

**USO RACIONAL Y EFICIENTE DE ENERGÍA:  
METODOLOGÍA DE GESTIÓN ENERGÉTICA DESDE  
UN ENFOQUE EXERGÉTICO PARA PEQUEÑAS Y  
MEDIANAS EMPRESAS**



**Autor:** Carlos Arturo Cárdenas Guerra  
Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas  
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Bucaramanga, 2006

**USO RACIONAL Y EFICIENTE DE ENERGÍA:  
METODOLOGÍA DE GESTIÓN ENERGÉTICA DESDE  
UN ENFOQUE EXERGÉTICO PARA PEQUEÑAS Y  
MEDIANAS EMPRESAS**



Trabajo de investigación para optar al título de Magíster en Ingeniería.

Área Ingeniería Eléctrica

**Autor:** Carlos Arturo Cárdenas Guerra  
Ingeniero Electricista

**Director:** Gilberto Carrillo Caicedo  
Doctor Ingeniero Industrial

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga, 2006

# Índice general

<b>1.</b>	<b>Introducción-----</b>	<b>1</b>
1.1	Justificación-----	3
1.2	Gestión energética en las PYMES-----	6
1.2.1	Planteamiento del problema-----	6
1.2.2	Desarrollo tecnológico de la PyME-----	7
1.2.2.1	Problemas de mercado-----	8
1.2.2.2	Problemas de gestión tecnológica-----	9
1.3	Objetivos del trabajo de investigación-----	10
1.4	Estructura del documento-----	11
<b>2.</b>	<b>Uso racional y eficiente de la energía-----</b>	<b>13</b>
2.1	Introducción-----	13
2.2	Definiciones termodinámicas asociadas al URE-----	13
2.3	Definiciones dentro del URE-----	16
2.3.1	Auditoría energética-----	16
2.3.2	Auditoría exergética-----	16
2.3.3	Conservación de la energía-----	16
2.3.4	Diagnóstico energético-----	16

2.3.5	Eficiencia energética-----	16
2.3.6	Gestión energética-----	17
2.3.7	Uso eficiente de la energía-----	17
2.3.8	Uso racional de la energía (URE) -----	17
2.4	Situación actual del URE en Colombia-----	17
2.5	Barreras para la implementación de un programa de gestión energética-----	23
<b>3.</b>	<b>URE: Enfoque energético-----</b>	<b>25</b>
3.1	Introducción-----	26
3.2	Metodología para gestión energética a partir del balance de energía---	25
3.2.1	Prediagnóstico-----	27
3.2.2	Planeación-----	27
3.2.3	Auditoría energética -----	28
3.2.3.1	Objetivos-----	28
3.2.3.2	Diagnóstico energético-----	29
3.2.3.3	Procedimiento-----	29
3.2.4	Auditor energético-----	31
3.2.5	Medios materiales para las auditorías energéticas-----	32
3.2.6	Cálculos económicos-----	34
3.2.7	Elaboración del plan de gestión energética-----	35

3.2.8	Implementación del programa de gestión energética-----	37
3.2.9	Centro de control energético-----	37
<b>4.</b>	<b>URE: Enfoque exergético-----</b>	<b>39</b>
4.1	Introducción-----	39
4.2	Filosofía exergética-----	39
4.3	Precedencia de las fases y etapas de la metodología-----	40
4.4	Resultados esperados del programa URE-----	40
4.5	Metodología para gestión exergética-----	40
4.5.1	Fase 1: Administrativa-----	44
4.5.1.1	Decisión gerencial-----	44
4.5.1.2	Recolección de información-----	44
4.5.1.3	Análisis de la información-----	44
4.5.1.4	Concertación administrativa-----	44
4.5.2	Fase 2: Auditoría exergética-----	45
4.5.2.1	Planeación de la auditoría exergética-----	45
4.5.2.2	Modelo del proceso-----	45
4.5.2.3	Identificación de los flujos de exergía-----	45
4.5.2.4	Medidas de los flujos-----	46
4.5.2.5	Balance exergético del proceso-----	46

4.5.2.6	Diagnóstico exergético-----	46
4.5.3	Fase 3: Elaboración de programa URE-----	50
4.5.4	Fase 4. Implementación de Programa URE-----	52
4.5.5	Fase 5. Centros de control exergético-----	52
<b>5.</b>	<b>Implementación de la termoeconomía a una línea de proceso del sector autopartista-----</b>	<b>55</b>
5.1	Introducción-----	55
5.2	Recolección de información-----	55
5.3	Análisis de la información-----	59
5.4	Auditoría exergética-----	64
5.4.1	Planeación de la auditoría exergética-----	61
5.4.2	Modelo del proceso-----	61
5.4.3	Identificación de los flujos de exergía-----	63
5.4.4	Diagnóstico exergético-----	66
5.4.5	Análisis de resultados-----	73
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros-----</b>	<b>75</b>
6.1	Conclusiones-----	75
6.2	Aportes-----	76
6.3	Recomendaciones para la empresa autopartista-----	76
6.4	Observaciones-----	77

6.3	Trabajos futuros-----	78
Anexo A:	Prediagnóstico energético-----	79
Anexo B:	Modelado exergético de los tanques para tratamientos químicos -----	83
Anexo C:	Principio de Pareto-----	85
Anexo D:	Teoría termoeconómica-----	88
Bibliografía	-----	96

# Índice de tablas

1.1	Posición competitiva de Colombia expresado en porcentaje de países mejor clasificados que Colombia-----	1
1.2	Consumo de energía eléctrica por la pequeña empresa participación en el total-----	6
5.1	Productos fabricados-----	58
5.2	Consumo de energía eléctrica mensual-----	59
5.3	Consumo de gas natural mensual-----	59
5.4	Porcentaje de consumo de los servicios públicos-----	59
5.5	Valores nominales de la maquinaria existente-----	60
5.6	Inventario de equipos eléctricos-----	60
5.7	Flujos identificados en el proceso de la figura 5.2-----	65
5.8	Exergía de los flujos-----	68
5.9	Eficiencia exergética y costo exergético-----	70
5.10	Valores de costos exergético por pieza, costos unitario e irreversibilidades-----	72
5.11	Valores de irreversibilidades anuales (500 piezas)-----	73
5.12	Costos de inversión de las máquinas (Z) y AOM (Z <sub>c</sub> )-----	75

A-1	Inventario de procesos-----	81
A-2	Inventario de máquinas-----	81
A-3	Fuentes de energía-----	82
A-4	Información del consumo de energía eléctrica-----	82
A-5	Información del consumo de gas natural-----	83
A-6	Consumos anuales-----	83
B-1	Información general-----	85
B-2	Flujos identificados-----	85
B-3	Características de los flujos identificados-----	86
B-4	Determinación de la cuantificación de los flujos -----	86
B-5	Flujos identificados vulcanizadora-----	88
B-6	Características de los flujos identificados-----	90
B-7	Determinación de la cuantificación de los flujos -----	91
B-8	Determinación de la cuantificación de los flujos-----	91
B-9	Componentes de la energía total entregada a la planchas-----	93
B-10	Calor específico del caucho y el acero-----	94
B-11	Consumo exergético en el proceso-----	101
B-12	Equipos consumidores de exergía-----	101
B-13	Consumo de exergía por producto-----	102

# Índice figuras

1.3	Posición competitiva de Colombia expresado en porcentaje de países mejor clasificados que Colombia-----	1
1.4	Consumo de energía eléctrica por la pequeña empresa participación en el total-----	6
5.13	Productos fabricados-----	58
5.14	Consumo de energía eléctrica mensual-----	59
5.15	Consumo de gas natural mensual-----	59
5.16	Porcentaje de consumo de los servicios públicos-----	59
5.17	Valores nominales de la maquinaria existente-----	60
5.18	Inventario observado de equipos eléctricos-----	60
5.19	Consumo porcentual de energía-----	61
5.20	Diagrama de la línea del proceso KODIAK-----	64
5.21	Flujos identificados en la cortadora-----	66
5.22	Flujos identificados en el torno-----	66
5.23	Flujos identificados en la troqueladora-----	67
5.24	Flujos identificados en el tanque-----	67
5.25	Flujos identificados en la vulcanizadora-----	68
5.26	Proceso general-----	69

5.27	Diagrama de irreversibilidades-----	73
5.28	Diagrama de Pareto de irreversibilidades-----	74
5.29	Eficiencia exergética de cada máquina-----	76
5.30	Costos de irreversibilidades-----	77

## RESUMEN

TITULO: USO RACIONAL Y EFICIENTE DE ENERGÍA: METODOLOGÍA DE GESTIÓN ENERGÉTICA DESDE UN ENFOQUE EXERGÉTICO PARA PEQUEÑAS Y MEDIANAS EMPRESAS\*.

AUTOR: CARLOS CÁRDENAS GUERRA\*\*

PALABRAS CLAVES: exergía, termoeconomía, gestión exergética, uso racional y eficiente de la energía.

La globalización de la economía obliga a que las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) busquen oportunidades de ahorro relacionadas directamente con los costos de producción como forma de lograr una posición prominente en el mercado.

Cuando los ahorros más evidentes de energía se han ido logrado, la *minimización-optimización-integración* de los procesos productivos se convierte en una tarea compleja cuyo análisis deja de ser elemental y pasa a ser objeto de investigación. Por ello es necesario desarrollar una base conceptual firme que elimine ambigüedades e incertidumbres en la toma de decisiones técnicas y económicas para mejorar los procesos consumidores de energía.

La estrategia, más común, para inspeccionar, diagnosticar y evaluar el uso y control eficaz de la energía eléctrica ha sido a través de las auditorías energéticas. No obstante, al momento de identificar oportunidades de ahorros más detalladamente se hace necesario recurrir a alternativas diferentes que ofrezcan mayor grado de análisis, por esto se ha acudido a la teoría exergética. Es importante tener presente que la realización de una auditoría exergética se expone como una etapa previa para la elaboración de un Programa URE.

Se propone una metodología para gestión energética desde un enfoque exergético, esto es, con base en la segunda ley de la termodinámica. La característica especial es el planteamiento de su aplicación a todo tipo de proceso industrial, casos ejemplo en el marco de este proyecto son: (Barbosa y Jiménez-06), (Bonilla-06), (Díaz-06), (González y Salazar-06), (Osma-06) y (Posada y Therán-06).

---

\* Trabajo de investigación

\*\* Facultad de Ciencias Físico-mecánicas. Maestría en Ingeniería. Área Eléctrica.  
Director: Dr. Gilberto Carrillo

## SUMMARY

TITLE: RATIONAL AND EFFICIENT USE OF ENERGY: METHODOLOGY OF ENERGETIC MANAGEMENT WITH EXERGETIC FOR COMPANIES SMALLS AND MEDIUMS<sup>1</sup>.

AUTHOR: CARLOS CÁRDENAS GUERRA\*\*

KEYS WORDS: Exergy, Thermo-economic, Exergetic Management, rational and efficient use of energy.

The global economy does that companies small and mediums found opportunities for save production costs as strategy to raise a position prominent at market. Due to the high costs of electric energy and deterioration of environment it's necessary to take actions aimed at decreasing inadequate use of natural resources. In this way, inefficiencies in production processes must found and corrected.

From the above considerations emerged the needs to consolidate a more exact understanding about energy consumption and to adopt a systematic procedure. It shall consist in procedures to diagnose, evaluate and analyze the flows of energy in the elements of the system under study, including a thermo-economic analysis. This project shows thermo-economy like a tool to quantify the energetic impact in the pumping systems and to evaluate efficient use of energy by means of an exergetic balance.

The more common strategy for inspecting, diagnosing and evaluating the use and effective control of electric energy has been *energetic* management. However, at the moment of identifying opportunities for saving energy in great detail, it is necessary to look for different alternatives that offer a higher level of analysis in all production processes.

With the objective of establishing a RUE plan, the following steps have been adopted: Collection of technical data and system characteristics, Identification energetic centers in the process, Obtention of production schemes, Deaggregation of system into the necessary number of elements, Identification of exergetic flows in the system, Performing measurements of exergetic flows, Identification of exergetic losses in the system, Calculation of exergetic costs of flows, Economic evaluation of exergetic costs, Elaboration of RUE plan proposal and Make a financial evaluation (Barbosa and Jiménez-06), (Bonilla-06), (Díaz-06), (González and Salazar-06), (Osma-06) and (Posada and Therán-06).

---

<sup>1</sup>Work of Research.

\*\* Physical-Mechanical Science department. Master Engineering. Topic Electrical.  
Director: Dr. Gilberto Carrillo

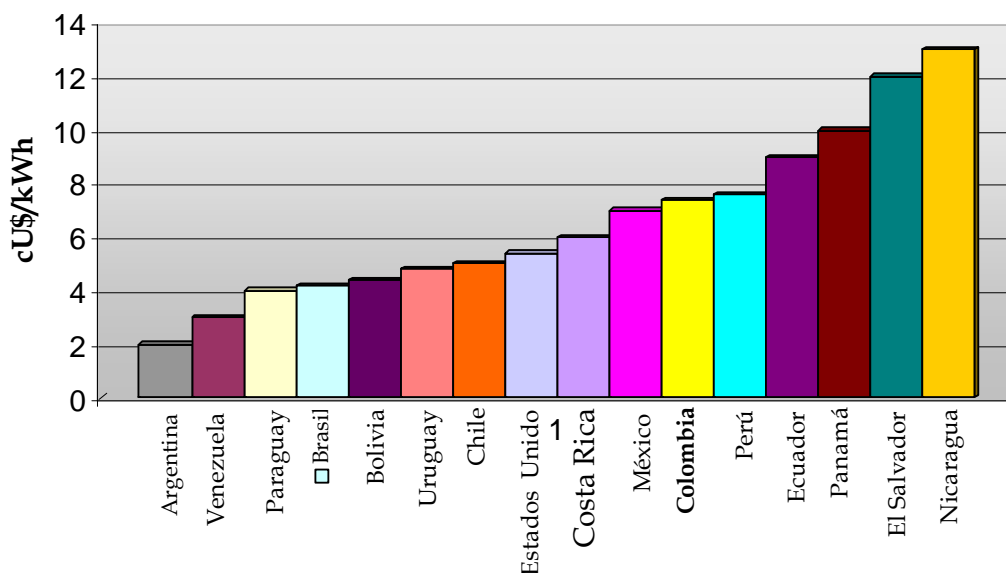
# Capítulo 1

## Introducción

Debido a la necesidad de mejorar los indicadores de productividad y competitividad del sector empresarial, y debido al alto costo de la energía se deben elaborar, implementar y establecer estrategias de control sobre las políticas energéticas para disminuir el uso inadecuado de los recursos energéticos. En la tabla 1.1 se muestra la clasificación de los países latinoamericanos de acuerdo con su competitividad y en la figura 1.1 se observa el precio de la energía a nivel industrial en diferentes países latinoamericanos.

Posición	Pais	2005	2004	2003	2002	2001
1	Chile	23	22	28	24	27
2	Uruguay	54	54	50	40	46
3	México	55	48	47	53	42
4	El Salvador	56	53	48	60	58
5	Colombia	57	64	63	61	65
6	Costa Rica	64	50	51	49	35
7	Brasil	65	57	54	45	44
8	Perú	68	67	57	52	55
9	Argentina	72	74	78	64	49
10	Panamá	73	58	59	51	53
11	Venezuela	89	85	82	68	62
12	Honduras	93	97	94	78	70
13	Guatemala	97	80	89	75	66
14	Nicaragua	99	95	90	70	73
15	Bolivia	101	98	85	71	67
16	Rep. Dominicana	102	72	62	56	50
17	Ecuador	103	90	86	73	68
18	Paraguay	113	100	95	76	72
Países considerados		117	104	102	80	75

**Tabla 1.1.** Posición competitiva de Colombia expresado en porcentaje de países mejor clasificados que Colombia.



**Figura 1.1.** Precio promedio energía eléctrica- Sector industrial año 2003

El país será más competitivo cuanto más alta sea su capacidad para sostener y expandir la eficiencia energética en los mercados y así elevar el nivel de vida de la población.

Para lograr competitividad se deben establecer índices, entre los que la *eficiencia energética*<sup>2</sup> se debe generalizar como uno normativo. El mejoramiento de este índice se puede obtener a través de la implementación de programas de *Gestión Energética*.

Para evaluar el índice de eficiencia energética se recurre usualmente a balances de materia y energía en los equipos y en los procesos para calcular rendimientos e irreversibilidades que luego se deben recuperar (Valero-00).

Cuando los ahorros más evidentes de energía se han ido logrado, la *minimización-optimización-integración* de los procesos productivos se convierte en una tarea compleja cuyo análisis deja de ser elemental y pasa a ser objeto de investigación. Por ello es necesario desarrollar una base conceptual firme que elimine ambigüedades e incertidumbres en la toma de decisiones técnicas y económicas para mejorar los procesos consumidores de energía (Göran-80), (Valero-00).

<sup>2</sup> En el capítulo 2 se ampliará este concepto

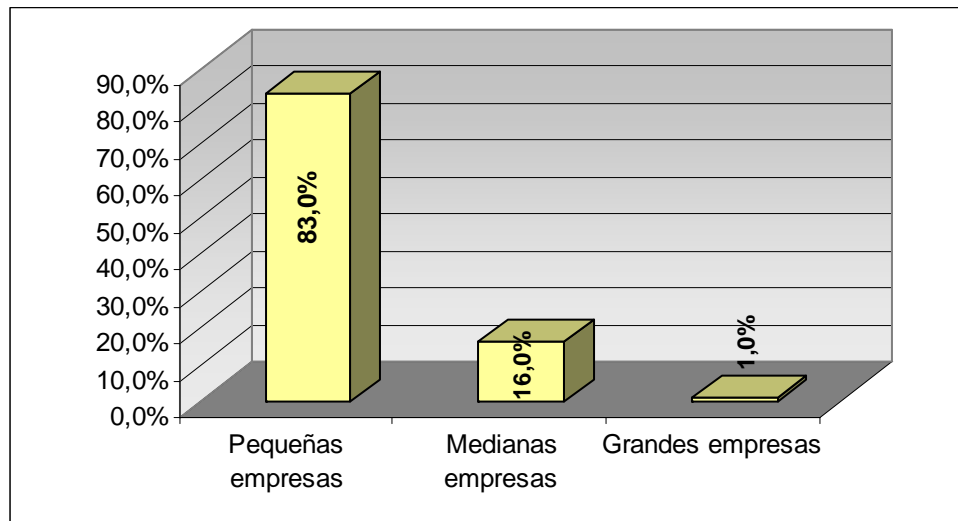
Este proyecto, a partir de la propuesta del director, presenta la *termoeconomía* como una herramienta sistemática para identificar las oportunidades de ahorro de energía y cuantificar el impacto energético en una cadena productiva industrial (Bonilla-06) (Osma-06). Para ello se presenta una metodología consistente en el diagnóstico, la evaluación y el análisis de los flujos de exergía en los elementos del sistema productivo. Además, con el fin de estructurar la aplicación general, se desarrollará la implementación del análisis en una línea de producto de una pequeña empresa del sector autopartista en Bucaramanga.

### **1.1 Justificación**

La globalización de la economía obliga a que las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) busquen oportunidades de ahorro relacionadas directamente con los costos de producción como forma de lograr una posición prominente en el mercado. En este aspecto, el elevado costo de la energía, impone la toma de acciones que optimicen su consumo, y en esta dirección resulta importante identificar y gestionar las *reservas* de eficiencia energética.

Los pocos esfuerzos que se han realizado en el área de gestión energética han sido aplicados en sectores particulares. En la actualidad los estudios de gestión energética se enfocan hacia los grandes procesos industriales, requiriendo ampliar su cobertura a los pequeños, teniendo en cuenta que un gran porcentaje de la economía nacional gira en torno a las PyMEs, ver figura 1.2. Por lo tanto, es muy importante para el desarrollo económico y social del país ofrecerles herramientas e incentivos tributarios que promuevan el desarrollo tecnológico y, específicamente, la eficiencia energética.

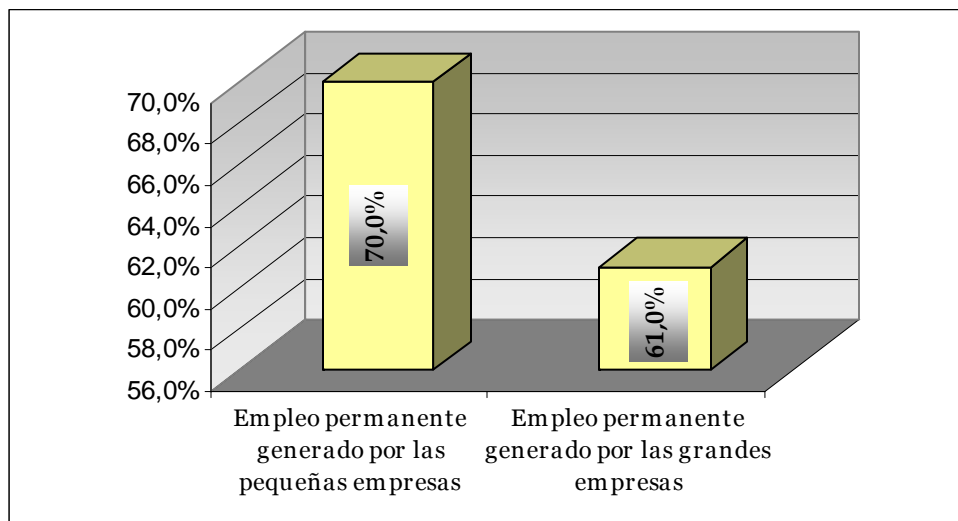
No obstante, en la actualidad se plantean estrategias de apoyo hacia las PyMEs, las cuales han llegado a ser imprescindibles al proyectarse como una de las mejores opciones para lograr la plena reactivación económica, aun cuando se deben superar falencias como la falta de gestión organizacional, financiera, comercial y administrativa.



**Figura 1.2.** Distribución del número de PyMEs y grandes empresas en Colombia

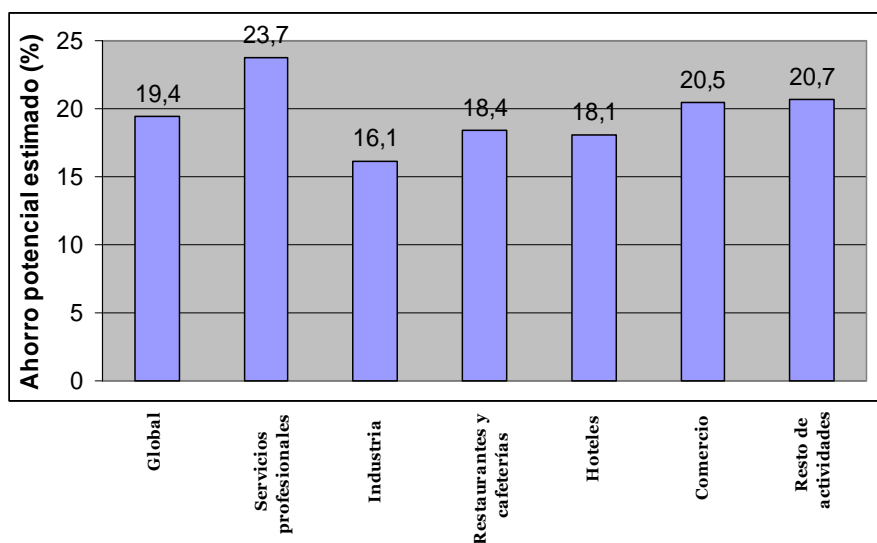
Definidas por la cantidad de personal y el total de activos, las PyMEs constituyen un 99% de las empresas del país, y representan aproximadamente, el 63% del empleo; el 37,7% de la producción; el 40% de los salarios y el 37% del valor agregado. Son más de 650 000 empresarios cotizando en el sistema de seguridad social en un sector frágil por su escaso capital, crédito insuficiente y necesidades insatisfechas. En el año 2001 existían en Colombia 43242 pequeñas empresas y 8041 medianas. Esta representatividad en la economía colombiana, las hace un punto de partida muy interesante para impulsar un compromiso mayor entre competitividad y gestión energética.

En la figura 1.3 (DANE-05) se muestra que las PyMEs utilizan más empleo permanente que las empresas grandes.



**Figura 1.3.** Distribución del porcentaje de empleos permanentes

Implementar programas de gestión energética en PyMEs implica optimizar el 37,7% de la producción lo cual sería altamente positivo. Un ejemplo para revisar, es el caso español; allí a partir de la creación y medición de un índice de eficiencia energética, se encontró que las PyMEs pueden ahorrar el 20% de la energía que consumen si modificaran sus hábitos y equipamientos básicos, ver figura 1.4 (Mincomercio-05).



**Figura 1.4.** Ahorro potencial estimado en las PyMEs españolas.

La necesidad de realizar propuestas de gestión energética, se hace entonces imprescindible, y se propone establecer una metodología de fácil implementación y alta efectividad basada en el análisis exergético. Se ha ido comprobando que este modelo ofrece buenos resultados como lo pueden corroborar los casos expuestos en (Bonilla-06) (CAPTE-99).

<b>Personal ocupado</b>	<b>Energía consumida</b>	<b>Producción Bruta</b>
<b>No.</b>	<b>% del total</b>	
Menores a 50	7,90	12,3
De 51 a 200	22,2	25,4
De 200 a 349	14,8	14,4
De 350 a 499	13,1	9,80
De 500 a 649	9,00	10,6
De 650 a 799	4,50	5,20
Mas de 800	28,6	22,3

**Tabla 1.2.** Consumo de energía eléctrica por la pequeña empresa participación en el total

## **1.2 Gestión energética en las PYMES**

### **1.2.1 Planteamiento del problema**

Para las PyMEs, la gestión energética deberá integrarse mediante una dimensión estratégica real que permita romper paradigmas entre los macro objetivos del desarrollo humano sostenible y la microeconomía estructural, representada en variables tales como la eficiencia, la competitividad y el rendimiento. El empresario PyME representa ser un verdadero gestor de riqueza y de empleo en las economías de los países latinoamericanos.

La gestión energética ha tomado un significativo auge en Colombia a partir de la entrada en vigencia de la Ley 697 de 2001 y el decreto reglamentario 3683 de 2003 que pretenden promover los proyectos de Uso Racional de la Energía (URE). Sin embargo, este tema se había venido tratando en la academia y en el sector industrial desde años atrás (CAPTE-99).

El tema de gestión energética, visto como un procedimiento organizado de

estimación, diagnóstico, análisis y control del consumo de energía, busca el mayor rendimiento energético posible sin disminuir el nivel de producción, esto hace que toda reducción del costo energético redunde en un mejoramiento de la vida económica de la empresa.

La práctica común en las empresas, es actuar sobre los consumos energéticos y no sobre la eficiencia energética. Como consecuencia de ello, la *gestión energética* se limita a obtener un buen contrato de energía, monitorizar los cambios en la factura mensual y la variación del índice de consumo en el tiempo. No obstante, *gerenciar la eficiencia energética* significa:

- ☑ Identificar donde están las pérdidas energéticas del sistema que más impactan los costos.
- ☑ Separar las pérdidas relativas a los procedimientos, de las relativas a la tecnología.
- ☑ Establecer y monitorizar en tiempo real, indicadores de eficiencia que permitan controlar y reducir las pérdidas relativas a los procedimientos.
- ☑ Evaluar técnica y económicamente los potenciales de reducción de las pérdidas relativas a la tecnología.
- ☑ Contar con un plan estratégico a corto, mediano y largo plazo con metas alcanzables y entendidas por todos los actores claves. Esto no se puede lograr aislando las actividades de control, de las del mejoramiento de la eficiencia energética que efectúan hoy las empresas (Bernal-99).

### **1.2.2 Desarrollo tecnológico de la PyME**

La formulación de una política tecnológica para las PyMEs debe partir del adecuado reconocimiento de los problemas que la explican y justifican. Un intento de categorización de dichos problemas, permite agruparlos en: problemas de mercado y problemas de gestión tecnológica empresarial, entre otros (Bernal-99).

### **1.2.2.1 Problemas de mercado**

La tecnología es un factor de producción que debe obedecer en sus dimensiones y características a los requerimientos del mercado de bienes y servicios en que se desenvuelven las empresas. Por tanto, es preciso tener en cuenta las características de los mercados que pueden condicionar el desarrollo tecnológico de las PyMEs. Algunas consideraciones se expresan a continuación:

- ☑ Las PyMEs están orientadas principalmente a los mercados internos.
- ☑ Como resultado de los procesos de apertura económica, el mercado de los productos de las PyMEs afronta una fuerte competencia de productos legalmente importados, otros de contrabando y algunos que, aunque legalmente importados, entran al mercado en condiciones de competencia desleal o de “competitividad artificial” por parte de otros países.
- ☑ Con mercados internos estrechos y altamente competidos, las PyMEs se encuentran ante condiciones más difíciles para acometer procesos de desarrollo tecnológico económicamente viables.
- ☑ La vinculación directa de las PyMEs a los mercados de exportación- generalmente más exigentes en materia tecnológica-; es aún escasa. La presencia de exportaciones indirectas, -por suministro a empresas que exportan directamente, es algo más significativa.
- ☑ La demanda de “soluciones tecnológicas” por parte de las PyMEs, es limitada. A ello se agrega la falta de conocimiento de las necesidades tecnológicas en un mercado abierto.
- ☑ Entre las PyMEs predominan los procesos de adaptación y asimilación de tecnologías, con respecto a los de generación de tecnología.

- ☑ El alto costo, el período incierto de retorno y las dificultades de financiación son los obstáculos económicos más frecuentemente señalados por las PyMEs para acometer procesos de innovación (Bernal-99).

#### **1.2.2.2 Problemas de gestión tecnológica**

Además de las condiciones de los mercados, esencialmente exógenas a las empresas, existen ciertas condiciones internas de la empresa que constituyen obstáculos a su desarrollo tecnológico. Al respecto debe señalarse que estos obstáculos son más críticos si se considera el tema de las PyMEs, principalmente, por razones de estructura de capital, gestión y organización. Los principales problemas son:

- ☑ El grado de informalidad de las PyMEs no solamente en su estructura jurídica o de propiedad, sino en su organización y administración.
- ☑ La insuficiente presencia de procesos de planeación en todas las áreas de la empresa consecuencia de esa informalidad.
- ☑ La escasa formación y experiencia de los empresarios, en materia de gestión tecnológica.
- ☑ La baja capacidad de las PyMEs para identificar problemas críticos de competitividad.
- ☑ El déficit de conocimientos y experiencias para acometer procesos de selección y negociación de tecnologías.
- ☑ El predominio de equipos con tecnologías obsoletas (especialmente en la pequeña empresa).
- ☑ En los procesos de selección de tecnología, la alta dependencia de la información del propio proveedor.

- ☑ El rechazo latente hacia procesos de asesoría en gestión y desarrollo tecnológico, o en general hacia procesos de innovación.
- ☑ El desconocimiento de los apoyos e incentivos institucionales hacia el mejoramiento tecnológico.
- ☑ La incredulidad de los empresarios de las PyMEs ante las instituciones del Estado y sus programas. En muchas ocasiones esa actitud se basa en experiencias negativas.
- ☑ La casi nula presencia de la variable ambiental en la gestión tecnológica de las empresas (Bernal-99).

### **1.3 Objetivos del trabajo de investigación**

El objetivo general de este trabajo es establecer una metodología basada en el análisis exergético que permita el aprovechamiento racional y eficiente de la energía eléctrica para procesos productivos de pequeña y mediana empresa.

Para cumplir con el objetivo general se han planteados los siguientes objetivos específicos:

Primero, describir la metodología del análisis exergético conducente al uso racional y eficiente de la energía en procesos productivos de pequeñas y medianas empresas.

Segundo, realizar un estudio de balance exergético de un proceso productivo en una empresa del sector autopartista.

Y por último, identificar los costos asociados al proceso de eficiencia energética en procesos productivos de PyMEs.

#### **1.4 Estructura del documento**

Este documento se encuentra estructurado en seis capítulos. Este primer capítulo, muestra la importancia del sector PyME en la economía nacional y por ello la relevancia de la gestión energética en su interior.

En el segundo capítulo se describe una descripción del uso racional y eficiente de la energía (URE) y los conceptos necesarios de termodinámica para una mejor comprensión.

En el tercer capítulo se describe una metodología para la elaboración e implementación de programas de gestión energética a partir de la primera ley de la termodinámica (balance energético).

En el cuarto capítulo se describe la propuesta metodológica para elaborar e implementar un plan de gestión energética a partir de la segunda ley de la termodinámica (balance exergético) que conlleve al uso racional y eficiente de la energía.

En el quinto capítulo se realiza la aplicación de la metodología a un proceso del sector de autopartes de la industria metalmecánica, en el cual se valida la herramienta del análisis termoeconómico para la evaluación de procesos productivos diferentes a los que tienen asociados directamente la energía térmica, como forma de detectar oportunidades de negocio en el uso racional y eficiente de energía.

En el sexto capítulo se encuentran las conclusiones, los aportes, las recomendaciones y las observaciones acerca de la aplicación de la metodología al proceso productivo de autopartes y, para la mejora de las PyMEs, se plantea una serie de trabajos futuros.

Además, en el documento se incluyen ocho anexos, el primero contiene la lista de chequeo implementada en la empresa autopartista y que puede ser implementada a

cualquier otro tipo; el segundo, contiene el esquema de una auditoría exergética; el tercero, contiene detalles del *Principio de Pareto*; el cuarto, contiene detalle de la teoría de rentabilidad en proyectos de inversión; el quinto, contiene la descripción de la metodología de *Gestión por Objetivos*; el sexto, contiene una propuesta de caracterización exergética para diferentes equipos utilizados en algunos procesos productivos; el séptimo, contiene aspectos generales de la Ley 697 de 2001; el octavo, contiene la ley que incentiva el desarrollo de la PyMEs en Colombia.

# Capítulo 2

## Uso racional y eficiente de la energía URE

### 2.1 Introducción

Para que las empresas logren mayor productividad, calidad y competitividad, un primer paso corresponde a la necesidad de evaluar las características energéticas en cada uno de sus procesos y a partir de ello buscar las mejoras correspondientes. De ahí que el conocimiento de la forma como contrata su energía, la forma como la consume y la magnitud en que repercute en sus costos, se convierte en información valiosa. El desarrollo de las auditorías energéticas conducentes al planteamiento de un programa de gestión energética, se presenta para dar respuesta a esos cuestionamientos y apunta hacia el Uso Racional de la Energía.

En este capítulo se presentan aspectos generales referentes a URE. Se inicia con algunas definiciones de termodinámica, herramientas claves para el éxito de los programas URE; seguidamente, se menciona la reglamentación nacional; y por último, se presentan opciones de aplicación.

### 2.2 Definiciones termodinámicas asociadas al URE

☑ **Anergia:** Parte de la energía total que es irreversible, esto es, energía de la que ya no es posible la obtención de ningún trabajo, ver ecuación 2.1.

$$E = E_x + A_g \quad (2.1)$$

Donde:

E: Energía, en Julios.

E<sub>x</sub>: Exergía, en Julios.

A<sub>g</sub>: Anergía, en Julios.

Estos dos componentes de la energía se comportan de tal forma que todas y cada una de las transformaciones que ocurren en un proceso, se efectúan únicamente en el sentido  $\mathbf{Ex} \Rightarrow \mathbf{Ag}$ , y nunca en sentido inverso (Gordillo-05).

- ☑ **Energía:** Capacidad de un sistema para realizar trabajo (Howell y Buckius-80).
- ☑ **Entalpía:** Cantidad de energía de un sistema termodinámico que puede intercambiar con su entorno (Gordillo-05) (Howell y Buckius-80). Se puede considerar como una forma de considerar la energía completa incluye la energía interna (así de ella sólo se pueda cuantificar la diferencia).
- ☑ **Entropía:** Medida del desorden molecular de una sustancia. Los valores grandes de la entropía implican un mayor desorden o incertidumbre, en tanto que los valores bajos corresponden a estados más organizados microscópicamente.

La entropía, al igual que las otras propiedades termodinámicas, sólo está definida para los estados en equilibrio o para procesos en cuasiequilibrio. La ecuación 2.2 muestra que la entropía del estado final nunca es menor que la del estado inicial para cualquier proceso que tenga lugar en un sistema aislado.

$$(S_{final} - S_{inicial})_{aislado} \geq 0 \quad \mathbf{(2.2)}$$

Las unidades de la entropía  $\mathbf{S}$  son el kilojoule por kelvin o el Btu por grado rankine.

- ☑ **Exergía:** Máxima cantidad de trabajo útil que un subsistema puede alcanzar en forma reversible.
- ☑ **Irreversibilidad:** Imposibilidad de un proceso de recuperar sus condiciones iniciales al invertir el proceso, ver ecuación 2.4.

$$(\text{Energía entrante} - \text{Energía saliente}) = \text{Irreversibilidad} > 0 \quad \mathbf{(2.4)}$$

- ☑ **Nivel de agregación:** Colección de equipos y relaciones que constituyen el sistema total. Una planta puede tener distintos niveles de agregación, desde el más simple, que estaría constituido por una vista de la planta completa, esto es, la consideración de la planta como un solo equipo; hasta niveles en los que se podría dividir la planta en centenares de equipos y separar los flujos en función de su naturaleza, componente mecánica, térmica, química, etc.
- ☑ **Sistema:** Entidad compleja compuesta por un conjunto de componentes y las relaciones entre ellos y su entorno. Un sistema se puede representar por un grafo dirigido, abierto y de longitud finita. Cada flujo interconecta uno o más equipos.
- ☑ **Termoeconomía:** Relación existente entre los conceptos y/o variables que utilizan la termodinámica y la economía de la forma más clara y rigurosa posible. Permite formular metodologías para el análisis, la optimización y la síntesis de los sistemas energéticos.

Existen diversas modalidades y nombres de análisis termoeconómicos, entre los cuales se pueden mencionar: Análisis Termoeconómico Funcional; Análisis Funcional Ingenieril y otros. Todas las metodologías emplean la exergía para repartir los costos, incluso cuando se generan uno o varios subproductos, y los resultados se pueden reproducir fielmente por la Teoría Estructural (Erlach, Serra y Valero-99).

Las técnicas del análisis termoeconómico permiten, calcular los costos de los flujos y productos de una planta, encontrar alternativas de ahorro de energía, optimizar la operación, optimizar localmente subsistemas o equipos, realizar auditorías energéticas y contabilizar el impacto en insumos de las anomalías en la operación, entre otras.

## **2.3 Definiciones dentro del URE**

**2.3.1 Auditoría energética:** Actividad de evaluación independiente y de asesoramiento, centrada en el examen y evaluación de la adecuación, eficiencia y eficacia de los sistemas de producción, así como de la calidad del desempeño de las unidades en relación con la eficiencia energética, y con los planes, metas, objetivos y políticas definidos para de dichas unidades.

**2.3.2 Auditoría exergética:** Actividad de inspeccionar los flujos de exergía involucrados en cualquier sistema o proceso en todas sus partes posibles con el fin de determinar la energía reversible y qué parte de ésta es utilizada (Guayar y Valero-88).

La técnica para realizar un análisis de uso de la energía a través del análisis exergético, permite un estudio más detallado y real del consumo de la energía disponible y, sobretodo, una evaluación de la energía perdida que realmente se puede recuperar. En el tratamiento de procesos térmicos se tiene experiencia en el enfoque exergético para realizar estos estudios (Valero-01) (CAPTE-99). Sin embargo, la propuesta de generalización al URE del director, la están justificando estudios como este proyecto, y proyectos de pregrado asociados como (Barbosa y Jiménez-06), (Bonilla-06), (Díaz-06), (González y Salazar-06), (Osma-06), (Posada y Therán-06).

**2.3.3 Conservación de la energía:** Actividad que se obtiene al disminuir el consumo total de la energía, medido en sus términos físicos.

**2.3.4 Diagnóstico energético:** Herramienta técnica utilizada en la evaluación del uso eficiente de la energía. Sin embargo, no se podrían alcanzar ahorros significativos a largo plazo, sin el respaldo de un programa de ahorro de energía dentro de la empresa.

**2.3.5 Eficiencia energética:** Producción de los mismos volúmenes de productos o servicios utilizando los menores insumos posibles.

La eficiencia en el uso de la energía, paso vital para la reducción de los costos de producción de la mayor parte de las empresas, puede ser lograda por dos vías: la vía costosa y de fácil implementación, o la vía de baja inversión y lenta de lograr.

**2.3.6 Gestión energética:** Planificación, dirección y seguimiento de los esfuerzos individuales encaminados hacia el mejor uso de los recursos. Es por ello, que la gestión de la energía debe estar firmemente apoyada por un programa de conservación, encargado de reducir el despilfarro mejorar la utilización por parte de los consumidores (uso racional) y promover la sustitución de fuentes energéticas.

**2.3.7 Uso eficiente de la energía:** “Utilización de la energía, de tal manera que se obtenga la mayor eficiencia energética, bien sea de una forma original de energía y/o durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución y consumo de las diferentes formas de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad, vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables.” (Ley 697 de 2001).

**2.3.8 Uso racional de la energía (URE):** “Aprovechamiento de la energía en todas y cada una de las cadenas energéticas, desde la selección de la fuente energética, su producción, la transformación, el transporte, la distribución y el consumo (incluyendo su reutilización cuando sea posible), buscando en todas y cada una de las actividades de la cadena, el desarrollo sostenible.” (Ley 697 de 2001).

## **2.4 Situación actual del URE en Colombia**

La práctica de URE debe realizarse partiendo de la selección de la fuente energética, optimizando su producción, transformación, transporte, distribución, y consumo, e incluyendo su reutilización cuando sea posible. De esta manera se

constituye en una medida efectiva para propiciar el crecimiento económico, el desarrollo social y por tanto el bienestar nacional, contribuyendo a la sostenibilidad del desarrollo colombiano.

Por esta razón, el Congreso Nacional mediante la expedición de la Ley 697 de 2001 declaró al Uso Racional y Eficiente de la Energía como asunto de interés social, público y de conveniencia nacional. Con la promulgación de esta Ley se sentaron las bases jurídicas necesarias para que el Estado pueda organizar, fomentar e impulsar el criterio URE y promover la utilización de las energías alternativas de manera efectiva en Colombia.

***Plan energético nacional:*** El Uso Racional y Eficiente de la Energía, entendido como el aprovechamiento óptimo de la energía en todos los eslabones de las diferentes cadenas energéticas, es una estrategia transversal a todos los objetivos del PEN.

Consumir los recursos energéticos en forma más eficiente, aumenta la competitividad hacia la exportación, de manera que se facilite el objetivo de garantizar el aporte del sector energético a la balanza comercial y a los ingresos a la nación. Así por ejemplo, programas de URE en el sector transporte, como la inclusión de mezclas carburantes de biocombustibles, la promoción de sistemas de transporte público eficientes en grandes ciudades, la agilización de corredores de transporte de carga intermunicipales (incluyendo construcción de túneles), el GNV, etc., puedan reducir la demanda de gasolina y ACPM, aliviando o retrasando las necesidades de importación de crudo o de sus derivados.

Al reducir la factura energética mediante programas de URE para los sectores productivos y para la población en general, se incrementa la competitividad de toda la economía colombiana. Al mismo tiempo, la utilización racional de las fuentes energéticas partiendo la escogencia de las fuentes primarias, junto con una economía más competitiva, soporta la consolidación de los esquemas competitivos de los mercados energéticos en Colombia y a la vez reduce o retrasa las necesidades

de ampliación de la infraestructura energética. Para que la cultura URE quede definitivamente instaurada en el país, se requiere que el mercado de servicios energéticos comience a funcionar. Por ello, incluyendo tanto los actores de oferta (ESCOS, empresas de consultoría, Universidades, etc.) como los de la demanda (Sectores productivos, sector financiero), crean un nuevo segmento de mercado energético en Colombia.

El Plan de Masificación del Gas Natural es el proyecto URE de mayor envergadura llevado a cabo en Colombia y ha demostrado ser factor decisivo en la diversificación de la canasta energética ampliando y tendiendo a garantizar la oferta interna de energéticos con precios competitivos.

La racionalidad del empleo de las fuentes disponibles local y/o regionalmente, así como la promoción para la utilización de fuentes no convencionales y los programas energéticos de desarrollo, favorecen de manera clara el desarrollo local y regional.

Los proyectos URE que tienen que ver con el uso final de la energía y con la eficiencia energética implican una alta componente de transferencia tecnológica, renovación y modernización del parque de equipos de conversión a energía útil, en todos los sectores. El desarrollo de estas tecnologías permite fortalecer el objetivo final del PEN: Investigación y Desarrollo (PEN-03).

De la legislación y de los planes energéticos adoptados, se concluye que las políticas energéticas responden a: seguridad en la oferta, continuo desarrollo del sector exportador de energía y eficiencia del sector de energía local. Siendo éstas, consistentes con la política macroeconómica de desarrollo económico y social del país. En la figura 2.1, se presenta el modelo URE Colombia donde se observa la interrelación de las entidades públicas y privadas nacionales entre ellas, y con entidades extranjeras.



- ☑ Mejoramiento de la calidad del medio ambiente.
- ☑ Investigación y desarrollo científico y tecnológico.
- ☑ Modernización Institucional.

Para lo cual, el URE se convierte en una herramienta para obtener mayor eficiencia energética al utilizar la energía durante cualquier actividad, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad, vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables. Además, las empresas nacionales debido a la entrada de acuerdos comerciales entre naciones, se enfrentarán a compañías y productos extranjeros, para lo cual deben optimizar sus procesos y por consiguiente los recursos energéticos.

Lo más importante para lograr la eficiencia energética en una empresa no es sólo que exista un plan de ahorro de energía, sino contar con un sistema de gestión energética que garantice el mejoramiento continuo. De forma similar, se deben concentrar los esfuerzos en el control de las principales funciones energéticas, organizar el programa orientado al logro de resultados y metas concretas, y realizar el mayor esfuerzo dentro del programa, a la instalación de equipos de medición.

**Opciones de aplicación:** La aplicación requiere la aplicación específica de instrumentos como pueden ser:

- ☑ **Instrumentos legales:** Si bien algunos programas URE han tenido éxito, en general ha sido difícil aplicar en forma efectiva las políticas diseñadas en materia de URE. Uno de los obstáculos encontrados ha sido la ausencia de un adecuado marco legal y regulatorio como elemento indispensable para consolidar la existencia de un mercado de servicios URE. La expedición de la Ley 697 de 2001 apunta a levantar esta barrera.

La reglamentación de la mencionada Ley es un paso indispensable para hacer efectivos los mecanismos plasmados. En dicha reglamentación se deberá dar cuerpo al Programa de URE, “PROURE”, creado en la Ley.

Este Programa estará constituido por diversos subprogramas de URE diseñados específicamente para los diferentes sectores de la economía nacional y/o grupos objetivos.

Se deberán diseñar prioritariamente programas de URE para los sectores, en los que se establezcan metas de ahorro, planes y cronogramas de trabajo.

Otra herramienta que tiene una incidencia favorable para el desarrollo de la estrategia de URE, es la consolidación de condiciones de mercado favorables para la penetración de tecnología eficiente en equipos de uso final, de consumo masivo. En este sentido, la UPME diseñó el Programa Colombiano de Normalización, Acreditación, Certificación y Etiquetado de Equipos de Uso Final de Energía, el “PROGRAMA CONOCE”, que reglamentará la utilización de una etiqueta que indica el desempeño energético de los equipos de uso final, la cual será una ventaja competitiva de mercado para los equipos que se presenten más eficientes (PEN-03).

- ☑ ***Instrumentos culturales:*** Estos instrumentos atacan las barreras culturales que deben ser superadas, con miras a reforzar e implementar el uso racional y eficiente de la energía. En este sentido se diseñó un programa de capacitación para el fomento de los servicios de URE enfocados particularmente a la demanda (Acevedo y Otros-02).

Este programa también incluye las acciones requeridas para que la UPME conjuntamente con las entidades responsables del sistema educativo colombiano, a través de la educación formal, no formal e informal, estructuren un proceso educativo que haga posible transformar y potenciar en el individuo su actitud frente a la energía. Para aliviar esfuerzos, se podría utilizar la

experiencia ganada en la incorporación del tema ambiental en las cátedras colombianas.

Como parte del PROURE, se diseñarán los programas educativos que se insertarán en los diferentes currículos nacionales. Así mismo, se plantearán proyectos demostrativos y educativos dirigidos especialmente a los niños (PEN-03).

- ☑ **Instrumentos económicos:** Estos instrumentos apuntan a levantar las barreras de tipo económico y constituyen uno de los mecanismos más importantes para el desarrollo y éxito de proyectos URE. Los incentivos económicos ocupan una posición central para promover programas y proyectos de eficiencia energética en la búsqueda de un modelo de producción sostenible económica, energética, ambiental y socialmente.

Uno de los mayores obstáculos para poner en marcha los proyectos de URE es la dificultad para acceder a recursos de financiamiento, tanto por la carencia de esquemas financieros para proyectos de URE, como por la ausencia de estímulos específicos. La UPME conjuntamente con BANCOLDEX ha diseñado un esquema de incentivo indirecto para apoyar la incorporación de tecnologías eficientes y la optimización del uso de la energía en los sectores productivos, a través de dos líneas de crédito. Si bien las líneas de redescuentos ya están operativas, su impulso y puesta en marcha definitiva mediante divulgación y acompañamiento tanto a industriales como a la banca de primer piso, es una labor que se debe adelantar de manera prioritaria (PEN-03).

## **2.4 Barreras para la implementación de un programa de gestión energética**

Existe un sinnúmero de deficiencias en la implementación de instrumentos de gestión energética que se deben superar, como son:

- ✓ Se enfrentan los efectos y no las causas de los problemas.

- ✓ Los esfuerzos son aislados y no hay mejora integral en todo el sistema.
- ✓ No se atacan los puntos vitales.
- ✓ No se detectan y cuantifican adecuadamente los potenciales de ahorro.
- ✓ Se consideran las soluciones como definitivas.
- ✓ Se conforman creencias erróneas sobre cómo resolver los problemas.
- ✓ Las personas idóneas para asumir determinada función dentro del programa se excusan por estar sobrecargadas.
- ✓ Los gerentes departamentales no ofrecen suficiente tiempo a sus subordinados para esta tarea.
- ✓ El líder del programa no tiene tiempo ni logra apoyo o tiene otras prioridades.
- ✓ La dirección no reconoce el esfuerzo del equipo de trabajo ni ofrece refuerzos positivos.
- ✓ La dirección no es paciente y juzga el trabajo sólo por los resultados inmediatos.
- ✓ No se logra conformar un equipo con buen balance interdisciplinario o interdepartamental.
- ✓ Falta comunicación con los niveles de toma de decisiones.
- ✓ La dirección ignora las recomendaciones derivadas del programa.
- ✓ El equipo de trabajo se aparta de la metodología y el enfoque sistemático.
- ✓ Los líderes del equipo de trabajo son gerentes e inhiben la actuación del resto de los miembros.

# Capítulo 3

## **URE: Enfoque energético**

### **3.1 Introducción**

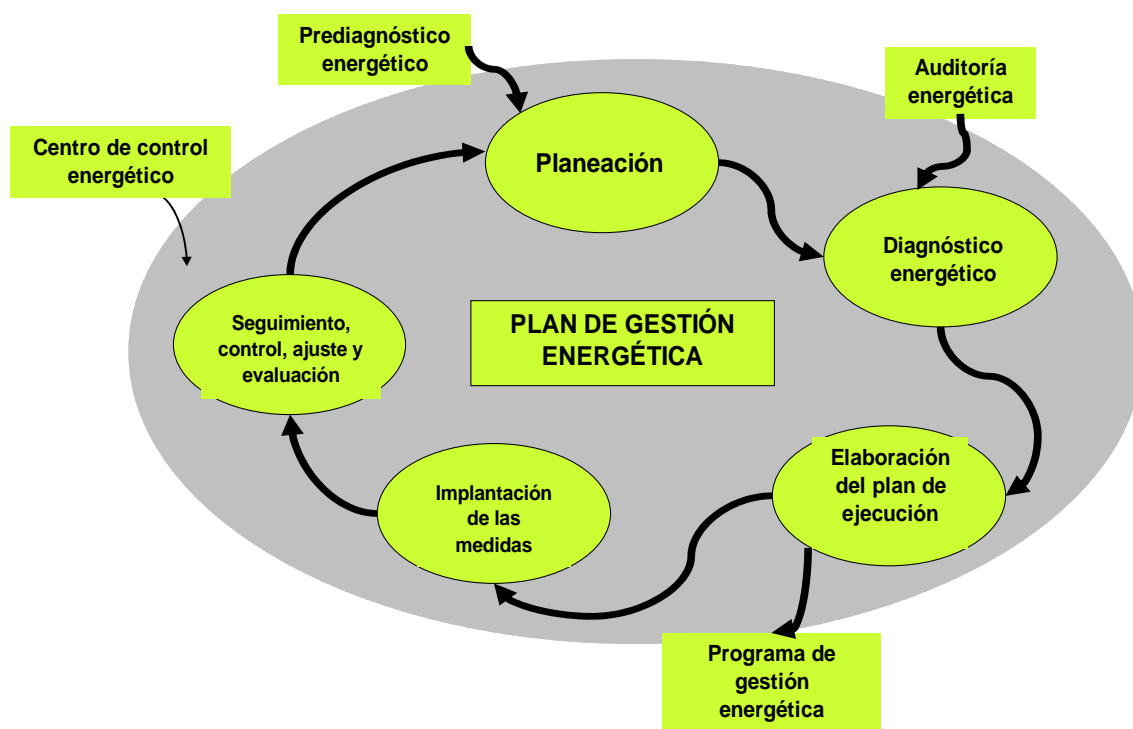
Durante las últimas décadas, las organizaciones han visto como la energía ha pasado de representar un factor marginal en su estructura de costos, a ser una parte importante. Por ello, es preciso conocer claramente el tipo y la cantidad de energía que se utiliza en cada uno de los procesos que conforman la cadena productiva, y determinar las acciones pertinentes para abaratar los costos de producción por concepto de energía, sin afectar la calidad ni la cantidad de producción.

Para lograr lo anterior es necesario implementar u operar programas de ahorro de energía cuya estrategia central sea el uso eficiente de la misma. Estos programas mejoran la competitividad, amplían el horizonte energético y liberan recursos económicos para destinarlos a otras actividades productivas. A continuación se presentan los pasos metodológicos para realizar un análisis energético a partir de la primera ley de la termodinámica.

### **3.2 Metodología para gestión energética a partir del balance de energía**

La definición e implantación de un programa de ahorro de energía se inserta dentro de un programa global de gestión energética. Este programa de ahorro de energía requiere de un soporte adecuado para identificar y evaluar las oportunidades existentes en la organización.

El ahorro de energía no puede llevarse a cabo si no se conoce dónde y cómo se está utilizando. En la mayoría de los casos, el establecimiento de este punto de partida requiere de una inspección y de un análisis energético detallado de los consumos y pérdidas de energía, que generalmente se conoce como *diagnóstico energético*. En la figura 3.1 se observa un modelo propuesto de gestión energética para implementar en procesos industriales.



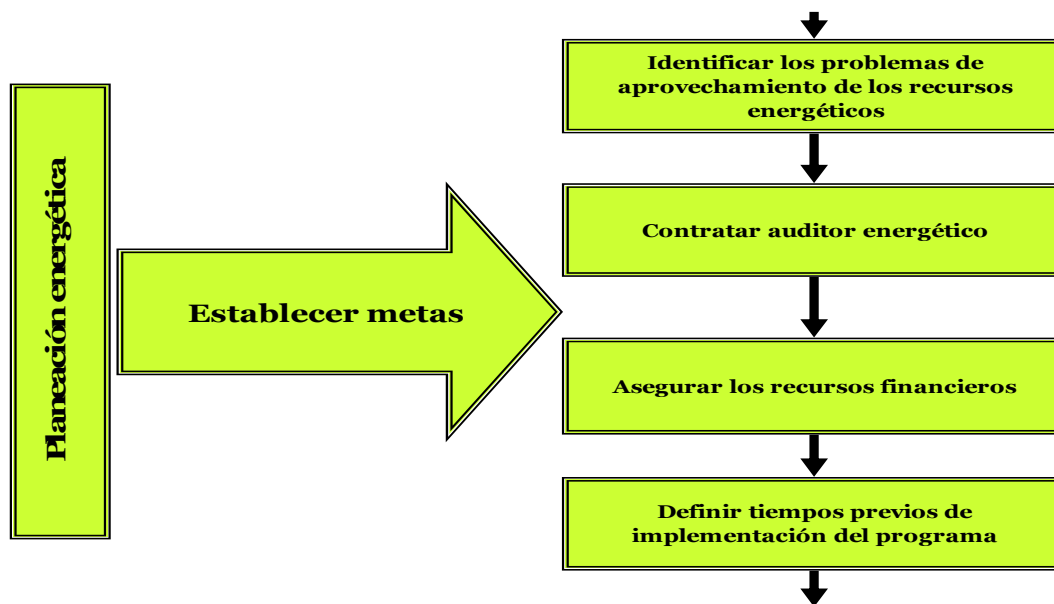
**Figura 3.1.** Modelo de gestión energética

En la figura 3.1 se observan las etapas que deben seguirse durante la implementación de un programa de gestión energética. Cabe resaltar que estas estrategias varían de acuerdo con las condiciones de cada una de las empresas y procesos productivos; dependen del tamaño, tipo de negocio, cantidad de energía mal utilizada y formación del personal, entre otras. A continuación, se muestra la desagregación de cada una de las etapas de la figura 3.1.

**3.2.1 Prediagnóstico:** En esta etapa se realizan encuestas a nivel gerencial o administrativo; se solicitan los contratos de suministro de energía, datos energéticos y todo lo necesario para identificar el problema.

De forma paralela se debe realizar una inspección ambiental; ya que un buen ambiente laboral da a los trabajadores un mejor espacio para realizar un trabajo más eficiente.

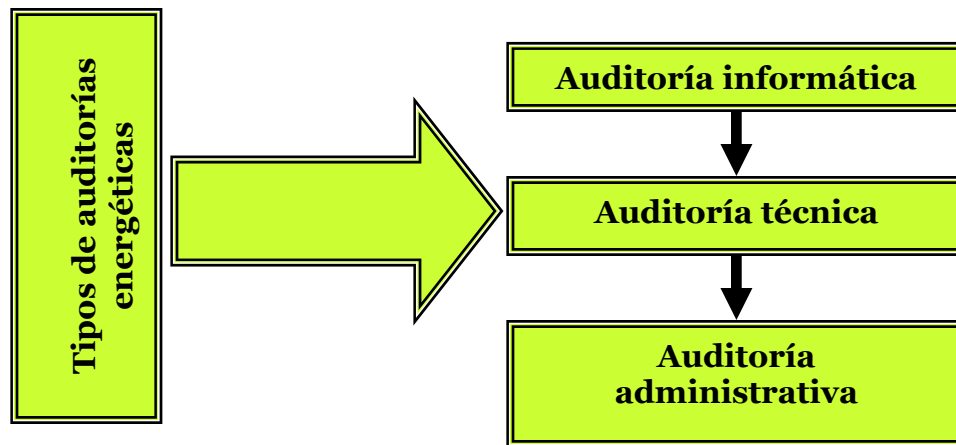
**3.2.2 Planeación:** Esta etapa surge del problema identificado en la empresa que puede haberse generado por el alto consumo de recursos energéticos o por el mal uso de los mismos, identificados en la etapa de prediagnóstico. Durante esta etapa la empresa se debe preguntar si existe la necesidad de contratar un auditor energético o una compañía de servicios energéticos ESCO<sup>3</sup> (California Energy Comisión-00). En la figura 3.2 se muestran los objetivos de esta etapa.



**Figura 3.2.** Objetivos de la etapa de planeación energética

<sup>3</sup> ESCO: Energy Service Company

**3.2.3 Auditoría energética (A.E.):** Tal como se mencionó en el capítulo 2, es una actividad de evaluación y asesoramiento, centrada en el examen y evaluación de la adecuación, la eficiencia y la eficacia de los sistemas de producción, así como de la calidad del desempeño de las unidades en relación con la eficiencia energética, los planes, las metas, los objetivos y las políticas. Existen diferentes tipos de auditoría como se muestra en la figura 3.3.



**Figura 3.3.** Tipos de auditorías

A continuación se presentan los objetivos de una auditoría energética, la herramienta de análisis denominada “Diagnóstico Energético” y el procedimiento a seguir.

### **3.2.3.1 Objetivos**

Identificar las medidas técnicas y administrativas rentables a partir del ahorro de energía en toda la empresa. Para llegar a ese objetivo, se deben plantear las siguientes metas:

- ✓ Obtener el balance energético global de la planta y los balances energéticos de los equipos y líneas de producción intensivas en consumos de energía para su cuantificación.

- ✓ Identificar las áreas de oportunidad que ofrecen potencial de ahorro de energía.
- ✓ Determinar y evaluar económicamente los volúmenes de ahorro alcanzables y las medidas técnicamente aplicables para lograrlo.
- ✓ Analizar las relaciones entre los costos y los beneficios de las diferentes oportunidades dentro del contexto financiero y gerencial de la empresa, para poder priorizar su implementación.
- ✓ Desarrollar un plan de acción para la realización de todos los proyectos de ahorro de energía, incluyendo fechas, metas y responsabilidades; tal plan permitirá dar continuidad al programa de ahorro de energía de la empresa.

**3.2.3.2 Diagnóstico Energético:** Es la herramienta técnica utilizada para la evaluación sistemática del uso eficiente de la energía, definiendo la situación del consumo y las posibles oportunidades potenciales de ahorro.

☑ ***Diagnóstico Energético de Primer Nivel (DEN-1):*** Su objetivo principal es obtener el balance global de energía y potencialidades de ahorro que no requieren inversión.

☑ ***Diagnóstico Energético de Segundo Nivel (DEN-2):*** Su objetivo principal es obtener los balances específicos de energía y los potenciales de ahorro sin y con inversión, aplicados al proceso.

### **3.2.3.3 Procedimiento**

#### **Paso 1. Recolectar información del sistema**

- ✓ Recolección de información básica e inventario general de las instalaciones.
- ✓ Identificación del proceso productivo y/o áreas principales.
- ✓ Identificación de las fuentes de energía.

- ✓ Identificación de los consumidores de energía, capacidad instalada y horas de operación.
- ✓ Información histórica de las facturas de los suministradores de energía.

### **Paso 2. Registrar valores**

- ✓ Toma de medidas.
- ✓ Balances de energía con el objeto de conocer la distribución de energía en las diferentes fases del proceso productivo y/o áreas.
- ✓ Registros y mediciones puntuales.
- ✓ Unificación del período y unidades de las diferentes formas de energía que entran o salen del sistema.

### **Paso 3. Obtener efectos**

- ✓ Incidencia del consumo de energía de cada equipo o grupo de equipos en el consumo de energía total y por lo tanto en el costo total.

### **Paso 4. Calcular índices de comportamiento**

- ✓ Cálculo de los índices de consumo de energía que se pueden usar para identificar la eficiencia energética de las etapas y, consecuentemente, el potencial de ahorro de energía (consumo específico de energía y factor de carga, entre otros).

### **Paso 5. Determinar potenciales de ahorro de energía**

- ✓ *Sistemas eléctricos*: evaluación de la transformación, la distribución, las cargas eléctricas y la generación propia.

- ✓ *Sistemas mecánicos*: evaluación de sistemas de aire comprimido, sistemas de bombeo, sistemas de manejo de aire y manejo de materiales sólidos.
- ✓ *Sistemas térmicos*: generación de vapor, sistemas de recuperación de calor residual, redes de distribución de fluidos térmicos, sistemas de refrigeración y aire acondicionado, hornos industriales, sistemas de quemadores, etc.

#### **Paso 6. Medir**

- ✓ Mediciones de variables energéticas.

#### **Paso 7. Evaluar**

- ✓ Evaluación de los ahorros de energía en términos de costos. Se lleva a cabo una evaluación financiera que permite realizar un análisis en función de los desembolsos requeridos para poner en práctica las recomendaciones.

Luego de la Auditoría Energética (teniendo como base las conclusiones y recomendaciones de la misma), se efectuará un Plan de Ejecución. Estos resultados deben ser conocidos por todo el personal de la empresa porque de esa manera comienza a crearse un buen ambiente de motivación y concientización (MME-00).

Las acciones correctivas deben iniciarse con las medidas de mantenimiento, y divulgarse sus resultados para una mayor motivación del personal. Asimismo, debe complementarse el programa con cursos de capacitación dirigidos al personal, y con un adecuado sistema de incentivos. Lo que incidirá en mayores rendimientos del mismo (UPME-03).

#### **3.2.4 Auditor Energético**

Es el profesional que realiza la auditoría con un grupo de especialistas, si la amplitud o complejidad de la instalación analizada lo requiere.

La diversidad de tipos de empresas, tipos de equipos consumidores y tecnologías energéticas horizontales específicas, hacen aconsejable que el auditor, tenga una formación muy amplia, con conocimientos de las técnicas energéticas en profundidad y con capacidad para relacionar los procesos productivos con el consumo de energía.

El auditor energético deberá poseer los conocimientos necesarios para la realización de cálculos técnicos y económicos así como la capacidad de realizar o dirigir las mediciones que sean necesarias.

La base teórica debe ir acompañada de una amplia experiencia profesional de trabajo en plantas, de diseño y/o de realización de auditorías energéticas.

La participación de instaladores en las auditorías, aportando bagaje práctico en determinadas tecnologías horizontales o equipos, puede admitirse siempre que no se pierda la visión de conjunto, y se potencie la perspectiva de eficiencia energética.

### **3.2.5 Medios Materiales para las auditorías energéticas**

La auditoría energética exige la realización de mediciones específicas que complementan las que se pueden obtener directamente de los instrumentos existentes en la empresa.

La realización de los balances de materia y energía requiere mediciones específicas que, para la producción normal y el mantenimiento, no son necesarias.

Los medios que se indican a continuación son materiales imprescindibles para la auditoría, si bien estos pueden complementarse con otros elementos más sofisticados para facilitar el trabajo del auditor.

- **Mediciones Eléctricas**

Analizador de redes.

Pinzas amperimétricas.

Pinzas voltimétricas.

Para medidas puntuales pueden utilizarse multímetros.

- **Mediciones de combustión**

Analizador de gases de combustión

Sonda para toma de muestras.

Opacímetro.

Termómetro para gases.

Termómetro para ambiente.

- **Otros instrumentos y medios**

Luxómetros.

Sondas de temperatura ambiente.

Pirómetros ópticos.

Pirómetros termográficos.

Anemómetros.

Caudalímetros.

Computador portátil.

Cronómetro.

Herramientas y material de seguridad.

### 3.2.6 Cálculos económicos

Como toda actividad empresarial, la eficiencia energética tiene un condicionante, que es la rentabilidad económica. Aunque cada empresa tiene su sistema y sus criterios para medir la rentabilidad y establecer sus prioridades, aquí se incluye un indicador clásico de cálculo de la rentabilidad de las mejoras energéticas, que requiere conocer la inversión a realizar y el ahorro económico estimado.

#### 1- Datos de partida

Para efectuar los cálculos se deben reunir los datos que se relacionan a continuación.

*Inversión (I)*: Valoración de las actividades, los equipos que hay que adquirir y los trabajos que hay que realizar a los precios vigentes en el mercado.

*Disminución anual de costos energéticos (DCE)*: Estimación del ahorro en costos energéticos, consecuencia de la implantación de la mejora energética, en *(US/Año)*.

*Aumento de los costos de mantenimiento/operación (ACMO)*: Estimación del incremento anual de los costos de mantenimiento y de operación asociados a la mejora energética introducida, en *(US/Año)*.

*Ahorro económico anual (AEA)*: Estimación del ahorro económico anual resultante, en *(US/Año)*. Se obtiene aplicando la ecuación 3.1:

$$AEA = DCE - ACMO \quad (3.1)$$

#### 2- Índices de rendimientos indirectos

Estos índices relacionan los costos de inversión con los beneficios a lo largo de la vida del equipo y se calculan mediante las expresiones:

*Rendimiento Bruto de la Inversión (RBI):* Para determinar este índice se utilizan otros conceptos, como Vida Útil del equipo y Ahorro Económico durante todo el proyecto. Se determina mediante la ecuación 3.3.

$$AEAn = (AEA) \times (Vu)$$

$$RBI = ((I - AEAn) \times 100) / I \quad (3.3)$$

Donde **Vu** es la vida útil del equipo en años y expresa el porcentaje de beneficio obtenido a lo largo de la vida de la instalación, equipo, procedimiento u origen de la mejora, etc.

*Rendimiento Bruto Anual (RBA) (%/año):* Con este indicador se calcula el ahorro anual (que suele ser más operativo) ver ecuación 3.4.

$$RBA = RBI / Vu \quad (3.4)$$

*Tasa de Retorno de la Inversión (TRI):* Mediante este indicador se comparan distintas alternativas de inversión. Se calcula mediante la expresión siguiente, que considera la depreciación del equipo.

$$D = I / Vu$$

$$TRI = (AEAn - D) / I \quad (3.5)$$

La depreciación anual del equipo (**D** en US/año) se supone que es lineal durante la vida de la mejora propuesta.

**3.2.7 Elaboración del plan de gestión energética:** Una vez realizado el diagnóstico energético se procede a la elaboración del plan de ejecución en el cual se debe contemplar cada una de las actividades a realizar, el tiempo asociado, el valor de inversión, el tiempo de recuperación, las estrategias para recuperar la inversión (si existe) y el sistema de control y vigilancia del proyecto. La elaboración del plan la deben realizar tanto los agentes

externos (profesionales de diferentes áreas) como todas las dependencias de la empresa.

Se deben establecer tres tipos de mediciones de inversión:

1- Sin inversión: Denominadas de “*housekeeping*”, relacionadas con los modos operativos, y de seguimiento y control.

Por ejemplo:

- Ajustes de los controles de relación aire-combustible en calderas y hornos.
  - Desconexión de equipos que no están en producción.
  - Programación correcta de la producción evitando tiempos muertos.
  - Planeación de la sustitución de fluorescentes T12 (40 W) por fluorescentes T8 (36 W) a medida que se vayan quemando.
- 2- Con baja o mediana inversión: Denominados de “*retrofitting*”, generalmente tienen retorno menor a un año.

Por ejemplo:

- Capacitación de personal.
  - Recuperación de condensados de vapor.
  - Corrección del factor de potencia.
  - Uso de controladores de velocidad.
- 3- Con alta inversión: Se refieren a “cambio de tecnologías y/o procesos” con tiempos largos de retorno de capital.

Por ejemplo:

- Instalación de equipos de alta eficiencia (motores, calderos).
- Uso de controlador automático de demanda.
- Cambio de procesos químicos, métodos de secado, etc.

**3.2.8 Implementación del programa de gestión energética:** Esta etapa se considera el “eje” del plan de gestión ya que plantea la realización de inversiones tanto en adquisición de conocimiento como en cambio de tecnología, por lo tanto requiere mucha atención de todas las dependencias de las empresas.

**3.2.9 Centro de control energético:** Se debe establecer un comité de control con los siguientes objetivos:

- ⇒ Realizar el seguimiento del consumo energético.
- ⇒ Establecer los objetivos de control que permitan realizar vigilancia sobre las metas.
- ⇒ Realizar los ajustes del programa de gestión.
- ⇒ Realizar la evaluación continua de las metas alcanzadas y el reformulamiento de las mismas.
- ⇒ Capacitar en la filosofía URE al personal.

Para culminar este capítulo es importante recalcar que para desarrollar eficientemente y con éxito un programa de ahorro de energía en una organización deben cumplirse las siguientes condiciones:

- Compromiso en recursos y tiempo, tanto de la gerencia como del personal de la empresa, para implementar y desarrollar un programa energético con un esfuerzo permanente.

- ☑ Base de datos consistente sobre consumos energéticos de la empresa.
- ☑ Proyectos viables deben ser evaluados de acuerdo con las normas y técnicas financieras de la compañía.
- ☑ El programa de ahorro de energía debe manejarse como cualquier programa gerencial administrativo de la empresa.

Un programa de ahorro de energía implica un compromiso y una organización permanente a largo plazo, que se integra a la administración diaria de la empresa y que sienta las bases y desarrolla el plan de acción para un *URE*.

# Capítulo 4

## **URE: Enfoque exergetico**

### **4.1 Introducción**

El análisis exergetico se utiliza en algunas industrias para la evaluación de procesos térmicos. Sin embargo, este proyecto está centrado en validar la propuesta del director de utilizar este tipo de análisis a la gestión y uso racional de la energía. En este capítulo se presenta una metodología basada en un lenguaje termoeconómico que facilita la elaboración de propuestas de ahorro de energía.

### **4.2 Filosofía exergetica**

En los procesos de producción de bienes y servicios, los flujos de energía desempeñan un papel físicamente insustituible y que económicamente es cada vez más importante.

Minimizar el costo energético, es cada vez más prioritario no sólo por su implicación en la situación empresarial sino por la asimilación cada vez más fuerte del hecho de la conservación de la energía como un bien social.

Sin embargo, no existe información adecuada ni siquiera unanimidad sobre que significa minimizar el costo energético. De aquí la necesidad de desarrollar métodos cuantitativos que disminuyan o incluso eliminen la incertidumbre en la toma de decisiones técnicas y económicas, al momento de mejorar energéticamente un determinado proceso.

Cuando se utiliza el análisis de conservación de energía, a través de la primera ley de la termodinámica, existe una limitación importante en el mismo. Dado se

analizan procesos reales, este tipo de análisis no está en la capacidad de definir apropiadamente el grado de aprovechamiento de la energía suministrada a los procesos. Por consiguiente, no se tienen en cuenta las irreversibilidades generadas en los equipos durante el proceso productivo. Esta limitación ha generado la búsqueda de métodos que permitan una caracterización bastante real de lo que sucede en este tipo de procesos. Uno de los métodos que cumple con este objetivo es el denominado análisis de exergía, el cual se convierte en una herramienta importante para evaluar la eficiencia de los procesos de producción y de cualquier sistema donde predomine el uso de energía. Todo esto enmarcado dentro de los objetivos de un programa de ahorro de energía (Gordillo-05).

El análisis exergético permite disponer de una herramienta clarificadora en la integración de proceso y esto sirve, tanto para el diseño de nuevas plantas o complejos energéticos, como la mejora de los existentes. La propuesta planteada es generalizar el análisis exergético en los procesos que se genera energía eléctrica, como en aquellos en los que se consume exergía para fabricar un determinado producto. A continuación se presenta una metodología para realizar gestión energética a partir del enfoque exergético.

#### **4.3 Precedencia de las fases y etapas de la metodología**

Para iniciar cada fase de la metodología se requiere que la anterior haya culminado en su totalidad, por lo que se desarrolla una a la vez. De igual forma sucede con la mayoría de las etapas.

#### **4.4 Resultados esperados del programa URE**

Los resultados esperados al aplicar el Programa URE se ilustran en la figura 4.1. El primer resultado se aprecia en la reducción del consumo energético, lo que de forma directa se traduce en un ahorro económico y menores costos de operación, mejorando así los índices de productividad y competitividad.

La reducción del consumo contribuye a velar por la responsabilidad empresarial en pro de un desarrollo sostenible, en cuanto al uso racional de la energía.



**Figura 4.1.** Resultados esperados

Esta secuencia de eventos no se diferencia de los resultados obtenidos al emplear otros instrumentos o herramientas, para controlar el consumo de la energía, que existen en la actualidad. Por lo que se requiere hacer énfasis en la diferenciación de la metodología propuesta en este trabajo con respecto a las demás técnicas que abordan el problema energético. Esta diferenciación se soporta en dos pilares.

El primero se relaciona con la comprensión correcta de la problemática, que se da al emplear la exergía como fundamento académico, lo que posibilita el generar soluciones posibles, delimitadas por la profundidad del análisis fijado y por las posibilidades físicas de mejoras. Las mayores limitaciones de las soluciones encontradas hacen referencia a la tecnología de los equipos y la cuantificación de la exergía.

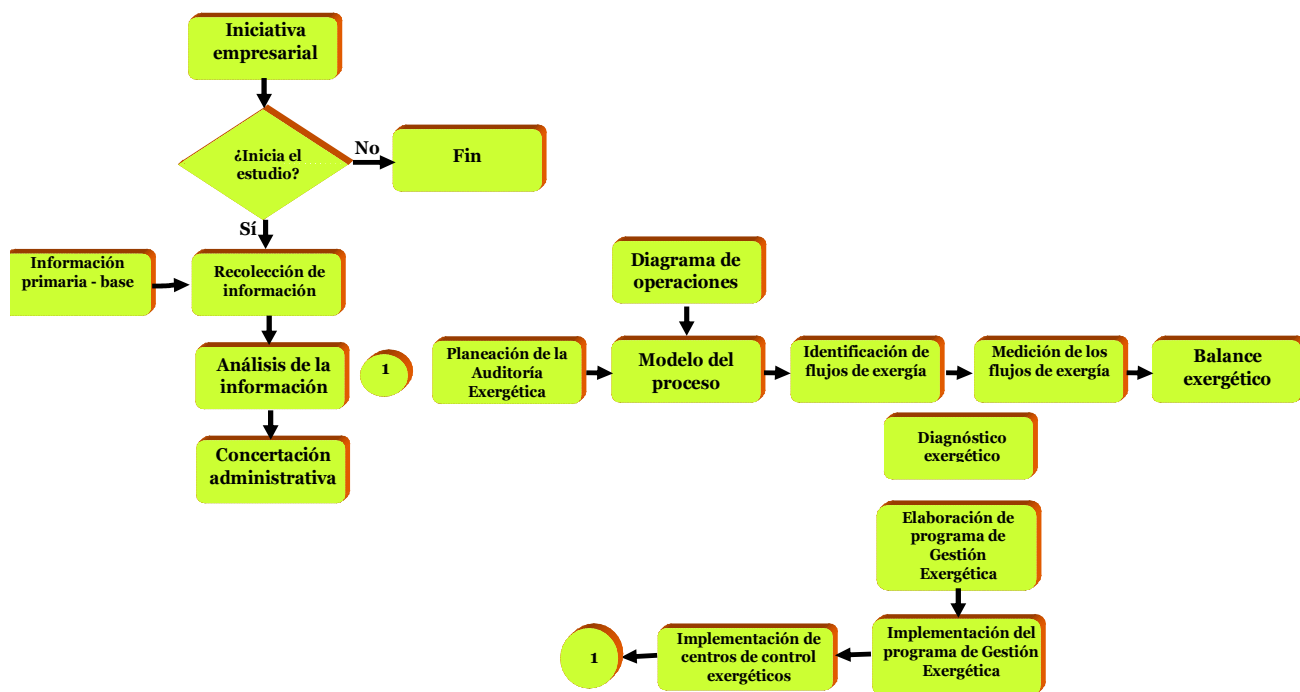
El segundo trata sobre la participación organizacional que tiene el Programa URE, pues se concibe como un generador importante de productividad y competitividad, lo que significa una mayor utilidad.

El real aporte de la metodología radica en el tratamiento del problema desde la perspectiva exergética, y la promoción de un programa que permita la gestión exergética.

#### **4.5 Metodología para gestión exergética**

Las empresas que conocen sus procesos observan dónde pierden energía y dónde son capaces de proponer soluciones que ahorren. Sin embargo, cuando se enfrentan con dos alternativas de ahorro de energía, normalmente, actúan analizando el problema en términos de pérdidas de energía y dejando a un lado la calidad de esa energía dada por la reversibilidad (Guayar, Marín y otros-85). Por ello, se ha optado por presentar una propuesta de *Gestión Exergética*, que brinde una alternativa para realizar e implementar programas de uso racional y eficiente de energía (ver figura 4.1), con base en el lenguaje entrópico (calidad de la energía) asociada al segundo principio de la termodinámica.

A continuación se describe cada una de las etapas que conforman el modelo. En el capítulo 5 se muestra la implementación de algunas de las fases, ver el resaltado de la figura 4.2.



**Figura 4.2.** Modelo de gestión exergética

Dada la importancia de facilitar los nuevos cambios organizacionales de las empresas con la adopción de nuevas filosofías y sistemas de gestión se considera prudente y hasta necesario que la administración y dirección del Programa URE se armonice con tales cambios. En la figura 4.2 se ilustra de forma esquemática la metodología propuesta, como medio práctico para la comprensión y adhesión a la estructura organizacional existente o planificada.

Aunque la administración y dirección se encarga de todas las etapas, existen cuatro puntos en el desarrollo metodológico, claves para revisar el programa en ejecución y obtener mejoras sustanciales a lo ya identificado, la recolección de información, los criterios fijados por la filosofía exergética, la evaluación del problema y la formulación del plan.

A continuación se realiza la descripción de cada una de las fases que conforman el modelo de *Gestión Exergética*.

#### 4.5.1 Fase 1: Administrativa

- 4.5.1.1 Decisión gerencial:** Con base en información previa suministrada por el departamento de mantenimiento o por el personal técnico de la empresa, o simplemente porque existe la *sensación* del alto consumo de recursos energéticos, la gerencia de la empresa opta por realizar un *prediagnóstico exergético* con personal propio o externo, para lo cual inicia con información interna, tal como: comparación del consumo de energía de la empresa con respecto a otra con características similares (\$/kWh), comparación con años anteriores, análisis de razones presupuestadas y ejecución de un criterio gerencial.
- 4.5.1.2 Recolección de información:** Se debe recolectar toda la información referente al consumo de los recursos energéticos (carbón, gasolina, gas, etc.), programas de mantenimiento, censo de carga de consumo intenso de energía, demanda y facturación de la energía eléctrica, jornadas laborales, hojas de vida de equipos y hojas de vida del recurso humano (operadores de máquinas) (ver anexo A).
- 4.5.1.3 Análisis de la información:** Se debe realizar la evaluación de los datos suministrados y recolectados. Esta evaluación concluye con un primer producto: el *prediagnóstico exergético*, el cual debe entregar resultados suficientes para optar la contratación de una *Auditoría Exergética* (ver anexo B).
- 4.5.1.4 Concertación administrativa:** Con base en la interpretación del diagrama exergético-productivo y en un análisis de *sensibilidad exergética*, la gerencia de la empresa debería quedar convencida de la contratación de una *Auditoría Exergética*.

## **4.5.2 Fase 2: Auditoría exergética**

**4.5.2.1 Planeación de la auditoría exergética:** En esta etapa se establece una bitácora para realizar cada una de las actividades asociadas a la auditoría exergética dentro de la empresa, tales como: la obtención del modelo del proceso, la identificación y medida de los flujos de exergía, y la elaboración del balance exergético. Además, esta etapa debe identificar las actividades externas y el diagnóstico exergético para la elaboración del programa URE. De manera similar, se debe seleccionar muy bien el personal que estará a cargo del proceso, lo cual garantizará el éxito del estudio.

**4.5.2.2 Modelo del proceso:** Se debe establecer el diagrama de producción o línea de productos de la empresa o el proceso. En las PyMEs el conocimiento de los procesos, sobretodo antes de la aplicación de la norma ISO 9000, no hace parte de sus activos, por tanto, en muchos casos no tienen establecida la manera cómo obtienen los productos (*know how*). Esta labor se hace necesario realizarla en asocio con un especialista en el área de *producción*. Además de lo anterior, se hace relevante conocer cada una de las actividades requeridas para obtener cada uno de los productos que ofrece la empresa y asociarlos al consumo de exergía.

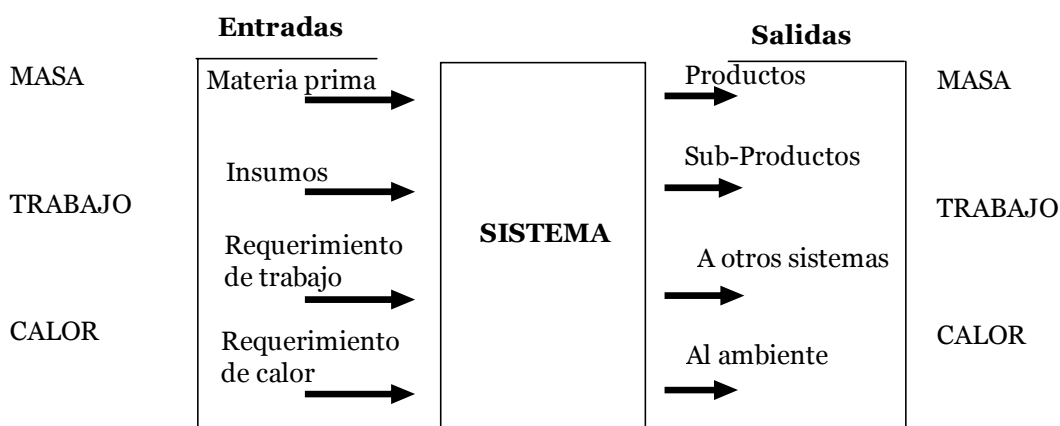
La información existente y la necesaria varían de una empresa a otra dependiendo de su actividad económica y de su tamaño, por un lado, y del objeto formal del estudio, por otro.

**4.5.2.3 Identificación de los flujos de exergía:** Una vez obtenida la línea de producción o la línea de los productos, se prosigue a identificar cada uno de los flujos exergéticos (insumos, productos y residuos); todos ellos deben estar una misma unidad de exergía (MW-h, BTU o MJ). Es de suma relevancia conocer cada una de las variables que asocian los flujos,

debida a que de ahí surge la necesidad de equipos e instrumentos de medida, y de la disponibilidad del proceso. Estos son aspectos que restringen el nivel de desagregación del proceso.

**4.5.2.4 Medidas de los flujos:** En esta etapa se realiza cada una de las medidas de los flujos de exergía, así como los cálculos indirectos de aquellos que no se puedan realizar. En la tabla 5.2 se presenta un modelo para la toma de medidas.

**4.5.2.5 Balance exergético del proceso:** El análisis de exergía está basado en el método de caja negra, en el cual el sistema es la caja que interactúa con el ambiente a través de transferencias de calor, trabajo y masa, mostrando el modelo físico del análisis de exergía (ver figura 4.3).



**Figura 4.3.** Modelo físico del análisis de exergía para un sistema

Sin embargo, en los trabajos de apoyo a esta tesis (González y Salazar-06), (Osma-06), (Barbosa y Jiménez-06), (Díaz-06) y (Therán y Posada-06) se obtuvieron modelos exergéticos por con el fin de determinar los valores de cada uno de los flujos identificados en el numeral 4.2.3.3 y aplicar la ecuación 4.1.

$$\sum B_{ent} = \sum B_{sal} + \sum B_R \quad (4.1)$$

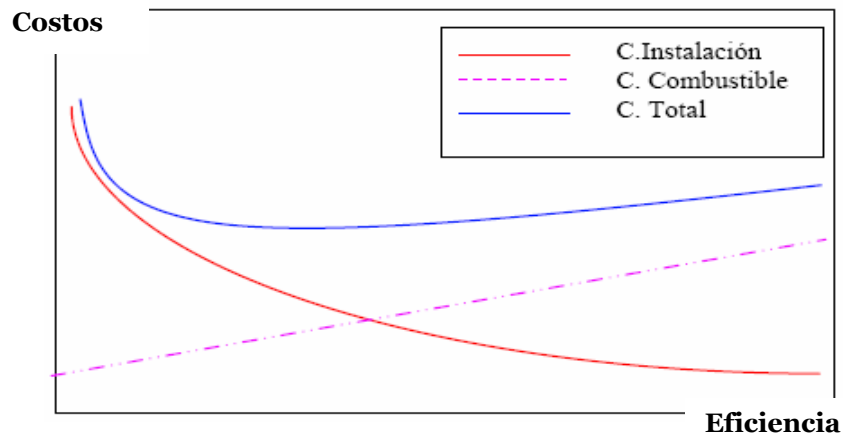
Donde:

$B_{ent}$ : energía de entrada (insumo), en Joules.

$B_R$ : exergía de los residuos, en Joules.

$B_{sal}$ : energía de salida (producto), en Joules.

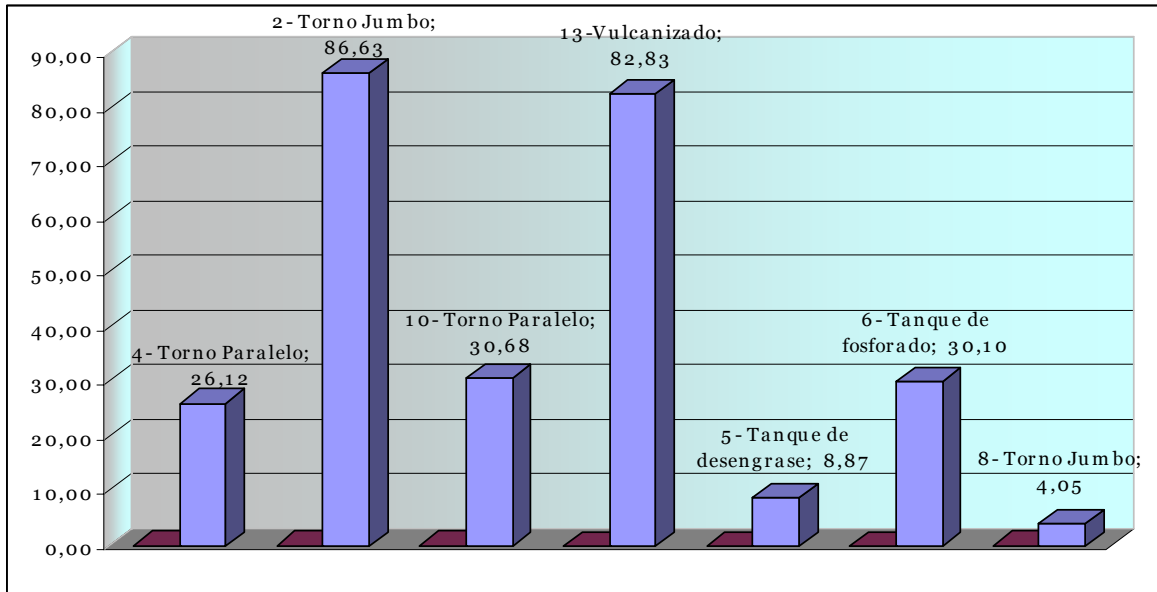
**4.5.2.6 Diagnóstico exergético:** La irreversibilidad asociada a los procesos en los que tienen lugar transformaciones energéticas, pueden tener tres causas: térmica, mecánica y química, que deben ser cuantificadas. En términos económicos puede efectuarse un planteamiento similar, al tener en cuenta que el costo de un producto se forma por la aportación económica de varios recursos productivos como puede ser combustible e instalación (ver figura 4.4).



**Figura 4.4.** Componentes del costo exergoeconómico

**Cálculo de irreversibilidades:** Dentro del proceso de auditoría exergética se considera muy importante el cálculo de las irreversibilidades tanto teóricas (nominales) como reales (existentes durante el proceso), con el fin de identificar las oportunidades reales de ahorro de energía. Se puede graficar un *diagrama de irreversibilidades*, el cual está conformado por máquinas, procesos o empresas del mismo sector, donde el punto más bajo corresponde al valor de irreversibilidad de diseño mínimo que se puede obtener, y el punto más alto es el valor de

irreversibilidad medida, la diferencia entre esos dos puntos indica la oportunidad de mejorar el proceso energético (ver figura 4.5).



**Figura 4.5.** Diagrama de irreversibilidades

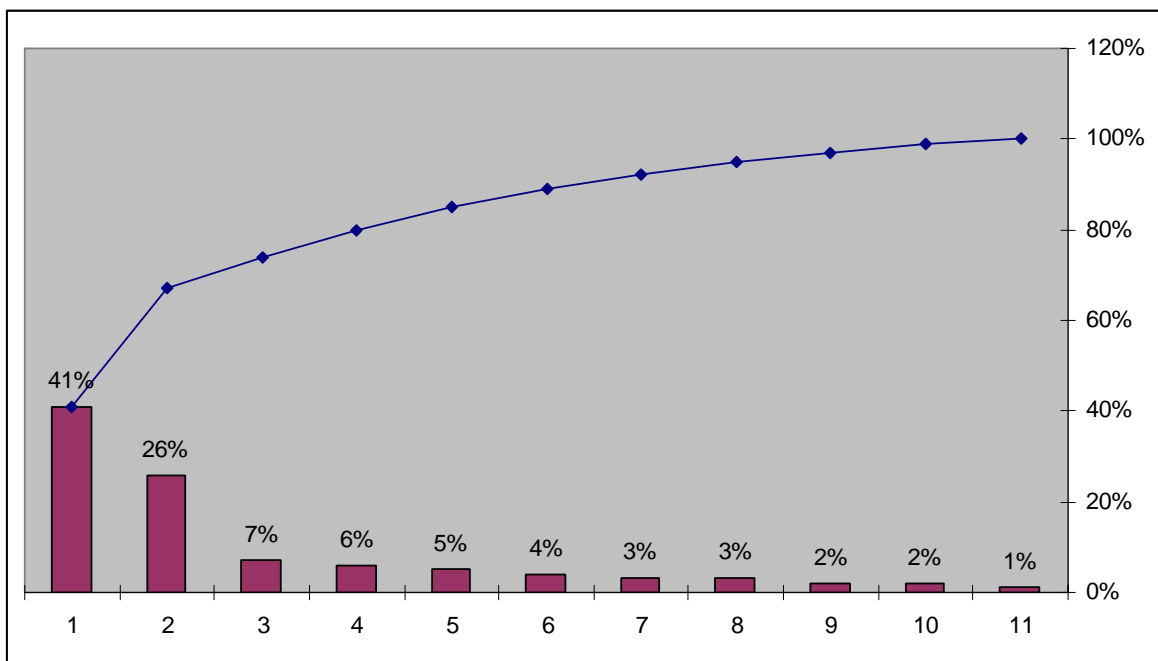
La cuantificación de los valores de la gráfica se hace mediante la aplicación de la teoría del *Costo Exergético* presentada en (Valero-89) y (Valero-00) e implementada en (Bonilla-06).

El análisis termoeconómico se realiza teniendo en cuenta las conexiones entre el método exergético, los principios de la termodinámica y las siguientes proposiciones:

- 1- En todo proceso reversible, la exergía se conserva.
- 2- Todo proceso irreversible implica pérdida de exergía, esto es, la transformación de exergía en anergia o destrucción de exergía.
- 3- Un proceso es tanto más irreversible, cuánto más exergía transforme en anergia.

Seguidamente, se debe realizar la evaluación económica y establecer un criterio para identificar las prioridades para la implementación del programa de URE. Para ello se propone utilizar el *Principio de Pareto*, que se describe a continuación.

☑ *El Principio de Pareto* parte de la consideración de que el 80% de los recursos se consumen en el 20% de los procesos. Esto permite clasificar los problemas *muy* importantes de los *menos* importantes: Se puede representar a través de un gráfico de barras verticales que los separa, estableciendo un orden de prioridades. Si existen por ejemplo los procesos de la figura 4.1; en cada uno de ellos existen posibilidades de ahorro de energía (con ayuda del Principio de Pareto se identifican y priorizan los problemas más influyentes (ver figura 4.6). En el anexo C se presenta un ejemplo de aplicación.



**Figura 4.6.** Diagrama de Pareto

A partir del diagrama se realiza el análisis de eficiencia exergética, costos de irreversibilidades, ineficiencia, diferencia de costo relativo y coeficiente de ineficiencia para plantear los proyectos.

### 4.5.3 Fase 3: Elaboración de programa URE

- ☑ *Identificación de proyectos*<sup>4</sup>: Con base en el diagrama de Pareto se identifican los proyectos a evaluar acorde con las políticas de la empresa.
- ☑ *Propuesta de inversión*: Cada proyecto se somete a las evaluaciones correspondientes de acuerdo con los criterios y estrategias empresariales (financiera, económica, social y ambiental) indicando la respectiva implementación y periodo de recuperación de la inversión.
- ☑ *Evaluación financiera*: En esta etapa se efectúan las evaluaciones correspondientes (como se nominó en el punto anterior) especificando los tiempos máximos de recuperación de capital. Esto permite determinar una programación detallada de la inversión. Entre los objetivos de largo plazo, se deben tener en cuenta:
  - Expansión de la empresa.
  - Reemplazo de equipos.
  - Fuentes de abastecimiento.
  - Otros recursos.

La evaluación debe incluir las posibilidades de financiación y apalancamiento como utilidades retenidas, capital social o pasivo garantizado.

Las técnicas y procedimientos que se deben seguir para formular y evaluar decisiones de este tipo a partir de la importancia de los proyectos, entre otras, pueden ser:

---

<sup>4</sup> EL término *proyecto* involucra una secuencia de tareas que se inicia con la definición y delimitación de una jerarquía de objetivos interrelacionados en una cadena medio-fin. Incluye la formulación y evaluación de diversas alternativas, la gestión de la misma y sólo se considera “terminado” con una evaluación ex post, cuyas conclusiones deben servir para alimentar la definición y ejecución de proyectos futuros. Este conjunto de actividades es comúnmente denominado “el ciclo del proyecto” (Mokate-04).

*Identificación de propuestas con los objetivos a largo plazo.* Esta actividad requiere una definición y una descripción completa de los objetivos y de las propuestas.

*Establecimiento de metas* y señales indicadoras de inversión (monto posible a realizar) como base de orientación.

*Proceso de evaluación y aprobación de propuestas,* esta actividad implica la posibilidad y validez técnica de los proyectos; la experiencia mercantil y el análisis de los resultados esperados.

La evaluación técnica se hace bajo la revisión por los departamentos de la empresa encargados de emitir los conceptos correspondientes o, si es el caso, por empresa externa.

Una vez realizado lo anterior, se realiza la evaluación (económica, financiera y social) para seleccionar o rechazar propuestas.

- ☑ *Análisis de la rentabilidad:* Esta actividad permite revisar la productividad de los fondos comprometidos en la ejecución de un proyecto desde el punto de vista del análisis a largo plazo de la empresa, para garantizar su permanencia y crecimiento, y por ende, el aumento de su valor (García-99).
- ☑ *Evaluación económica:* Tiene la perspectiva de la sociedad o la nación, como colectividad. Indaga sobre el aporte que hace el proyecto al bienestar socioeconómico nacional. Así, por definición, la evaluación está juzgando el proyecto según su aporte al objetivo de contribuir al bienestar de la colectividad nacional.
- ☑ *Evaluación social:* Analiza el aporte neto del proyecto al bienestar socioeconómico, pero además asigna una prima a los impactos del proyecto que modifican la distribución de ingresos y riquezas. Esta evaluación analiza el

aporte del proyecto al objetivo de aumentar el empleo y mejorar la equidad distributiva.

La naturaleza del proyecto y los objetivos de sus inversionistas y ejecutores definirán la relevancia de cada tipo de evaluación. Para los proyectos realizados por inversionistas del sector privado, podría esperarse que la única evaluación tenida en cuenta para la toma de decisiones sea la evaluación financiera, ya que el objetivo de los ejecutores se relaciona con la maximización de ganancias particulares. En contraste, si el proyecto propuesto es realizado por el sector público, es posible que el objetivo que motive la realización del proyecto no se relacione con la rentabilidad de la inversión, sino que busque satisfacer alguna necesidad de la comunidad o hacer un aporte al bienestar colectivo.

Un proyecto se descarta si no se obtiene un resultado favorable de las evaluaciones relevantes, después de haber analizado las diferentes alternativas de diseño y las modificaciones generadas por el propio proceso de preparación y evaluación. El proyecto que arroja un resultado positivo en las evaluaciones relevantes se compara con las otras alternativas de inversión, con el fin de seleccionar la mejor. Así, la evaluación apoya y contribuye al proceso de toma de decisiones, con el fin de participar en una mejor utilización de recursos y en cumplimiento de los objetivos de los inversionistas o ejecutores (Mokate-04).

#### **4.5.4 Fase 4. Implementación de Programa URE**

En esta etapa se ejecutan los proyectos que han sido aprobados por la empresa para formar parte integral del Programa URE. La duración de esta etapa varía de una empresa a otra, ya que depende del programa de inversión de la empresa y la forma de financiación.

#### **4.5.5 Fase 5. Centros de control exergético**

Los elementos básicos de una metodología de gestión exergética dependen del tipo de organización, de la estructura administrativa, del manejo de los energéticos, de

los programas de auditoría exergética, no obstante para lograr éxito en la implementación se requiere de la implementación de un programa de control de objetivos.

☑ *Gestión por objetivos*: es un modelo de administración a través del cual los gerentes de una empresa establecen metas para sus áreas de responsabilidad.

El *Objetivo* es un enunciado escrito de los resultados a alcanzar en un período determinado y debe ser:

- Cuantificable
- Alcanzable
- Pertinente
- Compatible

Los objetivos deben orientar el desempeño de los gerentes hacia un resultado medible.

En la figura 4.7 se muestra un esquema general de la Gestión por Objetivos. En (Rojas y otros-01) se puede observar en detalle esta metodología, la cual conduce a realizar una vigilancia de cada uno de los proyectos implementados y los objetivos que se proponen.



**Figura 4.7.** Ciclo de la gestión por objetivos

Dentro de la empresa se deben establecer objetivos específicos para cada cargo de dirección. Entre los objetivos a incluir pueden estar los siguientes:

- ✓ Establecimiento conjunto de objetivos entre el gerente general y el gerente del área.
- ✓ Establecimiento de objetivos para cada departamento o posición.
- ✓ Interrelación de los objetivos departamentales.
- ✓ Énfasis en la medición y control de los resultados.
- ✓ Evaluación, revisión y modificación continua de los planes.
- ✓ Participación activa de los ejecutivos.

✓ Apoyo constante de la dirección.

#### 4.5.5.1 Técnicas de control por objetivos

*Objetivo fijo:* es un nivel fijo de consumo para la comparación (kWh/semana o kWh/mes). Esto asume que, en ausencia de problemas que causen un consumo anormal, la cantidad de energía consumida durante un periodo de tiempo definido no debe cambiar. Dicha medición debe ser apropiada para medir el consumo real de electricidad de cada proceso. Una variación de esto es permitir variaciones según factores climáticos con los que se espera que el consumo de energía varíe.

*Proporción simple:* donde se considera que el consumo de energía es directamente proporcional a una variable, una proporción simple puede ser suficiente como un medio de comparar el uso de energía real contra su valor normal. Esta medida puede ser apropiada para un uso de energía donde no se esperarían cambios significativos en los niveles de eficiencia al variar la carga de un sistema.

*Regresión según carga base:* tiene la forma de una ecuación de la línea recta, ver ecuación 4.1.

$$y = (m)(x) + c \quad (4.1)$$

Donde  $y$  y  $x$  son los componentes de ambos ejes coordenados,  $m$  es la pendiente y  $c$  el intercepto. En la práctica, un ejemplo puede ser:

$$\text{Gas (kWh)} = (m(\text{kWh/Ton}))(\text{producción (Ton)}) + \text{carga base (kWh)}$$

Esta regresión según la carga base es la comparación más utilizada en los sistemas de control por objetivos.

Por su parte, un indicador de desempeño es una comparación del consumo de energía contra una medida esperada. Un indicador de desempeño normalizado es un indicador de comportamiento que se ha ajustado de forma que tenga en cuenta diferentes circunstancias de uso de energía y en diferentes sitios.

Los consumos medidos pueden ser comparados en algunos casos con cantidades facturadas y el costo unitario de los combustibles y la electricidad pueden calculados en \$/kJ o \$/kWh. También el consumo mensual de los combustibles y la electricidad pueden ser registrados y comparados con los valores esperados bajos condiciones temporales predominantes (Rojas y otros-01).

# Capítulo 5

## Implementación de la auditoría exergética a una línea de proceso del sector autopartista

### 5.1 Introducción

La termoeconomía ha sido una herramienta implementada para evaluar la eficiencia y el costo de los productos en procesos térmicos y flujos continuos. Este proyecto se caracteriza porque el proceso que se analiza no presenta ninguna de las dos consideraciones mencionadas.

Aquí se implementa la teoría del costo exergético (enfoque metodológico de la termoeconomía) en una línea de producto del sector autopartista.

### 5.2. Recolección de información

Se recolectó información básica de la empresa y de los servicios que utiliza y ofrece. A continuación se presentan algunas características generales.

#### ☑ Descripción de la PyME

***Industria de Cauchos Records Ltda*** es una empresa manufacturera que tiene por objeto social brindarle a la comunidad, pero en especial a todos aquellos propietarios de automóviles y vehículos de carga pesada, autopartes que combinan calidad, buen precio y una propuesta de valor para el cliente.

✓ **Misión:** Industrias de Cauchos Record Ltda., es una empresa privada, dedicada a la fabricación de soportes en caucho- metal para toda clase de

vehículos y la industria en general, con objetivos claros y en función del mercado local, siempre bajo los más estrictos principios éticos y legales.

- ✓ **Visión:** Industrias de Cauchos Record Ltda., será una empresa con crecimiento sostenido, comprometidas especialmente en un mejoramiento continuo en sus procesos productivos para seguir ofreciendo sus productos con valor agregado.
- ☑ **Productos que ofrece:** La producción se enfoca principalmente a la fabricación de los productos de la tabla 5.1.

LÍNEAS		
PRODUCTOS	Reanult	MAZDA
	Buje Tensor de Dirección (Zanahoria)	Buje Inferior Tijera
	Buje Barra Estabilizadora (Puntas)	Soporte Caja
	Soporte Exhosto	Soportes para el Motor
	Caucho Barra Estabilizadora (Central)	Soportes para el Amortiguador
	Soporte Caja	

LÍNEAS			
PRODUCTOS	CHEVROLET	TRAILER	FORD
	Caucho Barra Estabilizadora (Camioneta)	Media luna trailer	Soportes para el Motor
	Caucho Purificador	Soporte Trailer	Manguera Turbo
	Soporte Delantero y Trasero para la cabina		Caucho Purificador Aire
	Caucho Liga Exhosto		

**Tabla 5.1** Productos fabricados

- ☑ **Descripción general del proceso productivo:** Los productos fabricados (más de cincuenta) son de tres tipos: acero 100%, caucho 100 % y acero – caucho. Existe más de veinte líneas de procesos, para el caso de esta propuesta se implementó en una de esas líneas (Kodiak).
- ☑ **Consumo de energía:** Para la medición de la energía eléctrica, la empresa cuenta con cuatro medidores de energía eléctrica (cuatro acometidas) con tarifa comercial. En la tabla 5.2 se muestra detalle del consumo y el costo de la energía eléctrica consumida promedio de los últimos tres meses (julio, agosto y septiembre, año 2006).

Contador	Carga Contratada (kW)	Consumo promedio (kW)	Costo consumo (\$)	Costo alumbrado (\$)	Contribución (\$)	Total (\$)
1	16,60	0,62	169 959,00	25 371,00	33 828,00	229 158,00
2	23,50	1,29	352 447,00	55 440,00	73 920,00	481 807,00
3	11,50	1,51	412 096,00	21 353,00	85 414,00	518 863,00
4	57,60	2,64	718 784,00	39 561,00	158 244,00	916 589,00
Total	109,20	6,07	1 653 86,00	141 725,00	351 406,00	2 146 417,00

**Estrato:** Comercial                      **Tarifa:** 210 Comercial                      **Precio:** 272,37 \$ kWh  
**Circuito:** 20503 Circuito Norte   **Subestación:** Norte                      **Nivel:** 1

**Tabla 5.2.** Consumo de energía eléctrica mensual

La medición del gas natural se realiza a través de un medidor. En la tabla 5.3 se muestra el resumen del consumo y costo unitario por metro cúbico.

<b>Estrato</b>	3	<b>Concepto</b>	
<b>Servicio</b>	Comercial	<b>Cargo fijo (\$)</b>	1 527,00
<b>Factor</b>	1 030,00	<b>Contribución (\$)</b>	136,00
<b>Consumo leído (m<sup>3</sup>)</b>	2 813,00	<b>Consumo (\$)</b>	1 643 961,00
<b>Consumo neto (m<sup>3</sup>)</b>	2 897,00	<b>Contribución (\$)</b>	146 313,00
<b>Código de Ruta</b>	02-BGT026300	<b>Ajuste (\$)</b>	3,00
<b>Precio m<sup>3</sup> (\$)</b>	584,42	<b>Total</b>	1 791 940,00

**Tabla 5.3.** Consumo de gas natural mensual

En la tabla 5.4 se muestra el porcentaje de consumo de energía eléctrica y el de gas natural con el fin de observar el impacto relativo en los costos.

Energía Eléctrica	\$ 2 146 417	48,27%
Gas Natural	\$ 1 791 940	40,30%
Agua	\$ 507 836	11,42%
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 4 446 193</b>	<b>100,00%</b>

**Tabla 5.4.** Porcentaje de consumo de los servicios públicos

**Inventario de maquinaria:** En las tablas 5.5 y 5.6 se muestran los equipos y elementos eléctricos presentes.

<b>Máquina</b>	<b>Tensión (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Fases</b>	<b>Potencia (HP)</b>
Esmeril	220	2,80	3Φ	1,000
Taladro - Fujian Dong Fang	220	8,20	3Φ	3,000
Taladro - Startrite Engineering Co.	220	-	3Φ	-
Compresor - Doerr Emerson Electric	240	15,0	3Φ	5,000
Torno - Schindler Luzern	220	10,4	3Φ	3,200
	380	0,60	3Φ	0,250
Torno - Brever Werke	380	11,8	3Φ	5,500
	220	1,00	3Φ	0,250
Torno - Jumbo	220	21,0	3Φ	6,500
	220	0,50	3Φ	0,125
Torno - Ramco Machinery IMOCN	220	6,00	3Φ	2,000
	220	0,30	3Φ	0,125
Troqueladora - Baldor Industrial	230	14,0	3Φ	5,000
Caldera - Motor 1 General Electric	220	14,0	3Φ	5,000
Caldera - Motor 2 D5728	220	14,8	3Φ	5,500
Motor - Aceite hidráulico Siemens	220	24,2	3Φ	9,000
Molino - CEM Cuiracem	440	34,0	3Φ	25,00
Tambor	220	3,80	3Φ	1,400
<b>Ventilador - Siemens</b>	110	3,50	3Φ	0,250

**Tabla 5.5.** Valores nominales de la maquinaria existente

<b>Área o proceso</b>	<b>Potencia (kW)</b>
Torneado	39,2
Troquelado	15,0
Tamboreado	1,80
Molida	18,5
Cortado	0,40
Esmerilado	0,80
Soldado	90,0
Vulcanizado	0,80
Climatizado	4,60
Alumbrado	5,70
Oficina	2,70
<b>Total</b>	<b>223,50</b>

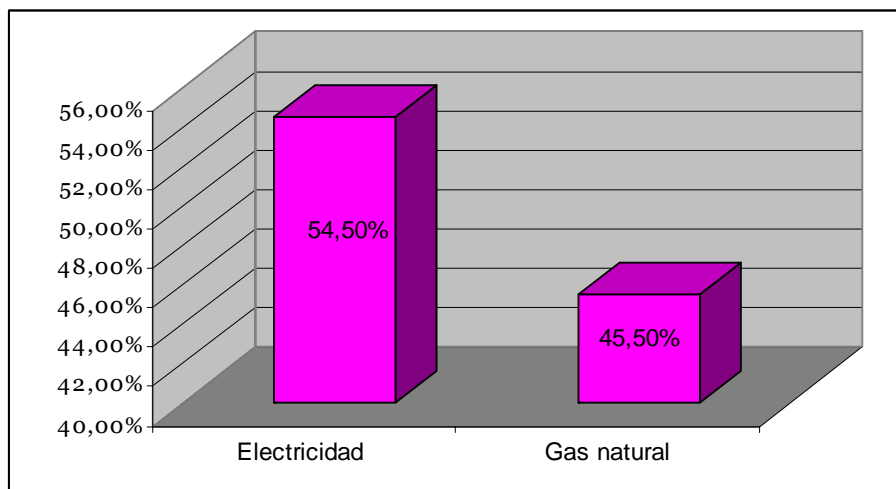
**Tabla 5.6.** Inventario de equipos eléctricos

### 5.3 Análisis de la información:

*Uso de energía en el proceso:* La energía eléctrica se utiliza en los procesos de torneado, esmerilado, soldado, troquelado, molinado, y paralelamente en los procesos de vulcanizado, tamboreado, cortado y zincado. Las máquinas de funcionamiento eléctrico en estos procesos son motores. También se incluyen en el consumo eléctrico los servicios de alumbrado, ventilación y climatización, y los de oficina. La mayor parte de la iluminación es fluorescente, el resto es incandescente, los ventiladores, extractores, el aire acondicionado y los computadores conforman el resto.

El gas natural se utiliza en el vulcanizado (a alta temperaturas y requiere el uso de dos generadores de aceite caliente) y en el templado en los hornos.

En la figura 5.1 se muestra el porcentaje de consumo de los servicios energéticos, energía eléctrica y gas natural. Allí se observan que la energía eléctrica representa el 54,5% de un total de \$3 938 357. Como ambos insumos son de marcada importancia para la empresa y la diferencia es escasa, el análisis se debe realizar con igual ponderación.



**Figura 5.1.** Consumo porcentual de energía

*Observaciones:* De esta etapa de prediagnóstico se concluye lo siguiente:

- No existen características registradas de las máquinas.
- No se planea el crecimiento de la planta con nuevas máquinas.
- No hay una distribución de planta acorde con los procesos.
- Las instalaciones eléctricas no cumplen con los requerimientos de la normatividad colombiana.
- No existe una política energética.
- Existe un interés para realizar cambios en cuanto al uso racional y eficiente de la energía, pero no se traduce en acciones concretas o decididas.
- La iluminación no está distribuida uniformemente.
- En las vulcanizadoras la pérdida de calor es muy alta.
- Los generadores de aceite caliente, parte esencial en el área del vulcanizado no están técnicamente dimensionados.
- La climatización en algunas áreas es deficiente (vulcanizado, molienda de caucho y aledaños).
- La ventilación en la zona de molienda de caucho es mínima, la concentración de partículas en este recinto es alta.
- En la zona de tratamientos químicos, los olores son fuertes. Son tanques en un punto de obligado tránsito. Los vapores emanados no son controlados y no se conocen las consecuencias en la salud de los empleados.
- No existen normas de seguridad expresas o por lo menos no se practican.

- No existe una política o estrategia de mantenimiento preventivo.
- El conocimiento de la energía consumida en cada proceso y área de trabajo es desconocido.
- Se debe realizar una auditoría exergética.

## **5.4 Auditoría Exergética**

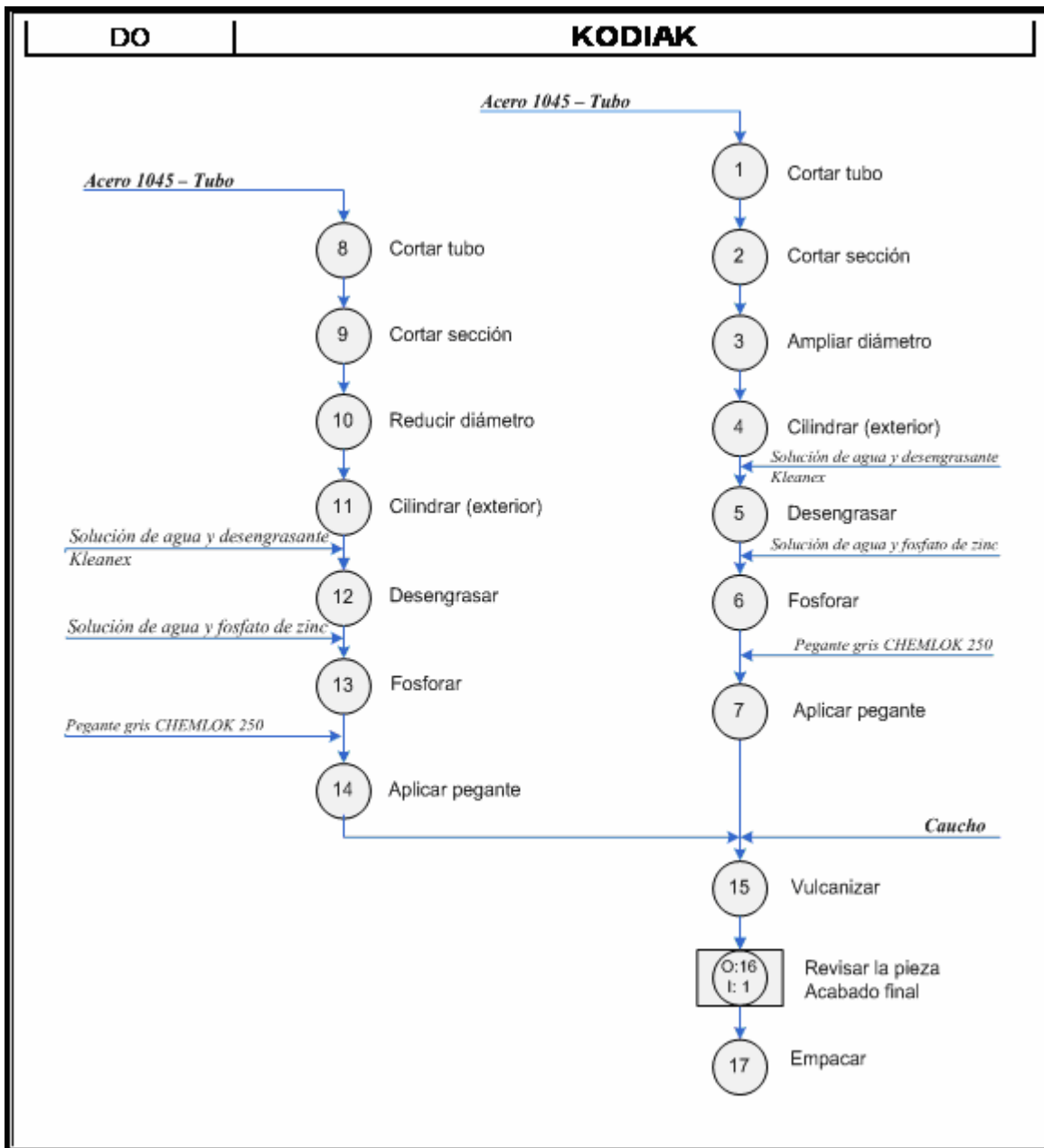
**5.4.1 Planeación de la Auditoría Exergética:** El primer paso en cualquier ejercicio termoeconómico es analizar el diagrama del proceso, con los datos operativos proporcionados y enumerar tanto equipos como flujos.

Aquí se estableció la línea de producto a analizar, sujeta a la programación de la empresa y ésta a las necesidades de los clientes.

A continuación se presentan las actividades realizadas:

- ✓ Levantamiento de los procesos.
- ✓ Elaboración de los diagramas de cada uno de los procesos.
- ✓ Identificación de los flujos con posibilidad de medición.
- ✓ Programación de toma de medidas de las variables identificadas en cada uno de los flujos.

**5.4.2 Modelo del proceso:** El proceso seleccionado es el correspondiente a la producción del “Kodiak”, el cual es un repuesto que se utiliza para automóviles Renault, en la figura 5.2 se muestra el diagrama de flujo del proceso de la línea del producto. Consta de dos entradas para obtener un único producto. La materia prima son dos tubos de acero, la empresa los adquiere en el mercado y los transforma.



**Figura 5.2.** Diagrama de la línea del proceso KODIAK

**5.4.3 Identificación de los flujos de exergía:** En esta etapa se identificaron e inspeccionaron los flujos de exergía presentes en la línea de producto. En la tabla 5.7 se detalla cada uno de ellos.

INDUSTRIA AUTOPARTISTA											
INFORMACIÓN DEL PROCESO PARA LA REALIZACIÓN DE LOS MODELOS EXERGÉTICOS											
REFERENCIA:		10 – QK – 368				RESUMEN					
FECHA:		03 DE ABRIL 2006				OPERACIONES			17		
MÉTODO:		ACTUAL				INSPECCIONES			1		
						TOTAL			18		

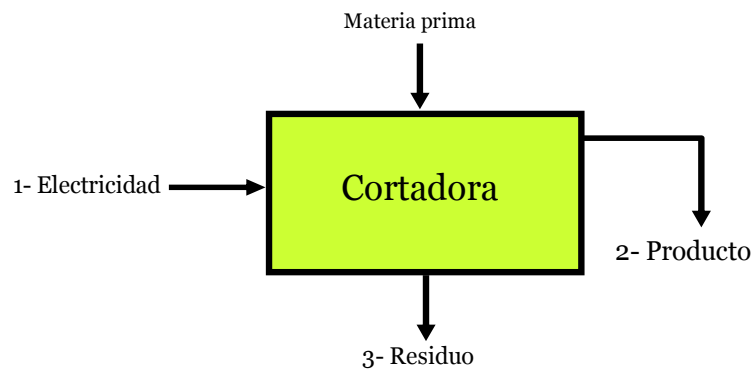
Nº	O	I	CONCEPTO	EQUIPO	PRESENTES						MODELOS EXERGÉTICOS			
					G	E	K	P	W	Q	SI	NO	MODELO	
1	X		Cortar tubo	Cortadora		X			X	X	X			Cortadora
2	X		Cortar sección	Torno		X		X	X	X	X			Torno
3	X		Ampliar diámetro	Troqueladora 1		X	X	X	X	X	X			Troqueladora
4	X		Cilindrar	Torno		X		X	X	X	X			Torno
5	X		Desengrasar	Tanque de desengrase	X					X	X			Tanque
6	X		Fosforar	Tanque de fosforado	X					X	X			Tanque
7	X		Aplicar pegante	Tarea manual					X				X	-
8	X		Cortar tubo	Cortadora		X			X	X	X			Cortadora
9	X		Cortar sección	Torno		X		X	X	X	X			Torno
10	X		Reducir diámetro	Troqueladora 2		X	X	X	X	X	X			Troqueladora
11	X		Cilindrar	Torno		X		X	X	X	X			Torno
12	X		Desengrasar	Tanque de desengrase	X					X	X			Tanque
13	X		Fosforar	Tanque de fosforado	X					X	X			Tanque
14	X		Aplicar pegante	Tarea manual					X				X	-
15	X		Vulcanizar	Vulcanizadora				X	X	X	X			Prensa
16	X		Acabado final	Tarea manual					X				X	-
1		X	Revisar la pieza	Tarea manual					X				X	-
17	X		Empacar	Tarea manual					X				X	-
			E: Energía eléctrica						P: Energía potencial					
			G: Gas						W:					
			K: Energía cinética						Q: Calor					

Nº	Partes	Insumo - MP	Operaciones requeridas	Descripción
1	CILINDRO	Tubo	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	Cilindro exterior. PARTE PRINCIPAL
2	CILINDRO	Tubo	8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	Cilindro interior.
3	CAUCHO	CAUCHO		Material entre los cilindros que las cohesiona.

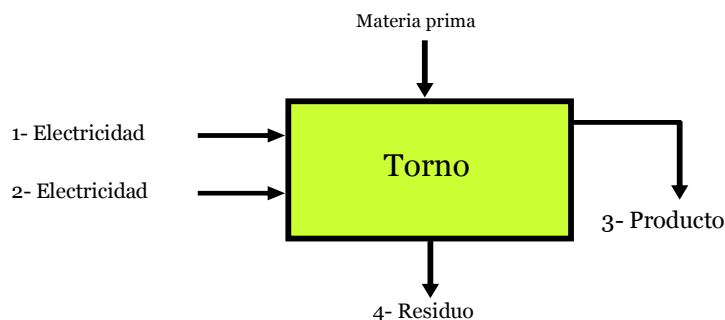
**Tabla 5.7.** Flujos identificados en el proceso de la figura 5.2

- ☑ **Identificación de los insumos, productos y residuos:** Acorde con el propósito de cada máquina se definen los flujos en cada una de ellas. En las figuras 5.4 a 5.8 se detalla lo mencionado para las máquinas que pertenecen a la línea de producto analizada. Teniendo en cuenta que los flujos de entrada son insumos y los de salida corresponden al producto y/o residuos, dependiendo del caso.
- ✓ **Cortadora:** Se aplica a tubos macizos o huecos, o a barras cilíndricas de acero. Allí se efectúan cortes sobre los componentes de un repuesto, ver figura 5.3.



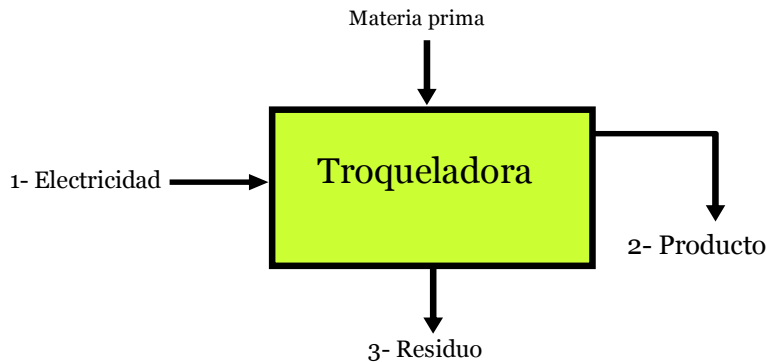
**Figura 5.3.** Flujos identificados en la cortadora

- ✓ **Torneado:** Se aplica a tubos (macizos o huecos) o a barras cilíndricas de acero. Allí se efectúan perforaciones sobre los componentes de un repuesto, ver figura 5.10.



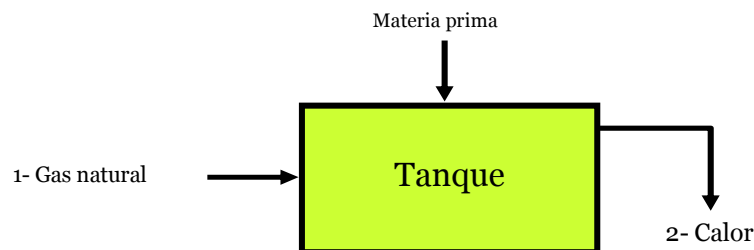
**Figura 5.4.** Flujos identificados en el torno

- ✓ **Troquelado:** Consiste en efectuar diferentes operaciones de manera secuencial para darle a esos tramos unas normas definidas a través de cortes, perforaciones, embutidos y doblados, ver figura 5.5.



**Figura 5.5.** Flujos identificados en la troqueladora

- ✓ **Desengrase:** cuando los tramos de lámina y los tubos salen de troquelado y torneado están impregnados de grasa y aceite y se someten a un proceso de limpieza con un tratamiento para metales y agua a altas temperaturas, ver figura 5.6.



**Figura 5.6.** Flujos identificados en el tanque

- ✓ **Fosforado:** como la gran mayoría de los repuestos fabricados tienen componentes metálicos se hace necesario someterlos a un proceso que retarde la oxidación de los mismos a lo largo de su vida útil, este proceso consiste en dejar las piezas en agua y fosfato de Zinc pesado a altas temperaturas, ver figura 5.7.
- ✓ **Vulcanizado:** Es el último proceso de la línea de producción. Generalmente se trata de introducir pedazos de caucho en los moldes para que las vulcanizadoras

hagan que se adhieran a los repuestos, en la figura 5.7 se muestran los flujos existentes.

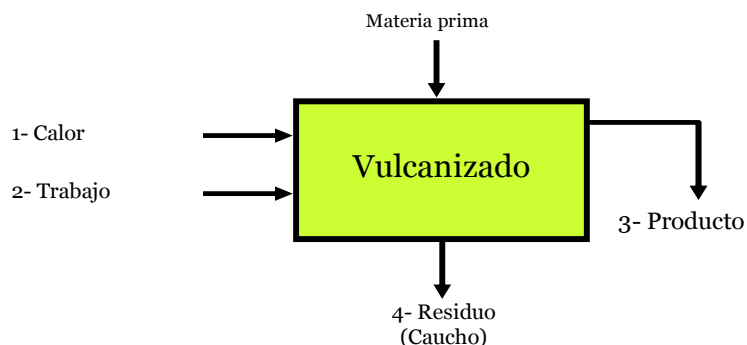


Figura 5.7. Flujos identificados en la vulcanizadora

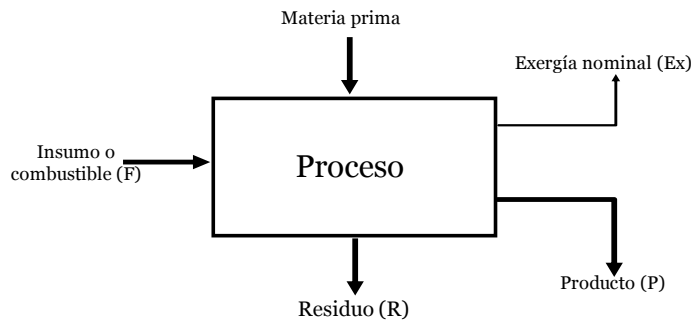
#### 5.4.4 Diagnóstico exergetico

☑ **Balance Exergetico:** En la tabla 5.8 se muestran los valores de las exergetias de cada uno de los flujos identificados. Para mejor comprension todos se expresan en kWh.

Equipo	Flujos	B (kWh)
1-Cortadora	1- Electricidad	$9,17 \times 10^{-6}$
	2- Producto	$7,54 \times 10^{-6}$
2- Torno Jumbo	1- Electricidad	0,03632
	2- Electricidad	0,00217
	3- Materia prima	$7,54 \times 10^{-6}$
3- Troqueladora	4- Producto	0,007306
	1- Electricidad	$45,2 \times 10^{-6}$
	2- Materia prima	0,007306
4- Torno Paralelo	3- Producto	0,012553
	1- Electricidad	0,09889
	2- Electricidad	0,004694
5- Tanque de desengrase	3- Materia prima	0,012553
	4- Producto	0,011644
	1- Gas natural	0,039889
6- Tanque de fosforado	2- Calor	0,007222
	3- Materia prima	0,011644
	1- Gas natural	0,059833
7-Cortadora	2- Calor	0,07222
	3- Materia prima	0,011644
	1- Electricidad	$6,14 \times 10^{-6}$
8- Torno Jumbo	2- Producto	$5,07 \times 10^{-6}$
	1- Electricidad	$0,033 \times 10^{-6}$
	2- Electricidad	0,020472
	3- Materia prima	$5,07 \times 10^{-6}$
9- Troqueladora	4- Producto	0,06086
	1- Electricidad	$0,012 \times 10^{-6}$
	2- Materia prima	$5,07 \times 10^{-6}$
10- Torno Paralelo	3- Producto	0,0042778
	1- Electricidad	0,089167
	2- Electricidad	0,004028
	2- Materia prima	$5,07 \times 10^{-6}$
11- Tanque de desengrase	4- Producto	0,096111
	1- Gas natural	0,039889
	2- Calor	0,007722
12- Tanque de fosforado	3- Materia prima	0,096111
	1- Gas natural	0,059833
	2- Calor	0,007 722
13- Vulcanizadora	3- Materia prima	0,096111
	1- Calor	0,270694
	2- Trabajo	0,055000
	2- Materia prima	0,011649
	4- Producto	0,006028

Tabla 5.8. Exergetia de los flujos

- ☑ Eficiencia y costo exergético:** Para la evaluación de los costos de los productos, se requiere establecer los valores de entrada al sistema (los combustibles) y proyectar esos valores en los productos hasta encontrar sus propios costos exergéticos. El proceso se inicia mediante el cálculo de la eficiencia exergética y el costo exergético de los flujos de las máquinas, respectivamente, ver ecuaciones 5.1 y 5.2 acorde a la figura 5.8.



**Figura 5.8.** Proceso general

$$\eta_{Ex} = \frac{P}{Ex} \quad (5.1)$$

Donde:  $\eta_{Ex}$  es la eficiencia exergética, adimensional

$P$  es el producto, en unidades de energía; para este caso en kWh.

$Ex$  es la exergía nominal del equipo, en unidades de energía; en kWh

$$k = \frac{1}{\eta_{Ex}} \quad (5.2)$$

Donde:  $k$  es el costo exergético, es adimensional.

En la tabla 5.9 se presenta para cada una de las máquinas, el cálculo de la eficiencia exergética, y el costo exergético de cada flujo.

Equipo	$\eta_{Ex} = \frac{P}{Ex}$	$k = \frac{1}{\eta_{Ex}}$	Equipo	$\eta_{Ex} = \frac{P}{Ex}$	$k = \frac{1}{\eta_{Ex}}$
1-Cortadora	0,000063	15915,12	7-Cortadora	0,000042	23668,63
2- Torno	0,006212	160,9636	8- Torno	0,0051752	193,2304
3- Troqueladora	0,002789	358,4800	9- Troqueladora	0,000951	1051,943
4- Torno	0,000994	1009,962	10- Torno	0,008172	122,3585
5- Tanque de desengrase	0,1810524	5,523263	11- Tanque de desengrase	0,19359	5,16548
6- Tanque de fosforado	0,1207026	8,284824	12- Tanque de fosforado	0,12906	7,74821
			13- Vulcanizadora	0,0251167	39,81420

**Tabla 5.9.** Eficiencia exergética y costo exergético

- ✓ *Cálculo de irreversibilidad:* se muestra el cálculo para el torno (proceso 10), los demás se realizan de igual forma.

Primero, se obtiene la matriz de incidencia (**A**) por inspección. Esta representa la presencia de los flujos en las máquinas, para el caso del torno se obtuvo la fila presentada en la ecuación 5.3.

$$[A] = [1 \ 1 \ -1] \quad (5.3)$$

Segundo, se obtiene el vector de costos exergéticos, ver el vector en la expresión 5.4.

$$[B] = [ \begin{matrix} 7,54 \times 10^{-6} \\ 0,03849 \\ 0,00731 \end{matrix} ] \text{ kWh} \quad (5.4)$$

Tercero, se obtiene el valor de las irreversibilidades, con base en la ecuación 5.5.

$$I = [A] \times [B] \quad (5.5)$$

$$I = 0,03118 \text{ kWh}$$

- ✓ *Cálculo de los Costos Exergéticos:* a continuación se muestran los pasos para estimar los Costos Exergéticos, donde [Aa] es la matriz aumentada, el vector [B\*] es el vector de costos y el vector [B] corresponde a los flujos de exergía, en el Anexo F se detalla el procedimiento termoeconómico.

$$[Aa] \times [B^*] = [B]$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1^* \\ B_2^* \\ B_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

$$B_1^* + B_2^* - B_3^* = 0$$

$$B_2^* = B_2; B_1^* = B_1$$

$$B_1^* + B_2^* = B_3^*$$

$$B_1^* = 0,03849; B_2^* = 7,54 \times 10^{-6} \text{ y } B_3^* = 0,03850$$

- ✓ *Cálculo de los Costos Unitario ( $K^*$ ):* es la razón entre el costo exerético y el flujo de exergía propio del flujo en análisis.

$$K_1^* = \frac{B_1^*}{B_1} = 1$$

$$K_2^* = \frac{B_2^*}{B_2} = \frac{7,54 \times 10^{-6}}{7,54 \times 10^{-6}} = 1$$

$$K_3^* = \frac{B_3^*}{B_3} = \frac{0,03850}{0,00731} = 5,26676$$

En la tabla 5.10 se muestran los valores de costos exeréticos, costos unitarios e irreversibilidades.

Equipo		$B^* (kWh)$	$K^* (tpu)$	$I (kWh)$
1-Cortadora	1-	$9,17 \times 10^{-6}$	1,0000	0,00000
	2-	$9,17 \times 10^{-6}$	1,2162	
2- Torno Jumbo	1-	0,03849	1,0000	0,34650
	2-	$7,54 \times 10^{-6}$	1,0000	
	3-	0,03850	5,2668	
3- Troqueladora	1-	$45,2 \times 10^{-6}$	1,0000	0,00000
	2-	0,007306	1,0000	
	3-	$7,3512 \times 10^{-3}$	0,5856	
4- Torno Paralelo	1-	0.103584	1,0000	0,104493
	2-	0,012553	1,0000	
	3-	0,116137	9,9740	
5- Tanque de desengrase	1-	0,039889	1,0000	0,035467
	2-	0,007222	1,0000	
	3-	0,047111	4,04595	
6- Tanque de fosforado	1-	0,059833	1,0000	0,120411
	2-	0,072222	1,0000	
	3-	0,132053	11,3408	
7-Cortadora	1-	$6,14 \times 10^{-6}$	1,0000	0,00000
	2-	$6,14 \times 10^{-6}$	0,76084	
8- Torno Jumbo	1-	0,020472	1,0000	0,016199
	2-	$5,07 \times 10^{-6}$	1,0000	
	3-	0,020477	0,33646	
9- Troqueladora	1-	$0,012 \times 10^{-6}$	1,0000	0,00000
	2-	$5,07 \times 10^{-6}$	1,0000	
	3-	$5,082 \times 10^{-6}$	$1,26 \times 10^{-3}$	
10- Torno Parelelo	1-	0,093195	1,0000	0,12272
	2-	$5,07 \times 10^{-6}$	1,0000	
	3-	0,09320	0,9697	
11- Tanque de desengrase	1-	0,039889	1,0000	0,12827
	2-	0,007722	1,0000	
	3-	0,047611	0,4954	
12- Tanque de fosforado	1-	0,059833	1,0000	0,14822
	2-	0,007 722	1,0000	
	3-	0,067556	0,7029	
13- Vulcanizadora	1-	0,32569	1,0000	0,33132
	2-	0,337343	1,0000	
	3-	0,663033	109,99	

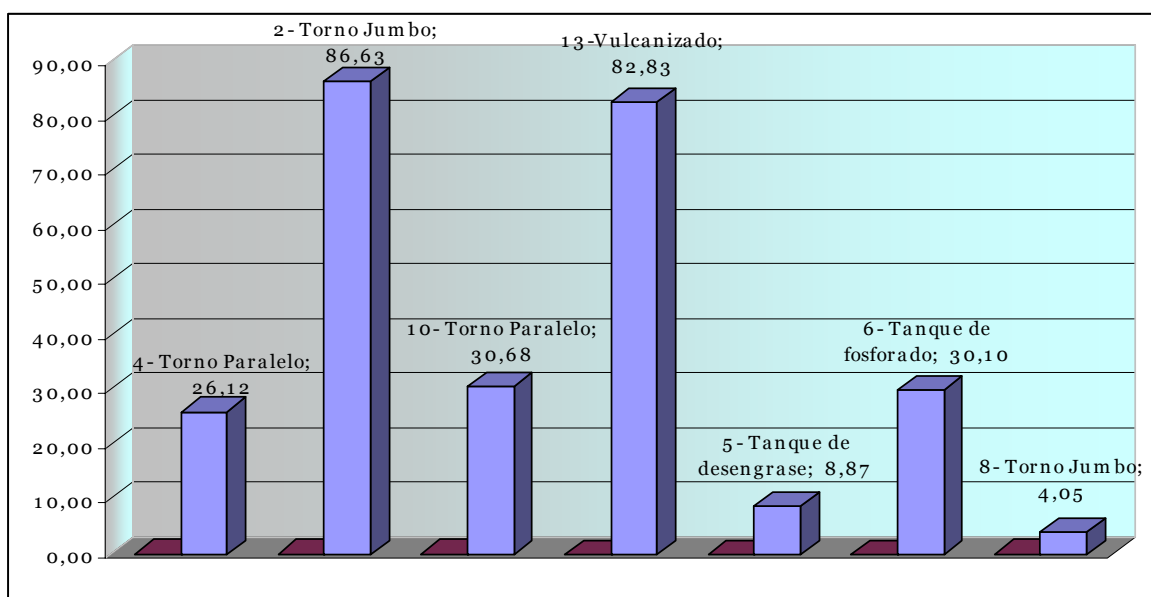
**Tabla 5.10.** Valores de costos exergético por pieza, costos unitario e irreversibilidades

- Diagrama de irreversibilidades:** Este diagrama indica la oportunidad real de ahorro de energía, teniendo en cuenta que la exergía nominal se calcula a partir de los datos nominales de cada máquina. En la tabla 5.11 se muestra el valor de las irreversibilidades que corresponde a cada una de las máquinas y de

la cual se obtiene el diagrama para visualizar una mejor idea de la oportunidad de ahorro, ver figura 5.9.

Máquina y proceso asociado	Irrev-m (kWh-anales)	Irrev- n (kWh-anales)
1- Cortadora	0,000	0,00056
2- Torno Jumbo	86,625	0,05445
3- Troqueadora	0,00000	0,02083
4- Torno Paralelo	26,123	0,05445
5- Tanque de desengrase	8,8667	-
6- Tanque de fosforado	30,102	-
7- Cortadora	0,000	0,00060
8- Torno Jumbo	4,0497	0,05445
9- Troqueadora	0,000	0,02083
10- Torno Paralelo	30,680	0,05445
11- Tanque de desengrase	32,067	-
12- Tanque de fosforado	37,055	-
13-Vulcanizado	82,830	0,00111

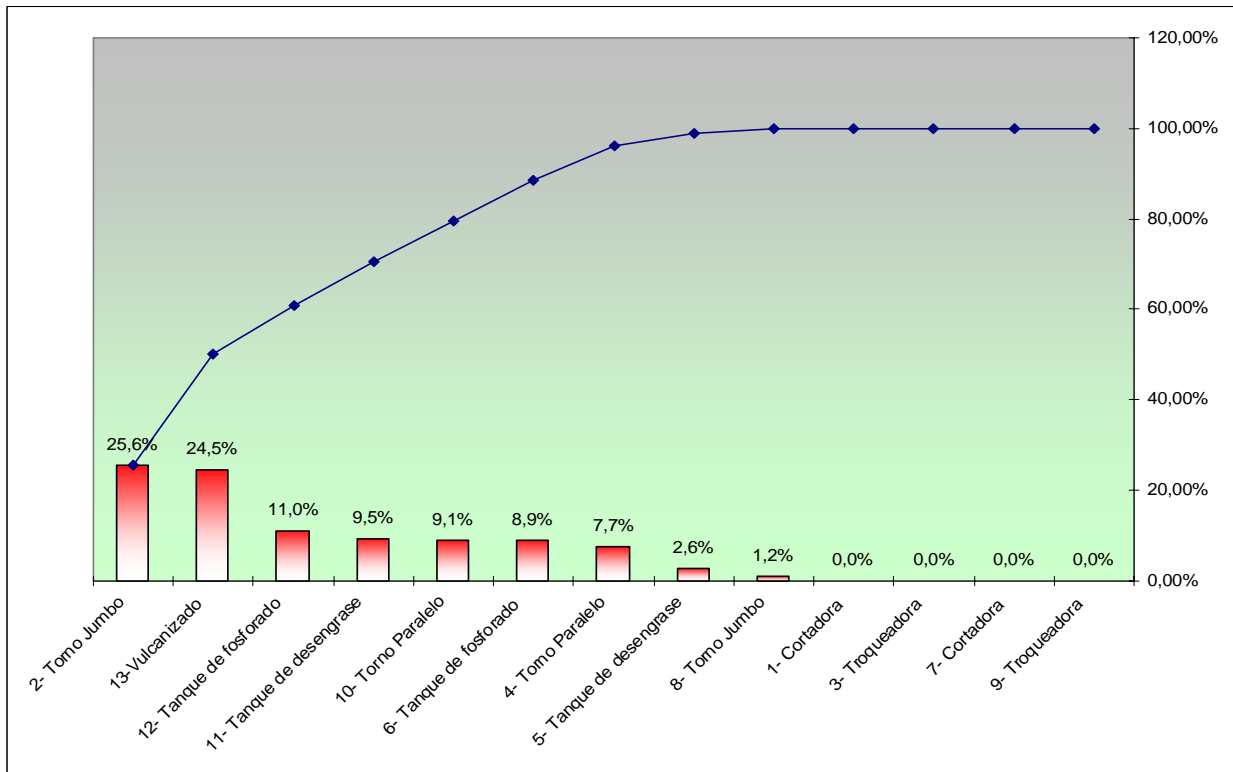
**Tabla 5.11.** Valores de irreversibilidades anuales (500 piezas)



**Figura 5.9.** Diagrama de irreversibilidades

- ☑ **Principio de Pareto:** Con base en el diagrama de Pareto y el *diagrama de irreversibilidades* se concluye que las máquinas a intervenir en orden de ahorro de energía son: la vulcanizadora, el torno y los tanques. Las cuales representan el 80% del consumo de energía y de igual forma representan los ejes para la

producción de la empresa, ver figura 5.10. Donde 13, 4, 10, 12 y 6 corresponden a los procesos presentados en la figura 5.2.



**Figura 5.10.** Diagrama de Pareto de irreversibilidades

- ☑ *Valoración económica de costos exergéticos:* para realizar la valoración de los costos exergéticos se hace necesario conocer el costo del equipo, teniendo en cuenta la depreciación, el mantenimiento y el costo del insumo consumido. En la tabla 5.12 se muestran los costos de los equipos.

La ecuación para el costo de Administración, Operación y Mantenimiento (AOM) de los equipos por unidad de tiempo, viene dada por la ecuación 5.6:

$$Z_c = (a\phi)Z_i/N \quad (5.6)$$

Donde:

- $Z_i$ : Precio de compra del equipo
- $a$ : Anualidad (se considera,  $i = 10\%$  TAE, y  $n = 20$  años)

- φ: Factor de mantenimiento  
 N: Número de horas de operación por año (se consideran 2304)

Siendo:

$$a = i(1+i)^n / ((1+i)^n - 1) \quad (5.7)$$

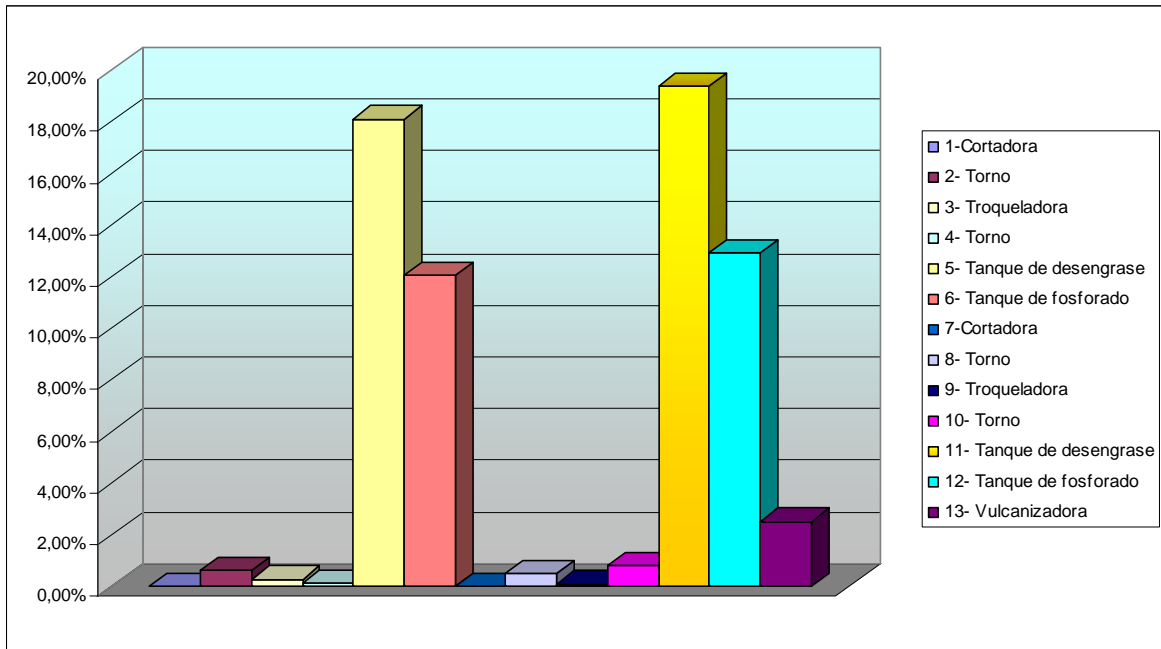
El costo del combustible se toma a partir de la facturación de consumo, ver tablas 5.4 a 5.8.

<b>Equipo</b>	<b>Z (\$)</b>	<b>Zc (\$/producción)</b>
Cortadora	9 300 000,00	55 800,00
Torno Jumbo	58 900 000,00	353 400,00
Troqueladora	6 300 000,00	37 800,00
Torno Paralelo	43 800 000,00	262 800,00
Tanque de desengrase	2 000 000,00	12 000,00
Tanque de fosforado	2 000 000,00	12 000,00
Vulcanizadora	34 300 000,00	205 800,00

**Tabla 5.12.** Costos de inversión de las máquinas (Z) y AOM (Zc)

**5.3.5 Análisis de resultados:** la metodología del análisis termoeconómico adoptado permite abordar la complejidad de las interacciones estructurales y obtener los costos de los flujos internos del sistema. A partir de estos es posible mejorar localmente componentes del sistema y desarrollar estrategias para el mejoramiento global del proceso (basado en el mejoramiento secuencial de cada componente individual).

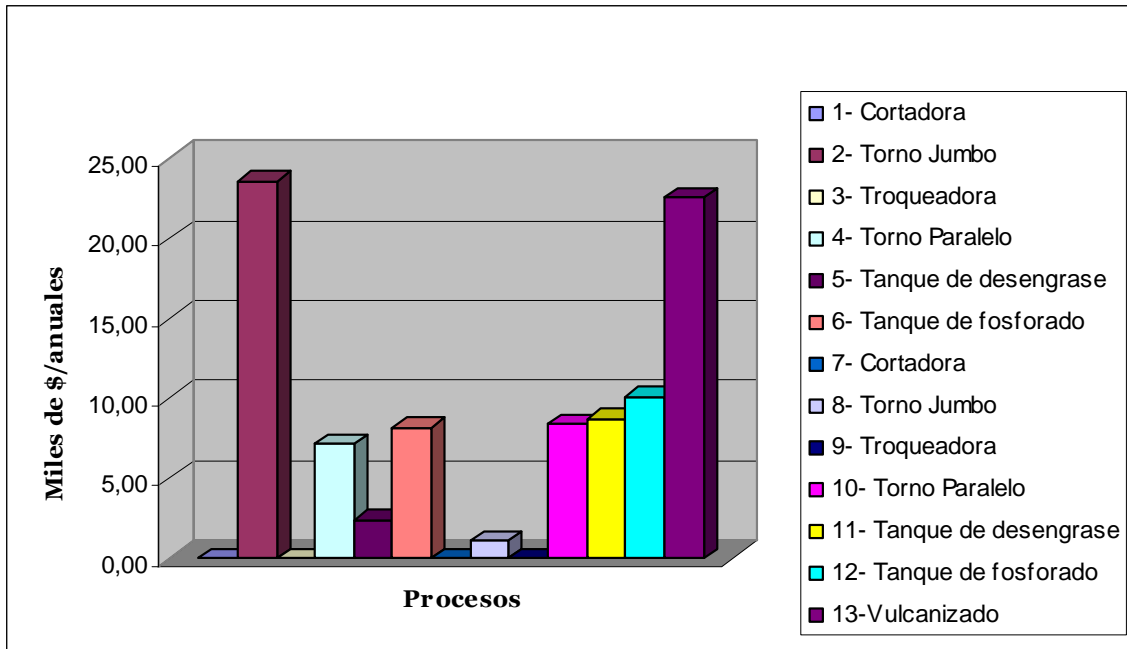
- ☑ *Eficiencia exergetica:* en la figura 5.11 se muestran los valores de eficiencia exergetica de cada una de los procesos.



**Figura 5.11.** Eficiencia exergética de cada máquina

Se puede observar que el proceso de mayor eficiencia exergética es el tratamiento en los tanques, sin embargo los demás procesos presentan una eficiencia por debajo del 25%, lo cual da señales de las oportunidades de mejorar cada uno de los procesos. Algunos problemas son: la antigüedad de las máquinas, la falta de mantenimiento y el desconocimiento de su eficiencia máxima. Para lo cual se sugiere realizar las caracterizaciones correspondientes y la aceptación de cambios en los procedimientos y el mejoramiento de algunas de sus partes.

**Costos de irreversibilidades:** En la figura 5.12 se muestran los valores de los costos de las irreversibilidades anuales.



**Figura 5.12.** Costos de irreversibilidades

Se observa que los procesos que presentan mayor costo son la vulcanizadora y el torno jumbo, lo cual exige acciones inmediatas para su mejoramiento.

# Capítulo 6

En este capítulo se presentan las conclusiones del proyecto, los aportes del estudio, algunas recomendaciones que se deben tener en cuenta en la empresa de autopartista, algunas observaciones generales, y por último, se presentan líneas de continuación, a través de trabajos futuros.

## **6.1 Conclusiones**

En la actualidad existen diversas metodologías encaminadas a la gestión energética, todas ellas enfocadas en la primera ley de la termodinámica.

En este trabajo se propone una metodología para gestión energética desde un enfoque exergetico, esto es, con base en la segunda ley de la termodinámica. La característica especial es que se plantea su aplicación a todo tipo de proceso industrial, casos ejemplo en el marco de este proyecto son: (Barbosa y Jiménez-06), (Bonilla-06), (Díaz-06), (González y Salazar-06), (Osma-06) y (Posada y Therán-06).

Se implementó la teoría de la termoeconomía en casos en los cuales los flujos no son continuos, logrando así establecer otra estrategia para realizar estudios para el ahorro energético en diferentes procesos productivos.

Aunque la gestión exergetica es un tema que al interior de la universidad no ha sido explotado de forma continua y mucho menos por el área de la ingeniería eléctrica, en este trabajo se logró aglutinar seis proyectos de pregrado que muestran la versatilidad del tema para esta área desde la perspectiva del uso racional y eficiente de la energía.

El expresar los flujos de exergía en MWh ha sido útil para mostrar que así como en sistemas químicos y térmicos se han realizado aplicaciones de la termoeconomía, cuyas variables son más familiares al lenguaje termodinámico; aquí se muestra que también se puede aplicar a sistemas eléctricos volviendo versátil esta metodología.

La metodología planteada permite mostrar los ahorros de energía reales que se pueden lograr, evitando irreversibilidades que no se pueden recuperar.

## **6.2 Aportes**

La teoría de la termoeconomía se utilizó para realizar un análisis de ahorro de energía en un proceso en el cual los flujos de energía no son continuos, no obstante se adaptó de forma acertada.

Se aplicó el análisis a circuitos eléctricos, con lo cual se mostró que la metodología termoeconómica es más general de lo que se utiliza normalmente.

Se generó un espacio de discusión y conceptualización, lo que permite mostrar la acción práctica por parte de los académicos y estudiantes.

## **6.3 Recomendaciones para la empresa autopartista**

- ✓ Dimensionar adecuadamente los generadores de aceite caliente.
- ✓ Realizar un estudio de la emisión de gases y partículas en el área de molienda de caucho y tratamientos químicos, y en general en toda la planta.
- ✓ Realizar un inventario tecnológico.
- ✓ Mejorar las instalaciones eléctricas acorde con los requerimientos mínimos establecidos por la normativa colombiana actual (RETIE).
- ✓ Realizar una proyección de las posibilidades de expansión y crecimiento de la empresa en particular lo relacionado con el dimensionamiento eléctrico.

- ✓ Interesarse por una política energética acorde con su planeación estratégica.
- ✓ Determinar los índices e indicadores energéticos para desarrollar un uso eficiente y racional de la energía.
- ✓ Emprender un análisis de competitividad en el área energética de la industria de autopartes.
- ✓ Realizar mediciones ambientales, calidad del aire, intensidad de ruido y emisión de partículas.

#### **6.4 Observaciones**

Existen limitaciones al implementar esta teoría tal como la cantidad de instrumentación que se requiere, sin embargo esto va de la mano con el nivel de detalle de estudio al cual se desea llegar.

Los empresarios de PyMEs no muestran aceptación directa por las nuevas teorías que surgen al interior de la universidad. Esto induce que se debe realizar un mayor acercamiento con aquellos, que aún siendo usuarios de la tecnología, son incrédulos.

#### **6.5 Trabajos futuros**

Realimentar la metodología propuesta con experiencias de otros procesos.

Realizar un programa de computador que permita de manera más ágil la implementación de la metodología.

## ANEXO A

### PREDIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

#### A.1 Recolección de información general

En la etapa de recolección de información, además de la información general de la empresa y aspectos comerciales y legales de la misma se debe:

- 1- Realizar un inventario de los procesos, ver tabla A-1.

Proceso	Potencia instalada (kW)

Tabla A-1. Inventario de procesos

- 2- Realizar el inventario de las máquinas, ver tabla A-2

Máquina	Tensión (V)	Corriente (A)	Fases	Potencia (kW)


**Tabla A-2.** Inventario de máquinas

3- Identificar las fuentes de energía, ver tabla A-3.

<b>Fuente de energía</b>	<b>Potencia contratada (kW o m<sup>3</sup>)</b>	<b>Tensión (V)</b>
Energía eléctrica		
Gas natural		
Productos petrolíferos		

**Tabla A-3.** Fuentes de energía

4- Otras fuentes de energía, ver cuadro A-4.

**A) ENERGÍA SOLAR**

1. Térmica (kWh/año)

2. Eléctrica (kWh/año)

**B) ESPECIALES**

1. Aire comprimido (kWh/año)

2. Vapor de agua (tep/año)

- 5- Recolectar la información del consumo de energía eléctrica y gas natural, ver tablas A-4 y A-5.

<b>Factura No.</b>	<b>Carga Contratada (kW)</b>	<b>Consumo promedio (kW)</b>	<b>Costo consumo (\$)</b>	<b>Otros costos (\$)</b>	<b>Contribución (\$)</b>	<b>Total (\$)</b>
Total						

Tarifa:

Precio:

**Tabla A-4.** Información del consumo de energía eléctrica

<b>Factura No.</b>	<b>Carga Contratada (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Consumo promedio (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Costo consumo (\$)</b>	<b>Otros costos (\$)</b>	<b>Contribución (\$)</b>	<b>Total (\$)</b>
Total						

Tarifa:

Precio:

**Tabla A-5.** Información del consumo de gas natural

6- Realizar la contabilidad energética, ver tabla A-6

<b>Tipo de energía</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Coefficiente de conversión a kWh</b>	<b>Total</b>

**Tabla A-6.** Consumos anuales

## ANEXO B

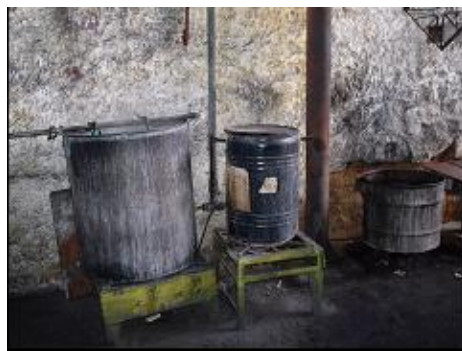
### B.1 Modelado exergético de los tanques para tratamientos químicos

Para el vulcanizado de las piezas se hace necesario que la superficie de las se encuentre limpia y fosforada para que el pegante se adhiera con el caucho. El desengrase y fosforado se llevan a cabo como paso previo al vulcanizado en los tanques.

En el desengrase, la pieza se somete a un proceso de limpieza debido a que cuando los tramos de lámina y los tubos pasan por el troquelado y torneado, quedan impregnados de grasa y aceite. El desengrase se realiza a una temperatura de 100°C, en una solución de agua y desengrasante (Kleanex).

Mediante el proceso de fosforado se retarda la oxidación del metal, brindando mayor vida útil a la pieza terminada. Se realiza a una temperatura de 100°C, en una solución de agua y fosfato de Zinc.

Las operaciones de desengrase y fosforado hacen parte de los tratamientos químicos para las piezas de metal, junto con el oxidado y el decapado, se llevan a cabo en tanques con capacidades entre 80 y 200 litros como se ve en la figura B-1.



**Figura B-1.** Tanques para los tratamientos químicos

La tabla B-1 registra parte de la información característica de los tratamientos químicos.

Recursos energéticos: (1) Gas Natural  
 Operaciones realizadas: (4) Desengrase, decapado, oxidado y fosforado  
 Componentes del sistema: (2) Un fogón, un tanque, agua y compuestos químicos.

**Tabla B-1.** Información general

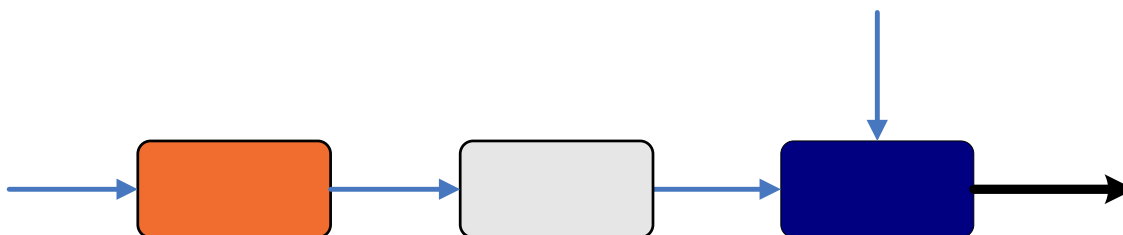
Nivel de desagregación. El modelo se compone de tres (3) bloques: combustión, tanque y operación. La combustión del gas natural genera una llama con temperatura y diámetro específico. El diámetro específico de la llama depende del flujo de gas natural y de las dimensiones físicas del fogón.

Identificación de flujos. Se definieron cinco (5) flujos, los cuales se describen en la tabla B-2.

FLUJO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	Gas natural	Utilizado para suministrar el calor necesario por combustión.
2	Calor	Calor entregado al tanque.
3	Calor	Calor útil aprovechado para el tratamiento químico de las piezas.
4	Materia prima	Piezas sometidas a los tratamientos químicos.
5	Producto	Pieza tratada.

**Tabla B-2.** Flujos identificados

Esquema del modelo. En la figura B-2 se muestra el modelo correspondiente a los tratamientos químicos, con el nivel de desagregación establecido y los flujos identificados.



**Figura B-2.** Esquema del modelo para los tratamientos químicos

Determinación de la cuantificación de los flujos. En la tabla B-3 se aprecian las características de cada flujo identificado.

FLUJO	MASA	Energía	Exergía
1. Gas Natural	✓	✓	✓
2. Calor	-	✓	✓
3. Calor	-	✓	✓
4. Materia prima	✓	✓	✓
5. Producto	✓	✓	✓

**Tabla B-3.** Características de los flujos identificados

En la tabla B-4 se presentan la determinación de la cuantificación de los flujos.

FLUJO	MASA	Energía	Exergía
1. Gas Natural	$m_1 = \rho_{GN} V_C$	$E_1 = Q_1 = \frac{m_1}{\rho_{GN}} P_C$	$B_1 = Q_1 \left( \frac{T_M - T_0}{T_M} \right)$
2. Calor	-	$E_2 = Q_{Ca} + Q_C + Q_{RN}$	$B_2 = B_{Ca} + B_C + B_{RN}$
3. Calor	-	$E_3 = Q_{Ca} + (Q_C + Q_{RN}) \frac{t_U}{t_D}$	$B_3 = B_{Ca} + (B_C + B_{RN}) \frac{t_U}{t_D}$
4. Materia prima	$m_4 = m_{MP}$	$E_4 = E_{MP}$	$B_4 = B_{MP}$
5. Producto	$m_5 = m_4$	$E_5 = E_4 + \frac{E_3}{N_P} \frac{t_O}{t_U}$	$B_5 = B_4 + \frac{B_3}{N_P} \frac{t_O}{t_U}$

**Tabla B-4.** Determinación de la cuantificación de los flujos

Los símbolos empleados para determinar la cuantificación de los flujos se indican a continuación:

$A_m$	Área horizontal de la llama, m <sup>2</sup>	$P_c$	Potencial energético del gas natural, kJ/m <sup>3</sup>
$A_{desp}$	Área vertical de la llama, m <sup>2</sup>	$Q_C$	Calor de conducción, kJ
$B_C$	Exergía de conducción, kJ	$Q_{Ca}$	Calor de calentamiento, kJ
$B_{Ca}$	Exergía de calentamiento, kJ	$Q_{RN}$	Calor de radiación neto, kJ
$B_i$	Exergía del flujo i, kJ	$T_0$	Temperatura del ambiente de referencia, K
$B_{MP}$	Exergía de la materia prima (1 pieza), kJ	$T_1$	Temperatura de ebullición de la solución, K
$B_{RN}$	Exergía de radiación neta, kJ	$T_2$	Temperatura de la base del tanque, K
$c$	Calor específico, J/kgK	$t_D$	Tiempo disponible de operación, h
$E_i$	Energía del flujo i, kJ	$t_o$	Tiempo de operación para N <sub>p</sub> , h
$E_{MP}$	Energía de la materia prima (1 pieza), kJ	$t_U$	Tiempo total útil de operación, h
$m_1$	Masa del gas natural utilizado, kg	$T_M$	Temperatura del mechero, K
$m_4$	Masa de la materia prima, kg	$V_c$	Volumen del gas natural consumido, m <sup>3</sup>
$m_5$	Masa del producto, kg	$e$	Emisividad de la llama
$m_a$	Masa de solución en el tanque	$\rho_{GN}$	Densidad del gas natural, kg/m <sup>3</sup>
$m_{MP}$	Masa de la materia prima (1 pieza), kg	$\sigma$	Constante de Stefan Boltzmann, 5,67*10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
$N_p$	Número de piezas colocadas en el tanque		

Dadas las características del flujo 2 se precisa conveniente expresar con mayor detalle las expresiones de energía y exergía referidas en la tabla B-3. Este flujo lo conforman tres (3) componentes térmicos: calentamiento, conducción y radiación neta. Este flujo se determina en dos (2) tiempos, el primero corresponde al calentamiento de la solución en el tanque hasta alcanzar temperatura de ebullición, que relaciona al primer componente, el segundo se debe al mantenimiento de la temperatura a nivel próximo a la ebullición, involucra los otros dos componentes térmicos.

El *componente de calentamiento* se describe con la expresión B-1, relación que determina el calor requerido para llevar una cantidad de masa de una temperatura  $T_1$  a una temperatura  $T_2$ .

$$Q_{Ca} = m_a c (T_2 - T_1) \quad (B-1)$$

El valor exergético de este flujo se determina con la expresión B-2 (Göran-86).

$$B_{Ca} = T_0 S^{tot} = Q_{Ca} \left( 1 - \frac{T_0}{T_2} \right) = mc(T_2 - T_1) \frac{(T_2 - T_0)}{T_2} \quad (\text{B-2})$$

El *componente de conducción* entre la llama, el tanque y la solución se describe por la expresión B-3.

La expresión B-4 representa el flujo de calor por conducción a través de una lámina plana.

$$Q_C = t_U * \dot{Q}_C \quad [\text{J}] \quad (\text{B-3})$$

$$\dot{Q}_C = \frac{kA_m(T_2 - T_1)}{\Delta x} \quad [\text{W}] \quad (\text{B-4})$$

Para determinar la exergía contenida en la conducción se debe tener presente que los valores de las temperaturas  $T_2$  y  $T_1$  difieren de la  $T_0$ . Por tal razón se debe establecer la exergía de conducción en función de la temperatura de las superficies de la pared o base del tanque. En la expresión B-5 se muestra que la exergía del proceso se manifiesta como la diferencia de las exergías a las temperaturas  $T_2$  y  $T_1$ .

En las expresiones B-6 y B-7 se relaciona la exergía para cada temperatura.

$$B_C = B(T_2) - B(T_1) \quad (\text{B-5})$$

$$B(T_2) = Q_C \left( \frac{T_2 - T_0}{T_2} \right) \quad (\text{B-6})$$

$$B(T_1) = Q_C \left( \frac{T_1 - T_0}{T_1} \right) \quad (\text{B-7})$$

Reemplazando B-4, B-6 y B-7 en B-5 la expresión para determinar la exergía en conducción se muestra en C-8.

$$B_C = t_U \frac{kA_m (T_2 - T_1)^2 T_0}{\Delta x T_2 T_1} \quad (\text{B-8})$$

El *componente de radiación neta* entregado por la llama al tanque se establece como la diferencia entre la radiación total menos la radiación pérdida al ambiente. El calor debido a la radiación se expresa en B-9, en B-10 se presenta el flujo de calor por radiación.

$$Q_R = t_U * \dot{Q}_R = [\text{J}] \quad \text{B-9}$$

$$\dot{Q}_R = e\sigma T_m^4 A_m \text{ [W]} \quad \text{B-10}$$

La radiación total entregada depende de la temperatura, la emisividad y el área efectiva de la llama en contacto con el tanque,  $A_m$ . El valor de la radiación perdida que se emite al ambiente sólo difiere de la anterior por el área. El área que se toma ahora se refiere a la envolvente de la llama,  $A_{desp}$ , que es perpendicular a la base del tanque. Por tanto el flujo neto se expresa como la diferencia de áreas tal como se muestra en la expresión B-11. Estas áreas se determinan con B-12 y B-13.

$$Q_{EN} = t * \dot{Q}_{RN} = te\sigma T_m^4 (A_m - A_{desp}) \text{ [W]} \quad \text{(B-11)}$$

$$A_m = \pi R_{Ll}^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad \text{(B-12)}$$

$$A_{desp} = 2\pi R_{Ll} h_{Ll} \text{ [m}^2\text{]} \quad \text{(B-13)}$$

La exergía suministrada al tanque debido a la radiación se basa en la expresión B-14:

$$B_R = t * \dot{B}_R = te\sigma T_m^4 A \left( 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_0}{T_m} \right)^4 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_m} \right) \text{ [J]} \quad \text{(B-14)}$$

Así, en la ecuación B-15 se tiene la expresión para calcular la exergía de radiación neta,  $B_{RN}$ .

$$B_{RN} = e\sigma T_m^4 \left( 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_0}{T_m} \right)^4 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_m} \right) (A_m - A_{desp}) \text{ [J]} \quad \text{(B-15)}$$

Unificando en una sola expresión la energía total suministrada al tanque se describe en (B-17) y la exergía total en (B-18), que corresponden a los valores de energía y exergía del flujo 5.

$$E_5 = E_{MP} + \frac{mc(T_2 - T_1)t_O}{N_P t_U} + \frac{t_U}{N_P} \left( \frac{kA_m(T_2 - T_1)^2}{\Delta x} + e\sigma T_m^4 (A_m - A_{desp}) \right) \frac{t_O}{t_D} \quad \text{(B-17)}$$

$$B_5 = B_{MP} + \left( \frac{mc(T_2 - T_1)(T_2 - T_0)}{N_P T_2} \right) \frac{t_O}{t_U} + \frac{t_U}{N_P} \left( \frac{kA_m(T_2 - T_1)^2 T_0}{\Delta x T_2 T_1} + e\sigma T_m^4 \left( 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_0}{T_m} \right)^4 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_m} \right) (A_m - A_{desp}) \right) \frac{t_O}{t_D} \quad \text{(B-18)}$$



## B.2 MODELADO EXERGÉTICO DE LA PRENSA VULCANIZADORA

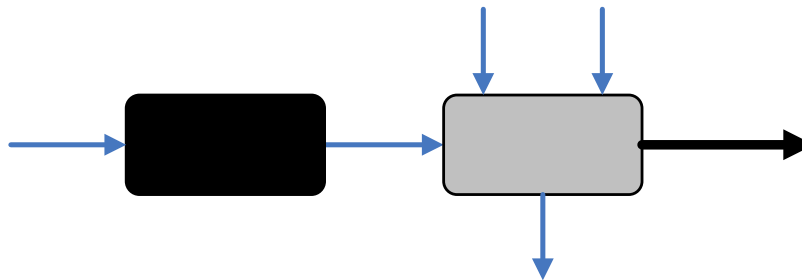
Nivel de desagregación. El modelo se constituye de dos (2) bloques: planchas y matriz.

Identificación de flujos. Se identificaron seis (6) flujos que se describen en la tabla B-5.

FLUJO	TIPO	DESCRIPCIÓN
1	Calor	Flujo térmico para calentar las planchas de vulcanizado
2	Calor	Flujo térmico suministrado a la matriz de vulcanizado
3	Materia prima	Caucho
4	Materia prima	Acero
5	Desperdicio	Caucho sobrante
6	Producto	Repuesto vulcanizado

**Tabla B-5.** Flujos identificados vulcanizadora

Esquema del modelo. El modelo establecido del molino y junto con la operación de mezclado se aprecia en la figura B-3.



**Figura B-3.** Esquema modelado de la prensa de vulcanizado

Determinación de la cuantificación de los flujos. En la tabla B-6 se aprecian las características de cada flujo identificado.

FLUJO	MASA	Energía	Exergía
1. Calor	-	✓	✓
2. Calor	-	✓	✓
3. Materia prima	✓	✓	✓
4. Materia prima	✓	✓	✓
5. Desperdicio	✓	✓	✓
6. Producto	✓	✓	✓

**Tabla B-6.** Características de los flujos identificados

En la tabla B-7 se presentan la determinación de la cuantificación de los flujos.

1

1

2

FLUJO	MASA	Energía	Exergía
1. Calor	-	$E_1 = \frac{E_{TP}}{n_V n_M}$	$B_1 = \frac{B_{TP}}{n_V n_M}$
2. Calor	-	$E_2 = \frac{Q_{MC}}{n_V n_M} + Q_{Mconv} + Q_{MO} + Q_C + Q_A$	$B_2 = \frac{B_{MC}}{n_V n_M} + B_{Mconv} + B_{MO} + B_C + B_A$
3. Materia prima	$m_3 = m_{MP\_C}$	$E_3 = E_{MP\_C}$	$B_3 = B_{MP\_C}$
4. Materia prima	$m_4 = m_{MP\_A}$	$E_4 = E_{MP\_A}$	$B_4 = B_{MP\_A}$
5. Desperdicio	$m_5 = m_{MP\_DC}$	$E_4 = \frac{m_5}{m_3}(E_3 + Q_C)$	$B_4 = \frac{m_5}{m_3}(B_3 + B_C)$
6. Producto	$m_6 = m_4 + m_C$	$E_6 = Q_A + E_4 + \frac{m_5 - m_3}{m_3}(E_3 + Q_C)$	$B_6 = B_A + B_4 + \frac{m_5 - m_3}{m_3}(B_3 + B_C)$

**Tabla B-8.** Determinación de la cuantificación de los flujos

Los símbolos empleados para determinar la cuantificación de los flujos se indican a continuación:

$B_i$	Exergía del flujo i, J	$E_{TP}$	Energía total (calor) entregada a la plancha, J
$B_A$	Exergía almacenada en la masa de acero de la pieza, J	$m_i$	Masa del flujo i, J
$B_C$	Exergía almacenada en la masa inicial de caucho, J	$m_{MP\_A}$	Masa del acero de materia prima, J
$B_{MC}$	Exergía almacenada en la matriz en el calentamiento, J	$m_{MP\_C}$	Masa del caucho de materia prima, J
$B_{Mconv}$	Exergía transferida por la matriz al ambiente por convección, J	$m_{MP\_CO}$	Masa del caucho desperdiciado, J
$B_{MO}$	Exergía almacenada en la matriz en un vulcanizado, J	$n_M$	Número de matrices
$B_{MP\_A}$	Exergía del acero de materia prima, J	$n_V$	Número de vulcanizaciones al día
$B_{MP\_C}$	Exergía del caucho de materia prima, J	$Q_A$	Calor almacenado en la masa de acero de la pieza, J
$B_{TP}$	Exergía entregada a la plancha, J	$Q_C$	Calor almacenado en la masa inicial de caucho, J
$E_i$	Energía del flujo i, J	$Q_{MC}$	Calor almacenado en la matriz en el calentamiento, J
$E_{MP\_A}$	Energía del acero de materia prima, J	$Q_{Mconv}$	Calor transferido por la matriz al ambiente por convección, J
$E_{MP\_C}$	Energía del caucho de materia prima, J	$Q_{MO}$	Calor almacenado en la matriz en un vulcanizado, J

En principio se intentó determinar la cuantificación de este flujo planteándolo como un problema de transferencia de calor de flujo interno, pero debido a la imposibilidad de acceder a información física referente a condiciones físicas del fluido y de los equipos, y además por la alta complejidad de las medidas requeridas, se optó por deducir los valores de energía y exergía por medio de un balance energético basado en el almacenamiento de calor y la transferencia de calor al ambiente (convección).

Se determinó el calor transferido a la matriz, a cada una de las partes de la pieza vulcanizada, el calor emitido al ambiente por las planchas y la matriz, el calor contenido en la estructura metálica de la prensa de vulcanizado. El valor  $E_{TP}$  representa la suma de cantidades de calor para distintas partes de la prensa vulcanizadora en diferentes condiciones de operación (ver expresiones B-19 y B-20).

$$E_{TOTAL\_PLANCHAS} = E_{TP} = Q_{PC} + Q_{PO} + Q_{Pconv} + Q_{MC} + n_V n_M (Q_{Mconv} + Q_{MO} + Q_C + Q_A) \quad (B-19)$$

$$B_{TOTAL\_PLANCHAS} = B_{TP} = B_{PC} + B_{PO} + B_{Pconv} + B_{MC} + n_V n_M (B_{Mconv} + B_{MO} + B_C + B_A) \quad (B-20)$$

Donde  $n_V n_M = n_p$  indica el número de repuestos vulcanizados al día.

Los componentes de  $E_{TP}$ , al igual que los  $B_{TP}$ , pueden presentarse en dos tipos de naturalezas, almacenamiento o convección, tal como se aprecia en la tabla **B-6**. La importancia de esta característica radica en la metodología de cálculo requerida para determinar una cantidad específica.

Para ambos casos se encuentra que dependen de una diferencia de temperaturas. En el caso del almacenamiento de calor en un cuerpo importa la temperatura que se registre en el instante inicial y en el instante final, pero no el tiempo en sí. Para el calor transferido por convección se hace relevante el tiempo de la transferencia y también la forma como se comportan las temperaturas con respecto al tiempo.

Componente	Cuerpo de referencia	Naturaleza	Tiempo de ocurrencia
$Q_{PC}$	Planchas	Calor almacenado en el cuerpo.	Durante el período de calentamiento (3:00am a 7:00am)
$Q_{PO}$			En el período de operación (7:00am a 5:00pm)
$Q_{MC}$	Matriz		Al inicio de la jornada
$Q_{MO}$			Durante el vulcanizado de la pieza
$Q_A$	Caucho (MP)		Durante el vulcanizado de la pieza
$Q_C$	Acero (MP)		Durante el vulcanizado de la pieza
$Q_{Pconv}$	Planchas	Calor transferido por convección desde el cuerpo al ambiente.	Durante el período de calentamiento (3:00am a 7:00am)
			$Q_{PcC}$
$Q_{PcO}$	Durante el vulcanizado de la pieza		
$Q_{Mconv}$	Matriz		

**Tabla B-9.** Componentes de la energía total entregada a la planchas

A continuación se comentan las consideraciones para determinar los componentes según su naturaleza, en función de las variables físicas asociadas.

Calor y exergía almacenados en un cuerpo. Para determinar el calor y la exergía almacenados en un cuerpo se emplean las expresiones B-21 y B-22, respectivamente, para el caso en que el calor específico no depende de la temperatura.

$$Q = mc(T_h - T_l) \quad (\text{B-21})$$

$$E = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (\text{B-22})$$

Si el calor específico depende de la temperatura se debe acudir a las expresiones B-23 y B-24.

$$E = Q = m \int_{T_l}^{T_h} c(T) dT \quad (\text{B-23})$$

$$B = m \int_{T_l}^{T_h} c(T) \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) dT \quad (\text{B-24})$$

En caso de que se presente una dependencia lineal de calor específico con respecto a la temperatura, o en un intervalo, las expresiones B-25 y B-26 permiten realizar los cálculos. Lo que ocurre en el caso del caucho y del acero para determinado intervalo.

$$E = Q = m \int_{T_L}^{T_H} c(T) dT = m \left( \frac{a(T_H^2 - T_L^2)}{2} + b(T_H - T_L) \right) \quad (\text{B-25})$$

$$B = m \int_{T_L}^{T_H} c(T) \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) dT = m \left( \frac{a(T_H^2 - T_L^2)}{2} + (b - aT_0)(T_H - T_L) - bT_0 \ln \frac{T_H}{T_L} \right) \quad (\text{B-26})$$

Y si las temperaturas varían con el tiempo y existe un flujo de masa se emplean las expresiones B-27 y B-28.

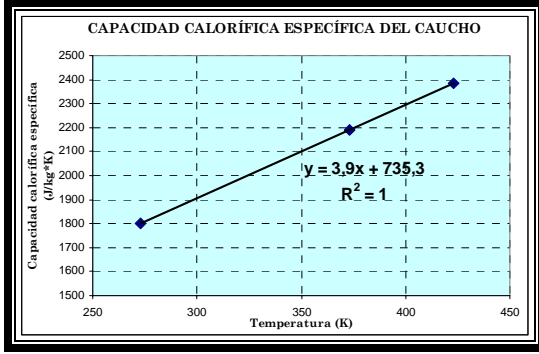
$$E = Q = \int_{t_i}^{t_f} \int_{T_L}^{T_H} \dot{m} c(T) dT dt \quad (\text{B-27})$$

$$B = \int_{t_i}^{t_f} \int_{T_L}^{T_H} \dot{m} c(T) \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) dT dt \quad (\text{B-28})$$

El calor específico del caucho para el intervalo  $273K(0^\circ C) < T < 423K(150^\circ C)$  presenta un comportamiento lineal expresado de la forma  $c(T) = aT + b$ . En el caso del acero se presenta un comportamiento lineal en el intervalo  $300K(27^\circ C) < T < 600K(323^\circ C)$ . En la tabla B-10 se presentan los valores del calor específico para el caucho y el acero a diferentes temperaturas. En la figura B-4 se muestra la dependencia lineal con respecto a la temperatura en un intervalo definido.

CAUCHO		ACERO	
Temperatura K	Calor específico J/kgK	Temperatura K	Calor específico J/kgK
173	1 000	300	434
273	1 800	400	487
373	2 190	600	559
423	2 385	800	685
473	2 580	1000	1168

**Tabla B-10.** Calor específico del caucho y el acero

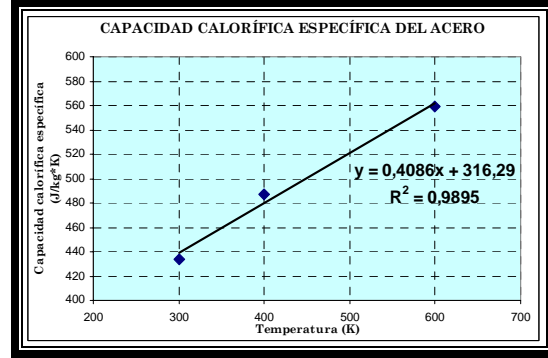


Comportamiento lineal válido para el intervalo

$$273\text{K} < T < 423\text{K} \text{ o } 0^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$$

$$c_{\text{CAUCHO}}(T) = 3,9T + 735,3 \quad [\text{J}/\text{kgK}]$$

a) Caucho



Comportamiento lineal válido para el intervalo

$$300\text{K} < T < 600\text{K} \text{ o } 27^{\circ}\text{C} < T < 327^{\circ}\text{C}$$

$$c_{\text{ACERO}}(T) = 0,4089T + 316,29 \quad [\text{J}/\text{kgK}]$$

b) Acero

**Figura B-4.** Calor específico

Por tanto la energía y exergía de una pieza de caucho se determinan por las expresiones B-29 y B-30, respectivamente. Para una pieza de acero se tienen las expresiones B-31 y B-32.

$$E = Q = m(1,95(T_H^2 - T_L^2) + 735,3(T_H - T_L)) \quad (\text{B-29})$$

$$B = m \left( 1,95(T_H^2 - T_L^2) - 416,7(T_H - T_L) - 225900 \ln \frac{T_H}{T_L} \right) \quad (\text{B-30})$$

$$E = Q = m(0,2043(T_H^2 - T_L^2) + 316,29(T_H - T_L)) \quad (\text{B-31})$$

$$B = m \left( 0,2043(T_H^2 - T_L^2) + 193,71(T_H - T_L) - 94887 \ln \frac{T_H}{T_L} \right) \quad (\text{B-32})$$

*Componentes de  $E_{TP}$  por almacenamiento.* El valor del componente  $Q_C$  se basa en la expresión B-25,  $Q_{PC}$ ,  $Q_{PO}$ ,  $Q_{MC}$ ,  $Q_{MO}$  y  $Q_A$  se basan B-28.

$$Q_C = m_C(1,95(T_{HC}^2 - T_{LC}^2) + 735,3(T_{HC} - T_{LC})) \quad (\text{B-33})$$

$$Q_{PC} = m_P(0,2043(T_{HPC}^2 - T_{LPC}^2) + 316,29(T_{HPC} - T_{LPC})) \quad (\text{B-34})$$

$$Q_{PO} = m_P(0,2043(T_{HPO}^2 - T_{LPO}^2) + 316,29(T_{HPO} - T_{LPO})) \quad (\text{B-35})$$

$$Q_{MO} = m_M(0,2043(T_{HMO}^2 - T_{LMO}^2) + 316,29(T_{HMO} - T_{LMO})) \quad (\text{B-36})$$

$$Q_{MC} = m_M(0,2043(T_{HMC}^2 - T_{LMC}^2) + 316,29(T_{HMC} - T_{LMC})) \quad (\text{B-37})$$

$$Q_A = m_A(0,2043(T_{HA}^2 - T_{LA}^2) + 316,29(T_{HA} - T_{LA})) \quad (\text{B-38})$$

*Componentes de  $B_{TP}$  por almacenamiento.* El valor del componente  $B_C$  se basa en la expresión B-29,  $B_{PC}$ ,  $B_{PO}$ ,  $B_{MC}$  y  $B_A$  se basan B-29.

$$B_C = m_C \left( 1,95(T_{HPC}^2 - T_{LPC}^2) - 416,7(T_{HPC} - T_{LPC}) - 225900 \ln \frac{T_{HPC}}{T_{LPC}} \right) \quad (\text{B-39})$$

$$B_{PC} = m_P \left( 0,2043(T_{HPC}^2 - T_{LPC}^2) + 193,71(T_{HPC} - T_{LPC}) - 94887 \ln \frac{T_{HPC}}{T_{LPC}} \right) \quad (\text{B-40})$$

$$B_{PO} = m_P \left( 0,2043(T_{HPO}^2 - T_{LPO}^2) + 193,71(T_{HPO} - T_{LPO}) - 94887 \ln \frac{T_{HPO}}{T_{LPO}} \right) \quad (\text{B-41})$$

$$B_{MC} = m_M \left( 0,2043(T_{HMC}^2 - T_{LMC}^2) + 193,71(T_{HMC} - T_{LMC}) - 94887 \ln \frac{T_{HMC}}{T_{LMC}} \right) \quad (\text{B-42})$$

$$B_{MO} = m_M \left( 0,2043(T_{HMO}^2 - T_{LMO}^2) + 193,71(T_{HMO} - T_{LMO}) - 94887 \ln \frac{T_{HMO}}{T_{LMO}} \right) \quad (\text{B-43})$$

$$B_A = m_A \left( 0,2043(T_{HA}^2 - T_{LA}^2) + 193,71(T_{HA} - T_{LA}) - 94887 \ln \frac{T_{HA}}{T_{LA}} \right) \quad (\text{B-44})$$

Calor y exergía debidos a la transferencia por convección. Se consideran en este caso la energía y la exergía emitidas por un cuerpo al ambiente dada la diferencia de temperaturas. Las expresiones base para realizar los cálculos se indican en las expresiones B-44, B-45 y B-46:

$$q = hA(T_H - T_L) \quad [\text{W}] \quad (\text{B-44})$$

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} q dt = hA \int_{t_1}^{t_2} (T_H - T_L) dt \quad [\text{J}] \quad (\text{B-45})$$

$$B = \int_{t_1}^{t_2} q \left( \frac{T_H - T_0}{T_H} - \frac{T_L - T_0}{T_L} \right) dt = hAT_0 \int_{t_1}^{t_2} \frac{(T_H - T_L)^2}{T_H T_L} dt \quad [\text{J}] \quad (\text{B-46})$$

*Componentes de  $E_{TP}$  por convección.* Para calcular los componentes  $Q_{PC}$ ,  $Q_{PO}$  y  $Q_{Mconv}$  se emplea la expresión B-45. A continuación se tiene de forma general, la relación de las temperaturas con respecto al tiempo. Las variables sin un valor numérico asociado indican su dependencia de las condiciones propias de cada prensa de vulcanizado y del repuesto.

Temperatura de las planchas durante el calentamiento en horas,

$$T_{PC}(t) = a_{PC}t + b_{PC} \quad (\text{B-47})$$

Temperatura de las planchas durante el período de operación en horas,

$$T_{PO}(t) = a_{PO}t + b_{PO} \quad (\text{B-48})$$

Temperatura de la matriz durante cada vulcanizado en minutos,

$$T_{MV}(t) = a_{MV}t^2 + b_{MV}t + c_{MV} \quad (\text{B-49})$$

Sólo se tienen como valores generalizados, las constantes de la temperatura del aire, que se establece como la misma para todos los casos de estudio, al igual que el coeficiente de transferencia de calor, la temperatura promedio del aire entre las 7:00am y las 5:00pm, los tiempos de inicio y terminación del período de calentamiento y de operación, se indican continuación:

$$h = 40 \frac{W}{m^2 K}$$

$$\overline{T}_{a0} = 37,05^\circ C = 310,05K$$

$$t_{iC} = 3 = 3am, \quad t_{jC} = 7 = 7am$$

$$t_{iO} = 7 = 7am, \quad t_{jO} = 17 = 5pm$$

Temperatura del aire en horas. Válido para todos los repuestos.

$$T_a(t) = a_a t^2 + b_a t + c_a = -0,1361t^2 + 3,786t + 11,875[K] \quad (\text{B-50})$$

Para el calor transferido por las planchas al ambiente se tienen dos cantidades, una durante el calentamiento y la otra durante el período de operación.

$$Q_{Pcomv} = Q_{PeC} + Q_{PeO}$$

Reemplazando las expresiones B-45, B-46, B-47 y B-48, junto a los valores asociados se tiene las expresiones B-51 y B-52:

$$Q_{PeC} = hA_{TP} \int_{t_{iC}}^{t_{jC}} (T_{PC}(t) - T_a(t)) dt \quad (\text{B-51})$$

$$Q_{PeC} = hA_{TP} \left( -\frac{a_a}{3} (t_{jC}^3 - t_{iC}^3) + \frac{(a_{PC} - b_a)}{2} (t_{jC}^2 - t_{iC}^2) + (b_{PC} - c_a) (t_{jC} - t_{iC}) \right) \quad (\text{B-53})$$

$$Q_{PcC} = 40A_{TP}(20a_{PC} + 4b_{PC} - 1229,6) \quad (\text{B-54})$$

$$Q_{PcO} = h \frac{A_{TP}(t_{fO} - t_{iO}) - A_{PCM}t_{OU}}{t_{fO} - t_{iO}} \int_{t_{iO}}^{t_{fO}} (T_{PO}(t) - T_a(t)) dt \quad (\text{B-55})$$

$$Q_{PcO} = h \frac{A_{TP}(t_{fO} - t_{iO}) - A_{PCM}t_{OU}}{t_{fO} - t_{iO}} \left( -\frac{a_a}{3}(t_{fO}^3 - t_{iO}^3) + \frac{(a_{PO} - b_a)}{2}(t_{fO}^2 - t_{iO}^2) + (b_{PO} - c_0)(t_{fO} - t_{iO}) \right) \quad (\text{B-56})$$

$$Q_{PcO} = (40A_{TP} - 4A_{PCM}t_{OU})(120a_{PO} + 10b_{PO} - 3510,55) \quad (\text{B-57})$$

$$Q_{Mconv} = hA_{MCA} \int_{t_{iV}}^{t_{fV}} (T_{MV}(t) - \bar{T}_{aO}) dt \quad (\text{B-58})$$

$$Q_{Mconv} = hA_{MCA} \left( \frac{a_{MV}}{3}(t_{fV}^3 - t_{iV}^3) + \frac{b_{MV}}{2}(t_{fV}^2 - t_{iV}^2) + (c_{MV} - \bar{T}_{aO})(t_{fV} - t_{iV}) \right) \quad (\text{B-59})$$

$$Q_{Mconv} = 40A_{MCA} \left( \frac{a_{MV}}{3}(t_{fV}^3 - t_{iV}^3) + \frac{b_{MV}}{2}(t_{fV}^2 - t_{iV}^2) + (c_{MV} - 310,05)(t_{fV} - t_{iV}) \right) \quad (\text{B-60})$$

**Componentes de  $E_{TP}$  por convección.** Para calcular los componentes  $B_{PcC}$ ,  $B_{PcO}$  y  $B_{Mconv}$  se emplea la expresión B-40.

$$B_{Pconv} = B_{PcC} + B_{PcO} \quad (\text{B-61})$$

Las expresiones matemáticas que se establecen de los componentes exergéticos se presentan más complejas que las apreciadas para los componentes energéticos, tal como se ve en las expresiones B-62 y B-84.

$$B_{PcC} = hA_{TP} \int_{t_{iC}}^{t_{fC}} (T_{PC}(t) - T_a(t)) \left( \frac{T_{PC}(t) - T_0}{T_{PC}(t)} - \frac{T_a(t) - T_0}{T_a(t)} \right) dt \quad (\text{B-62})$$

$$B_{PcC} = hA_{TP}T_0 \int_{t_{iC}}^{t_{fC}} \frac{(T_{PC}(t) - T_a(t))^2}{T_{PC}(t)T_a(t)} dt = hA_{TP}T_0 (Co_1 + Co_2 + Co_3 + Co_4)_{t_{iC}}^{t_{fC}} \quad (\text{B-63})$$

$$Co_1 = \frac{(a_{PC}\sqrt{(b_a^2 - 4a_a c_a)} + a_{PC}b_a - 2b_{PC}a_a) \ln(\sqrt{(b_a^2 - 4a_a c_a)}(2a_a t + b_a) - 4a_a c_a + b_a^2)}{2a_a \sqrt{(b_a^2 - 4a_a c_a)}} \quad (\text{B-64})$$

$$Co_2 = \frac{(a_{PC}\sqrt{(b_a^2 - 4a_a c_a)} - a_{PC}b_a + 2b_{PC}a_a) \ln(\sqrt{(b_a^2 - 4a_a c_a)}(2a_a t + b_a) + 4a_a c_a - b_a^2)}{2a_a \sqrt{(b_a^2 - 4a_a c_a)}} \quad (\text{B-65})$$

$$Co_3 = \frac{(a_{PC}^2 c_a - a_{PC} b_{PC} b_a + b_{PC}^2 a_a) \ln(a_{PC} t + b_{PC})}{a_{PC}^3} \quad (\text{B-66})$$

$$Co_4 = -\frac{t(4a_{PC}^2 - a_{PC}(a_a t + 2b_a)) + 2b_{PC} a_a}{2a_{PC}^2} \quad (\text{B-67})$$

$$Co_1 = -\frac{(16,81a_{PC} + 0,27b_{PC}) \ln(3,54t + 218,71)}{3,54} \quad (\text{B-68})$$

$$Co_2 = -\frac{(9,23a_{PC} - 0,27b_{PC}) \ln(3,54t - 120,13)}{3,54} \quad (\text{B-69})$$

$$Co_3 = \frac{(284,88a_{PC}^2 - 3,79a_{PC} b_{PC} - 0,14b_{PC}^2) \ln(a_{PC} t + b_{PC})}{a_{PC}^3} \quad (\text{B-70})$$

$$Co_4 = -\frac{t(4a_{PC}^2 - a_{PC}(-0,14t + 7,57) - 0,27b_{PC})}{2a_{PC}^2} \quad (\text{B-71})$$

$$B_{PCO} = h \frac{A_{TP}(t_{JO} - t_{IO}) - A_{PCM} t_{OU}}{t_{JO} - t_{IO}} \int_{t_{IO}}^{t_{JO}} (T_{PO}(t) - T_a(t)) \left( \frac{T_{PO}(t) - T_0}{T_{PO}(t)} - \frac{T_a(t) - T_0}{T_a(t)} \right) dt \quad (\text{B-72})$$

$$B_{PCO} = h \frac{A_{TP}(t_{JO} - t_{IO}) - A_{PCM} t_{OU}}{t_{JO} - t_{IO}} T_0 \int_{t_{IO}}^{t_{JO}} \frac{(T_{PO}(t) - T_a(t))^2}{T_{PO}(t) T_a(t)} dt = h(A_{TP} - A_{PCM}) T_0 (Co_1 + Co_2 + Co_3 + Co_4)_{t_{IO}}^{t_{JO}} \quad (\text{B-73})$$

$$Co_1 = \frac{(a_{PO} \sqrt{(b_a^2 - 4a_a c_a)} + a_{PO} b_a - 2b_{PO} a_a) \ln(\sqrt{(b_a^2 - 4a_a c_a)} (2a_a t + b_a) - 4a_a c_a + b_a^2)}{2a_a \sqrt{(b_a^2 - 4a_a c_a)}} \quad (\text{B-74})$$

$$Co_2 = \frac{(a_{PO} \sqrt{(b_a^2 - 4a_a c_a)} - a_{PO} b_a + 2b_{PO} a_a) \ln(\sqrt{(b_a^2 - 4a_a c_a)} (2a_a t + b_a) + 4a_a c_a - b_a^2)}{2a_a \sqrt{(b_a^2 - 4a_a c_a)}} \quad (\text{B-75})$$

$$Co_3 = \frac{(a_{PO}^2 c_a - a_{PO} b_{PO} b_a + b_{PO}^2 a_a) \ln(a_{PO} t + b_{PO})}{a_{PO}^3} \quad (\text{B-76})$$

$$Co_4 = -\frac{t(4a_{PO}^2 - a_{PO}(a_a t + 2b_a)) + 2b_{PO} a_a}{2a_{PO}^2} \quad (\text{B-77})$$

$$Co_1 = -\frac{(16,81a_{PO} + 0,27b_{PO}) \ln(3,54t + 218,71)}{3,54} \quad (\text{B-78})$$

$$Co_2 = -\frac{(9,23a_{PO} - 0,27b_{PO}) \ln(3,54t - 120,13)}{3,54} \quad (\text{B-79})$$

$$Co_3 = \frac{(284,88a_{PO}^2 - 3,79a_{PO} b_{PO} - 0,14b_{PO}^2) \ln(a_{PO} t + b_{PO})}{a_{PO}^3} \quad (\text{B-80})$$

$$Co_4 = -\frac{t(4a_{PO}^2 - a_{PO}(-0,14t + 7,57) - 0,27b_{PO})}{2a_{PO}^2} \quad (\text{B-81})$$

$$B_{Mconv} = hA_{MCA} \int_{t_{iv}}^{t_{jc}} (T_{MV}(t) - \overline{T_{aO}}) \left( \frac{T_{MV}(t) - T_0}{T_{MV}(t)} - \frac{\overline{T_{aO}} - T_0}{\overline{T_{aO}}} \right) dt \quad (\text{B-82})$$

$$B_{Mconv} = \frac{hA_{MCA} T_0}{T_{aO}} \int_{t_{iv}}^{t_{jc}} \frac{(T_{MV}(t) - \overline{T_{aO}})^2}{T_{MV}(t)} dt \quad (\text{B-83})$$

$$B_{Mconv} = \frac{hA_{MCA} T_0}{T_{aO}} \left( \frac{2\overline{T_{aO}}^{-2} ATAN \left( \frac{2a_{MV}t + b_{MV}}{\sqrt{(4a_{MV}c_{MV} - b_{MV}^2)}} \right) + \frac{a_{MV}t^3}{3} + \frac{b_{MV}t^2}{2} + t(c_{MV} - 2\overline{T_{aO}})}{\sqrt{(4a_{MV}c_{MV} - b_{MV}^2)}} \right)_{t_{ic}}^{t_{jc}} \quad (\text{B-84})$$

$$B_{Mconv} = 38,70 A_{MCA} \left( \frac{192262,01 ATAN \left( \frac{2a_{MV}t + b_{MV}}{\sqrt{(4a_{MV}c_{MV} - b_{MV}^2)}} \right) + \frac{a_{MV}t^3}{3} + \frac{b_{MV}t^2}{2} + t(c_{MV} - 720,10)}{\sqrt{(4a_{MV}c_{MV} - b_{MV}^2)}} \right)_{t_{ic}}^{t_{jc}} \quad (\text{B-84})$$

$A_{MCA}$	Área de la matriz en contacto con el aire, m <sup>2</sup>	$Q_{MO}$	Calor almacenado en la matriz en un vulcanizado, J
$A_{PCM}$	Área de la plancha en contacto con la matriz, m <sup>2</sup>	$Q_{PC}$	Calor almacenado en la plancha en el calentamiento, J
$A_{TP}$	Área de total de la plancha en contacto con el aire, m <sup>2</sup>	$Q_{Pconv}$	Calor transferido por la plancha al ambiente por convección, J
$a_a, b_a, c_a$	Coefficientes de la expresión $T_0(t)$	$Q_{PCc}$	Calor transferido por la plancha al ambiente por convección en el calentamiento, J
$a_{MV}, b_{MV}, c_{MV}$	Coefficientes de la expresión $T_{MV}(t)$	$Q_{PCo}$	Calor transferido por la plancha al ambiente por convección en la operación, J
$a_{PC}, b_{PC}$	Coefficientes de la expresión $T_{PC}(t)$	$Q_{PO}$	Calor almacenado en la plancha en la operación, J
$a_{PO}, b_{PO}$	Coefficientes de la expresión $T_{PO}(t)$	$T_a(t)$	Temperatura del aire de la zona de vulcanizado durante el día, K
$B_A$	Exergía almacenada en la masa de acero de la pieza, J	$\overline{T_{aO}}$	Temperatura promedio del aire en el período de operación (7:00am a 5:00pm)
$B_C$	Exergía almacenada en la masa inicial de caucho, J	$T_{HA}$	Temperatura del acero de la pieza después del vulcanizado, K
$B_{MC}$	Exergía almacenada en la matriz en el calentamiento, J	$T_{HC}$	Temperatura del caucho de la pieza después del vulcanizado, K
$B_{Mconv}$	Exergía transferida por la matriz al ambiente por convección, J	$T_{HMC}$	Temperatura de la matriz después del calentamiento, K
$B_{MO}$	Exergía almacenada en la matriz en un vulcanizado, J	$T_{HMO}$	Temperatura de la matriz después del vulcanizado, K
$B_{PC}$	Exergía almacenada en la plancha en el calentamiento, J	$T_{HPC}$	Temperatura de las planchas después del calentamiento, K
$B_{Pconv}$	Exergía transferida por la plancha al	$T_{HPO}$	Temperatura de las planchas al final

	ambiente por convección, J		de la jornada, K
$B_{PcC}$	Exergía transferida por la plancha al ambiente por convección en el calentamiento, J	$T_{LA}$	Temperatura del acero de la pieza antes del vulcanizado, K
$B_{PcO}$	Exergía transferida por la plancha al ambiente por convección en la operación, J	$T_{LC}$	Temperatura del caucho de la pieza antes del vulcanizado, K
$B_{PO}$	Exergía almacenada en la plancha en la operación, J	$T_{LMC}$	Temperatura de la matriz antes del calentamiento, K
$E_{TP}$	Energía total (calor) entregada a la plancha, J	$T_{LMO}$	Temperatura de la matriz antes del vulcanizado, K
$h$	Coefficiente de transferencia de calor por convección, W/m <sup>2</sup> K	$T_{LPC}$	Temperatura de las planchas antes del calentamiento, K
$m_A$	Masa de acero para una pieza, kg	$T_{LPO}$	Temperatura de las planchas al inicio de la jornada, K
$m_C$	Masa de caucho inicial para una pieza, kg	$T_{MV}(t)$	Temperatura de la matriz durante el vulcanizado, K
$m_M$	Masa de la matriz, kg	$T_{PC}(t)$	Temperatura de las planchas durante el calentamiento, K
$m_P$	Masa de las planchas, kg	$T_{PO}(t)$	Temperatura de las planchas durante el tiempo de operación total del día, K
$n_M$	Número de matrices	$t_{IC}$	Hora de inicio del calentamiento, h
$n_V$	Número de vulcanizaciones al día	$t_{iO}$	Hora de inicio de la jornada de trabajo, h
$Q_A$	Calor almacenado en la masa de acero de la pieza, J	$t_{iV}$	Tiempo de inicio del vulcanizado, h
$Q_C$	Calor almacenado en la masa inicial de caucho, J	$t_{jC}$	Hora de terminación del calentamiento, h
$Q_{MC}$	Calor almacenado en la matriz en el calentamiento, J	$t_{jO}$	Hora de terminación de la jornada de trabajo, h
$Q_{Mconv}$	Calor transferido por la matriz al ambiente por convección, J	$t_{jV}$	Tiempo de terminación del vulcanizado, h

### B-3 Prediagnóstico exergético

1- Distribución del consumo exergético en el proceso, ver tabla B-11.

Operación	Energía térmica, ter	Energía eléctrica, kWh


**Tabla B-11.** Consumo exergético en el proceso

2- Equipos consumidores de exergía directa, ver tabla B-12

Máquina	Antigüedad	Exergía disponible	Carga	Proceso	Utilización (Año)	Consumo de exergía	Régimen de equipo

**Tabla B-12.** Equipos consumidores de exergía

3- Relación de consumo de exergía con la producción, ver tabla B-13.

Etapa del proceso	Consumo por etapa del proceso de cada producto, kWh/Ton		
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa n

**Tabla B-13.** Consumo de exergía por producto

## ANEXO C

### PRINCIPIO DE PARETO

Los *diagramas de Pareto* son gráficos especializados de barras que presentan la información en orden descendente, desde la categoría mayor a la más pequeña en unidades y en porcentaje. Los porcentajes agregados de cada barra se conectan por una línea para mostrar la suma incremental de cada categoría respecto al total.

Es muy útil para aplicar el Principio de Pareto (80 – 20), que identifica el 20% de las causas que provoca el 80% de los efectos de cualquier fenómeno estudiado.

#### **C.1. Utilidad del diagrama de Pareto.**

- \* Identificar y concentrar los esfuerzos en los puntos claves de un problema o fenómeno como puede ser: los mayores consumidores de energía de la fábrica, las mayores pérdidas exergéticas o los mayores costos exergéticos.
- \* Predecir la efectividad de una mejora al conocer la influencia de la disminución de un efecto al reducir la barra de la causa principal que lo produce.
- \* Determinar la efectividad de una mejora comparando los diagramas de Pareto anterior y posterior a la mejora.

#### **C.2 Uso del diagrama de Pareto para identificar puntos clave de los costos exergéticos.**

- \* Identificar el 20% de los portadores exergéticos de las empresas que producen el 80% del consumo total equivalente, realizando un diagrama de Pareto de los consumos equivalentes de energía por portador exergético.
- \* Identificar el 20% de las áreas de la empresa que producen el 80% del consumo exergético de un portador exergético específico, realizando un

diagrama de Pareto de los consumos exergéticos de ese portador para las diferentes áreas que utilizan en la fábrica.

- \* Identificar el 20% de los equipos que producen el 80% del consumo exergético de un portador específico, realizando un diagrama de Pareto de los consumos de ese portador para todos los equipos que lo utilizan.
- \* Identificar el 20% de los equipos o áreas que producen el 80% de las pérdidas exergéticas (irreversibilidades) equivalentes de la empresa.

## ANEXO D

### TEORÍA TERMOECONÓMICA

**F.1 Exergía vista como factor de producción.** El capital, para un marxista, no es más que una acumulación del superávit del trabajo. Para los marxistas, sólo existe un factor de producción: el trabajo. A mediados del siglo XVIII el trabajo manual y la tierra fueron consideradas como los dos factores de producción. En los anteriores puntos de vista, la tierra ha sido relegada como factor de producción. Contrastando esto, la mayoría de los economistas hoy en día consideran como factores de producción el trabajo y el capital (Bonilla-06), (Valero-01).

La exergía, o trabajo termodinámico disponible, es producido por una combinación de trabajo y capital. La diferencia entre la labor humana y el trabajo termodinámico fue bastante confusa cuando la labor humana se basaba principalmente en el ejercicio muscular. La diferencia se ha ido marcando poco a poco desde que los animales, y luego las máquinas, se utilizaron para realizar las actividades que involucraban esfuerzo o potencia física, y el rol del trabajador, en la mayoría de los casos, se centraba en actividades de coordinación, control, diseño, supervisión, monitorización e inspección.

A estos factores de producción, hay que añadirle los que se extrajeron de la teoría económica neoclásica, la cual considera a la exergía como factor de producción.

Algunos economistas agregaron los materiales como factor de producción, quedando entonces cuatro factores de producción: costos de capital, costos de la labor humana, costos de la exergía y los costos de los materiales. Se puede considerar los materiales y la exergía como un solo factor denominado: exergía.

Los costos de capital normalmente están expresados en unidades monetarias debido a que no existe una variable física similar. La labor humana se expresa en horas hombre, resaltando así que existen diferentes niveles y remuneraciones (Bonilla-06), (Valero-01).

**F.2 Rendimiento o eficiencia en la teoría de producción.** A una planta química, cementera, térmica, etc., se les considera como un sistema, formado por un conjunto de subsistemas (equipos), relacionados entre sí a través de los flujos de materia, energía o información que intercambian, realizando un determinado objetivo de producción. De forma general el propósito de la producción está alentado por un aumento de la utilidad económica.

El concepto de rendimiento o eficiencia es central en toda teoría de producción. Partiendo de esto, el deseo de producir algo es externo al sistema definido previamente. Después que se realiza el diseño del sistema y su estructura funcional, deben adecuarse al objetivo de utilizar de forma eficiente los recursos disponibles (capital, materias primas, personal, etc.).

El producto es la consecuencia final del proceso productivo y los recursos disponibles, la causa material. Los interrogantes que se desatan no se hacen esperar, y son: ¿cómo se deben caracterizar, medir y evaluar estas causas material y consecuencia final en los sistemas energéticos?, ¿existe algún criterio de aplicación general con el cual juzgar la bondad o eficiencia de su diseño y funcionamiento?

La respuesta se encuentra en el segundo principio de la termodinámica, ley que afecta a todo proceso ya sea físico, biológico, económico o social y expresa que no existe ningún proceso natural que sea completamente reversible.

El segundo principio también permite cuantificar la mayor o menor irreversibilidad y eficiencia de los procesos a través de la entropía.

Si toma el propósito de producción de un proceso (producto P) y los recursos disponibles consumidos (insumo F), ambos valorados por su exergía, entonces se cumplirá la ecuación D-1:

$$F - P = I > 0 \text{ (D-1)}$$

Donde  $I$  representa la cuantificación de la irreversibilidad del proceso en términos de exergía destruida. El rendimiento termodinámico viene dado por la ecuación D-2:

$$\eta = \frac{P}{F} \leq 1 \text{ (D-2)}$$

Este número es adimensional y representa la razón universal para evaluar la calidad termodinámica de los procesos.

La inversa de la función eficiencia así definida representará el costo exergético, ver ecuación D-3:

$$K = \frac{F}{P} \geq 1 \text{ (D-3)}$$

En sentido puntual, el objetivo de la optimización energética debe encaminarse a minimizar el costo exergético unitario de los productos funcionales (maximizar la eficiencia).

**F.3 Limitaciones del análisis exergético.** La limitación con la que se encuentra el análisis exergético radica en la insuficiencia de instrumentación. En el análisis energético típico las medidas que se necesitan son las de los flujos de entrada (insumo) y salida (producto o pérdidas), pero en el análisis exergético se requiere ir más allá, ya que se busca desagregar la irreversibilidad total por equipos, necesitando medidas sistemáticas sobre los flujos internos de la instalación. Por otra parte, las normas para el cálculo del rendimiento, basadas en su mayoría en una perspectiva energética, han sido complementadas con la determinación de otros parámetros (eficacia, rendimiento politrópico, coeficiente de operación, etc.) que introducen, la potencia de diagnóstico del segundo principio.

Sin embargo, la tendencia creciente hacia una mayor instrumentación de los procesos, aunque sea por otras razones como la seguridad y su regulación automática, y la toma de conciencia paulatina acerca de su bondad, está abriendo cada vez más las puertas del mundo industrial al análisis exergético (Bonilla-06), (Valero-01).

**F.4 Teoría del costo exergético.** El denominado costo exergético no corresponde a dinero (pesos \$), sino a una cuantificación energética expresada en la forma en que se hace la contabilidad de costos. En los procesos energéticos complejos, la estructura del sistema juega un papel predominante a la hora de estudiar su eficiencia y sus costos. La teoría del costo exergético es una metodología de costos termoeconómicos que formula un procedimiento de asignación de costos basado en consideraciones termodinámicas. La esencia de estas reglas está en repercutir el costo de los recursos de cada equipo, de forma exclusiva a sus productos útiles y proporcionales a su exergía. Se trata de una técnica esencialmente numérica que permite cuantificar los costos pero que no responde de manera completa a las causas del proceso de formación de costos y en especial de los residuos, ni a la influencia que ejerce en él la estructura productiva.

Un primer paso para identificar el proceso de formación de los costos es determinar la estructura física del sistema a través de la matriz de incidencia, y relacionarla con un esquema o diagrama productivo que indique: dónde se utiliza el producto de cada componente, qué parte se utiliza como insumo en otros componentes y que parte se transforma en producto final. Por otro lado es importante determinar cuál es el origen de los recursos de cada componente, cuál proviene de recursos externos y qué parte de los productos proviene de otros equipos.

Otra limitación de las teorías de contabilidad termoeconómica es determinar el nivel de agregación adecuado para obtener los costos más precisos con la

información disponible. El conocimiento de la estructura productiva puede ayudar a buscar criterios de desagregación de los sistemas.

El diagrama insumo - producto será la clave para comprender el proceso de formación de costos de los productos o residuos y relacionar la estructura completa del sistema.

A continuación se tienen algunas definiciones de los conceptos básicos de la teoría del costo exergético:

a) *Nivel de agregación.* Se interpreta como la colección de equipos y sus relaciones que constituyen el sistema total.

El nivel de agregación depende del tipo y profundidad del análisis y de la cantidad de medidas disponibles, y permite separar la irreversibilidad total del sistema en tantas componentes como equipos se consideren. La escogencia del nivel de agregación puede afectar las conclusiones del análisis, la calidad de los resultados depende del nivel de información suministrado. Por el contrario, el analista deberá desagregar el sistema hasta que la información disponible se pueda usar de forma adecuada.

b) *Matriz de incidencia.* Esta matriz  $[A]$  muestra las relaciones entre los  $n$  componentes de un sistema a través de  $m$  flujos. Los elementos de esta matriz representan los flujos que entran y salen de los equipos; así:

$a_{ij} = 1$  si el flujo  $i$  entra al elemento  $j$

$a_{ij} = -1$  si el flujo  $i$  sale del elemento  $j$

En estado estacionario esta matriz permite expresar los balances de materia, energía y exergía de la siguiente manera:

$$[A] * [M] = 0 \quad (\text{Flujo de materiales})$$

$$[A] * [H] = 0 \quad (\text{Flujo de energía})$$

$$[A] * [B] = I \quad (\text{Flujo de exergía})$$

Donde  $M$ ,  $H$  y  $B$  son vectores ( $m \times 1$ ) que contienen la masa, energía y exergía de cada uno de los flujos. El elemento  $i$ -ésimo del vector  $I$  ( $n \times 1$ ) representa la exergía destruida en dicho componente debido a irreversibilidades internas y externas.

A partir de ellas, se pueden encontrar otras matrices de incidencia para los flujos insumo  $Af(n \times m)$  y los flujos producto  $Ap(n \times m)$ , tales que cumplan:

$$[Af] * [Ap] = A$$

$$[Af] * [B] = F$$

$$[Ap] * [B] = P$$

Siendo  $F$  y  $P$  vectores ( $n \times 1$ ), cuya componente  $i$ -ésima contiene la exergía del insumo  $F_i$  y de producto  $P_i$ , respectivamente.

Con base en el concepto de eficiencia se define el rendimiento exergético de un subsistema, como la exergía producida por unidad de exergía de los recursos utilizada:

$$\eta = \frac{P_i}{F_i} \quad (\text{D-4})$$

Y el costo exergético, como se expresó anteriormente:

$$k_i = \frac{F_i}{P_i} \quad (\text{D-5})$$

Por tanto, se puede expresar para todo el sistema en forma unitaria como:

$$\eta_t = \frac{P_t}{F_t} \quad (\text{D-6})$$

$$k_t = \frac{F_t}{P_t} \quad (\text{D-7})$$

Siendo  $F_t$  el insumo del sistema completo y  $P_t$  el producto final (Bonilla-06), (Valero-01).

**F.5 Costo exergético.** La exergía no depende del proceso utilizado y representa el costo mínimo necesario. Como los procesos reales no son completamente reversibles se tiene:

$$F - P = I \geq 0 \quad (\text{D-8})$$

El costo, en términos de exergía, de la obtención de dichos productos, deberá ser igual a la exergía de los recursos consumidos.

Dado un sistema cuyos límites, nivel de agregación y propósito productivo han sido definidos, se denomina costo exergético,  $B^*$ , de un flujo físico a la cantidad necesaria de exergía para producirlo. El costo exergético unitario corresponde al costo exergético de un flujo por unidad de exergía así:

$$k_i = \frac{B_i^*}{B_i} = (\text{D-9})$$

Cuando en un sistema se obtiene un único producto, es muy sencillo calcular su costo exergético a partir de su definición. Cuando el flujo es interno, sale de un componente y entra en otro, la exergía consumida para producirlo puede ser calculada como la suma de todos los consumos de exergía en los componentes anteriores, hasta llegar a los recursos de entrada al sistema. Cuando existen bifurcaciones, los costos se distribuyen de forma proporcional a la exergía.

El costo de un flujo es una propiedad emergente, significa que no existe como una propiedad termodinámica de un flujo aislado, sino que debe ir asociado a un proceso de producción. Se determina no el costo de un flujo aislado, sino de un conjunto de flujos internos y externos interrelacionados. La distinción de flujo interno o externo no depende de elemento físico alguno sino de los límites que se definen para el sistema.

El problema de asignación de costos exergéticos puede ser formulado de la siguiente manera: *Dado un sistema para el que se han definido sus límites y nivel de agregación, indicando los elementos que lo componen, ¿cómo obtener el costo de todos los flujos que los interrelacionan?*

Para resolver este problema, la teoría del costo exergético define un procedimiento matemático, basado en las siguientes proposiciones:

**P1** = El costo exergético es una propiedad conservativa. Para cada componente del sistema la suma de todos los costos exergéticos de los flujos de entrada es igual a la suma de los costos exergéticos de los flujos de salida. En forma matricial y en ausencia de valoraciones externas el balance de costos exergéticos puede escribirse como:

$$[A] * [B^*] = 0$$

Donde  $B^*$  es un vector (mx1) cuyas componentes contienen los valores de los costos de los flujos. Esta propiedad define tantas ecuaciones como elementos en la instalación.

**P2** = El costo exergético de los flujos depende de los costos de los recursos de entrada. En ausencia de asignaciones externas, el costo de los flujos de entrada al sistema es igual a su exergía. Su costo exergético unitario es uno. Esta propiedad permite definir tantas ecuaciones como flujos de entrada al sistema.

**P3** = Todos los costos generados en el proceso productivo deben ser incluidos en el costo final de los productos. En ausencia de asignaciones externas, se asigna un costo nulo a los flujos de pérdidas. Esto permite definir tantas ecuaciones como flujos de pérdida.

Si se quiere calcular el costo de cada uno de los  $m$  flujos relevantes en el nivel de agregación considerado para el análisis, será necesario escribir  $m$  ecuaciones independientes. Sin considerar los flujos de pérdidas, las preposiciones definidas hasta ahora permiten definir  $n+e$  ecuaciones ( $n$ , proposición 1, y  $e$ , proposición 2).

Si un componente tiene más de un flujo de salida, tendrá  $S_i - 1$  bifurcaciones, y su número total viene dado por:

$$\sum_{i=1}^n (S_i - 1) = \sum_{i=1}^n S_i - n = m - n - e \quad (\text{D-10})$$

Entonces el número de ecuaciones restantes, deberán definirse en cada una de los componentes que tengan bifurcaciones.

El costo en las bifurcaciones se asigna atendiendo las siguientes preposiciones:

**P4** = Si el producto de una componente esta formado por varios flujos de la misma calidad termodinámica, todos ellos tienen el mismo costo exergético unitario.

$$\frac{B_j^*}{B_j} = \frac{B_h^*}{B_h}$$

Esta proposición se basa en el hecho de que si en un equipo se identifican varios productos, su proceso de formación ha sido el mismo y se asigna un costo proporcional a su exergía.

**P5** = Si un flujo de salida de una componente es parte del insumo de dicha componente, su costo exergético es el mismo que el del flujo de entrada del que proviene.

$$\frac{B_j^*}{B_j} = \frac{B_i^*}{B_i}$$

Esta proposición se basa en el hecho de que el flujo de salida es una parte del flujo de entrada no utilizado en el proceso y por tanto tienen el mismo costo unitario.

De forma general, el sistema de ecuaciones para determinación de los costos exergéticos es:

$$[Aa] * [B^*] = [Y^*]$$

$$[B^*] = [Aa]^{-1} * [Y^*]$$

$$[Aa] = \begin{pmatrix} A \\ ae \\ ax \end{pmatrix}$$

$$[Y^*] = \begin{pmatrix} -Z \\ we \\ o \end{pmatrix}$$

Siendo  $[Aa](n \times m)$  una matriz formada por la matriz de incidencia  $A(n \times m)$ , correspondiente a los coeficientes de las ecuaciones de la proposición P1; la matriz  $ae$  ( $e \times m$ ) de coeficientes asociados a las ecuaciones de la proposición P2, y P3; y la matriz  $ax$  ( $m-n-e \times m$ ) de coeficientes correspondientes a las proposiciones P4 y P5. El vector  $Y^*(m \times 1)$  contiene los valores de las asignaciones de recursos externos. Este vector puede expresarse tanto en términos de exergía, como en términos económicos (Bonilla-06), (Valero-01).

**F.6 Costo exergoeconómico.** El costo exergoeconómico de un flujo o producto es la suma de dos contribuciones: la primera que procede del costo de la exergía de

entrada a la planta necesaria para producir dicho flujo, y la segunda, que engloba el resto de los costos originados en el proceso productivo.

La diferencia entre los costos termodinámicos (kJ) y los económicos (\$) corresponde al costo unitario de la energía (\$/kJ), con lo cual se plantea la conexión entre la termodinámica y la economía (Bonilla-06), (Valero-01).

**F.7 Aplicaciones.** La aplicación de la teoría general de sistemas permite desglosar la irreversibilidad o ineficiencia de un sistema, por complejo que sea, por equipos o causas (análisis exergético); y también, calcular los costos exergéticos de sus flujos internos y productos finales, y establecer estimaciones precisas de la repercusión en consumo de los insumos ocasionados por el mal funcionamiento de cualquiera de los equipos que componen la estructura del sistema (gestión exergética).

Sin embargo, la evaluación final de cualquier proceso debe realizarse en términos monetarios incorporando al costo de los flujos internos y productos, todos y cada uno de los recursos utilizados. Aquellos sistemas industriales en que predominan los procesos de transformación energética, entendidos en sentido amplio, vienen subordinados por dos ambientes relacionados entre sí: un ambiente físico constituido por el ambiente de referencia y los recursos energéticos y de materias primas; y otro ambiente, el económico caracterizado por el precio de mercado de estos últimos.

Cuando se trabaja bajo la óptica del ambiente físico, la variable relevante es su costo exergético, debido a que se analiza el proceso de formación del costo de los flujos internos y los productos de un sistema. La variable costo exergético informa de la cantidad real de exergía que ha sido necesaria para producir los productos.

Esta dependerá, tanto de la estructura del sistema (relación funcional entre equipos y flujos) como de la calidad del funcionamiento (rendimiento exergético) de los

equipos. Una mejora de la estructura o de la eficiencia de los equipos implicará un menor consumo de recursos.

Cuando se considera el ambiente económico, la visión se amplía al introducir dos factores adicionales en el análisis. En primer lugar los recursos energéticos y de materias primas procesados tendrán una escala de costos o precios de mercado no ligada necesariamente a sus exergías y sus materiales respectivos. En segundo lugar deberán tenerse en cuenta como fuentes de costo, la amortización y mantenimiento de la instalación que posibilita la existencia del proceso productivo. El detalle de la optimización económica de un sistema resulta entonces mucho más complejo que el de su optimización puramente termodinámica, pues ahora son varios los factores de producción que entran en competencia. Así, normalmente, la mejora de su estructura o el incremento de la eficiencia de los equipos, implicarán menos consumo de insumos pero llevará consigo un incremento de costos de capital.

También puede plantearse la posibilidad de sustitución económica de los recursos que constituyen el insumo, bien entre sí o por otros recursos alternativos. Se encuentra entonces que la función a minimizar es el costo económico de los productos finales (Bonilla-06), (Valero-01).

# Bibliografía

**BARBOSA, Andrés y JIMÉNEZ, Ernesto.** Propuesta para un URE desde un enfoque termoeconómico en la facultad de salud de la UIS y el HUS. Proyecto de grado (en construcción). Director: Dr. Gabriel Ordóñez Plata; codirector: Ing. Carlos Cárdenas Guerra. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2006.

**BERNAL JAIMES, Juan y ARBOLEDA SALAZAR, Omar.** Estudio sobre el ahorro de energía eléctrica en las instalaciones industriales y comerciales. Bucaramanga, 1980. p.34. Proyecto de grado para optar el título de ingeniero electricista. Dirigido por el Ingeniero Carlos Ortiz. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

**BONILLA, William.** Propuesta para un uso racional y eficiente de la energía en el acueducto metropolitano de Bucaramanga en el sistema subestación alimentadora sistema de bombeo de la Planta Bosconia. Proyecto de grado. Director: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo; codirector: Ing. Carlos Cárdenas Guerra. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2006.

**CENTRO PILOTO DE CAPACITACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE CENTRALES TÉRMICAS Y ESTUDIOS ENERGÉTICOS.** Proyecto CLÍOPE caso Termobarranca. Bucaramanga. Informe. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Mecánica. 61 p.

**CENGEL, Yunus. Boles Michael.** (2003). Termodinámica 4ta edición. Editorial Mc Graw Hill.

**DÍAZ, Cristian.** Programa de URE en la UIS - sede Bucarica. Proyecto de grado (en construcción). Director: Dr. Gabriel Ordóñez Plata; codirector: Ing. Carlos Cárdenas Guerra. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2006.

**DINCER, Ibrahim. CENGEL Yunus.** (2001). *Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering.* [www.mdpi.org/entropy/](http://www.mdpi.org/entropy/)

**GONZÁLEZ, Carolina y SALAZAR, Pedro.** Elaborar un programa URE desde un enfoque termoeconómico en el Parque Tecnológico Guatiguará. Proyecto de grado (en construcción). Director: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo; codirector: Ing. Carlos Cárdenas Guerra. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2006.

**GONZÁLEZ, Enrique.** Taller promoción de tecnologías de eficiencia energética y energías renovables. Buenos Aires, 2005.

**GÖRAN, Wall.** Exergetics. Exergy, ecology, democracy. [www.exery.es/exergetic.pdf.1998](http://www.exery.es/exergetic.pdf.1998).

**GÖRAN, Wall.** A useful concept. Physical resource theory group. Göteborg. 3rd edition. [www.exery.es/ausefulconcept.pdf](http://www.exery.es/ausefulconcept.pdf), 1998.

**GUALLAR J. y Valero A.** Termodinámica y costes en una industria azucarera: análisis termodinámico. En: Revista alimentación, Equipos y Tecnología. Madrid, (septiembre-octubre); p. 199-210. 1988.

**JARAMILLO, Hebert** (1999). Gestión energética en la industria. Escuela de estudios gerenciales. Universidad ICESI. Cali – Colombia. [www.icesi.edu.co/es/publicaciones/publicaciones/contenidos/73/hjaramillo\\_gestion-energetica.pdf](http://www.icesi.edu.co/es/publicaciones/publicaciones/contenidos/73/hjaramillo_gestion-energetica.pdf)

**LOZANO M.A. VALERO A. GUAYAR J.** *Teoría del coste exergético. Conceptos básicos.* <http://circe.cps.unizar.es/>, 1997.

**OROZCO**, Carlos (2004). Ahorro de energía y eficiencia energética en sistemas de aire acondicionado y refrigeración. Universidad Tecnológica de Pereira. Escuela de ingeniería mecánica.

**OSMA, Germán.** Uso racional y eficiente de la energía: metodología para la caracterización exergética de equipos utilizados en procesos productivos del sector metalmeccánico. Proyecto de grado (en construcción). Director: Dr. Gabriel Ordóñez Plata; codirector: Ing. Carlos Cárdenas Guerra. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2006.

**PÉREZ**, José Ignacio. Energía y desarrollo sostenible. Discurso de aceptación de la membresía de la real academia de ingeniería. España, 2004.

**POSADA, Juan Carlos y THERÁN, Gustavo.** Propuesta de un plan de uso racional y eficiente de la energía: para los edificios de la facultad de ingenierías físico-químicas (planta de aceros) de la UIS. Proyecto de grado. Director: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo; codirector: Ing. Carlos Cárdenas Guerra. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander, 2006.

**SHUKUYA** Masanori; Hammache Abdelaziz. (2002). Introduction to the concept of exergy - for a better understanding of low-temperature-heating and high-temperature-cooling systems.  
<http://www.lowex.net/downloads/Introduction%20to%eot%20of%20exergy.pdf>

**TORRA**, Carlos. Uso racional de la energía en los sectores productivos. Instituto Catalán de la energía. Zaragoza – España, 2004.

**ZEMANSKY, M.w.** Termodinámica técnica fundamental. España, Reverté, 1972.

**WANG Y.** and Feng X. Exergy analysis involving resource utilization and environmental influence. [on line]. USA:2000.. [http:// Wangexergy.us](http://Wangexergy.us)