d = T_a S_g \quad (III)$$

siendo T_a la temperatura ambiente en el momento de realizar la auditoría y S_g la entropía generada por todas las irreversibilidades generadas en la producción.

Ahora bien la entropía es una cantidad aditiva de tal manera que S_g estará compuesta de tantos sumandos como irreversibilidades existan en el proceso, y cada sumando dará cuenta proporcionalmente de la magnitud de la irreversibilidad considerada. Así que

$$S_g = \sum_{j=1}^M S_{g,j} \quad (IVa)$$

o bien

$$B_d = \sum_{j=1}^M T_a S_{g,j} = \sum_{j=1}^M B_{d,j} \quad (IVb)$$

siendo M el número de irreversibilidades existentes, $S_{g,j}$ y $B_{d,j}$ la entropía generada y la exergía perdida en la irreversibilidad i .

Pero por otra parte, estas irreversibilidades se generan en los distintos subprocesos y/o aparatos de que consta la instalación en estudio, por tanto podemos reagrupar los valores de $B_{d,j}$ más que por irreversibilidades, por aparatos, o por subprocesos, o por cualquier otro criterio, de tal manera que definamos por ejemplo, exergía destruida en el aparato i , $B_{d,i}$, como

$$B_{d,i} = \sum_{j=1}^{M_i} B_{d,j} \quad (V)$$

siendo M_i todas las irreversibilidades que se dan en el aparato i .

Por ejemplo en un generador de vapor, i , $B_{d,i}$ sería la suma de la exergía perdida por el proceso de combustión, más la pérdida por humos, más la pérdida por transmisión de calor, etc.

Así pues la ecuación (IVb) podemos ponerla como

$$B_d = \sum_{i=1}^N B_{d,i} \quad (VI)$$

siendo N el número de aparatos de la empresa en cuestión, o bien el número de subprocesos, o cualquier otro criterio similar, y el rendimiento exergético de toda la planta será ahora:

$$\kappa = 1 - B_d/B_{ent} = 1 - \sum_{i=1}^N (B_{d,i}/B_{ent}) \quad (VII)$$

Esta ecuación ahora podemos interpretarla como que la pérdida de rendimiento exergético de un proceso de producción (B_d/B_{ent}) es igual a la suma de las pérdidas de rendimiento exergético de cada uno de los aparatos o subprocesos que componen ese proceso de producción ($B_{d,i}/B_{ent}$)

Nótese que esto no puede decirse del rendimiento energético ya que no tiene el mismo "valor" la energía eléctrica que la energía que llevan unas aguas residuales por ejemplo, aunque su contenido energético sea el mismo.

La ecuación (VII) tiene una importancia fundamental pues nos permite cuantificar y discernir cuales son las causas reales de pérdida de rendimiento, asignándole un valor correcto a su verdadero peso dentro de la instalación.

Además nos da un criterio de análisis de la instalación ya que podemos decir que la Auditoría Exergética de una instalación es la Suma de las Auditorías Exergéticas de cada uno de los subprocesos que componen el proceso de producción.

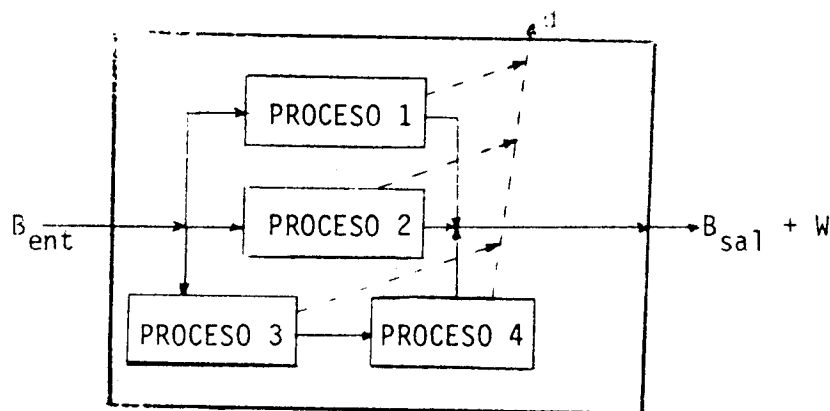


Fig. 2: El análisis exergético de cada uno de los procesos que componen una instalación permite valorar su contribución a la pérdida global de rendimiento de la instalación, por pérdidas separadas.

3. AHORRO TECNICO DE ENERGIA. EXERGIA PERDIDA RECUPERABLE.

Supongamos ahora que se ha realizado la auditoría exergética de una empresa, habiéndose calculado todos los valores de $B_{d,i}$ para cada uno de los aparatos que componen su instalación.

Los valores de $B_{d,i}$ representan todo el despilfarro termodinámico de exergía que hay en la instalación, por tanto representan TODO EL AHORRO DE ENERGIA (Exergía) QUE PUEDE OBTENERSE.

Pero no todo el ahorro de energía termodinámicamente posible puede ser ahorrado técnicamente. En efecto los sistemas tienen una realidad física que impone unas condiciones al diseño de los aparatos, de tal modo que estas irreversibilidades intrínsecas al diseño NO pueden ser consideradas como posibilidades de ahorro de energía.

Esto, lejos de ser una objeción al análisis exergético es una aportación al mismo.

El análisis exergético nos da el máximo ahorro de energía que es posible termodinámicamente en las condiciones reales de una instalación, y en cada uno de los aparatos que componen la misma.

Por tanto siempre podremos comparar el Balance Exergético de la instalación en funcionamiento real respecto del Balance en condiciones de diseño de la planta, con cuyo análisis, por pérdidas separadas, podremos obtener el ahorro técnicamente posible en dicha instalación. Es decir

$$\begin{aligned}
 \text{Ahorro Técnico Posible} &= \text{Ahorro Termodinámico Posible Instalación Real} - \text{Ahorro Termodinámico Posible Instalación en condiciones de diseño} \\
 &= (1 - \kappa_{\text{real}}) - (1 - \kappa_{\text{diseño}}) = \frac{\sum B_{d,i}}{B_{\text{ent}}} \Big|_{\text{real}} - \frac{\sum B_{d,i}}{B_{\text{ent}}} \Big|_{\text{diseño}} \\
 &= \frac{\sum (B_{d,i}^R - B_{d,i}^D)}{B_{\text{ent}}} = \frac{\sum \Delta B_d^D}{B_{\text{ent}}} \quad \text{(VIII)}
 \end{aligned}$$

siendo $B_{d,i}^R$ y $B_{d,i}^D$ las exergías perdidas por cada aparato en condiciones reales y de diseño respectivamente.

El término ΔB_d^D lo llamaremos Exergía Perdida Recuperable respecto a las condiciones de diseño.

Este nuevo análisis nos permitirá ver como influye realmente un aparato en mal funcionamiento sobre todos los demás de la instalación y respecto de las condiciones de diseño. O bien nos permitirá ver la verdadera "derrota" de un aparato respecto a sus condiciones base de funcionamiento, y lo que influye su mal funcionamiento

sobre el rendimiento de la instalación, etc.

4. CONCEPTO DE NIVEL DE DISEÑO

Ahora bien, de la misma manera que hemos prefijado la situación de diseño de la instalación en el punto en que todos y cada uno de los aparatos estaban diseñados y listos para trabajar, también podríamos haber considerado una situación posterior -o anterior- de funcionamiento, y haber referido los balances a esa situación (por ejemplo al 1 de enero de 1982).

En cada uno de los casos obtendremos una situación de ahorro de energía técnicamente alcanzable distinta.

Veamos un ejemplo:

Supongamos que disponemos de gasolina (energía química) y queremos procesarla para convertirla en energía cinética. Es decir queremos construir un automóvil.

La primera decisión, al más alto nivel, será la de que si éste combustible se debe quemar en combustión fría (célula de combustible) o combustión caliente (motor térmico).

Supongamos que hemos elegido la segunda. Evidentemente tiene menor rendimiento, aunque es más viable que la primera; por tanto ya hemos desechado un porcentaje de exergía que no será posible transformar. Al elegir y por tanto al diseñar perdemos opciones de ahorro de energía.

Pero volvamos al ejemplo.

Ya hemos elegido la combustión caliente, procedimiento y ahora volvemos a elegir el tipo de proceso o ingeniería. En este caso elegimos un ciclo Otto, en vez de un ciclo Diesel u otros posibles.

También aquí se pierden opciones de rendimiento.

Ahora elegimos la circuitería asociada al procedimiento, es decir si el motor será de dos o cuatro tiempos, qué tipo de embrague, qué tipo de aerodinámica, etc. Nuevamente hemos perdido opciones de rendimiento ya que la economía nos aconseja que no conviene extremar las decisiones. Por tanto habrá un porcentaje de exergía, ahora mayor ya que se suman los anteriores, que no podrá ser recuperado.

Ya tenemos el automóvil "diseñado" y listo para ser comprado. Y ahora su dueño podrá o no ahorrar energía según el control y mantenimiento a que someta su automóvil. Será por tanto esta decisión importante pero está claro que influirá menos que las anteriores.

Finalmente, este coche más o menos bien mantenido, si no se le somete a excesiva velocidad, o paradas o acelerones bruscos, etc., es decir si las actitudes del conductor son adecuadas el ahorro de combustible será tanto mayor.

Una serie de consecuencias lógicas podemos obtener de este análisis:

TABLA :

NIVEL DE DISEÑO Y ACCIONES ASOCIADAS PARA AHORRAR ENERGÍA (*)

Nivel de diseño	Clave	Tipo de acción para Ahorrar Energía	Plazo de la Acción	Tipo de inversión	ϵ	β
I	Actitudes	Psicológica sobre los operadores. Cursos Propaganda, Concursos, etc.	Inmediata	Muy baja	▲	▲
II	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo: limpiezas, re-glajes, etc.	Corto plazo	Baja		
III	Circulteria	Mejora de operaciones: recuperadores, automatizaciones, etc.	Corto plazo	Media		
IV	Ingeniería	Mejora de procesos: Procesos continuos en vez de discontinuos, por ej. transporte ferrocarril en vez de automóvil	Medio plazo	Medio-grande		
V	Energía total	Interconexión de muchas utilizaciones acopladas de la Energía	Medio-Largo Plazo	Grande		
VI	Procedimiento	Utilización de procedimientos más eficientes energéticamente, por ej. células de combustible, gasificación carbón, etc.	Largo plazo	Muy grande		
VII	Socio-política	Reducción psico-sociológica de los consumos. Bicicleta, Arquitectura Solar, etc.	Muy largo plazo	-		

(*) Tabla propuesta en base a las ideas de R. Le Goff (3)

- 1°) - Cuanto menor es la capacidad de decisión del responsable de ahorro de energía, menores son sus posibilidades de ahorrarla.

Es por ello necesario por ejemplo que el Coordinador Energético de una Empresa, o de un Estado, dependa del más alto nivel posible de dirección.

- 2°) - Cuanto más elevada es una planificación energética mayor ahorro de energía puede conseguirse. No obstante existen oportunidades a todos los niveles de ahorrar energía.

La cuantificación de estas oportunidades nos la da el concepto de Exergía Perdida Recuperable que hemos explicado antes.

- 3°) - Podemos definir tantos "Niveles de Diseño" como niveles de decisión tengamos.

La tabla de la página siguiente define el "nivel de diseño" y lo relaciona con el tipo de intervención que puede realizarse para ahorrar energía.

De acuerdo con la Tabla (I), definiremos Ahorro de Energía Técnicamente posible en nivel de diseño D para un aparato en una instalación determinada ΔB_d^D , como el valor que toma la Exergía Perdida Recuperable en nivel de diseño D, es decir:

$$\begin{array}{l} \text{Ahorro de Energía en} \\ \text{nivel de diseño D} \\ \text{técnicamente posible} \end{array} = \Delta B_d^D = B_d^0 - B_d^D \quad (IX)$$

siendo B_d^0 la Exergía perdida por el aparato en condiciones reales de funcionamiento y B_d^D la perdida o perdible por el sistema cuando éste está diseñado en nivel D. D puede valer I, II... hasta VII de acuerdo con la definición de la tabla anterior.

Naturalmente, hemos de decir que el concepto de nivel de diseño no es un concepto definitivo que implique definiciones estancas y excluyentes, resulta más bien una ayuda para la clasificación y cuantificación de los ahorros de energía. Así en algunos casos pueden aparecer inversiones sobre el orden propuesto en la tabla (1).

De cualquier manera, a la hora de hacer la auditoría exergética de una empresa habrá que definir muy precisamente las condiciones base de funcionamiento sobre las que se van a calcular las Exergías Perdidas Recuperables, ya que sino no se podría cuantificarlas.

Si podemos cuantificarlas y si disponemos de los datos medidos necesarios "on line" recogidos por un ordenador podremos obtener en todo momento, todos y cada uno de los rendimientos de los aparatos que componen la instalación. Con lo que dispondremos en todo momento de la Auditoría Energética de la situación real de la planta, a través de un ordenador.

5. AHORRO ECONOMICAMENTE OPTIMO

Una de las consecuencias más importantes del apartado anterior es que el objetivo que debe perseguir la auditoría exergética de una planta es poder cuantificar el Ahorro de Energía Técnicamente Alcanzable, es decir, la Exergía Perdida Recuperable en cada uno de los aparatos que compone dicha instalación.

Para lo cual será necesario especificar rigurosamente las condiciones base de funcionamiento para cada uno de los procesos -si se hace el análisis a nivel de procesos- o para cada uno de los aparatos que componen la instalación- si se hace el análisis más profundo sobre los aparatos que componen los procesos-.

Una vez especificadas las condiciones base se calcularán los balances exergéticos sobre los aparatos o los procesos en condiciones base y en condiciones actuales de funcionamiento. La diferencia entre la exergía perdida actual menos la perdida de base nos dará para cada aparato, el Ahorro de Energía que se puede alcanzar sobre esas condiciones base.

Si ya hemos realizado estos análisis en una planta determinada, ya disponemos de los valores de las Exergías Perdidas Recuperables para cada una de las unidades elementales -aparatos- que componen la instalación, es decir $\Delta B_{D,i}^D$,

Lógicamente, el análisis de estos valores nos dirá que hay que actuar primero sobre aquellos aparatos cuya Exergía Perdida Recuperable sea mayor. Dirá, por ejemplo, que hay que actuar sobre una caldera de vapor, o sobre una fuga de vapor, antes que sobre un pequeño motor.

Ahora bien, ¿son los valores de $\Delta B_{D,i}^D$ suficientes para ordenar las Acciones de Ahorro de Energía que deben emprenderse en la empresa auditada?

Evidentemente, no, porque como sabemos son cuestiones económicas y de rentabilidad las que proporcionan los Criterios de ordenación de las Operaciones de Ahorro de Energía.

Por ejemplo, supongamos que disponemos del valor de la exergía perdida recuperable de una caldera de vapor de una instalación. Si reglamos cada cierto tiempo el exceso de aire, esta operación de Ahorro de Energía es barata y los resultados son positivos. Si instalamos, ahora, un control registrador de temperatura de humos y actuamos más frecuentemente sobre los parámetros de la caldera, habremos ahorrado más Energía pero habremos invertido más que antes. Si la información del control registrador es procesada continuamente por un ordenador que automáticamente regule las condiciones óptimas de combustión habremos llegado a recuperar prácticamente toda la Exergía Perdida Recuperable de esa caldera de vapor, si bien a costa de una inversión muy elevada.

Este análisis puede generalizarse para todos y cada uno de los aparatos que compongan cualquier instalación, de tal manera que podemos obtener una ley totalmente empírica que nos relaciona el Ahorro de Energía Técnicamente Alcanzable con la Inversión necesaria para obtenerlo.

Esta ley nos dice que el Ahorro de Energía "A" que se obtiene cuando actuamos sobre un aparato es una función exponencial de la inversión "P" realizada para obtener dicho ahorro, del tipo:

$$A = \beta(1 - e^{-\epsilon P}) \quad (X)$$

Donde β es el máximo ahorro de energía que se obtendría si la inversión tiende a infinito. Graf. (3). Lógicamente en nuestro caso β coincide con ΔB_d y en general será la Exergía Perdida Recuperable en las condiciones en que se haga el análisis económico.

" ϵ " la definimos como elasticidad o flexibilidad de la operación de ahorro de energía. Las unidades de "A" son unidades de energía (Kcal, Kwh) al igual que " β ", mientras que las unidades de "P" son unidades monetarias (ptas.) y las de " ϵ " (ptas.)⁻¹

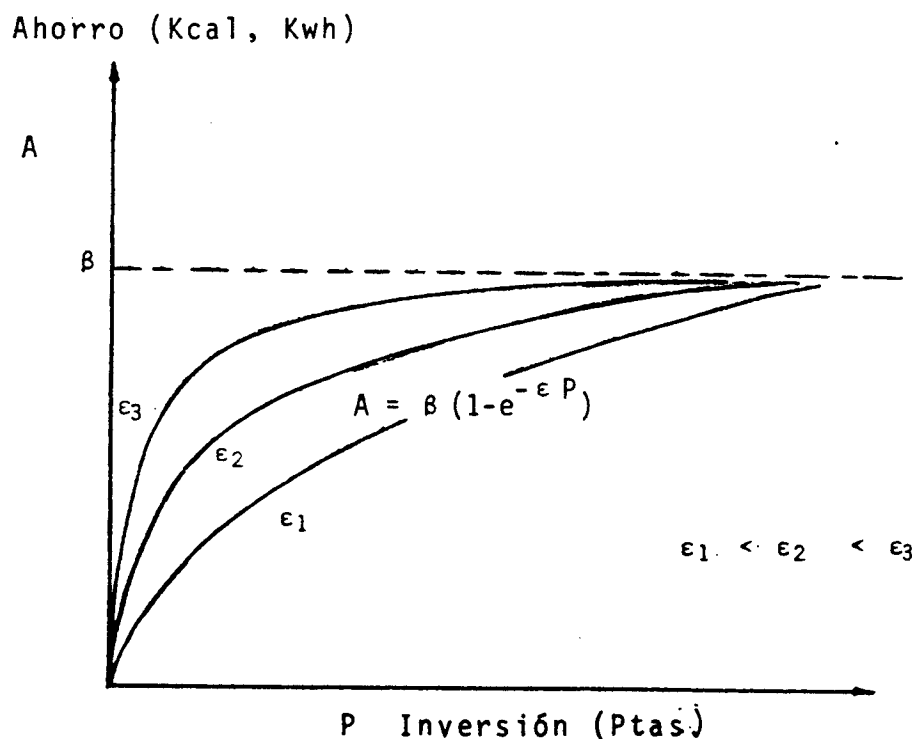


Fig. (3) . Curva Ahorro-Inversión.

La elasticidad " ϵ " mide la rapidez con que la curva Ahorro-Inversión alcanza su valor asintótico β .

Las operaciones de ahorro de energía con elevada elasticidad son muy rentables. Por tanto aquí tenemos un nuevo criterio para la ordenación de las operaciones de ahorro de Energía. Las operaciones que primero se realizarán son las que presenten mayor elasticidad.

A la luz de estos resultados, volvamos a la Tabla(I), en ella se ve que cuanto menores son las oportunidades de ahorro (niveles de diseño bajos) más fácil es ahorrar. Así un conductor modificando sus hábitos de conducción puede ahorrar un porcentaje que siempre será mucho más pequeño que el que potencialmente puede obtener un ingeniero diseñando un coche más optimizado y esté a su vez menos que lo que un científico conseguiría si venciera los problemas de las células de combustible, y así sucesivamente.

Sin embargo, es más barato porque es más elástico ahorrar a nivel de conducción que a nivel de ingeniería, etc.

Desafortunadamente, ocurre que al aumentar el nivel de diseño aumentamos nuestras posibilidades de ahorro de energía pero la elasticidad de estas posibilidades disminuye así que:

$$\begin{array}{ccccccc} \beta^I & < & \beta^{II} & < & \dots\dots\dots & < & \beta^{VII} \\ \epsilon^I & > & \epsilon^{II} & > & \dots\dots\dots & > & \epsilon^{VII} \end{array}$$

Esta situación nos lleva a que la ordenación de las operaciones de ahorro de energía depende tanto de β como de ϵ . Debe encontrarse un Óptimo económico de la curva Ahorro-Inversión.

La búsqueda de este óptimo económico se puede realizar a través de un análisis marginal, que es bien conocido en la literatura económica y no entraremos aquí en ello por la brevedad del artículo.

No obstante es importante decir que existirán tantos Óptimos como posibles criterios de análisis económico quiera utilizar el responsable en la toma de decisiones.

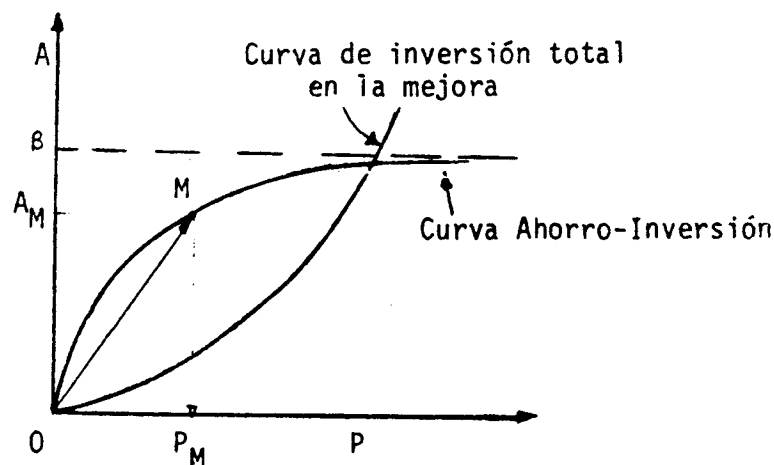


Fig.(4)

Ahora podemos definir Ahorro de Energía Económicamente Rentable como el Ahorro Óptimo Económico, " A_M " obtenido al realizar el análisis marginal con un criterio M determinado sobre la curva Ahorro-Inversión.

El valor de P_M será la inversión óptima a realizar para alcanzar el ahorro A_M

6. AHORRO DE ENERGIA E INVERSION OPTIMOS EN UNA INSTALACION.

Tanto el Ahorro Técnicamente Alcanzable, β , como el Ahorro Económicamente Rentable, A_M , han sido definidos para un aparato "i" determinado y sobre unas condiciones base de diseño "D" prefijadas.

Por tanto el análisis marginal habrá de ser realizado para todos los aparatos que componen la instalación, obteniéndose así todos los valores $(A_{M,i}, P_{M,i})$.

Puede ocurrir en algunos casos que los valores de $(A_{M,i}, P_{M,i})$ sean nulos, esto querrá decir que no es rentable ahorrar en el aparato "i" en este nivel de diseño.

El mejor de los casos que se puede presentar es cuando se consiga un buen ahorro con una baja inversión. Es decir, elevado $A_{M,i}$ con bajo valor de $P_{M,i}$. Lógicamente esta será la primera operación de Ahorro de Energía que se ha de emprender.

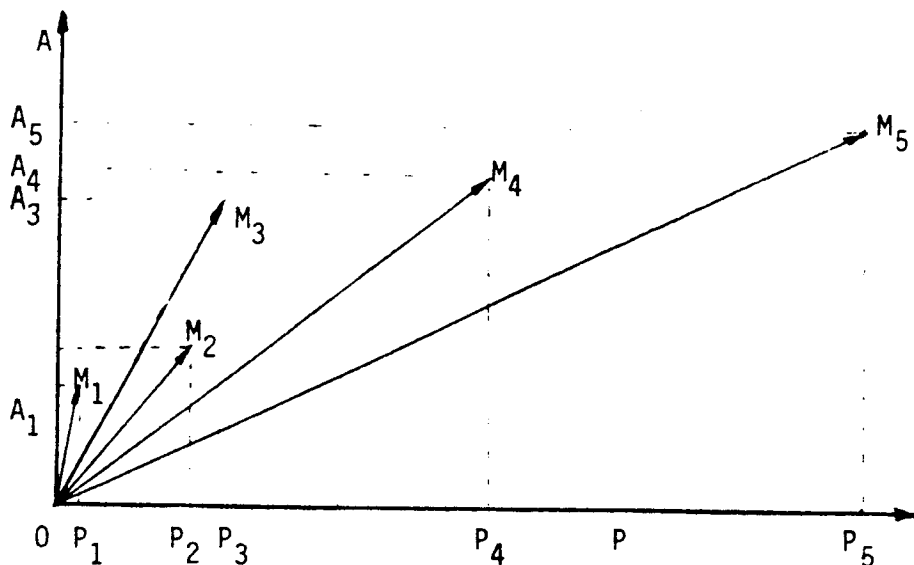


Fig. (5)

Pero como ya hemos dicho antes, suele ocurrir que las inversiones más rentables también son aquellas que dan menores ahorros de energía, así que:

si $P_1 < P_2 < P_3 \dots\dots\dots$

entonces $A_1 < A_2 < A_3 \dots\dots\dots$

Los vectores $(A_{M,i}, P_{M,i})$ están representados en la gráfica (5). En ella se ve un caso especialmente interesante y es: que a pesar de que la operación 3 requiere más inversión que la 2, sin embargo debe realizarse antes que la 2 ya que proporciona mejores resultados que la 2.

Esta idea nos da un criterio definitivo para la ordenación de las operaciones de Ahorro de Energía. Esta es que "Deben ordenarse las operaciones de ahorro de energía según el orden de mayor a menor cociente $A_{M,i}/P_{M,i}$ ".

Llamando $t_{g\alpha i} = A_{M,i}/P_{M,i}$, el orden de las operaciones de ahorro para el ejemplo de la figura (5) será:

Op. 1 antes que Op. 3 antes que Op. 2 antes que Op. 4

Ya que: $\alpha_1 > \alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_4 \dots\dots$

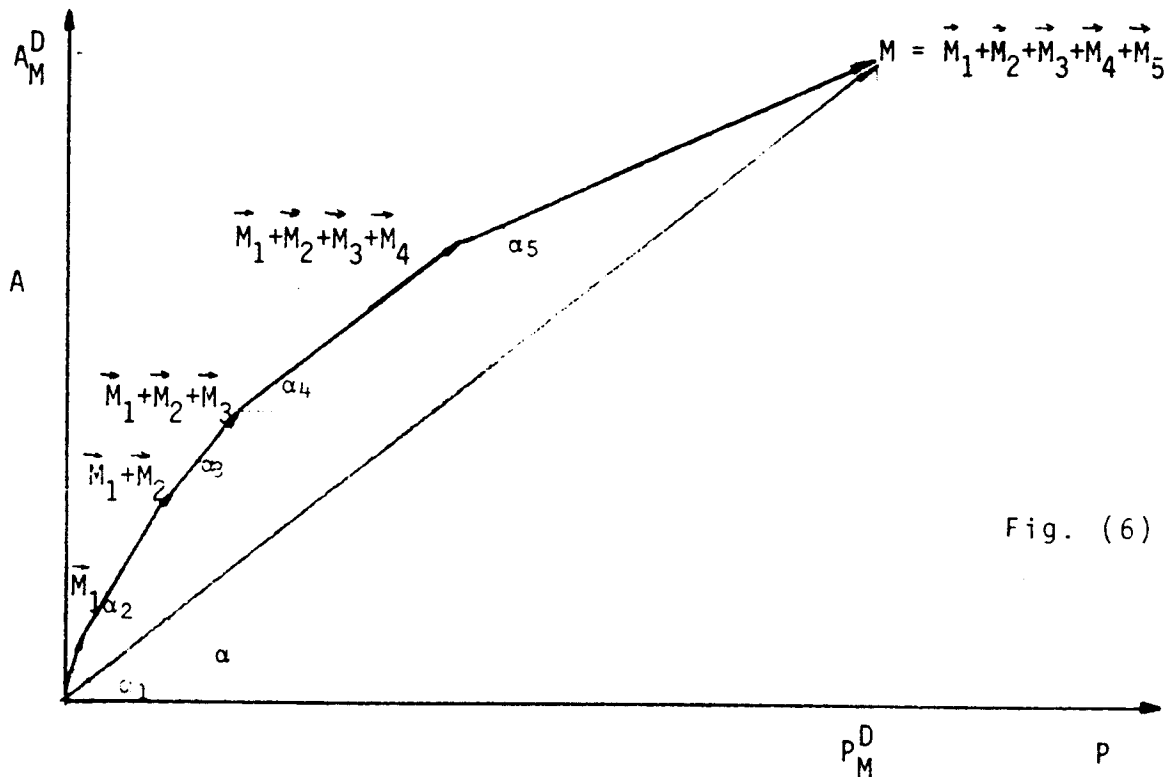


Fig. (6)

Y la suma de todas las operaciones, ordenadas según este criterio, nos dará ahora el ahorro total de energía óptimo económico A_M^D que puede obtenerse de la auditoría en cuestión, así como la inversión P_M^D que hay que realizar sobre la base de diseño D y el criterio económico M.

O sea:

$$A_M^D = A_{M,1} + A_{M,3} + A_{M,2} + A_{M,4} + \dots\dots$$

$$P_M^D = P_{M,1} + P_{M,3} + P_{M,2} + P_{M,4} + \dots\dots$$

Gráficamente esto equivale a sumar ordenadamente los vectores $M_1, M_3, M_2, M_4, \dots$ y se representa en la figura (6) de arriba.

7. GENERALIZACION DE LAS CURVAS AHORRO DE ENERGIA - INVERSION.

La forma de la gráfica (6) y los resultados anteriores sugieren el hecho de que se puede asociar a toda la instalación una curva Ahorro-Inversión cuyo óptimo económico se encuentra en el punto M^D y su β^D asíntota es la suma de todas las exergías perdidas recuperables β_i para todos los aparatos de la instalación.

Por tanto será fácilmente calculable la elasticidad ϵ^D de la operación total, ya que

$$\text{si } A_M^D = \beta^D (1 - e^{-\epsilon^D P_M^D})$$

$$\text{entonces } \epsilon^D = - (1/P_M^D) \ln (1 - A_M^D / \beta^D)$$

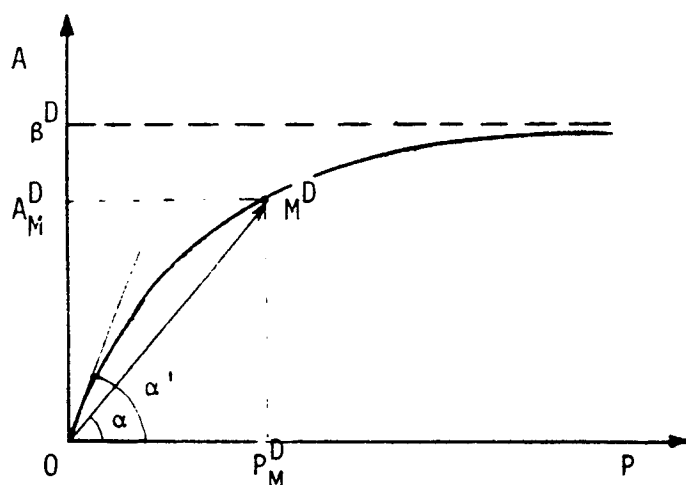


Fig. (7)

El conocimiento de ϵ^D nos permitirá comparar instalaciones entre sí obteniendo las consecuencias pertinentes.

Un estudio interesante se plantea cuando cambiamos de nivel de diseño para pasar a $D+1$; en este caso como sabemos:

$$\beta^D < \beta^{D+1} \quad \text{y} \quad \epsilon^D > \epsilon^{D=1}$$

obtendremos un nuevo óptimo económico M^{D+1} , y si esta operación puede evaluarse para todos los niveles de diseño que admita una instalación obtendríamos una nueva curva Ahorro-Inversión cuyo sentido tendría validez "técnica", "científica" o "política", según el grado de magnitud de las inversiones así como de las acciones que deban llevarse a cabo para conseguir esos ahorros.

8. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Una forma equivalente a las curvas Ahorro-Inversión aquí descritas fue obtenida empíricamente por F. Alegría y cols.(2) en el Centro de Estudios de la Energía de España. En este estudio se analizan monográficamente trece sectores industriales de España correlacionándose el porcentaje de ahorro de energía primaria sobre el total de energía primaria consumida por el sector, frente a la Inversión que supone conseguir estos ahorros.

Estas curvas que presentan una forma gráfica idéntica a la curva propuesta en este artículo, pueden ajustarse por un procedimiento de mínimos cuadrados no lineal a una expresión analítica del tipo

$$A^{\circ} = \beta^{\circ}(1 - e^{-\epsilon P}) \quad (XI)$$

siendo " A° " el porcentaje de ahorro de energía primaria sobre el total de la energía primaria " E_p " consumida por el sector, cuando se invierten " P " ptas. Mientras que β° es el valor asintótico de la curva que se consigue cuando P tiende a infinito.

Debido a que la energía primaria " E_p " prácticamente coincide con la exergía primaria " B_p ", -la energía de los combustibles es casi exergía pura- podremos relacionar A° con A y β° con β en la forma:

$$A(100/B_p) \approx A(100/E_p) \approx A^{\circ}$$

$$\beta(100/B_p) \approx \beta(100/E_p) \approx \beta^{\circ}$$

De la misma manera podemos definir ϵ° y P° como

$$\epsilon^{\circ} = \epsilon \cdot E_p$$

$$P^{\circ} = P/E_p$$

siendo las unidades de ϵ° Ktep/Kpts (10^3 toneladas equivalentes de petróleo en energía primaria por cada mil pesetas) y las de P° las unidades inversas de ϵ° .

Evidentemente

$$\epsilon^{\circ} P^{\circ} = \epsilon P$$

Por tanto podemos poner de una forma muy conveniente las ecuaciones (X) y (XI) como:

$$A^{\circ} = \beta^{\circ}(1 - e^{-\epsilon^{\circ} P^{\circ}}) \quad (XII)$$

Los resultados del ajuste por mínimos cuadrados no lineal de las curvas obtenidas por F. Alegría y cols. se presentan en la Tabla (II). La calidad de los ajustes obtenidos viene dada por la desviación standard asociada definida como:

$$\sigma = \frac{\sum (A^{\circ}_{calc,i} - A^{\circ}_{exp,i})^2}{N}$$

siendo N el número de datos de la muestra y $A^{\circ}_{calc,i}$ y $A^{\circ}_{exp,i}$ los va-

TABLA (I I)

Comprobación experimental de la Ley de Ahorro de Energía-Inversión

Fuente: F. Alegría y cols.; Técnicas Energéticas en la Industria, vols. I-XIII

Centro de Estudios de la Energía, España. (Datos referidos a 1976-1978)

SECTOR	ENERGIA PRIMARIA CONSUMIDA POR EL SECTOR (Tep/año)	Nº INSTALACIONES ENCUESTADAS EN EL SECTOR	VALORES OBTENIDOS EN EL AJUSTE POR MINIMOS CUADRADOS				
			β^0 (%)	ϵ^0 (Ktep/Kpts.) ⁻¹	ϵ (Mill.pts.) ⁻¹	$\frac{\beta^0 \epsilon^0}{100}$	DESVIACION STANDARD (unidades de β^0)
ACEITES (consumo 2-10 Tep)	64 000	14	9.64	2.43	0.038	0.23	0.435
ACEITES (consumo > 10 Tep)	101 000	3	11.48	3.03	0.030	0.35	0.438
ALIMENTICIAS	51 873	9	3.70	6.74	0.130	0.19	0.124
BEBIDAS (ALCOHOLES-CARBONICAS)	65 169	16	12.58	3.32	0.051	0.42	0.274
BEBIDAS (CERVEZAS)	77 005	14	5.33	9.24	0.120	0.49	0.090
CERAMICA (LADRILLOS)	236 000	73	11.17	3.30	0.014	0.37	0.342
CERAMICA (AZULEJOS)	194 000	37	7.35	1.17	0.009	0.09	0.221
ELECTRICIDAD (GLOBAL)	13 688 944	42	0.30	125.9	0.009	0.38	0.026
ELECTRICIDAD (1a. muestra)	11 477 900	27	0.26	183.6	0.016	0.48	0.013
ELECTRICIDAD (2a. muestra)	2 211 044	15	0.54	79.6	0.036	0.43	0.087
LACTEAS	39 000	10	8.75	3.12	0.080	0.27	0.054
PAPEL Y CARTON	339 303	40	9.76	1.19	0.004	0.12	0.261
QUIMICA ORGANICA	367 219	22	11.47	2.21	0.006	0.25	0.234
QUIMICA INORGANICA	345 000	18	6.13	3.80	0.011	0.23	0.231
SIDERURGIA	124 700	19	4.25	4.23	0.023	0.18	0.187
TEXTIL	112 215	22	17.59	0.55	0.005	0.10	0.358
TRANSFORMADOS METALICOS	281 988	19	5.93	3.53	0.013	0.21	0.237
VIDRIO	114 500	16	9.38	2.12	0.019	0.20	0.301

lores calculado y experimental del dato i.

Como puede verse en la Tabla (II) las desviaciones standard son siempre menores de un 10% del valor de β^0 obtenido en el ajuste.

Este resultado nos confirma experimentalmente la validez de la Ley de Ahorro de Energía-Inversión expresada matemáticamente con las fórmulas (X) y (XII).

Estos datos fueron tomados entre 1976-1978, por lo que especialmente sus parámetros económicos deben ser actualizados al año en curso con objeto de asignar validez cuantitativa a los resultados del ajuste.

Como hemos explicado en el apartado 6, una vez obtenidos los valores de β y ϵ para el conjunto de posibles candidatos a realizar operaciones de Ahorro de Energía, el problema que se plantea ahora es ORDENAR esas acciones.

Para ello necesitamos un criterio -ahora político más que económico- para obtener los óptimos económicos y proceder en consecuencia con el apartado anterior.

No obstante, al no disponer de ese criterio es interesante proponer un criterio alternativo que consiste en suponer que el valor de las pendientes, en el origen las distintas curvas Ahorro de Energía-Inversión, presenta la misma secuencia que los vectores de óptimo económico de dichas curvas.

Es decir que si la secuencia real (con el análisis de óptimo económico ordena las acciones de Ahorro según:

$$\text{tg}\alpha_1 > \text{tg}\alpha_2 > \text{tg}\alpha_3 \dots\dots\dots$$

Se supone que también se conservaría la secuencia con las tangentes en el origen de las curvas Ahorro de Energía-Inversión, es decir:

$$\text{tg}\alpha'_1 > \text{tg}\alpha'_2 > \text{tg}\alpha'_3 \dots\dots\dots (\text{ver Fig. (7)})$$

siendo

$$\text{tg}\alpha' = (dA/d\beta)_{p=0} = \beta\epsilon$$

Esta elección presenta la ventaja de que ya no es necesario realizar el análisis marginal para saber Quien debe ser primero en las acciones de Ahorro de Energía. Relegándose este análisis para responder a la pregunta de ¿hasta dónde debe llevarse a cabo dicho proceso?

Se demuestra fácilmente que

$$\text{tg}\alpha' \equiv \beta\epsilon = \beta^0\epsilon^0/100$$

En la tabla (II) aparecen los valores de $\text{tg}\alpha' \equiv \beta^0\epsilon^0/100$, como puede verse son los sectores de Bebidas y Eléctrico los que mayores valores de $\text{tg}\alpha'$ presentan (~0.45) mientras que los sectores Textil y Papel y Cartón (~0.11) presentan las peores expectativas de acciones de Ahorro de Energía.

Lógicamente, las acciones de ahorro de energía en un sector determinado rebajan el valor de $tg\alpha'$ permitiendo una nueva reordenación de los sectores respecto a la Política de Acciones de Ahorro de Energía.

No obstante, el parámetro $tg\alpha'$ no mide la repercusión a nivel nacional que pueden tener las acciones de energía en un determinado sector. Esta idea la recoge mejor el parámetro ϵ^0 ya que éste es proporcional al consumo bruto de energía primaria del sector. Consecuentemente cuanto más elevado sea mayor será su repercusión a nivel nacional.

El análisis de los valores de ϵ^0 de la tabla nos demuestra que ϵ^0 del sector eléctrico es unas veinte veces mayor que el ϵ^0 promedio de los restantes sectores, lo que da idea -por otra parte ya conocida- de su importancia.

Los valores de β^0 nos indican como sabemos, el máximo ahorro de energía que puede esperarse. Y estos valores serán tanto más bajos cuanto más optimizado energéticamente esté un determinado sector, y las acciones de ahorro de energía serán tanto más difíciles de realizar cuanto menor sea β .

En este aspecto nuevamente se encuentra que el sector eléctrico es un sector altamente optimizado en el que cualquier medida de ahorro de energía debe ser mucho más sofisticada y estudiada que en otros sectores, pero sin embargo resulta absolutamente necesaria para poder estar al nivel ($tg\alpha'$) de los otros sectores.

Otras muchas conclusiones pueden obtenerse del análisis de los datos de la Tabla (II), pero dejamos al lector interesado que las obtenga por su cuenta.

9. RESUMEN

A lo largo del presente artículo hemos visto los tres tipos de Ahorro de Energía que se dan en el análisis energético de una planta.

. Ahorro Termodinámico de Energía, que lo cuantifica la "Exergía Perdida" en cada aparato de una instalación y el máximo ahorro posible de Energía.

. Ahorro Máximo Técnicamente Alcanzable, que es el máximo ahorro que es técnicamente posible obtener respecto a unas condiciones base de funcionamiento, y nos lo cuantifica para cada aparato la "Exergía Perdida Recuperable sobre condiciones base de diseño D". Este parámetro depende del nivel de diseño que se fije para su cuantificación y deberá ser rigurosamente especificado cuando se realice la Auditoría Exergética de una Planta de producción.

. Ahorro Económicamente Optimo, que es el ahorro que resulta rentable llevar a cabo. Se puede cuantificar a partir de un análisis marginal de la curva Ahorro de Energía-Inversión. Y este ahorro depende no sólo de la Exergía Perdida Recuperable (asíntota) y de la elasticidad de la curva Ahorro-Inversión sino también del criterio económico "M" utilizado para realizar el análisis de ahorro marginal.

También a lo largo del artículo hemos sentado las bases de la Auditoría Exergética de un sistema que consiste principalmente en la realización y comparación de los Balances Exergéticos en condiciones actuales y en condiciones base de diseño para obtener los valores desglosados de las Exergías Perdidas Recuperables.

Para realizar estos balances será necesario fijar dos condiciones muy importantes:

1a. Orden de Análisis (*) al que se quiere profundizar, es decir, orden 0 sería a nivel de todas y cada una de las irreversibilidades de la planta, orden I sería a nivel de cada aparato, orden II a nivel de procesos, orden III a nivel de planta, orden IV a nivel de Sector Industrial, etc.

2a. Nivel de diseño que fijará las condiciones base sobre las que referir los balances de Exergía y en la Tabla (I) se proponen unos criterios para definir los distintos niveles de Diseño.

Nótese que la importante propiedad de aditividad de la exergía perdida (o entropía generada) -ecuaciones IVa y IVb- es la que permite separar con rigor las pérdidas pudiéndose clasificar y cuantificar según el orden de análisis y/o el nivel de diseño. Esta propiedad no la presentan los Balances de Energía ya que éstos dan cuenta de la cantidad de energía que entra o sale pero no especifican la calidad de la energía que se ha transformado. No obstante, para realizar los Balances de Exergía es condición "sine qua non" realizar previamente los Balances de Energía (ya que $Bal. Ex. = Bal. Energía - T_0 (Bal. Entropía)$)).

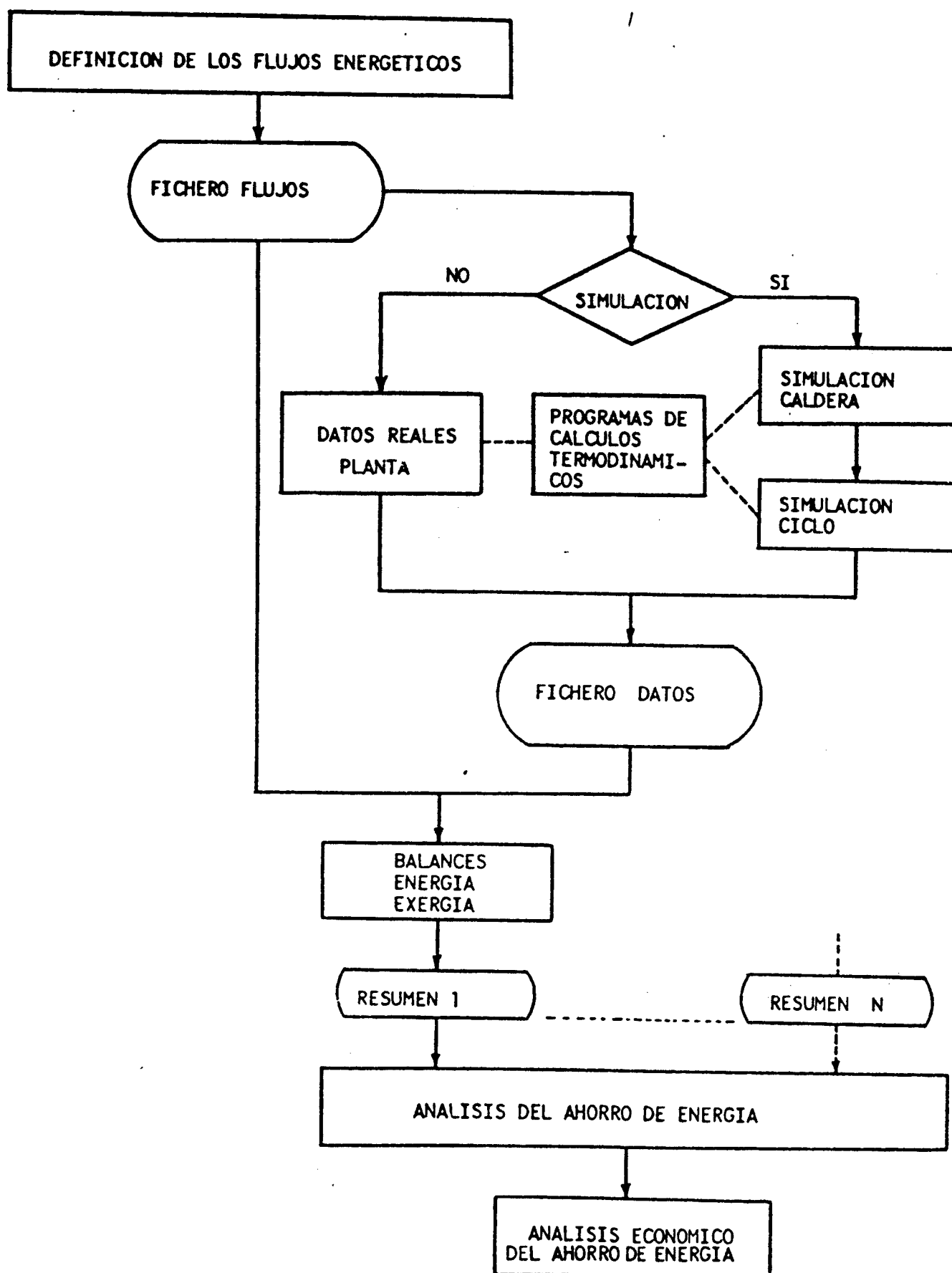
Finalmente hemos postulado una Ley que correlaciona el Ahorro de Energía obtenible con la Inversión necesaria para obtenerlo -ecuación (X)-. Esta Ley de Ahorro de Energía-Inversión hemos visto que tiene validez general y puede ser aplicada para cualquier Orden de Análisis y/o Nivel de Diseño. Su comprobación experimental ha sido hecha en orden de análisis IV (sectorial) y niveles de diseño III-IV (Circuitaría-Ingeniería) por el Centro de Estudios de la Energía de España (2), para trece sectores industriales.

Además la Ley de Ahorro de Energía-Inversión nos ha permitido -con o sin el análisis marginal, $tg\alpha$ o $tg\alpha'$ - un criterio para la ordenación de las acciones de Ahorro de Energía, con lo que podremos objetivamente en todo momento organizar una política de ahorro de Energía coherente y eficaz.

Es por ello muy conveniente que los responsables de la política de ahorro de energía a nivel de planta, empresa, región o nación conocieran las bases de la Termoeconomía que aquí se presentan.

(*) Definición propuesta en base a las ideas de Bonstead y Hancock (4)

Fig. (8). DIAGRAMA DE FLUJOS DE CALCULO DE BALANCES TERMONECONOMICOS DE LA
C.T. ANDORRA



10. ADENDA

Consecuentemente con los resultados de este artículo en los que se ve que el sector Eléctrico es uno de los sectores en el que es más urgente actuar ($\text{tg}\alpha'$ elevado) así como su elevada repercusión a nivel nacional (ϵ^0 unas veinte veces mayor que los otros sectores) y el hecho de estar muy optimizado energéticamente (β^0 bajo), lo hace ideal para poder iniciar una investigación sobre ahorro de energía que confirme las ideas apuntadas en el presente artículo, y sirva de modelo y Laboratorio de experimentación para la posterior generalización del método aquí propuesto.

El Centro de Estudios de la Energía así como la dirección de ENDESA-Aragón así lo han entendido y nos han apoyado económicamente para la puesta en marcha de un sistema de programas de cálculo que permita disponer en cada instante ("on line") de la auditoría Energética, exergética y económica del proceso de producción de electricidad. Todo ello obtenido para distintos niveles de diseño, hasta niveles IV-V, y distintos órdenes de análisis, desde 0 hasta III.

Un diagrama de flujos de cálculo se presenta en la figura (8) y en los artículos siguientes se presentan parte de los resultados obtenidos hasta la fecha.

11. BIBLIOGRAFIA.

- (1) Gual·l·ar, J.; Marín, J.M.; Turégano, J.A.; Valero, A.; Exergía: Un planteamiento más preciso del Ahorro de Energía. 1a. Conferencia Nacional sobre Ahorro Energético y Alternativas Energéticas. Energética 81. F.O.N.M. Octubre, 1981. Zaragoza.
- (2) Alegría, F.; Gayo, A.; Gual, C.; Juárez, A.; Llorente, J.C.; Meseguer, J.; Técnicas Energéticas en la Industria, vols. 1-13, Centro de Estudios de la Energía, Madrid, 1980.
- (3) Le Goff, P. (coordinador); Energétique Industrielle, tome 1. Technique et Documentation, Paris, 1979. Pág. 35.
- (4) Bonstead, I.; Hanc Kock, G.F.; Handbook of Industrial Energy Analysis. Ellis Horwood Publ., 1979, cap. 3.