

Proyecto Final de Carrera

**Ingeniería Industrial**

**Análisis Exergético  
de bienes de equipo**

**MEMORIA**

**Autor:** Andrea Orellana Abreu

**Director:** Isabel Joaquina Niembro

**Ponente:** Margarita González Benítez

**Convocatoria:** Julio 2009



Escuela Técnica Superior de  
Ingeniería Industrial de Barcelona





## Resumen

El análisis exergético es una metodología que permite analizar los mecanismos básicos de la eficiencia exergética de cualquier sistema, mediante la aplicación de las leyes de la termodinámica. Por ello, es considerada una herramienta de análisis y diagnóstico de sistemas útil en el diseño de soluciones alternativas que busquen reducir la utilización innecesaria de recursos, y por ende los impactos potenciales generados por la misma, orientando así hacia la búsqueda del desarrollo sostenible.

El presente trabajo tiene como finalidad realizar una primera aproximación al análisis exergético de bienes de equipo, específicamente se realizará el análisis exergético de un esterilizador, como ejemplo de aplicación de la metodología. Además, se realizará la propuesta de la inclusión de un nuevo módulo de cálculo a la herramienta informática *CICLOPE V.2.0*, creada por el Departamento de Proyectos de Ingeniería (DPE) para ser usada en los estudios de Análisis de Ciclo de Vida.

El nuevo módulo pretende incorporar criterios de balances exergéticos y eficiencias con el afán de valorar de forma más eficaz los impactos potenciales de los equipos o procesos en estudio y servir de base para el diseño de equipos o procesos más amigables con el medio ambiente.

Este trabajo está enmarcado el proyecto de “Análisis de ciclo de vida de bienes de equipo”, que se inscribe dentro del proyecto de Diagnóstico Ambiental de Bienes de Equipo de la fundación CEQUIP, patrocinado por la Generalitat de Catalunya y llevado a cabo por el Departamento de Proyectos de Ingeniería (DPE).





# Sumario

<b>RESUMEN</b>	<b>3</b>
<b>SUMARIO</b>	<b>5</b>
<b>1. NOMENCLATURA</b>	<b>7</b>
1.1. Notación general .....	7
1.2. Variables de definición del sistema .....	7
1.3. Magnitudes del sistema.....	7
1.4. Sub-índices.....	8
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
2.1. Justificación del proyecto. ....	10
2.2. Objetivos del proyecto.....	11
2.3. Alcance del proyecto.....	11
2.4. Metodología empleada en el proyecto. ....	12
<b>3. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS EXERÉTICO.</b>	<b>13</b>
3.1. Antecedentes históricos del concepto de exerjía .....	13
3.2. Entropía y segunda ley de la termodinámica. ....	14
3.3. Producción de trabajo mecánico. Estado muerto.....	16
3.4. El concepto de exerjía.....	17
3.5. Exerjía termomecánica .....	17
3.6. Ecuación de balance exerético .....	19
3.7. Balance exerético en un volumen de control .....	21
3.8. Diagramas de flujo exerético.....	24
3.9. Rendimiento exerético.....	26
<b>4. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS EXERÉTICO</b>	<b>29</b>
4.1. Descripción del sistema.....	29
4.2. Especificación de los volúmenes de control.....	29
4.3. Ambiente de referencia del sistema. Estado muerto.....	30
4.4. Simplificaciones.....	30
4.5. Balances de energía, materia y exerjía.....	31
4.6. Análisis exerético y diagrama de flujo exerético.....	31
4.7. Eficiencia exerética y sumideros de exerjía .....	31
<b>5. HERRAMIENTA INFORMÁTICA CICLOPE</b>	<b>33</b>



5.1. Análisis de ciclo de vida.....	33
5.2. Descripción del <i>CICLOPE</i> .....	35
5.3. Funcionamiento del <i>CICLOPE</i> .....	36
5.3.1. Módulo de trabajo.....	36
5.3.2. Módulo de cálculo.....	37
<b>6. RESULTADOS</b> .....	<b>39</b>
6.1. Análisis exergético de un esterilizador.....	39
6.1.1. Esterilización de productos sanitarios.....	39
6.1.2. Descripción del proceso de esterilización.....	40
6.1.3. Definición del volumen de control.....	41
6.1.4. Datos experimentales.....	42
6.1.5. Cálculos numéricos, balance de exergía.....	44
6.1.6. Discusión de resultados.....	48
6.2. Nuevo módulo de eficiencia exergética.....	50
6.2.1. Propuesta y creación del módulo.....	50
6.2.2. Definición de sistema.....	51
6.2.3. Introducción de datos del sistema.....	52
6.2.4. Cálculos de exergía y balances exergéticos. Rendimiento exergético.....	53
6.2.5. Cálculo del rendimiento exergético y presentación de los resultados.....	53
6.2.6. Diagrama de flujo.....	54
6.2.7. Especificación formal de desarrollo del módulo.....	55
<b>7. VALORACIÓN ECONÓMICA.</b> .....	<b>59</b>
7.1. Fase de investigación y confección del proyecto.....	59
7.2. Fase de Desarrollo.....	60
7.3. Fase de seguimiento y comunicación de resultados.....	62
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>65</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>66</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>68</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>73</b>
A. Plan cronológico de trabajo.....	73



# 1. Nomenclatura

## 1.1. Notación general

<i>Mayúsculas</i>	Magnitudes globales
<i>Minúsculas</i>	Magnitudes específicas
$\dot{x}$	Magnitud de un flujo por unidad de masa del flujo de referencia
$\dot{X}$	Derivada respecto al tiempo (flujo de una magnitud global)
$d$	Diferencial exacta de una propiedad del sistema
$\Delta$	Gradiente de una propiedad del sistema.

## 1.2. Variables de definición del sistema

$\zeta$	Sistema termodinámico genérico
$\pi$	Proceso genérico perteneciente al sistema $\zeta$
$P(\zeta)$	Conjunto de procesos que el sistema puede realizar
$\mathcal{E}$	Entorno, compuesto por el medio ambiente y los cuerpos exteriores al sistema
$Q(\pi)$	Calor absorbido por el sistema durante el proceso $\pi$
$Q(\pi, T)$	Calor neto intercambiado por el sistema $\zeta$ con $\mathcal{E}$ durante el proceso $\pi$ a temperaturas inferiores o iguales a $T$
$W(\pi)$	Trabajo producido por el sistema durante el proceso $\pi$

## 1.3. Magnitudes del sistema

$Ex$	Exergía
$Exp$	Exergía perdida
$ExQ$	Contenido exergético del calor
$ExW$	Contenido exergético mecánico
$H$	Entalpía



$M$	Masa
$p$	Presión
$Q$	Calor
$S$	Entropía
$S_{gen}$	Entropía generada
$T$	Temperatura (K)
$U$	Energía interna
$V$	Volumen
$W$	Trabajo

#### 1.4. Sub-índices

$0$	Estado muerto, entorno.
$1$	Estado inicial del sistema.
$2$	Estado final del sistema.
$\mathcal{S}$	Sistema.
$C$	Sistema compuesto.
$E$	Entrada.
$MA$	Medio ambiente, entorno.
$S$	Salida.
$VC$	Volumen de control.
$a$	Agua.
$sup$	Superficial.
$\alpha$	Dentro del volumen de control.





## 2. Introducción

El presente proyecto tiene como objetivo la descripción de una metodología básica y genérica para la realización de un análisis exergético de un bien de equipo. Esta metodología será luego aplicada a la fase de uso de un equipo de esterilización clínica, ensamblado por una de las empresas asociadas al CEQUIP (Centro de Innovación de Bienes de Equipo), en el marco del proyecto de análisis de ciclo de vida de bienes de equipos, realizado por el Departamento de Proyectos de Ingeniería (DPE) de la UPC, gracias al apoyo del Departamento de Medio Ambiente y Vivienda de la Generalitat de Catalunya.

La primera ley de la termodinámica es la ley de conservación de la energía. Esta ley afirma que la energía, en lugar de destruirse, se transforma, pero no enuncia ninguna restricción sobre los tipos de conversiones de energía que pueden ocurrir, no hace distinción entre el trabajo y el calor. Existe una diferencia muy importante entre el trabajo y el calor, diferencia que no se evidencia en la primera ley: teóricamente es posible convertir completamente el trabajo en calor, mientras que, paralelamente es imposible convertir completamente el calor en trabajo sin modificar los alrededores.

El análisis exergético se basa en el segundo principio de la termodinámica. Su aplicación en el análisis de procesos o sistemas, permite proponer mejoras ingenieriles a los mismos y hacer más eficiente la utilización de recursos. La exergía es una propiedad que determina el potencial de trabajo útil de una cantidad de energía determinada en cierto estado especificado. El uso de los recursos tanto energéticos como no energéticos en un sistema cerrado, ocasiona intrínsecamente la destrucción de la exergía, tal como lo manifiesta la segunda ley de la termodinámica. Mediante la evaluación de las pérdidas de exergía, se identifican las posibles mejoras al sistema que permiten la optimización del proceso, y por ende, se contribuye a la disminución del impacto ambiental [1].

Este proyecto pretende además la implementación de la metodología de análisis exergético en la herramienta informática *CICLOPE*; creada por el DPE de la UPC para la evaluación de impactos ambientales potenciales de un determinado proceso, mediante un análisis de ciclo de vida (ACV). El ACV es una herramienta medioambiental, de uso frecuente, ya que contempla todas las emisiones involucradas desde las materias primas, hasta la disposición



final del producto. El llevar a cabo ambos criterios de análisis (ACV y análisis exergético), otorgará una visión más amplia del sistema y facilitará la tarea de los analistas del proceso.

La esterilización del material quirúrgico, técnica de saneamiento sanitario usada para destruir toda forma de vida microbiana, es el proceso termodinámico que se analizará para mejorar la eficiencia y reducir los impactos ambientales del sistema. Esta técnica es de uso indispensable en el material quirúrgico que tendrá contacto con el paciente y en las instalaciones médicas, ya que permite la reducción de infecciones intrahospitalarias y disminuye la necesidad de administración de medicamentos en tratamientos de corta y larga estancia. Esto convierte a los equipos que la realizan en un factor de suma importancia en la red sanitaria mundial, por lo que se desea optimizar su utilización disminuyendo sus impactos, y potenciando su uso.

## **2.1. Justificación del proyecto.**

La preocupación creciente por el ahorro de energía, la conservación de los recursos naturales y la reducción de emisiones y daños al medio ambiente ha generado que las nuevas tendencias apunten hacia el desarrollo de productos cuyos impactos ambientales sean reducidos; hacia la búsqueda de sistemas planteados en el marco del desarrollo sostenible. Esto, sólo es posible, si desde la concepción de dichos productos se toman decisiones orientadas a la disminución de los daños sobre el medio ambiente. Sin embargo para aquellos sistemas que ya se encuentran en funcionamiento, las alternativas son, estudios para contabilizar dichos impactos, que permitan identificar posibles modificaciones que ayuden a la realización de productos más amigables con el medio ambiente.

Es por esto, que últimamente se ha fomentado un examen crítico de los métodos utilizados para evaluar e incrementar la eficiencia energética de los procesos industriales, y por ende, reducir los impactos ambientales. Como respuesta, la atención se ha centrado en técnicas de análisis basadas en el segundo principio de termodinámica, y en particular en el concepto de exergía.

El análisis exergético permite obtener la información necesaria para la mejora termodinámica del sistema, contribuyendo decisivamente en la eficiencia, integración y optimización energética de las unidades del proceso entre sí [2]. Esta mejora se traduce en una reducción de las posibles repercusiones al ambiente que podría estar generando dicho proceso.



La decisión de implementar esta herramienta de análisis exergético al *CICLOPE*, originalmente creado para llevar a cabo un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se basa en la necesidad de tomar en consideración y minimizar la pérdida de reservorios de exergía y de emisiones exergéticas al ambiente durante la fase de utilización del equipo [3]. El tomar en cuenta estos factores convierte al *CÍCLOPE* en una herramienta de análisis de impactos más poderosa y útil.

La esterilización quirúrgica, proceso a evaluar, juega un papel muy importante en el sistema sanitario mundial, y es de uso extensivo y obligatorio en la práctica médica, por lo que el estudio, optimización energética y reducción de emisiones de los equipos que la realizan tendrá una importante repercusión en el medioambiente de la zona, en este caso, Cataluña, España.

## 2.2. Objetivos del proyecto.

El objetivo general de este proyecto es la aplicación de una metodología de análisis exergético a la fase de uso de un bien de equipo, en este caso, un esterilizador quirúrgico ensamblado en Cataluña, España. Para esto, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Describir una metodología detallada para el análisis exergético de un proceso termodinámico.
- Realizar el análisis exergético de la fase de uso de un esterilizador, como ejemplo de aplicación de la metodología y para generar el correspondiente diagrama de Sankey, que sirve de base para la evaluación de la efectividad energética del bien de equipo.
- Realizar una propuesta de mejora de la herramienta informática *CICLOPE V2.0*, al incorporar un módulo exergético en el que se incluyan los criterios del análisis exergético como parte del programa.

## 2.3. Alcance del proyecto.

El alcance de este proyecto se limita a la realización del análisis exergético de un equipo esterilizador quirúrgico como una medida de la eficiencia del proceso que lleva a cabo el



equipo. Se propondrán modificaciones a la herramienta informática *CICLOPE V2.0* para incluir criterios exergéticos, de forma que arroje resultados más representativos y fiables para la evaluación de los impactos potenciales.

## **2.4. Metodología empleada en el proyecto.**

El procedimiento que se ha seguido para llevar a cabo este proyecto se describe a continuación:

- Se planteó la metodología base para el análisis exergético del proceso llevado a cabo por bienes de equipo, para ello se hará uso de la teoría existente y del trabajo de varios autores.
- Se delimitó el ámbito de estudio para el análisis exergético de la fase de uso de un esterilizador quirúrgico, describiendo detalladamente el proceso.
- Se tomaron, in situ, datos de las entradas y salidas al sistema, emisiones y demás aspectos ambientales del proceso.
- Se aplicó la metodología de análisis exergético, y se adaptó a la operación del equipo esterilizador.
- Finalmente, se elaboró una propuesta de modificaciones al *CÍCLOPE V2.0*, introduciendo criterios exergéticos dentro de sus funciones.



### 3. Introducción al análisis exergético.

La ley de conservación de la energía sostiene que la energía nunca desaparece, mientras que la segunda ley de termodinámica sostiene que la energía calórica no puede ser completamente aprovechada mientras interactúe con nuestro sistema atmosférico. Es por ello, que recientemente se ha introducido una nueva magnitud energética, llamada *exergía* para cuantificar cuanto trabajo se puede aprovechar de una determinada sustancia o flujo de energía con respecto al ambiente natural. La energía es conservada en cualquier tipo de proceso; mientras que la exergía es disipada en procesos espontáneos. Este capítulo examina el concepto y propiedades de la exergía de sistemas termodinámicos, hace una revisión histórica de su aparición, deducción a partir de previos conceptos termodinámicos, utilidad para el análisis termodinámico de sistemas, balances exergéticos que permiten su aplicación, la herramienta gráfica que los representa y la teoría de rendimiento exergético, base para el análisis del sistema.

#### 3.1. Antecedentes históricos del concepto de exergía

Distintos autores [4,9] han realizado una revisión histórica de la aparición, desarrollo teórico y aplicación del concepto de exergía y del análisis exergético. Liu y Wepfer [6], en 1986, hacen una recopilación bibliográfica exhaustiva, recogiendo más de 600 referencias de las aportaciones más recientes. Un estudio crítico de esta información nos conduce a las siguientes afirmaciones:

- El concepto de exergía ha sido objeto de acalorados debates tanto en su denominación como en su origen. En la controversia sobre su origen [7] aparecen los nombres de eminentes científicos (Maxwell (1871), Gibbs (1873), Kelvin (1889), Gouy (1889) y Stodola (1898)) más conocidos por otras de sus contribuciones. El concepto fue ciertamente estudiado y usado por Gouy y Stodola a finales del pasado siglo, quienes independientemente uno de otro formularon la ley que lleva su nombre [5].
- La Ley de Gouy-Stodola no despertó al principio mucho interés. Las primeras aplicaciones fueron realizadas por Juoguet (1907), Darrieus (1930) y Keenan (1932). El trabajo de Bosnjakovic (1938) marca una nueva era en el desarrollo del análisis



termodinámico de procesos basado en el segundo principio. En sus escritos centra la atención en los efectos desfavorables de los procesos irreversibles y realiza contribuciones importantes a la formulación de nuevos criterios de rendimiento y de técnicas de evaluación de la eficiencia termodinámica de los procesos. También es el primero que intenta formular un balance de la capacidad de producir trabajo [5,8].

- El progreso queda interrumpido por la segunda guerra mundial, pero se renueva vigorosamente en Europa hacia 1950, mientras que en Estados Unidos las aplicaciones prácticas son más recientes. Las razones de este comportamiento diferenciado cabe buscarlas, según Wepfer [6], en la necesidad para Europa de reconstruir su industria, y en la diferencia significativa de precios energéticos entre Europa y USA. Rant (1953) fue el primero en utilizar el término *exergía* mayoritariamente asumido por los autores europeos [4].

La relevancia actual y el grado de madurez del análisis exergético se evidencia en la publicación reciente de varios libros centrados básicamente en este tema, y por la realización de frecuentes estudios y congresos que lo abordan.

Una revisión completa de la aplicación del método exergético en el análisis de plantas térmicas y químicas ha sido realizada por Kotas [8]. Este autor aporta un amplio examen tanto de las posibles aplicaciones del análisis exergético (auditoría energética, estimación de costes, optimización termoeconómica, síntesis de procesos, etc) como de las herramientas y técnicas utilizadas (criterios de eficiencia, diagramas, tablas, coeficientes, etc.).

Tsatsaronis [9] hace una revisión sistemática de las distintas metodologías, que combinando técnicas de optimización económica más o menos clásicas con el análisis exergético, se orientan a la consecución de los siguientes objetivos: optimización del diseño, operación y/o mantenimiento de los sistemas energéticos y determinación de los costes de los flujos internos y productos de una instalación (balance económico). Además de esto, discute y examina las ventajas, inconvenientes y aplicaciones potenciales de las metodologías desarrolladas hasta la fecha.

### **3.2. Entropía y segunda ley de la termodinámica.**

Antes de presentar la definición de exergía como una función de estado, se realiza un repaso por las Leyes de la Termodinámica, especialmente por la Segunda Ley, y el



concepto de entropía. Esto ayuda a tener una visión más clara del concepto de exergía y su utilidad desde el punto de vista termodinámico.

Denotamos por  $\zeta$  a un sistema termodinámico genérico. Todos los sistemas realizan ciertos procesos, así que denotemos  $\pi$  a un proceso genérico, y al conjunto de procesos que el sistema  $\zeta$  puede realizar como  $P(\zeta)$ . El sistema  $\zeta$  interactúa con los cuerpos exteriores a él, denominados entorno  $\mathcal{E}$  de dos maneras: intercambiando calor con  $\mathcal{E}$  durante el proceso  $\pi$ ,  $Q(\pi)$ , o realizando trabajo sobre  $\mathcal{E}$  en  $\pi$ ,  $W(\pi)$ .

Enunciando la segunda ley de la termodinámica para un sistema  $\zeta$  cerrado, tenemos que:

$$\Delta S \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde  $S$  es la entropía, y  $dQ$  denota el calor intercambiado por  $\zeta$  a la temperatura  $T$ . En términos de la función de acumulación, introducida por J.B Serrin [10], esta desigualdad queda como:

$$\Delta S \geq \int_1^\infty \frac{Q(\pi, T)}{T^2} dT \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde llamamos  $Q(\pi, T)$  al calor neto intercambiado por el sistema  $\zeta$  con  $\mathcal{E}$  durante el proceso  $\pi$  a temperaturas inferiores o iguales a  $T$ . A la izquierda de esta desigualdad aparece la variación de una función de estado; a su derecha, una magnitud dependiente del proceso. Podemos transformar la anterior desigualdad en una igualdad definiendo una nueva magnitud dependiente del proceso, la entropía generada [10]:

$$S_{gen}(\pi) = \Delta S - \int_1^\infty \frac{Q(\pi, T)}{T^2} dT \quad (\text{Ec. 3.3})$$

El valor de la entropía generada resulta una medida de la irreversibilidad del proceso, ya que, debido a la Segunda Ley, será positiva en cualquier proceso irreversible, y cero en los procesos reversibles.

Introduciendo esta nueva magnitud, la Segunda Ley se resume en los dos siguientes enunciados:



$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T} + S_{gen} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

$$S_{gen} \geq 0$$

Mientras que el análisis de un proceso basado en la primera ley (balance de masa y energía) pone de manifiesto los diferentes flujos energéticos implicados; el análisis basado en la segunda ley pone de manifiesto el grado de irreversibilidad del proceso. El concepto de *exergía* y el de *balance exergético* nacen para unificar estos dos puntos de vista, de manera que en el análisis de los procesos en una instalación se pueda tener en cuenta tanto la magnitud de los flujos de energía como su "calidad" en cuanto a la producción de trabajo [11].

### 3.3. Producción de trabajo mecánico. Estado muerto.

Si tenemos un sistema termodinámico genérico  $\zeta$ , que se encuentra en un estado termodinámico caracterizado por una temperatura  $T$  y una presión  $p$ , situado en un entorno con una temperatura  $T_0$  y una presión  $p_0$  que se consideran constantes a lo largo del tiempo, podemos asegurar que el sistema evolucionará espontáneamente hacia un estado de equilibrio con el entorno, en el que su temperatura y presión serán  $T_0$  y  $p_0$  (equilibrio termodinámico). Si el sistema no interactúa con otro distinto al propio entorno, el trabajo en este proceso es el asociado únicamente a la variación de volumen bajo la presión exterior. Este trabajo no es considerado útil, ya que no es realizado sobre un sistema distinto al medio ambiente; sin embargo la evolución del sistema hasta alcanzar el equilibrio termodinámico puede ocurrir mediante procesos en los que el sistema si realice un trabajo sobre otro sistema, lo que sería un trabajo útil.

El *estado muerto* de un sistema de masa y composición constantes es aquel estado del sistema en el que su presión y temperatura coinciden con las del medio ambiente [11]. Se denomina así porque al no existir desequilibrio de temperatura o presión entre el sistema y el entorno, no hay capacidad de producir trabajo útil.





### 3.4. El concepto de exergía.

A partir de la segunda ley fueron deducidos los conceptos de entropía, energía libre (energía de Helmholtz) y entalpía libre (energía de Gibbs); funciones termodinámicas que indican la posibilidad y capacidad de avanzar en procesos irreversibles. En los 50's, la termodinámica ha introducido, desde el punto de vista práctico, un nuevo término llamado *exergía* para expresar la cantidad de energía disponible; su habilidad para ser convertida en otras formas de energía y, especialmente, su capacidad para generar trabajo que se pueda utilizar a partir de un sistema dado de energía en el ambiente natural de la tierra [12]. El término *exergía*, introducido por Rant [13], significa "cantidad de trabajo (-erg-) que es liberado (ex.)".

La exergía es definida por Szargut [14] como la máxima cantidad de trabajo obtenible cuando un flujo de energía es llevado de su estado inicial a un estado de equilibrio termodinámico con las sustancias comunes del entorno natural (estado inerte), por medio de procesos reversibles, interactuando únicamente con su entorno natural. En otras palabras, la exergía es la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener cuando una sustancia o forma de energía es llevada a su estado inerte, o estado muerto. La exergía es expresada en términos de función de estado siempre y cuando esté definida por medio de procesos reversibles.

### 3.5. Exergía termomecánica

La exergía termomecánica de un sistema es el máximo trabajo que puede realizar sobre el entorno cuando evoluciona desde un estado definido hasta el estado muerto intercambiando calor sólo con el medio. De esta definición se deducen inmediatamente dos conclusiones: en primer lugar que la exergía termomecánica de un sistema en el estado muerto es nula, y en segundo lugar, que en cualquier otro estado es positiva. Para que la exergía termodinámica del sistema fuese negativa, sería necesario que un sistema distinto de  $\zeta$  y del entorno  $\mathcal{E}$  realizara sobre  $\zeta$  un trabajo, en contradicción con la tendencia espontánea de los sistemas a alcanzar el equilibrio [11].

La exergía total de un sistema es la suma de la contribución termomecánica y química, ya que desde un principio se considera que la contribución potencial y la cinética son despreciables en comparación con las magnitudes de éstos.



Para el cálculo de la exergía termomecánica se determinará el trabajo realizado en un proceso genérico que conduzca al sistema  $\zeta$  desde su estado inicial  $(T, p)$  al estado muerto  $(T_0, p_0)$ , intercambiando calor sólo con el medio -es decir, el sistema compuesto formado por  $\zeta$  y  $\mathcal{E}$  es adiabático- y realizando trabajo tanto sobre el medio ambiente como sobre otros cuerpos diferentes a él y al medio ambiente (es decir, el sistema compuesto por  $\zeta$  y  $\mathcal{E}$  puede intercambiar trabajo con otros sistemas). Aplicar un balance de primera ley al sistema compuesto C conduce a [11]:

$$\Delta U_c = -W \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Además,

$$\Delta U_c = \Delta U_\zeta + \Delta U_{MA} = U - U_o + (Q_{MA} - W_{MA}) \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde  $U_o$  es la energía interna del sistema en el estado muerto,  $U$  es la energía interna del sistema en el estado inicial,  $Q_{MA}$  el calor absorbido por el entorno y  $W_{MA}$  el trabajo realizado por el mismo.

Si se considera al medio ambiente homogéneo, el proceso de absorción de calor resulta reversible. Al ser isotérmico,

$$Q_{MA} = T_0 \Delta S_{MA} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Aplicando un balance de Segunda Ley,

$$\Delta S_c = \Delta S + \Delta S_{MA} = S_{gen} \geq 0 \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Que, combinado con la Ecuación 3.7, nos llevan a que

$$Q_{MA} = T_0 S_{gen} + T_0 (S - S_0) \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Como el proceso realizado por el entorno se considera Isobárico, tenemos que:



$$W_{MA} = p_0 \Delta V_{MA} = -p_0 (V_o - V) \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.9 y 13.10 En 3.6, obtenemos la siguiente expresión:

$$W = U - U_o - T_o (S - S_o) + p_o (V - V_o) - T_o S_{gen} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde  $S_{gen} > 0$  si el proceso es irreversible, o  $S_{gen} = 0$  si el proceso es reversible. La exergía termomecánica es por definición el máximo valor que puede alcanzar el trabajo útil, es decir, el correspondiente a un proceso reversible, donde se anula  $T_o S_{gen}$ . Eliminando este término, se evidencia que el trabajo realizado en un proceso reversible del sistema compuesto es sólo función del estado inicial y de las condiciones del estado muerto, y por lo tanto, independiente del proceso realizado.

Así pues, la exergía termodinámica queda expresada por:

$$Ex = U - U_o - T_o (S - S_o) + p_o (V - V_o) \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Si la queremos expresar en magnitudes intensivas (por unidad de masa del sistema), tenemos:

$$ex = u - u_o - T_o (s - s_o) + p_o (v - v_o) \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Observando esta ecuación se nota que, una vez fijadas las condiciones del estado muerto  $(T_o, p_o)$ , los parámetros  $u_o, s_o$  y  $v_o$  dependen únicamente de la sustancia de estudio. La exergía termomecánica específica es entonces una función de estado que puede utilizarse como variable independiente a la hora de caracterizar el estado termodinámico de un sistema.

### 3.6. Ecuación de balance exergético

Como se vio en apartados previos, la exergía es una función de estado, por lo que la variación de la misma sólo depende del estado inicial y final del sistema en el proceso,



siempre y cuando esté fijado como constante el estado muerto. Si identificamos con los subíndices 1 y 2 al estado inicial y final del sistema  $\zeta$  en el proceso  $\pi$ , se tiene

$$Ex_2 - Ex_1 = U_2 - U_1 - T_0(S_2 - S_1) + p_0(V_2 - V_1) \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Introduciendo los balances de primera y segunda ley de la termodinámica, la expresión cambia a

$$Ex_2 - Ex_1 = \{-W + p_0(V_2 - V_1)\} + \left\{Q - T_0 \int_1^2 \frac{dQ}{T}\right\} - T_0 S_{gen} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

El primer miembro de la Ecuación 3.15,  $-W + p_0\Delta V$ , coincide en módulo con el trabajo total realizado por el sistema en el proceso menos el trabajo realizado contra el ambiente, es decir, es el trabajo realizado sobre cuerpos ajenos al medio y al propio sistema. A este miembro se le da el nombre de *contenido exergético del trabajo mecánico*,  $ExW$ . Su valor coincide con el del trabajo útil, pero cambiado de signo.

Observando ahora el segundo término de la Ecuación 3.15,

$$Q - T_0 \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

Coincide con el máximo trabajo que puede obtenerse del calor  $Q$  transmitido a las mismas temperaturas a las que se encuentra el sistema durante el proceso, por lo que se le da el nombre de *contenido exergético del calor*,  $ExQ$ . El contenido exergético del calor tiene el mismo signo que el calor siempre que la temperatura a la que se transmita sea superior a la del estado muerto. Si se transmite calor a una temperatura inferior a la del estado muerto los signos del calor y de su contenido exergético son opuestos [11].

Finalmente, el término  $T_0 S_{gen}$ , siempre positivo, representa la exergía destruida por la producción de un proceso irreversible en el sistema. Se le llamará, de ahora en adelante  $Ex_p$  exergía perdida. En un proceso reversible  $Ex_p = 0$ , mientras que en un proceso irreversible éste término representa una cierta cantidad de exergía que se ha destruido en el proceso. Esta magnitud es una medida del grado de irreversibilidad del proceso.



La Ecuación 3.15, que queda reescrita como

$$\Delta Ex = ExW + ExQ - Ex_p \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Será denominada como la *ecuación del balance exergético*, y, frente a la ecuación del balance de la energía, presenta la diferencia fundamental de que la exergía no se conserva en procesos irreversibles:

$$\Delta Ex \leq ExW + ExQ \quad (\text{Ec. 3.18})$$

La Ecuación 3.17 puede ser interpretada como que la exergía del sistema al final del proceso es igual a la que poseía en el estado inicial, aumentada por el valor de los *flujos exergéticos*  $ExW$  y  $ExQ$ , y disminuida por el valor del flujo de pérdidas,  $Ex_p$ .

### 3.7. Balance exergético en un volumen de control

Consideremos ahora al sistema en estudio como una región arbitraria del espacio llamada Volumen de Control (VC), delimitada por un contorno con una serie de conductos que permiten la entrada y salida de materia. En las secciones de entrada al volumen de control las condiciones de los flujos materiales se suponen homogéneas, aunque no necesariamente invariantes con el tiempo. Se considera en primer lugar un sistema con una única entrada y una única salida de materia; la generalización de la ecuación de balance a un sistema con un número cualquiera de entradas y salidas es inmediata, como se observa en la Figura 3.1.

Considérese el proceso sufrido por el sistema entre un instante de tiempo  $t$  y otro  $t+dt$ . En el periodo de tiempo  $dt$  ha entrado al sistema una cantidad de masa  $dm_E$  por el conducto de entrada al sistema y ha salido una cantidad de masa  $dm_S$  por los conductos de salida, siendo  $m_{VC}(t)$  la masa encerrada en el volumen de control en el instante  $t$  y  $m_{VC}(t+dt)$  la masa encerrada en el volumen de control en el instante  $t + dt$ . Del balance de masa aplicado entre los instantes  $t$  y  $t+dt$ , obtenemos:

$$m_{VC}(t) + dm_E = m_{VC}(t + dt) + dm_S \quad (\text{Ec. 3.19})$$



El expresar la primera ley de esta manera permite tratar al sistema formado por la masa encerrada en el VC en el instante  $t$  y la masa que entrará a éste durante  $dt$  (o bien la masa que ocupa el volumen de control en el instante  $t + dt$  y la masa que ha salido del volumen de control en el  $dt$  anterior) como un sistema cerrado que evoluciona en un proceso en el que cambia su posición en el espacio.

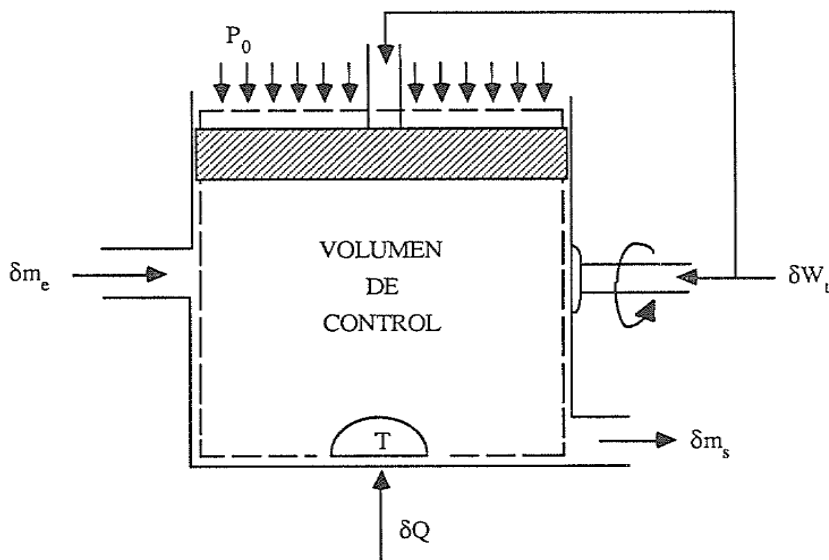


Figura 3.1. Volumen de Control

Este sistema absorbe o emite una determinada cantidad de calor  $dQ_{VC}$  a través del contorno del VC, o también por radiación desde la masa que ocupa el VC, realizando un trabajo  $dW$ , que representa el trabajo realizado a través de las secciones de entrada y salida al volumen de control  $dW_f$ , y el resto ( $dW_{VC}$ ) en el que está incluido el posible trabajo de expansión por variación del volumen de control [15]:

$$dW = dW_f + dW_{VC} \tag{Ec. 3.20}$$

El término  $dW_f$  es el trabajo necesario para introducir o sacar del volumen de control las masas  $dm_E$  y  $dm_S$ , y puede distinguirse y calcularse con las propiedades del fluido circulante debido a que hemos supuesto que tanto en la entrada, como en la salida son homogéneas. Entonces:



$$dW_f = p_s v_s dm_s - p_E v_E dm_E \quad (\text{Ec. 3.21})$$

Este término es el llamado *trabajo de flujo*. Si el proceso  $\pi$  dura desde  $t_1$  hasta  $t_2$ , la Ecuación 3.21 se convierte en:

$$W_f = \int_{t_1}^{t_2} p_s(t) v_s(t) dm_s(t) - \int_{t_1}^{t_2} p_E(t) v_E(t) dm_E(t) \quad (\text{Ec. 3.22})$$

Con lo que

$$W = W_{VC} + \int p_s v_s dm_s - \int p_E v_E dm_E \quad (\text{Ec. 3.23})$$

Usando el mismo razonamiento, se consigue que

$$\Delta V = \Delta V_{VC} + \int v_s dm_s - \int v_E dm_E \quad (\text{Ec. 3.24})$$

Igualmente, para la variación de exergía en el sistema, el razonamiento es análogo:

$$\Delta Ex = \Delta Ex_{VC} + \int ex_s dm_s - \int ex_E dm_E \quad (\text{Ec. 3.25})$$

Igualando la Ecuación 3.17 con la Ecuación 3.25, y teniendo en cuenta las Ecuaciones 3.23 y 3.24, obtenemos la siguiente igualdad:

$$Ex_{Q_{VC}} + Ex_{W_{VC}} - Ex_p = \Delta Ex_{VC} + \int (ex_s + p_s v_s - p_0 v_s) dm_s - \int (ex_E + p_E v_E - p_0 v_E) dm_E \quad (\text{Ec. 3.26})$$

Como ya definimos que  $Ex_{W_{VC}} = -W_{VC} + p_0 \Delta V_{VC}$ , la Ecuación 3.26 es el balance de la exergía en un volumen de control en una corriente fluida. En ella, puede denominarse a la Ecuación 3.27

$$ex + (p - p_0)v = ex_c \quad (\text{Ec. 3.27})$$



como *contenido exergético específico de las corrientes fluidas*. Si desarrollamos su expresión, usando la Ecuación 3.13, obtenemos

$$ex_c = h - h_o - T_o(s - s_o) \quad (\text{Ec. 3.28})$$

El contenido exergético de una corriente fluida puede interpretarse como el máximo trabajo útil que podría analizar la corriente evolucionando en un sistema abierto y estacionario, con volumen de control constante en el que las condiciones de salida fueran las del estado muerto [15].

Es importante destacar también que mientras la exergía de un sistema es siempre positiva, el contenido exergético de una corriente puede ser negativo cuando la presión es menor que la del estado muerto, debido al término  $(p-p_o)v$ .

Por otro lado, si estamos en presencia de un proceso estacionario, la Ecuación 3.26 queda simplificada a:

$$\dot{m}(ex_{c,S} - ex_{c,E}) = \dot{E}xQ_{VC} + \dot{E}xW_{VC} - \dot{E}x_p \quad (\text{Ec. 3.29})$$

Cuando no hay variación de volumen en el VC, el trabajo intercambiado por el sistema a través de la superficie de control coincide con su contenido exergético cambiado de signo:

$$\Delta V_{VC} = 0 \rightarrow ExW_{VC} = -W_{VC} \quad (\text{Ec. 3.30})$$

Este es el caso de turbinas y compresores, por ejemplo [11].

### 3.8. Diagramas de flujo exergético.

Para facilitar su interpretación, el balance de exergía tiene varios tipos de representaciones gráficas. Los llamados *diagramas de flujo exergético*, o sencillamente *diagramas de Sankey* son los más conocidos [16]. En ellos, cada proceso sufrido por el sistema se representa por una línea horizontal, marcando mediante *líneas de flujo* los flujos de exergía entrantes o salientes del sistema. Así, por ejemplo, un proceso irreversible en el que el sistema cerrado recibe trabajo (exergía positiva), transmitiendo calor al exterior a temperaturas superiores a





$T_0$  (exergía negativa) e incrementando su energía interna tendrá un diagrama exergético como el indicado en la Figura 3.2.

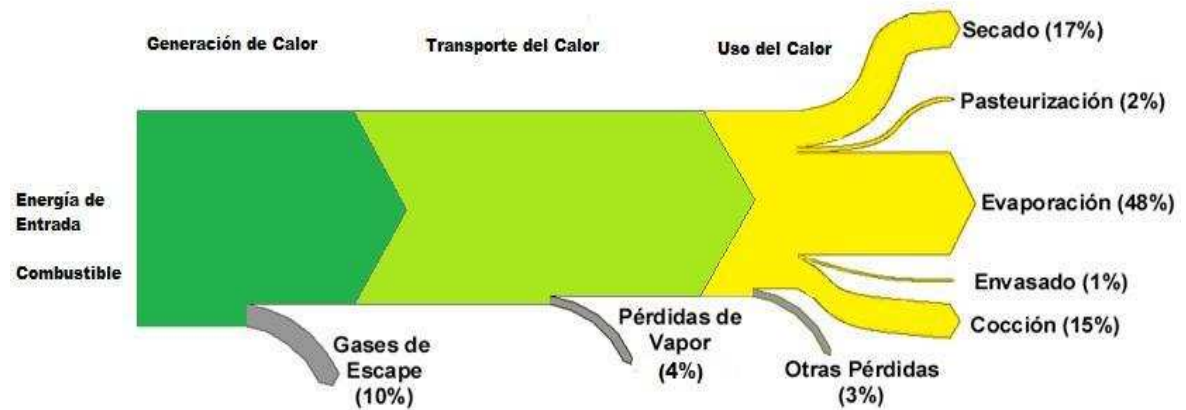


Figura 3.2. Ejemplo de Diagrama de Sankey. [11]

En los últimos años se ha puesto en el mercado una variedad de herramientas informáticas cuyo fin es la creación de estos diagramas, pues resultan una manera muy elegante, concisa y práctica de arrojar resultados para el análisis de cualquier sistema que se esté estudiando. Sólo con observar el diagrama de Sankey de cualquier sistema se puede conocer [17]:

- Las eficiencias exergéticas de varios procesos de un sistema.
- Las entradas y salidas de exergía
- De donde provienen y donde terminan los distintos flujos exergéticos
- Las corrientes en las que existe flujo de exergía
- La cantidad de exergía destruida en cada proceso del sistema.

Además de todo esto, los diagramas de flujo exergético son una muy buena herramienta para evaluar procesos de carácter industrial que se quieren optimizar, ya que permiten tener una visión global del proceso.



### 3.9. Rendimiento exergético

El balance exergético de una instalación recoge una serie de flujos exergéticos entrantes al sistema y una serie de flujos de exergía que se obtienen de él. Los flujos de exergía que salen del sistema pueden dividirse genéricamente en dos tipos: *flujos de exergía útiles* y *flujos de exergía recuperable*. Los primeros son aquellos generados como objetivo de diseño de la instalación y que se aprovechan de forma inmediata: es el caso del trabajo mecánico obtenido en una instalación de turbina de vapor o en un motor de combustión interna; o el contenido exergético del calor extraído del foco frío de una máquina frigorífica. Cualquier otro flujo de exergía que salga del sistema puede ser aprovechado (flujos de exergía recuperable), al menos teóricamente, para la obtención de trabajo mecánico, como se deduce de la propia definición de exergía. Este es el caso del contenido exergético de los humos a la salida de una chimenea o del calor cedido al foco frío en una máquina motora. La mayor parte de este tipo de flujos de exergía se desaprovecha totalmente, convirtiéndose en exergía perdida. La recuperación de estos flujos exergéticos, bien sea en instalaciones secundarias, o en la propia instalación (como puede ser el caso de un ciclo de turbina de gas con regeneración), es normalmente el camino más sencillo para mejorar el aprovechamiento energético [11].

Podemos expresar el balance exergético de forma genérica como:

$$Ex_e = Ex_u + Ex_r - Ex_p \quad (\text{Ec. 3.31})$$

Donde  $Ex_e$  es la suma de flujos exergéticos entrantes al sistema,  $Ex_u$  el flujo de exergía útil,  $Ex_r$  la suma de los flujos de exergía recuperables, y  $Ex_p = T_0 S_{gen}$  la exergía perdida debido a irreversibilidades internas y externas.

La definición de rendimiento desde el punto de vista del análisis exergético debe tener la forma genérica:

$$\text{rendimiento} = \frac{\text{flujo de exergía utilizado}}{\text{flujo de exergía consumido}}$$

Es claro que el numerador será el valor de  $Ex_u$ , pero para el denominador hay varios enfoques diferentes. Un planteamiento consiste en considerar como consumo exergético la



totalidad de la exergía entrante al sistema, con lo que cualquier flujo de exergía saliente distinto del útil se considera como desaprovechado. Al rendimiento definido según este criterio se le llamará *rendimiento exergético*:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_u}{Ex_e} = 1 - \frac{Ex_r + Ex_p}{Ex_e} \quad (\text{Ec. 3.32})$$

El rendimiento exergético es un parámetro útil para medir las mejoras introducidas en una instalación tanto en cuanto a la disminución de la exergía perdida como en cuanto al aprovechamiento de flujos de exergía recuperable dentro de la propia instalación [18].

Un factor importante de este concepto es que es aplicable a cualquier tipo de proceso, no sólo a máquinas térmicas motoras o de refrigeración, sino también a cualquier proceso industrial en el que los intercambios energéticos tengan una cierta importancia: procesos de la industria química, centrales térmicas o incluso balances de consumo de energía de un país [19].





## 4. Metodología para el análisis exergético

En este apartado se desarrolla una metodología básica y generalizada propuesta para el análisis exergético de bienes de equipo de forma genérica. Esta metodología puede ser descrita por pasos de la siguiente manera [19]:

- Realizar una descripción tanto del sistema como del proceso que va a estudiarse
- Dividir convenientemente el sistema en volúmenes de control por medio de fronteras claramente especificadas
- Definir el ambiente de referencia del sistema
- Realizar las simplificaciones necesarias para poder trabajar con un modelo manejable
- Calcular los balances de exergía y la destrucción de exergía de cada componente
- Elaborar el diagrama de flujo exergético
- Definir y calcular las eficiencias exergéticas y demás parámetros de evaluación para cada componente
- Identificar la locación y magnitud de los principales sumideros de exergía.

### 4.1. Descripción del sistema

En esta etapa es necesario definir el proceso o sistema a estudiar, describiendo su funcionamiento y cada una de sus fases, con entradas, salidas, etc. diagramas esquemáticos, los diagramas de flujo y demás información detallada serán sumamente útiles para la definición de las variables a considerar durante el análisis.

### 4.2. Especificación de los volúmenes de control

Con el fin de aplicar el método de análisis exergético a un sistema, este debe ser dividido convenientemente en volúmenes de control. Generalmente esta división se hace en componentes del equipo o ciclo, o bien etapas del proceso a analizar.

La frontera del volumen de control puede ser tanto real como imaginaria. En el caso de que exista intercambio de calor entre el volumen de control y el ambiente, debe especificarse la temperatura de la frontera en las partes donde ocurre el intercambio de calor. Es decir, debe especificarse si el gradiente de temperaturas se encuentra dentro o fuera de esta, ya que en



el primer caso, la destrucción de la exergía debida a una caída de la temperatura del fluido se considera una irreversibilidad interna al componente, mientras que el segundo caso se considera una pérdida de exergía y por lo tanto una irreversibilidad externa.

### 4.3. Ambiente de referencia del sistema. Estado muerto.

La exergía es una propiedad inherente al sistema una vez que el ambiente ha sido especificado. El ambiente de referencia para el cálculo de la exergía de un sistema termodinámico estará constituido a la manera de Kestin [15] por la unión de tres grandes reservorios: un reservorio de energía, un reservorio de volumen y un reservorio de masa. En nuestro caso, como no consideramos la contribución de la exergía química, por no estar ante sistemas reactivos, tenemos que el estado intensivo para este ambiente de referencia viene dado por:

- La temperatura ambiente,  $T_o$ , para el reservorio de energía.
- La presión atmosférica,  $p_o$ , para el reservorio de volumen.

Los valores de éstas magnitudes, y por tanto, el ambiente del referencia al sistema será definido tomando como referencia los valores estándar de temperatura y presión, es decir,  $p_o= 101,325$  kPa y  $T_o= 298$  K.

### 4.4. Simplificaciones

Los procesos que ocurren en la realidad resultan a veces demasiado complejos y se requieren simplificaciones para desarrollar modelos termodinámicos que los representen de la manera más precisa posible. Generalmente, para fines de análisis exergéticos se supone que [18]:

- El estudio se restringe al estado estacionario del sistema. Por lo tanto quedan fuera los problemas de carácter dinámico.
- Los efectos de la energía cinética y potencial de los flujos másicos de las corrientes que entran o salen del volumen de control se desprecian, debido a que, en la mayoría de los procesos de conversión de energía, los cambios en estas formas de energía resultan despreciables comparados con los cambios en la entalpía de los flujos másicos de las mismas corrientes. Consecuentemente, los términos de exergía cinética y potencial se desprecian.
- El proceso termodinámico es abierto a las interacciones con el entorno.



- Se considera que los procesos llevados a cabo por el sistema no son reactivos, por lo que no se considerará la contribución de la exergía química en el cálculo de la exergía y en su análisis, quedando sólo la exergía termomecánica como contribuyente a la exergía del sistema.
- La sustancia (o sustancias) de trabajo del sistema deben ser sustancias simples, no admitirá mezclas multicomponentes.

#### **4.5. Balances de energía, materia y exergía.**

En esta etapa se aplican las ecuaciones para calcular los flujos de masa y energía mediante un análisis de primera ley. En base a las ecuaciones señaladas en el apartado anterior, se realizan los balances de exergía y el cálculo de la destrucción de exergía de cada componente del sistema cerrado, adiabático, no reactivo y estacionario que es nuestro objeto de análisis. Este estudio otorga una visión más amplia del sistema en su fase de uso y los posibles aspectos a optimizar del mismo.

#### **4.6. Análisis exergético y diagrama de flujo exergético**

Los diagramas de Sankey son la representación gráfica del balance exergético del sistema por excelencia. En ellos, cada proceso sufrido por el sistema es representado con líneas horizontales, marcando mediante líneas de flujo, que forman flechas, los flujos de exergía entrantes y salientes del sistema. El grosor de estas líneas representa el porcentaje de exergía perdida. Estos diagramas facilitan la interpretación energética del sistema, y por lo tanto, su posterior optimización, ya que resumen en una gráfica toda la información exergética obtenida en los balances.

#### **4.7. Eficiencia exergética y sumideros de exergía**

Para el cálculo del rendimiento, se hace uso de la Ecuación 3.32 descrita en el apartado anterior. Este valor nos brinda un parámetro con el cual evaluar el aprovechamiento exergético del sistema, y de esta manera, proponer distintas modificaciones, como por ejemplo la recuperación de flujos de exergía que están siendo desaprovechados, y también la cantidad de exergía que está siendo utilizada.



Para conocer la eficiencia exergética de un sistema es necesario calcular previamente los flujos de exergía útil, exergía recuperable y exergía perdida; con ello estamos definiendo la ubicación y magnitud de los sumideros de exergía del sistema.

En base a estos valores, los analistas de procesos toman decisiones y proponen mejoras en el diseño del sistema que permitan un mejor aprovechamiento de los recursos, y por ende, un mejor rendimiento.

La aplicación de estos pasos resume la metodología básica considerada en la modificación de la herramienta informática *CICLOPE*, que en su versión *V2.0* no considera ninguno de estos conceptos y principios. La versión *V3.0*, desarrollada en la actualidad, tendrá un valor agregado con la incorporación de un módulo de eficiencia exergética en sus funciones, que le se traducirá en un valor agregado integrado al análisis de ciclo de vida.





## 5. Herramienta informática CICLOPE

### 5.1. Análisis de ciclo de vida

Se entiende por ciclo de vida a las etapas consecutivas y relacionadas entre sí de un sistema del producto, esto desde la adquisición de materia prima a partir de recursos naturales hasta la disposición final de residuos [20]. El análisis de ciclo de vida (ACV), definido a partir de este razonamiento, es la evaluación de las cargas ambientales asociadas al producto mediante la identificación y cuantificación del consumo energético y de materiales, y de los residuos y emisiones vertidas al medio ambiente para cada las distintas fases del ciclo de vida del producto o sistema, es decir, “de la cuna a la tumba”.

Los ACV buscan identificar oportunidades para mejorar el desarrollo ambiental de productos, a través de la aportación de información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales. Ayudan a conocer las fases del ciclo de vida cuyo impacto sobre el medio ambiente es mayor; y a establecer criterios para la selección de materiales, y para la fabricación, producción y diseño que supongan un menor impacto sobre el ambiente. Además permiten conocer a las posibles consecuencias de un cambio en cualquier aspecto del ciclo de vida de un determinado producto (simulación) [21].

En la normativa ISO para este tipo de análisis [22], están definidas las cuatro fases por las que se rige el proceso:

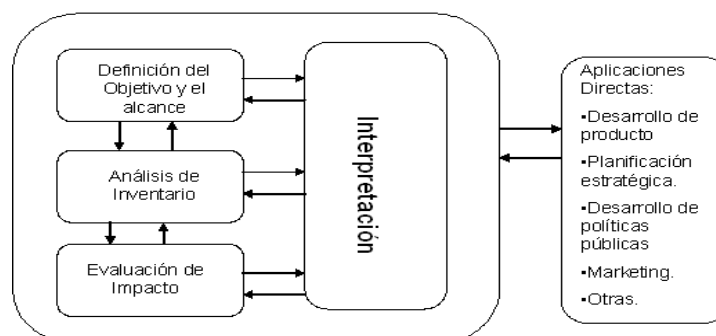


Figura 5.1. Fases de un análisis de ciclo de vida [22]



Las cuatro fases que se observan en la Figura 5.1 son las llamadas *etapas del proceso de análisis de ciclo de vida*. Al definir en la primera fase los objetivos y el alcance del ACV, se tiene un qué, un porqué y un cómo para el estudio. Todas las entradas y salidas del producto o sistema deben ser inventariadas y cuantificadas, actividades que se llevan a cabo en la fase de análisis de inventario. En la fase de evaluación de impactos, estos valores pasan a ser evaluados, ubicándolos en categorías de impacto, y sintetizando las contribuciones a valores comparables entre sí. Para esto se utilizan diferentes métodos de evaluación. El más usado en España es el descrito en el *eco-indicador*; método de evaluación de los efectos sobre el medio ambiente o la salud humana, desarrollado en el contexto europeo por el *Programa de Investigación en Reutilización Nacional de Residuos* (NOH) de la agencia holandesa de energía y medio ambiente, y asesorado por los expertos suizos del *Instituto de Salud Pública y Medio Ambiente (RIVM)*. El valor del eco-indicador para cada categoría se calcula con la introducción de coeficientes de ponderación en los análisis de ciclo vida para cada proceso y material, que otorga un valor representativo del impacto ambiental asociado a un proceso [23].

Por último, la fase de interpretación de datos, es en la que se analizan los resultados obtenidos, y se cuantifica el consumo energético y los impactos generados, buscando el origen de los mismos y proponiendo medidas para la optimización del proceso. Para la evaluación del impacto ambiental se utilizan criterios detallados en la metodología del eco-indicador, pero que básicamente asignan un porcentaje del impacto total a cada categoría tenida en cuenta en el análisis [23].

A raíz de la evolución de los sistemas de gestión ambiental, y del auge que ha tomado el ACV dentro de ellas, en el pasado siglo se comienzan a implementar herramientas informáticas que facilitan el proceso de análisis de ciclo de vida, especialmente en las fases de análisis de inventario y evaluación de impactos. Estas herramientas se han ido desarrollando conforme ha avanzado la tecnología, y hoy día le ofrecen al usuario una manera mucho más sencilla y rápida de obtener resultados fieles y precisos.

Existen en el mercado programas comerciales que ofrecen la opción de realizar el análisis de ciclo de vida de un producto haciendo uso del mismo, y que han tenido relativo éxito. Sin embargo, el Departamento de Ingeniería de Proyectos de la ETSEIB decidió que era necesaria la creación de una herramienta informática que facilitara los



análisis de ciclo de vida desarrollados por su equipo; que estuviese personalizada a los requerimientos exigidos por las normativas vigentes en la región de Cataluña y cuyas condiciones y criterios de análisis se adaptaran de mejor manera a la misma. En este contexto es que tiene lugar la creación e implantación del *CICLOPE* como herramienta informática del DPE para el análisis de ciclo de vida.

## 5.2. Descripción del *CICLOPE*

*CICLOPE*, es una herramienta informática desarrollada en el año de 1997, por el grupo de investigación sobre el análisis de ciclo de vida del Departamento de Proyectos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona (ETSEIB), dirigido por la Dra. Margarita González Benítez; para responder a la necesidad de un software, que permitiera comparar tanto los datos reales de las etapas del ciclo de vida. Está desarrollado con la herramienta de programación Borland C++ Builder Profesional. En el año 2004 se realizó una actualización, que dio lugar a la versión *V2.0*, en la que se integran modelos de tratamiento de aguas residuales gestión de residuos y energéticos, así como la metodología empleada por el eco-indicador desarrollado en el año 1995, para la determinación de los modelos de daño de las categorías evaluadas [21].

La versión *V2.0* del *CICLOPE* utiliza dos métodos de evaluación de impacto ambiental: en primer lugar el modelo de aproximación de daños propuesto en el eco-indicador desarrollado en 1999, para la estimación de los impactos ocasionados, y en segundo lugar el método de *aproximación suiza de los volúmenes críticos*, utilizado para la ponderación de los indicadores obtenidos. La versión *V3.0* desarrollada actualmente, contempla un número mayor de categorías específicas e incluye nuevas categorías, como ruido y eficiencia energética, lo que permite tener una visión más completa de los impactos ocasionados; y posee un sistema de manejo de incertidumbres más eficiente, lo que lo hace más riguroso [24].

El método de aproximación de los volúmenes críticos está basado en los valores de concentraciones máximas de emisiones fijadas por cada país. Se definen volúmenes críticos para cada categoría y se realiza una ponderación de las emisiones haciendo el cálculo del volumen de aire o agua necesario para diluir un contaminante hasta su límite legal de emisión. El resultado es la suma de los volúmenes críticos obtenidos para cada contaminante, dando lugar a un volumen total de aire o agua asociado a cada etapa del proceso. El *eco-perfil* para el producto estudiado incluye la suma de los volúmenes



críticos para aire, agua y residuos sólidos, así como el consumo energético equivalente [21].

La facilidad en la utilización, y la estricta aplicación de la legislación vigente son las principales ventajas del método; sin embargo es importante considerar que éste se limita sólo al país donde se realiza el estudio, ya que la legislación cambia de país en país, y por lo tanto los límites legales de emisiones varían. Además sólo puede ser aplicado para valorar efectos sobre la salud, y presenta complicaciones en aquellas emisiones donde no se encuentren especificados límites legales.

La evolución de *CICLOPE* ha ido a la par de las necesidades específicas de los proyectos medioambientales a los que ha auxiliado y siempre siguiendo las pautas ISO para ACV [24].

### **5.3. Funcionamiento del *CICLOPE***

*CICLOPE* centra su ámbito de aplicación en las fases de definición del sistema y de la unidad funcional, la realización del inventario y la cuantificación y evaluación de los impactos dentro del análisis de ciclo de vida de un producto o actividad. Para esto, el funcionamiento del programa está basado en la existencia de una configuración modular, pudiéndose distinguir dos tipos de módulos [25]:

#### **5.3.1. Módulo de trabajo.**

En él se define el sistema objeto del estudio, y se realiza gran parte del inventario del ciclo de vida; es decir, se identifican los procesos, productos y corrientes residuales valoradas para todas las operaciones del ciclo de vida, el consumo de energía, y la gestión y disposición final de los residuos.

En este módulo se consideran dos tipos diferentes de operaciones: los procesos productivos (de extracción, transformación o gestión de residuos) y los transportes. Dentro de estos se cuantifican aquellos materiales, que son extraídos, transformados en otros diferentes, gestionados ambientalmente y/o transportados; así como consumos de energía y generación de corrientes residuales.



### 5.3.2. Módulo de cálculo.

Este módulo incluye parte del inventario del ciclo de vida y la totalidad de la evaluación de los impactos ambientales. Debe realizarse a través de los módulos de cálculo internos de *CICLOPE*, y no pueden ser modificados por el usuario, sino tomar un valor de acuerdo a los datos introducidos manualmente o calculados en el módulo anterior. La mayoría de estas librerías son extraídas del *eco-indicador 99* para la cuantificación de las categorías de impacto, e incorporadas a la base de datos del programa.

*CICLOPE* muestra los resultados, tanto para el ciclo completo, como para cada una de las etapas, procesos o transporte involucrados; de dos maneras posibles: en gráficos y en listados, según lo decida el usuario.





## 6. Resultados

### 6.1. Análisis exergético de un esterilizador

#### 6.1.1. Esterilización de productos sanitarios

La esterilización es básicamente la eliminación o muerte de todos los microorganismos (patógenos o no patógenos) que contiene un objeto o sustancia, incluyendo las formas esporuladas de hongos y bacterias. Significa el nivel más alto de seguridad y, por tanto, de letalidad (o eficacia biocida). La esterilización puede ser alcanzada mediante la aplicación de calor, sustancias químicas, radiación, altas presiones o filtración [26].

En un hospital o centro sanitario, es necesario que todo producto y material usado para el tratamiento de los pacientes sea absolutamente seguro en su uso ya que el riesgo de contagio de enfermedades debe ser mínimo. La limpieza, la descontaminación y la esterilización son métodos imprescindibles para combatir este peligro. La demanda para encontrar procedimientos apropiados para el control de infecciones se ha incrementado enormemente, especialmente desde la aparición de enfermedades como el SIDA, de rápida diseminación a escala mundial. Además, enfermedades como la hepatitis B, que pueden ser transmitidas por instrumentos quirúrgicos contaminados, han estimulado la creación de normas y reglamentos más estrictos para los procedimientos de descontaminación y esterilización, como la UNE EN-285, que regula el proceso y las especificaciones de los esterilizadores médicos en España [27].

Las centrales de esterilización de los establecimientos médicos están compuestas, casi en su totalidad por esterilizadores de vapor, que usan vapor presurizado para la eliminación de microorganismos. Las fases de un proceso de esterilización por vapor pueden resumirse en:

- *Acondicionamiento*: el material se prepara para iniciar la fase de esterilización. Se eliminan las bolsas de aire contenidas dentro de la cámara.
- *Exposición*: el producto se lleva a una temperatura determinada con un tiempo mínimo de exposición. Es aquí donde ocurre la fase de esterilización.



- *Escape*: el vapor presente en la cámara se elimina. El tiempo dependerá del tipo de producto.
- *Secado*: depende del volumen y del tipo de producto.

### 6.1.2. Descripción del proceso de esterilización

El equipo analizado es un esterilizador a vapor, cuyo principal objetivo es la esterilización de material tanto quirúrgico hospitalario textil y/o metálico, como de otro tipo tal como líquidos, recipientes, etc., mediante cambios de presión y temperatura durante determinado tiempo para lograr la destrucción de microorganismos de acuerdo a la norma UNE-EN 285. La eficacia del proceso de esterilización es comprobada mediante controles rutinarios frecuentes (físicos, químicos, biológicos).

Este equipo, que trabaja a altas temperaturas, efectúa el vacío valiéndose del efecto Venturi, lo que elimina las bolsas de aire de la cámara de esterilización del equipo, que es posteriormente llenada con vapor y puesta a condiciones de temperatura y presión que garantizan la esterilización de la carga, como se puede ver en la Figura 6.1.

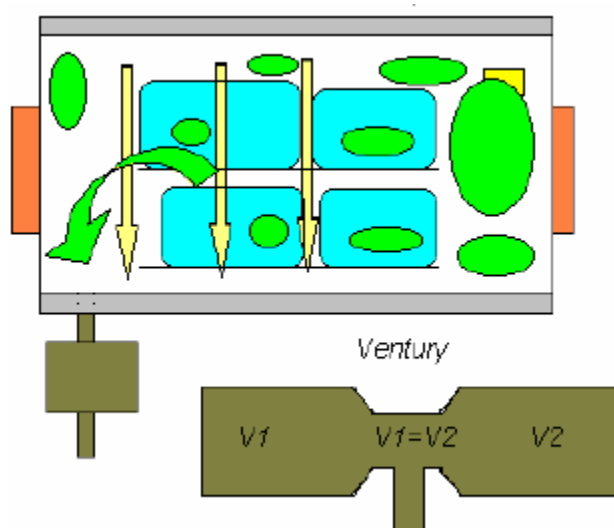


Figura 6.1. Pre-vacío de la Cámara de Esterilización.

Los pasos consecutivos para llevar a cabo el proceso son descritos a continuación:

- La carga a esterilizar es introducida al equipo. La carga de esterilización está conformada por *Unidades de Esterilización (UE)*; definidas por la norma UNE-EN 285 como recipientes de dimensiones conocidas y establecidas.





- El ciclo de esterilización tiene una duración predefinida. Durante este tiempo el proceso realiza varios llenados y vaciados consecutivos de la cámara de vapor (en total 10 llenados completos) para eliminar completamente las bolsas de aire dentro de ella. Gracias al vapor que produce el equipo, alcanza también una temperatura y una presión específicas. En esta fase se observa disipación de energía a través de las paredes del equipo, en forma de calor residual. Las aguas residuales son enviadas al desagüe durante el proceso.
- Finalmente, concluido el ciclo, la máquina imprime un reporte de operación en el que certifica que las condiciones de esterilización fueron alcanzadas, y la carga es extraída del equipo.

### 6.1.3. Definición del volumen de control

Para fines del análisis exergético, se establece un volumen de control, fijado para este caso como el volumen del equipo, delimitado por las fronteras físicas del mismo. Este enfoque nos permite evaluar la exergía que entra al sistema en forma de energía y de flujos de materia, la que es aprovechada (que realiza trabajo útil) y la que es perdida por irreversibilidades.

Si observamos este volumen de control como una caja negra, y tomamos en cuenta sólo los flujos energéticos y de materia, se tiene un sistema como el ilustrado en la Figura 6.2. En la entrada tenemos un flujo de energía eléctrica que da la potencia al equipo, una corriente de agua a condiciones estándar, y la carga de esterilización. En la salida se tiene la carga ya esterilizada, que representa el trabajo útil del sistema, el calor residual, por el que el sistema pierde cierta cantidad de exergía, la exergía perdida por irreversibilidades, y la corriente de aguas residuales, que representa la exergía perdida en emisiones.





Figura 6.2. Volumen de Control del proceso de esterilización

Para realizar el análisis exergético de este volumen de control, se llevaron a cabo simplificaciones que hacen posible desarrollar modelos termodinámicos que lo represente de la manera más precisa posible. Las aproximaciones hechas al modelo de resolución de este problema son las descritas en el apartado 4.4, y las consideradas a continuación:

- El volumen del sistema no cambia, es decir, el proceso es isocórico
- Admite, como energía de entrada, únicamente una fuente eléctrica, que lo alimente con una potencia, expresada en kW.
- Para este caso en específico sólo se usa agua como sustancia de trabajo, y aire como gas ideal para el entorno.
- El proceso es alimentado únicamente con trabajo, no se agrega calor al volumen de control aunque el volumen de control genera calor.

#### 6.1.4. Datos experimentales

Los datos del equipo fueron recopilados *in situ* en la planta de ensamblaje, ubicada en la ciudad de Barcelona. Se recopilaron de manera continua valores de presión y temperatura en los puntos clave. Para ello se hizo uso de sensores termopares y un dispositivo electrónico de control y monitoreo. La presión de las corrientes de entrada y salida, así como de los alrededores es la atmosférica, ya que el volumen de control se define con fronteras al



ambiente normal de operación del esterilizador (hospital). Los valores de las temperaturas y presiones se encuentran recopilados en la tabla 6.1, y en la figura 6.3 se encuentra detallada su ubicación.

$T_0$ (K)	298
$T_E$ (K)	298
$T_S$ (K)	353
$T_{Op}$ (K)	407
$T_{sup}$ (K)	320
$p_0$ (kPa)	101,325
$p_{Op}$ (kPa)	304,240

Tabla 6.1. *Datos experimentales de temperatura y presión*

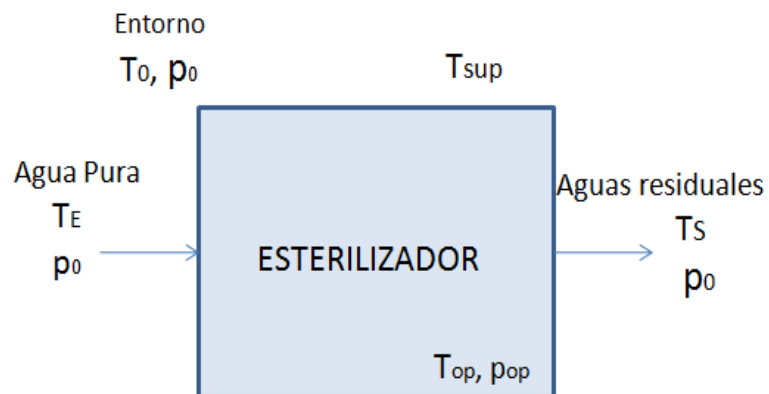


Figura 6.3. *Diagrama explicativo de las variables de entrada al sistema*

Estos datos experimentales fueron obtenidos promediando los valores reportados de las mediciones de un ciclo completo, con intervalos de 2 segundos entre cada una de ellas.



La potencia del equipo está definida por el fabricante, y es de 17 kW; mientras que la duración promedio de un ciclo de esterilización es de 41 minutos. El volumen de agua de trabajo es de 332 litros por ciclo. Con estos datos se puede conocer la cantidad de energía que entra al sistema.

Para conocer el volumen de vapor que ocupa la cámara, usamos las dimensiones de una unidad de esterilización (UE), que está definida oficialmente como 30 cm de altura, 30 cm de ancho y 60 cm de profundidad. La cámara de esterilización tiene una capacidad máxima de 8 cargas. Con estos datos, ya es posible realizar el cálculo del rendimiento exergético del sistema, con sus respectivos balances.

### 6.1.5. Cálculos numéricos, balance de exergía.

Para realizar el balance de exergía del sistema, debemos antes definir los valores de exergía de entrada y salida al mismo. Como entradas tenemos al potencial de trabajo de energía, o exergía de la potencia, y a la exergía de las corrientes que entran al sistema. Por otro lado, como salidas tenemos la exergía perdida como calor residual, la perdida por las corrientes de salida al sistema, la exergía por irreversibilidades y, por último, la exergía del proceso, que es la exergía útil del proceso.

#### 6.1.5.1. Potencial de trabajo de la energía.

La exergía que se introduce al sistema al aplicarle una potencia de 17 kW, resulta igual a la propia energía potencial, sin tener en cuenta la temperatura y la presión del ambiente.

$$Ex_p = 17 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \cdot 2460 \text{ s} = 41820 \text{ kJ}$$

#### 6.1.5.2. Exergía de flujo de la corriente de entrada.

Para este caso particular, las exergía de flujo de la corriente de entrada es nula, ya que se encuentra bajo condiciones de temperatura y presión iguales a las del estado muerto.

$$Ex_E = 0$$



### 6.1.5.3. Exergía de flujo de la corriente de salida.

Usando la Ec 3.13, que define el contenido exergético de las corrientes, y usando las propiedades del agua saturada en el estado muerto y en las condiciones de salida, mostradas en la tabla 6.2 y determinadas con tablas de temperaturas para agua saturada [28].

	T (K)	$u$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg.K)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)
Corriente de salida S	353	334,97	1,0756	1,029e-3
Estado muerto 0	298	104,83	0,3672	1,003e-3

Tabla 6.2. Propiedades de la corriente de agua saturada de salida y en el estado muerto.

Obtenemos

$$ex_S = 19,039 \text{ kJ/kg}$$

Como

$$m_a = 332 \text{ l} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 332 \text{ kg}$$

Entonces

$$Ex_S = 6321,09 \text{ kJ}$$

### 6.1.5.4. Exergía del proceso

La tabla 6.3 resume las propiedades del agua, como vapor de agua saturado a las condiciones dentro del VC, y como agua líquida saturada en el estado muerto, que fueron usadas para determinar la exergía específica del proceso. Estas propiedades fueron obtenidas de tablas de saturación del agua [28]. La presión dentro de la cámara es la de saturación.



El proceso de llenado de la cámara se repite 10 veces por cada ciclo de esterilización, así que el valor de la exergía del proceso de llenado deberá ser multiplicada por las veces que es llevado a cabo, es decir, diez.

	T (K)	$u$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg.K)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)
Operación $op$	407	2543,4	6,9884	0,598
Estado muerto $0$	298	104,83	0,3672	1,003e-3

Tabla 6.3. *Propiedades dentro de la cámara de esterilización y en el estado muerto.*

Usando nuevamente la Ec. 3.13 para el cálculo del contenido exergético específico de la corriente, obtenemos que:

$$ex_{op} = 525,92 \text{ kJ/kg}$$

Masa de vapor que ocupa la cámara

$$m_{vapor} = 0,432 \text{ m}^3 \cdot \frac{\text{kg}}{0,598 \text{ m}^3} \cdot 10 \text{ llenados} = 7,22 \text{ kg}$$

Finalmente, la exergía consumida por el proceso de esterilización es:

$$Ex_{op} = 3799,93 \text{ kJ}$$

#### 6.1.5.5. Exergía perdida por el calor residual.

La transferencia de calor siempre está acompañada por la transferencia de exergía. Para este caso, se ha considerado que todo el calor cedido al entorno proviene exclusivamente del vapor generado durante el proceso de esterilización, es decir, el equipo no genera trabajo y el portador de exergía y calor es el agua. La eficiencia, o transferencia de exergía asociada a la transferencia de calor se encuentra definida por:



$$Ex_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) m C_V (T - T_0)$$

Donde:

$$T = 320 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$C_V = 28,03 \text{ kJ/kmol.K}$  para el vapor de agua

$$m = 332 \text{ kg. MMagua} = 18,44 \text{ kmol}$$

Entonces:

$$Ex_Q = 781,77 \text{ kJ}$$

#### 6.1.5.6. Balance exergético del sistema.

Finalmente, para conocer la exergía liberada por irreversibilidades del sistema, es decir, el resto de la exergía perdida durante un ciclo de esterilización, debemos realizar el balance exergético sobre el volumen de control:

$$Ex_P = Ex_Q + Ex_{op} + Ex_S + Ex_{irrev}$$

Sustituyendo valores de potencial de trabajo de energía, y las exergías perdidas por calor residual, exergía del proceso y exergía de flujo de las corrientes de salida, podemos calcular el valor de la exergía perdida por irreversibilidades:

$$Ex_{irrev} = 30917,84 \text{ kJ}$$

#### 6.1.5.7. Rendimiento exergético.

Usando la Ec. 3.32 para el cálculo del rendimiento exergético, obtenemos

$$\eta_{ex} = 0,091$$



### 6.1.6. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos para el análisis exergético del esterilizador clínico son presentados convenientemente en forma de diagrama exergético en la Figura 6.4. En ella se observa que las mayores pérdidas de exergía son las asociadas a las irreversibilidades del proceso, que alcanzan aproximadamente un 74% del gasto exergético total del sistema. El 26% restante se divide entre la exergía perdida por disipación de calor al entorno, la perdida por el flujo de las corrientes residuales, y, por último, la exergía del proceso de esterilización, es decir, el porcentaje de exergía aprovechado por el sistema.

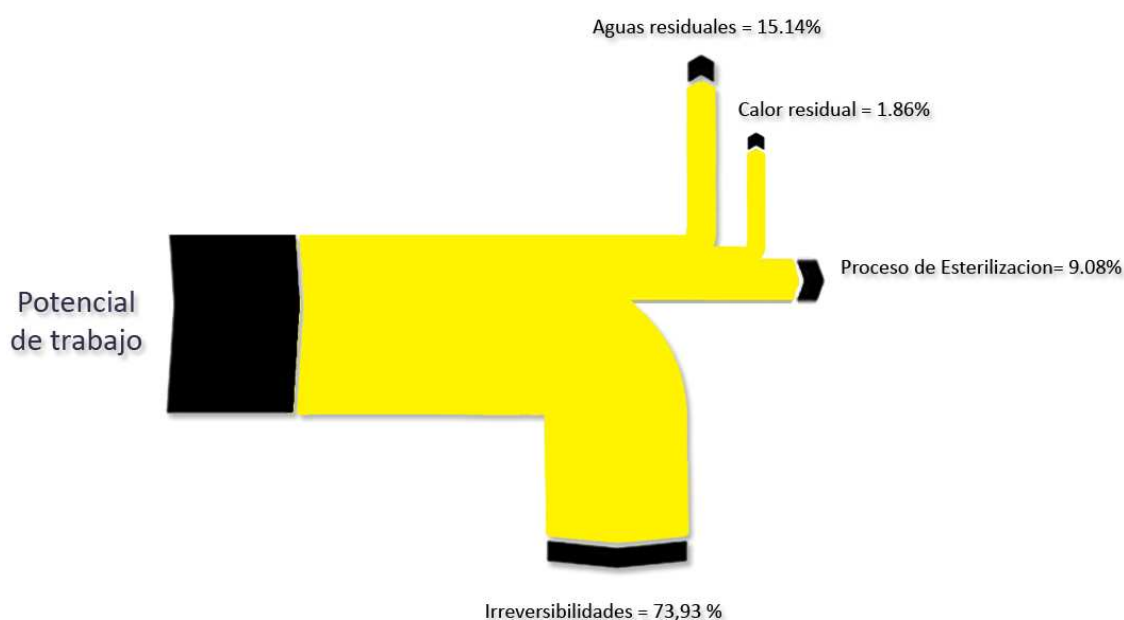


Figura 6.4. *Diagrama de Sankey del proceso.*

El rendimiento exergético obtenido para la fase de uso del esterilizador clínico evidencia que para este bien de equipo, el principal gasto exergético es el generado por las irreversibilidades inherentes al proceso. El potencial de trabajo de la energía que entra al sistema, al contrario de lo que se puede suponer, no es destinado mayormente al proceso de esterilización, sino que más bien se pierde como la exergía de las irreversibilidades inherentes del sistema. Esta cantidad de exergía perdida realmente es heterogénea, es decir, proviene de diversas fuentes de exergía. Está compuesta principalmente por la exergía presente en la carga de esterilización, la destruida durante el proceso y la exergía





asociada a las irreversibilidades del proceso. Es evidente que la carga de esterilización posee cierta exergía asociada, pues abandona el volumen de control a una temperatura mayor que la del entorno, propiciando así el intercambio de calor con el medio que la rodea. También es lógica la existencia de un flujo de exergía generado por las irreversibilidades del sistema, que acapara toda la exergía perdida en los procesos que conforman el sistema y que no son reversibles en el tiempo.

El alto porcentaje de la exergía total que representan las irreversibilidades no nos permite proponer modificaciones del diseño al bien de equipo analizado que produzcan una mejora significativa en el rendimiento exergético del sistema, ya que el bajo desempeño exergético del proceso de esterilización depende mucho más de las irreversibilidades inherentes al sistema que del calor disipado, o de las condiciones de las corrientes residuales.

Contrario a lo que se había supuesto inicialmente, la exergía asociada a las pérdidas de calor por disipación no resulta considerable si tomamos en cuenta la gran cantidad de energía que se pierde por este medio. Esto se debe a que el calor es una forma de energía desorganizada, y sólo una porción pequeña de él puede convertirse en trabajo, que es una forma de energía organizada. Sin embargo, siempre es posible producir trabajo a partir de calor a una temperatura superior a la del entorno. Este potencial de trabajo del calor emanado por el VC podría ser aprovechado para calentar alguna corriente o proceso simultáneo de otro sistema.

Por otra parte, la exergía de flujo perdida por la corriente de agua residual representa aproximadamente un 15% de las pérdidas totales, esto debido, básicamente a la alta temperatura con la que abandona el sistema. El agua caliente, que es desaprovechada ahora, podría igualmente ser aprovechada para el calentamiento de alguna otra corriente de un sistema alternativo, es decir, podría ser usada como la fuente de calor de un intercambiador de calor.

La exergía del proceso, o la exergía útil, representa apenas un 9% del gasto exergético total del sistema. Esta es la exergía perdida para que el fluido de trabajo pase de las condiciones de entrada a las condiciones de operación dentro de la cámara de esterilización, durante las múltiples fases de llenado y vaciado de la cámara.



## 6.2. Nuevo módulo de eficiencia exergética

### 6.2.1. Propuesta y creación del módulo

La ampliación que propone este proyecto al programa *CICLOPE V2.0*, descrito en el apartado anterior, es la incorporación de un nuevo módulo para el cálculo de la eficiencia exergética del producto o sistema estudiado a los de análisis de ciclo de vida ya desarrollados. Esta decisión se basa en la necesidad de tomar en consideración y minimizar la pérdida de reservorios de exergía y de emisiones exergéticas al ambiente. La incorporación de estos criterios convierte a la nueva versión *CICLOPE V3.0* en una herramienta de análisis de impactos más poderosa y útil.

Es importante destacar que para fines de la aplicación al *CICLOPE*, el balance exergético se realizará únicamente a la fase de uso del producto porque es en ella en la que se tiene interés por evaluar el rendimiento exergético del bien de equipo; ya que lo que se busca, a corto plazo, es proponer modificaciones y soluciones que permitan la mejor utilización de los recursos y la reducción de los impactos ambientales del bien de equipo durante la fase de uso por parte del cliente.

Dentro de la configuración modular bajo la que funciona el *CICLOPE*, y para la realización del balance exergético del sistema, el programa requiere la introducción de datos de operación del sistema (definido por un volumen de control) y del entorno por parte del usuario, con lo que, consultando una base de datos, definirá los estados termodinámicos de las entradas, salidas e interacciones del sistema, y procederá a los cálculos exergéticos.

En síntesis, para introducir el módulo que permite la evaluación de criterios exergéticos dentro del programa del *CICLOPE V3.0*, se llevan a cabo los siguientes pasos:



- Definición de un sistema termodinámico genérico para el que será aplicable el módulo. Se toman en cuenta todas las posibles entradas o salidas de los procesos o sistemas más comunes que guardan relación con el que es nuestro objeto de aplicación.
- Introducción y clasificación de datos del sistema mediante uso de ventanas de operación. Incorporación de librerías con las tablas de propiedades termodinámicas de las sustancias a la base de datos del programa. Se creó un lazo de cálculo interno que define estados termodinámicos con datos de presión y temperatura.
- Cálculos de exergías de flujos, balances de exergía y rendimientos exergéticos, que requieren de la definición de estados previa.
- Disposición de los resultados de dos maneras distintas: en forma de lista y de manera gráfica, mediante un diagrama de Sankey. En esta fase es esencial el uso de aplicaciones gráficas dentro del programa.

### 6.2.2. Definición de sistema

Para realizar el análisis exergético de un sistema usando una herramienta informática como *CICLOPE*, es necesario definir un sistema genérico de estudio. En este caso, ese sistema será definido como el volumen de control cuyas fronteras están conformadas por las fronteras físicas del equipo, es decir, el volumen de control está conformado por la totalidad del equipo del se desea analizar la fase de uso. Un ciclo de operación del mismo será considerado como el proceso que lleva a cabo el sistema.

La versión *V3.0* del *CICLOPE* se limita, por cuestiones de tiempo de programación y desarrollo del software, a sistemas cuyos fluidos de entrada y salida son sustancias puras de uso común, es decir, el programa no es aplicable a sistemas multicomponentes. Esto se ha dispuesto así porque de otra manera los cálculos de las propiedades termodinámicas implicarían la aplicación de un módulo para el cálculo de propiedades de mezclas, lo que no pertenece a los objetivos de nuestro proyecto. Dentro de los bienes de equipo a los que puede ser aplicado este modelo se encuentran algunos dispositivos comunes de refrigeración, plantas de vapor eléctricas, equipos de pasteurización, etc.



El sistema genérico a estudiar también está limitado por algunos aspectos de operación, es decir, el sistema a estudiar debe ser estacionario, cerrado, adiabático y no reactivo, como se especifica en el apartado 4.4, en las simplificaciones hechas al sistema.

A rasgos generales, el proceso genérico a estudiar tiene como entradas energía, que puede entrar como potencia eléctrica y una o varias sustancias de trabajo (puras). Naturalmente, el sistema lleva a cabo algún trabajo sobre una carga, que también debe ser considerada. Dentro del mismo ocurren cambios termodinámicos que generan un gasto exergético. Son consideradas como pérdidas los consumos de exergía por dispersión de calor en las paredes del equipo, la contenida en las corrientes de desecho, y la exergía perdida por irreversibilidades dentro del proceso. La exergía útil es la necesaria para que el proceso sea llevado a cabo.

Para la definición de dicho sistema genérico dentro del *CICLOPE V3.0* se generó un modelo de sistema básico, cuyas entradas y salidas son las descritas anteriormente. El usuario sólo tiene que asignar valores a las variables ya definidas.

### 6.2.3. Introducción de datos del sistema.

Dentro de la función principal *edición*, y al abrir una pestaña de interacción con el usuario, el programa solicitará valores de potencia de entrada, volumen de la carga de trabajo, condiciones del entorno y tiempo de duración del proceso. El usuario puede agregar o eliminar entradas y salidas al sistema, que se seleccionan como una opción dentro de la ventana de *edición*. Luego de esto, se seleccionará la composición de cada entrada y salida de una lista de sustancias almacenadas en la base de datos, y se define su flujo másico. Al seleccionar la sustancia, el sistema le solicitará inmediatamente valores de masa, presión y temperatura, con los que, consultando de la base de datos las tablas termodinámicas de la sustancia seleccionada, define las propiedades termodinámicas ( $u$ ,  $s$ ,  $v$ ) de los estados de entrada y salida. Debe especificarse también la temperatura de la frontera en las partes donde ocurre el intercambio de calor entre el sistema y el entorno.

Para la definición del estado de las sustancias con las que se trabaja en las entradas y salidas del sistema, y durante el mismo proceso, fue necesaria la incorporación de las tablas de propiedades termodinámicas a la base de datos del programa. Para ello se creó una librería, en la que se almacenan las tablas de propiedades de las sustancias puras de uso común. En caso de que la sustancia no se encuentre en la base de datos, el usuario tiene la



posibilidad de cargar la tabla por sí mismo a una base de datos temporal del sistema, que le permite calcular las propiedades de forma automática.

Se crea posteriormente un lazo de cálculo interno que define todas las propiedades termodinámicas con datos de presión y temperatura de la sustancia, que hace uso de estas bases de datos.

#### **6.2.4. Cálculos de exergía y balances exergéticos. Rendimiento exergético.**

Esta es la fase en la que se ponen en uso las ecuaciones descritas relacionadas con exergía y la segunda ley de termodinámica. Para la determinación de exergía de las corrientes de entrada y salida del sistema se usa la ecuación 3.13 si nos encontramos frente a un gas, y la ecuación 3.28, si se quiere el cálculo del contenido exergético específico de una corriente fluida. La exergía de la potencia de entrada es exergía pura, y se calcula como tal. Para el cálculo de la exergía perdida por difusión de calor se utiliza la temperatura del aire en la superficie del equipo, y la ecuación 3.13 nuevamente. Estas exergías calculadas son exergías específicas, por lo que es importante considerar el flujo másico de cada corriente.

Cuando ya se tienen las exergías de cada corriente de entrada y salida, se realiza un balance exergético, usando la ecuación 3.26. Para las exergías de entrada y salida se suman las contribuciones de todas las corrientes, previamente transformadas multiplicando por los flujos másicos. De este balance se conocen los valores de la exergía que se genera (útil) y que se pierde por irreversibilidades. Los valores son identificados por el programa y almacenados como nuevas variables dentro del mismo.

Por último en esta etapa de cálculos, se usa la ecuación 3.32 para calcular el rendimiento exergético de la fase de uso del bien de equipo, que determina la relación entre el flujo de exergía útil y la cantidad de exergía consumida por el proceso.

#### **6.2.5. Cálculo del rendimiento exergético y presentación de los resultados.**

Con los valores obtenidos, se procede a representar gráficamente el balance exergético. Para ello se hace uso de herramientas gráficas incorporadas al programa, que almacenan los datos y los convierten en flechas proporcionales al porcentaje de la exergía total de entrada que representan.



Dentro de la presentación de resultados del análisis exergético de la fase de uso del bien de equipo, que es adjuntada al reporte generado para el ACV, se leerá primeramente una lista tabulada que resume la exergía introducida al sistema, la exergía útil, la pérdida por irreversibilidades y la que es recuperable; además de los flujos energéticos de entrada y salida y demás parámetros que ayudan a definir la energía del sistema. Esta forma tabulada de expresar los resultados permite encontrar alguna variable de manera más directa. Además de esta, se tendrá la forma gráfica, mediante la representación de los flujos de exergía mediante un diagrama de Sankey, lo que permite analizar de manera más sencilla las pérdidas exergéticas, y en qué etapa del proceso están siendo generadas, información muy valiosa para los diseñadores que desean optimizar el sistema.

El resultado obtenido permitirá al usuario tener noción de los flujos de exergía del sistema, y por ende, de la energía que está siendo aprovechada y la que está siendo malgastada en cada fase del proceso. Estos conocimientos son la base para el análisis desde el punto de vista de diseño o aplicación, y para la posterior optimización del sistema.

#### **6.2.6. Diagrama de flujo**

Un diagrama de flujo es la representación detallada en forma gráfica de cómo deben realizarse los pasos en el ordenador para producir resultados. En este caso, el diagrama de flujo servirá para detallar, a grandes rasgos, la ruta de programación del nuevo módulo de rendimiento exergético que se propone incorporar al *CICLOPE*.



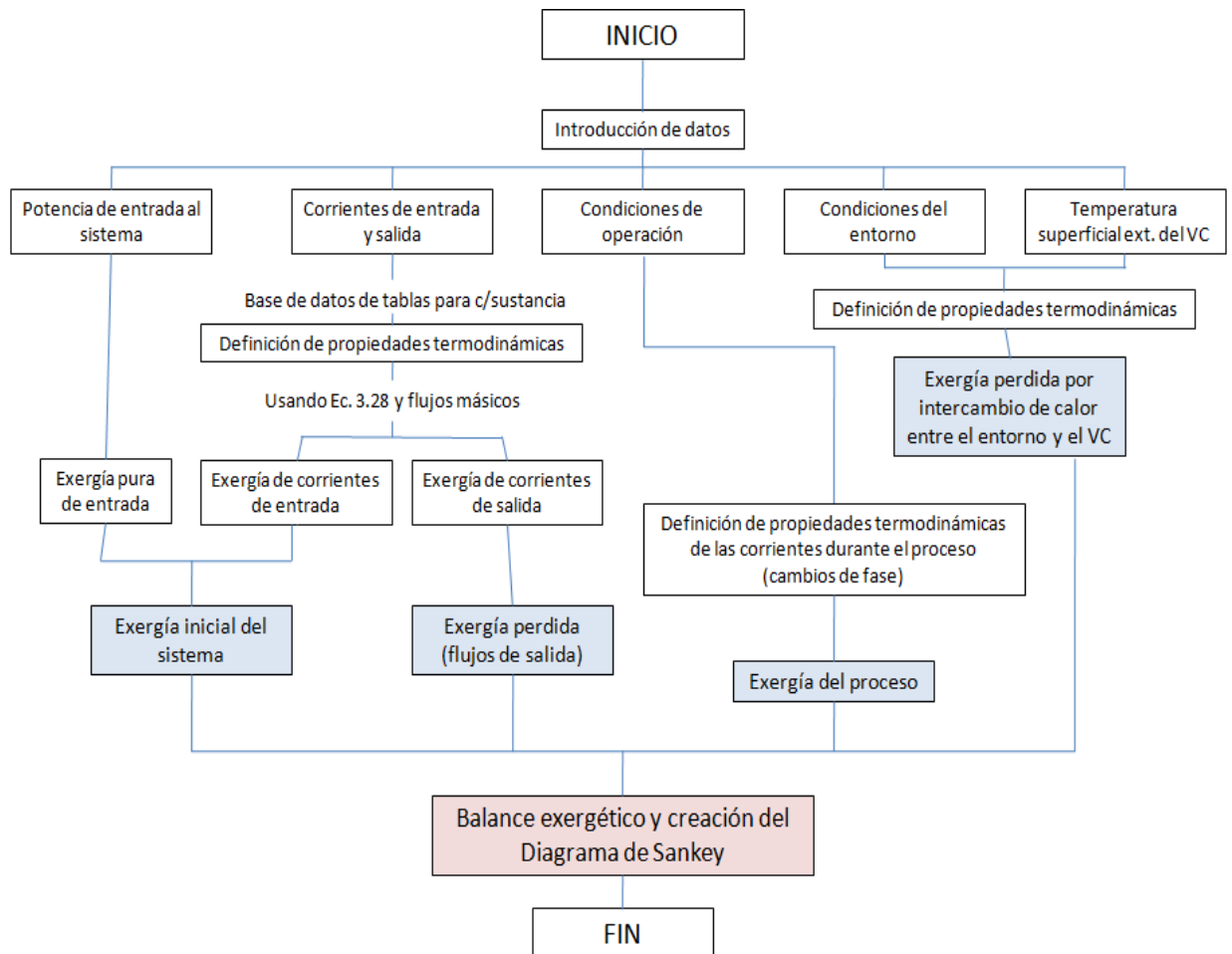


Figura 6.5. Algoritmo de programación para el modelo de rendimiento exergético

### 6.2.7. Especificación formal de desarrollo del módulo.

Para que el funcionamiento del módulo para cálculos exergéticos del *CICLOPE V3.0* sea comprendido a un nivel informático, se facilita la información en este apartado, donde se especifican, de manera formal, los datos de entrada al programa, los cálculos intermedios y los valores de salida del mismo. Los datos de entrada solicitados al usuario son:

- pE Potencia de entrada.
- vCT Volumén de Carga de Trabajo.
- Una cantidad n de corrientes que serán compuestas por los siguientes factores (n especificado por el usuario). Para cada corriente i, i menor que n y mayor que cero, se tiene:
  - o tS(i) Tipo de Sustancia de la corriente i.
  - o mE(i) Masa de Entrada de la corriente i.



- $mS(i)$  Masa de Salida de la corriente  $i$ .
- $tE(i)$  Temperatura de Entrada de la corriente  $i$ .
- $tS(i)$  Temperatura de Salida de la corriente  $i$ .
- $pE(i)$  Presión de Entrada de la corriente  $i$ .
- $pS(i)$  Presión de Salida de la corriente  $i$ .
- $tDP$  Tiempo de Duración del Proceso.
- Condiciones de Operación del Sistema. Se definen como:
  - $tC$  Temperatura Cero.
  - $tA$  Temperatura Alfa.
  - $pC$  Presión Cero.
  - $pA$  Presión Alfa.
- $tS$  Temperatura de Superficie (de Frontera).

Una vez ingresados todos estos datos, para cada corriente se definen mediante la librería de sustancias las propiedades termodinámicas asociadas a cada una, a saber:

- $eEM(i)$  Energía Interna Específica Muerta para corriente  $i$ .
- $eE(i)$  Energía Interna Específica de Operación para corriente  $i$ .
- $eEE(i)$  Energía Interna Específica de Entrada para corriente  $i$ .
- $eES(i)$  Energía Interna Específica de Salida para corriente  $i$ .
- $eEM(i)$  Entropía Específica Muerta para corriente  $i$ .
- $eE(i)$  Entropía Específica de Operación para corriente  $i$ .
- $eEE(i)$  Entropía Específica de Entrada para corriente  $i$ .
- $eES(i)$  Entropía Específica de Salida para corriente  $i$ .
- $vEM(i)$  Volumen Específico Muerto para corriente  $i$ .
- $vE(i)$  Volumen Específico de Operación para corriente  $i$ .
- $vEE(i)$  Volumen Específico de Entrada para corriente  $i$ .
- $vES(i)$  Volumen Específico de Salida para corriente  $i$ .

En caso de que la librería no exista para la sustancia ingresada por el usuario, éste podrá insertar los datos asociados en una librería temporal para ser utilizada en el cálculo actual.

A continuación se lleva a cabo una fase en la que se ponen en uso las ecuaciones descritas anteriormente relacionadas con exergía y la segunda ley de termodinámica, con el propósito de obtener los datos de salida relevantes.





$$exE(i) = eIE(i) - eIEM(i) - tC(eE(i) - eEM(i)) + pC(vE(i) - vEM(i))$$

$$exS(i) = eIE(i) - eIEM(i) - tC(eE(i) - eEM(i)) + pC(vE(i) - vEM(i))$$

Para la ecuación de  $exE(i)$  se toman en cuenta los valores de temperatura y presión inicial de cada una de las corrientes  $i$ . En el caso de  $exS(i)$  se toman en cuenta los valores de temperatura y presión final de cada una de las mismas corrientes. Los valores que devuelven son los de exergía de entrada y salida de cada corriente.

A continuación se calcula la exergía útil mediante la ecuación siguiente:

$$Ex_u = \Delta Ex_{vc} + \int (ex_s + pS * vES - pC * vES) dm_s - \int (ex_e + pE * vEE - pC * vEE) dm_e$$

Con:

- Exs Sumatoria de todas las  $ExS(i)$ .
- Exe Sumatoria de todas las  $ExE(i)$ .
- vES Sumatoria de todas las  $vES(i)$ .
- vEE Sumatoria de todas las  $vEE(i)$ .
- pS Sumatoria de todas las  $pS(i)$ .
- pE Sumatoria de todas las  $pE(i)$ .

Por último se calcula el rendimiento exergético ( $\eta_{ex}$ ) de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_u}{Ex_e}$$

Donde:

- $Ex_u$  es la exergía útil calculada mediante la expresión anterior.
- $Ex_e$  es la potencia de entrada definida como  $pE$  en los datos de entrada del usuario.





## 7. Valoración económica.

En este apartado se presenta un estimado de los costes en los que se incurrió para la realización de este proyecto. Esta estimación se hizo en base a los gastos registrados para cada etapa del mismo, con lo que se calcula el coste de la confección y la puesta en marcha del proyecto.

### 7.1. Fase de investigación y confección del proyecto.

Esta fase consiste en:

- Delimitar el sistema de estudio mediante la especificación de sus respectivas funciones y parámetros.
- Familiarizarse con el concepto de exergía, sus antecedentes históricos, y los principios que lo rigen.
- Investigar y profundizar en los fundamentos de la metodología del análisis exergético.
- Describir una metodología básica para el análisis exergético de bienes de equipo, mediante el estudio de un sistema genérico.
- Familiarizarse con el bien de equipo al que se realizará el estudio, conocer las condiciones de operación y visitar la empresa.
- Definir técnicas para la toma de datos.
- Recoger datos tanto de manera experimental como bibliográficamente.
- Validar los datos obtenidos mediante balances y comparaciones; y relación de los datos con los procesos del sistema.

La realización de esta etapa implica económicamente los siguientes gastos:

- **Honorarios de los miembros del departamento:** 4300 euros



Estos se dividen en los honorarios del proyectista que confeccionó el proyecto, y de los miembros del DPE que lo dirigieron y supervisaron, el aporte de cada uno está detallado en las Ecuaciones 8.1 y 8.2.

$$\text{Costo de confección} = 10 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \times 180 \text{ horas} = 1800 \text{ euros} \quad (\text{Ec. 8.1})$$

$$\text{Costos de dirección} = 50 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \times 50 \text{ horas} = 2500 \text{ euros} \quad (\text{Ec. 8.2})$$

- **Transporte:** 50 euros

Tarjetas de transporte urbano del servicio TMB y taxis usados para transportar el equipo de medición.

- **Alquiler de sensores termopares y dispositivo de monitoreo:** 120 euros

Los equipos de medición fueron tomados en alquiler por 2 días, con un coste neto de 120 €

- **Gastos de impresión de material:** 40 euros

Gasto aproximado de páginas impresas en el departamento. .

- **Gastos por uso de ordenador:** 27,4 euros

Durante la confección del equipo se trabajó en un ordenador perteneciente al DPE, que tiene un coste aproximado de 1000 €, y un tiempo de amortización de unos tres años. Si el equipo fue usado durante 30 días, esto representa un coste de:

$$\frac{30 \text{ d} \times 1000 \text{ euros}}{(3 \times 365 \text{ d})} = 27,4 \text{ euros.} \quad (\text{Ec. 8.3})$$

<b>Total fase 8.1: 4537.4 euros.</b>
--------------------------------------

## 7.2. Fase de Desarrollo.

Esta fase consisten en:



- Llevar a cabo los cálculos necesarios en el proceso termodinámico para obtener el análisis exergético del bien de equipo a estudiar.
- Realizar las modificaciones pertinentes asociadas a criterios exergéticos en el software para análisis de ciclo de vida del bien de equipo desarrollado por el departamento de Procesos de la UPC.

Para la consecución de estos objetivos se incurrieron en los siguientes gastos:

- **Honorarios de los miembros del equipo:** 16000 euros

Los honorarios que ocupan esta parte son los del proyectista, el director de proyecto y el programador, respectivamente. el aporte de cada unos está detallado en las Ecuaciones 8.4, 8.5 y 8.6.

$$\text{Costo de confección} = 10 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \times 200 \text{ horas} = 2000 \text{ euros} \quad (\text{Ec. 8.4})$$

$$\text{Costos de dirección} = 50 \frac{\text{euros}}{\text{horas}} \times 40 = 2000 \text{ euros} \quad (\text{Ec. 8.5})$$

$$\text{Costos de programación} = 30 \frac{\text{euros}}{\text{horas}} \times 400 = 12000 \text{ euros} \quad (\text{Ec. 8.6})$$

- **Uso del ordenador:** 59,4 euros

Durante la confección del equipo se trabajó en un ordenador perteneciente al DPE, que tiene un coste aproximado de 1000 €, y un tiempo de amortización de unos tres años. Si el equipo fue usado durante 65 días, esto representa un coste de:

$$\frac{65 \text{ d} \times 1000 \text{ euros}}{(3 \times 365 \text{ d})} = 59,4 \text{ euros.} \quad (\text{Ec. 8.7})$$

**Total fase 8.2: 16023 euros.**



### 7.3. Fase de seguimiento y comunicación de resultados.

Esta fase consisten en:

- Fijar objetivos, alcance, límites del proyecto, además de la clasificación de datos de inventario, entre otras.
- Comunicar resultados a los entes pertinentes, a los productores de bienes de equipo, a los organismos de financiación y a la comunidad científico-técnica.

Para alcanzar los objetivos de estas fases se incurrieron en los siguientes gastos:

- **Honorarios de los miembros del equipo :** 2000 euros

Los honorarios que ocupan esta parte son los del proyectista y el director de proyecto, respectivamente. el aporte de cada unos está detallado en las Ecuaciones 8.8 y 8.9.

$$\text{Costo de confección} = 10 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \times 100 \text{ horas} = 1000 \text{ euros} \quad (\text{Ec. 8.8})$$

$$\text{Costos de dirección} = 50 \frac{\text{euros}}{\text{horas}} \times 20 = 1000 \text{ euros} \quad (\text{Ec. 8.9})$$

- **Uso de ordenadores:**

Durante la confección del equipo se trabajó en un ordenador perteneciente al DPE, que tiene un coste aproximado de 1000 €, y un tiempo de amortización de unos tres años. Si el equipo fue utilizado por 30 horas, esto representa un coste de:

$$\frac{30 \text{ d} \times 1000 \text{ euros}}{(3 \times 365 \text{ d})} = 27,4 \text{ euros.} \quad (\text{Ec. 8.10})$$

- **Impresión de material:** 80 euros

<b>Total fase 8.3: 2107,4 euros.</b>
--------------------------------------



Sumando los gastos en cada fase del proyecto obtenemos un valor de 22667, 8 euros, lo que quiere decir que la realización de este proyecto lleva un gasto directo asociado de 22667,8 euros.







## Conclusiones

- El análisis exergético constituye una herramienta fundamental en la búsqueda de un desarrollo sostenible, ya que permite obtener la información necesaria para la mejora termodinámica del sistema, contribuyendo decisivamente en la eficiencia, integración y optimización energética de las unidades del proceso entre sí. Esta mejora se traduce en una reducción de consumos y de emisiones al ambiente, dos de las características más buscadas para los procesos industriales del siglo XXI.
- La metodología básica para el análisis exergético hace uso de balances termodinámicos, e introduce a la exergía como nueva función de estado del sistema. Resulta sencilla e ilustrativa, y, además de definir los flujos exergéticos en cada fase del proceso, permite conocer el rendimiento exergético de cualquier proceso.
- La representación gráfica del análisis exergético, los diagramas de Sankey, resultan una excelente herramienta para evaluar procesos de carácter industrial a los que se quiere mejorar, ya que pueden llegar a incluir, en un mismo diagrama las entradas y salidas de exergía, la exergía destruida en cada fase y la eficiencia exergética del proceso; datos de gran ayuda para la optimización energética del proceso.
- La incorporación de un módulo de rendimiento exergético a la herramienta informática *CICLOPE*, originalmente creada para la evaluación de impactos ambientales potenciales de un determinado proceso aplicando el análisis de ciclo de vida (ACV) genera información más detallada de las pérdidas de energía del proceso, otorgando una visión más amplia del sistema, y haciéndola una herramienta de análisis de impactos más poderosa e útil para los analistas de procesos.
- El principal gasto exergético durante la fase de uso del esterilizador clínico analizado es el que proviene de las irreversibilidades asociadas al sistema. Por esta razón, el rendimiento exergético del proceso, además de ser muy bajo, no es fácilmente modificable. Las pérdidas por calor difundido al entorno y en flujos residuales no supera el 20% del total.



## Recomendaciones

- Para una mayor versatilidad del módulo de evaluación exergética del *CICLOPE V3.0*, se recomienda considerar en un futuro, otras fuentes de energía para el sistema, como por ejemplo combustibles fósiles, el vapor de una caldera externa, etc.
- Continuar el desarrollo del módulo exergético, ampliando su rango de acción a las fases de producción y desecho del bien de equipo, de modo de evaluar, de esta manera, el comportamiento exergético del ciclo de vida del bien de equipo.



## Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos van a todas las aquellas personas que colaboraron de una u otra manera en la concepción y realización de este proyecto. A la Generalitat de Catalunya y al Departamento de Proyectos de Ingeniería por brindarme la oportunidad de formar parte de esta gran iniciativa; a la Universidad Simón Bolívar por permitirme esta valiosa oportunidad, a la Prof. Margarita González por confiar en mi trabajo y capacidades como proyectista, y especialmente a Joaquina Niembro por estar siempre allí y ser un apoyo incondicional y sumamente importante en el desarrollo de este proyecto.





## Bibliografía

- [1] NIEMBRO, I. J., & GONZÁLEZ-BENÍTEZ, M. *Energía y Exergía: Enfoques hacia la Sostenibilidad mediante el Análisis de Ciclo de Vida*. Paper presented at the *Congreso Nacional del Medio Ambiente, Cumbre del Desarrollo Sostenible, Fondo Documental, Comunicación técnica escrita, Temática: Cambio climático*. Madrid, España, 2008.
- [2] RASCÓN, A et al. *Análisis Exergético para la integración energética de tres esquemas GTL*. Ingeniería química, ISSN 0210-2064, Nº. 402, 2003, pp. 103-106, Universidad de la Rioja, 2007.
- [3] CORNELISSEN, R.L. *Exergetic Life Cycle Analyses*. Cornelissen Consulting Services BV, Sweden, 1998.
- [4] KESTIN, J. *Availability: the concept and associated terminology*. Energy, Vol. 5, pp 679-692, 1980.
- [5] SZARGUT, J. *International progress in second law analysis*. Energy, Vol.5, pp 709-718, 1980.
- [6] WEPFER, W.J. *Application of the second law to the analysis of energy systems*. Ph. D Thesis, University of Wisconsin, 1979.
- [7] LIU, Y et al. *Second law analysis*. ACS Symposium series, No. 235, 1986.
- [8] KOTAS, T.J. *Exergy method of thermal and chemical plant analysis (review paper)*. Chem. Eng. Res. Des., Vol 64, 1986.
- [9] TSATSARONIS, G.A. *Review of exergoeconomics Methodologies*. IV International Symposium of Second Law analysis of thermal systems. Roma, 1987
- [10] SERRIN, J.B. *New perspectives in thermodynamics*. Springer Verlag, 1986.
- [11] GOMEZ, J.L, GONZÁLEZ-BENÍTEZ, M., SIERRA, C. *Termodinámica, Análisis Exergético*. Editorial Reverté, Barcelona, 1990.
- [12] NOBUSAWA, T. *Introduction to Exergy*. Ohm Pub, Tokyo, 1984.



- [13] RANT, Z. *Forsh. Ing. Wes.* Vol. 22, pp 36-37, 1956.
- [14] SZARGUT, J et al. *Exergy Analysis of thermal, chemical and metallurgical processes.* Hemisphere Publishing Corporation, New York-London, 1988.
- [15] SATO, N. *Chemical Energy and Exergy, an introduction to chemical thermodynamics.* Ed. Elsevier, London, 2004.
- [16] SANKEY DIAGRAMS HOMEPAGE (en línea). Consultada el 20 Mayo, 2009. Disponible en <http://www.sankey-diagrams.com>
- [17] GONG, M et al. *On Exergetics, Economics and Desalination.* Consultado el 13 Mayo, 2009. Disponible en <http://www.exergy.se>
- [18] LOZANO, M.A. *Metodología para el análisis exergético de calderas de vapor en centrales térmicas.* 1987, Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España.
- [19] RODOREDA, M. *Análisis exergético de una central termoeléctrica de ciclo de vapor.* Universidad de las Américas Puebla, Departamento de Física y Matemáticas. México, 2005.
- [20] UNE-EN-ISO 14000, *Directrices para la implantación de un sistema de Gestión Medioambiental,* Asociación Española de normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 1997.
- [21] SERRANO MEGÍAS, C. *Ampliación y mejora del programa CICLOPE, desarrollado para la realización de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).* Proyecto Final de Carrera dirigido por los profesores Margarita González Benítez y Carlos Sierra Garriga, ETSEIB, Noviembre, 2004.
- [22] UNE-EN-ISO 14044, *Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y Directrices.* Asociación Española de normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2006.
- [23] GOEDKOOP, M, SPRIENSMA, R. *The Eco-indicator 99, Methodology Annex.* Tercera Edición. Junio, 2001.
- [24] NIEMBRO, I.J, GARCÍA S, GONZÁLEZ-BENÍTEZ, M., SIERRA, C. *Actualización de la herramienta informática CICLOPE para Análisis de Ciclo de Vida.* XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Acta de Congreso, Julio 2009.



[25] SERRANO MEGÍAS, C, GONZÁLEZ-BENÍTEZ, M, SIERRA, C. *CÍCLOPE V2.0 Manual de Instrucciones*. GREP-UPC. 2004.

[26] HUYS, J. *Esterilización de Productos Sanitarios por Vapor, Volumen I Teoría General*. HEART Consultancy, Países Bajos, 1999.

[27] UNE EN-285. *Esterilización. Esterilizadores de Vapor. Esterilizadores Grandes*. . Asociación Española de normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2007.

[28]. ÇENGEL, Y, Boles, M. *Termodinámica*. Editorial Mc. Graw Hill. Mexico, 2002.







## Anexos

### A. Plan cronológico de trabajo.

Etapa	Objetivos	Resultado	Duración (semanas)
Ámbito de estudio del análisis exergético de bienes de servicio	Delimitar el sistema de estudio mediante la especificación de sus respectivas funciones y parámetros. Familiarizarse con los fundamentos de la metodología del análisis exergético.	Características del Bien de Equipo en estudio; diagramas de flujo de los procesos, fundamento para la normalización de datos, conocimientos básicos de la metodología del análisis exergético.	4
Inventario para el análisis exergético	Describir los procesos unitarios con la recopilación de datos pertinentes y en detalle de cada uno, clasificando los datos en títulos. Validar los datos obtenidos mediante balances y comparaciones; y relación de los datos con los procesos unitarios y la unidad funcional.	Datos fiables de entradas de energía, materia prima, auxiliares etc., de los bienes de servicio. Datos de emisiones al aire, vertidos al agua y suelo, y otros aspectos ambientales de los procesos. Hojas de inventario. Tablas y Gráficos.	2
Contratación de ensayos y/o mediciones	Obtención de datos sobre los procesos de los cuales no se cuenta con la información pertinente.	Datos fiables sobre entradas y salidas de energía, materias primas y auxiliares. Datos de emisiones y otros aspectos ambientales de los procesos. Tablas y gráficos.	1
Desarrollo de la metodología de análisis Exergético	Llevar a cabo los cálculos necesarios para obtener el análisis exergético del bien de equipo a estudiar.	Análisis exergético del equipo	7



Etapa	Objetivos	Resultado	Duración (semanas)
Implementación de los criterios exergéticos en el software.	Realizar las modificaciones pertinentes asociadas a criterios exergéticos en el software para análisis de ciclo de vida del bien de equipo desarrollado por el departamento de Procesos de la UPC.	Software de análisis de ciclo de vida compatible con el análisis exergéticos de bienes de equipo.	4
Interpretación del análisis exergético de bienes de equipo	Identificar los elementos significativos de la acción. Generar resultados y conclusiones. Verificar la sensibilidad, integridad y coherencia de los resultados y conclusiones.	Conclusiones, limitaciones y recomendaciones para el análisis exergético del bien de equipo. Memoria del proyecto.	2
Reuniones periódicas de seguimiento del proyecto	Fijar objetivos, alcance, unidad funcional del proyecto, además de la toma de datos de inventario, entre otras.	Comunicados de los acuerdos de las reuniones.	Todo el proyecto
Elaboración de informes y comunicación de resultados	Comunicar resultados a los entes pertinentes, a los productores de bienes de equipo, a los organismos de financiación y a la comunidad científico-técnica	Informes, y presentaciones.	Todo el proyecto

