

**APLICACIÓN DEL ANÁLISIS ENERGÉTICO A CIRCUITOS DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA EN EL HOSPITAL UNIVERSITARIO DE SANTANDER.**

**ERNESTO JIMÉNEZ PEÑA  
NOLBERTO ANDRÉS BARBOSA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2007**

**APLICACIÓN DEL ANÁLISIS EXERGÉTICO A CIRCUITOS DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA EN EL HOSPITAL UNIVERSITARIO DE SANTANDER.**

**ERNESTO JIMÉNEZ PEÑA  
NOLBERTO ANDRÉS BARBOSA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar  
al título de Ingeniero Eléctrico**

**Director  
Dr. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA**

**Codirector  
Magister. CARLOS CÁRDENAS GUERRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2007**

## CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	1
1. TERMOECONOMÍA EN PROCESOS INDUSTRIALES	4
1.1 Principios De La Termodinámica	4
1.1.1 Ley cero de la termodinámica	4
1.1.2 Primer principio: “conservación de la energía”	4
1.1.3 Segundo principio	5
1.1.4 Tercer principio: “el estado cero”	6
1.2 EXERGIA	7
1.3 TERMOECONOMÍA	9
1.3.1 Balance energético	10
1.3.2 Balance exergético	10
1.3.3 Teoría del costo exergético	10
1.3.4 Costo exergético	12
2. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA AUDITORÍA ENERGÉTICA	17
2.1 PRIMER PASO: RECOLECCIÓN, ANÁLISIS, CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y CONCERTACIÓN ADMINISTRATIVA.	17
2.2 SEGUNDO PASO: DESARROLLO DEL TRABAJO	19
2.3 TERCER PASO: ELABORACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE GESTIÓN EXERGÉTICA.	20
3. SELECCIÓN DE CIRCUITOS	21
3.1 SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO	24
3.2 UNIDAD DE IMAGENOLOGÍA	26
3.3 CALDERA	26
4. CARACTERIZACIÓN TERMOECONÓMICA DE PROCESOS INDUSTRIALES	29
4.1 ANÁLISIS TERMOECONÓMICO DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO	29
4.1.1 Nivel de desagregación del aire acondicionado	30
4.2 análisis termoeconómico de la unidad de imagenología	36
4.2.1 Nivel de desagregación de un equipo de la unidad de imagenología	37
4.3 ANÁLISIS TERMOECONÓMICO DEL SISTEMA DE CALDERAS	39
4.3.1 nivel de desagregación de la caldera	40
5. PLAN DE USO RACIONAL Y EFICIENTE DE LA ENERGÍA PROPUESTO	46
5.1 AIRE ACONDICIONADO	46
5.2 CALDERAS	44

5.3 UNIDAD DE IMAGENOLOGÍA	50
6. CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFÍA	53

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama T-S	5
Figura 2. División energética.	7
Figura 3. División exergética.	8
Figura 4 Bloque asignación de costos.	14
Figura 5 Bloque asignación de costos.	15
Figura 6 Metodología empleada para el desarrollo de la gestión exergética.	18
Figura 7 Diagrama de conexiones aire acondicionado	21
Figura 8 Tensión tablero de control aire acondicionado	24
Figura 9 Corriente tablero de control aire acondicionado	24
Figura 10. Diagrama de conexiones equipos de medida unidad de Imagenología	25
Figura 11. Diagrama de conexiones equipos de medida unidad de calderas.	26
Figura 12. Funcionamiento motobombas de las calderas de vapor.	28
Figura 13. Balance de masa aire acondicionado.	29
Figura 14. Balance de energía aire acondicionado.	30
Figura 15. Balance de exergía aire acondicionado.	30
Figura 16. Esquema de funcionamiento del aire acondicionado	30
Figura 17. Nivel de desagregación propuesto incluyendo los mezcladores y derivadores.	32
Figura 18. Nivel de desagregación más simple	33

Figura 19. Nivel de desagregación propuesto para el aire acondicionado con mezcladores y derivadores.	35
Figura 20. Balance de masa de la unidad de imagenología.	37
Figura 21. Balance de energía de la unidad de imagenología.	37
Figura 22. Balance de exergía de la unidad de imagenología.	37
Figura 23. Diagrama de conexiones, unidad de imagenología	38
Figura 24. Esquema funcionamiento del sistema de radiografía.	38
Figura 25. Balance de masa de la caldera	39
Figura 26. Balance de energía de la caldera	40
Figura 27. Balance de exergía de la caldera	40
Figura 28. Esquema de funcionamiento de la caldera	41
Figura 29. Nivel de desagregación propuesto incluyendo los mezcladores.	42
Figura 30. Nivel de desagregación con los mezcladores.	43
Figura 31. Sistema de acondicionamiento de aire por compresión.	54
Figura 32. Sistema de acondicionamiento de aire por absorción.	55
Figura 33. Compresor.	56
Figura 34. Condensador de tiro natural	56
Figura 35. Condensador de tiro forzado	57
Figura 36. Condensador tubular enfriado por agua	58
Figura 37. Unidad evaporadora industrial	59
Figura 38. Válvula de expansión termostática.	62
Figura 39. Equipo de radiografía	62
Figura 40. Diagrama esquemático de un tubo de rayos x	63

Figura 41. Vista frontal del tomógrafo computarizado	64
Figura 42. Mamógrafo	65
Figura 43. Caldera	66
Figura 44. Caldera acuotubular	67
Figura 45. Caldera pirotubular	68
Figura 46. Caldera tipo horizontal	69
Figura 47. Caldera tipo horizontal	69
Figura 48. Componentes de la corriente total.	73

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparativo entre termodinámica y economía	10
Tabla 2. Matriz de producción.	16
Tabla 3. Medidas en el sistema del aire acondicionado	22
Tabla 4. Medidas realizadas en bornes de algunos equipos de la unidad de imagenología.	25
Tabla 5. Registro de mediciones sistema de calderas.	27
Tabla 6. Ecuaciones termodinámicas para el sistema de aire acondicionado	31
Tabla 7. Insumo-Producto-Residuo de la figura 4.4	32
Tabla 8. Insumo-Producto-Residuo de la figura 3.6	33
Tabla 9. Matriz de producción	34
Tabla 10. Vector de recursos externos	34
Tabla 11. Insumo-Producto-Residuo de la figura 4.7	35
Tabla 12. Matriz de producción	36
Tabla 13. Vector de recursos externos	36
Tabla 14. Ecuaciones termodinámicas para el aparato de radiografía.	38
Tabla 15. Ecuaciones termodinámicas para el sistema de caldera	42
Tabla 16. Insumo-Producto-Residuo del sistema de la figura 4.18.	43
Tabla 17. Matriz de producción	44
Tabla 18. Vector de recursos externos	45
Tabla 19. Tipo de compresor vs Consumo Promedio	47

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág</b>
Anexo A. Sistema de aire acondicionado	53
Anexo B. Unidad de imagenología.	61
Anexo C. Unidad de calderas	66
Anexo D. Desarrollo termodinámico de las ecuaciones que rigen los flujos energéticos eléctricos.	72
Anexo E. Desarrollo termodinámico de las ecuaciones que rigen los flujos energéticos para gases ideales.	74
Anexo F. Desarrollo termodinámico de las ecuaciones que rigen los flujos energéticos para gases combustibles.	77

## RESUMEN

Título: APLICACIÓN DEL ANÁLISIS EXERGÉTICO A CIRCUITOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL HOSPITAL UNIVERSITARIO DE SANTANDER.\*

Autor: ERNESTO JIMÉNEZ PEÑA Y NOLBERTO ANDRES BARBOSA MORALES.\*\*

Palabras Claves: Termoeconomía, exergético, calderas, energético.

El uso racional y eficiente de la energía se ha convertido en una necesidad a nivel mundial, dada la cercanía de una posible crisis energética que desde hoy empieza a evidenciarse. La termoeconomía mediante la aplicación del método exergético, brinda herramientas novedosas y de gran utilidad para analizar y determinar posibles focos de desperdicio energético, haciendo más fácil la tarea de encontrar alternativas de ahorro.

En el presente trabajo, se busca establecer la factibilidad de la aplicación del método exergético en el análisis de circuitos eléctricos para poder así comprobar la versatilidad del método, y poder proponer una auditoria exergética con el fin de ampliar los horizontes en cuanto a métodos de diagnóstico se refiere y poder optimizar dichos procesos. Dicho trabajo se realizó en el Hospital Universitario de Santander, lugar en donde se analizaron distintas unidades como lo son el sistema de calderas, las unidades de aire acondicionado y la unidad de imagenología, unidades que se eligieron debido a su consumo energético (ya sea eléctrico o de otro carácter), y en donde la metodología empleada es una muestra del procedimiento de una auditoria exergética.

Aquí también se realiza una propuesta de ahorro en donde se sugiere desde cambios de carácter administrativos como cambios en el mantenimiento y capacitaciones hasta propuestas de cambio de tecnología.

---

\* Proyecto de Grado.

\*\* Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Gabriel Ordóñez Plata

## ABSTRACT

Title: APPLICATION OF THE ANALYSIS EXERGÉTICO TO CIRCUITS OF ELECTRIC POWER IN THE UNIVERSITY HOSPITAL DE SANTANDER.\*

Author: ERNESTO JIMÉNEZ PEÑA Y NOLBEF JRES BARBOSA MORALES.\*\*

Index Terms: Termoeconomia, exergetic, boilers, energy.

The rational and efficient use of the energy has become a necessity at world-wide level, given the proximity of a possible power crisis that from today it begins to demonstrate itself. The termoeconomia by means of the application of the exergetic method, offers novel and very useful tools to analyze and to determine possible centers of power waste, making the task of finding saving alternatives easier.

In the present work, one looks for to establish the feasibility of the application of the exergetic method in the analysis of electrical circuits to thus be able to verify the versatility of the method, and to be able to propose a exergetic audit with the purpose of extending the horizons as far as diagnosis methods talks about and to be able to optimize these processes. This work was made in the Hospital Universitario of Santander, place in where different units were analyzed like are it the system of boilers, the conditioned air units and the unit of imagenologia, units that were chosen due to their power consumption (or electrical or another character), and in where the used methodology is a sample of the procedure of a exergetic audit.

Here also a saving proposal is made in where it suggests from administrative changes of character like changes in the maintenance and qualifications to proposals of change of technology.

---

\* Project of grade.

\*\* Faculty of Physical-mechanical. Electric, Electronic school of Engineerings and of Telecommunications. Manager Gabriel Ordóñez Plata.

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se ha iniciado un proceso de concientización en cuanto al Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) y a las aplicaciones basadas en la utilización de energías no convencionales. Fue luego de la primera gran crisis energética del planeta ocurrida en el año 1973, la cual se consideró fue el primer llamado de atención en la globalización económica que se aproximaba y donde el control de grupos de poder podrían poner en crisis al mundo, en uno de los intercambios básicos de cualquier sistema, el energético, en donde la elaboración de planes de uso racional y eficiente de la energía empezó a constituirse como un camino necesario para el desarrollo industrial.

A nivel nacional, el Estado tiene como propósito difundir el URE, condición necesaria para la sustentabilidad energética y ambiental de la nación a largo plazo, la disminución de los costos de energía y la mitigación de problemas ambientales asociados a la producción, transporte, distribución y consumo de fuentes energéticas del país. Por esto, surge la necesidad de implementar metodologías que permitan realizar ahorros significativos, en cuanto al consumo de energéticos y al costo de los mismos se refiere.

Las medidas para implementar URE en el país, deberán amoldarse a los parámetros presupuestarios. Es decir, para bajar los consumos energéticos se debe utilizar más el ingenio, generando ideas factibles a bajo costo como la de las inversiones en sistemas electrónicos de control, sistemas eficientes de iluminación, balastos electrónicos o de bajo consumo, motores eficientes, cogeneración, etc. Para implementar este tipo de medidas, el primer paso es realizar los estudios pertinentes que establezcan la factibilidad de estos cambios.

Es importante enfatizar que se deben establecer sectores en los cuales se puedan implementar acciones de URE. Allí se deben realizar los estudios pertinentes, los cuales permitirán conocer el estado actual del sistema y de igual manera plantear posibles soluciones y medidas a tomar para que se realice un adecuado uso de la energía.

El uso de la energía en el sector Hospitalario tanto en la forma de fluido eléctrico como de combustible, las pérdidas de energía en los procesos de intercambio de calor y los gastos de operación y mantenimiento representan parte importante del costo de los procesos de producción.

Las condiciones actuales han coadyuvado a los sectores que consumen energía a reestructurar sus procesos, buscando con esto un aumento en la eficiencia de los mismos. Esta reestructuración por un lado consiste en realizar un control del proceso a partir de sistemas avanzados, y que solo unos pocos sectores productivos los poseen por su costo; por otro lado, pequeñas y medianas

empresas acuden a la llamada gestión energética la cual posiblemente garantice la estructuración y reducción de los consumos energéticos.

La metodología empleada para la realización de este proyecto, consiste en diagnosticar, evaluar y analizar algunos elementos del sistema desde la óptica del análisis termoeconómico, dentro del esquema de la gestión energética. La gestión energética, es un área de la ingeniería que aplica una avanzada tecnología. Requiere la instalación de aparatos de monitorización y control con el objetivo de reducir los consumos de energía. La inversión en proyectos de ahorro de energía permite obtener ahorros económicos que pueden reinvertirse una y otra vez para optimizar el sistema y obtener un ahorro cada vez mayor.

Estudios realizados en varios países han demostrado que se puede ahorrar entre un 20 y un 30% de la energía consumida en cualquier proceso, a través de inversiones rentables encaminadas a incrementar los niveles de eficiencia en el aprovechamiento y explotación de los recursos energéticos; éstas por lo general no implican replanteos integrales de la instalaciones y se recuperan en el corto y mediano plazo (máximo dos años).

Las simples medidas técnico-organizativas (no requieren inversión) que se deriven de un estudio energético y una disciplina consciente en la explotación de estos recursos, en breves plazos conllevan a ahorros significativos que superan con creces los costos de las auditorías energéticas.

El objetivo de este trabajo de grado es establecer criterios a partir del análisis termoeconómico que permitan hacer un uso racional y eficiente de la energía eléctrica en procesos de alto consumo de energía eléctrica del Hospital Universitario de Santander (HUS). La forma como se aborda el análisis en el HUS permite establecer una metodología que puede ser aplicada a otros procesos que requieran el uso de la energía.

Este documento se ha organizado en seis capítulos y seis anexos. En el primer capítulo se expone la teoría referente a la teoría a aplicar en una auditoría exergética, se presentan los temas que permiten plantear las ecuaciones para el desarrollo de ésta auditoría. Los pasos de la metodología a seguir, se describen en el capítulo dos. En el tercer capítulo se justifica el porqué la selección de los procesos de aire acondicionado, la unidad de imagenología y las calderas del HUS.

La ecuaciones que permiten realizar el análisis termoeconómico de los sistemas escogidos se plantea en el capítulo cuarto mientras que en el capítulo quinto se proponen, luego de haberse realizado el análisis exergético, una serie de recomendaciones que permitirán que los procesos sean más eficientes y presenten un consumo más bajo de energéticos.

Finalmente, en el capítulo sexto se plasmarán las conclusiones y recomendaciones más relevantes de este trabajo.

En los anexos se presenta la teoría sobre el funcionamiento y componentes de cada sistema escogido. Además de esto, se realiza el análisis matemático de las ecuaciones termodinámicas que permiten plantear el análisis termoeconómico del sistema seleccionado.

# 1 TERMOECONOMÍA EN PROCESOS INDUSTRIALES

La termoeconomía está fundamentada en los principios de la termodinámica y la economía, los cuales permiten definir los conceptos básicos necesarios para realizar una gestión exergética, pilares que sustentan el fundamento teórico de este trabajo.

## 1.1 PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA

La termodinámica es la rama de la física que estudia la energía, la transformación entre sus distintas manifestaciones, como el calor, y su capacidad para producir un trabajo. El concepto de una cantidad que se conserva es importante en muchos campos de la ciencia y se basa en experiencias comunes, como todas las leyes físicas empleadas en la termodinámica clásica, los principios o leyes no pueden ser probadas, sino que son enunciados de los fenómenos observados. Dentro de los principios de la termodinámica se encuentran 4 leyes o principios fundamentales los cuales se tratarán a continuación.

**1.1.1 Ley cero de la termodinámica.** Cuando dos sistemas están en equilibrio mutuo, comparten una determinada propiedad. Esta propiedad se puede medir, y se le puede asignar un valor numérico definido. Una consecuencia de ese hecho es el principio cero de la termodinámica, que afirma que si dos sistemas distintos están en equilibrio termodinámico con un tercero, también tienen que estar en equilibrio entre sí. Esta propiedad compartida en el equilibrio es la temperatura.

Si uno de estos sistemas se pone en contacto con una fuente térmica que se encuentra a una temperatura determinada, el sistema acabará alcanzando el equilibrio termodinámico con su entorno, es decir, llegará a tener la misma temperatura que éste.

Así, la temperatura de un sistema tiene significado solamente si este se encuentra en equilibrio. La temperatura es un concepto para un sistema visto desde su totalidad [Ref 1].

**1.1.2 Primer principio: “Conservación de la energía”.** La energía no puede ser creada ni destruida”.

La cantidad de energía transferida a un sistema en forma de calor más la cantidad de energía transferida en forma de trabajo sobre el sistema es igual a un cambio en la energía total (cinética, potencial e interna) (ver ecuación 1.1).

$$\partial E = \partial Q + \partial W \quad (1.1)$$

Donde:

- $\partial E$  = Cambio en la energía total del sistema.
- $\partial Q$  = Energía transferida al sistema.
- $\partial W$  = Energía transferida en forma de trabajo sobre el sistema

El calor y el trabajo son mecanismos por los que los sistemas intercambian energía entre sí.

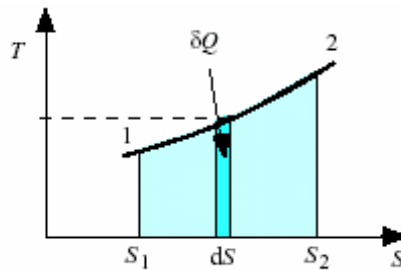
Es erróneo hablar de producción de energía, en vez de ello se podría decir abastecimiento de energía. Por la misma razón el consumo de energía es imposible, la energía antes y después de un cambio de estado es la misma.

**1.1.3 Segundo principio.** La segunda ley de la termodinámica da una definición precisa de una propiedad llamada entropía. La entropía se puede considerar como una medida de lo próximo o no que se halla un sistema al equilibrio; también se puede considerar como una medida del desorden (espacial y térmico) del sistema. La segunda ley afirma que la entropía, o sea, el desorden, de un sistema aislado nunca puede decrecer. Por tanto, cuando un sistema aislado alcanza una configuración de máxima entropía, ya no puede experimentar cambios: ha alcanzado el equilibrio.

El trabajo puede ser ilustrado como áreas en un diagrama presión/volumen (diagrama P-V) [Ref 2]. Igualmente, el calor [Q] puede ser ilustrado como área en un diagrama temperatura/entropía (diagrama T-S, figura 1).

El área bajo la curva (T(S)) entre  $S_1$  y  $S_2$  es el calor contenido Q entonces se tiene que (ecuación 1.2):

**Figura 1. Diagrama T-S**



$$\partial Q - T \cdot \partial S = 0 \quad (1.2)$$

o

$$\partial S = \frac{\partial Q}{T} \quad (1.3)$$

dado en [J/K].

Donde:

- S = Entropía.
- T = Temperatura

Cuando el calor  $\delta Q$  es transferido a un sistema, esto es, la temperatura del calor muestra que la entropía está siendo transferida simultáneamente. Por integración se obtiene el valor de la entropía (ver ecuación 1.4).

$$\Delta S = \int_1^2 \partial S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} \quad (1.4)$$

La entropía es una variable de estado, función solo dependiente del estado del sistema. Por lo tanto se puede expresar la entropía en función de las variables de estado presión, volumen y temperatura.

Un proceso reversible es un proceso donde siempre se puede regresar al estado inicial revirtiendo el proceso seguido. Los procesos donde no se asumen pérdidas y se suponen en equilibrio no diferencian temperatura ni presión. Esto hace que el proceso tome un tiempo infinito y se vuelva irreal. Mediante la segunda ley se pueden considerar procesos irreversibles que es lo que se posee en la realidad.

**1.1.4 Tercer principio.** “El estado cero”. Puede enunciarse como: “el cero absoluto no se puede alcanzar por ningún procedimiento que conste de un número finito de pasos. Es posible acercarse al cero absoluto, pero nunca puede llegarse a él”.

El segundo principio de la termodinámica permite calcular las variaciones de entropía entre dos estados de equilibrio, y para determinar el valor absoluto en un cierto estado de equilibrio es necesario adoptar arbitrariamente un cierto estado de referencia en el que la entropía se anule.

Este estado se denomina estado cero, entonces la entropía en cualquier otro estado de equilibrio, se calcula por la ecuación 1.5:

$$S_1(p_1, T_1, V_1) - S_0(p_0, T_0, V_0) = \int_0^1 \frac{\partial Q}{T} \quad (1.5)$$

Donde  $S_0(p_0, T_0, V_0) = 0$ , por ser el estado cero.

Se tiene el valor de la entropía como lo establece la ecuación 1.6.

$$S_1(p_1, T_1, V_1) = \int_0^1 \frac{\partial Q}{T} = \int_{(p_0, T_0, V_0)}^{(p_1, T_1, V_1)} \frac{\partial Q}{T} [J] \quad (1.6)$$

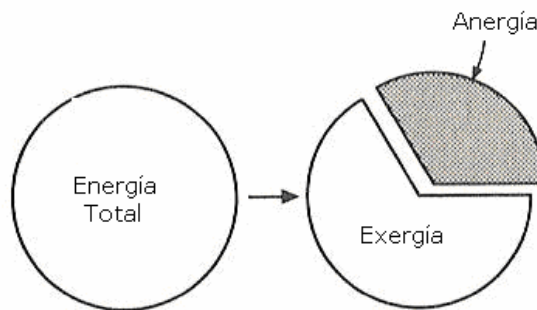
Resulta lógico entonces, intentar adoptar como estado de referencia para la entropía aquel en el que la temperatura sea  $T_0 = 0 \text{ K}$ , se encuentra entonces que la entropía de cualquier sistema es nula en el cero absoluto, pero como esta temperatura no se puede alcanzar, la entropía se hará presente, pese a que el sistema presente un grado de baja energía.

## 1.2 EXERGÍA

La exergía se define como la máxima cantidad de trabajo que un subsistema puede hacer sobre sus alrededores hasta alcanzar el equilibrio termodinámico en forma reversible. La exergía es proporcional a la futura producción de entropía pero con unidades de energía.

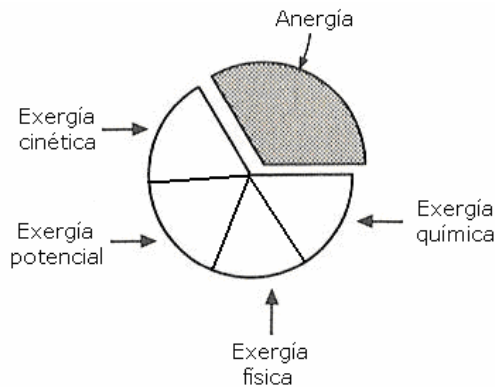
La exergía (sinónimo de calidad de la energía) es función de estado. A partir de esta definición, la energía puede considerarse constituida por dos partes, una de ellas "útil", llamada exergía, y otra "inútil" o perdida, denominada anergía (ver figura 2).

**Figura 2. División energética**



La exergía tiene cuatro componentes (ver figura 2): exergía cinética (ligada al movimiento relativo), exergía potencial (ligada a las diferencias de potencial gravitatorios o electromagnéticos), exergía física (ligada a los deltas de presión y/o temperatura), y la exergía química (ligada a diferencias en la composición química). Las dos primeras son completamente transformables en trabajo y por tanto coinciden con su energía [Ref 3].

**Figura 3. División exérgica**



La componente física y química de la exergía de un flujo de materia se calcula con la ecuación 1.7:

$$B_f = (H - H_0) - T_0(S - S_0) - \sum \mu_i(N_i - N_0) \quad (1.7)$$

Donde:

- H Entalpía
- S Entropía
- $N_i$  Número de moles de componente química
- $\mu_i$  potencial químico

El subíndice -0- representa las condiciones del ambiente o estado de referencia. La exergía de un flujo de calor cedido -Q- puede hallarse por medio de la ecuación 1.8:

$$B_Q = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (1.8)$$

Y la exergía de un flujo de trabajo con la ecuación 1.9:

$$B_W = W \quad (1.9)$$

La cual coincide con su energía.

La energía contenida por un cuerpo, la cual tiene la habilidad de dispersarse, es llamada fuente de energía. Una fuente energética existe siempre complementada por energía dispersa. El nivel de energía dispersa en el medio ambiente puede ser expresado como el producto de la entropía contenida por la fuente y su temperatura medioambiental en Kelvines. Por tanto, la ecuación de balance de entropía puede escribirse como (ver ecuación 1.10):

$$(Entropía\ inicial) \cdot T_c + (Entropía\ generada) \cdot T_c = (Entropía\ final) \cdot T_c \quad (1.10)$$

Donde  $T_c$  es la temperatura del medio ambiente. El producto de la entropía y la temperatura del medio ambiente es llamado "anergía", lo cual implica energía

dispersa. Usando el término “anergía”, la ecuación 1.10 puede ser expresada como un balance de anergía [Ref 4]:

$$(Anergía\ inicial) + (Anergía\ generada) = (Anergía\ final) \quad (1.11)$$

De acuerdo con lo anterior se establecen las siguientes proposiciones:

- 1- En todo proceso reversible, la exergía se conserva.
- 2- Todo proceso irreversible implica pérdida de exergía, o, la transformación de exergía en anergía.
- 3- Un proceso es tanto más irreversible, cuánto más exergía transforme.
- 4- Es imposible el paso de anergía a exergía.

Entonces cuando se habla de que se dispone cada vez de menos energía, lo que sucede es que su calidad se va degradando ya que la cantidad es la misma. En realidad de lo que cada vez se dispone es de menos exergía, no de energía.

La cantidad de energía no utilizable para realizar trabajo viene dada por la exergía destruida, y esta a su vez es proporcional a la entropía generada, lo cual es el índice cuantitativo de la irreversibilidad de un determinado proceso.

“La causa real de que haya pérdidas exergéticas son las irreversibilidades de los distintos procesos de transformación energética” [Ref 5].

Las irreversibilidades no se pueden eliminar totalmente porque eso es un límite puramente técnico, pero lo que si se puede hacer es disminuirlas al máximo.

### **1.3 TERMOECONOMÍA**

Es el punto de encuentro de la termodinámica, la economía y la ecología. Trata de costos, sean estos monetarios (pesos/kJ) o puramente energéticos (kJ de recurso/kJ de producto), y se utiliza principalmente para la contabilidad, diagnóstico, mejora y diseño y optimización de sistemas. La termodinámica, y en particular, el segundo principio se une con la economía brindando una herramienta útil de valoración de los sistemas.

En el ámbito de la energía industrial aún no se utiliza como método de trabajo el denominado análisis exergético que se deriva de la utilización del lenguaje entrópico del Segundo Principio de la termodinámica en términos de energía. El objetivo que se busca es, crear y utilizar un lenguaje energético susceptible de aplicarle argumentos económicos.

En la tabla 1 se pueden comparar algunos términos de ese lenguaje aplicados a la termoeconomía.

**Tabla 1. Comparativo entre termodinámica y economía**

TERMODINÁMICA (Joules)	ECONOMÍA (Pesos)
Diagnóstico	Costo de la energía
Ahorro de energía	Ahorro económico
Optimización energética	Optimización económica

Unificando criterios cualitativos y cuantitativos aplicables en general a cualquier tipo de energía.

**1.3.1 Balance energético.** El principio “La energía no se crea ni se destruye” hace referencia a relaciones de conservación las cuales constituyen un material que al ser desarrollado y explorado adecuadamente, sirve de base a buena parte del estudio de la termodinámica.

De acuerdo con el principio de conservación de la energía, para cualquier sistema se puede obtener una expresión que describe el balance energético (ver ecuación 1.11):

$$\left( \begin{array}{c} \text{Energía transferida} \\ \text{hacia adentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Energía transferida} \\ \text{hacia afuera del} \\ \text{sistema} \end{array} \right) = 0 \quad (1.12)$$

**1.3.2 Balance energético.** El balance exergético es la combinación del balance de energía y de entropía, que se deriva a su vez del primer y segundo principio de la termodinámica. En este tipo de balances debe tener en cuenta que la exergía no posee la misma propiedad de conservación sino que dependiendo del proceso ésta se puede crear o destruir. Es por ello que debido a dicha propiedad deben existir unas pérdidas asociadas a los procesos. Es por esto que para cada sistema se debe plantear la ecuación que describa este tipo de balance.

**1.3.3 Teoría del costo energético.** Calcular los costos de los flujos que involucran intercambio de energía es de vital importancia ya que estos están ligados a los costos de producción de los distintos elementos que constituyen el sistema productivo, y por ende a la correcta asignación de los costos de los productos finales.

En aquellos lugares en que los procesos pueden interpretarse como procesos de intercambio de energía, la energía juega un papel muy importante, por lo que la formulación de los costos económicos de los flujos internos y los productos finales tiene que ver tanto con la eficiencia termodinámica con la que realizan los procesos, como con el costo de amortización y mantenimiento de los equipos con los cuales se lleva a cabo el proceso.

La teoría del costo exergético se sustenta en las siguientes definiciones:

- Sistema: Un sistema puede ser definido como una entidad compleja compuesta por una serie de componentes relacionados entre sí y con el entorno. Este se puede describir mediante grafos en donde a cada flujo le corresponde un par de equipos que los conecta.
- Nivel de agregación: El nivel de agregación indica la profundización con la cual se va a estudiar un sistema dado. Este incluye los equipos en los cuales se ha dividido el proceso y las relaciones entre ellos. El nivel de agregación depende también del tipo de análisis que se va a realizar, la cantidad de medidas disponibles, y permite identificar las irreversibilidades en tantos elementos como equipos se identificaron. El nivel de agregación también limitan las conclusiones del análisis. No se puede pedir más información de la que se dispuso en el análisis.
- La matriz de incidencia [A]: La matriz de incidencia representa una alternativa diferente a la representación de grafos del sistema, dicha matriz relaciona los n componentes del sistema con los m flujos presentes en el. Esta matriz muestra la totalidad de flujos que entran y salen de los equipos colocando un 1 en la posición del equipo y flujo requerido si dicho flujo ingresa al equipo, en el caso contrario se coloca un -1. Si el sistema funciona en estado estacionario, la matriz de incidencia permite expresar los balances de masa, energía y exergía del sistema, ecuaciones 1.13, 1.14, 1.15:

$$[A]x[M]=0 \quad (1.13)$$

$$[A]x[H]=0 \quad (1.14)$$

$$[A]x[B]=I \quad (1.15)$$

Donde M, H y B son vectores (mx1) que representan la masa, energía y exergía respectivamente de cada uno de los flujos. El vector I representa la exergía destruida en cada equipo debido a sus irreversibilidades.

- Producto: En un sistema térmico, a todo equipo se le identifica un propósito o un conjunto de flujos de materia o energía llamado producto.
- Insumo: El conjunto de flujos encargado de representar los recursos que deben ser consumidos para llevar a cabo el propósito se conoce como insumos.

No todos los recursos utilizados son aprovechados completamente debido a las irreversibilidades ligadas a los procesos térmicos. De esto se puede definir una nueva variable, eficiencia exergética, definida como el producto obtenido por unidad de recurso utilizada para producirlo (ver ecuación 1.16):

$$Eficiencia = \frac{Pr oducto}{Re siduo} \quad (1.16)$$

Del concepto de eficiencia se define rendimiento exergético de un subsistema, como la exergía producida por unidad de exergía de los recursos utilizada (ver ecuación 1.17):

$$\eta_i = \frac{P_i}{F_i} \quad (1.17)$$

Donde  $P_i$  y  $F_i$  son respectivamente el producto y el insumo del componente  $i$  del nivel de desagregación del sistema.

El inverso del rendimiento exergético se le conoce como consumo exergético y se denota como  $k_i$  (ver ecuación 1.18):

$$k_i = \frac{F_i}{P_i} \quad (1.18)$$

- Pérdidas, residuos y productos: La organización de cooperación y desarrollo económico define los residuos como aquellos materiales generados en las actividades de producción, transformación y consumo que no han alcanzado en el contexto en que son generados, ningún valor comercial.

Las pérdidas se definen como aquellos flujos que salen de un componente y del sistema, sin ser objeto de producción o utilización en posteriores procesos y son eliminados sin necesitar un consumo adicional de recursos.

Los subproductos se distinguen como aquel flujo físico que puede ser útil parcialmente en otros procesos debido a su contenido de exergía, pero que no son el principal propósito de producción del sistema [Ref 6].

**1.3.4 Costo energético.** Ya se ha visto que la exergía no depende del proceso utilizado, y además representa el costo mínimo necesario de un producto. Como los procesos reales son irreversibles se tiene que:

$$F - P = I \geq 0 \quad (1.19)$$

En esta ecuación  $I$  son las irreversibilidades que tiene el proceso, de lo que se deduce que la exergía necesaria para obtener un producto es mayor o igual a la exergía que este pueda contener. Con base en lo anterior, el costo en términos de exergía en la obtención de un producto, es igual a la exergía de los recursos consumidos para producirlo.

Dado un sistema cuyos límites, nivel de agregación y propósito productivo están definidos, el costo exergético  $B^*$  de un flujo físico se define como la cantidad de exergía necesaria para llevar a cabo un proceso que dará como resultado un producto deseado.  $B_i$  representa el valor de la exergía del flujo  $i$ . El costo exergético unitario se refiere al costo exergético de un flujo por unidad de exergía, ecuación 1.20:

$$k_i^* = \frac{B_i^*}{B_i} \quad (1.20)$$

Es muy sencillo calcular el costo exergético de un producto cuando este es único en un sistema de producción. Cuando el flujo es interno, sale de un componente y entra en otro, la exergía consumida para producirlo es calculada como la sumatoria de todos los consumos de exergía en los componentes anteriores hasta llegar a la entrada del sistema. Sin embargo, uno de los problemas más comunes de la termoeconomía surge cuando en el sistema aparecen bifurcaciones, en donde una de las soluciones propuestas con mayor frecuencia por varios autores es que se distribuyan los costos proporcionalmente a la exergía.

El costo de un flujo no existe como una propiedad termodinámica de un flujo aislado sino que está asociado a un proceso de producción. Por lo tanto no se debe determinar el costo de un flujo aislado sino de una serie de flujos internos y externos relacionados entre sí. Por otro lado la clasificación de flujo interno y externo no depende del equipo físico sino de los límites previamente establecidos. Sin embargo seguir todos estos pasos conlleva ciertas dificultades, por lo que la teoría del costo exergético propone 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 se representa por medio de la ecuación 1.21:

$$[A] \times [B^*] = 0 \quad (1.21)$$

Donde  $B^*$  es un vector ( $m \times 1$ ) 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 esta dado por la ecuación 1.22:

$$\sum_{i=1}^n (S_i - 1) = \sum_{i=1}^n S_i - n = m - n - e \quad (1.22)$$

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

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

- **P4** Si el producto de una componente esta formado por varios flujos de la misma calidad termodinámica (ver figura 4), todos ellos tienen el mismo costo exergético unitario (ver ecuación 1.23).

**Figura 4. Bloque asignación de costos**

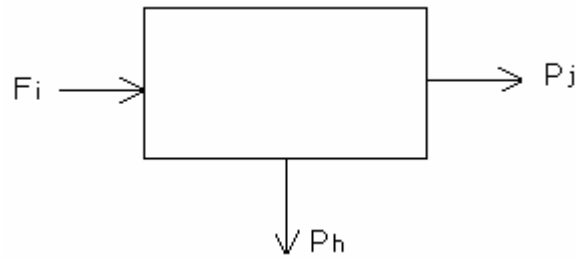


$$\frac{B_j^*}{B_j} = \frac{B_h^*}{B_h} \quad (1.23)$$

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 (ver figura 5), su costo exergético es el mismo que el del flujo de entrada del que proviene (ver ecuación 1.24).

**Figura 5. Bloque asignación de costos.**



$$\frac{B_j^*}{B_j} = \frac{B_i^*}{B_i} \quad (1.24)$$

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.

El esquema productivo del sistema, indica donde se utiliza el producto de cada componente, que parte se utiliza como recursos en otros componentes y que parte se transforma en producto final. De acuerdo a lo anterior, el producto de un componente -i- puede utilizarse para obtener el producto final del sistema, como insumo de otro componente o no ser utilizado, entonces se tratará de un residuo. Esto se puede expresar como (ver ecuación 1.24)

$$P_i \equiv P_{i0} + P_{i1} + P_{i2} + \dots + P_{ij} + \dots + P_{in} + R_{i0} + R_{i1} + R_{i2} + \dots + R_{ij} + \dots + R_{in} \quad (1.25)$$

Siendo  $P_{ij}$  la parte de la producción de la componente  $i$  absorbida por la componente  $j$ ,  $R_{ij}$  es la parte del producto del equipo  $i$  que se imputo como residuo del equipo  $j$ . Si se considera la 0 como el entorno, entonces  $P_{i0}$  es la parte del producto del equipo -i- que forma parte del producto total.

Por otra parte los recursos absorbidos por cada componente, se definen por la ecuación 1.26.

$$F_i = P_{1i} + P_{2i} + \dots + P_{ji} + \dots + P_{ni} + P_{0i} \quad (1.26)$$

donde  $P_{0i}$  representan los recursos externos que entran en el equipo -i-.

Y los residuos imputados a cada componente serán:

$$R_i = R_{1i} + R_{2i} + \dots + R_{ji} + \dots + R_{ni} \quad (1.27)$$

El insumo total ( $F_T$ ) y el producto total ( $P_T$ ) del sistema se pueden formular por medio de las siguientes ecuaciones (ver ecuaciones 1.28 y 1.29):

$$F_T \equiv F_0 = P_{01} + P_{02} + \dots + P_{0j} + \dots + P_{0n} \quad (1.28)$$

$$P_T \equiv P_0 = P_{10} + P_{20} + \dots + P_{j0} + \dots + P_{n0} \quad (1.29)$$

Estas ecuaciones definen la matriz de producción que es de la forma (ver tabla 2):

**Tabla 2. Matriz de producción.**

×	F <sub>0</sub>	F <sub>1</sub>		F <sub>j</sub>		F <sub>n</sub>	R <sub>1</sub>		R <sub>n</sub>
P <sub>0</sub>		P <sub>01</sub>		P <sub>0j</sub>		P <sub>0n</sub>	R <sub>01</sub>		R <sub>0n</sub>
P <sub>1</sub>	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>		P <sub>1j</sub>		P <sub>1n</sub>	R <sub>11</sub>		R <sub>1n</sub>
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
P <sub>i</sub>	P <sub>i0</sub>	P <sub>i1</sub>		P <sub>ij</sub>		P <sub>in</sub>	R <sub>i1</sub>		R <sub>in</sub>
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
P <sub>n</sub>	P <sub>n0</sub>	P <sub>n1</sub>		P <sub>nj</sub>		P <sub>nn</sub>	R <sub>n1</sub>		R <sub>nn</sub>

Siendo P<sub>i</sub> el producto de un componente i y F<sub>i</sub> los insumos absorbidos por cada componente. [Ref 3]

De acuerdo a la proposición **P3** el costo que se asigna a los residuos es nulo, por lo que las columnas 7, 8 y 9 desaparecen de la matriz de producción. Definida la matriz de producción se halla el vector de recursos externos (Y<sub>e</sub><sup>x</sup>) y por medio de las siguientes relaciones se halla el valor de los costos exergéticos y la exergía de cada flujo.

$$\alpha \times B^x = Y_e^x \quad (4.14)$$

Donde:

- $\alpha$  = Matriz de producción, tamaño (n x n).
- n = número de flujos
- B<sup>x</sup> = Vector de costos exergéticos, tamaño (n x 1).
- Y<sub>e</sub><sup>x</sup> = Vector de recursos externos, tamaño (n x 1).

Debido a las bifurcaciones que se presentan en los elementos del sistema, y de acuerdo a las proposiciones **P4** y **P5** no siempre se tendrá un 1 o un -1 en la matriz de producción.

## **2 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA AUDITORÍA EXERGÉTICA**

En este capítulo se presenta la metodología empleada para el desarrollo del presente estudio, comprendida en tres pasos. Esta metodología parte del supuesto que para realizar este proyecto se debe tener como primera medida la iniciativa que puede ser empresarial o académica (ver figura 6).

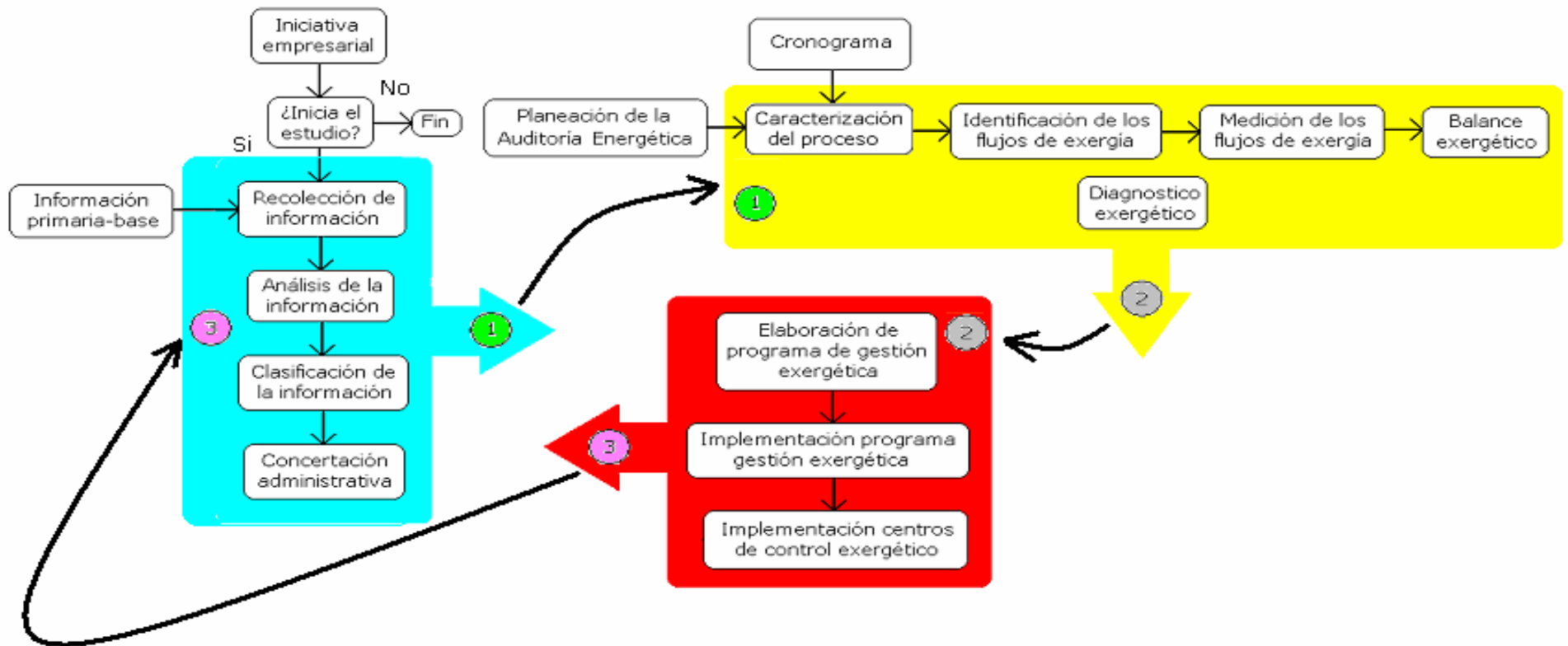
Luego de haber tomado la decisión de hacer la auditoria se debe realizar una reunión entre los interesados para presentar debidamente el proyecto y las actividades a seguir [Ref 7]. Se presentan los objetivos el alcance del trabajo y la descripción de las actividades. Posteriormente se aplica la metodología planteada en los siguientes pasos.

### **2.1 PRIMER PASO: RECOLECCIÓN, ANÁLISIS, CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y CONCERTACIÓN ADMINISTRATIVA.**

Para empezar a elaborar un plan concreto sobre el desarrollo del trabajo es necesario como primer paso recolectar información básica sobre los procesos en los cuales se podrían encontrar potenciales significativos de ahorro energético. Esta información será proporcionada por la institución auditada, se analizará cuidadosamente y se clasificará para poder escoger aquellos lugares donde se podrán realizar acciones de uso racional y eficiente de la energía.

Cabe aclarar que esta información puede estar representada en libros, planos arquitectónicos, planos eléctricos, bitácoras de los centros de alto consumo energético, planes de mantenimiento, reuniones con los jefes de operación de procesos, facturación del consumo energético y toda aquella información que permita detallar y conocer el funcionamiento de estos sistemas.

Figura 6. Metodología empleada para el desarrollo de la gestión energética



Si se sabe dónde, cómo y quién utiliza la energía, es más fácil concentrarse en aquellas actividades que generarán los mejores resultados.

- En el HUS se realizaron reuniones con el jefe de mantenimiento donde se dió a conocer el estado de algunos procesos que presentan consumo de energéticos. Se preseleccionaron procesos para el desarrollo de la auditoria exergética. Se realizaron las medidas de los procesos preseleccionados, se analizaron los datos y se determinó que en los sistemas de aire acondicionado, la unidad de imagenología y las calderas se realizaría la auditoria exergética.

## **2.2 SEGUNDO PASO: DESARROLLO DEL TRABAJO**

Para realizar un trabajo cumpliendo parámetros de tiempo establecidos entre el ente auditado y el auditor es necesario que se efectuó una correcta planeación y por ende un cronograma de las actividades a realizar. De acuerdo con la información obtenida en el primer paso y luego de conocer el funcionamiento de los sistemas escogidos se plantea un primer nivel de desagregación en cual deben estar identificados claramente los flujos exergéticos.

Teniéndose la primera caracterización del sistema es preciso identificar que flujos se pueden medir y cuales no, ya que de acuerdo a esto se define que tan complejo debe ser el nivel de desagregación. En el momento de tener una caracterización en la cual todos los flujos exergéticos pueden ser medidos, se tomarán los registros con los cuales se realizará el balance exergético para luego plantear un diagnóstico sobre el sistema.

Este diagnóstico comprende toda la información sobre eficiencia, el estado del sistema, sus posibles potenciales de ahorro y puntos en los cuales se deberán tomar las medidas necesarias para realizar un uso racional y eficiente de la energía.

- El cronograma de actividades a seguir para realizar la auditoria exergética en el HUS se concertó con el jefe de mantenimiento, en él se establecieron los tiempos en los cuales se entregarían los resultados. Las caracterizaciones de los procesos se idearon de acuerdo a su funcionamiento, se determinaron las ecuaciones termodinámicas y se realizó el análisis matemático de ellas, llegando a un término que permite encontrar el valor de la exergía que depende de variables reales y medibles del proceso.

Se realizaron las medidas de las variables que se necesitan para efectuar el análisis exergético de los sistemas seleccionados. Teniendo las medidas de los procesos, se aplicó la teoría termoeconómica la cual permite proponer

una serie de medidas correctivas a tomar con las cuales se llegará a hacer un uso racional y eficiente de la energía en el HUS.

### **2.3 TERCER PASO: ELABORACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE GESTIÓN EXERGÉTICA.**

Obtenidos los resultados del diagnóstico, el último paso a seguir es elaborar un programa de gestión exergética en cual se plasmarán las medidas correctivas que se deben aplicar en los sistemas auditados. Este programa incluye una descripción del sistema y su operación, una información de los principales centros de consumo, una descripción de los posibles ahorros con su impacto energético y el análisis de costos y beneficios. Para realizar este programa se deben tener en cuenta los objetivos y el alcance que se definió al iniciarse la auditoría.

El programa debe cubrir tanto las modificaciones grandes que requieren un detallado análisis económico como las modificaciones menores que puedan ofrecer tasas de retorno inmediatas, así, se realiza una lista de los posibles ahorros de energía para los centros de consumo auditados (calor, vapor, aire acondicionado, iluminación, fuerza, etc) [Ref 7].

- Al HUS se le presenta un informe ejecutivo en donde se plasman las medidas correctivas que se deben tomar y el informe sobre el estado del sistema.

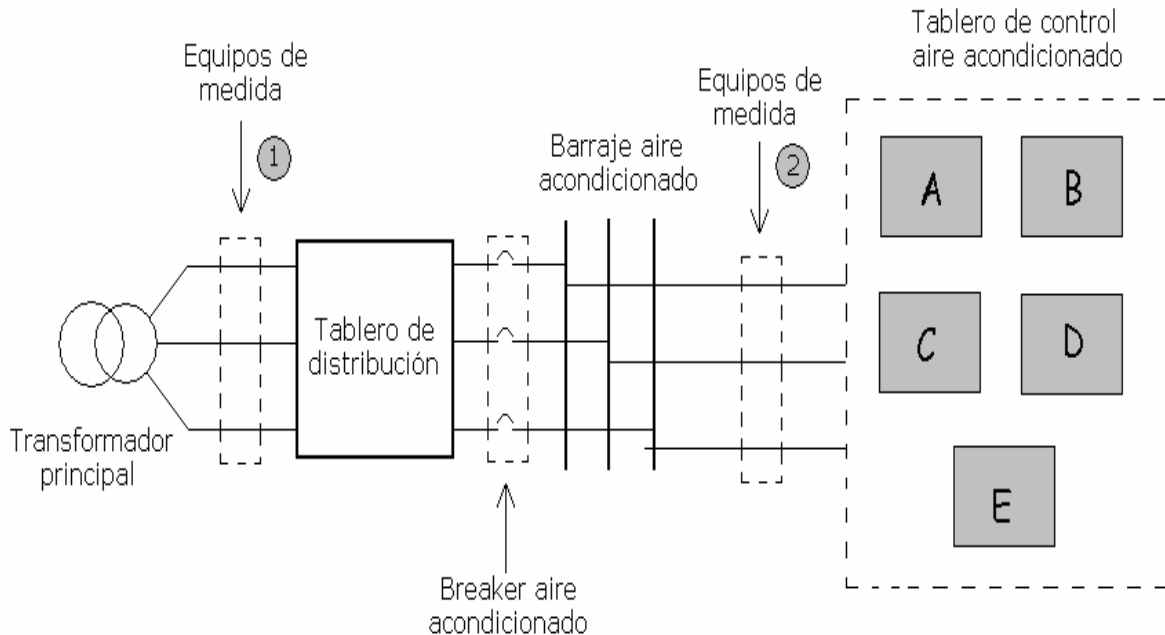
### 3 SELECCIÓN DE CIRCUITOS

La implementación en este proyecto de la teoría termoeconómica se realizó en los circuitos eléctricos del Hospital Universitario de Santander (HUS). La selección de los circuitos se hizo teniendo en cuenta las medidas tomadas en los barrajes correspondientes y en el uso que tienen dichos sistemas, resultando como sistemas seleccionados el de aire acondicionado, la unidad de imagenología y las calderas.

#### 3.1 SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO

Posee terminales conectados directamente con el tablero de distribución del sistema (ver figura 7), el cual es alimentado directamente de bornes del transformador, dicha característica permitió una rápida identificación del consumo que este tiene, registrando medidas de bornes del transformador como del tablero de control del aire acondicionado.

**Figura 7. Diagrama de conexiones aire acondicionado**



Conociéndose que la característica principal de la carga es su homogeneidad, solo es necesario tomar muestras en un periodo corto de tiempo con las cuales se logra realizar una primera caracterización del proceso.

**Tabla 3. Medidas en el sistema del aire acondicionado**

Muestra	Tablero de control aire acondicionado		Transformador ESSA	
	V [V]	I [A]	V [V]	I [A]
1	214,0	282	230	1150
	214,8	282	230	1220
	212,0	280	225	1220
2	213,8	280	210	1150
	214,0	280	215	1180
	211,1	281	210	1145
3	212,6	280	212	1260
	213,7	280	212	1190
	211,0	280	210	1250
4	213,5	267	210	1210
	214,2	260	210	1250
	211,4	260	210	1230
5	214,0	280	215	1280
	214,5	282	212	1190
	211,2	269	215	1200
6	214,5	290	212	1290
	214,7	285	212	1220
	211,3	285	212	1250
7	214,5	282	212	1250
	215,2	290	215	1200
	213,0	290	212	1200
8	214,5	293	215	1200
	215,3	295	212	1190
	212,5	285	210	1190
9	217,7	290	217	1250
	218,0	290	217	1290
	216,2	290	217	1280
10	216,3	280	214	1100
	215,8	288	210	1150
	214,3	278	212	1150
11	215,8	294	215	1350
	215,7	285	220	1290
	213,0	285	218	1210
12	217,0	272	218	1250
	217,3	272	215	1180
	215,0	267	215	1280

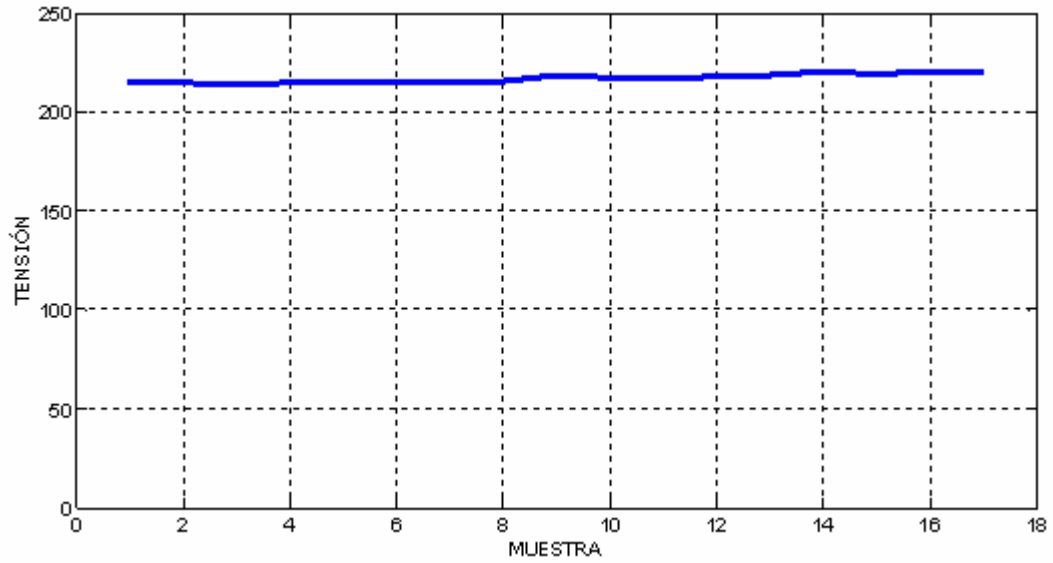
Muestra	Tablero de control aire acondicionado	Transformador ESSA	215	1190
	V [V]	I [A]	V [V]	I [A]
14	215,0	280	214	1200
	219,1	282	220	1230
	218,7	290	220	1250
	217,0	285	222	1180
15	218,0	220	220	1210
	220,0	220	225	1210
	216,3	217	220	1230
16	219,0	225	220	1280
	219,8	234	220	1250
	218,0	230	224	1250
17	218,6	230	218	1210
	218,0	215	225	1210
	218,0	228	223	1200

En la tabla 3 se muestran los resultados de las medidas tensión y corriente realizadas en los puntos 1 y 2 de la figura 7. Las medidas realizadas establecen que la corriente que requiere el sistema de aire acondicionado para su funcionamiento tiene un valor cercano a una cuarta parte de la corriente total del sistema eléctrico del HUS (centro de alto consumo). Estos valores corresponden al funcionamiento de 4 unidades de las 5 que componen el sistema.

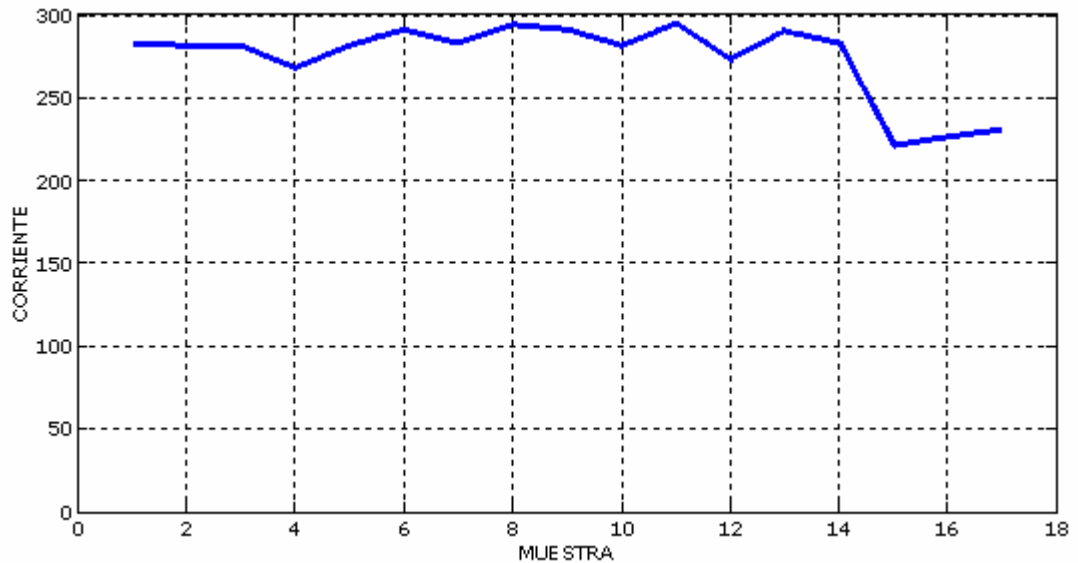
Si en el proceso de acondicionamiento del aire, se encuentran bajas eficiencias exergéticas, se podrá desarrollar un plan URE, logrando de esta manera obtener un ahorro significativo de dinero y de energía, meta de este trabajo.

En las figuras 8 y 9 se muestran las curvas correspondientes a la tensión y corriente que consume el sistema de aire acondicionado en diferentes instantes de tiempo. La tensión medida fue la de línea  $V_{AB}$ .

**Figura 8. Tensión tablero de control aire acondicionado**



**Figura 9. Corriente tablero de control aire acondicionado**

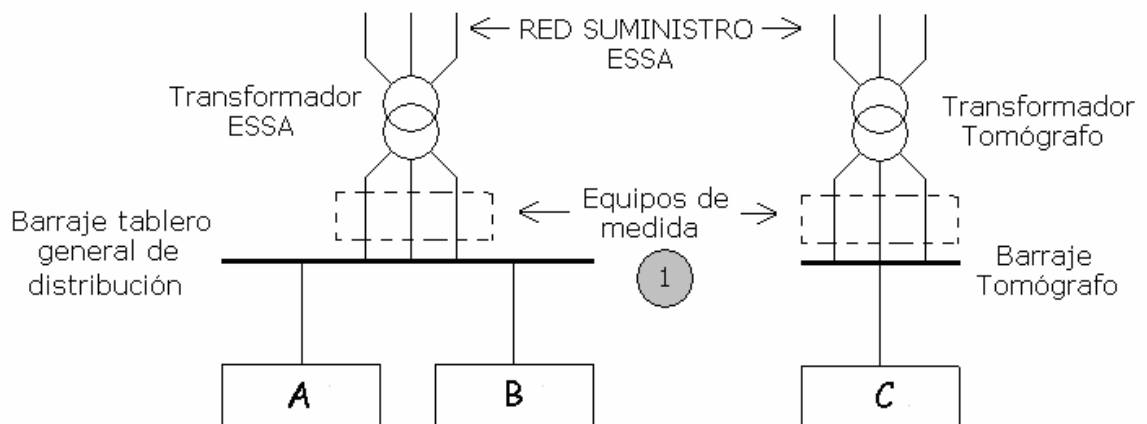


### 3.2 UNIDAD DE IMAGENOLÓGÍA

Las muestras obtenidas son valores aleatorios (carga heterogénea) debido a que el uso de estos equipos depende de la necesidad que se tenga de utilizarlos. Sin embargo, la gran afluencia de pacientes en el hospital hace que estos equipos

tengan una frecuencia de uso relativamente alta, siendo utilizados regularmente en el periodo de la mañana.

**Figura 10. Diagrama de conexiones equipos de medida unidad de imagenología.**



En la tabla 4 se muestran los resultados de las mediciones realizadas y en la figura 10 se detalla el punto donde se conectaron los equipos de medida.

**Tabla 4. Medidas realizadas en bornes de algunos equipos de la unidad de imagenología**

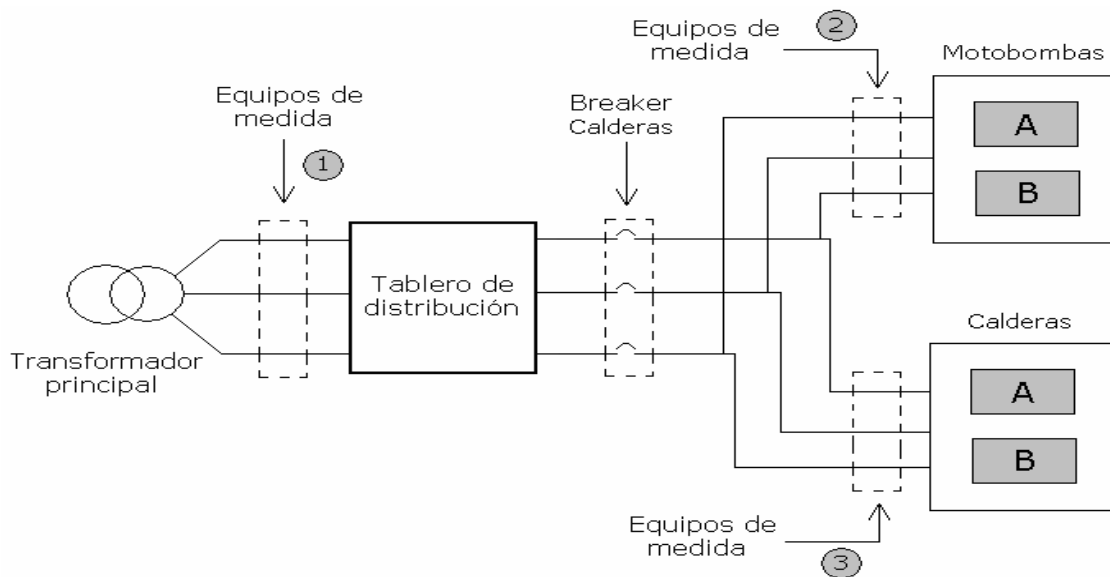
TOMÓGRAFO			RAYOS X SALA 2		
Muestra	V [V]	I [A]	Muestra	V [V]	I [A]
1	486	48 (17 disparos)	1	389,2	15
	486			393,1	
	486			391,5	
2	486	38 (55 disparos)	2	287,5	15
	486			392,3	
	486			392,0	
3	486	50 (32 disparos)	3	390,0	15
	486			394,7	
	486			393,8	
4	486	50 (17 disparos)	Ya que son disparos, no se tenía la cantidad de equipos necesarios para medir la corriente en las tres fases por lo tanto las medidas son de la fase A.		
	486				
	486				

El tiempo de funcionamiento de cada aparato en el proceso de toma de placas es corto, su consumo energético radica en las sobretensiones inducidas, los cambios bruscos de corriente y los fenómenos transitorios que en ellos se presentan, junto con las ineficiencias energéticas que muestran tales dispositivos en su funcionamiento, siendo estos los motivos principales por los cuales tal unidad fue elegida como uno de los focos de estudio.

### 3.3 CALDERA

La caldera por ser un sistema térmico presenta un alto nivel de irreversibilidad y es un centro de alto consumo energético, que por consiguiente requiere de un análisis exergético.

**Figura 11. Diagrama de conexiones equipos de medida unidad de calderas.**



La tensión promedio de funcionamiento de la caldera es de 220 V, la corriente de arranque de la motobomba es de 150,8 A, su corriente en estado estable es de 25 A y la corriente de funcionamiento de la caldera es de 7 A. Las muestras registradas fueron tomadas en los puntos 2 y 3 de la figura 11.

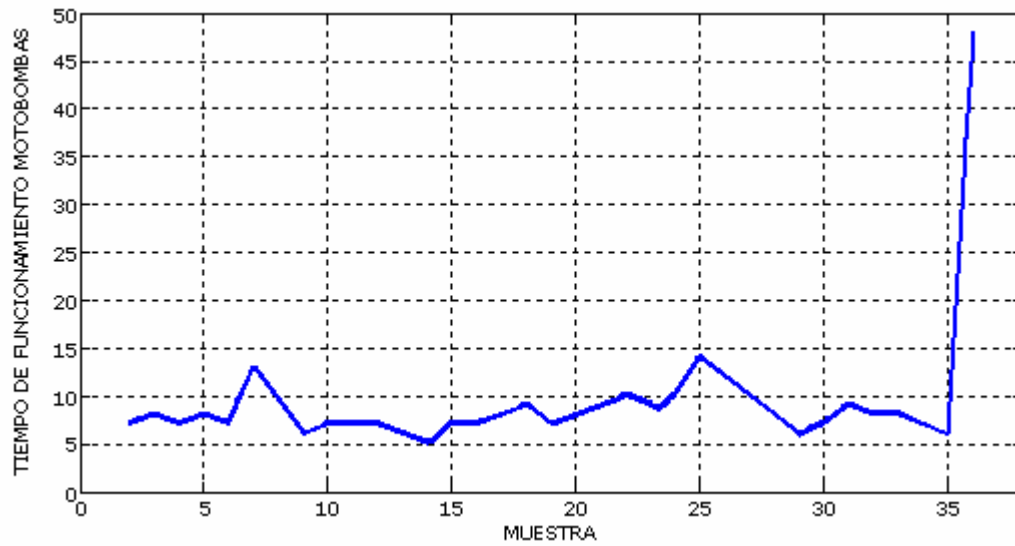
En la tabla 5 se enumera la frecuencia con la que los motores entran en funcionamiento así como también lo hace la caldera. El comportamiento diario de esta carga es similar (carga homogénea). En la figura 12 se muestra el comportamiento que presentan las motobombas. Se observa que el tiempo de funcionamiento es corto y los lapsos que se presentan entre cada encendido es relativamente pequeño, alrededor de 3 minutos.

**Tabla 5. Registro de mediciones sistema de calderas.**

<b>Muestra</b>	<b>Equipo que entra en funcionamiento</b>	<b>Tiempo de duración</b>
1	Caldera	12 min
2	Motores agua	7 s
3	Motores agua	8 s
4	Motores agua	7 s
5	Motores agua	8 s
6	Motores agua	7 s
7	Motores agua	13 s
8	Caldera	35 min
9	Motores agua	6 s
10	Motores agua	7 s
11	Motores agua	7 s
12	Motores agua	7 s
13	Motores agua	6 s
14	Motores agua	5 s
15	Motores agua	7 s
16	Motores agua	7 s
17	Motores agua	8 s
18	Motores agua	9 s
19	Motores agua	7 s
20	Motores agua	8 s
21	Motores agua	9 s
22	Motores agua	10 s
23	Motores agua	9 s
24	Motores agua	10 s
25	Motores agua	14 s
26	Caldera	14 min
27	Motores agua	10 s
28	Motores agua	8 s
29	Motores agua	6 s
30	Motores agua	7 s
31	Motores agua	9 s
32	Motores agua	8 s
33	Motores agua	8 s
34	Caldera	13 min
35	Motores agua	6 s
36	Motores agua	48 s*

(\*) Este tiempo es debido a la purga de la caldera.

**Figura 12. Funcionamiento motobombas de las calderas de vapor.**



El tiempo de funcionamiento de las motobombas es corto ya que el caudal que manejan es grande comparado con el que demandan las calderas, razón por la que no necesitan estar encendidas largos periodos de tiempo.

#### 4. CARACTERIZACIÓN TERMOECONÓMICA DE PROCESOS INDUSTRIALES.

De acuerdo con los postulados de la termoeconomía y el tratamiento termodinámico es posible caracterizar cualquier proceso en el cual exista intercambio de energía, esto se hace en dos pasos.

El primer paso para elaborar dicha caracterización es conocer detalladamente el funcionamiento del proceso, sus componentes, de que forma y en que lugares se realiza el intercambio de la energía. Como segundo paso se realizan los correspondientes balances de masa, energía y exergía para poder realizar el análisis termoeconómico.

La matriz de producción muestra los requerimientos exigidos por las proposiciones expuestas en la teoría del costo exergético. A los flujos que provienen del ambiente y que son insumos del sistema total se les asigna al costo exergético el valor de su exergía, en el caso del aire aunque su exergía es cero debido a que se encuentra a temperatura ambiente, se le asignará el valor energético necesario para realizar la absorción de dicho aire (asociado a la energía necesaria para hacer funcionar los ventiladores de absorción). En cuanto a los residuos, se le asignará un costo de cero tal y como se enuncia en la proposición número tres de la teoría del costo exergético.

El conocimiento básico acerca de los sistemas de aire acondicionado, unidad de imagenología y calderas se encuentra detallado en los anexos A, B y C.

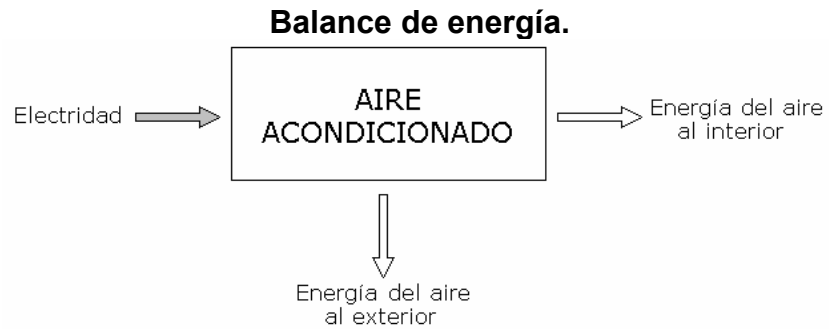
##### 4.1 ANÁLISIS TERMOECONÓMICO DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO

Como primera medida es necesario precisar los correspondientes balances de masa (figura 13), energía (figura 14) y exergía (figura 15).

**Figura13. Balance de masa aire acondicionado.**



**Figura 14. Balance de energía aire acondicionado.**

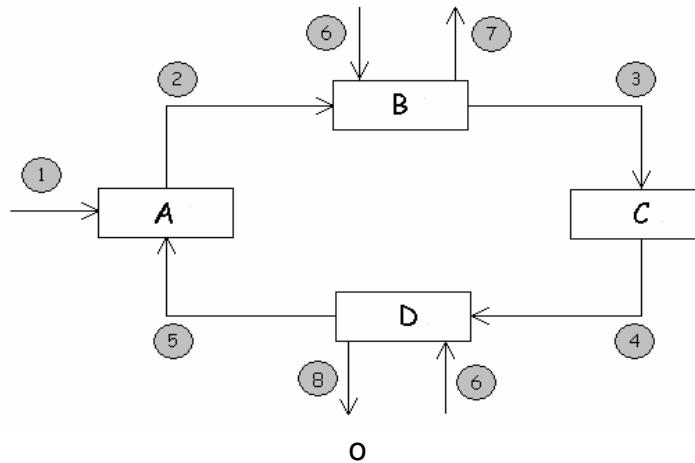


**Figura 15. Balance de exergía aire acondicionado.**



**4.1.1 Nivel de desagregación del aire acondicionado.** Para el aire acondicionado se tienen cuatro bloques de desagregación, los cuales se muestran en la figura 16, siendo A el compresor, B el condensador, C la válvula de expansión y D el evaporador.

**Figura 16. Esquema de funcionamiento del aire acondicionado**



Los flujos que intervienen es este proceso son (ver figura 16):

1. Electricidad suministrada al compresor.
2. Refrigerante en estado gaseoso a alta temperatura y presión.
3. Refrigerante en estado líquido a alta temperatura y presión.
4. Refrigerante en estado líquido a baja temperatura y presión.
5. Refrigerante en estado gaseoso a alta temperatura y presión media.
6. Aire del exterior.
7. Aire al exterior.
8. Aire acondicionado.

En la tabla 6 se presentan las ecuaciones termodinámicas requeridas en el estudio del sistema de aire acondicionado, de acuerdo con los flujos que intervienen.

**Tabla 6. Ecuaciones termodinámicas para el sistema de aire acondicionado**

Flujo	Masa [kg]	Energía [J]	Exergía [J]
1	-	$E_1=S_1$	$B_1=P_1$
2	$m_2$	$E_2=U_2+PV$	$B_2= U_2+PV -T_0^*S_2$
3	$m_3$	$E_3=U_3+PV$	$B_3= U_3+PV -T_0^*S_3$
4	$m_4$	$E_4=U_4+PV$	$B_4= U_4+PV -T_0^*S_4$
5	$m_5$	$E_5=U_5+PV$	$B_5= U_5+PV -T_0^*S_5$
6	$m_6$	$E_6=U_6+PV$	$B_6= U_6+PV -T_0^*S_6$
7	$m_7$	$E_7=U_7+PV$	$B_7= U_7+PV -T_0^*S_7$
8	$m_8$	$E_8=U_8+PV$	$B_8= U_8+PV -T_0^*S_8$

En el proceso del acondicionamiento del aire se tiene como materia prima el gas refrigerante, encargado de absorber el calor o realizar la calefacción.

Como en el proceso la materia prima es un gas, se tomarán de las ecuaciones que rigen a los gases ideales, aquellas que permitan encontrar los valores correspondientes a los balances de masa, energía y exergía.

En el anexo D se presentan las ecuaciones correspondientes al tratamiento energético y exergético del flujo eléctrico (ecuaciones D3 Y D13).

En el anexo E se presentan las ecuaciones correspondientes al tratamiento energético y exergético de los flujos de gases ideales (ecuaciones E16 Y E21).

Para realizar un análisis termoeconómico se debe identificar en primera instancia la estructura productiva del sistema, la cual tiene similitudes con el análisis

económico de los procesos. Se deben identificar los flujos, los equipos y a su vez los costos relacionadas a cada uno de ellos, reconocer y entender el funcionamiento de cada uno de estos los cuales conforman el proceso, para de esta manera lograr encontrar la matriz Insumo-Producto (I-P) que define el sistema.

En grandes sistemas se encuentra que el nivel de desagregación más sencillo hace que el análisis termoeconómico se vuelva complejo y más difícil de entender, por tanto es necesario buscar el nivel de desagregación adecuado con el cual se pueda definir el insumo-producto-residuo del sistema. En la tabla 7 se muestran los insumos, productos y residuos de cada uno de los componentes del sistema de aire acondicionado (ver figura 16).

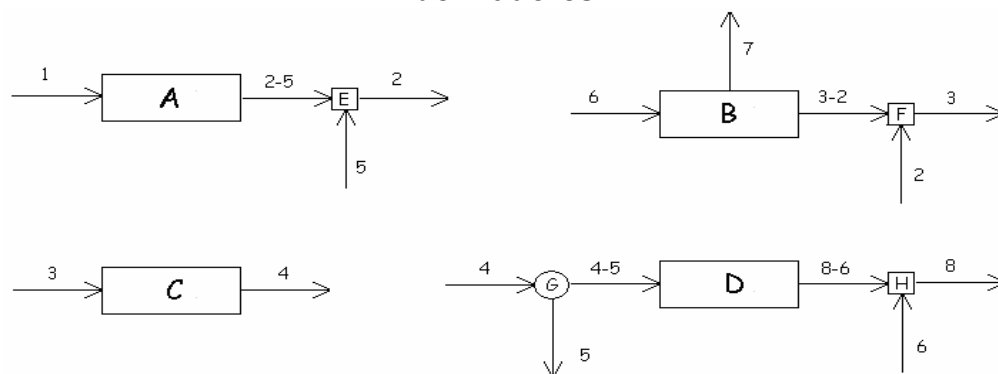
**Tabla 7. Insumo-Producto-Residuo de la figura 16**

Equipo	Insumo	Producto	Residuo
A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub> - B <sub>5</sub>	0
B	B <sub>6</sub>	B <sub>3</sub> - B <sub>2</sub>	B <sub>7</sub>
C	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	0
D	B <sub>4</sub> - B <sub>5</sub>	B <sub>8</sub> - B <sub>6</sub>	0

A continuación se muestra un nivel de desagregación más simple para el aire acondicionado. Este se realiza con base en el primer nivel de desagregación (ver figura 16).

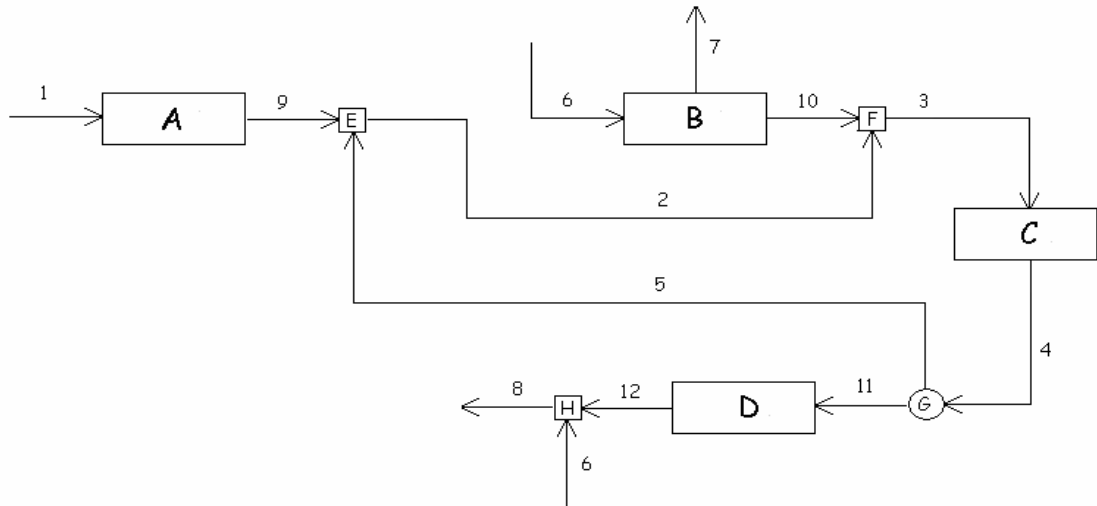
En este nivel de desagregación se utilizan una serie de nuevos elementos que permiten identificar de manera fácil el insumo y el producto de cada componente, pero no son módulos físicos que formen parte del sistema. Se llamarán mezcladores, caso del bloque E, F y H (ver figura 17) o derivadores caso del bloque G (ver figura 17).

**Figura 17. Nivel de desagregación propuesto incluyendo los mezcladores y derivadores.**



Este nuevo nivel de desagregación se logra de acuerdo con la tabla I-P-R (Tabla 7) del nivel básico de desagregación (figura 16). Ahora uniendo los bloques de la figura 17 se obtiene el diagrama de la figura 18.

**Figura 18. Nivel de desagregación más simple**



Se observa en la figura 18, que la cantidad de flujos aumenta pero a su vez se ha facilitado la identificación del insumo y del producto de cada subsistema. De la figura 18 se puede obtener con gran facilidad la tabla Insumo-Producto-Residuo y a su vez encontrar la matriz de producción del sistema. De acuerdo a las proposiciones de la teoría de costo exergético y del nivel de desagregación mostrado en la figura 18 se tiene la relación insumo-producto-residuo de la tabla 8.

**Tabla 8. Insumo-Producto-Residuo de la figura 12**

Equipo	Insumo	Producto	Residuo
A	$B_1$	$B_9$	0
B	$B_6$	$B_{10}$	$B_7$
C	$B_3$	$B_4$	0
D	$B_{11}$	$B_{12}$	0
E	$B_9 + B_5$	$B_2$	0
F	$B_{10} + B_2$	$B_3$	0
H	$B_6 + B_{12}$	$B_8$	0

Teniendo el grafo que define el sistema se encuentra la matriz de producción ( $\alpha$ ) de la tabla 9.

**Tabla 9. Matriz de producción**

×	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>	F <sub>11</sub>	F <sub>12</sub>
P <sub>1</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
P <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0
P <sub>3</sub>	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
P <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
P <sub>5</sub>	0	-1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
P <sub>6</sub>	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
P <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	1
P <sub>8</sub>	0	0	0	$-B_5/B_4$	1	0	0	0	0	0	0	0
P <sub>9</sub>	0	0	0	$-B_{11}/B_4$	0	0	0	0	0	0	1	0
P <sub>10</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P <sub>11</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
P <sub>12</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Para la evaluación de los costos de los productos se requiere establecer los valores de entrada al sistema. El vector de recursos externos,  $Y_e^x$  (tabla 10), representa la cantidad de recursos que se necesitan para cumplir el proceso productivo del sistema. Constituye el valor que se debe pagar para poder obtener el producto final.

El proceso de aire acondicionado se tiene el vector mostrado en la tabla 10.

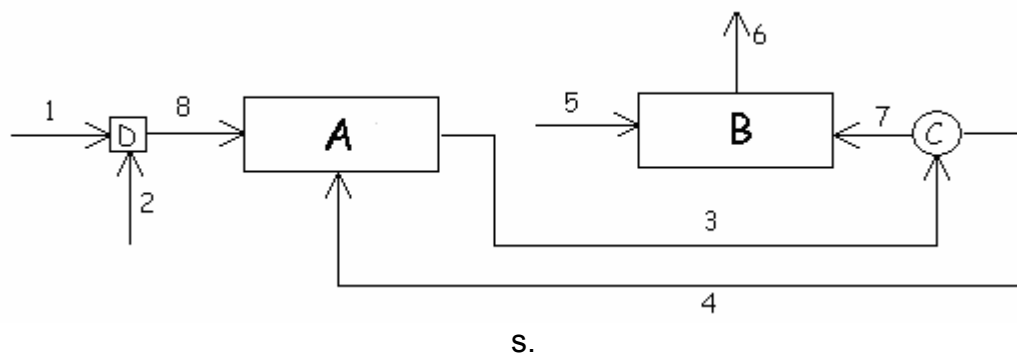
**Tabla 10. Vector de recursos externos**

Flujo	Recursos Externos
1	$\$ B_1$
2	0
3	0
4	0
5	0
6	$\$ B_6$
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0

Donde \$ B\_1\$ representa el costo de la energía eléctrica suministrada al compresor y \$ B\_6\$ el de la energía necesaria para mover los ventiladores del evaporador.

Teniendo en cuenta que para el nivel de desagregación del aire acondicionado presentado anteriormente aplicado a un sistema real se hace complejo tomar medidas en algunos puntos del sistema, por ejemplo flujos 3 y 4, se propone un nivel de desagregación (ver figura 19) al cual se le puede aplicar la teoría termoeconómica teniendo en cuenta las medidas realizadas en el sistema de aire acondicionado.

**Figura 19. Nivel de desagregación propuesto para el aire acondicionado con mezcladores y derivadores**



Los flujos que intervienen en el funcionamiento del aire acondicionado (ver figura 19) son:

1. Potencia activa suministrada al sistema.
2. Potencia reactiva suministrada al sistema.
3. Refrigerante en estado gaseoso a alta temperatura y presión.
4. Refrigerante en estado gaseoso.
5. Aire del exterior.
6. Aire acondicionado.

Aplicando la teoría termoeconómica al diagrama de la figura 19 se tiene la relación insumo-producto-residuo de la tabla 11.

**Tabla 11. Insumo-Producto-Residuo de la figura 19**

Equipo	Insumo	Producto	Residuo
A	$B_8 + B_4$	$B_3$	0
B	$B_5 + B_7$	$B_6$	0
C	$B_3$	$B_3/B_4$	0
	$B_7$	$B_7/B_4$	0
D	$B_1 + B_2$	$B_8$	0

Conociéndose el grafo que define el sistema (ver figura 19) y de acuerdo a la teoría termoeconómica se define la matriz de producción de la tabla 12.

**Tabla 12. Matriz de producción**

	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>8</sub>
P <sub>1</sub>	0	0	-1	1	0	0	0	1
P <sub>2</sub>	0	0	0	0	-1	1	1	0
P <sub>3</sub>	1	1	0	0	0	0	0	-1
P <sub>4</sub>	0	0	1	-B <sub>3</sub> /B <sub>4</sub>	0	0	0	0
P <sub>5</sub>	0	0	0	-B <sub>7</sub> /B <sub>4</sub>	0	0	1	0
P <sub>6</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0
P <sub>7</sub>	0	1	0	0	0	0	0	0
P <sub>8</sub>	0	0	0	0	1	0	0	0

El vector de recursos externos para este caso corresponde al mostrado en la tabla 13.

**Tabla 13. Vector de recursos externos**

Flujo	Recursos Externos
1	\$ B <sub>1</sub>
2	\$ B <sub>2</sub>
3	0
4	0
5	\$ B <sub>5</sub>
6	0
7	0
8	0

Establecida la matriz de producción y de acuerdo a la teoría del costo exergetico se encontrarán las respectivas eficiencias e irreversibilidades del proceso, las cuales permitirán plantear posibles soluciones a los problemas encontrados. Estos análisis se presentan en el capítulo 5.

#### **4.2 ANÁLISIS TERMoeCONÓMICO DE LA UNIDAD DE IMAGENOLÓGÍA**

Para realizar el análisis termoeconómico se toman los balances de masa (ver figura 4.8), energía (ver figura 21) y exergía (ver figura 22) del proceso que se evalúa ya que son indispensables para formular la caracterización termodinámica

del proceso. Todos los equipos (aparato de radiografía, tomógrafo y mamógrafo) funcionan de manera similar y como componente fundamental un tubo de rayos X.

**Figura 20. Balance de masa de la unidad de imagenología.**



**Figura 21. Balance de exergía de la unidad de imagenología.**



**Figura 22. Balance de energía de la unidad de imagenología.**

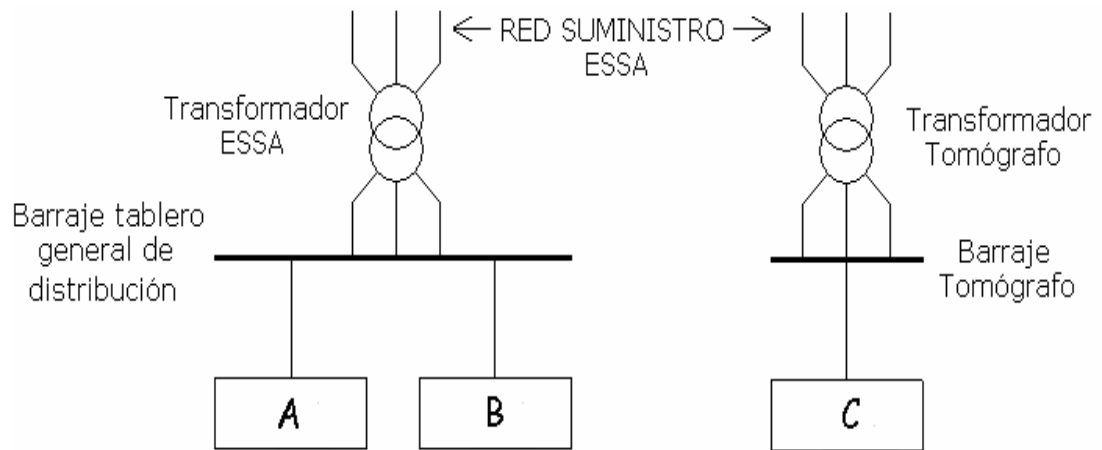


#### **4.2.1 Nivel de desagregación de un equipo de la unidad de imagenología.**

Para obtener el nivel de desagregación de la unidad de imagenología se tiene en cuenta que conforman esta unidad son totalmente electrónicos. A partir de esta característica, el nivel de desagregación de estos procesos es básico.

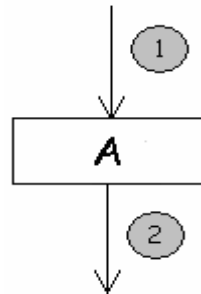
El diagrama de conexiones de la unidad de imagenología se muestra en la figura 23 siendo: A el aparato de radiografía, B el mamógrafo y C el tomógrafo.

**Figura 23. Diagrama de conexiones, unidad de imagenología**



Dado que los equipos de la unidad de imagenología funcionan de manera similar (ver figura 24), teniendo como componente principal el tubo de rayos X, sólo es necesario analizar un equipo de ésta unidad.

**Figura 24. Esquema funcionamiento del sistema de radiografía.**



Los flujos del sistema de radiografía (ver figura 24) son:

1. Energía eléctrica suministrada al equipo.
2. La imagen tomada (placa de rayos X).

Las ecuaciones termodinámicas de este proceso se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14. Ecuaciones termodinámicas para el aparato de radiografía.**

Flujo	Masa [kg]	Energía [J]	Exergía [J]
1	-	$E_1=S_1$	$B_1=P_1$

El flujo 2 representa el producto del aparato. Es la parte material que se obtiene del mismo.

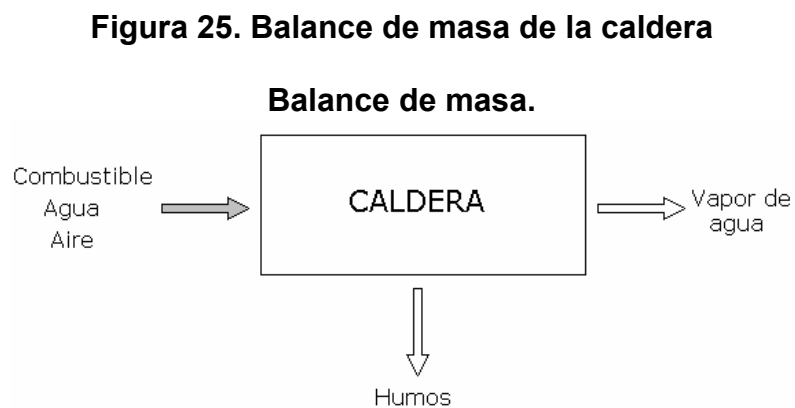
En el anexo D se presentan las ecuaciones correspondientes al tratamiento energético y exergético del flujo eléctrico (ecuaciones D3 y D13).

Ya que el consumo eléctrico está asociado a la necesidad de producir la placa o imagen, todo el costo de la energía estará asociado al producto. Cabe destacar que se deben tener en cuenta otros factores asociados a las imágenes producidas, ya que una imagen a tiempo puede salvar una vida y esta no tiene precio. Además de estos se encuentra, por ejemplo, el espacio, el personal calificado que maneja los aparatos, etc.

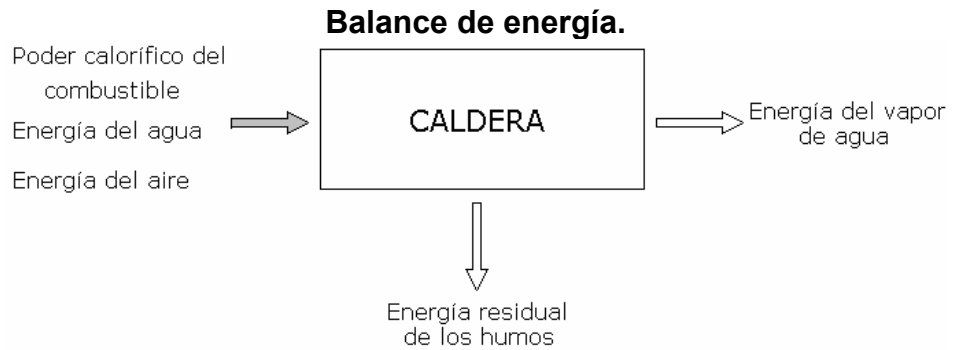
Teniéndose el análisis termoeconómico, se procede a aplicar la metodología que permitirá establecer las conclusiones, el estado del sistema y las posibles soluciones a los problemas que presente la unidad relacionado con el uso racional de la energía.

### 4.3 ANÁLISIS TERMOECONÓMICO DEL SISTEMA DE CALDERAS

Los balances de masa, energía y exergía del sistema de calderas se muestran en las figuras 25, 26 y 27.



**Figura 26. Balance de energía de la caldera**

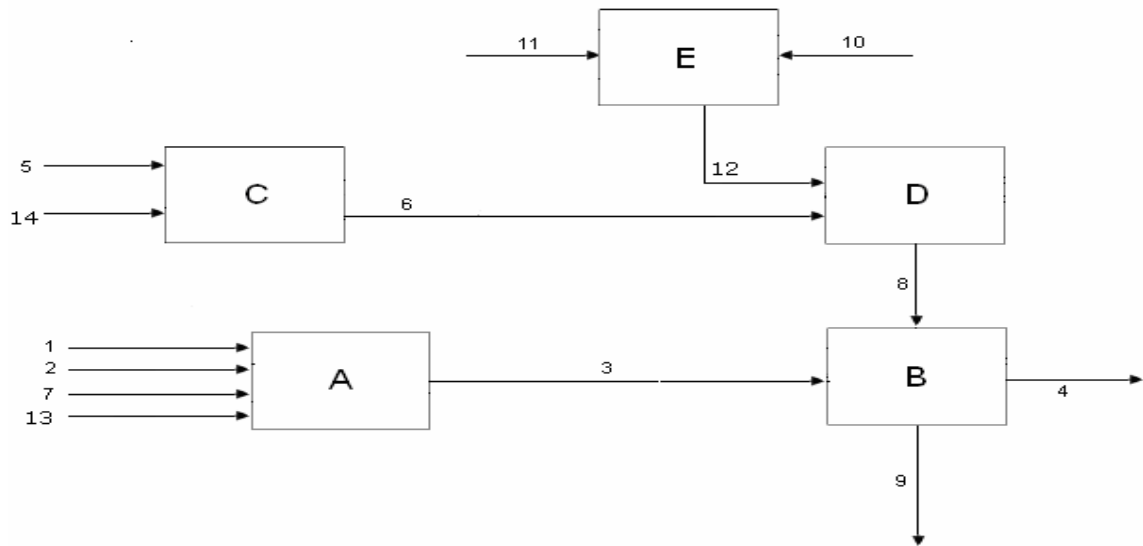


**Figura 27. Balance de exergía de la caldera**



**4.3.1 Nivel de desagregación de la caldera.** El sistema de funcionamiento de la caldera puede ser desagregado en cinco componentes fundamentales como se muestra en la figura 4.16, que corresponden al hogar (A), los tubos (B), el motor (C), la bomba (D) y el inyector (D).

**Figura 28. Esquema de funcionamiento de la caldera**



Los flujos que intervienen en el funcionamiento de la caldera (ver figura 28) son:

1. El aire.
2. El combustible.
3. Los gases salida del hogar.
4. Los gases de salida a la chimenea.
5. La potencia eléctrica consumida por el motor.
6. El trabajo.
7. La potencia eléctrica suministrada a la caldera.
8. El agua de entrada de la caldera.
9. El vapor de agua.
10. El agua condensada.
11. El agua suministrada por el acueducto municipal de Bucaramanga.
12. El agua requerida por la motobomba.
13. La potencia reactiva requerida por la caldera.
14. La potencia reactiva requerida por el motor.

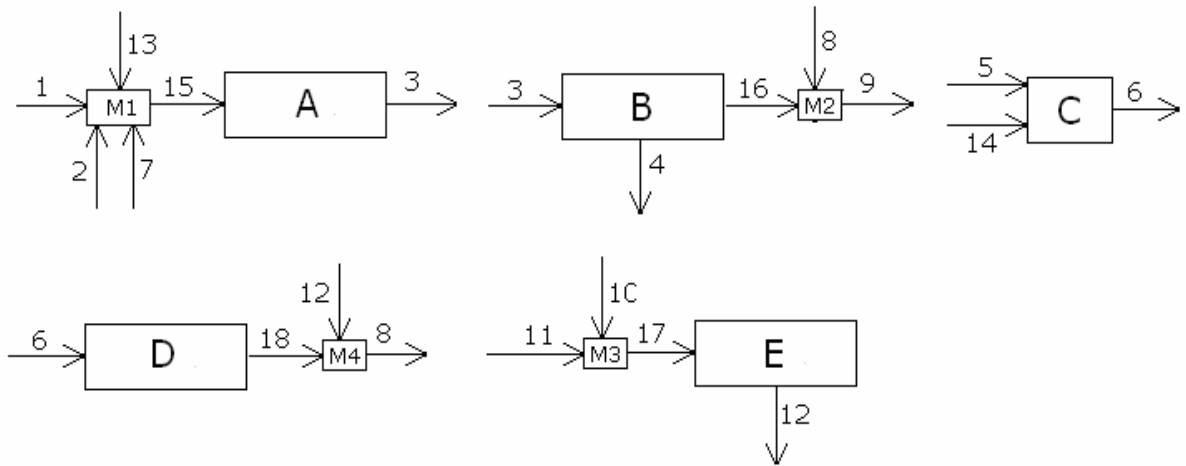
La tabla 15 presenta las ecuaciones termodinámicas requeridas para el estudio del sistema de calderas.

**Tabla 15. Ecuaciones termodinámicas para el sistema de caldera**

Flujo	Masa [kg]	Energía [J]	Exergía [J]
1	$m_1$	$E_1=U_1+PV$	-
2	$m_2$	-	$0.98 * VCI * M_C$
3	$m_3$	$E_3=U_3+PV$	$B_3= U_3+PV -T_0 * S_3^{tot}$
4	$m_4$	$E_4=U_4+PV$	$B_4= U_4+PV -T_0 * S_4^{tot}$
5	-	$E_5=S_5$	$B_5=P_5$
6	$m_6$	$E_6=U_6+PV$	$B_6= U_6+PV -T_0 * S_6^{tot}$
7	$m_7$	$E_7=U_7+PV$	$B_7= U_7+PV -T_0 * S_7^{tot}$
8	$m_8$	$E_8=U_8+PV$	$B_8= U_8+PV -T_0 * S_8^{tot}$
9	$m_9$	$E_9=U_9+PV$	$B_9= U_9+PV -T_0 * S_9^{tot}$
10	$m_{10}$	$E_{10}=U_{10}+PV$	$B_{10}= U_{10}+PV -T_0 * S_{10}^{tot}$
11	$m_{11}$	$E_{11}=U_{11}+PV$	$B_{11}= U_{11}+PV -T_0 * S_{11}^{tot}$

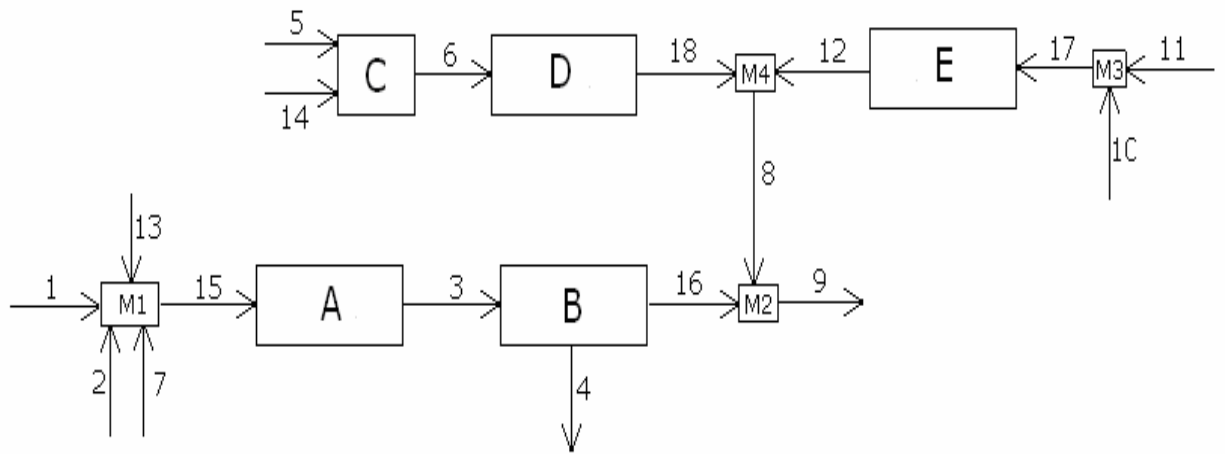
Sin embargo, para una mayor comprensión y un mejor desenvolvimiento en el desarrollo del método exergético, se propone trabajar con un nivel de desagregación mayor el cual incluye cuatro elementos adicionales los cuales se llamaran mezcladores que a la vez añaden al estudio cuatro flujos (ver figura 29).

**Figura 29. Nivel de desagregación propuesto incluyendo los mezcladores.**



Dados los grafos anteriores, el sistema desagregado final que se analizará es el mostrado en la figura 30.

**Figura 30. Nivel de desagregación con los mezcladores.**



De acuerdo a la teoría de costo exergético y del nivel de desagregación mostrado en la figura 30 se tiene la relación insumo-producto-residuo de la tabla 16.

**Tabla 16. Insumo-Producto-Residuo del sistema de la figura 30**

EQUIPO	FUEL	PRODUCTO	RESIDUO
HOGAR	B15	B3	
TUBOS	B3	B16	B4
MOTOR	B5+B14	B6	
BOMBA	B6	B18	
INYECTOR	B17	B12	
MEZCLADOR 1	B1 + B2+B7+B13	B15	
MEZCLADOR 2	B16 + B8	B9	
MEZCLADOR 3	B10 + B11	B17	
MEZCLADOR 4	B18 + B12	B8	

Teniendo en cuenta los pasos indicados en la teoría del costo exergético, la matriz de producción del sistema es la mostrada en la tabla 17.

**Tabla 17. Matriz de producción**

$\otimes$	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>	F <sub>11</sub>	F <sub>12</sub>	F <sub>13</sub>	F <sub>14</sub>	F <sub>15</sub>	F <sub>16</sub>	F <sub>17</sub>	F <sub>18</sub>
P <sub>1</sub>	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
P <sub>2</sub>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
P <sub>3</sub>	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
P <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
P <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1	0
P <sub>6</sub>	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0
P <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
P <sub>8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	-1	0
P <sub>9</sub>	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
P <sub>10</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P <sub>11</sub>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P <sub>12</sub>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P <sub>13</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P <sub>14</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P <sub>15</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
P <sub>16</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
P <sub>17</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
P <sub>18</sub>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En el anexo D se presentan las ecuaciones correspondientes al tratamiento energético y exergético del flujo eléctrico (ecuaciones D3 y D13).

En el anexo E se presentan las ecuaciones correspondientes al tratamiento energético y exergético de los flujos de gases ideales (ecuaciones E16 y E21).

En el anexo F se presentan las ecuaciones correspondientes al tratamiento energético y exergético de los flujos energéticos para gases combustibles (ecuaciones F1 y F2).

Para obtener el vector de recursos externos de los flujos asociados al sistema de calderas falta por definir el vector de costos del sistema total que son los insumos agregados a la caldera para su operación. Estos valores están determinados en su mayoría por el valor de sus respectivas exergías, caso particular es el del aire como ya se mencionó anteriormente y se le asignará el valor de la exergía total necesaria para su recolección.

El vector de recursos externos se muestra en la tabla 18.

**Tabla 18. Vector de recursos externos**

Flujo	Recursos externos
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	$0.98 * VCI * M_C$
12	$\sqrt{3} * \cos(\varphi) * \int (V * I) dt$
13	$\sqrt{3} * \cos(\varphi) * \int (V * I) dt$
14	$B_f = (H - H_0) - T_0(S - S_0) - \sum \mu_i(N_i - N_0)$
15	$B_f = (H - H_0) - T_0(S - S_0) - \sum \mu_i(N_i - N_0)$
16	$B = \cos(\varphi) \cdot \left( E_1 + \int (V \cdot (I_T - I_r)) \cdot dt \right)$
17	$B = \cos(\varphi) \cdot \left( E_1 + \int (V \cdot (I_T - I_r)) \cdot dt \right)$
18	0

Teniéndose definida la matriz de producción del sistema y su vector de recursos externos, se aplica la teoría del costo exergético con la cual se obtiene la eficiencia e irreversibilidades del proceso, para que a continuación se puedan elaborar las conclusiones sobre el estado del sistema y las medidas correctivas a tomar.

## **5. PLAN DE USO RACIONAL Y EFICIENTE DE LA ENERGÍA PROPUESTO**

En el presente ítem se proponen las medidas correctivas a tomar, para lograr un ahorro significativo en cuanto a consumo energético y económico se refiere.

Anterior a esto se aplicó la metodología planteada en este trabajo, se analizaron los resultados y posteriormente se obtuvieron las conclusiones que permiten establecer las características de funcionamiento del sistema, su estado, y los potenciales de ahorros de energía.

### **5.1 AIRE ACONDICIONADO**

El sistema de aire acondicionado al que se le aplicó el análisis exergético es de tipo central y utiliza como medio de condensación el agua. Al realizar el análisis se encontraron algunas deficiencias que elevan el costo del proceso, éstas serán mencionadas a continuación y posteriormente se plantearán las medidas correctivas que se deberían tomar.

Se observó durante la visita de inspección que gran parte de la instalación del sistema de control estaba en malas condiciones (perdida total del aislamiento y de sus características de conducción debido a cortocircuitos), razón por la que encienden o apagan las unidad de manera manual. El aislamiento de los ductos de conducción del aire se encuentra en malas condiciones conllevando a pérdidas producidas por intercambio de calor con el exterior. En los recintos en donde se encuentra acondicionando el aire no se presenta una conciencia de ahorro ya que la mayoría del tiempo las puertas permanecen abiertas razón por la cual se incrementa la carga térmica de los equipos y por tanto se eleva el consumo de energético. En las salidas de aire caliente que van al exterior se encuentra depositada gran cantidad de suciedad debido al poco mantenimiento que se les realiza, obstruyendo la salida del aire y por lo tanto generando una operación inadecuada del equipo. En algunos recintos en donde se encuentran instalados controles de tiempo y temperatura tienen un funcionamiento deficiente o simplemente no se encuentran en funcionamiento, y en otros no se encuentra instalado.

Por las razones anteriormente expuestas y de acuerdo al análisis termoeconómico se propone:

- ❖ Cambio de la instalación de control y revisión de las que se encuentran en buen estado, con esto se lograrán evitar las pérdidas por malas conexiones, conexiones defectuosas y consumo de energéticos debido a la falta de control en el proceso.

- ❖ El aislamiento térmico de los ductos conductores del aire refrigerado debe ser reemplazado en aquellas zonas donde se han perdido sus características. En los lugares donde éste se encuentre deteriorado se debe reacondicionar.
- ❖ Implementar en las puertas de acceso a los recintos donde se esta acondicionando el ambiente, gatos hidráulicos que permita mantener cerradas las puertas de manera continua.
- ❖ Desarrollar planes de mantenimiento preventivo, ya que estos permiten detectar anomalías que estén ocasionando pérdidas en el sistema.
- ❖ Limpieza semestral de los equipos ya que la suciedad es uno de los factores que reduce la vida útil del sistema y estos están expuestos a elevados niveles de contaminación.
- ❖ Es necesario instalar controles de tiempo y temperatura los cuales permitan reducir los ciclos de trabajo de los ventiladores de evaporación hasta en un 50% y reparar aquellos que no se encuentran en funcionamiento.
- ❖ De acuerdo al análisis termoeconómico la eficiencia del compresor utilizado en las unidades de aire acondicionado del HUS es deficiente y tiene un consumo promedio de 1,9 kW por tonelada de aire refrigerado y según el análisis exergético del compresor muestra un nivel de irreversibilidad de 35015,6 kJ, razones por las cuales se plantea que éste debería ser reemplazado por uno de más alta eficiencia con un menor consumo y bajos niveles de pérdidas. De acuerdo a la tabla 19 el cambio podría ser por uno de tipo centrífugo.

**Tabla 19 Tipo de compresor vs Consumo Promedio**

TIPO COMPRESOR	MEDIO CONDENSACIÓN	kW/TR	I.P.L.V
Reciprocante	Aire	1,1	10,5 EER
Rotativo	Aire	1,1	11,5 EER
Tornillo	Aire	1,1	12,2 EER
Reciprocante	Agua	0,9	15,7 EER
Tornillo	Agua	0,65	0,575
Centrífugo	Agua	0,55	0,523
Centrífugo con variador	Agua	0,55	0,460

A continuación se realiza un análisis numérico del ahorro de energía que se puede lograr con el cambio del compresor antiguo, por uno nuevo de mayor eficiencia.

Las características de esta unidad son:

1. Capacidad de la unidad de refrigeración = 6 T.R.
2. Eficiencia equipo en uso = 1,90 kw/T.R
3. Eficiencia equipo nuevo = 0,60 kw/T.R.
4. Costo de la energía eléctrica = 209,89075 \$/Kwh
5. Factor de diversidad = 0,60 (Este se relaciona con el nivel de ocupación promedio)

De acuerdo a los parámetros del sistema se tiene que el costo de la energía eléctrica consumida por estas unidades es:

➤ Unidad de aire acondicionado en uso:

$$0,6 \times 6 \text{ T.R.} \times 1,90 \text{ kw/T.R.} \times 209,89075 \text{ \$/kwh} \times 365 \text{ Días/Año} \times 24 \text{ h/Día} \\ = 12\ 576\ 317,9148 \text{ \$/Año}$$

➤ Unidad de aire acondicionado en nueva:

$$0,6 \times 6 \text{ T.R.} \times 0,60 \text{ kw/T.R.} \times 209,89075 \text{ \$/kwh} \times 365 \text{ Días/Año} \times 24 \text{ h/Día} \\ = 3\ 917\ 468,8152 \text{ \$/Año}$$

➤ Diferencia:

$$8\ 658\ 849,0996 \text{ \$/Año}$$

El valor del equipo nuevo es de \$ 7 100 256, el tiempo de recuperación de la inversión (sin tener en cuenta la vida útil y el valor del dinero en el tiempo) sería de:

$$TRI = \frac{\text{Costo equipo}}{\text{Ahorro generado}} = \frac{7\ 100\ 256 \text{ \$}}{8\ 658\ 849,0996 \frac{\text{\$}}{\text{año}}} = 0,8199 \text{ años} \cong 9,84 \text{ meses}$$

Como se puede observar, el ahorro que se obtendría al cambiar la unidad compresora es importante y más cuando se tienen cinco unidades similares, caso del HUS.

El análisis exergético muestra que la irreversibilidad que se presenta en el bloque B es de 109 456,4869 J, ésta se presenta por que no hay controles adecuados de temperatura o por la baja eficiencia de los ventiladores del evaporador o por la falta de control en los mismos, razones por las cuales se propone cambiar el ventilador y mejora los controles de temperatura.

## 5.2 CALDERAS

El proceso que realiza una caldera en su funcionamiento tiene un grado de complejidad elevado, ya que involucra procesos tanto físicos como químicos (estos últimos contemplados ínfimamente en este trabajo). Es por ello que su análisis se realizó con el nivel de desagregación simplificado, que permite establecer los potenciales de ahorro energéticos que se puedan dar en este sistema.

Durante el proceso de inspección del área de calderas se pudo observar varias irregularidades en el sistema que afectan el proceso. Entre ellas están la baja frecuencia con la que se realiza el mantenimiento al tanque de condensados, lo cual puede provocar que sedimentos arrastrados por el agua creen una capa de suciedad en la superficie del tanque que puede afectar a elementos tales como los sensores de temperatura y por ende el funcionamiento de tales dispositivos.

En los sistemas utilizados para el llenado de la caldera se encontraron anomalías tales como fugas de agua a través de tuberías de bombeo, mangueras instaladas de manera incorrecta, y la ausencia de arrancadores para los motores de bombeo. Estos problemas pueden causar problemas tales como reducción de la eficiencia de los motores, pérdidas debidas a fugas no contempladas, e incrementos de corriente en el arranque de los motores que en un momento determinado limitan la funcionalidad de la caldera.

Ahora, en el estudio exergético, se observó que el bloque en donde se presenta la mayor cantidad de irreversibilidades es en el sistema de tubos conductores de los gases de combustión, dichas pérdidas se derivan de efectos tales como radiación, convección, y la baja efectividad en la transmisión del calor al medio circundante. Estas irreversibilidades no se pueden eliminar ya que estas pérdidas son propias del sistema de conducción de los gases de combustión.

Dado lo anterior, y teniendo identificados los sistemas en donde se encuentran las pérdidas exergéticas se proponen a continuación algunas acciones que deberían emprenderse para hacer un adecuado de la energía.

- ❖ Aunque no es visible dentro del análisis exergético, el uso de arrancadores en el sistema de motores de las calderas es importante, ya que la cantidad de energía requerida en el estado transitorio es alta, además, ante situaciones de funcionamiento limitado (por ejemplo cuando se activa la planta auxiliar), en las condiciones actuales no es posible la acción de las calderas, pero con dichos arrancadores su funcionamiento sería posible, garantizando así confiabilidad, y el aumento de la vida útil del equipo
- ❖ Se recomienda realizar periódicamente inspecciones para detectar las fugas de agua y de tubería averiada y su reemplazo con el fin de garantizar la

disminución de pérdidas asociadas a daños en la tubería, esto reduciría el tiempo de funcionamiento de la motobomba disminuyendo el consumo eléctrico y a la vez el consumo de agua evitando así desperdicios innecesarios.

- ❖ Replantear la frecuencia de mantenimiento del tanque de condensados. Se aconseja realizar mantenimiento a dicha unidad cada tres meses para así garantizar su buen funcionamiento, evitando la formación de barreras o películas sobre la superficie interna del tanque, que provoquen errores en la lectura de las condiciones internas del tanque. Hay que recordar que se requiere una temperatura de diseño especial en el agua para el óptimo funcionamiento de la caldera, y el incumplimiento de dicho parámetro reduce el rendimiento de la máquina.
- ❖ En un nivel más elevado, y con una inversión mayor pero no por eso inapropiada, se recomienda la inspección de las tuberías conductoras del vapor de agua ya que se determinó durante las visitas que éstas presentaban fugas, haciendo que el tiempo de operación de las calderas aumente, una disminución de los periodos de operación corresponderían a un ahorro sustancial, dicho porcentaje de ahorro dependerá de la cantidad de fugas de vapor presentes en los ductos y de la magnitud de la fuga. El problema que se presenta por no conocerse los planos de la instalación, se dificulta plantear los costos económicos que acarrearía dicho cambio.

### **5.3 UNIDAD DE IMAGENOLOGÍA**

La unidad de imagenología presenta unas características de funcionamiento con un nivel de complejidad elevado y que dado su nivel de desarrollo, pocas personas poseen la autorización para la manipulación de los elementos, debido a esto no es posible realizar un modelo con el nivel de agregación adecuado para el buen análisis, por otro lado, las curvas de tensión y corriente que allí se presentan son tan complejas que solo después de exhaustivas matemáticas puede llegarse a la obtención de los valores de exergía requeridos.

Por otro lado, al analizar el insumo y el producto del elemento visto desde una perspectiva global, vemos que mientras el insumo corresponde a energía eléctrica y a “pedazos” de un material sintético (placas donde se toma la radiografía, mamografía, etc.), el producto final corresponde a una placa del mismo material sintético que se introdujo como insumo, esto hace que el valor energético de dicha placa dependa únicamente de la calidad de diagnóstico que este pueda brindar al médico encargado de dicho examen, es por ello que dicha unidad fue desechada para el análisis energético, ya que sus valores no se podrían generalizar, debido a que cada caso es diferente uno del otro.

Sin embargo, y a pesar de los problemas antes mencionados si se puede realizar una recomendación en el momento de la prestación del servicio, y esta es la

planificación a la hora de la toma de exámenes. Dichos elementos poseen un consumo de energía considerable así ellos no se encuentren operando, solo en estado de stand-by, y por ello, el dejarlos mucho tiempo encendidos genera pérdidas. La falencia más frecuente en la planeación se da lugar cuando son los menores los pacientes. En estos casos se recomienda preparar a los infantes para el examen ya sea durmiéndolos (en el caso de los bebés), o tranquilizándolos en el caso de aquellos más grandecitos, y con un intervalo de tiempo prudencial para que el equipo no posea largos intervalos de inactividad, aumentando de esta forma su rendimiento.

## 6. CONCLUSIONES

El método exergético amplía en gran manera los horizontes en el área de las auditorías energéticas ya que al introducir el concepto de exergía permite descubrir la verdadera eficiencia de los equipos y a partir de ello reconocer con mayor exactitud los esfuerzos necesarios para que las pérdidas sean mínimas.

El nivel de agregación de un sistema es un factor determinante a la hora de establecer los mecanismos de medición ya que de ello depende que tan a fondo se desee estudiar el sistema y que tan especializados resultan ser los instrumentos de medida, además, determina el nivel de confiabilidad en el resultado del método gracias a su especificidad.

El modelo termoeconómico de un proceso permite conocer el valor correspondiente de cada flujo que interviene en un sistema y en que parte es se donde presenta el mayor consumo de energéticos. Sabiéndose esto se logra puntualizar en aquellos lugares donde es necesario que la eficiencia y las irreversibilidades sean menores, para que de esta manera se puedan plantear soluciones que permitan una disminución en el consumo de energía y por ende en los costos del proceso.

Independiente del tipo de auditoría que se haga en el sector empresarial, el primer paso a seguir para hacer uso racional y eficiente de energía es la concientización del personal que labora y utiliza las instalaciones donde se presentan consumo de energéticos, para luego proponer de acuerdo a los análisis obtenidos de las auditorías propuestas URE.

## BIBLIOGRAFÍA

Ref 1:

HOTEL, Jhon R y BUCKIUS, Richard. Principios de termodinámica para ingenieros. México: Editorial McGraw Hill, 1990.

Ref 2:

GORAN, Wall. "EXERGETICS". Mölndal: 1998.

Ref 3:

"PROYECTO CLÍOPE CASO PILOTO PLANTA TERMOBARRANCA, Informe Técnico Termoeconomía, CAPTE (Centro Piloto de Capacitación y Optimización de Centrales Térmicas y Estudios Energéticos). UIS, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA"

Ref 4:

MASANORI, Shukuya y ABDELAZIZ, Hammache. "Introduction to the Concept of Exergy - for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems". Abril 25 del 2002

Ref 5:

GUALLIAR, JM, MARIN, J.A. y VALERO, Turegano A. "LA EXERGÍA UN PLANTEAMIENTO MÁS PRECISO DEL AHORRO DE ENERGÍA. 2ed. Conferencia Nacional sobre el ahorro energético y alternativas energéticas, 42 Feria oficial y nacional de muestras – Zaragoza (España).

Ref 6:

TORRES CUADRA, César y VALERO, Antonio. CURSO DE DOCTORADO TERMOECONOMÍA, 2000

Ref 7:

GUÍA METODOLÓGICA PARA EL AHORRO DE ENERGÍA EN CENTROS HOSPITALARIOS, UPME, 2005

Ref 8:

COTELL, L.W. Y OLAREWAJU, S. "AIRE ACONDICIONADO Y REFRIGERACIÓN PARA REGIONES TROPICALES". Mexico D.F.: Editorial Limusa, 1995.

Ref 9:

<http://www.caloryfrio.com/dossiers/saberhacer/aire/saberhacer-clima-indice.htm>

Ref 10:

<http://www.terra.es/personal5/anajes/home.htm>

Ref 11:

GARRIDO, Julio. RAYOS X Y LA ESTRUCTURA FINA DE LOS CRISTALES. FUNDAMENTOS, TEORÍAS Y MÉTODOS PRÁCTICOS. Madrid: Julio, 1946.

Ref 12:

<http://www.bioingenieros.com/bio-maquinas/tomografia/index.htm>

Ref 13:

[www.diee.unicam.es/pdf/007%20calderas](http://www.diee.unicam.es/pdf/007%20calderas)

Ref 14:

GRANADOS MORA, Nancy Marlene. “ANÁLISIS DE FALLAS, MANUAL DE FUNCIONAMIENTO Y MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL EQUIPO BÁSICO DEL HOSPITAL UNIVERSITARIO RAMÓN GONZÁLEZ VALENCIA”, Tesis de Grado (UIS), 1995.

Ref 15:

HART, Hayt William. ANÁLISIS DE CIRCUITOS EN INGENIERÍA. México: editorial McGRAW-HILL, 1975.

Ref 16:

BURGESS H., Jennings y R., Samuel. “REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING”. Editorial continental, 1970.

Ref 17:

W.F., Stoecker. “REFRIGERACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL AIRE”, New Cork: Editorial McGraw Hill, 1958.

## **Anexo A. Sistema de aire acondicionado**

Proceso por el que se reduce la temperatura de un espacio determinado y se mantiene esta temperatura con el fin, por ejemplo, de enfriar alimentos, conservar determinadas sustancias o conseguir un ambiente agradable. La refrigeración evita el crecimiento de bacterias e impide algunas reacciones químicas no deseadas que pueden tener lugar a la temperatura del ambiente.

### **A.1. GENERALIDADES**

Una instalación de acondicionamiento de aire no solo está destinada a producir enfriamiento del aire, sino también para secarlo en verano, eventualmente humectarlo en invierno y producir en todo momento la adecuada ventilación de los locales para asegurar la calidad del aire interior, lo cual involucra intercambios de energía.

Esta transferencia de energía se realiza por la intermediación de un fluido refrigerante sometido a un ciclo termodinámico continuo de sucesión de cambios de estados: vapor/líquido.

Durante casi 1500 años fue poco el progreso y solo hasta el año 1748 se llevo a cabo el primer intento por utilizar sistemas modernos de refrigeración, siendo William Cullen quien investigó los efectos de evaporación del éter etílico en un vacío parcial. Hubo que esperar hasta el año 1834, cuando Jacob Perkins patentó un sistema de refrigeración por ciclo cerrado utilizando un compresor.

El uso de hielo de origen natural o artificial como refrigerante estaba muy extendido hasta poco antes de la I Guerra Mundial, cuando aparecieron los refrigeradores mecánicos y eléctricos.

En la refrigeración mecánica se obtiene un enfriamiento constante mediante la circulación de un refrigerante en un circuito cerrado, donde se evapora y se vuelve a condensar en un ciclo continuo. Si no existen pérdidas, el refrigerante sirve para toda la vida útil del sistema. Todo lo que se necesita para mantener el enfriamiento es un suministro continuo de energía y un método para disipar el calor. Los dos tipos principales de sistemas mecánicos de refrigeración son el sistema de compresión, empleado en los refrigeradores domésticos y en los aparatos de aire acondicionado, y el sistema de absorción, que en la actualidad se usa sobre todo en los acondicionadores de aire por calor, aunque en el pasado también se empleaba en refrigeradores domésticos por calor.

Existen equipos acondicionadores condensados por aire y condensados por agua. Los equipos pueden ser compactos y partidos. Los primeros constan de una sola unidad, mientras que los partidos están formados por dos o más unidades. En

cuanto al servicio que prestan, los equipos se denominan unitarios, si se trata de equipos independientes en cada habitación, o individuales, cuando un solo equipo atiende al conjunto de la vivienda o local. [Ref 8]

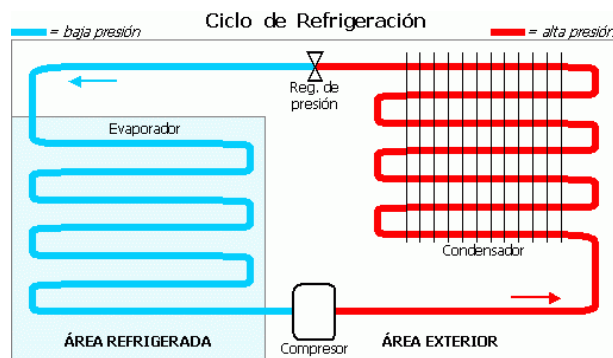
## A.2. TIPOS DE SISTEMAS PARA ACONDICIONAMIENTO DEL AIRE.

Para el sistema, el proceso se puede realizar de dos maneras: por compresión o por absorción.

**A.2.1. Sistema de acondicionamiento del aire por compresión:** En las máquinas de este tipo constituye la parte central del sistema la bomba o compresor, este recibe el refrigerante sobrecalentado proveniente del evaporador a baja presión, eleva la temperatura y la presión del gas refrigerante para hacerlo circular por el condensador o intercambiador de calor. Es allí donde el gas cede su calor al aire o al agua fría que lo rodea, logrando que el gas llegue al punto donde su temperatura es tal que se produce la condensación del gas, pasando de estado gaseoso a estado líquido liberando calor como ocurre en estos casos.

El gas en estado líquido pasa del condensador hasta la válvula de expansión, allí la presión y la temperatura del gas disminuyen. A continuación el gas pasa por el evaporador, donde se produce un intercambio de calor con el recinto que se desea refrigerar, haciendo que el gas cambie de fase líquida a gaseosa, cediendo frío al recinto (producto) y logrando extraer el aire caliente (ver figura 31). Al producirse el cambio de fase la temperatura del gas aumenta. El gas en estado gaseoso es succionado por el compresor y repitiéndose el ciclo mencionado.

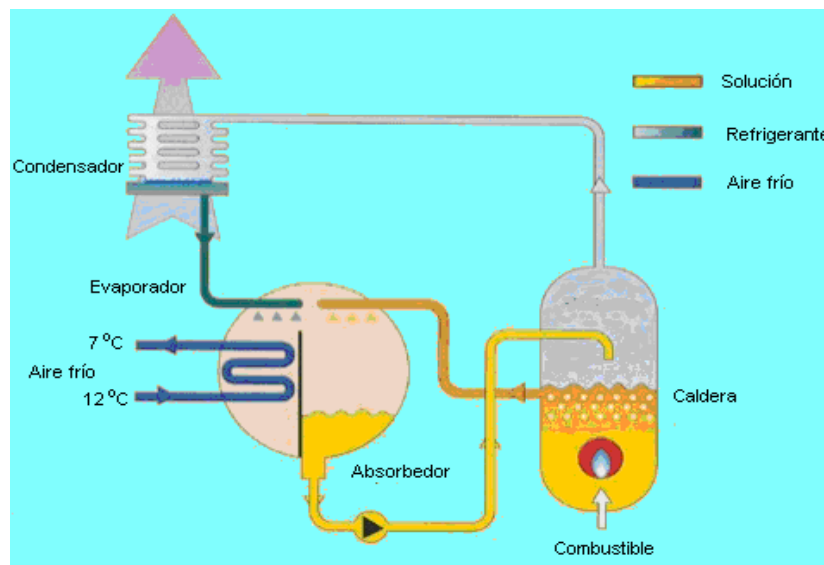
**Figura 31. Sistema de acondicionamiento de aire por compresión.**



**A.2.2. Sistema acondicionamiento del aire por absorción:** En el sistema por absorción se consigue el enfriamiento mediante la energía térmica de una llama de gas, de resistencias eléctricas, o de la condensación del vapor de agua a baja presión. La instalación tiene una serie de tubos de diversos diámetros, dispuestos en circuito cerrado, los cuales están llenos de amoniaco y agua. El amoniaco se disuelve fácilmente en el agua y es denso. Se acumula en el fondo del sistema como una solución concentrada. Este se diluye bajo la acción de la energía

térmica que hierve parte del amoníaco, consiguiendo que el amoníaco se desprenda en forma de gas caliente, lo cual aumenta la presión cuando este gas se enfría en el condensador, bajo la acción de agua o aire frío, se produce la condensación y se convierte en amoníaco líquido. Fluye así por una válvula dentro de evaporador, donde enfría el aire circundante absorbiendo el calor de éste, lo cual produce nuevamente su evaporación. A continuación, entra el amoníaco, en estado gaseoso, en contacto con el agua, en la cual se disuelve. Esta fuerte solución de amoníaco retorna, impulsada por una bomba, al gasificador o hervidor, donde la llama de gas se calienta. Entonces vuelve a repetirse el ciclo (ver figura 32) [Ref 9].

**Figura 32. Sistema de acondicionamiento de aire por absorción.**



### **A.3. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO.**

El equipo de acondicionamiento de aire se encarga de producir frío o calor y de impulsar el aire tratado a la vivienda o local. Los equipos de acondicionamiento poseen cuatro componentes principales: compresor, condensador, evaporador y válvula de expansión.

**A.3.1. Compresor:** Utilizado para comprimir un fluido en su estado gaseoso para utilizarlo en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor (ver figura 33). Utilizado para aumentar la presión y temperatura del gas.

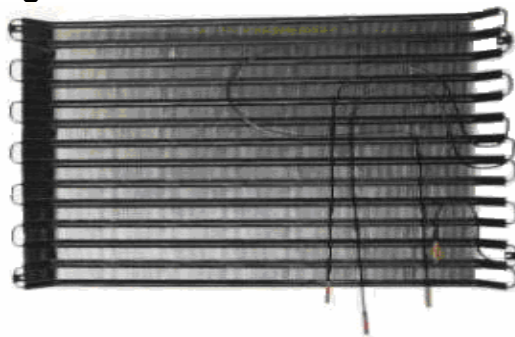
**Figura 33. Compresor.**



**A.3.2. Condensador:** El condensador tiene la función de poner en contacto los gases que provienen del compresor con un medio para licuarlo. El gas refrigerante a alta presión y temperatura descargado de los compresores se enfría con aire o con agua para permitir que el gas se condense. Se tienen dos tipos de unidades condensadoras:

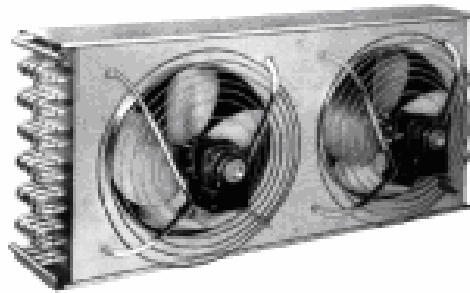
- **Condensador de aire:** tienen como medio enfriador el aire ambiente y pueden ser de dos tipos: de tiro natural o de tiro forzado.
- ✚ **Tiro natural** (ver figura 34): utilizado en refrigeradores domésticos excepto los más grandes, suelen ser de tubo liso dispuestos en forma de serpentín, como la velocidad del aire es lenta se acumula mucha suciedad.

**Figura 34. Condensador de tiro natural**



- ✚ **Tiro forzado** (ver figura 35): utilizan ventiladores para aumentar la velocidad del aire, por lo tanto se reduce la superficie de tubo.

**Figura 35. Condensador de tiro forzado**



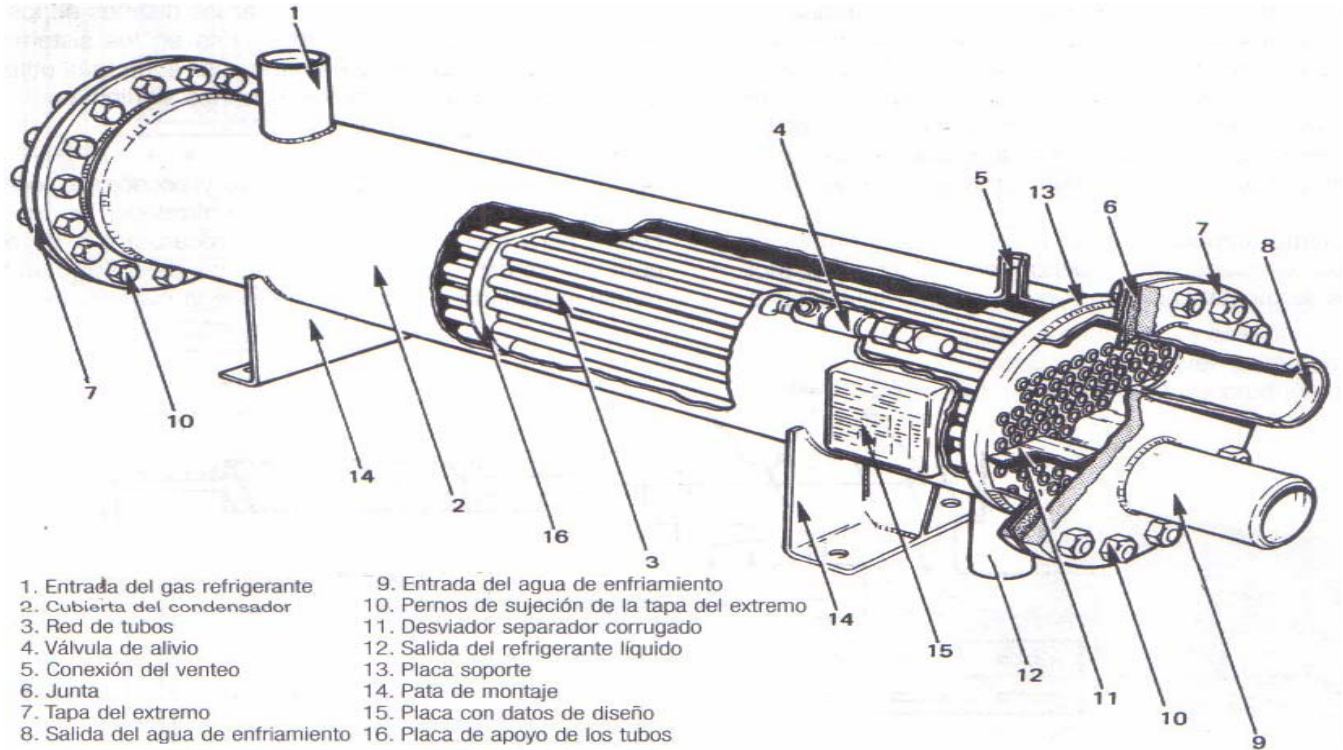
■ **Condensador de agua:** Son aquellos que usan el agua como medio condensable (ver figura A.6). Para asegurar un buen funcionamiento y limitar el consumo de agua, las temperaturas idóneas del agua a la salida del condensador con respecto a la temperatura de entrada han de ser:



- Temperatura de entrada hasta 15°C, la salida ha de ser 10°C más que la entrada.
- 
- Temperatura de entrada a partir de 16°C, la salida ha de ser 9°C más que la entrada.
- 
- Temperatura de entrada a partir de 21°C, la salida ha de ser 8°C más que la entrada.
- 

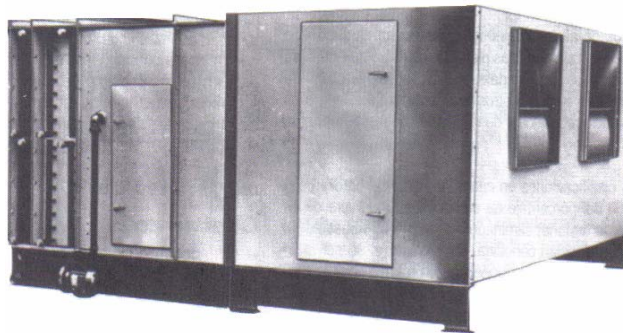
Se deben instalar torres de recuperación de agua las cuales deben recuperar hasta el 75 % del agua utilizada.

**Figura 36. Condensador tubular enfriado por agua**



**A.3.3. Evaporador:** Es el lugar donde se produce el intercambio térmico entre el refrigerante y el medio a enfriar. Es un intercambiador de temperaturas entre medios, de modo que mientras uno de ellos se enfría, disminuyendo su temperatura, el otro se calienta aumentando su temperatura. Los evaporadores pueden ser de distintas formas o tamaños (ver figura 37) [Ref 8].

**Figura 37. Unidad evaporadora industrial**



#### **A.3.4. Válvula de expansión**

Sistema de expansión de doble función (ver figura 38):

- En su interior se produce una expansión del fluido frigorífico que disminuye de temperatura y de presión. El fluido frigorífico alcanza la temperatura adecuada para poder evaporarse en el evaporador.
- La válvula de expansión regula el caudal de fluido que circula por el circuito de forma que se mantengan la presión y temperatura adecuada de condensación y evaporación [Ref 10].

**Figura 38. Válvula de expansión termostática.**



#### **A.4. FUNCIONAMIENTO**

El desarrollo de este trabajo se centrará en sistemas de aire acondicionado por compresión, ubicados en el HUS de la ciudad de Bucaramanga.

El objetivo del aire acondicionado es brindar el confort necesario a los ocupantes de las instalaciones.

Su funcionamiento se describe a continuación:

El primer paso es energizar los distintos componentes, esto se hace por medio de un interruptor que conecta la energía eléctrica al sistema.

El compresor empieza a bombear el gas en estado gaseoso al condensador.

Por la unidad condensadora se hace circular aire o agua fría, haciendo que el gas cambie de estado gaseoso a estado líquido.

El gas en estado líquido circula hasta llegar a la válvula de expansión que permite que el gas baje la presión.

A continuación el gas pasa por una unidad evaporadora que hace que cambie de estado otra vez. Esto se logra tomándose el aire caliente del recinto al cual se le requiere acondicionar su temperatura para luego hacerlo pasar por la unidad y así por efectos de intercambio de calor el recinto se enfríe.

Después de esto el gas retorna a la unidad compresora para repetirse cíclicamente el proceso.

## **Anexo B. Unidad de Imagenología**

El área de imagenología comprende todos los implementos utilizados para realizar toma de exámenes en seres vivos, por ejemplo de la estructura ósea, redes cristalinas, etc. Entre los implementos utilizados en esta área se encuentra los aparatos de radiografía, mamografía y equipos de tomografía computarizada. La energía para su funcionamiento proviene básicamente de la electricidad, lo cual es un factor de interés en este trabajo.

### **B.1. GENERALIDADES**

La denominación rayos x designa a una radiación descubierta por Wilhelm Röntgen a finales del siglo XIX, invisible, capaz de atravesar cuerpos opacos y de impresionar las películas fotográficas. La longitud de onda está entre 10 a 0,1 nanómetros. Tal radiación es una radiación electromagnética de la misma naturaleza que las ondas de radio, las microondas, los rayos infrarrojos, la luz visible, los rayos ultravioleta y los rayos gamma. Los rayos X surgen de fenómenos extranucleares, a nivel de la órbita electrónica, fundamentalmente producidos por frenamiento de electrones. La energía de los rayos X en general se encuentra entre la radiación ultravioleta y los rayos gamma producidos naturalmente.

Son emitidos por una máquina como partículas individuales (fotones) que pasan a través de un cuerpo para luego ser detectados por una película sensible.

La ciencia básica de la generación y detección de rayos X es la clave tras las radiografías generales del cuerpo, de las mamografías, de las fluoroscopias (creación de imágenes en pantallas de video en tiempo real) y de las tomografías computarizadas, equipos de interés para el desarrollo de este trabajo.

### **B.2. EQUIPOS UNIDAD IMAGENOLOGÍA**

Los siguientes son los equipos de la unidad de imagenología: aparatos de radiografía, tomógrafo computarizado y aparatos de mamografía.

**B.2.1. Equipo de radiografía:** El equipo de radiografía (ver figura 39) consiste en una mesa grande y plana con una gaveta donde hay una bandeja que contiene el cassette de película de rayos X. Suspendido sobre la mesa se encuentra un aparato que contiene el tubo de rayos X, componente fundamental del equipo, que se puede mover sobre el cuerpo para dirigir los rayos al lugar donde se desea tomar la impresión.

**Figura 39 Equipo de radiografía**

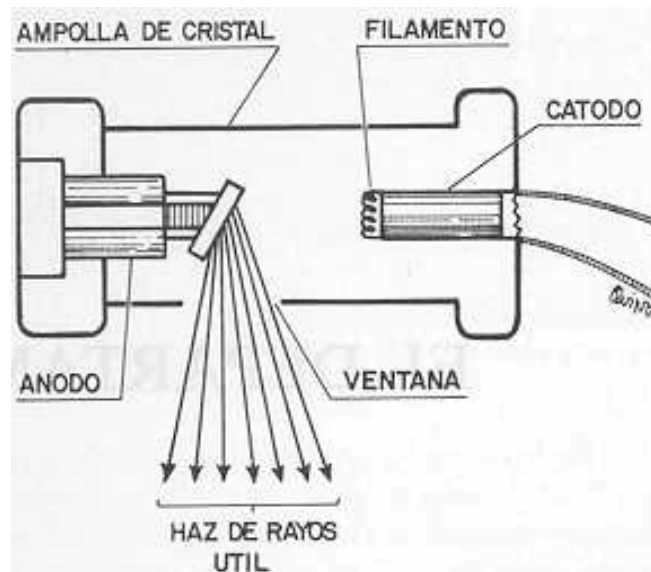


- **Tubo de rayos X:** Tubo de vacío rodeado de una cubierta de plomo con una pequeña ventana que deja salir las radiaciones al exterior (ver figura B.2). El espacio entre la funda aislante y el tubo está relleno de aceite, que actúa como disipador. El tubo de vacío (diodo) tiene un filamento en uno de los extremos (cátodo o negativo) y un blanco metálico que puede ser fijo o móvil en el otro extremo (ánodo o positivo).

Por el filamento del cátodo se hace circular una corriente que pone al mismo incandescente, liberando de esta forma gran cantidad de electrones que serán impulsados a gran velocidad hacia el ánodo, mediante la aplicación de una tensión entre el ánodo y el cátodo de alrededor de 120 kV.

Los electrones acelerados, que poseen una gran energía cinética, chocan contra el blanco metálico del ánodo, cediéndole toda la energía. Esta energía es transformada en un 99% en calor y un 1% en radiación X que se transmite al exterior del tubo.

**Figura 40. Diagrama esquemático de un tubo de rayos x**



El cátodo está formado por un filamento de tungsteno, arrollado en forma de espiral, similar al de una bombilla eléctrica común. Este filamento se coloca en un alojamiento en forma de copa, llamado copa enfocadora, que tiene la misión de lograr un haz de electrones de forma y tamaño adecuados y cuya dirección sea la correcta para impactar en el blanco metálico del ánodo.

El ánodo está construido generalmente de cobre y posee en su cara exterior un recubrimiento de una aleación de tungsteno, renio y molibdeno (punto de fusión por encima de los 3300°C) en donde impactan los electrones. Para que los rayos X emerjan por el sitio deseado, el ánodo tiene una disposición oblicua al haz incidente [Ref 11].

**B.2.2. Tomógrafo:** Compuestos básicamente por tres grandes módulos o bloques. Estos son: el gantry o garganta, computador y la consola (ver figura 41).

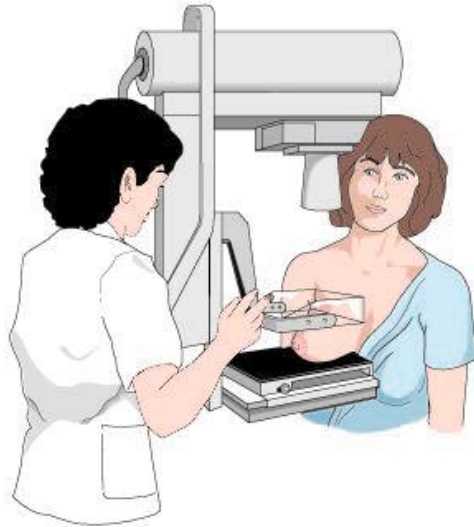
**Figura 41. Vista frontal del tomógrafo computarizado**



- **Gantry o garganta:** El gantry es el lugar físico donde es introducido el paciente para su examen. En él se encuentran el tubo de rayos X, el sistema de detección de rayos X y todo el conjunto mecánico necesario para realizar el movimiento asociado con la exploración.
- **Computador:** Módulo que está compuesto por tres unidades, cuyas funciones están claramente diferenciadas. Éstas son:
  - ✚ Unidad de control del sistema (CPU): tiene a su cargo el funcionamiento total del equipo.
  - ✚ Unidad de reconstrucción rápida (FRU): encargada de realizar los procedimientos necesarios para la reconstrucción de la imagen a partir de los datos recolectados por el sistema de detección.
  - ✚ Unidad de almacenamiento de datos e imágenes: discos magnéticos donde se realiza el almacenamiento no sólo de las imágenes reconstruidas y de los datos primarios, sino también del software de aplicación del tomógrafo.
- **Consola:** Módulo donde se encuentra el teclado para controlar la operación del equipo, el monitor de TV (donde el operador observa las imágenes) y, en algunos casos, la unidad de visualización encargada de la conversión de la imagen digital almacenada en el disco magnético del computador en una señal de vídeo capaz de ser visualizada en el monitor de TV [Ref 12].

**B.2.3. Mamógrafo:** Equipo de rayos x utilizado para estudiar aquellos tumores que, al ser tan pequeños, no han podido ser encontrados por el médico. Este examen es realizado en los senos (ver figura 42).

**Figura 42. Mamógrafo**



### **B.3. FUNCIONAMIENTO**

Ya que los procesos que comprenden la unidad de imagenología funcionan de manera similar, en este trabajo solo se tendrá en cuenta un proceso, será el del tomógrafo. A este se le realizará el correspondiente análisis termoeconómico. Su funcionamiento se describe a continuación.

Inicialmente se energizan los distintos componentes del sistema.

A continuación desde la unidad de mando o desde el computador se envía la señal que permite que circule la corriente por el tubo de rayos X, el cual irradia rayos que son disparados hacia el objetivo o cuerpo al cual se le desea tomar la imagen.

Luego de haberse realizado el disparo del tubo, las señales son recogidas por un sistema de almacenamiento el cual por medio de un software reconstruye las imágenes que se tomaron, para luego ser impresas.

Este proceso se repite cada ocasión en que se desea tomar una imagen.

## Anexo C. Unidad de calderas

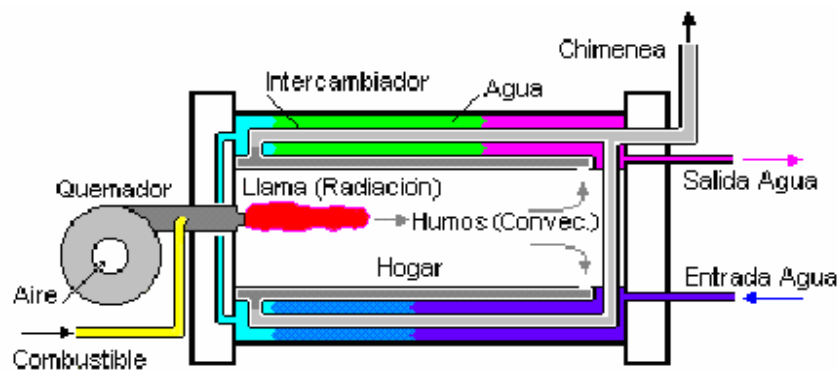
Elementos contruidos hace más de doscientos años. Se encuentran en casi cualquier lugar del mundo, transfiriendo calor del combustible al agua para calentar edificios o permitir procesos. Las calderas son simples, eficientes y fiables. Ningún equipo las supera transfiriendo calor de un lugar a otro. Se han utilizado para la calefacción desde antes de la guerra civil de los Estados Unidos, en 1861. Incluso antes de esta guerra, ya las calderas se usaban en procesos industriales. Actualmente se utilizan en fábricas, planchadoras de ropa, lavaplatos, pasteurización de leche, esterilización de equipos médicos y hasta para calentar ciudades enteras, convirtiéndose en un elemento de gran relevancia.

### C.1. GENERALIDADES

Las calderas o generadores de vapor (ver figura 43) son instalaciones industriales que, aplicando el calor de un combustible sólido, líquido o gaseoso, vaporizan el agua para aplicaciones industriales.

Hasta principios del siglo XIX se usaron calderas para teñir ropa, producir vapor para limpieza, etc., hasta que Papin creo una pequeña caldera llamada “marmita”. Se usó su vapor para intentar mover la primera máquina homónima, la cual no funcionaba durante mucho tiempo ya que utilizaba vapor húmedo (de baja temperatura) y al calentarse esta dejaba de producir trabajo útil [Ref 13].

Figura 43. Caldera



Luego de otras experiencias, James Watt completó una máquina de vapor de funcionamiento continuo, que usó en su propia fábrica, ya que era un natural inglés muy conocido. Papin inventó su máquina de vapor en 1769, y éste último la desarrolló en 1776. Inicialmente fueron utilizadas como máquinas para accionar bombas de agua, de cilindros verticales. Ella fue la impulsora de la revolución industrial, la cual comenzó en ese siglo.

Dentro de los diferentes tipos de calderas se han construido calderas para tracción, utilizadas en locomotoras para trenes tanto de carga como de pasajeros. Allí se ve una caldera multi-humotubular con haz de tubos amovibles, preparada para quemar carbón o lignito. El humo, es decir los gases de combustión caliente, pasan por el interior de los tubos cediendo su calor al agua que rodea estos tubos.

## C.2. TIPOS DE CALDERAS

Las calderas según sus características físicas o de funcionamiento tienen diferentes clasificaciones. Así, se pueden clasificar por la posición relativa de los humos y el agua entre calderas pirotubulares y acuotubulares; por la posición de los tubos se pueden clasificar en verticales, horizontales e inclinados; según la forma de los tubos en tubo recto y tubo inclinado.

**C.2.1. Calderas acuotubulares:** Las calderas acuotubulares (ver figura 44), el agua y el vapor circula por el interior de los tubos; los gases de la combustión se desplazan por la parte externa. Las calderas acuotubulares se emplean casi exclusivamente cuando interesa obtener elevadas presiones y altos rendimientos.

**Figura 44. Caldera acuotubular**



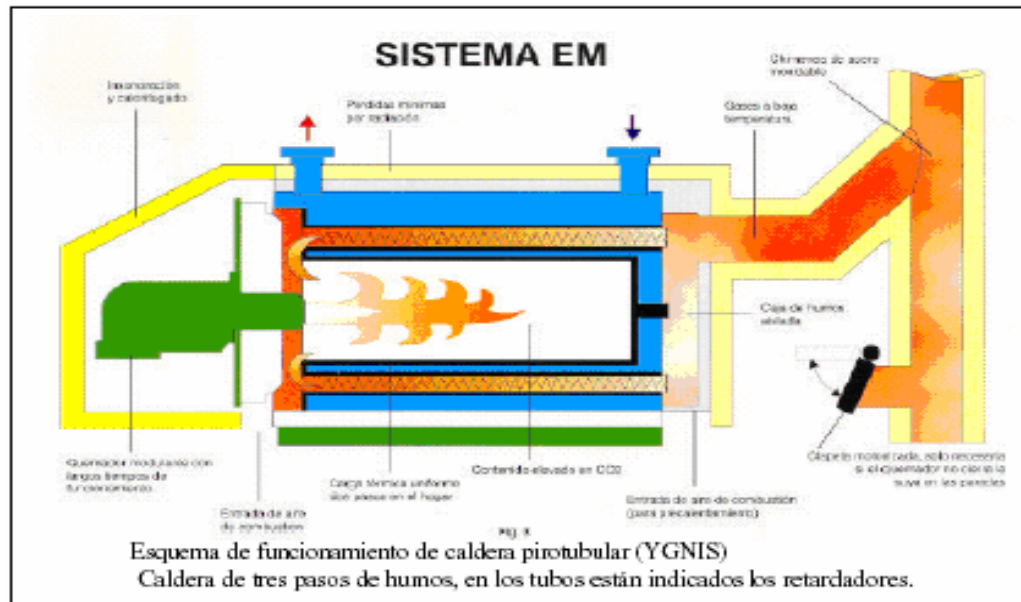
En estas calderas, los tubos longitudinales interiores se emplean para aumentar la superficie de calefacción, y están inclinados para que el vapor a mayor temperatura al salir por la parte más alta, provoque un ingreso natural del agua más fría por la parte más baja. Originalmente estaban diseñadas para quemar combustible sólido.

La producción del vapor de agua depende de la correspondencia que exista entre dos de las características fundamentales del estado gaseoso, que son la presión y la temperatura. A cualquier temperatura, por baja que esta sea, se puede vaporizar el agua, con tal que se disminuya convenientemente la presión a que se encuentre sometido dicho líquido, y también a cualquier presión puede ser vaporizada el agua, con tal que se aumente convenientemente la temperatura.

**C.2.2. Calderas piro tubulares:** En estas calderas los gases calientes pasan por el interior de los tubos, los cuales están rodeados de agua (ver figura 45).

Generalmente tiene un hogar integral, llamado **caja de fuego**, limitado por superficies enfriadas por agua.

**Figura 45. Caldera piro tubular**

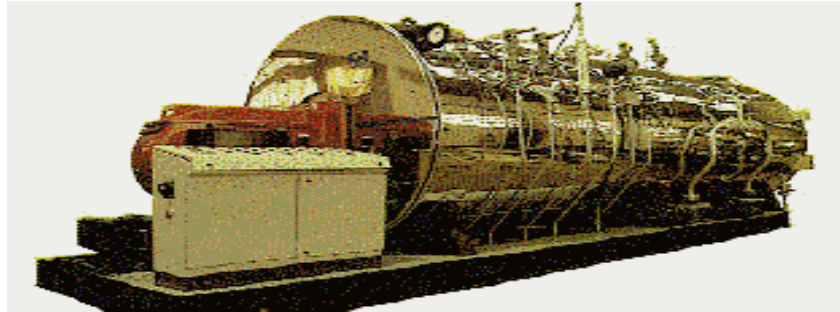


La caldera piro tubular fija con tubos de retorno horizontales (HRT) es una combinación de parrilla, altar refractario, puertas de carga y cenicero, cenicero y cámara de combustión. Las superficies interiores de las paredes del hogar están revestidas de refractario. Los gases calientes pasan por encima del altar y lamen todo el fondo de la caldera, volviendo a la parte frontal de esta por el interior de los tubos. Finalmente los productos de la combustión pasan a la chimenea. Estas calderas con tubos de retorno se utilizan en pequeñas centrales industriales debido a sus pequeñas capacidades de producción de vapor, presiones limitadas y baja velocidad de producción de vapor.

**C.2.3. Calderas verticales:** Estas calderas deben su nombre a la posición de los tubos, se presenta generalmente en calderas de gran tamaño como las utilizadas en las centrales térmicas.

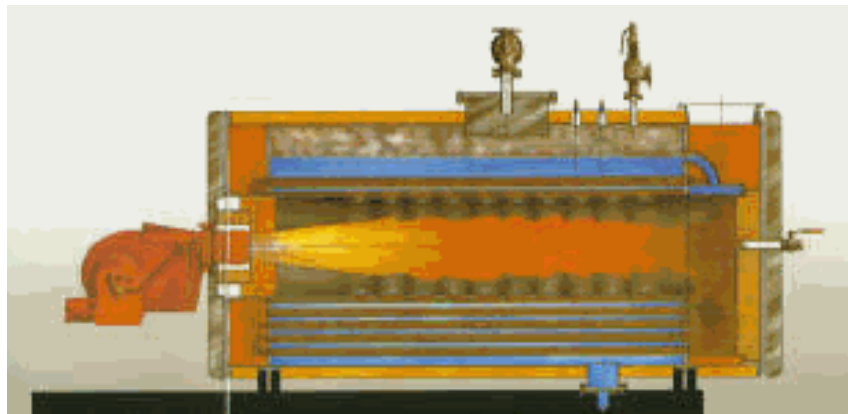
#### C.2.4. Calderas horizontales

**Figura 46. Caldera tipo horizontal**



Las calderas (ver figuras 46 y 47) con este tipo de distribución de los tubos, generalmente es piro-tubular con hogar integrado y tubos de retorno. Estos permiten que los gases de la combustión circulen varias veces a lo largo de toda la caldera para obtener la mayor transferencia de calor.

**Figura 47. Caldera tipo horizontal**



**C.2.5. Calderas de tubos inclinados:** Son calderas acuotubulares de tubos rectos. El ángulo de inclinación es aproximadamente  $22^\circ$  y necesitan colectores de tal manera que los tubos inclinados sellen correctamente. Los productos de combustión pasan por la superficie externa de los tubos guiados por deflectores.

**C.2.6. Calderas de tubos rectos:** Este tipo de tubos se acopla por ensanchamiento de sus extremos a una placa portatubos, en el caso de las calderas piro-tubulares; pero en el caso de las calderas acuotubulares, los tubos van acoplados a un colector.

### **C.3. PARTES DE LA CALDERA**

Para una mayor comprensión de los sistemas de los que consta la caldera, en ésta se tienen seis elementos clasificados según su funcionalidad.

- Sistema de la cámara de vaporización: Se dispone de una cámara hermética que resiste presión, temperatura y es de material apto para el contacto con agua, sedimentos y otras sustancias.
- Sistema de agua de alimentación a la caldera: Este sistema detecta y mantiene un nivel de agua ya establecido independientemente del mayor o menor consumo de vapor, asegurando la producción de vapor a las condiciones deseadas.
- Sistema de combustible: Gracias a este sistema se suministra calor al agua para la producción del vapor, generalmente por la combustión de un hidrocarburo.
- Sistema de aire de combustión: Suministra el aire a la relación adecuada para asegurar una combustión completa del hidrocarburo.
- Sistema de control y seguridad: Ofrece los mecanismos de control y seguridad necesarios para garantizar que no existe peligro aunque se estén manejando combustibles inflamables y vapor a altas temperaturas y presiones.
- Sistemas para mayor eficiencia: estos sistemas ofrecen mecanismos de ahorro energético.

El estudio se basa en el funcionamiento en los sistemas de vaporización de la caldera, el de abastecimiento de agua, y el sistema de combustible que son los principales elementos que forman parte en el funcionamiento de la caldera.

### **C.4. FUNCIONAMIENTO**

Los sistemas que se explicaron anteriormente aplican para todo tipo de caldera salvo algunas modificaciones. La atención está en las calderas pirotubulares de tubos rectos horizontales, marca Power Master, Distral, que se encuentran ubicadas en el Hospital Universitario de Santander (HUS) de la ciudad de Bucaramanga.

El objetivo de estas calderas es producir el vapor necesario para el funcionamiento de autoclaves, lavadoras, calandrias (planchadoras de rodillos), secadoras, planchas, marmitas y tanques de agua caliente.

El funcionamiento de la caldera se puede describir de la siguiente manera:

Cuando el nivel del agua está en el rango normal y la válvula de combustible principal está cerrada, se energiza el motor del ventilador.

Entra solo aire a la cámara de combustión por espacio de 30 segundos realizando un barrido o prepurga.

El motor modulador, que es el que maneja simultáneamente las compuertas del aire y del combustible, abre totalmente la compuerta para que entre totalmente el aire (posición de alto fuego) sin peligro de que entre combustible porque está cerrada la válvula de combustible principal.

Luego el motor modulador cierra la compuerta para llegar a la posición de bajo fuego, o sea la mínima abertura de las compuertas para iniciar el encendido, demora aproximadamente 30 segundos.

Se energiza la válvula de entrada de gas piloto y el transformador permite que se produzca la chispa en el electrodo, formándose una llama pequeña o llama piloto o preencendido.

Se prueba por 10 segundos que la llama sea estable y en la dirección correcta.

Se energiza y abre la válvula principal de combustible y el transformador se desenergiza. Se prueba por 15 segundos la estabilidad de la llama principal y entonces la llama piloto es desenergizada.

El período que continua se llama período de fuego, en él automáticamente se alimenta de combustible y aire gracias a al controlador proporcional de presión y al motor modulador, produciendo vapor a una presión constante. En el período de bajo fuego la bomba de agua de alimentación también es automática, manteniendo el nivel normal.

Cuando se apaga la caldera, la válvula principal de combustible se desenergiza y el motor modulador pasa a posición de bajo fuego. El ventilador sigue energizado por 15 segundos más, realizando la postpurga o barrido de gases y luego se apaga [Ref 14].

## Anexo D. Desarrollo termodinámico de las ecuaciones que rigen los flujos energéticos eléctricos.

Conociendo los postulados que rigen la energía eléctrica, se plantean las ecuaciones que permitirán conocer la energía y la exergía correspondiente de cada uno de estos flujos.

### Flujos máxicos, energéticos y energéticos

**Energía:** para encontrar el valor de la posible energía que puede ser suministrada por el flujo de energía eléctrica se tiene la ecuación número (D1) [Ref 15]:

$$E = \int S \cdot dt \quad (D1)$$

Donde S es igual a la potencia aparente o potencia de dimensionamiento que el sistema esta en capacidad de entregara, y se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad [\text{V-A}] \quad (D2)$$

Reemplazando (D2) en (D1):

$$E = \int (\sqrt{3} \cdot V \cdot I) \cdot dt = \sqrt{3} \int (V \cdot I) \cdot dt \quad [\text{J}] \quad (D3)$$

Donde:

- V Tensión suministrada por la red [V]
- I Corriente suministrada por la red [A]

El valor de tensión suministrado por la red a los compresores esta alrededor de los 220 V, el valor de la corriente depende de la carga que este suministrando las cinco unidades de aire acondicionado.

**Exergía:** para encontrar el valor la exergía suministrada por el flujo de energía eléctrica se tiene la ecuación número (D4):

$$B = \int P \cdot dt + \int Q \cdot dt \quad [\text{J}] \quad (D4)$$

Donde P es la potencia activa consumida en el proceso y que esta descrita por la ecuación número (D5):

$$P = V \cdot I \quad [\text{W}] \quad (D5)$$

Valor instantáneo de la potencia activa.

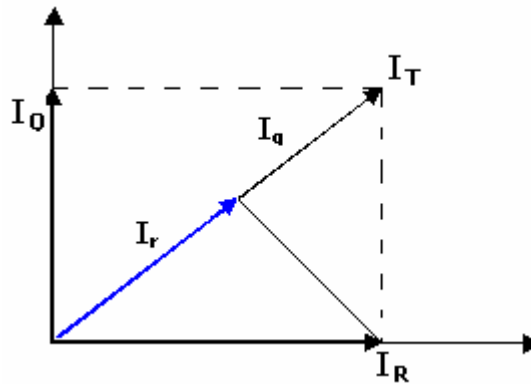
Para un sistema trifásico balanceado se tiene:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (D6)$$

Ahora, se introducirá un nuevo concepto con el cual se permitirá establecer un valor exergético a la potencia reactiva, dicho proceso consiste en instaurar un valor como parte efectiva de la potencia reactiva el cual se determina de la siguiente manera:

Primero se establecen dos componentes como se muestra en la figura D.1. que sumadas equivalen a la corriente total.

**Figura 48. Componentes de la corriente total**



La componente total es igual a:

$$I_T = I_r + I_q = I_R + I_0 \quad (D7)$$

Por consiguiente  $I_q$  e  $I_Q$  es igual a:

$$I_q = I_T - I_r \quad (D8)$$

$$I_Q = I_T - I_R \quad (D9)$$

Si se realiza una proyección de  $I_R$  en  $I_T$  se tiene que:

$$I_r = \text{Proy}_{I_T} I_R \quad I_r = \frac{I_R \cdot I_T}{\|I_T\|^2} \cdot I_T \quad (D10)$$

Con la cual se obtiene el valor de la exergía correspondiente a Q para un sistema trifásico balanceado:

$$Q = V \cdot (I_T - I_r) \quad (D11)$$

Por lo que se tiene:

$$B = \int (\sqrt{3} \cdot V \cdot I) \cdot dt + \int \sqrt{3} \cdot V \cdot (I_T - I_r) \cdot dt \quad (D12)$$

$$B = \sqrt{3} \cdot \left( \int (V \cdot I) \cdot dt + \int (V \cdot (I_T - I_r)) \cdot dt \right) \quad (D13)$$

Retomando la ecuación número (D3) y reemplazándola en (D13) se obtiene:

$$B = \left( E + \int (V \cdot (I_T - I_r)) \cdot dt \right) \text{ [J]} \quad (D14)$$

## Anexo E. Desarrollo termodinámico de las ecuaciones que rigen los flujos energéticos para gases ideales.

En este anexo se definen las ecuaciones termodinámicas que rigen los flujos que intervienen en los sistemas analizados, se hace un desarrollo matemático de las ecuaciones hasta llegar al término deseado, aquel que dependa de variables las cuales pueden ser medidas.

### Flujos máxicos, energéticos y exergéticos:

**Energía:** de acuerdo a las leyes de la termodinámica y las leyes que describen los gases ideales (materia prima del aire acondicionado, gas refrigerante) se puede encontrar el valor de la energía entregada por los flujos. La relación con la cual se encuentra este valor es la ecuación (E1) [Ref 8].

$$E = U + P_2 \cdot V \quad (E1)$$

Donde:

- V Volumen total del gas [m<sup>3</sup>]
- U Energía interna del gas [J]
- P<sub>2</sub> Presión final del gas [pa]

Durante todo el proceso de refrigeración o calefacción el volumen del gas utilizado no cambia, por lo que el calor (Q) suministrado a volumen constante es igual al incremento en la energía interna (U).

$$U = Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (E2)$$

Donde:

- m Masa del gas [kg]
- c Calor específico [J/K kg]
- ΔT Incremento en la temperatura [K]

Cuando el cambio de estado se produce a volumen constante, se tiene un cambio en el calor específico de la sustancia. Por consiguiente la energía interna cambia y de igual forma el calor (Q) [Ref 16 y Ref 17]:

$$Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T \quad (E3)$$

- c<sub>v</sub> Calor específico a volumen constante
- c<sub>p</sub> Calor específico a presión constante

Para gases se tiene la siguiente relación:

$$\frac{c_p}{c_v} = k \quad (E4)$$

Donde k es una constante definida de la siguiente forma:

- a) Gases inertes y gases monoatómicos  $k \approx 1,66$
- b) Gases biatómicos y aire  $k \approx 1,4$
- c) Gases triatómicos y Vapor  $k \approx 1,3$

Además:

$$c_p - c_v = R \quad (E5)$$

- R Constante específica del gas

$$R = \frac{8314,13}{M} \quad (E6)$$

- M Masa molar de la sustancia [kg/kmol]

Reemplazando (E4) en (E5) se encuentra el valor de  $c_v$ :

$$c_v = \frac{R}{k-1} \quad (E7)$$

Teniendo el valor de  $c_v$  se encontrará el valor respectivo del calor (Q) a volumen constante (llevando (E7) a (E3)):

$$Q = m \cdot \frac{R}{k-1} \cdot \Delta T = m \cdot \frac{R}{k-1} \cdot (T_2 - T_1) \quad (E8)$$

$$E = m \cdot \frac{R}{k-1} \cdot (T_2 - T_1) + P_2 \cdot V \quad (E9)$$

La materia prima durante todo el proceso es un gas, podemos tomar la ecuación que rige los gases ideales es:

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (E10)$$

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (E11)$$

- v Volumen específico [m<sup>3</sup>/kg]
- ρ Densidad [kg/m<sup>3</sup>]

La variable que es invariante durante todo el proceso es el volumen, por consiguiente el cambio se presenta en la presión y la temperatura de la sustancia.

Con lo cual se tiene:

$$m = \frac{P_1 \cdot V}{R \cdot T_1} \quad (E12)$$

Asumiendo gases ideales:

$$P_1 \cdot V = m \cdot R \cdot T_1 \quad (\text{E13})$$

$$P_2 \cdot V = m \cdot R \cdot T_2 \quad (\text{E14})$$

Si (E14)/(E13), se obtiene:

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot T_2}{T_1} \quad (\text{E15})$$

Con las ecuaciones anteriores se puede encontrar el valor de la energía:

$$E = \frac{P_1 \cdot V}{T_1} \cdot \frac{1}{k-1} \cdot (T_2 - T_1) + \frac{P_1 \cdot T_2}{T_1} \cdot V \quad (\text{E16})$$

**Exergía:** de acuerdo a las leyes de la termodinámica se tiene que para un sistema cerrado el valor de la exergía es igual a:

$$B = U + P_2 \cdot V - T_1 \cdot S \quad (\text{E17})$$

La exergía es igual a la energía máxima que se puede obtener menos las pérdidas que se presenten durante todo el proceso. Estas pérdidas están representadas por el término  $T_1 \cdot S$ .

Por lo que se tiene:

$$B = \frac{P_1 \cdot V}{T_1} \cdot \frac{1}{k-1} \cdot (T_2 - T_1) + \frac{P_1 \cdot T_2}{T_1} \cdot V - T_1 \cdot S \quad (\text{E18})$$

- S Entropía total del proceso

El valor de la entropía se calcula por medio de la relación E19:

$$S = \frac{Q}{T_1} - \frac{Q}{T_2} \quad (\text{E19})$$

Teniendo el valor de la entropía, se puede hallar el valor de la exergía producida por los flujos inmiscuidos en el proceso.

Simplificando las pérdidas ( $T_1 \cdot S$ ):

$$T_1 \cdot S = T_1 \cdot \left( \frac{Q}{T_1} - \frac{Q}{T_2} \right) = Q \cdot \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} \right) = Q \cdot \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2} \right) \quad (\text{E20})$$

Si  $T_1 > T_2$  solo cambia la dirección del flujo del calor (Q) [Ref 2].

Por consiguiente se obtiene que el valor de la exergía para el sistema cerrado es [Ref 2]:

$$B = \frac{P_1 \cdot V}{T_1} \cdot \frac{1}{k-1} \cdot (T_2 - T_1) + \frac{P_1 \cdot T_2}{T_1} \cdot V - \frac{P_1 \cdot V}{T_1} \cdot \frac{1}{k-1} \cdot \frac{(T_2 - T_1)^2}{T_2} \quad (\text{E21})$$

## Anexo F. Desarrollo termodinámico de las ecuaciones que rigen los flujos energéticos para gases combustibles

En este anexo se presenta las ecuaciones físicas que rigen los flujos para gases combustibles. No se presenta ningún análisis matemático ya que para hallar el valor de la energía y exergía se tiene una sola ecuación, sustentadas bajo los postulados de la termodinámica.

**Energía:** La energía o poder calorífico de un combustible se encuentra determinada por unas tablas en las que se referencia las capacidades caloríficas de distintos combustibles.

En cuanto a la potencia hidráulica ejercida por los motores se nota de la siguiente manera:

$$\zeta \cdot Q \cdot h_{wb} = P_{hidráulica} \quad (F1)$$

Donde

$\zeta$  = peso específico = densidad por gravedad [ $\frac{g}{m^2 s^2}$ ]

Q = caudal del fluido [ $\frac{m^3}{s}$ ]

$h_{wb}$  = altura de trabajo de la bomba [ $m$ ]

**Exergía:** La exergía del combustible viene dada por la ecuación F2:

$$0,98 \cdot VCI \cdot M_c \quad (F2)$$

Donde

- VCI = Valor Calórico Inferior del combustible
- $M_c$  = Masa del combustible.