

**PROPUESTA PARA UN USO RACIONAL DE LA ENERGÍA EN EL  
ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA EN EL SISTEMA  
SUBESTACIÓN ALIMENTADORA SISTEMA DE BOMBEO DE LA PLANTA  
DE BOSCONIA**

**WILLIAN ARLEY BONILLA FELIZOLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICO MECNICAS  
INGENIERIA ELÉCTRICA  
BUCARAMANGA  
2006**

**PROPUESTA PARA UN USO RACIONAL DE LA ENERGÍA EN EL  
ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA EN EL SISTEMA  
SUBESTACIÓN ALIMENTADORA SISTEMA DE BOMBEO DE LA PLANTA  
DE BOSCONIA**

**WILLIAN ARLEY BONILLA FELIZOLA**

**TRABAJO DE GRADO**

**Director:**

**Dr. GILBERTO CARRILLO CAICEDO**

**Codirector:**

**Ing. CARLOS ARTURO CARDENAS GUERRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICO MECÁNICAS  
INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BUCARAMANGA  
2006**

**A Dios por su misericordia infinita.**

**A la santísima virgen por su intercesión.**

**A mi madre, Julia, por su apoyo y tranquilidad.**

**A mi tía, Fanny, por sus oraciones y atención.**

**A mis tíos Deiberd y Nilson por enseñarme que todo es posible de realizar.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Doctor Gilberto Carrillo Caicedo, por su colaboración y aporte de conocimientos y experiencia para la realización de este proyecto.

Mi especial agradecimiento al Ingeniero Carlos Arturo Cárdenas Guerra por su apoyo constante y por estar conmigo en los momentos difíciles en esta etapa de mi experiencia académica.

Un agradecimiento especial a todas aquellas personas que me brindaron su aliento y energías positivas constantemente para terminar esta labor, personas especiales que llevo en mi mente y corazón.

## CONTENIDO

	PÁG.
1. INTRODUCCIÓN.....	19
2. ESTADO DEL ARTE.....	21
2.1 AUDITORÍA ENERGÉTICA.....	28
2.2 AUDITORÍA EXERGÉTICA.....	29
3. TERMOECONOMÍA EN PROCESOS DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA.....	30
3.1 PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA.....	30
3.1.1 Principio cero (escala de temperatura).....	30
3.1.2 Primer principio (conservación de la energía).....	31
3.1.3 Segundo principio (entropía).....	33
3.1.4 Tercer principio (estado de referencia de la entropía).....	34
3.2 TERMODINÁMICA Y ECONOMÍA EN PROCESOS DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA.....	36
3.2.1 Exergía y balance exergético.....	37

<b>3.2.2 Exergía visto como factor de producción.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.3 Rendimiento o eficiencia en la teoría de producción.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.4 Limitaciones del análisis exergético.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.5 Teoría del costo exergético.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.6 Costo exergético.....</b>	<b>44</b>
<b>3.2.7 Costo exergoeconómico.....</b>	<b>49</b>
<b>3.2.8 Aplicaciones.....</b>	<b>49</b>
<b>4. AHORRO EN EQUIPOS.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1 APLICACIÓN EN TRANSFORMADORES.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.1 Pérdidas en transformadores de potencia.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.2 Regulación de tensión.....</b>	<b>53</b>
<b>4.1.3 Índice de carga.....</b>	<b>54</b>
<b>4.1.4 Rendimiento en transformadores trifásicos.....</b>	<b>54</b>
<b>4.1.5 Normas que reglamentan las pérdidas en transformadores en Colombia.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1.6 Aspectos fundamentales para el ahorro de energía en transformadores.....</b>	<b>58</b>
<b>4.2 URE EN MOTORES DE INDUCCIÓN.....</b>	<b>60</b>

4.2.1 Pérdidas y diagrama de flujo de potencia.....	60
4.2.2 Rendimiento en los motores de inducción.....	62
4.2.3 Selección del motor.....	63
4.2.4 Recomendaciones para el ahorro de energía en motores eléctricos.....	66
4.2.5 Resistencia de aislamiento e índice de polarización en máquinas rotatorias.....	66
4.3 INCIDENCIA DEL FACTOR DE POTENCIA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	70
4.3.1 Consecuencias del bajo factor de potencia.....	71
4.3.2 Compensación del factor de potencia.....	72
4.3.3 Ahorros al mejorar el factor de potencia.....	73
4.4 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.....	77
4.4.1 Clasificación de los sistemas de puesta a tierra.....	78
4.4.2 Componentes de un sistema de puesta a tierra.....	79
4.4.3 Problemas típicos de los sistemas de puesta a tierra.....	81
4.5 ILUMINACIÓN.....	85

4.5.1 Eficiencia energética en la iluminación.....	86
4.5.2 Selección del nivel de iluminación.....	87
4.5.3 Selección de la luminaria adecuada para cada aplicación.....	87
4.5.4 Cambio de fuente de luz más eficiente.....	87
4.5.5 Recomendaciones para URE según el tipo de alumbrado.....	90
4.6 URE EN TURBOMÁQUINAS HIDRÁULICAS (BOMBAS).....	95
4.6.1 Tipos de bombas.....	96
4.6.2 Pérdidas en las bombas.....	98
4.6.3 Altura desarrollada por una bomba.....	100
4.6.4 Rendimiento en las bombas.....	101
4.6.5 Curvas características de las bombas.....	102
4.6.6 Altura estática.....	104
4.6.7 Altura dinámica.....	104
4.6.8 Curva de los sistemas de bombeo.....	104
4.6.9 Punto de funcionamiento de una bomba.....	105
4.6.10 Fenómeno de cavitación en las bombas.....	106
<b>5. APLICACIÓN AL SISTEMA DE BOMBEO DE LA PLANTA BOSCONIA DEL AMB S.A E.S.P.....</b>	<b>109</b>

<b>5.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO BOSCONIA.....</b>	<b>109</b>
<b>5.1.1 Inventario del sistema de bombeo.....</b>	<b>111</b>
<b>5.2 METODOLÓGIA PARA UN ESTUDIO DE URE EN EL SISTEMA DE BOMBEO DE LA PLANTA BOSCONIA DEL AMB S.A E.S.P.....</b>	<b>118</b>
<b>5.3 AUDITORÍA EXERGÉTICA.....</b>	<b>122</b>
<b>6. EVALUACIÓN FINANCIERA.....</b>	<b>190</b>
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>193</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>202</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>207</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Temperatura del transformador para mantener su eficiencia a determinada altura.....	59
<b>Tabla 2.</b> Valores mínimos de resistencia de aislamiento para 40° C.....	69
<b>Tabla 3.</b> Tensiones de prueba para la medición de resistencia de aislamiento en máquinas rotatorias.....	69
<b>Tabla 4.</b> Calibres de conductores empleados en sistemas de puesta a tierra....	80
<b>Tabla 5.</b> Ahorro en por ciento por cambio de fuente de luz por una de mayor eficiencia.....	88
<b>Tabla 6.</b> Ventajas y desventajas de los tipos de lámparas más utilizadas.....	88
<b>Tabla 7.</b> Valores de la fricción en las juntas.....	99

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pag.</b>
<b>Figura 1.</b> Modelo físico del análisis de exergía.....	24
<b>Figura 2.</b> Diagrama de potencia.....	61
<b>Figura 3.</b> Selección de motores según torque y velocidad.....	63
<b>Figura 4.</b> Valores del coeficiente $K_t$ en función de la temperatura en los bobinados de la máquina.....	68
<b>Figura 5.</b> Representación gráfica de la compensación del factor de potencia.....	72
<b>Figura 6.</b> Configuración permitida para un sistema derivado independiente.....	83
<b>Figura 7.</b> Configuración no permitida para un sistema derivado independiente...	84
<b>Figura 8.</b> Bomba espiral.....	98
<b>Figura 9.</b> Bomba turbina.....	98
<b>Figura 10.</b> Curva característica de una bomba.....	102
<b>Figura 11.</b> Curva del sistema.....	105
<b>Figura 12.</b> Punto de funcionamiento de las bombas.....	106

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo 1.</b> Ley 697 de 2001(LEY URE) y decreto 3683 de 2003.....	208
<b>Anexo 2.</b> Lista de chequeo típica.....	233
<b>Anexo 3.</b> Pérdidas norma ICONTEC para transformadores trifásicos.....	237
<b>Anexo 4.</b> Letra de código.....	239
<b>Anexo 5.</b> Factor o constante “K” que sustituye al término $(\text{Tan}\phi_2 - \text{Tan}\phi_1)$ .....	240
<b>Anexo 6.</b> Niveles de iluminación recomendados por el RETIE.....	242
<b>Anexo 7.</b> Resultado de la lista de chequeo.....	245

## LISTA DE ECUACIONES

Pag

### Capítulo 3

Ecuación 1. Variación de calor emitido.....	32
Ecuación 2. Entalpía.....	32
Ecuación 3. Entropía.....	33
Ecuación 4. Relación termodinámica fundamental.....	33
Ecuación 5. Variación de entropía.....	34
Ecuación 6. Variación de entropía en función de la presión.....	34
Ecuación 7. Variación de entropía entre estados.....	35
Ecuación 8. Entropía entre un estado y la referencia.....	35
Ecuación 9. Exergía destruida.....	39
Ecuación 10. Rendimiento termodinámico.....	39
Ecuación 11. Coste exergético.....	40
Ecuación 12. Rendimiento exergético.....	43
Ecuación 13. Consumo exergético.....	43
Ecuación 14. Rendimiento exergético total.....	44
Ecuación 15. Consumo exergético total.....	44
Ecuación 16. Exergía de irreversibilidad.....	44
Ecuación 17. Costo exergético unitario.....	45
Ecuación 18. Numero de bifurcaciones total.....	46

### Capítulo 4

Ecuación 1. Pérdidas en el cobre.....	51
Ecuación 2. Pérdidas en el hierro.....	52
Ecuación 3. Regulación de tensión.....	53

Ecuación 4. Regulación de tensión en función del secundario del transformador.....	53
Ecuación 5. Índice de carga.....	54
Ecuación 6. Rendimiento en transformadores trifásicos.....	54
Ecuación 7. Rendimiento en transformadores trifásicos conocidas las pérdidas.....	55
Ecuación 8. Calculo del rendimiento en transformadores trifásicos.....	55
Ecuación 9. Rendimiento en función del índice de carga.....	55
Ecuación 9.1 Rendimiento en función del índice de carga.....	56
Ecuación 9.2 Rendimiento en función del índice de carga.....	56
Ecuación 10. Pérdidas en el hierro en función del índice de carga.....	56
Ecuación 11. Índice de carga para máximo rendimiento.....	56
Ecuación 12. Potencia aparente para máximo rendimiento.....	57
Ecuación 13. Rendimiento diario del transformador.....	57
Ecuación 14. Kilovatio hora de salida en 24 horas.....	57
Ecuación 15. Kilovatio hora de pérdida en 24 horas.....	58
Ecuación 16. Rendimiento en motores de inducción.....	62
Ecuación 17. Potencia ahorrada al remplazar el motor existente por uno eficiente.....	62
Ecuación 18. Corriente de arranque en motores de inducción.....	66
Ecuación 19. Resistencia de aislamiento en maquinas rotativas.....	67
Ecuación 20. Resistencia de aislamiento mínima recomendada.....	68
Ecuación 21. Potencia reactiva del condensador a conectar.....	73
Ecuación 22. Porcentaje de reducción de pérdidas en los cables al compensar el factor de potencia.....	74
Ecuación 23. Disminución de la caída de tensión en cables.....	74
Ecuación 24. Corriente de fase en el primario del transformador.....	75
Ecuación 25. Corriente de fase en el secundario del transformador.....	75
Ecuación 26. Resistencia eléctrica total en ohmios.....	75

Ecuación 27. Pérdidas térmicas sin compensar el factor de potencia.....	75
Ecuación 28. Pérdidas térmicas después de compensar el factor de potencia.....	75
Ecuación 29. Disminución de pérdidas térmicas.....	76
Ecuación 30. Porcentaje de reducción de pérdidas térmicas.....	76
Ecuación 31. Diferencia en consumo de energía.....	76
Ecuación 32. Potencia liberada en el transformador.....	76
Ecuación 33. Potencia liberada en el transformador.....	77
Ecuación 34. Altura desarrollada por una bomba.....	100
Ecuación 35 Rendimiento de una bomba.....	101
Ecuación 36. Potencia desarrollada para cada valor de Q.....	103
Ecuación 37. Altura estática.....	104
Ecuación 38. Altura dinámica.....	104
Ecuación 39. Parámetro de cavitación.....	107

## RESUMEN

En el presente proyecto se realizó una propuesta para uso racional y eficiente de la energía (URE) en el sistema de bombeo Bosconia del acueducto metropolitano de Bucaramanga. Se abordó la condición de bombeo hacia el tanque estadio y el tanque Morrónico con el fin de identificar los puntos críticos y las oportunidades de ahorro. Se llevó a cabo una auditoría exergética para identificar y establecer los índices de eficiencia exergética y evaluar el proceso con el fin de hacer una propuesta para URE. Parámetros como la eficiencia exergética, la irreversibilidad y la mejora potencial del sistema fueron incluidos en el análisis de exergía. Este análisis revela que el proceso de bombeo es altamente irreversible en los elementos motor- bomba y, que las razones de esto es el tiempo de uso de los equipos, el cual está sobre su vida útil. En los demás equipos la irreversibilidad encontrada está dentro de los límites.

Un estudio de procedimiento también fue desarrollado. Esto permitió caracterizar el comportamiento exergético de cada unidad, cuando trabajan para las dos condiciones de bombeo. Los resultados de este análisis muestran que si se bombea con la unidad 2 se tiene un menor costo económico que si se hiciera con cualquier otra unidad. Esto genera una posibilidad de ahorro sin realizar algún tipo de inversión.

El análisis de irreversibilidad muestra el impacto exergético del motor y la bomba en la eficiencia del proceso. Este análisis indica que la causa de irreversibilidad es el tiempo de uso de los equipos. Se propone el reemplazo de algunos elementos existentes por nuevos satisfaciendo condiciones nominales. Se muestra el ahorro y el tiempo de recuperación de la inversión para cada propuesta.

## ABSTRACT

In the present project a proposal for rational and efficient use of energy (URE) in the Bosconia bomb system of Bucaramanga Metropolitan Aqueduct was realized. It board the bomb state toward the stadium tank and morrórico tank, with the purpose of to identify the critic points and the saving chances. It was carried out an exergetic auditorship to identify and establish the efficiency rate exergetic and evaluate the process with the purpose to make a proposal to URE. Parameters like exergetic, irreversibility and the system potential improve efficiency were include in the exergetic analysis. This analysis reveal that the bomb process is highly irreversible in the engine- bomb elements and, that the reasons of this is the used time of the equipment, wich is over his useful life. In the other equipment the irreversibility found is within limits.

Study of procedure was developed also. This allowed characterizing the exergetic behavior of each unit, when it works to both bomb conditions. The result of this analysis shows that if you bomb with unit 2, it has lower economic cost that it will be done with any other unit. This generates a saving possibility without accomplish any type of investment.

The irreversibility analysis shows the engine and bomb exergetic impact in the process efficiency. These analyses indicate the irreversibility cause is used time of equipment. It proposes the replacement of some existing elements by new, satisfying nominal conditions. It shows the saving and recover time of investment for each proposal.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Grade Paper

<sup>2</sup> Physical – Mechanical Science Department. Electric Engineering Electronic and Telecommunications.  
Director: Dr Gilberto Carrillo Caicedo. Co-Director: Eng. Carlos Arturo Cárdenas Guerra.

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido al alto costo de la energía eléctrica se debe tomar una serie de acciones que hagan disminuir el consumo energético. Para esto, se deben identificar y corregir todas las ineficiencias.

En busca de una mejor administración de los recursos eléctricos, es necesario considerar que la electricidad requiere grandes y costosas centrales de generación para producirla. La energía eléctrica se transmite por muchos kilómetros, en los que se utiliza una gran cantidad de estructuras, transformadores y cables. En los centros de distribución, la energía se reparte a los hogares, oficinas, industrias y en general, a los centros de consumo.

Si en todas las etapas del proceso, y muy especialmente en el consumo se evita el malgasto de energía, se puede ahorrar en el montaje de las instalaciones y, más aún, en los combustibles utilizados.

El uso racional y eficiente de la energía entonces, se ha convertido en mandatorio en los sistemas eléctricos, mecánicos y químicos. Esto es especialmente cierto, en un país que sobrevive en una situación económicamente lamentable.

En este sentido, este proyecto nace de la necesidad de proveer un conocimiento más real del consumo de energía, y a partir de esto, proponer un procedimiento sistemático para buscar su reducción.

La metodología empleada consiste en diagnosticar, evaluar y analizar los flujos de energía en los elementos del sistema en estudio desde la óptica del análisis termoeconómico, con el fin de caracterizar exergéticamente al sistema a partir de la revisión organizada del aprovechamiento de la energía eléctrica en los sistemas de bombeo y la forma como ésta se degrada. Este trabajo prevé mostrar a la

TERMOECONOMÍA como una herramienta para cuantificar el impacto energético de este tipo de procesos y, mediante la exergía, valorar el uso eficiente de la energía.

Este documento, registro conceptual del proyecto, se encuentra estructurado de la siguiente manera:

En el siguiente capítulo (segundo) se hará una descripción del USO RACIONAL Y EFICIENTE DE LA ENERGIA (URE), con el fin de mostrar las metodologías empleadas y las acciones que trae consigo la elaboración de una propuesta para uso racional y eficiente de la energía.

En el tercer capítulo se hará una descripción del análisis energético por medio de la termoeconomía. Para esto se tratarán aspectos básicos de termodinámica. Se mostrará la termoeconomía como una metodología para cuantificar los procesos de transformación energética y como una herramienta útil para estudios de URE.

En el cuarto capítulo se describen las oportunidades de URE en algunos equipos como: transformadores, motores de inducción y turbomáquinas hidráulicas (bombas) así como el ahorro al realizar compensación de reactivos y la contribución de los sistemas de puesta a tierra a la calidad y uso eficiente de la energía.

En el quinto capítulo se propone la aplicación de estos conceptos en la planta Bosconia del Acueducto metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P. (AMB).

El sexto capítulo contiene una propuesta de evaluación financiera de las inversiones, que requerirá la aplicación al AMB.

En el séptimo capítulo se encuentran las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

## 2. ESTADO DEL ARTE DE URE

La eficiencia energética y la conservación de la energía son dos conceptos muy relacionados entre sí pero diferentes. La eficiencia energética es obtenida, cuando se reduce el consumo de energía por unidad de producto. La conservación de la energía, por su parte se obtiene al reducir el consumo total de la energía, medido en sus términos físicos (puede darse mediante la eficiencia energética o mediante la reducción del número de unidades consumidoras).

La industria ve al URE como la solución a sus problemas de eficiencia y uso racional de la energía, porque les ha permitido mejorar la administración de sus recursos energéticos y reducir los costos de producción. Esto se hace manteniendo o incluso aumentando la producción.

La eficiencia en el uso de la energía, elemento vital para la reducción de los costos de producción de la mayor parte de las empresas, puede ser lograda por dos vías: la vía costosa y de fácil implementación de adquirir e implementar tecnologías productivas de bajo consumo, o la vía barata y lenta de lograr cambio de hábitos en el uso final de la energía, con la tecnología existente.

Muchos de los problemas asociados con la energía en una empresa no son de índole técnica. Se deben normalmente al desconocimiento y a la estructura de manejo existente. Para encontrar respuesta se hace una caracterización y gestión energética del sistema con el fin de encontrar el procedimiento óptimo de operación del sistema que permita un uso racional y eficiente de la energía [Campos Avella, J, 1989].

El URE está siendo impulsado en algunos países, mediante estímulos o incentivos; para el caso de Colombia existe la ley 697 de 2001 o ley URE y el decreto 3683 de 2003, **ver (anexo 1)**. Esta legislación establece estímulos normativos que se han clasificado en cuatro categorías: incentivos tributarios, de mercado, institucionales y ambientales.

Desde el punto de vista de la demanda, existen los incentivos que se dirigen a proteger a los usuarios en este campo. Otros incentivos que no pueden ser encasillados dentro de los tipos de actividades anteriormente señalados y que aportan mucho, son los aportes de tipo académico, dados mediante proyectos de investigación [Amin C, 2004].

En el afán del hombre por optimizar el funcionamiento y operación de los sistemas que utiliza, se han generado nuevas metodologías para lograr este objetivo, uno de estos métodos es el análisis de exergía, el cual ha logrado gran aceptación en plantas cuyo objetivo es la producción de energía útil. Sin embargo aún se continua investigando hasta que punto este método se puede generalizar para industrias cuyo objetivo no es la producción de energía [Guallar J. y Valero A., 1988.].

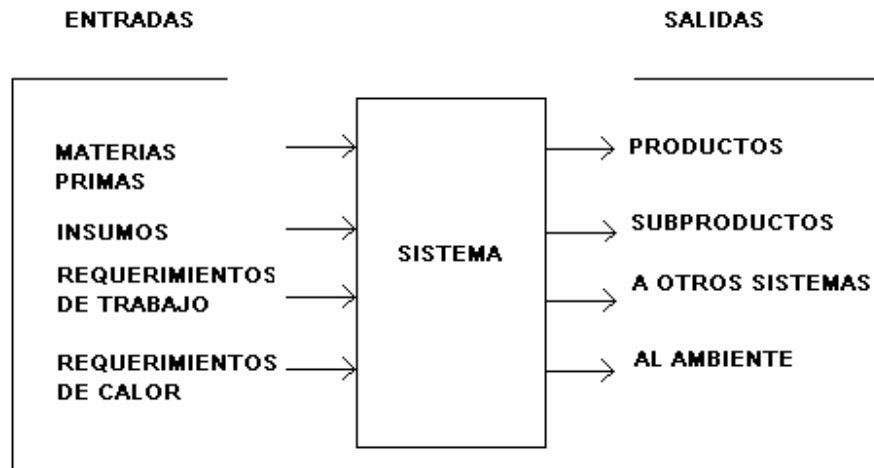
En una revisión crítica del método de análisis de exergía, se ha establecido que este método ha demostrado ser satisfactorio desde el punto de vista termodinámico, pero que no es capaz de determinar por sí solo el diseño óptimo real de un sistema, por esa razón su uso ha sido asociado generalmente con el análisis económico de costos. Esto ha llevado al desarrollo de procedimientos basados en la combinación de los métodos económicos y termodinámicos, denominado análisis termoeconómico, el cual ha sido aplicado a industrias estándares [Sciubba E., 2001.] y a equipos de producción de energía térmica, como calderas de vapor [Lozano M. y Valero A., 1982.]. En estas aproximaciones

las eficiencias se calculan mediante el análisis de exergía y de gastos “no energéticos”, los cuales son explícitamente relacionados a parámetros técnicos y termodinámicos de los procesos bajo consideración. Desde este punto de vista, la optimización consiste en determinar el punto de diseño y el plan operativo que minimice el costo total, bajo un conjunto apropiado de restricciones financieras, normativas, ambientales y técnicas.

Bajo estas condiciones [Sciubba E., 2001.], presenta una nueva aproximación para la evaluación de procesos de conversión de energía y sistemas, basada en una representación extendida del diagrama de flujo de sus exergías. Esta aproximación es un intento sistemático de unificar formal y coherentemente los métodos de consumo acumulativo de exergía y termoeconómicos, y constituir así una generalización de ambos, que sirvan de marco teórico para una comparación cuantitativa de cantidades no energéticas como “trabajo” e “impacto ambiental”. Este método se denomina contabilidad de exergía extendida, donde “exergía extendida” es una nueva cantidad física que es la suma de la exergía física y la exergía agregada de un flujo que es cuantificada empleando balances de exergía.

También existen estudios en los que se ha propuesto evaluar el uso de los recursos de un sistema y su influencia sobre el ambiente [Wang Y. y Feng X., 2000], el análisis ha llegado a ser la teoría fundamental y herramienta útil en el análisis de sistemas energéticos, de gran aceptación en todo el mundo. Se establece [Wang Y. y Feng X., 2000] que el análisis de exergía de un sistema está basado en el método de caja negra, en el cual el sistema es la caja que interactúa con el ambiente a través de transferencias de calor, trabajo y masa, mostrando el modelo físico del análisis de exergía (Figura 1).

**Figura 1.** Modelo físico del análisis de exergía



El análisis de exergía se ha aplicado a plantas de producción de energía geotérmica [Quijano J., 2000.], a través de un parámetro denominado índice de exergía específica (SEI, specific exergy indice), de la eficiencia basada en la segunda ley de la termodinámica y de la razón de eficiencia. Estos indicadores permiten caracterizar la eficiencia de plantas de potencia que utilizan la energía suministrada a partir de fuentes geotérmicas. El término SEI se utiliza para determinar la capacidad que tiene el recurso [Hinderink A.P., Kerkhof F.P.J., Lie A.B.K., De Swaan Arons J. and Van Der Kooi H.J., 1996] geotérmico de estas plantas para convertir la energía en trabajo útil a través de las variables de entalpía y entropía. Los resultados obtenidos revelan que las eficiencias obtenidas a partir de las definiciones de la segunda ley, es decir, utilizando la exergía como variable de trabajo, son mayores que las obtenidas con el primer principio.

Existen también aplicaciones del análisis de exergía en la industria petroquímica. Allí se estudian los procesos de separación para evaluar la eficiencia en los procesos químicos de una columna de destilación para la separación de propileno-propano [Rivero R., y Anaya A., 1990]. Este estudio utiliza las definiciones de

eficiencia racional junto con la exergía química definida por Kotas [Kotas T. J., 1995] y utilizada por [Cornelissen R., 1997.].

Datos más específicos se han encontrado en la aplicación de análisis de exergía desarrollado por [Doldersum A., 1997.], para una parte de una refinería [Hinderink A.P., Kerkhof F.P.J., Lie A.B.K., De Swaan Arons J. and Van Der Kooi H.J., 1996.] que corresponde a la sección del reactor y destilación, en la que se obtiene una reducción de las pérdidas de exergía del 70%.

Se han presentado análisis en los que se reporta la dificultad para determinar la operación de plantas industriales cuando el número de sub-procesos o elementos de los equipos son grandes [Chejne F., Florez W., Ordóñez J., y Botero E., 2001.]. Una técnica para evaluar esta situación es la del método matricial del análisis termoeconómico y la otra es el costo de optimización de la planta, y por medio de un análisis de exergía se puede determinar el grado de irreversibilidad de los procesos. El estudio muestra las potencialidades del método matricial para calcular los balances de masa y energía, y para determinar el costo termoeconómico de la planta de potencia. Aplicando la teoría de sistemas lineales a balances termodinámicos es posible obtener en forma rápida y flexible, la irreversibilidad total de los procesos, sus características exergéticas y las pérdidas de exergía en cada subsistema [Karakus A.A., Boyar S., Akdeniz R.C. and Hepbasli A., 2002.].

El sector de producción de acero ha sido también objeto de estudio. Se puede citar el caso del método de contabilidad exergética [Costa M., Schaeffer R. and Worrell E., 2001.]. Este estudio analiza los flujos de materia y energía en sistemas de producción de acero, los resultados fueron comparados con los resultados obtenidos por otros investigadores. En este estudio se realizaba el análisis de cada uno de los procesos que se llevan a cabo en esta industria, con el objeto de calcular y comparar las pérdidas de exergía y las eficiencias de cada uno de ellos.

También se presentan en forma desagregada los valores de exergía correspondientes a los residuos de estos procesos, clasificados como emisiones al aire y efluentes en el agua, así como las limitaciones para caracterizarlos. Para llevar a cabo este trabajo los autores utilizan el balance de exergía, con esto se logran cuantificar las pérdidas de exergía (B), es decir, las irreversibilidades de cada proceso, la ecuación es la siguiente:

$$B_{\text{Pérdidas}} = B_{\text{Entrada}} - B_{\text{Productos}} - B_{\text{Residuos}}$$

En el área de procesos de combustión, específicamente en motores de combustión interna, también se han realizado análisis basados en la segunda ley de la termodinámica para examinar la destrucción de disponibilidad energética en estos procesos [Caton J., 2000]. Este estudio es del tipo analítico y no involucra mediciones experimentales. La fracción de la disponibilidad del combustible que es destruida, debido a la irreversibilidad del proceso, es obtenida en función de la temperatura, la presión y la razón entre la mezcla de octano y aire.

Trabajos de investigación realizados en el sector de la industria de alimentos son escasos, las industrias que han utilizado el método del análisis de exergía como herramienta para cuantificar el grado de irreversibilidad de sus procesos son la industria azucarera, plantas productoras de leche, plantas de procesamiento de pasta de tomate, industrias de conservas de pescado, líneas de producción de paletizado de alimentos balanceados y la industria de la harina de pescado.

La industria azucarera es la que más ha sido estudiada, básicamente debido a que el bagazo, producto secundario en la obtención del azúcar está siendo utilizado como combustible sólido en calderas, de allí la necesidad de caracterizar el potencial térmico para producir energía. Con respecto al bagazo se ha tenido en cuenta que sufre transformaciones del tipo físico, mas no químico, entonces es

considerado como un combustible sólido, para lo cual emplea las expresiones sugeridas por [Szargut J., Morris D.R. and Steward F. R., 1988.]. En ella se presenta la exergía del bagazo como una función de la fracción en masa de carbón, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno presentes, así como de su poder calorífico inferior [Fernández-Parra M.I., Nebra S. A., 2004. ].

El análisis de exergía ha sido aplicado a procesos de producción de leche con la finalidad de optimizar el uso de energía. Se analizaron equipos como enfriadores, intercambiadores de calor y regeneradores dentro del proceso; así el análisis de exergía reveló información importante como por ejemplo que en el homogenizador se debe minimizar la caída de presión, mientras que en los intercambiadores se deben aumentar los coeficientes de transferencia de calor. En este estudio el análisis de exergía se utiliza como una herramienta para administrar racionalmente el uso de energía en los procesos y equipos. El proceso de optimización está enfocado a minimizar el uso de los recursos energéticos, mientras que la optimización exergética está enfocada en minimizar la irreversibilidad y las pérdidas de energía de todo el sistema (planta lechera). Las ecuaciones generadas en este problema de optimización son no lineales y trabajadas en un programa de computador denominado GAMS/MINOS. Por último se utilizan las ecuaciones de conservación de masa y energía para obtener las expresiones de exergía con lo que se está en capacidad de determinar la irreversibilidad en un punto en específico de producción [Fang Z., Larson D.L., Fleischmen G, 1995. ].

La industria de producción de pasta de tomate también ha sido objeto de estudio vía análisis de exergía, en este caso como herramienta de diagnóstico para analizar el estado real del funcionamiento de una planta, presenta los criterios apropiados para definir la entalpía y entropía de sustancias alimenticias [Rostein E., 1983].

En el análisis de exergía se hace énfasis en los flujos de energía eléctrica suministrada a cada uno de los equipos involucrados en el análisis. Se analiza la pérdida de trabajo por la producción de entropía del sistema [Lozano M. y Valero A., 1986.], con el objeto de elaborar una especie de escala en la que se identifique cual es la sección del proceso productivo que contribuye en mayor medida a la ineficiencia total del sistema [Rostein E., 1983].

Son muchos los casos en los que se utiliza la termoeconomía como herramienta para realizar estudios de uso racional y eficiente de la energía. En este proyecto se utiliza para el estudio de URE en el sistema de bombeo Bosconia. Se quiere mostrar la aplicación de este análisis a sistemas eléctricos de conversión energética con el fin de mostrar una metodología conceptual sistematizable.

## **2.1 AUDITORIA ENERGÉTICA**

La auditoría energética consiste en revisar los procedimientos llevados a cabo para administrar la energía en un determinado proceso. Al terminar la auditoría energética se espera contestar las siguientes preguntas:

1. ¿Dónde se consume la energía?
2. ¿Qué cantidad de energía se está consumiendo?
3. ¿Cuál es el costo?
4. ¿Qué cambios pueden realizarse para mejorar las operaciones?

La conservación de la energía eléctrica ofrece una posibilidad real para ahorros sustanciales. Con un buen cuidado y un mantenimiento apropiado se pueden ahorrar sumas considerables. Para esto se requiere de un conocimiento de las pérdidas de energía en los equipos y de un aprovechamiento sistemático para

minimizarlas. Esto se hace implementando una lista de chequeo y realizando un inventario de los equipos del sistema.

Las listas de chequeo se usan para identificar el equipo conectado a la red y registrar los consumos en kWh en cada etapa del proceso con el fin de reducirla.

**Ver anexo 2** (lista de chequeo).

Para programar la auditoría se designa un determinado tiempo para hacer una comparación entre el consumo teórico y el indicado por la factura del consumo de energía eléctrica (práctico). Para ello se procede determinando:

- a) El número de horas de operación del sistema en un periodo mensual.
- b) El número total de kW conectados.
- c) Los kWh consumidos y esperados será el producto de lo encontrado en los incisos a) y b).
- d) Los kWh de la factura del consumo de energía eléctrica
- e) Si c y d difieren más del 20%, es probable que cierto diseño y/o procedimiento deben ser cambiados.

## **2.2 AUDITORÍA EXERGÉTICA**

La auditoria exergética consiste en inspeccionar los flujos de exergía involucrados en cualquier sistema o proceso en todas sus partes posibles con el fin de saber como se está administrando la energía y que parte de ésta es útil.

### 3. TERMOECONOMÍA EN PROCESOS DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA

Existen procesos en los cuales se pueden tener diferentes tipos de energía realizando algún trabajo. Las energías térmica, química, cinética, de fluidos, etc. pueden realizar procesos mecánicos, químicos y demás, en los cuales se quiere cuantificar la energía en cada parte del proceso, con el fin de evaluar la eficiencia energética y lo que cuesta llevar a cabo esos procesos tanto en unidades de energía como en pesos. Para esto se presentarán los principios básicos de la termodinámica con el fin de relacionar términos claves para la comprensión de algunos fenómenos físicos, tales como el intercambio energético, y se introducirá el concepto de termoeconomía con el fin de crear y utilizar un lenguaje energético susceptible de aplicarle argumentos económicos.

#### 3.1 PRINCIPIOS DE LA TERMODINÁMICA

A continuación se hará una breve descripción de los principios de la termodinámica y su incidencia en los procesos industriales de conversión energética.

La relación de la termodinámica con los procesos de intercambio energético en las industrias, juega un papel importante, pues si los procesos llevados a cabo en una industria, son más o menos eficientes, esto se reflejara en la economía de la industria. Podrá suceder que el consumo por unidad de producción sea tan elevado y que al final cueste mucho seguir la producción.

**3.1.1 Principio cero (escala de temperatura).** En ciertas ocasiones el hombre experimenta sensaciones que califica con adjetivos como caliente y frío. Cuando se toca un cierto objeto, el sentido del tacto proporciona tales sensaciones, de

manera que a nivel de mera apreciación cualitativa se dice que un cuerpo está a mayor o menor temperatura que otro. Se aprecian las variaciones de temperatura por los cambios de intensidad de aquellas sensaciones. Si la sensación de calor aumenta se dice que la temperatura se eleva, y si dicha sensación disminuye se considera que la temperatura ha disminuido.

Se tiene un sistema en equilibrio térmico cuando la temperatura de los elementos que la conforman alcanza un valor estable o no presenta ningún cambio de temperatura.

Si este sistema entra en contacto con un segundo sistema también en equilibrio térmico pero a una temperatura diferente, estos dos sistemas también encuentran el equilibrio térmico a una temperatura intermedia entre los primeros.

La ley expone además, que dos sistemas en equilibrio térmico al unirse con un tercero, llegarán a un equilibrio térmico entre sí.

**3.1.2 Primer principio (conservación de la energía).** Los sistemas ya sean líquidos, sólidos o gaseosos tienen una energía muy especial pero que no es directamente cuantificable. Esta energía se denomina energía interna (o algunas veces energía latente).

La energía interna es una función que está ligada al movimiento microscópico de la materia o el sistema, por que no depende del desplazamiento del sistema termodinámico con respecto de cualquier sistema de referencia que se tome. Se encuentra asociada a la posición y movimiento de sus moléculas, átomos y partículas subatómicas con respecto a su centro de masas. La energía interna constituye una propiedad que depende de la combinación simultánea de las energías cinética y potencial molecular, y para tratarla se toman sus propiedades globales: la presión y la temperatura.

Un sistema por tener energía interna está en capacidad de realizar trabajo. Al hacerlo experimenta un cambio en la energía interna y desprende calor. Con esto la primera ley de la termodinámica enuncia que al poner en contacto un cuerpo caliente con otro frío, el calor fluirá de uno a otro de manera tal que la energía global permanecerá constante, pero no impone ninguna restricción al sentido de avance del calor. Es decir la energía se conserva en el sistema.

Al ser la energía interna una función de estado, la presión y la temperatura se constituyen en variables de estado para todas las funciones que permiten cuantificar el calor emitido por un sistema o subsistema, es así como la variación de calor emitido se puede expresar como:

$$\hat{\partial}q = du + p * dv \quad [\text{Cal}] \quad (1)$$

Siendo  $du$  la variación de la energía interna,  $dv$  la variación de volumen y  $p$  la presión.

Ahora, esta expresión sólo indica la variación que tiene el calor desprendido por un sistema cuando realiza un trabajo.

Para cuantificar la cantidad de energía que este sistema desprende, se recurre a la expresión llamada entalpía.

La entalpía corresponde a la energía total asociada, y se expresa al agregar la energía interna a la energía del movimiento (presión por volumen) es decir:

$$H = U + p * V \quad [\text{J}] \quad (2)$$

Donde  $U$  es la energía interna,  $P$  la presión,  $V$  el volumen y  $H$  la entalpía que se mide en julios.

Esta expresión indica la cantidad de energía que un sistema termodinámico puede intercambiar con su entorno. Se utiliza en las reacciones químicas como el calor emitido o absorbido por la reacción, en los cambios de estado (por ejemplo de líquido a gas se encuentra en el calor latente o de vaporización) o en un simple cambio de temperatura (se evidencia como la capacidad calorífica por cada grado de variación del componente o sistema en cuestión).

**3.1.3 Segundo principio (entropía).** La energía total no permite caracterizar por completo un sistema macroscópico, puesto que las partículas del sistema pueden estar en diferentes niveles de energía. Es necesaria una magnitud que pueda representar, a nivel macroscópico, el grado de orden existente entre las partículas del sistema.

Mientras la primera ley presenta calor y trabajo como formas equivalentes de intercambio de energía, la segunda ley varía su equivalencia, ya que el trabajo puede pasar de manera íntegra a calor pero el calor no puede transformarse de manera íntegra en trabajo.

La formulación matemática de la segunda ley, debida a Clausius, introduce una nueva función de estado llamada entropía, definida como:

$$SB = SA + \int_A^B \frac{dq_{rev}}{T} \quad [J] \quad (3)$$

Donde  $SA$  es el valor (arbitrario) que se asigna a la entropía del estado de referencia  $A$ ,  $T$  es la temperatura absoluta en grados kelvin y  $dq_{rev}$  es el calor intercambiado en un proceso irreversible ideal dado en calorías.

Es así como existe una propiedad llamada entropía  $S$ , intrínseca de un sistema, funcionalmente relacionada con las coordenadas medibles que caracterizan el sistema. Para un proceso reversible, los cambios en esta propiedad están dados por:

$$ds = \frac{dQ}{T} \quad [\text{J}] \quad (4)$$

A esta expresión se le denomina relación termodinámica fundamental. Es una relación muy importante y útil que puede escribirse de muchas maneras equivalentes, por ejemplo, cuando se basa en el primer principio se puede dar como:

$$Tds = dQ = dU - dV \quad [\text{Cal}] \quad (5)$$

Si el único parámetro externo de relieve es el volumen  $V$  del sistema, entonces el trabajo realizado sobre el mismo es  $dW = -p^* dV$  cuando su presión media es  $p$ .

En este caso se reduce a:

$$Tds = dU + p^* dV \quad [\text{Cal}] \quad (6)$$

El cambio de entropía de cualquier sistema y su ambiente considerados como un todo, es positivo. Se aproximaría a cero si el proceso es reversible; sin embargo como esto es casi imposible, entonces se considera que todos los procesos naturales dan por resultado un incremento de la entropía total.

Se puede entonces concluir que el valor energético de un sistema no depende tan solo de la materia y la energía que contiene sino de algo más, la entropía. Esta expresa lo que hay en él, de orden o de desorden; la energía se conserva, pero se va degradando a medida que la entropía del sistema aumenta.

**3.1.4 Tercer principio (estado de referencia de la entropía).** 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 como sigue:

$$S1(p1, T1, V1) - S0(po, To, Vo) = \int_0^1 \frac{\partial Q}{T} \quad [\text{J}] \quad (7)$$

Donde  $S0(po, To, Vo) = 0$ , por ser el estado cero.

Se tiene entonces:

$$S1(p1, T1, V1) = \int_0^1 \frac{\partial Q}{T} = \int_{(po, To, Vo)}^{(p1, T1, V1)} \frac{\partial Q}{T} \quad [\text{J}] \quad (8)$$

Resulta lógico entonces, intentar adoptar como estado de referencia para la entropía aquel en el que la temperatura sea  $To = 0 \text{ }^\circ\text{K}$ , 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.

Si fuera posible alcanzar el cero absoluto de temperatura, la materia estaría totalmente ordenada y su estado sería de  $0 \text{ J/}^\circ\text{K}$ .

Al aumentar la temperatura, las moléculas, y los átomos que las constituyen adquieren una cierta movilidad, con lo que pueden adoptar varias orientaciones con la misma energía, por tanto se tendrían estados de desorden pero con baja energía creciente.

### **3.2 TERMODINÁMICA Y ECONOMÍA EN PROCESOS DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA**

Analizar la producción económica en un contexto global, que asuma las restricciones que supone el medio físico y el entorno en que se ubica, ha cobrado gran importancia debido al interés de las industrias de ser cada vez más competitivas.

El segundo principio de la termodinámica establece una importante limitación a cualquier transformación que utilice calor o trabajo, sea o no económica; dice que todo al utilizar trabajo reduce la energía disponible. De acuerdo con esto, los productos de toda transformación económica contienen sólo una parte del trabajo o calor utilizado para su obtención, esto indica que la producción reduce la energía disponible de entrada y aumenta la entropía del proceso.

Un sistema económico no sería viable si el valor económico de la producción final fuera menor que el valor económico de los recursos utilizados en ella. Habrá producción sólo cuando se consiga que de los productos finales disponibles, tras los procesos de conversión de energías de entrada, pueda obtenerse algún tipo de beneficio. Estos dos planteamientos no pueden ser contradictorios; la termodinámica y la economía describen fenómenos con metodologías distintas, pero sus visiones deben ser compatibles. Estos planteamientos se recogen en uno solo por medio de la termoeconomía.

La termoeconomía se ocupa de establecer la relación existente entre los conceptos y variables que utilizan las ciencias de la termodinámica y la economía de la forma más clara y rigurosa posible, y de formular las metodologías más apropiadas para el análisis, la optimización y la síntesis de los sistemas energéticos.

**3.2.1 Exergía y balance exergético.** Un término que permite evitar confusiones, es el de 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.

Esta propiedad medida como el trabajo potencial que podría obtenerse por un subsistema por medio de un proceso reversible sobre el ambiente, puede citarse con cuatro componentes: la exergía cinética (relacionada con el movimiento relativo), la exergía potencial (ya sea gravitacional o electromagnética), la exergía física (dada por las diferencias de presión y/o temperatura) y la exergía química (asociada a diferencias en la composición química). La exergía toma un valor diferente de cero, cuando el sistema en estudio tiene alguna diferencia con sus alrededores en una o más de los componentes de exergía arriba mencionados.

A diferencia de la energía, la exergía no se conserva, ya que se puede ganar o perder en un proceso físico, pero también se puede acumular y encontrar en diferentes presentaciones como por ejemplo en carbones minerales. La exergía que entra o sale a y de cualquier subsistema puede ser medible y definida. Como la exergía no se conserva, deben existir unas pérdidas en el proceso asociadas, generalmente, a una pérdida de calor.

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

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

A estos factores de producción, hay que añadirle los que se extrajeron de la teoría económica neoclásica, la cual considera a la exergía como factor de producción. Algunos economistas agregaron los materiales como factor de producción, quedando entonces cuatro factores de producción: costos de capital, costos de la labor humana, costos de la exergía y los costos de los materiales. Se puede considerar los materiales y la exergía como un solo factor denominado: exergía.

Los costos de capital normalmente están expresados en unidades monetarias debido a que no existe una variable física similar. La labor humana se expresa en horas hombre, resaltando así que existen diferentes niveles y remuneraciones. La exergía es medida en unidades de energía.

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

El concepto de rendimiento o eficiencia es central en toda teoría de producción. Partiendo de esto, el deseo de producir algo es externo al sistema definido previamente. Después que se realiza el diseño del sistema y su estructura

funcional, deben adecuarse al objetivo de utilizar de forma eficiente los recursos disponibles (capital, materias primas, personal, etc.).

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

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

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

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

$$F - P = I > 0 \quad (9)$$

Donde I representa la cuantificación de la irreversibilidad del proceso en términos de exergía destruida. El rendimiento termodinámico vendrá dado por:

$$n = \frac{P}{F} \leq 1 \quad (10)$$

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

La inversa de la función eficiencia así definida representará el costo exergético:

$$K = \frac{F}{P} \geq 1 \quad (11)$$

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

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

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

**3.2.5 Teoría del costo exergético.** El denominado costo exergético no corresponde a dinero (pesos \$), sino a una cuantificación energética expresada en la forma en que se hace la contabilidad de costos. En los procesos energéticos complejos, la estructura del sistema juega un papel predominante a la hora de estudiar su eficiencia y sus costos. La teoría del costo exergético es una metodología de costos termoeconómicos que formula un procedimiento de asignación de costos basado en consideraciones termodinámicas. La esencia de

estas reglas está en repercutir el costo de los recursos de cada equipo, de forma exclusiva a sus productos útiles y proporcionales a su exergía. Se trata de una técnica esencialmente numérica que permite cuantificar los costos pero que no responde de manera completa a las causas del proceso de formación de costos y en especial de los residuos, ni a la influencia que ejerce en él la estructura productiva.

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

Otra limitación de las teorías de contabilidad termoeconómica es determinar el nivel de agregación adecuado para obtener los costos más precisos con la información disponible. El conocimiento de la estructura productiva puede ayudar a buscar criterios de desagregación de los sistemas.

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

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

a) Sistema.

Entidad compleja compuesta por un conjunto de componentes y las relaciones entre ellos y con su entorno. Se le representa por un grafo dirigido, abierto y de longitud finita. Cada flujo conecta un par de equipos.

b) Nivel de agregación.

Se interpreta como la colección de equipos y sus relaciones que constituyen el sistema total.

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

c) Matriz de incidencia.

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

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

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

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

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

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

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

Donde M, H y B son vectores (mx1) que contienen la masa, energía y exergía de cada uno de los flujos. El elemento i-ésimo del vector I (nx1) representa la exergía destruida en dicho componente debido a irreversibilidades internas y externas.

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

$$[Af] - [Ap] = A$$

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

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

Siendo F y P vectores (nx1), cuya componente i-ésima contiene la exergía del insumo Fi y de producto Pi, respectivamente.

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

$$\eta_i = \frac{P_i}{F_i} \quad (12)$$

Y el costo exergético, como se expresó anteriormente:

$$k_i = \frac{F_i}{P_i} \quad (13)$$

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

$$\eta_t = \frac{P_t}{F_t} \quad (14) \quad k_t = \frac{F_t}{P_t} \quad (15)$$

Siendo  $F_t$  el insumo del sistema completo y  $P_t$  el producto final.

#### d) Residuos, pérdidas y subproductos

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 que 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.

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

$$F - P = I \geq 0 \quad (16)$$

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

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

$$Ki^* = \frac{Bi^*}{Bi} \quad (17)$$

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

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

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

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

**P<sub>1</sub>** = El costo exergético es una propiedad conservativa. Para cada componente del sistema la suma de todos los costos exergéticos de los flujos de entrada es igual a la suma de los costos exergéticos de los flujos de salida. En forma matricial y en ausencia de valoraciones externas el balance de costos exergéticos puede escribirse como:

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

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

**P<sub>2</sub>** = 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.

**P<sub>3</sub>** = Todos los costos generados en el proceso productivo deben ser incluidos en el costo final de los productos. En ausencia de asignaciones externas, se asigna un costo nulo a los flujos de pérdidas. Esto permite definir tantas ecuaciones como flujos de pérdida.

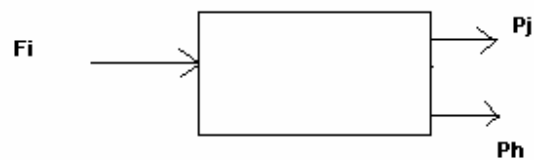
Si se quiere calcular el costo de cada uno de los  $m$  flujos relevantes en el nivel de agregación considerado para el análisis, será necesario escribir  $m$  ecuaciones independientes. Sin considerar los flujos de pérdidas, las preposiciones definidas hasta ahora permiten definir  $n+e$  ecuaciones ( $n$ , proposición 1, y  $e$ , proposición 2). Si un componente tiene más de un flujo de salida, tendrá  $S_i - 1$  bifurcaciones, y su número total viene dado por:

$$\sum_{i=1}^n (S_i - 1) = \sum_{i=1}^n S_i - n = m - n - e \quad (18)$$

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

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

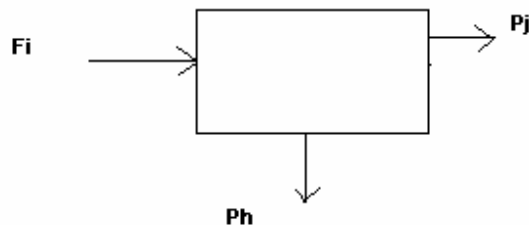
**P<sub>4</sub>** = Si el producto de una componente esta formado por varios flujos de la misma calidad termodinámica, todos ellos tienen el mismo costo exergético unitario.



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

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

**P<sub>5</sub>** = Si un flujo de salida de una componente es parte del insumo de dicha componente, su costo exergético es el mismo que el del flujo de entrada del que proviene.



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

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

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

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

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

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

$$[Y^*] = \begin{pmatrix} -Z \\ we \\ 0 \end{pmatrix}$$

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

**3.2.7 Costo exergoeconómico.** El costo exergoeconómico de un flujo o producto es la suma de dos contribuciones: la primera que procede del costo de la exergía de entrada a la planta necesaria para producir dicho flujo, y la segunda, que engloba el resto de los costos originados en el proceso productivo.

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

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

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

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

equipos y flujos) como de la calidad del funcionamiento (rendimiento exergético) de los equipos. Una mejora de la estructura o de la eficiencia de los equipos implicará un menor consumo de recursos.

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

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

## 4. AHORRO EN EQUIPOS

En este capítulo se hace una descripción de las oportunidades de ahorro de energía en diferentes equipos como: transformadores, motores, bombas centrífugas, y sistemas como: iluminación y puestas a tierra.

### 4.1 APLICACIÓN EN TRANSFORMADORES

Los transformadores son máquinas eléctricas estáticas que reciben la energía eléctrica a una tensión dada y la entregan a otra.

Los transformadores permiten utilizar en cada sector los niveles de tensión más apropiados y económicos, atendiendo a factores tales como pérdidas de energía, potencia a transmitir, seguridad de utilización, longitud de líneas, etc.

**4.1.1 Pérdidas en transformadores de potencia.** Las pérdidas que ocurren en los transformadores se consideran que ocurren en dos circuitos, el del cobre y el del hierro.

**1. Pérdidas en el cobre ( $P_{cc}$ ).** Estas pérdidas se deben a paso de la corriente por los arrollamientos del transformador.

Cambian proporcionalmente con el cuadrado de la intensidad de corriente, siendo la constante de proporcionalidad la resistencia eléctrica.

Las pérdidas en el cobre del transformador se cuantifican así:

$$P_{cc} = I_1^2 * R_1 + I_2^2 * R_2 \quad [W] \quad (1)$$

Donde:

$I_1$ : corriente en el primario del transformador.

$I_2$ : corriente en el secundario del transformador.

$R_1$ : resistencia eléctrica del devanado primario del transformador.

$R_2$ : resistencia eléctrica del devanado secundario del transformador.

**2. Pérdidas en el hierro ( $P_o$ ).** Son llamadas también pérdidas en vacío o pérdidas en el hierro, ya que se pueden hallar mediante el ensayo de vacío del transformador. Son independientes de la carga a la cual esté sometido y por tanto son prácticamente invariables a tensión y frecuencia constantes.

Las pérdidas en el hierro comprenden: pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas.

Las pérdidas por histéresis están relacionadas con los reacomodamientos de los dominios magnéticos en el núcleo durante cada medio ciclo de la tensión aplicada. Dependen de la frecuencia de la tensión aplicada, del volumen del material ferromagnético y de la densidad de flujo magnético presente en el núcleo.

Las pérdidas por corrientes parásitas se deben a que los flujos que salen del núcleo y pasan únicamente a través de una de las bobinas del transformador se dispersan, produciendo una autoinductancia en las bobinas primaria y secundaria, y estableciendo de esta manera unas corrientes no deseadas llamadas corrientes parásitas o de Foucault que calientan el núcleo.

La suma de estas pérdidas se cuantifica como la potencia consumida en la conductancia del circuito de magnetización  $G_m$  así:

$$P_o = V^2 * G_m \text{ [w]} \quad (2)$$

Donde:

$V_1$ : Tensión aplicada al transformador en el ensayo de vacío en V.

$P_o$ : Pérdidas en el hierro dadas en W.

**4.1.2 Regulación de tensión.** En el transformador real la tensión varía ligeramente al variar la carga debido a sus impedancias serie. La medición de esta variación se asigna a una cantidad llamada regulación de tensión.

Este índice expresa la variación de tensión en vacío con respecto a plena carga, en porcentaje de la tensión a plena carga:

$$\delta = \frac{(V_{s.sc} - V_{s.pc})}{V_{s.pc}} * 100\% \quad (3)$$

Donde:

$V_{s.sc}$  = tensión del secundario sin carga (en vacío).

$V_{s.pc}$  = tensión del secundario a plena carga

Si el circuito equivalente del transformador está dado en sistema *por unidad* ( $pu$ ), entonces la regulación de tensión es:

$$\delta = \frac{(V_{s.sc_{pu}} - V_{s.pc_{pu}})}{V_{s.pc_{pu}}} * 100\% \quad (4)$$

Se considera ventajoso, normalmente, tener una regulación de tensión tan pequeña como sea posible. Para un transformador ideal,  $\delta = 0\%$ . No siempre es conveniente tener una regulación de tensión baja pues algunas veces los transformadores se usan deliberadamente para reducir las corrientes de falla en un circuito.

**4.1.3 Índice de carga.** Debido a que el transformador no funciona siempre en régimen nominal, es decir con  $I_{N1}$  e  $I_{N2}$  en el primario y secundario, respectivamente, para expresar que tan cargado se encuentra, se define el índice de carga C, como:

$$C = \frac{I1}{I_{N1}} = \frac{I2}{I_{N2}} \quad (5)$$

Donde I1 e I2 son las intensidades de corriente reales que circula por el primario y secundario respectivamente.

- Si  $C \leq 1$  El transformador trabaja cómodamente. Le circulan corrientes menores a la de diseño y puede funcionar en modo continuo. Si el índice de carga es muy bajo para todo el ciclo de carga, el transformador se encuentra sobredimensionado.
- Si  $C > 1$  El transformador estará sobrecargado. Los calentamientos alcanzados pueden llegar a ser peligrosos y dañar los aislantes. El funcionamiento no puede ser continuo.

**4.1.4 Rendimiento en transformadores trifásicos.** Los transformadores también se contrastan y evalúan de acuerdo con su eficiencia. La eficiencia o rendimiento está dada por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} * 100\% \quad (6)$$

Como  $P_{ent} = P_{sal} + P_{pérdidas}$  se tiene:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{(P_{sal} + P_{pérdidas})} * 100\% \quad (7)$$

Esta ecuación se aplica también a motores y generadores.

Para calcular la eficiencia de un transformador bajo carga, sólo se suman las pérdidas en el hierro y en el cobre y se aplica la ecuación 8.

Puesto que la potencia es  $P_{SAL} = \sqrt{3} * V_S * I_S * \cos \varphi$ , siendo  $V_S$  e  $I_S$  la tensión y corriente del secundario respectivamente, la eficiencia puede formularse por:

$$\eta = \frac{(\sqrt{3} * V_S * I_S * \cos \varphi_S)}{(\sqrt{3} * V_S * I_S * \cos \varphi_S + P_o + P_{cc})} * 100\% \quad (8)$$

El rendimiento del transformador utilizando el concepto de índice de carga se evalúa con la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\sqrt{3} * V_2 * C * I_{N2} * \cos \varphi}{\sqrt{3} * V_2 * C * I_{N2} * \cos \varphi + C^2 * P_{cc} + P_{cc}} \quad (9)$$

En esta ecuación se observa:

- Al mejorar el factor de potencia en la carga del transformador se ahorra energía y dinero, debido a que aumenta el rendimiento.

$$\eta = \frac{\sqrt{3} * V_2 * C * I_{N2}}{\sqrt{3} * V_2 * C * I_{N2} * \cos \phi + \frac{C^2 * P_{cc} + P_{cc}}{\cos \phi}} \quad (9.1)$$

Si  $\cos \phi$  crece  $\eta$  disminuye

si  $\cos \phi$  decrece  $\eta$  aumenta

- Si el índice de carga es cercano a uno, implica que el transformador trabaja cerca a su potencia nominal, esta condición aumenta el rendimiento ahorrando energía y dinero.

$$\eta = \frac{\sqrt{3} * V_2 * I_{N2} * \cos \phi}{\sqrt{3} * V_2 * I_{N2} * \cos \phi + \left( \frac{1 + C^2}{C} \right) * P_{cc}} \quad (9.2)$$

**A. Rendimiento máximo de un transformador.** El rendimiento máximo del transformador se presenta en el punto de carga en el que las pérdidas fijas en el núcleo son iguales a las pérdidas variables en el cobre. Esto se puede ver en la siguiente ecuación:

$$C^2 * P_{cc} = P_{VACIO} = P_o \quad (10)$$

De donde:

$$C \eta_{\max} = \sqrt{\frac{P_o}{P_{cc}}} \quad (11)$$

Donde:

$C \eta_{\max}$ , es el índice de carga para el cual se tiene el máximo rendimiento.

Dependiendo del tamaño del transformador y del material del núcleo, el rendimiento máximo se obtiene entre el 40 % y el 70 % de su capacidad nominal.

**B. Potencia a la cual se presenta el máximo rendimiento.** Se obtiene como una fracción de la potencia nominal para el índice de carga que presenta el máximo rendimiento. Esta potencia se calcula como sigue:

$$P = \sqrt{3} * V_2 * I_{N2} * \cos \varphi * C\eta \text{ max}$$

$$S_{nom} = \sqrt{3} * V_2 * I_{N2} * C\eta \text{ max}$$

$$S\eta \text{ max} = C\eta \text{ max} * S_{nom} = \sqrt{\frac{P_o}{P_{cu}}} * S_{nom} \text{ [kVA.]} \quad (12)$$

Donde  $S_{nom}$  es la potencia nominal del transformador en kVA

**C. Rendimiento diario o rendimiento cíclico del transformador.** Se tiene que la energía absorbida es igual a la energía suministrada más las pérdidas en vacío y con carga. Como el transformador está conectado todo el día, las pérdidas sin carga siempre están presentes aunque no se suministre energía a los consumidores. No ocurre lo mismo con las pérdidas bajo carga, pues ellas son función de la cantidad de energía que se está suministrando. En consecuencia el rendimiento se calcula de la forma siguiente:

$$\eta(\text{diario}) = \frac{W_{sal}(\text{total})}{W_{ent}(\text{total})} = \frac{kWh(\text{salida en 24 horas})}{kWh(\text{salida en 24 horas}) + kWh(\text{pérdidas en 24 horas})} \quad (13)$$

$$kWh(\text{salida en 24 horas}) = \sum (V_s * I_T * \cos \theta_T * t) = \sum (P_i * t) \text{ [kWh]} \quad (14)$$

$$kWh(\text{perdidas en 24 horas}) = P_o * T + \sum (P_{CUNOMINAL} * C^2 * t) \quad [\text{kWh}] \quad (15)$$

Donde:

**t** = Duración de cada intervalo.

**T** = Tiempo total del ciclo (24 horas).

**C** = índice de carga en cada intervalo.

Las pérdidas de energía durante el periodo de 24 horas serán estas pérdidas en el núcleo (constantes) más una pérdida variable en el cobre ( $P_{cu}$ ) que cambia en forma directa con la carga fluctuante durante el periodo de 24 horas.

**4.1.5 Normas que establecen las pérdidas para transformadores en Colombia.** En Colombia, el ICONTEC ha reglamentado las pérdidas mediante la NTC 818 para transformadores monofásicos, la NTC 819 para transformadores trifásicos y la NTC 380 para tolerancias. Las NTC 819 segunda revisión del año 1979 y tercera revisión del año 1987 permitían un 15 % adicional a los valores reglamentados para las  $P_o$  y las  $P_{cu}$ , así como un 10% adicional para las pérdidas totales  $P_t$  por medio de la norma NTC 380. En la cuarta y última revisión, en el año 1995 se eliminó esta tolerancia. En el **anexo 3** se presenta la norma ICONTEC sobre pérdidas en transformadores.

El índice de carga recomendado por la NTC 819 para operar los transformadores refrigerados por aceite es de alrededor de 0,8 con esta medida las temperaturas internas no son tan elevadas, permitiendo una duración mayor de los aislamientos.

**4.1.6 Aspectos fundamentales para el uso racional de energía en transformadores.** En los transformadores de potencia es posible mejorar el aprovechamiento de la energía vigilando los siguientes aspectos:

- Caídas de tensión
- Mantenimiento
- Control de temperatura
- Pérdidas de energía
- Desbalance de fases
- Sobrecargas

Es importante tener en cuenta la altura sobre el nivel del mar (ASNM) a la cual está instalado el transformador para conocimiento de su eficiencia. Esto se debe a que la intensidad y rigidez dieléctrica del aire se incrementan al aumentar la (ASNM) disminuyendo de esta manera la masa de aire y por lo tanto el enfriamiento natural. Para un funcionamiento en alturas superiores a 1000 metros, el transformador suministrará su potencia normal siempre que la temperatura promedio no exceda los valores siguientes:

**Tabla 1.** Temperatura del transformador para mantener su eficiencia a determinada altura (Tomada de “GELVEZ F, Julio Augusto. Ahorro de Energía. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, 1992. p 47”)

ALTITUD (m)	TEMPERATURA PROMEDIO MAXIMA (° C )
1000	30
2000	28
3000	25
4000	23

Si el transformador opera en altitudes superiores a 1000 m, y a temperatura normalizada, el límite de aumento en el devanado de 65 ° C se conservará siempre que la carga alimentada se reduzca con relación a la nominal en un porcentaje igual a 0,45% por cada 100 metros por encima de 1000 m.

## 4.2 URE EN MOTORES DE INDUCCIÓN

Este tipo de motor es también conocido como motor asincrónico, y basa su funcionamiento en la creación de un campo magnético giratorio en el entrehierro, debido a la circulación de corriente alterna trifásica por los devanados del estator. La velocidad de giro de este campo magnético en revoluciones por minuto se denomina velocidad de sincronismo.

El rotor gira a una velocidad ( $n$ ), que no llega a ser nunca la velocidad de sincronismo pero que es muy próxima a ésta.

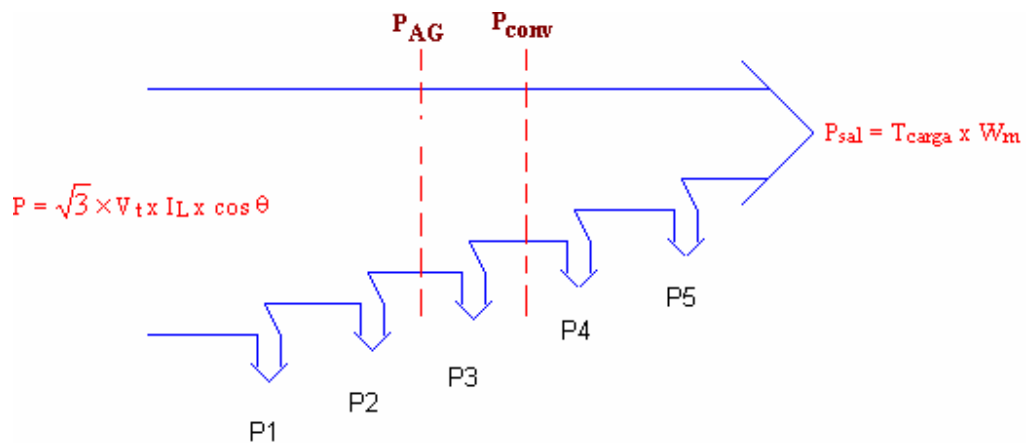
Hay dos tipos de motores de inducción según la constitución del rotor:

- Rotor en cortocircuito o jaula de ardilla: El rotor está compuesto por un conjunto de barras conductoras de cobre o aluminio unidas en sus extremos por anillos.
- Rotor bobinado: El rotor está compuesto por un devanado introducido en las ranuras, similar a la del estator. Los extremos de cada fase se conectan a unos anillos conectores montados sobre el eje, aislados eléctricamente de él. Esto permite conectar al devanado rotórico resistencias adicionales externas para reducir la corriente en el arranque. Una vez acabado el periodo de arranque se cortocircuitan estos anillos, y se levantan las escobillas.

**4.2.1 Pérdidas y diagrama de flujo de potencia.** Un motor de inducción se puede describir como un transformador giratorio trifásico, en el cual sus bobinados secundarios están cortocircuitados por lo que la potencia de salida no es eléctrica como en un transformador, sino que es mecánica.

En la siguiente figura se ilustra la relación de la potencia de entrada (eléctrica) con la potencia de salida (mecánica).

**Figura 2.** Diagrama de potencia (Tomada de “CONAE”)



Donde:

**P:** Es la potencia de entrada la cual se da a partir de corriente y tensión trifásicas.

**P1:** Es la potencia de entrada que se expresa a partir de la corriente y las tensiones trifásicas.

**P2:** Son las pérdidas  $I^2 \cdot R$  en los bobinados del estator.

**P3:** Son las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas en el estator.

**P4:** Son las pérdidas  $I^2 \cdot R$  en los bobinados del rotor.

**P5 :** Son las pérdidas por rozamiento y fricción a causa del movimiento del rotor.

**Psal:** Es la potencia de salida del motor, la cual es mecánica.

**PAG:** Es la potencia que se traslada del estator al rotor a través del entrehierro.

**Pconv:** Es el punto de transformación de la potencia eléctrica en mecánica.

**4.2.2 Rendimiento en los motores de inducción.** La eficiencia o rendimiento de un motor eléctrico ( $n$ ) es una medida de su habilidad para convertir la potencia eléctrica. Se expresa como la razón en porcentaje entre la potencia mecánica y la potencia eléctrica:

$$n = \frac{\text{potencia mecánica}}{\text{potencia eléctrica}} * 100\% \quad (16)$$

No toda la energía eléctrica que un motor recibe, se convierte en energía mecánica. En el paso de conversión, se presentan pérdidas, por lo que la eficiencia nunca será del 100%. Emplear motores de mayor eficiencia, reduce las pérdidas y los costos de operación. Por ejemplo si un motor se sustituyera por otro con una eficiencia del  $E_2\%$ , la potencia ahorrada (PA) se puede calcular aplicando la siguiente ecuación:

$$PA(kW) = 0,746 * CP * \left( \frac{100}{E_1} - \frac{100}{E_2} \right) \quad (17)$$

Donde:

CP= Caballos de potencia

0,746= Factor de conversión de CP a kW (partiendo de una potencia nominal del motor en HP).

$E_1$ = Eficiencia del motor viejo

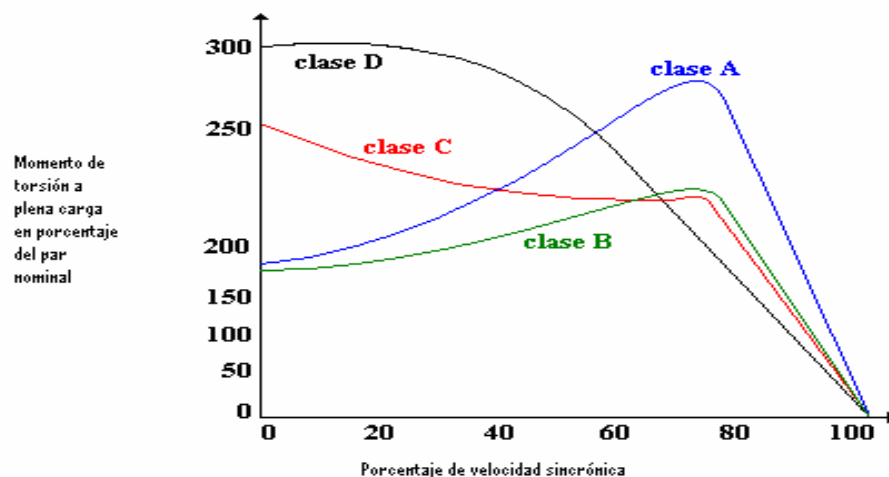
$E_2$ = Eficiencia del motor nuevo

Las distintas normas internacionales distinguen los motores eficientes de los estándares; en general, el rendimiento de los primeros, para distintos niveles de carga, es siempre superior al de los motores estándar.

**4.2.3 Selección del motor.** En los motores de inducción es permisible construir una gran variedad de curvas torsión – velocidad, modificando el rotor, lo que resulta de gran ayuda a la industria a la hora de seleccionar los motores más apropiados para la gran variedad de aplicaciones. NEMA en Estados Unidos y la International Electrotechnical Commission (IEC) especifican, en toda la gama de potencias, una serie de diseños normalizados con diferentes curvas de torsión – velocidad.

Estos diseños normalizados se conocen como clases de diseño. En la siguiente figura pueden verse curvas de torsión – velocidad típica para las cuatro clases de diseños normalizados de NEMA.

**Figura 3.** Selección de motores según torque y velocidad (Tomado de “NEMA”).



**DISEÑO CLASE "A":** El motor clase A es un motor de jaula de ardilla normal fabricado para uso a velocidad constante. Tiene grandes áreas de ranuras para una muy buena disipación de calor, y barras con ranuras hondas en el motor. Durante el periodo de arranque, la densidad de corriente es alta cerca de la superficie del rotor; durante el periodo de marcha, la densidad se distribuye con uniformidad. Esta diferencia origina algo de alta resistencia y baja reactancia de arranque, con lo cual se tiene un par de arranque entre 1,5 y 1,75 veces el nominal (a plena carga). El par de arranque es relativamente alto y junto con una baja resistencia del rotor producen una aceleración rápida hacia la velocidad nominal. Tiene la mejor regulación de velocidad pero su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal, haciéndolo menos deseable para arranque en línea.

Las aplicaciones típicas para estos motores son los ventiladores, abánicos, bombas, tornos y otras máquinas – herramientas.

**DISEÑO CLASE "B":** A los motores clase B a veces se les llama motores de propósito general. Son muy parecidos a los clase A debido al comportamiento de su deslizamiento-par. Las ranuras de su motor están embebidas algo más profundamente que en los motores clase A. Esta mayor profundidad tiende a aumentar la reactancia de arranque y la marcha del rotor, y por tanto reduce un poco el par y la corriente de arranque.

Las corrientes de arranque varían entre 4 y 5 veces la corriente nominal en los tamaños mayores de 5 HP, por lo cual se sigue usando típicamente arranque a tensión reducida. Los motores clase B se prefieren sobre los clase A para tamaños mayores.

Las aplicaciones típicas comprenden las bombas centrífugas de impulsión, las máquinas herramientas y los sopladores.

**DISEÑO CLASE "C":** Los motores de diseño clase C tienen un momento de torsión de arranque alto, con corriente de arranque baja y bajo deslizamiento (menos del 5%) a plena carga. El momento de torsión máximo es ligeramente más bajo que el de los motores clase A, mientras que el momento de torsión de arranque llega hasta un 250% del momento de plena carga. Estos motores se fabrican con rotores de doble jaula por lo que son más costosos que los motores de las clases anteriores. Se usan para cargas que requieren un alto momento de arranque, tales como bombas cargadas, compresores y bandas transportadoras.

**DISEÑO CLASE "D":** Los motores de diseño clase D tienen un momento de torsión de arranque muy alto (275% o más del momento de torsión nominal) y una corriente de arranque baja, pero tienen también un deslizamiento alto a plena carga. Son, esencialmente, motores de inducción comunes (clase A) pero con las barras del rotor más pequeñas y hechos de material de alta resistencia. La alta resistencia del rotor hace que el momento de torsión máximo se presente a muy baja velocidad. Incluso es posible que el momento de torsión más alto ocurra a velocidad cero (100% de deslizamiento). El deslizamiento a plena carga para estos motores es bastante alto en razón de la alta resistencia del rotor, la que por lo general tiende a ser de un 7 a un 11%, pero puede llegar hasta al 17% o más. Estos motores se usan en aplicaciones que requieren la aceleración de cargas muy altas de tipo inercial, especialmente grandes volantes o grúas de tijera. En tales aplicaciones, estos motores aceleran un gran volante hasta su máxima velocidad, para luego impulsar la perforadora. Después de una operación de perforación, el motor reacelera el volante por un período de tiempo largo para la siguiente operación.

Además de estas cuatro clases de diseños, NEMA acostumbra a reconocer las clases de diseño E y F, llamadas arranque suave de los motores de inducción.

Las normas NEMA han establecido la letra de código para los motores tipo jaula de ardilla, la cual representa las condiciones de partida en kVA por cada HP, cuando el motor parte a plena tensión, por lo que entrega información respecto a las corrientes de arranque (Ver **anexo 4** para identificar la letra de código).

Conocida la letra de código, la corriente de arranque del motor se calcula de acuerdo con la expresión:

$$I_{\text{arranque}} = \frac{(kVA / HP)_{\text{letra de código}} * HP_N * 1000}{\sqrt{3} * V_N} \quad (18)$$

**4.2.4 Recomendaciones para el ahorro de energía en motores eléctricos.** Es importante el hecho de que los motores eléctricos, suministran en su mayor parte, la energía que mueve los accionamientos industriales, por lo que la operación y conservación de los motores en la industria, significa uno de los campos que más oportunidades en el ahorro de energía presenta y que se traducen en una disminución en los costos de producción y en una mayor competitividad.

El ahorro de energía comienza desde la selección apropiada de los motores. Se tiene un motor adecuado para cada necesidad, tanto en lo que respecta a su tipo por condiciones ambientales, por condiciones de arranque o regulación de velocidad, así como por su tamaño o potencia. Los mayores ahorros de energía eléctrica se obtienen cuando el motor y su carga operan a su máxima eficiencia.

Para ver algunas sugerencias acerca de la administración de la energía en motores de inducción remitirse al capítulo de *RECOMENDACIONES*.

**4.2.5 Resistencia de aislamiento e índice de polarización en máquinas rotatorias.** La resistencia de aislamiento en máquinas rotatorias es la razón entre la tensión continua aplicada entre bobinados y tierra, y la corriente resultante.

Normalmente se toman mediciones después de un minuto de haberse iniciado y luego diez minutos después.

Los valores de resistencia de aislamiento medidos, se corrigen a los valores esperados en las bobinas a una temperatura de 40 °C. Esto se hace de acuerdo con la siguiente fórmula que propone la guía ANSI/IEEE .43 – 1974:

$$R_{ais} = K_T * R_m \quad (19)$$

Donde:

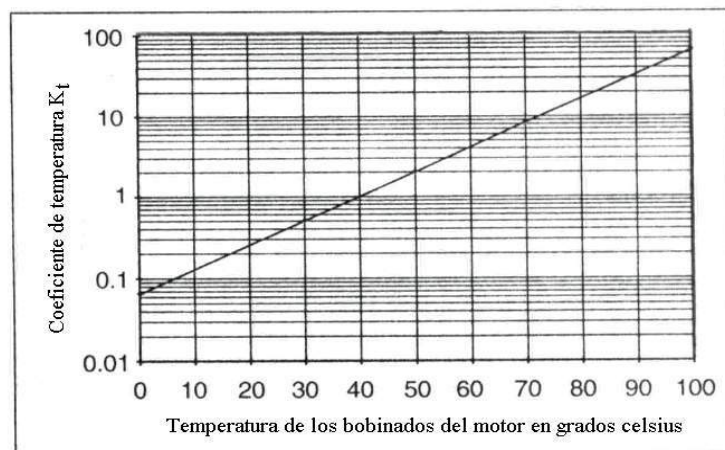
$R_{ais}$  : Resistencia de aislamiento (en  $M\Omega$ ) corregida a 40 °C.

$R_m$  : Resistencia de aislamiento (en  $M\Omega$ ) medida a una temperatura  $t$ .

$K_T$  : Coeficiente de temperatura asociado a la resistencia de aislamiento a temperatura  $t$ .

La temperatura de los bobinados puede ser medida con un termómetro o termocupla. Los valores aproximados de  $K_T$  se pueden ver en la figura 4.

**Figura 4.** Valores del coeficiente  $K_t$  en función de la temperatura en los bobinados de la máquina. (Tomado de “ANSI/IEEE 43-1974”)



En lo que respecta a valores de resistencia de aislamiento, el valor mínimo recomendado para un minuto de medición según ANSI/IEEE . 43-1974 viene dado por la siguiente fórmula:

$$R_m = kV + 1 \quad (20)$$

Donde:

$R_m$ = Valor mínimo recomendado de resistencia de aislamiento en  $M\Omega$  si

las bobinas están a 40 °C.

kV = Tensión eléctrica en kV

Para motores construidos después de 1970 el estándar IEEE 43-1974 recomienda un valor mínimo de resistencia de aislamiento de 100 MΩ a 40 °C. En la tabla 2 se aprecian los valores de resistencia de aislamiento mínimos para 40 °C.

**Tabla 2.** Valores mínimos de resistencia de aislamiento para 40° C (Tomado de “IEEE Std 43-1974”).

Resistencia de aislamiento ( MΩ)	Tipo de máquina
R (1 min) = kV + 1	Para bobinados fabricados antes de 1970, todos los bobinados de campo y otros no descritos abajo
R (1 min) =100	Para armaduras DC y estatores AC construidos después de 1970
R (1 min) = 5	Para máquinas de bobinado aleatorio y con TENSIONES menores a 1 kV.

Las tensiones de prueba a aplicar por el instrumento de medición se encuentran en la tabla 3.

**Tabla 3.** Tensiones de prueba para la medición de resistencia de aislamiento en máquinas rotatorias (Tomado de “IEEE Std 43-1974”).

Rango de tensiones del bobinado (V)	Tensión de prueba (V)
< 1000	500

1000 – 2500	500 – 1000
2501 – 5000	1000 – 2500
5001 – 12000	2500 – 5000
> 12000	5000 – 10000

El índice de polarización es la razón entre las mediciones de resistencia de aislamiento a los 10 minutos y al minuto. El estándar IEEE 43-1974 señala que para máquinas con bobinado en buenas condiciones el índice de polarización debe ser de 3 o más. Para motores construidos antes de 1970 el IP debe ser igual o superior a 2. Si el índice de polarización está entre 1 y 2 se está en una situación límite y si el índice de polarización es menor que 1 se tiene un aislamiento defectuoso.

#### **4.3 INCIDENCIA DEL FACTOR DE POTENCIA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Este apartado presenta los aspectos relacionados con la incidencia del factor de potencia en el uso racional de la energía y las ventajas de la compensación del factor de potencia.

Los motores de inducción, transformadores, equipos de soldadura, lámparas fluorescentes, anuncios de neón, hornos de inducción, etc., consumen sólo una parte de la corriente que toman de la línea que los alimenta, siendo ésta la corriente “activa” o “productiva”. El resto de la corriente total alimenta los campos magnéticos del equipo y se conoce como corriente “magnetizante reactiva” o “no productiva”.

El factor de potencia de un circuito es la relación entre la corriente productiva y la corriente total suministrada, o la razón entre la potencia activa real o verdadera que es usada en un circuito para producir calor o trabajo, expresada en W o kilovatios (kW) y la potencia aparente que es tomada de la línea, expresada en VA.

**4.3.1 Consecuencias del bajo factor de potencia.** Las instalaciones eléctricas tienen las siguientes consecuencias a medida que el factor de potencia disminuye.

**A. Incremento de las pérdidas por efecto Joule.** La potencia que se pierde por calentamiento está dada por la expresión  $I^2R$  donde  $I$  es la corriente total y  $R$  es la resistencia eléctrica de los equipos (bobinados de generadores y transformadores, conductores de los circuitos de distribución, etc.). Las pérdidas por efecto Joule se manifiestan en:

- Calentamiento de cables.
- Calentamiento de embobinados de los transformadores de distribución.
- Deterioro del aislamiento de los conductores, y en caso de ser irreversible, puede facilitar la aparición de cortocircuitos.

**B. Sobrecarga en los generadores, transformadores y líneas de distribución.** El exceso de corriente debido a un bajo factor de potencia, ocasiona que los generadores, transformadores y líneas de distribución, operen con sobrecarga y reduzcan su vida útil.

**C. Aumento de la caída de tensión.** El incremento de la regulación de tensión asociada al bajo factor de potencia puede causar un insuficiente suministro de potencia a las cargas (motores, lámparas, etc.). Si los motores mantienen

constante la potencia de salida, la relación de la tensión aplicada conlleva un incremento de la corriente de alimentación con todas sus consecuencias. Esta caída de tensión afecta a:

- Los embobinados de los transformadores de distribución.
- Los cables de alimentación.

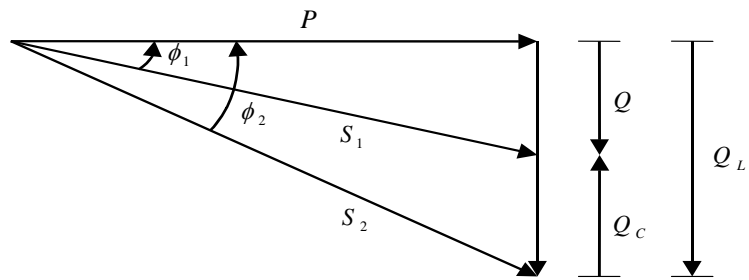
**D. Incremento en la facturación eléctrica.** Un bajo factor de potencia implica pérdidas que afectan al productor y distribuidor de energía eléctrica, por lo que se penaliza al usuario haciendo que pague más por su energía.

**4.3.2 Compensación del factor de potencia.** Las cargas inductivas que se encuentran en una industria, además de requerir potencia activa, demandan un suministro de potencia reactiva para su funcionamiento, lo cual ocasiona un bajo factor de potencia. Esta demanda de potencia reactiva se suple instalando condensadores en las cargas inductivas.

Los condensadores son las fuentes más comunes de kVAr para mejorar el factor de potencia y se conectan en paralelo con la carga. Son equipos estáticos sin partes móviles que se desgasten, tienen alta eficiencia, larga vida y son económicos para instalar y mantener.

Con base en la cantidad de reactivos que entregan, se reduce parcial o totalmente la potencia reactiva tomada de la red eléctrica y se aumenta el FP. A este proceso se le denomina compensación de la potencia reactiva.

**Figura 5.** Representación gráfica de la compensación del factor de potencia.  
(Tomado de "CONAE")



Donde:

$Q_L$ : demanda de reactivos de un motor y  $S_2$  la potencia aparente correspondiente.

$Q_C$ : suministro de reactivos del condensador de compensación.

La compensación de reactivos no afecta el consumo de potencia activa en baja carga, (**ver figura 5**) ya que se trata de reducir la exigencia de potencia reactiva mejorando el factor de potencia. Como efecto del empleo de los condensadores, el valor del ángulo  $\phi_2$  se reduce a  $\phi_1$ , del mismo modo, la potencia aparente  $S_2$  también disminuye, tomando el valor de  $S_1$ .

Finalmente, al disminuir la demanda de reactivos, se incrementa el factor de potencia ( $\text{Cos } \phi_1 > \text{Cos } \phi_2$ ).

El tamaño del condensador se puede calcular considerando lo siguiente:

- La potencia reactiva del condensador es:  $Q_C = Q_L - Q$
- Del triángulo de potencias,  $Q = P * \text{Tan}(\phi)$
- Sustituyendo en la primera ecuación:  $Q_C = P * (\text{Tan}\phi_2 - \text{Tan}\phi_1)$

Por facilidad, el término  $(\text{Tan}\phi_2 - \text{Tan}\phi_1)$  se sustituye por una constante "K" la cual puede presentarse en tablas para diferentes valores del factor de potencia. **Ver anexo 5** (Factor o constante "K" que sustituye al término  $(\text{Tan}\phi_2 - \text{Tan}\phi_1)$ )

Entonces:

$$Q_C = P * K \quad (21)$$

Donde  $Q_C$  es la potencia reactiva que debe suministrar el condensador a conectar.

**4.3.3 Ahorros al mejorar el factor de potencia.** Los principales ahorros o beneficios al mejorar el factor de potencia son:

**a) Eliminación del cargo por factor de potencia.** Al compensar el factor de potencia, se evitará la penalización por concepto de reactivos ya que si el factor de potencia está por encima de 0,9 no tendrá lugar dicho cargo.

**b) Reducción de pérdidas en los cables.** La reducción de pérdidas ( $I^2R$ ) en (W), puede ser obtenida con el siguiente factor:

$$K = \left( 1 - \left( \frac{\cos\phi_1}{\cos\phi_2} \right)^2 \right) * 100 \text{ [%]} \quad (22)$$

El factor  $K$  representa la reducción de pérdidas en por ciento para un factor de potencia compensado.

**c) Disminución de la caída de tensión en cables**

$$\Delta V = I_x * (R * \cos\phi + W * L_x * \sin\phi) \quad (23)$$

Donde:

$\Delta V$  : Disminución en la caída de tensión en (V)

$L$ : Inductancia en (H)

$W$ :  $2 \pi f$

$f$  : Frecuencia en (Hz)

d) **Ahorro en consumo de energía.** El ahorro energético puede calcularse de la siguiente manera:

**1. Calcular la corriente de fase**

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \text{Cos}\phi_1} \quad (24)$$

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \text{Cos}\phi_2} \quad (25)$$

Donde:

$I_1$ : Corriente de fase en (A) con factor de potencia sin corregir

$I_2$ : Corriente de fase en (A) con factor de potencia corregido.

P: Carga eléctrica en (W)

**2. Calcular la resistencia eléctrica total en ohmios de los cables de alimentación**

$$R_T = r_{\text{Cable}} * l_{\text{Cable}} \quad (26)$$

Donde:

$R_T$ : Resistencia eléctrica total en ohms ( $\Omega$ )

$r_{\text{Cable}}$ : Resistencia del cable en ohms por metro ( $\Omega / \text{m}$ )

$l_{\text{Cable}}$ : Longitud del cable en metros (m)

**3. Calcular las pérdidas térmicas**

$$P_1 = 3 * R_T * I_1^2 \quad [\text{W}] \quad (27)$$

$$P_2 = 3 * R_T * I_2^2 \text{ [W]} \quad (28)$$

Donde:

$P_1$ : Potencia eléctrica en (W) con  $\cos \phi_1$

$P_2$ : Potencia eléctrica en (W) con  $\cos \phi_2$

$R_T$ : Resistencia eléctrica total en ( $\Omega$ )

#### 4. Calcular disminución de pérdidas térmicas ( $\Delta P$ )

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad \text{[W]} \quad (29)$$

$$\Delta P = \left( \frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) * 100 \quad \text{[%]} \quad (30)$$

Donde  $\Delta P$  es la diferencia de pérdidas térmicas al pasar de un factor de potencia 1 a un factor de potencia 2 (compensado).

#### 5. Calcular la diferencia de consumo anual de energía eléctrica (kWh/año)

$$\text{Diferencia en consumo de energía} = \frac{(P_1 - P_2) * (\text{horas / mes}) * 12}{1000} \text{ [kWh/año]} \quad (31)$$

Esta expresión presenta la diferencia en consumo de energía en kWh/año cuando se ha realizado una compensación del factor de potencia.

#### e) Liberar potencia del transformador en (kVA)

$$kVA = \sqrt{kW^2 + kVAr^2} \quad \text{[kVA]} \quad (32)$$

Donde:

kW: Potencia activa en kilovatios

kVAr: Potencia reactiva en kilovoltamperios reactivos.

La potencia liberada en el transformador mientras se mantiene la misma potencia activa, puede ser calculada así:

$$kVA = kW * \left( \frac{1}{\cos \phi_1} - \frac{1}{\cos \phi_2} \right) \quad (33)$$

Donde:

kW: Carga máxima de potencia activa

$\cos \phi_1$ : Factor de potencia inicial

$\cos \phi_2$ : Factor de potencia final o deseado

Estos ahorros permiten cuantificar el impacto técnico y económico que se logra al realizar una compensación del factor de potencia en una industria o equipo

#### **4.4 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

En este apartado se presentarán los conceptos básicos que se deben tener en cuenta para un estudio de puesta a tierra. En este campo en principio no existe oportunidad de ahorro, pero es de mención en este trabajo porque contribuye a la seguridad de los equipos y de las personas, así como a la mejora de la calidad de la energía eléctrica.

Se puede definir un sistema de puesta a tierra como el conjunto de conductores, electrodos, conectores, etc., que permiten la circulación y disipación de las corrientes a tierra, independientemente de sus orígenes.

Los propósitos para los cuales es necesario diseñar y construir un sistema de puesta a tierra son los siguientes:

1. Garantizar baja resistencia de puesta tierra.
2. Garantizar conducción a tierra de cargas estáticas o inductivas, descargas atmosféricas o corrientes de cortocircuito.
3. Garantizar niveles de potencial seguros entre las estructuras metálicas de los equipos accidentalmente energizados y la tierra propiamente dicha. Para seguridad de las personas que puedan tocar las estructuras.
4. Garantizar adecuado funcionamiento de los equipos de protección asociados a los sistemas eléctricos, para aislar rápidamente las fallas que puedan presentarse durante su operación.
5. Disipar eficientemente la energía de los diferentes tipos de eventos en los cuales debe operar.

Puede afirmarse que la esencia de un sistema de puesta a tierra es garantizar la seguridad de las personas y del sistema de potencia.

**4.4.1 Clasificación de los sistemas de puesta a tierra.** La norma IEEE en el Std 80, clasifica las redes de tierra en las siguientes clases:

**1. Puesta a tierra para protección:** Se encuentran en esta clasificación todas las conexiones llevadas a cabo para conectar eléctricamente al suelo las partes de las instalaciones eléctricas que a pesar de no encontrarse sujetas a tensión en operación normal, pueden llegar a tener diferencias de potencial a causas de fallas accidentales. Un ejemplo es el caso de las cubiertas de máquinas eléctricas, tableros eléctricos, tanques de transformadores, estructuras metálicas de subestaciones o de

líneas de transmisión, y en general, todas las partes mecánicas no sometidas a tensión de los diferentes equipos y aparatos eléctricos.

**2. Puesta a tierra para funcionamiento:** Son aquellas que establecen una conexión eléctrica entre puntos específicos del sistema eléctrico y el sistema de puesta a tierra, para mejorar el funcionamiento del mismo y para mayor seguridad o regularidad en la operación. Por ejemplo el caso de los neutros de los generadores, los devanados de los transformadores conectados en estrella, la conexión de los pararrayos, la conexión de los transformadores de potencial, la conexión de los transformadores de corriente, etc.

**3. Puesta a tierra para trabajo:** Ya se había expresado que una de las funciones de las conexiones a tierra era aterrizar las cargas inducidas y/o de estática; sucede con frecuencia que durante el desarrollo de actividades de mantenimiento, remodelaciones, reparaciones, etc., es necesario efectuar conexiones de sistemas de puesta a tierra temporalmente a partes del sistema de potencia que se encuentre fuera de servicio a fin de que sean accesibles sin peligro para los trabajos a realizarse.

**4.4.2 Componentes de un sistema de puesta a tierra.** En esta parte se describirán los componentes constitutivos de un sistema de puesta a tierra, así como las características principales que debe poseer cada uno de ellos.

- **Conductores:** Existe unanimidad en cuanto a que los conductores de una malla deben ser de cobre desnudo. Esto se fundamenta en las características del cobre como buen conductor eléctrico y a la alta resistencia a fenómenos de oxidación y corrosión generados por el suelo.

La determinación de la sección del conductor va en concordancia con la magnitud de la corriente máxima a transportar y la energía a disipar.

En la tabla 4, se presenta el calibre que deben cumplir conductores “externos” de sistemas de puesta a tierra para aterrizar equipos, de acuerdo a la norma IEEE Std 142 - 1982.

**Tabla 4.** Calibres de conductores empleados en sistemas de puesta a tierra  
(Tomado de IEEE Std 142-1982)

<b>EQUIPO</b>	<b>CALIBRE (AWG)</b>
ESTACIONES DE CONTROL Y MOTORES MENOR 5 HP	6
MOTORES DE 5HP A 25HP	6
MOTORES DE 30HP A 150HP A.C. Y D.C.	4
MOTORES MAYORES DE 50HP D.C.	1/0
MOTORES MAYORES DE 150HP A.C.	1/0
TRANSFORMADORES DE POTENCIA Y EQUIPOS	2/0
PANELES D.C Y A.C.	2/0

- **Conectores:** Los puntos de contacto entre los conductores del sistema de puesta a tierra y los electrodos, están sometidos a esfuerzos eléctricos y mecánicos muy significativos en caso de cortocircuitos o descargas atmosféricas.

Para estos casos los conectores deben obrar como amortiguadores y no fracturarse como resultado del esfuerzo. Un conector rígido, estático, no proporciona este dinamismo al sistema, lo ideal en un conector es que ayude a amortiguar los esfuerzos mecánicos y que no disminuya la conductividad en los puntos de contacto como resultado de los esfuerzos descritos.

Otras características importantes de operación en conectores instalados en sistemas de puesta a tierra son la facilidad de instalación, velocidad de instalación y sensibilidad a los agentes climáticos.

- **Varillas o electrodos:** La razón de ser de esta componente dentro de un sistema de puesta a tierra es la búsqueda de las capas interiores del suelo donde la conductividad tiende a ser mejor y menos variable que hacia la superficie.

A menor resistencia de los electrodos menor es el efecto joule, esto es, cantidad de calor desprendido, irradiado a la tierra, a causa del paso de la corriente. Se conoce que al aumentar drásticamente la temperatura de un suelo se disminuye su conductividad. Puede recomendarse entonces que desde el punto de vista de la conductividad la varilla o electrodo más conveniente es el más conductor.

**4.4.3 Problemas típicos de los sistemas de puesta a tierra.** Algunos problemas de los sistemas de puesta a tierra son topológicos y pueden ser detectados con una inspección física.

**1. Problemas con conductores y conectores.** Es común encontrar tableros con demasiados cables que impiden una correcta identificación, espaciamiento, refrigeración entre otros problemas. Este problema es particularmente común en los sistemas de cableado asociado a sistemas de computación y control, los cuales evolucionan continuamente.

Esta es la primera revisión que debe hacerse durante una inspección física.

**2. Ausencia de tierra de seguridad.** La ausencia de tierra de seguridad es una situación insegura para los operarios y equipos de un sistema eléctrico. Por otra parte, impide la operación de los interruptores ante fallas monofásicas.

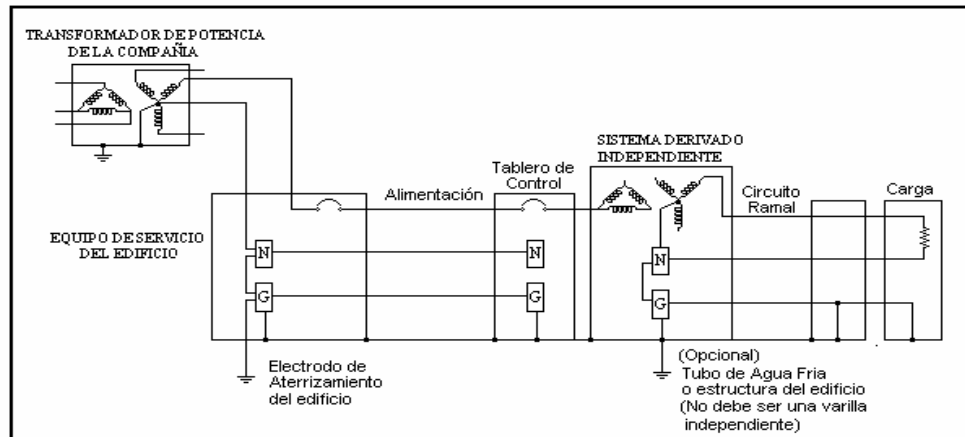
**3. Múltiples uniones neutro – tierra.** En todo sistema eléctrico, salvo en sistemas independientes, sólo debe existir una unión entre neutro y tierra, la cual debe realizarse en la subestación o el inicio del servicio. El neutro y la tierra deben estar cableados separadamente en todas las celdas y tableros de distribución, para evitar la transferencia de sobre tensiones por descargas a los neutros de baja tensión.

Uniones entre neutro y tierra aguas abajo a la del inicio, producen múltiples caminos paralelos para el retorno de la corriente de carga. Esto puede causar operaciones inadecuadas en los dispositivos de protección. Adicionalmente, y para condiciones de falla, la corriente de retorno puede dividirse entre el conductor de neutro y el de tierra, lo cual puede ocasionar igualmente una mala operación de las protecciones.

Este tipo de conexiones violan los criterios establecidos en el “National Electrical Code” (NEC).

**4. Equipos no aterrizados.** Algunas veces se emplean tierras aisladas con la percepción de obtener una tierra limpia. Reemplazar el sistema de aterrizamiento general por una tierra aislada dedicada para computadores, es peligroso, y no es conveniente para resolver problemas de ruido. El procedimiento apropiado se muestra en la Figura 6.

**Figura 6.** Configuración para un sistema derivado independiente (tomado del “NEC”)

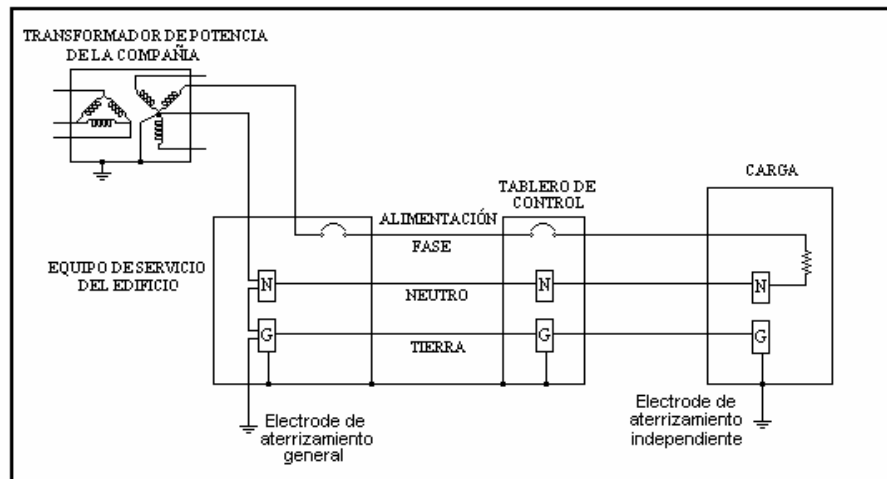


**5. Varillas adicionales de tierra.** Las varillas de tierra, por su facilidad de manejo, pueden ser parte de un sistema de aterrizamiento existente. Estas varillas adicionales se deben conectar al punto común de unión de todos los electrodos de aterrizamiento. Múltiples varillas pueden ser unidas simultáneamente a la entrada del servicio, para reducir la resistencia de puesta a tierra.

Cuando se pretende realizar una tierra derivada para un equipo especial, que pertenece al mismo sistema de potencia, se debe efectuar la conexión que se presenta en la Figura 6, a través de un transformador de aislamiento. Algunas UPS cuentan con este sistema de aislamiento.

En muchas ocasiones al tratar de conseguir el mismo objetivo, se conectan tierras independientes, como se muestra en la Figura 7.

**Figura 7.** Configuración no permitida para un sistema derivado independiente  
(tomado del “NEC”)



**6. Bucles de tierra.** Este es uno de los problemas más graves en ambientes comerciales e industriales que involucran procesamiento de datos y equipos de comunicación. Si dos dispositivos son aterrizados a través de diferentes vías y un cable de comunicaciones provee otra conexión entre los dos, se produce un bucle de tierra y una pequeña diferencia de potencial entre los dos sistemas, puede causar circulación de corrientes.

Cuando no es un camino completo, el aislamiento que previene la circulación de corriente puede fallar, debido a que los niveles de aislamiento de los circuitos de comunicación son bajos. Asimismo, pequeñas magnitudes de corriente circulante pueden causar serios problemas de ruido.

La mejor solución para estos problemas, puede ser utilizar acopladores ópticos en las líneas de comunicación, de este modo se eliminan los bucles de tierra y se provee un adecuado aislamiento para los esfuerzos de sobretensión.

Cuando esto no se hace, los conductores de tierra en el cable de señal, deben ser reforzados con otros conductores o con las pantallas.

**7. Conductor de neutro insuficiente.** La circulación de terceros armónicos debida a cargas no lineales como la luz fluorescente y las fuentes conmutadas, pueden generar corrientes de secuencia cero circulando por el neutro con una magnitud entre el 140% y el 170% de la corriente de fase.

Cuando se presenta este tipo de inconvenientes o en el momento de realizar un diseño con cargas de esta característica, se pueden plantear diferentes alternativas como son:

- Neutro por cada fase.
- Neutro del doble de capacidad de las fases.
- Transformadores de Aislamiento  $\Delta$  - Y.
- Filtros para terceros armónicos.

#### **4.5 ILUMINACIÓN**

El sistema de alumbrado ofrece un buen campo de ahorro de energía, pero su porcentaje tiende a ser pequeño comparado con el que se encuentra en otros procesos de transformación energética llevados a cabo en las industrias. El alumbrado no hace parte de la cadena productiva de las industrias, pero es una ayuda para la ejecución de las actividades llevadas a cabo en los procesos industriales, ya que sin la exigencia básica de una iluminación adecuada no se

puede llevar a cabo ninguna tarea visual de un modo correcto, rápido, seguro y fácil, por esto el sistema de alumbrado da la señal de “ahorro” o “desperdicio” a los gerentes o jefes de planta. El alumbrado se hace con el fin de mantener un adecuado nivel de iluminación pero se debe ser cuidadoso en donde haya partes móviles, de mantener un rango de frecuencia adecuado para evitar percepciones peligrosas en la visión.

En este apartado se hará una descripción de los principales aspectos concernientes al URE en la iluminación, incluyendo algunas recomendaciones que ayudan a mejorar el uso de la energía eléctrica.

**4.5.1 Eficiencia energética en la iluminación.** Son acciones que buscan una mayor eficiencia y ahorro de energía. La finalidad consiste en lograr el ahorro de energía manteniendo una calidad en el confort visual.

Para la iluminación se usan generalmente tres tipos de lámparas que son:

- **Tipo Incandescentes:** se encuentran las de tungsteno y las halógenas.
- **Tipo por luminiscencia:** se consideran así las lámparas por descarga de gas, las luminiscentes, las de arco de baja presión, las de arco de alta presión, las fluorescentes.
- **Tipo inducción:** son las lámparas de campo inducido.

Existen factores externos importantes que afectan el funcionamiento de las lámparas y es de gran beneficio considerar estos factores para conservar la vida útil de la lámpara, así como su eficiencia:

- **Temperatura Ambiente:** A temperaturas bajas se dificulta el arranque. Sin embargo hay que mantener buena ventilación para la luminaria.

- Desviaciones de tensión de red: las sobretensiones afectan la vida de la lámpara.
- Número de encendidos.

**4.5.2 Selección del nivel de iluminación.** Los requisitos cuantitativos de la iluminación varían mucho con la naturaleza de la actividad y el objetivo de la iluminación es permitir un trabajo visual de modo correcto, seguro y fácil.

En la [NTC 2050], [RETIE] y manuales como la [IES], dan recomendaciones acerca de los niveles de iluminación mínimo, promedio y máximo, dependiendo de la actividad a desarrollar. **Ver anexo 6** (niveles de iluminación recomendados por el RETIE).

**4.5.3 Selección de la luminaria adecuada.** Para la selección de la luminaria se recomienda tener en cuenta los siguientes factores:

- La fuente de luz a utilizar
- Su desempeño en la distribución del haz
- El diseño estructural de la pantalla o armazón
- Su tamaño y apariencia
- Su efectividad en la disipación de calor
- La calidad del material reflector y de los componentes: balastos, “sockets”, alambre, etc.
- El diseño y la calidad del reflector
- Las características físicas del lugar a iluminar
- El tipo de trabajo a realizar

**4.5.4 Cambio de fuente de luz más eficientes.** Al realizarse el cambio de fuente de luz por uno más eficiente, se está ayudando al ahorro de energía. El costo de

inversión inicial será alto, pero éste será compensado en poco tiempo teniendo en cuenta que el costo de operación se puede reducir hasta un 50%.

En la tabla 5 se observa el ahorro de energía que se puede lograr al instalar lámparas de mayor eficiencia.

**Tabla 5.** Ahorro en por ciento por cambio de fuente de luz por una de mayor eficiencia (Tomada de “WERGEL, R.G. Luminotecnia. Barcelona: Gustavo Gili s.a 1987. p 30”)

Cambio Actual	Mercurio	Fluorescente	Metal halide	Sodio alta presión	Sodio baja presión
Incandescente	63	71	79	82	87
Mercurio	–	23	44	51	66
Fluorescente	–	–	28	36	56
Metal halide	–	–	–	11	39
Sodio alta presión	–	–	–	–	31

A continuación se indican las principales ventajas y desventajas de los tipos de lámparas más utilizadas.

**Tabla 6.** Ventajas y desventajas de los tipos de lámparas más utilizadas. (Tomada de “MEZA, julio y VEGA, Raúl. Uso racional de la energía eléctrica en el sector metalmecánico. Bucaramanga, 1993, p. 200”)

Lámpara	Ventajas	Desventajas
Incandescente	Compacta Sin balastro	Corta vida Bajo rendimiento

	<p>Buen control óptico</p> <p>Barata</p> <p>Buena reproducción de color</p> <p>Mantiene bien su producción de lúmenes</p>	<p>Alta producción de calor radiante</p>
<p>Tungsteno halógeno Incandescente</p>	<p>Compacta</p> <p>Sin balastro</p> <p>Buena reproducción de color</p> <p>Excelente control óptico</p> <p>Vida moderada</p> <p>Mantiene en forma excelente su producción de lúmenes</p>	<p>Costosa</p> <p>Bajo rendimiento</p> <p>Produce calor radiante</p> <p>La temperatura ambiente afecta su vida promedio</p>
<p>Fluorescente</p>	<p>Barata</p> <p>Alta eficiencia</p> <p>Larga vida</p> <p>Buen mantenimiento de producción de lúmenes</p>	<p>Necesita balastro</p> <p>Control óptico limitado</p> <p>Balastros ruidosos</p>
<p>Mercurio de color mejorado</p>	<p>Larga vida</p> <p>Moderadamente eficiente</p> <p>Buen mantenimiento de producción de lúmenes</p>	<p>Arranque entre 2 y 5 minutos</p> <p>No reenciende inmediatamente</p> <p>Necesita balastro</p> <p>Balastros costosos</p>
<p>Metal halide</p>	<p>Buena eficiencia</p> <p>Buena reproducción de color</p> <p>Buen control óptico</p> <p>Vida media buena</p>	<p>El color varia de acuerdo con el fabricante</p> <p>Necesita balastro</p> <p>Lámpara y balastro costosos</p> <p>Arranque entre 2 y 10 minutos</p>
<p>Sodio</p>	<p>Excelente eficiencia</p> <p>Larga vida</p> <p>Mantiene de forma excelente su producción de lúmenes</p>	<p>Pobre reproducción de color</p> <p>Necesita balastro</p> <p>Lámpara y balastro costosas</p> <p>Arranque entre 1 y 4 minutos</p>

#### 4.5.5 Recomendaciones para URE según el tipo de alumbrado:

**a) Alumbrado industrial.** El objetivo del alumbrado industrial es producir una visibilidad suficiente contando con un mínimo número de puntos de luz, y siendo energéticamente eficiente. Es importante tener en cuenta en el análisis, tanto el nivel de iluminación y la eficiencia, como la seguridad.

- Lámparas: fluorescentes estándares para alturas inferiores a 6 metros, fluorescentes compactas para iluminación localizada.

Sodio alta presión para alturas superiores a 6 metros (si no es importante el color).

Mercurio a alta presión para alturas superiores a 6 metros.

- Luminarias: luminaria industrial abierta con reflector rotacional, con rendimiento aproximado de 80%.

**b) Alumbrado de oficinas.** Por las actividades típicas que se realizan en una oficina, se debe contar con un ambiente adecuado para las tareas visuales, buen rendimiento de color y posibilidad de regulación.

- Lámparas: fluorescentes tubulares y compactas.
- Luminarias: empotradas

**c) Alumbrado exterior:** En la iluminación vial se debe contar con un nivel de luminancia suficiente en la calzada, para lograr una conducción segura y de confort, buena eficacia lumínica, un aceptable rendimiento de color y posibilidad de regulación.

- Lámparas: sodio a baja presión (no en zonas peatonales), Sodio a alta presión, Mercurio a alta presión.
- Luminarias : luminaria con reflector abierta o cerrada

Al diseñar un sistema de iluminación, se deben tener en cuenta aspectos tales como:

### **1. Niveles de iluminación.**

Algunas veces los niveles de iluminación son demasiado elevados, tanto en áreas comunes como para áreas específicas. Estos niveles se comprueban mediante el uso de un luxómetro y se comparan con las tablas de los niveles de iluminación de la IES y de seguridad industrial.

Si el nivel de iluminación no es el mínimo requerido, se pueden utilizar reflectores de aluminio en los gabinetes buscando no incrementar la carga eléctrica.

### **2. Uso de lámparas eficientes.**

Cuando los niveles de iluminación son los adecuados, se recomienda utilizar lámparas que proporcionen el mismo nivel, pero con una menor potencia. Se aconseja esperar la terminación de la vida útil de la lámpara para hacer la sustitución. Para esto es fundamental llevar un control por área de las horas de trabajo de las lámparas, que servirá para hacer el reemplazo en grupo.

### **3. Circuitos para dos o más niveles de iluminación.**

Un problema general consiste en los sistemas de iluminación es la imposibilidad de, desenergizar ciertas lámparas que no son necesarias en determinado momento, debido a que existe un interruptor que controla a todas las lámparas originando que siempre permanezcan encendidas. Otro problema es utilizar interruptores globales cuando sólo un mínimo de personal está laborando.

En estos casos se recomienda rediseñar la instalación eléctrica con circuitos independientes, o instalar en cada luminaria un apagador de palanca o de perilla colgante.

### **4. Luz natural y redistribución de luminarias.**

Se recomienda redistribuir los circuitos de alumbrado de tal manera que las lámparas ubicadas cerca de las ventanas se puedan encender y apagar por medio de un interruptor sencillo (o mediante un control automático con fotocelda), a fin de aprovechar la luz solar. En caso de que las luminarias se encuentren en las áreas donde no se requiera iluminación directa, se recomienda reducir el número de lámparas por luminaria.

### **5. Reemplazo de bombillos incandescentes.**

El bombillo incandescente es el de más bajo rendimiento lumínico debido a que su operación está basada en el calentamiento de un filamento hasta el rojo blanco, con lo cual convierte el 95% de la energía eléctrica en calor y solo el 5% en luz visible, recomendando el cambio de estas lámparas por las de tipo fluorescente.

En lugares donde el alumbrado se utiliza por intervalos pequeños de tiempo, no se recomienda utilizar lámparas fluorescentes compactas en lugar de

incandescentes, pues el continuo encendido y apagado de la misma reduce su vida.

#### **6. Balastros conectados sin ser utilizados.**

Es común encontrar lámparas quemadas o desconectadas intencionalmente, pero unidas al balastro. Esto debe evitarse, pues el balastro sigue consumiendo energía eléctrica, del orden del 20% de la potencia de la lámpara.

Por otra parte, si un balastro está conectado a dos lámparas y una de ellas fue desconectada, la lámpara en funcionamiento reducirá su vida útil.

#### **7. Balastros de alta eficiencia.**

Los balastros son circuitos magnéticos con un consumo de aproximadamente el 20% de la potencia de la lámpara.

Existen en el mercado balastros ahorradores que consumen menos energía y permiten a la lámpara llegar a su vida nominal. Por otro lado, también están los balastros electrónicos que son los más eficientes. Los balastros ahorradores cuestan casi lo mismo que los tradicionales no siendo el caso de los electrónicos cuyo costo es superior.

#### **8. Difusores imperfectos.**

El difusor es la tapa de acrílico que se encuentra debajo de las lámparas. Su función consiste en difundir hacia los extremos la luz que sale en forma vertical.

Además reduce la brillantez sin que por ello se afecte el nivel de iluminación. Si el difusor se encuentra sucio por el polvo acumulado, o ha adquirido un color

amarillo, entonces se disminuirá el nivel de iluminación. Para evitar esto se recomienda hacer limpieza a los difusores y si no mejoran, conviene sustituirlos por otros de mayor eficiencia. Existen en el mercado difusores tipo rejilla con los que se obtienen buenos resultados.

## **9. Luminarias y reflectores.**

La luminaria es la caja de lámina en donde se alojan las lámparas y el balastro. La parte superior está cubierta con una pintura reflectante, que es necesario revisar periódicamente para asegurarse que no esté deteriorada.

Existen en el mercado reflectores de aluminio que se sobreponen a la luminaria con lo cual se logra mayor reflexión, que puede llegar hasta el 95%, por lo cual, dependiendo del estado en que se encuentre la pintura, se puede ganar entre 25% y 50% del nivel de iluminación, lo que permitirá retirar la mitad de las lámparas y ahorrarse el 50% de la energía eléctrica. Si con esta medida se perdiera iluminación, ésto se puede recuperar por otros medios, como por ejemplo, sustituyendo lámparas por otras de mayor flujo lumínico, o pintando paredes, techos y columnas, de color claro. Estos reflectores también se usan para incrementar la iluminación cuando ésta no es suficiente, evitándose la instalación de luminarias adicionales.

## **10. Altura de montaje por encima de la recomendada.**

En muchas edificaciones las lámparas se encuentran tan elevadas, que si permanecieran apagadas no se afectaría el nivel de iluminación. Esto se debe a que sólo son elementos decorativos. Si se quiere aprovecharlas también para iluminación, se recomienda reducir la altura de montaje y rediseñar el sistema para colocar menor número de luminarias.

## **11. Alumbrado de seguridad.**

Algunas áreas como estacionamiento, jardines, etc., que no necesitan nitidez de color pueden ser iluminadas con lámparas de vapor de sodio de alta o baja presión, que reducen el consumo de energía eléctrica hasta en un 65%.

## **12. Sistemas automáticos y sensores de presencia.**

El personal de seguridad y/o de mantenimiento no tendrá siempre la disponibilidad de acatar las instrucciones en el sentido de desconectar determinados circuitos a determinadas horas; por ello se recomienda instalar desde el sencillo apagador de tiempo en lugares de poco uso como pasillos, baños, etc., hasta equipos programables que conectan y desconectan circuitos según las necesidades de trabajo de forma automática.

## **4.6 URE EN TURBOMÁQUINAS HIDRÁULICAS (BOMBAS).**

La bomba hidráulica se usa para transformar la energía mecánica en hidráulica. Se emplea para elevar toda clase de líquidos como agua, aceites de lubricación, combustibles ácidos, líquidos alimenticios, cerveza, leche, etc, e incluso líquidos espesos con sólidos en suspensión, como pastas de papel, melazas, fangos, desperdicios, etc.

Un sistema de bombeo puede definirse como la adición de energía a un fluido para moverse o trasladarse de un punto a otro. Esta adición de energía al fluido, no ocurre de manera completa, debido a las pérdidas presentes en las bombas, ocasionadas por unos elementos que se encuentran en su interior que consumen parte de la energía de entrada para lograr el funcionamiento de la bomba. Las otras pérdidas se deben al sistema de tubería empleado para elevar al líquido y son ocasionadas por la fricción del líquido con las paredes de la tubería que lo componen.

Las oportunidades de URE en las bombas, se dan al operarlas en el punto de intersección entre su curva característica y la curva característica del sistema (tubería), ya que en este punto se obtiene el mayor rendimiento. Un aspecto a tener en cuenta es la altura neta positiva de succión o NPSH ya que indica el riesgo de cavitación de la bomba, caso nocivo para la operación de máximo rendimiento y para la vida útil.

En este apartado se hará una descripción de los aspectos que enmarcan un estudio de URE en bombas.

**4.6.1 Tipos de bombas.** Sin considerar las aplicaciones especiales, las bombas pueden catalogarse bajo los siguientes títulos:

1. Bombas de movimiento alternativo: aquellas en las que un émbolo o pistón es girado mecánicamente en el interior de un cilindro que contiene el líquido.
2. Bombas centrífugas: aquellas en la que se aplica presión al líquido por medio del giro de un impulsor y de la fuerza centrífuga.
3. Bombas giratorias: su funcionamiento consiste en la rotación de unos tambores que fuerzan al líquido a circular a lo largo de un cilindro llamado cuerpo de la bomba; algunas usan pistones sin la ayuda de la fuerza centrífuga.
4. Bombas de aire comprimido: por medio de estas bombas el agua se eleva por la fuerza ascendente de una columna de agua, mezclada con aire en un tubo sumergido.

Se resalta que los modernos tipos de bombas han alcanzado un alto grado de eficiencia con el desarrollo de la tecnología, pero probablemente el mayor progreso se ha logrado en lo que respecta a la vasta cantidad de operaciones

llevadas a cabo mediante la bomba centrífuga. Para un gran número de tareas la bomba centrífuga de acoplamiento directo o movida por correa, ha venido reemplazando a la bomba de movimiento alternativo, no obstante ser, la centrífuga menos eficiente.

Con todo, la bomba centrífuga presenta muchas ventajas, y entre las más importantes pueden mencionarse el poco costo, la ausencia de válvulas, lo compacta que es, el hecho de tener una base más ligera y el exigir poco gasto por funcionamiento y reparación. Por otro lado la bomba centrífuga no puede competir con la de movimiento alternativo ni con las rotativas trabajando para superar presiones altas de capacidad variable, cuando comúnmente puede ser aprovechado el calor del vapor a su salida, en las bombas de acción directa o movidas por vapor.

Los fabricantes de bombas han ideado y construido bombas para trabajos específicos, y es el especialista el mejor capacitado para satisfacer las demandas de aquellos que necesitan una bomba especial.

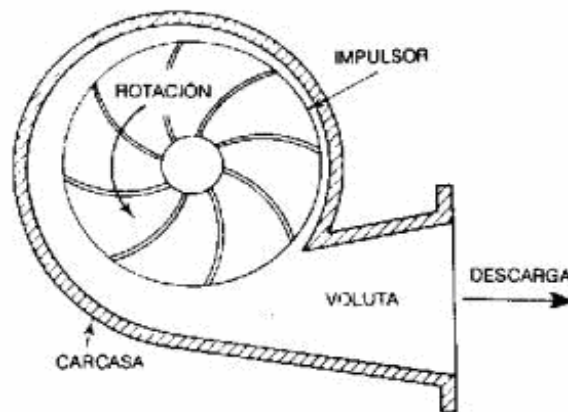
Los diversos tipos de bombas empleados en la industria, difieren considerablemente en las características. El tipo de bomba encontrado en el sistema de bombeo Bosconia es centrífuga y será tema de discusión en este proyecto para la propuesta de URE.

La estructura de las bombas centrífugas es análoga a la de las turbinas hidráulicas, salvo que el proceso energético es inverso; en las turbinas se aprovecha la altura de un salto hidráulico para generar una velocidad de rotación en la rueda, mientras que en las bombas centrífugas la velocidad comunicada por el rodete al líquido se transforma, en parte, en presión, lográndose así su desplazamiento y posterior elevación.

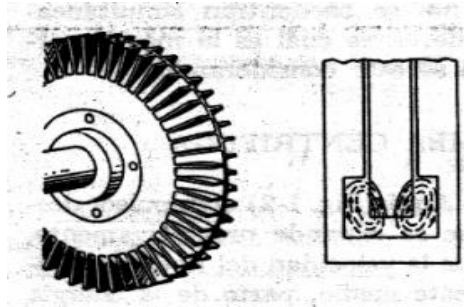
Se pueden dividir, en dos clases, bajo los títulos de bombas espiral (**ver figura 8**) y bombas turbina (**ver figura 9**). En la primera una cubierta en forma de espiral envuelve a un impulsor giratorio, mientras que en la de turbina el líquido que se eleva deja los bordes de un impulsor y pasa a las paletas de un difusor. En algunas ocasiones especiales, se adopta una combinación de los dos sistemas, pero generalmente se emplea la de espiral cuando el volumen del líquido resulta ser grande comparado con la altura de elevación y la turbina de impulsores, cuando la altura es grande comparada con el volumen.

En cualquier caso la presión se obtiene por el giro de un impulsor o rodete. El líquido que entra por el centro del impulsor, es lanzado hacia fuera por la fuerza centrífuga, y la energía cinética desarrollada es convertida en gran parte en energía de presión por el área uniformemente creciente de la caja en espiral, o por las paletas difusoras.

**Figura 8.** Bomba espiral



**Figura 9.** Bomba turbina



**4.6.2 Pérdidas en las bombas.** El beneficio del poco gasto de funcionamiento, de la bomba centrífuga moderna, puede perderse totalmente, si el sistema de tubería no está planeado de un modo adecuado. Una velocidad elevada en los tubos, significa que la bomba habrá de desarrollar más altura dinámica para poder contrarrestar la mayor resistencia friccional, resultando de esto un mayor consumo de potencia. En la instalación de una bomba se encuentran dos tipos de pérdidas:

a) Pérdidas por fricción en los tubos.

Es la fricción que ofrecen las paredes y la capa envolvente del líquido. Estas pérdidas se calculan en metros de altura del líquido.

b) Pérdidas por fricción en las juntas.

Se originan debido a la resistencia que ofrece las juntas que se disponen a lo largo de la tubería para darle unión y soporte a la estructura. Algunas pérdidas se muestran en la tabla 7.

Las pérdidas friccionales en otras partes del sistema, tales como los tubos del condensador, refrigeradores de aceite, filtros, etc. se obtienen de los fabricantes.

**Tabla 7.** Valores de la fricción en las juntas (Tomado de “comisión del agua MÉXICO, 2003”).

Válvula de compuerta del tipo sin	Equivalente a 4,57 metros de tubo
-----------------------------------	-----------------------------------

diafragma	recto
Válvula de retención del tipo sin diafragma	Equivalente a 6,10 metros de tubo recto
Válvula de pie del tipo sin diafragma	Equivalente a 6,10 metros de tubo recto
Colador	Equivalente a 12,19 metros de tubo recto
Curvas	Equivalente a 4,57 metros de tubo recto
Codos	Equivalente a 6,10 metros de tubo recto
Tes y codos pronunciados	Equivalente a 7,62 metros de tubo recto

Las pérdidas en el interior de una bomba centrífuga son de tres tipos:

**1. Pérdidas hidráulicas:** Son debidas al frotamiento continuo que el líquido encuentra al atravesar la bomba.

**2. Pérdidas volumétricas:** Son debidas a las fugas que se presentan cuando el líquido pasa a través de la bomba, son ocasionadas por diferencias de presiones, que existen entre las partes fijas y móviles de la bomba. Otras fugas importantes se dan por creación de gases o vapores y por ocupar un volumen concentrado en el interior de la bomba lo que provoca la disminución del caudal.

**3. Pérdidas mecánicas.** Se deben a los frotamientos mecánicos en las partes fijas y las partes de la bomba, como por ejemplo en pernos y cojinetes, entre pistones y cilindros, etc.

**4.6.3 Altura desarrollada por una bomba.** La altura  $h$  desarrollada por una bomba se determina midiendo la presión en la aspiración y en la salida de la bomba, calculando las velocidades mediante la división del caudal de salida entre las respectivas áreas de las secciones transversales y teniendo en cuenta la diferencia de altura entre la aspiración y la descarga. La altura neta  $h$  suministrada por la bomba al fluido es:

$$h = H_d - H_{as} = \left( \frac{P_d}{\gamma} + \frac{V_d^2}{2 * g} + Z_d \right) - \left( \frac{P_{as}}{\gamma} + \frac{V_{as}^2}{2 * g} + Z_{as} \right) \text{ [m]} \quad (34)$$

Donde los subíndices  $d$  y  $as$  se refieren a la descarga y aspiración de la bomba,  $g$  es la aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ ,  $Z$  las pérdidas por fricción en la tubería y juntas en metros,  $P$  la presión en  $N/m^2$  y  $V$  la velocidad en  $m/s$ . Si las tuberías de descarga y aspiración son del mismo tamaño, las componentes de la altura correspondiente a la velocidad se cancelan, sin embargo en general la tubería de entrada es mayor que la de salida.

**4.6.4 Rendimiento en las bombas.** Cuando un líquido fluye a través de una bomba, sólo parte de la energía comunicada por el eje del impulsor es transferida al fluido. Existe fricción en los cojinetes y juntas, no todo el líquido que atraviesa la bomba recibe de forma efectiva la acción del impulsor, y existe una pérdida de energía importante debido a la fricción del fluido. Esta pérdida tiene varias componentes, incluyendo las pérdidas por choque a la entrada del impulsor, la fricción por el paso del fluido a través del espacio existente entre las palas o álabes y las pérdidas de altura al salir el fluido del impulsor. El rendimiento de una bomba es bastante sensible a las condiciones bajo las cuales esté operando.

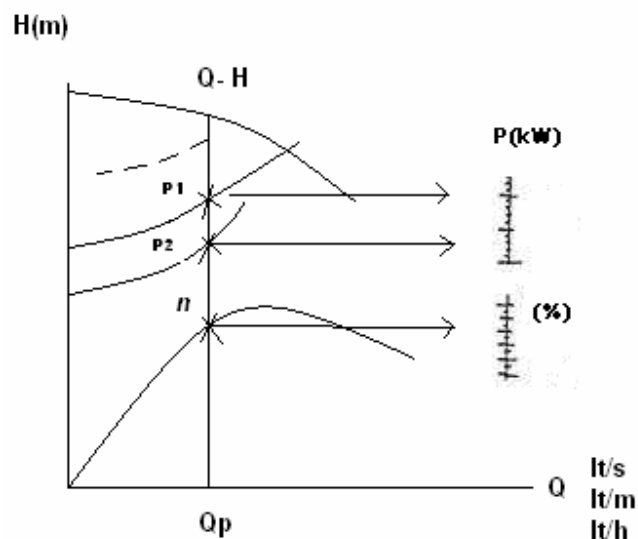
El rendimiento  $\eta$  de una bomba viene dado por:

$$\eta = \frac{\text{POTENCIA SUMINISTRADA AL FLUIDO}}{\text{POTENCIA EN EL EJE}} = \frac{\gamma * Q * h}{T * \omega} \quad (35)$$

Donde  $\gamma$  es la densidad del líquido en  $\text{kg/m}^3$ ,  $Q$  el caudal en  $\text{m}^3/\text{h}$  bombeado,  $h$  la altura desarrollada por la bomba en metros,  $T$  es el par ejercido por el motor sobre el eje de la bomba y  $\omega$  el régimen de giro del eje en  $\text{m/s}$ .

**4.6.5 Curvas características de las bombas.** Estas curvas muestran la relación entre la altura obtenida, la potencia absorbida, el rendimiento y el caudal correspondiente a velocidad constante. Se obtienen de ensayos efectivos y se planean con arreglo a las lecturas y medidas tomadas cuando el caudal varía desde cero hasta la capacidad máxima.

**Figura 10.** Curva característica de una bomba (Tomado de “COMISION NACIONAL DEL AGUA. Eficiencia en sistemas de bombeo. México. 2003. 14 p.”).



Se llama  $P_1$ , potencia consumida por una bomba a su gasto energético en la unidad de tiempo.

Se llama  $P_2$ , potencia necesaria, aquella que, para cada posición de la curva Q-H, ha de verificarse en el eje de rotación de la bomba.

Se llama  $P_3$ , potencia desarrollada o útil, aquella que se entrega para imprimir movimiento al líquido, se cuantifica a partir de la medición de (caudal y altura).

La relación  $P_2/P_1 = \rho$  se llama rendimiento del motor (entre 0,6 y 0,85) depende de características puramente eléctricas y es constante para cada modelo de bomba.

La relación entre la potencia desarrollada  $P_3$  y la necesaria  $P_2$  en cada posición de la curva Q-H se denomina "rendimiento de la bomba" y se representa por la letra  $\eta$  ( $\eta < 1$ ). En este parámetro que es función del caudal que mueve la bomba, se incluye además, la pérdida de potencia que se produce por rozamiento de los cojinetes, la viscosidad del líquido, la formación de torbellinos, las pérdidas por ranuras, etc.

Las diferentes curvas "se leen" siempre sobre la vertical  $Q_p$  a impulsar, la curva Q-H da la altura,  $P_1$  y  $P_2$  las potencias en kW y  $\eta$  el rendimiento en %.

El rendimiento  $\eta$  de la bomba es nulo para caudal cero, aumenta con el caudal hasta lograr un máximo a partir de ese valor.

La "potencia desarrollada" para cada valor de Q será:

$$P_3 = P_2 * \frac{\eta}{100} \text{ [kW]} \quad (36)$$

Con base en las curvas para una velocidad dada, es posible construir curvas semejantes, aplicando para ello las leyes relativas a las bombas centrífugas.

Estas son:

1. El volumen es directamente proporcional a la velocidad
2. La altura varía con el cuadrado de la velocidad
3. La potencia absorbida es proporcional al cubo de la velocidad

**4.6.6 Altura estática.** Es la distancia vertical medida en metros desde la aspiración hasta el nivel de agua de salida.

$$H_s = H_g + H_r \text{ [m]} \quad (37)$$

Donde  $H_g$  y  $H_r$  son la altura de impulsión y aspiración, respectivamente.

**4.6.7 Altura dinámica.** Es la altura total en el sistema y se calcula como la suma de la altura estática y todas las pérdidas por fricción, expresadas en metros de altura de líquido. Se determina así:

$$H_p = H_g + H_r + \frac{P_i}{\gamma} - \frac{P_s}{\gamma} + H_{fi} + H_{fs} + \frac{V_i^2}{2 * g} - \frac{V_s^2}{2 * g} \text{ [m]} \quad (38)$$

Donde:

$P_i$  = presión en la impulsión

$P_s$  = presión en la succión

$V_i$  = velocidad en la impulsión

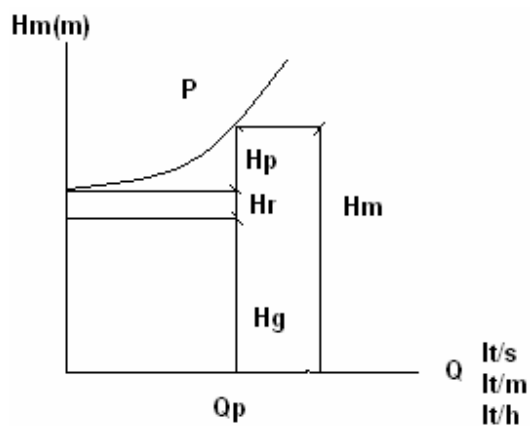
$V_s$  = velocidad en la succión

$H_{fi}$  = pérdidas de impulsión

$H_{fs}$  = pérdidas de succión

**4.6.8 Curva de los sistemas de bombeo.** Esta curva muestra la altura de bombeo requerida con respecto al caudal  $Q$ . En este caso, la bomba está suministrando líquido a través de un sistema de tuberías con una altura estática  $H_s$ . La altura que la bomba debe desarrollar es igual a la elevación estática más la pérdida total de carga en el sistema de tuberías (altura estática mas altura dinámica).

**Figura 11.** Curva del sistema (Tomado de “COMISION NACIONAL DEL AGUA. Eficiencia en sistemas de bombeo. México. 2003. 14 p.”)

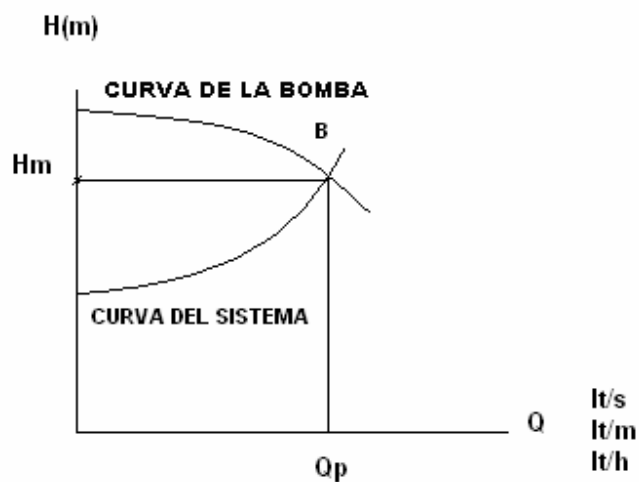


Siendo  $H_m$  la altura a desarrollar por la bomba,  $Q_p$  el caudal a bombear por el sistema y  $P$  el punto de funcionamiento.

**4.6.9 Punto de funcionamiento de una bomba.** La manera en la que una bomba trabaja depende no sólo de las características de funcionamiento de la bomba, sino también de las características del sistema en el cual vaya a trabajar.

Para el caso de una bomba dada, en la figura 12 se muestra la característica de funcionamiento de la bomba ( $h$  respecto a  $Q$ ) para una velocidad de operación dada, normalmente cercana a la velocidad que da el rendimiento máximo. También se muestra la curva característica del sistema (es decir, la altura de bombeo requerida respecto a  $Q$ ). La altura de funcionamiento de la bomba real y el caudal se determina por la intersección de las dos curvas.

**Figura 12.** Punto de funcionamiento de las bombas (Tomado de “COMISION NACIONAL DEL AGUA. Eficiencia en sistemas de bombeo. México. 2003. 14 p.”)



La bomba será la adecuada para cubrir las demandas de la instalación (caudal  $Q_p$  y altura  $H_m$ ) cuando la curva de la bomba "cubra" el punto B de la curva de la instalación. Si la curva de la bomba intercepta a la curva del sistema en cualquier punto diferente al B, la bomba no será la adecuada para cubrir las demandas de la instalación y debe intentarse con otra curva para una nueva bomba.

Los valores específicos de Hm y Qp determinados por esta intersección pueden ser o no los de máximo rendimiento. Si no lo son, significa que la bomba no es la adecuada para esas condiciones específicas.

Las curvas altura-caudal para las bombas centrífugas son sustancialmente planas, con tendencia a que el rendimiento máximo se sitúe inmediatamente después de la capacidad media.

**4.6.10 Fenómeno de cavitación en las Bombas.** Un factor importante para el funcionamiento satisfactorio de una bomba es evitar la cavitación, tanto para obtener un buen rendimiento como para evitar daños en el impulsor. Cuando un líquido pasa por el impulsor de una bomba, se produce un cambio de presión. Si la presión absoluta de un líquido cae por debajo de la presión de vapor, se producirá cavitación. Las zonas de vaporización obstruyen el flujo limitando la capacidad de la bomba.

Cuando el fluido avanza a una zona de mayor presión, las burbujas colapsan y su implosión puede producir un picado del impulsor. La cavitación suele producirse con más frecuencia cerca de la salida (periferia) de los impulsores de flujo radial y mixto, donde se alcanzan las velocidades mayores. También puede aparecer en la aspiración del impulsor, donde las presiones son menores. Para las bombas se define el parámetro de cavitación como

$$\sigma = \frac{\frac{(P_{as})_{abs}}{\gamma} + \frac{V_{as}^2}{2g} - \frac{P_b}{\gamma}}{h} = \frac{NPSH}{h} \quad (39)$$

Donde:

$P_{as}$  = Presión en la aspiración

$P_b$  = Presión de elevación

$V_{as}$  = velocidad en la aspiración

$\gamma$  = Densidad del agua

NPSH = Cabeza neta positiva de succión

h= altura de bombeo

Para evitar que se produzca cavitación, la bomba debe funcionar de manera que  $\sigma$  sea mayor que el parámetro de cavitación crítico ( $\sigma_c$ ). Esto puede conseguirse seleccionando el tipo, tamaño de bomba y la velocidad de funcionamiento adecuados, y situando la bomba en el punto y a la elevación correcta dentro del sistema.

$\sigma$  tenderá a ser pequeño (por lo que existirá la posibilidad de cavitación) en las siguientes situaciones: a) grandes alturas de bombeo; b) presión atmosférica; c) cuando la bomba se encuentra a una elevación relativamente grande comparada con la elevación de la superficie del agua del depósito; d) valores grandes de presión de vapor, es decir, altas temperaturas y bombeo de líquidos muy volátiles como gasolina.

La cavitación ocurre cuando la presión absoluta dentro de un impulsor cae por debajo de la presión del vapor del líquido y se forman burbujas de vapor. Estos se contraen mas adelante en los álabes del impulsor cuando llegan a una región de dispersión más alta.

La cavitación de la bomba se nota cuando hay uno o más de las siguientes señales: ruido, vibración, caída en la curva de capacidad de carga y eficiencia, con el paso del tiempo, por los daños en el impulsor por picaduras y erosión.

## **5.0 APLICACIÓN AL SISTEMA DE BOMBEO DE LA PLANTA BOSCONIA DEL AMB S.A E.S.P**

Usando el análisis termoeconómico se procederá, a realizar una auditoria exergética al sistema de bombeo Bosconia del AMB S.A E.S.P con el fin de identificar las irreversibilidades en el sistema y sus causas para realizar una propuesta de URE.

### **5.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO BOSCONIA**

La planta Bosconia del AMB S.A E.S.P se alimenta de un circuito de la empresa electrificadora de Santander a un nivel de tensión de 115 kV mediante una red aérea que llega al barraje principal ubicado en la subestación Bosconia.

La línea de 115 kV proveniente de la Subestación Palos se conecta a un transformador de 16 MVA, el cual tiene una relación de transformación de 115/4,16 kV. En el barraje de 4,16 kV se encuentra conectado el sistema de bombeo, conformado por cuatro unidades, cada una de ellas con los siguientes elementos:

1. Autotransformador
2. Motor de inducción
3. Bomba centrífuga

El autotransformador se usa para arrancar el motor a tensión reducida y permanece conectado al barraje de 4,16 kV por un tiempo de 18 segundos, tiempo en el cual se desconecta de manera automática y se conecta el motor a tensión de 4,16 kV, quedando el siguiente esquema de operación:

### **MOTOR DE INDUCCIÓN - BOMBA CENTRÍFUGA**

El sistema de bombeo cumple con la función de transportar agua potable desde la planta de tratamiento (Bosconia), ubicada en el kilómetro 8 vía al corregimiento de Matanza (Santander) hasta dos puntos estratégicos para su distribución llamados tanque del “estadio” y tanque de “morrórico” ubicados en la parte nororiente y en el perímetro del estadio departamental Alfonso López (costado oriente del barrio morrórico de la ciudad de Bucaramanga) por medio de una tubería de acero laminado de diámetro un metro.

Para el bombeo se tienen cuatro unidades motor-bomba (unidad 1, unidad 2, unidad 3, unidad 4), la unidad 3 no se tuvo en cuenta para los análisis por encontrarse fuera de servicio. Se conecta sólo una unidad, alternándose su uso diario así: unidad 1 - unidad 2 - unidad 4 -unidad 1. Siendo muy ocasional el funcionamiento de dos o más unidades al tiempo, lo cual sucede, cuando se requiere hacer un refuerzo. Este refuerzo consiste en llevar más agua a los tanques “estadio” o “morrórico” como consecuencia del aumento en la demanda de agua. Esto se hace operando dos unidades al tiempo y no se incluyó para el estudio, por ser una condición de operación no habitual.

Al transformador de potencia se le llamará transformador principal, para diferenciarlo de otro transformador conectado al barraje de 4,16 kV que suministra energía a las secciones de la planta de tratamiento y servicios auxiliares. A este transformador se le llamará transformador de servicios auxiliares.

El flujo de exergía suministrado por el transformador principal para el transformador de servicios auxiliares no se tendrá en cuenta para el estudio en este proyecto por que no es comparable con el flujo de energía en el sistema de bombeo y no hace parte de los objetivos de este trabajo.

**5.1.1 Inventario del sistema de bombeo.** El inventario de los elementos se hizo a manera de ficha técnica, con los datos de placa :

<b>DATOS DE PLACA</b>
<b>TRANSFORMADOR DE POTENCIA DEL BOMBEO BOSCONIA</b>

**Nota: Las cuatro unidades motor-bomba son iguales y aquí se citan los datos de sólo una de ellas.**

Marca: PAUWELS TRAFO, BELGIUM

Potencia nominal: 12/16 MVA

Relación:

- Tensiones :

Alta tensión: 115000 V

Baja tensión: 4160, +2,5, -5% V

- Corrientes :

Alta tensión: 60.2 / 80.3 A

Baja tensión: 1665 / 2221 A

Taps:

Posición 1: 4368 V 1586/2115 A

Posición 2: 4324 V 1625 / 2167 A

Posición 3: 4160 1664 / 2220 A

Posición 4: 4056 V 1709 / 2278 A

Posición 5: 3952 V 1754 / 2338 A

Ajuste de tensión:

Lado de baja tensión: cambiador de tomas en vacío sin carga y sin tensión:

Sacem tipo KLD 305

Grupo vector: DYn 5

Carga admisible del punto neutro: carga nominal

Frecuencia: 60 Hz

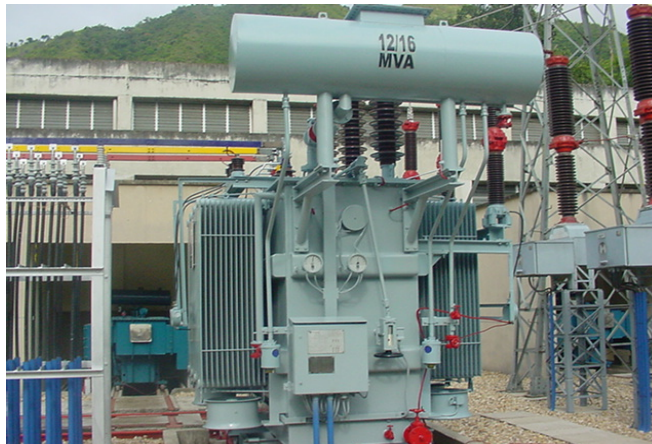
Elevación de temperatura del aceite: 60 grados centígrados

Perdidas en vacío  $P_o = 16$  kW

Perdidas bajo carga = 100 kW

Tensión de corto circuito (impedancia / UK) 10%

Sistema de enfriamiento ONAN / ONAF



<b>DATOS DE PLACA</b>
-----------------------

<b>MOTORES BOMBEO BOSCONIA</b>
--------------------------------

Marca: ABB (ASEA BROWN BOVERI)

Tipo QWG 630 Kb-4

Potencia nominal: 3780 kW (5000 HP)

Tensión nominal = 4160 V+/- 5 % y 10% sin carga.

Frecuencia: 60 Hz+/- 2%

Aislamiento del estator: clase F

Normas ANSI

Material: micador compact (R)

Máxima temperatura del estator: 80 grados centígrados

Corriente nominal: 597 A

Torque nominal: 2045 Kg

Carga	115 %	100 %	90 %	80 %	70 %
Factor de potencia	0,9	0,91	0,91	0,91	0,9
Eficiencia (%)	96,6	96,7	96,7	96,6	96,5

Torque de arranque 52,8 % Tn

Corriente de arranque..... 28 % con autotransformador

570 % In

300 % con autotransformador

Máximo torque 190 % Tn

Velocidad 1790 rpm

Velocidad máxima permitida 2150 rpm

Características mecánicas:

Clase de protección IP44

Forma de construcción B3 (IM 1001)

Lubricación forzada

Tipo de aceite 150 VA 32/46

Capacidad de aceite en el cojinete 7 litros / minuto

Presión 0,3 kg. / cm<sup>2</sup>

Refrigerado aire forzado (intercambiador)

Momento de inercia 408 kg. por metro cuadrado

Características de arranque:

Por motor 81 kg.\*m

Tiempo de arranque hasta la velocidad nominal	6,6 s
Arranques máximos permisibles	2
Intervalo en caliente	60 minutos -150 minutos



<b>DATOS DE PLACA</b>
-----------------------

<b>BOMBAS BOSCONIA</b>
------------------------

Marca: CCM SULZER

Tipo: HPDM-35-555-3D725

Código: BOBM-D1

Numero de serie: 5958 Y

Potencia: 3013 KW

Altura: 394 m

Velocidad angular: 1788 RPM

Caudal: 662 L/S

Accesorios:

- Bomba lubricación 1:

Marca G Martin; ICB3040L20; No. 20697923

- Bomba lubricación 2:

Marca G Martin; ICB3040L20; No. 20697919

- Bomba lubricación 3:

Marca G Martin; ICB3040L20; No. 20697924

- Motor eléctrico 1:

- Potencia: 1,1kW
- Tensión: 255/440V
- Corriente: 4,3/2,3A
- Velocidad angular 1750 rpm
- Frecuencia: 60Hz.

- Motor eléctrico 2 :

- Potencia: 1,1 kW
- Tensión: 255/440 V
- Corriente: 4,3/2,3 A
- Velocidad angular 1750 rpm
- Frecuencia: 60Hz.

- Motor eléctrico 3 :

- Potencia: 1,1kW
- Tensión: 125 V

- Corriente: 9,8 A
- Velocidad angular 1800 rpm
- Frecuencia: 60Hz.

Tanque de aceite:

Marca: G Martin; Tipo E.T.7294; No. 1191



## **5.2 METODOLOGÍA PARA UN ESTUDIO DE URE EN EL SISTEMA DE BOMBEO DE LA PLANTA BOSCONIA DEL AMB S.A E.S.P**

Para el estudio de URE en el sistema de bombeo de la planta Bosconia del AMB S.A E.S.P se hará una auditoria exergética, esto significa:

- Obtener el esquema de producción del sistema del bombeo Bosconia (diagrama causal).
- Desagregar el sistema de bombeo Bosconia en 5 elementos así:  
Transformadores - conductores eléctricos de alimentación - motor de inducción - bomba centrífuga - tubería, para desglosar la irreversibilidad o ineficiencia del sistema por equipos o causas.
- Identificar los flujos de exergía a la entrada y salida para cada elemento del sistema.
- Identificar las pérdidas energéticas del sistema que más impactan los costos.
- Asociar estas pérdidas a los procedimientos y a la tecnología.
- Calcular el costo exergético de los flujos de entrada y salida en los elementos que forman el sistema y llevarlos a valor económico.
- Evaluar técnica y económicamente los potenciales de reducción de las pérdidas relativas a la tecnología si es el caso.

El objetivo final es proponer la disposición de algunos elementos del sistema para minimizar las pérdidas, y hacer de la energía un uso racional.

Los pasos a seguir son:

## **1. Diagnosticar el sistema de bombeo:**

Para realizar el diagnóstico se utiliza el informe de medidas suministrado por el personal de bombeo. Estas medidas son realizadas con los equipos instalados en el sistema de bombeo Bosconia del AMB S.A E.S.P:

Las variables medidas son: tensión, corriente y factor de potencia en el transformador principal y motores. En las bombas se mide caudal y altura de impulsión.

## **2. Evaluar el sistema de bombeo:**

El proceso de evaluación se lleva a cabo de la siguiente manera:

*1. Simular en POWER WORLD el sistema eléctrico del bombeo Bosconia, con el fin de cuantificar las variables tensión, corriente, potencia activa y reactiva en cada uno de los elementos del sistema para condiciones nominales. Realizar lista de chequeo.*

Con los valores de tensión, corriente, potencia activa y reactiva encontrados con la simulación se calculan los flujos de exergía esperados o teóricos en cada uno de los elementos. La exergía a la entrada y a la salida de la bomba, se calcula utilizando las variables velocidad del motor, porcentaje de carga del motor, caudal y altura de elevación de la bomba esperadas para las diferentes condiciones de bombeo.

*2. Comparar la eficiencia exergética medida con la eficiencia exergética esperada (teórica).*

### 3. Hacer análisis Termoeconómico:

El análisis termoeconómico se realiza de la siguiente manera:

#### 1. Calcular los costos exergéticos

- Identificar el sistema considerándolo como una entidad compleja compuesta por un conjunto de componentes relacionados entre sí y con su entorno.
- Definir el nivel de agregación para desglosar el sistema como una colección de equipos en los cuales sus flujos de entrada y salida se pueden determinar.
- Calcular: rendimiento ( $n$ ), consumo ( $k$ ) y costo exergético  $B^*$  (mx1).
- Construir por inspección la matriz de incidencia  $[A]$ (nxm).
- Construir las matrices  $[H]$ (mx1) y  $[B]$ (mx1) de energía y exergía respectivamente para cada uno de los flujos del sistema.
- Verificar que:

$$[A](nxm) * [H] (mx1) = 0, [A] (nxm) * [B] (mx1) = [I] (nx1)$$

Donde  $[I]$ (nx1) es un vector que contiene la exergía destruida en cada componente.

- Construir las matrices  $[Af]$ (nxm) y  $[Ap]$ (nxm) de incidencia de los flujos de entrada (insumo) y salida (producto) respectivamente de cada elemento.
- Verificar que:

$$[Af] - [Ap] = [A]$$

$$[Af] * [B] = [F] \text{ (nx1)}$$

$$[Ap] * [B] = [P] \text{ (nx1)}$$

Donde F y P son vectores que contienen la exergía de cada insumo y producto.

- Calcular el costo exergético de cada insumo y producto:

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

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

Siendo F\* y P\* vectores de (nx1) que contienen el costo exergético de cada flujo de insumo y producto de c/u de los elementos.

- Calcular el costo exergético unitario de insumo y producto para cada elemento así:

$$Kf, i^* = \frac{Fi^*}{Fi}$$

$$Kp, i^* = \frac{Pi^*}{Pi}$$

Donde el subíndice i denota el número asignado al flujo ya sea insumo o producto

*2. Analizar la eficiencia exergética y su incidencia en las diferencias encontradas entre la exergía medida y la exergía esperada, de cada uno de los elementos en que se desagregó el proceso de bombeo.*

*3. Hacer la valoración económica, de los costos exergéticos del sistema*

#### **4. Plantear propuestas para URE**

### **5.3 AUDITORÍA EXERGÉTICA**

Se llevo a cabo la auditoria exergética, siguiendo los pasos descritos en la metodología encontrando los siguientes resultados:

#### **1. Diagnóstico:**

El diagnóstico se hizo a partir de un censado de la exergía y de las variables que la generan, en cada uno de los elementos, utilizando los equipos de monitorización existentes en el sistema de bombeo Bosconia

Para el proceso de medición se desagregó el sistema de bombeo en cinco elementos de la siguiente manera:

#### **TRANSFORMADOR PRINCIPAL-CONDUCTORES ELECTRICOS DE ALIMENTACION-MOTOR-BOMBA-TUBERÍA**

Con el fin de determinar el flujo de energía y exergía en cada uno de los elementos que lo componen obteniéndose los siguientes resultados:

1. Transformador principal

Unidad 1:

- Bombeo al tanque “estadio “

Tiempo de operación:13,66 h

VARIABLE	TENSIÓN (kV)	CORRIENTE (A)	FACTOR DE POTENCIA	POTENCIA ACTIVA P (MW)	POTENCIA REACTIVA (MVAr)	EXERGÍA (MW-h) $\int P^* dt$
PUNTO DE MEDICIÓN						
<b>BARRAJE DE 115 Kv</b>	115,4	ia=18,5 ib=18,83 ic=16,85	0,9	3,39	1,6	45,75
<b>BARRAJE DE 4,16 kV</b>	4,17	ia=511,53 ib=520,76 ic=466,07	0,91	3,31	1,5	45,23

- Bombeo al tanque “morrórico”

Tiempo de operación:4,416 h

VARIABLE	TENSIÓN (kV)	CORRIENTE (A)	FACTOR DE POTENCIA	POTENCIA ACTIVA P (MW)	POTENCIA REACTIVA (MVAr)	EXERGÍA (MW-h) $\int P^* dt$
PUNTO DE MEDICIÓN						
<b>BARRAJE DE 115 kv</b>	118,5	ia=18,24 ib=18,52 ic=16,52	0,9	3,38	1,63	14,81

<b>BARRAJE DE 4,16 kv</b>	4,2	ia=504,25 ib=512,25 ic=456,75	0,91	3,3142	2,27	14,64
---------------------------	-----	-------------------------------------	------	--------	------	-------

Unidad 2:

- Bombeo al tanque “estadio”

Tiempo de operación:15,25 h

VARIABLE	TENSIÓN (kV)	CORRIENTE (A)	FACTOR DE POTENCIA	POTENCIA ACTIVA P (MW)	POTENCIA REACTIVA (MVar)	EXERGÍA (MW-h) $\int P^* dt$
PUNTO DE MEDICIÓN						
<b>BARRAJE DE 115 kv</b>	111,55	ia=18,01 ib=18,37 ic=16,49	0,9	3,26	1,57	48,81
<b>BARRAJE DE 4,16 kv</b>	4,03	ia=498,06 ib=508,06 ic=456,06	0,91	3,16393	1,43	48,25

- Bombeo al tanque “morrórico”

Tiempo de operación:3,25 h

VARIABLE	TENSIÓN (kV)	CORRIENTE (A)	FACTOR DE POTENCIA	POTENCIA ACTIVA P(MW)	POTENCIA REACTIVA (MVar)	EXERGÍA (MW-h) $\int P^* dt$
PUNTO DE MEDICIÓN						

<b>BARRAJE DE 115 kV</b>	114,17	ia=17,59 ib=18,24 ic=16,25	0,9	3,25	1,57	10,44
<b>BARRAJE DE 4,16 kV</b>	4,13	ia=486,33 ib=504,33 ic=449,33	0,91	3,175	1,44	10,3195

Unidad 4:

- Bombeo al tanque “estadio”

Tiempo de operación:14,083 h

VARIABLE	TENSIÓN (kV)	CORRIENTE (A)	FACTOR DE POTENCIA	POTENCIA ACTIVA P(MW)	POTENCIA REACTIVA (MVar)	EXERGÍA (MW-h) $\int P^* dt$
PUNTO DE MEDICIÓN						
<b>BARRAJE DE 115 kV</b>	113,93	ia=19,8 ib=19,6 ic=17,32	0,9	3,49	1,69	48,43
<b>BARRAJE DE 4,16 kV</b>	4,12	ia=547,57 ib=543,07 ic=479	0,91	3,4	1,54	47,91

- Bombeo al tanque “morrórico”

Tiempo de operación:2,66 h

VARIABLE	TENSIÓN (kV)	CORRIENTE (A)	FACTOR DE POTENCIA	POTENCIA ACTIVA P (MW)	POTENCIA REACTIVA (MVar)	EXERGÍA (MW-h) $\int P^* dt$
PUNTO DE MEDICIÓN						

<b>BARRAJE DE 115 kV</b>	118,17	ia=19,15 ib=19,24 ic=16,53	0,9	3,45	1,64	9,03
<b>BARRAJE DE 4,16 kV</b>	4,27	ia=529,5 ib=532 ic=457	0,91	3,35	1,54	8,93

La exergía a la salida del transformador para cada situación de bombeo, corresponde a la exergía de entrada, en los conductores de alimentación que parten del barraje de 4,16 kV y llegan a los motores.

## 2. Motores de bombeo

- Bombeo al tanque “estadio”

<b>ELEMENTO</b>	<b>MOTOR</b>	<b>MOTOR 2</b>	<b>MOTOR 4</b>
<b>VARIABLE</b>	<b>1</b>		
TIEMPO DE BOMBEO (h)	13,66	15,25	14,08
TENSIÓN (Kv)	4,13	4,03	4,12
CORRIENTE (A)	ia=511,53 ib=520,76 ic=466,07	ia=498,06 ib=508,06 ic=456,06	ia=547,57 ib=543,07 ic=479
POTENCIA ACTIVA P(MW)	3,30	3,163	3,39
POTENCIA REACTIVA (MVar)	1,45	1,36	1,5
FACTOR DE POTENCIA	0,91	0,91	0,91
EXERGÍA A LA ENTRADA DEL MOTOR (MW-h) $\int P^* dt$	45,19	48,23	47,87

### Bombeo al tanque “morrórico”

ELEMENTO	MOTOR	MOTOR 2	MOTOR 4
VARIABLE	1		
TIEMPO DE BOMBEO (h)	4,41	3,25	2,66
TENSIÓN (kV)	4,26	4,13	4,12
CORRIENTE (A)	ia=504,25 ib=512,25 ic=456,75	ia=486,33 ib=504,33 ic=449,33	ia=529,5 ib=532 ic=457
POTENCIA ACTIVA P (MW)	3,31	3,174	3,35
POTENCIA REACTIVA (MVar)	1,50	1,40	1,5
FACTOR DE POTENCIA	0,90	0,91	0,91
EXERGÍA A LA ENTRADA DEL MOTOR (MW-h) $\int P * dt$	14,63	10,3165	8,92

Los datos de exergía a la entrada del motor, corresponden también, a la exergía de salida en los conductores de alimentación que llegan al motor, provenientes del barraje de 4,16 kV.

De acuerdo a [IEC, rotating electrical machines] se estima la velocidad de giro del motor en un 95% de la velocidad nominal por cuanto las desviaciones de tensión en el motor son menores al 5%. La velocidad de giro estimada es de 1700 RMP.

De la característica para motores de inducción en [NEMA, 1980] se estima el porcentaje de carga así:

F.P	0,9	0,91	0,915	0,92
PORCENTAJE DE CARGA DE LA POTENCIA NOMINAL	70	80	90	100

Con los siguientes resultados:

- Bombeo al tanque “estadio”

Unidad 1:

$$P_m = 3954 \text{ [HP]}$$

Al convertir este valor a MW se obtiene:

$$P_m = 2,9107 \text{ [MW]}$$

$$T = 13,66 \text{ [h]}$$

$$E_{sm} = 2,9107 \text{ MW} \times 13,66 \text{ h} = 39,76 \text{ [MW-h]}$$

Donde:

$P_m$  = Potencia mecánica en el eje del motor

$T$  = Tiempo de operación

$E_{sm}$  = Exergía a la salida del motor

Unidad 2:

$$P_m = 3991 \text{ [HP]}$$

$$P_m = 2,9379 \text{ [MW]}$$

$$T = 15,25 \text{ [h]}$$

$$E_{sm} = 44,8035 \text{ [MW-h]}$$

Unidad 4:

$$P_m = 4086,95 \text{ [HP]}$$

$$P_m = 3,008 \text{ [MW]}$$

$$T = 14,083 \text{ [h]}$$

$$E_{sm} = 42,3626 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque “morrórico”

Unidad 1:

$$P_m = 3813,31 \text{ [HP]}$$

$$P_m = 2,8066 \text{ [MW]}$$

$$T = 4,416 \text{ [h]}$$

$$E_{sm} = 12,3942 \text{ [MW-h]}$$

Unidad 2:

$$P_m = 3813,31 \text{ [HP]}$$

$$P_m = 2,8066 \text{ [MW]}$$

$$T = 3,25 \text{ [h]}$$

$$E_{sm} = 9,1216 \text{ [MW-h]}$$

Unidad 4:

$$P_m = 3967,11 \text{ [HP]}$$

$$P_m = 2,9118 \text{ [MW]}$$

$$T = 2,66 \text{ [h]}$$

$$E_{sm} = 7,76 \text{ [h]}$$

### 3. Bombas

ELEMENTO	BOMBA 1	BOMBA 2	BOMBA 4
<b>VARIABLE MEDIDA</b>			
TIEMPO DE OPERACIÓN (h)	18,083	18,5	16,75
CAUDAL DE BOMBEO A "ESTADIO" (lt/s)	685	700	729
TIEMPO DE OPERACIÓN A "ESTADIO" (h)	13,66	15,25	14,083
CAUDAL DE BOMBEO A "MORRORICO" (lt/s)	630	630	690
TIEMPO DE OPERACIÓN A "MORRORICO" (h)	4,416	3,25	2,66

Con las medidas de caudal, altura de elevación y tiempo de operación se determinó la potencia mecánica y la exergía a la salida de las bombas (exergía de entrada a la tubería) para cada condición de trabajo de la siguiente manera:

**Bomba 1:**

- Bombeo al tanque “estadio”

**Potencia mecánica a la salida de la bomba (PH):**

$$PH = \frac{Q*H}{75} = \frac{685 * 349}{75} = 3187,53 \quad [HP]$$

Donde Q es el caudal de bombeo en lt/s y H la altura total en m.

Al convertir este valor a MW se obtiene:

$$PH = 3187,53HP * \frac{0,000746 MW}{HP} = 2,3460 \quad [MW]$$

**Exergía a la salida de la bomba (E<sub>sb</sub>):**

$$E_{sb} = PH * T = 2,3460 MW * 13,66 h = 32,0463 \quad [MW-h]$$

Donde T es el tiempo de operación de la bomba.

- Bombeo al tanque “morrórico”

**Potencia mecánica a la salida de la bomba:**

$$PH = \frac{Q*H}{75} = \frac{630 * 379,31}{75} = 3186,204 \quad [HP]$$

Al convertir este valor a MW se tiene:

$$PH = 3186,204HP * \frac{0,000746 MW}{HP} = 2,3450 \quad [MW]$$

**Exergía a la salida de la bomba:**

$$E_{sb} = PH * T = 2,3450 \text{ MW} \times 4,416 \text{ h} = 10,3555 \text{ [MW-h]}$$

Siguiendo el procedimiento descrito para el cálculo de potencia y exergía en la bomba 1, se obtuvieron los siguientes resultados para las unidades 2 y 4.

**Bomba 2:**

- Bombeo al tanque “estadio”

**Potencia mecánica a la salida de la bomba:**

$$PH = 3258,45 \text{ [HP]}$$

Al convertir este valor a MW se obtiene:

$$PH = 2,3982 \text{ [MW]}$$

**Exergía a la salida de la bomba:**

$$E_{sb} = 36,57 \text{ MW-h}$$

- Bombeo a tanque “morrórico”

**Potencia mecánica a la salida de la bomba:**

$$PH = 3186,20 \text{ [HP]}$$

Al convertir este valor a MW se obtiene:

$$PH = 2,3450 \text{ [MW]}$$

**Exergía a la salida de la bomba:**

$$E_{sb} = 7,6212 \text{ [MW-h]}$$

**Bomba 4:**

- Bombeo al tanque “estadio”

**Potencia mecánica a la salida de la bomba:**

$$PH = 3396,65 \text{ [HP]}$$

Al pasar este valor a MW se obtiene:

$$PH = 2,5 \text{ [MW]}$$

**Exergía a la salida de la bomba:**

$$E_{sb} = 35,20 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque “morrónico”

**Potencia mecánica a la salida de la bomba:**

$$PH = 3495,44 \text{ [HP]}$$

Al convertir este valor a MW se obtiene:

$$PH = 2,5726 \text{ [MW]}$$

**Exergía a la salida de la bomba:**

$$E_{sb} = 6,8431 \text{ [MW-h]}$$

4. Tubería (sistema)

Para cada condición de bombeo el agua a la salida de la tubería tiene una energía de flujo; para determinar la energía disponible en este punto se emplea la ecuación de disponibilidad de flujo [Dugan, 1980], así:

$$y_1 = \left( h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g * z_1 - T_o * s_1 \right) - (h_0 + g * z_0 - T_o * s_0) \quad \left[ \frac{m^2}{s^2} \right]$$

Junto con la siguiente información:

ELEMENTO	BOMBA 1	BOMBA 2	BOMBA 4
<b>VARIABLE MEDIDA</b>			
TIEMPO DE OPERACIÓN (h)	18,083	18,5	16,75
CAUDAL DE BOMBEO A "ESTADIO" (lt/s)	685	700	729
TIEMPO DE OPERACIÓN A "ESTADIO" (h)	13,66	15,25	14,083
CAUDAL DE BOMBEO A "MORRORICO" (lt/s)	630	630	690
TIEMPO DE OPERACIÓN A "MORRORICO" (h)	4,416	3,25	2,66

Donde:

$y_1$ : Disponibilidad de energía de flujo a la salida de la tubería

$V_1$ : Velocidad del agua a la salida de la tubería

$g$ : Aceleración de la gravedad

$Z_1$ : La cota de altura hasta la salida de la tubería (para el tanque estadio es de 345,2 m y para morrorico de 376,14)

$Z_0$ : Cota de referencia=nivel de la bomba

$S_1$ : Entropía del agua la salida de la tubería

$S_0$ : Entropía del agua a la salida de la tubería para temperatura ambiente y presión atmosférica

$T_0$ : Temperatura ambiente

$h_1$ : Entalpía del agua a la salida de la bomba

$h_0$ : Entalpía del agua a la salida de la bomba para temperatura ambiente y presión atmosférica

Todas expresadas en el sistema internacional de unidades (SI).

***Para el caso en estudio la temperatura corresponde a la temperatura ambiente y la presión a la atmosférica.***

En estas condiciones se tiene que la disponibilidad de flujo a la salida de la tubería es:

$$y_1 = \left( \frac{v_1^2}{2} + g * z_1 \right) \quad \left[ \frac{m^2}{s^2} \right]$$

**Bomba 1:**

- Bombeo al tanque “estadio”

$$v_1 = \frac{Q}{0,785 * D^2} \quad [m/s]$$

Siendo Q el caudal por la tubería en m<sup>3</sup>/s y D el diámetro de la tubería en m.

$$v_1 = \frac{0,685}{0,785 * 1^2} = 0,8726 \quad [m/s]$$

Al reemplazar en la ecuación para y<sub>1</sub> se tiene:

$$y_1 = 3383,34 \left[ \frac{m^2}{s^2} \right]$$

Como 1kJ/kg = 1000\*m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>

Entonces:

$$y_1 = 3,3833 \quad [kJ/kg]$$

Para determinar la potencia disponible en kW a la salida de la tubería se procede a determinar la rata de cambio de masa de agua que sale de la tubería así:

$$m \cdot = \frac{Q}{V} \quad [Kg/s]$$

$$y_{1p} = y_1 * m \cdot$$

Donde Q es el caudal en m<sup>3</sup>/s que se transporta por la tubería, V el volumen específico del agua para la temperatura ambiente y presión atmosférica y y<sub>1p</sub> la potencia disponible a la salida de la tubería.

Se tiene entonces:

$$\dot{m} = 685 \quad [\text{Kg/s}]$$

$$y_{1p} = 2317,56 \quad [\text{kJ/s}]$$

$$\text{Como } 1\text{kJ/s} = 1 \quad [\text{kW}]$$

$$y_{1p} = 2317,56 \quad [\text{kW}]$$

$$y_{1p} = 2,3175 \quad [\text{MW}]$$

La energía disponible o exergía a la salida de la tubería ( $E_{st}$ ) es :

$$E_{st} = 2,3175 \text{ MW} * 13,66 \text{ h}$$

$$E_{st} = 31,65 \quad [\text{MW-h}]$$

Realizando el mismo procedimiento para cuando el bombeo es al tanque "morrórico" se obtienen los siguientes resultados:

- Bombeo al tanque "morrórico"

$$V = 0,8025 \quad [\text{m/s}]$$

$$y_1 = 3,6864 \quad [\text{kJ/kg}]$$

$$\dot{m} = 630 \quad [\text{kg/s}]$$

$$y_{1p} = 2322,49 \quad [\text{kJ/s}]$$

$$y_{1p} = 2322,49 \quad [\text{kW}]$$

$$y_{1p} = 2,3224 \quad [\text{MW}]$$

La exergía disponible a la salida es:

$$E_{st} = 2,3224 \text{ MW} * 4,416 \text{ h}$$

$$E_{st} = 10,256 \quad [\text{MW-h}]$$

Siguiendo el procedimiento descrito para el cálculo de la exergía cuando opera la bomba 1, se obtuvieron los siguientes resultados para las bombas 2 y 4.

### **Bomba 2:**

- Bombeo al tanque “estadio”

$E_{st} = 36,1165$  [MW-h]

- Bombeo a tanque “morrórico”

$E_{st} = 7,5478$  [MW-h]

### **Bomba 4:**

- Bombeo al tanque “estadio”

$E_{st} = 34,4554$  [MW-h]

- Bombeo al tanque “morrórico”

$E_{st} = 6,7659$  [MW-h]

Estas medidas muestran que la potencia demandada a la entrada del transformador por unidad esta entre:

- Tanque “estadio” : 3,26 - 3,49 MW
- Tanque “morrórico” : 3,25 – 3,45 MW

y el tiempo de operación para las unidades de bombeo no es el mismo, lo que indica que cuando se realice el análisis de costos exergéticos tenga que recalcularse los costos exergéticos para un tiempo promedio de operación determinados a partir del análisis termoeconómico.

## **2. Evaluación:**

Se hará una comparación entre los flujos de exergía calculados a partir de las variables medidas con los esperados, utilizando para esto, el diagnóstico del

sistema y la simulación en POWER WORLD. Aplicar la lista de chequeo. **Ver anexo 7** (Resultado de la lista de chequeo)

*1. Simulación en POWER WORLD del sistema eléctrico del bombeo Bosconia.*

La simulación del sistema de bombeo se hizo para una condición de carga impuesta por la bomba. Esta carga se determinó a partir de su curva característica, teniendo como dato de entrada el caudal y como dato de salida la altura de elevación, potencia a suministrar por el motor en el eje y rendimiento de la bomba así:

$$\text{Altura} = -0,000000258 * Q^3 + 457,3372 \text{ [m]}, Q \text{ en It/s}$$

$$\text{Potencia} = -0,001108 * Q^2 + 3,3488 * Q + 1136,642 \text{ [kW]}, Q \text{ en It/s}$$

$$\text{Rendimiento} = -0,000186 * Q^2 + 0,2491 * Q + 4,3235 \text{ [%]}, Q \text{ en It/s}$$

1. Para el tanque “estadio”

Altura : 350 m

Caudal: 746,5 It/s

Potencia requerida en el eje de la bomba: 3,019 MW

Rendimiento: 86,6 %

2. Para el tanque “morrórico”

Altura: 380 m

Caudal: 669,2 It/s

Potencia requerida en el eje de la bomba: 2,88 MW

Rendimiento: 87,7%

Con el dato de potencia en el eje del motor (% de carga), se determina su factor de potencia y eficiencia de placa como se muestra en la tabla 8.

**Tabla 8.** Cargabilidad del motor

Carga (%)	115	100	90	80	70
Factor de potencia	0,9	0,91	0,91	0,91	0,9
Eficiencia (%)	96,6	96,7	96,7	96,6	96,5

Obteniéndose los siguientes datos de funcionamiento teórico o ideal, pues no son resultado de una medición en sitio:

**Condición 1:** bombeo hacia el tanque “estadio”

Porcentaje de carga del motor: 79,86 %

Factor de potencia del motor: 0,91

Eficiencia del motor: 96,6

Potencia activa consumida por el motor: 3,125 MW

Potencia reactiva consumida por el motor: 1,4 MVAR

**Condición 2:** bombeo hacia el tanque “morrórico”

Porcentaje de carga del motor: 76,22 %

Factor de potencia del motor: 0,91

Eficiencia del motor: 96,6

Potencia activa consumida por el motor: 2,98 MW

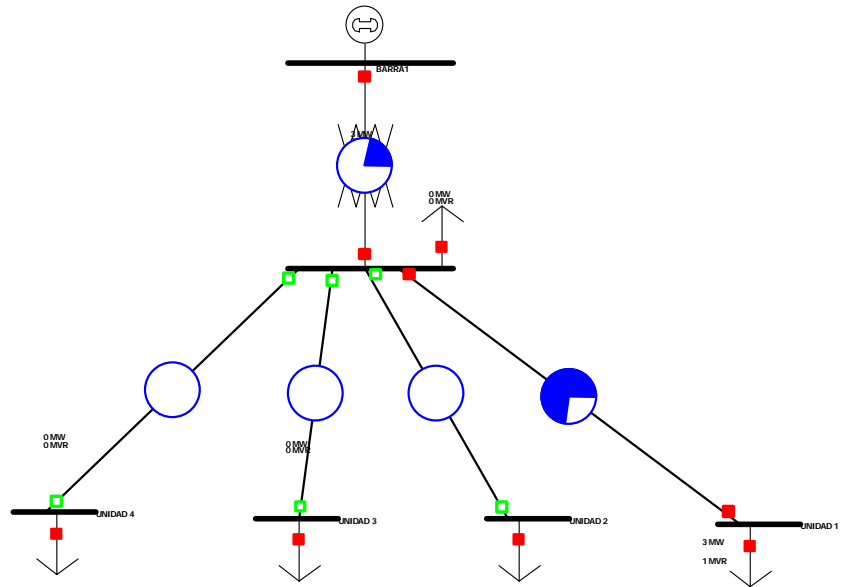
Potencia reactiva consumida por el motor: 1,35 MVAR

Determinada la condición de carga de los motores, se utiliza el dato de potencia activa y reactiva consumida para modelar el motor como una carga de potencia constante y así simular el sistema eléctrico (transformador principal - conductores eléctricos - motores) en POWER WORLD obteniendo los siguientes resultados:

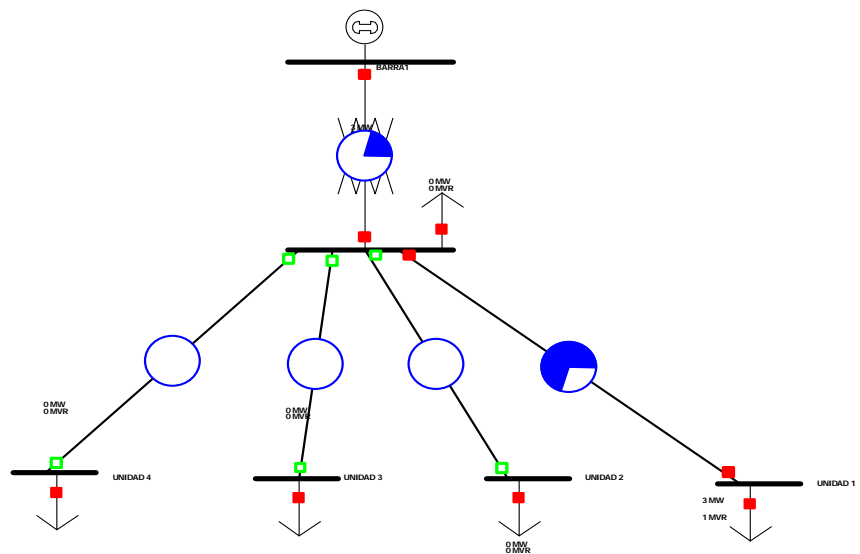
*Esquema del sistema de bombeo Bosconia simulado*

**Unidad 1:**

*Bombeo hacia el tanque “estadio”*

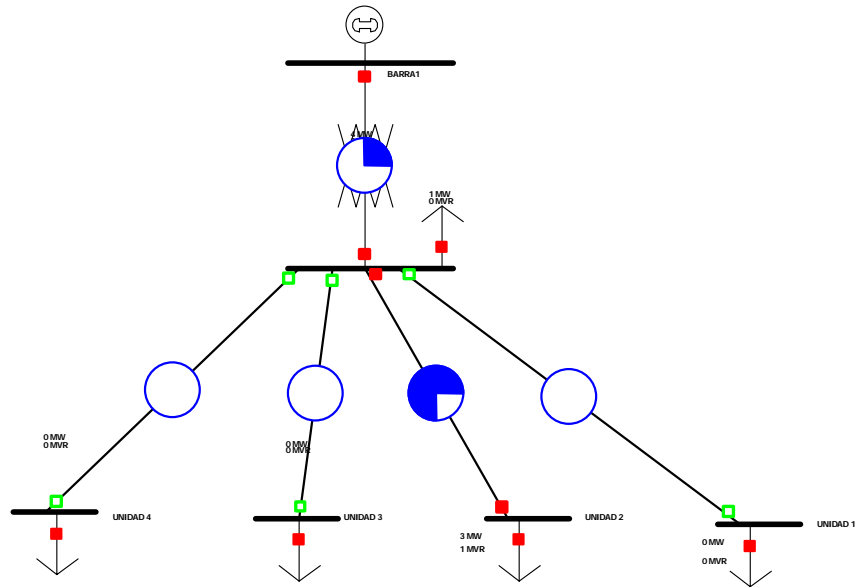


*Bombeo hacia el tanque “morrórico”*

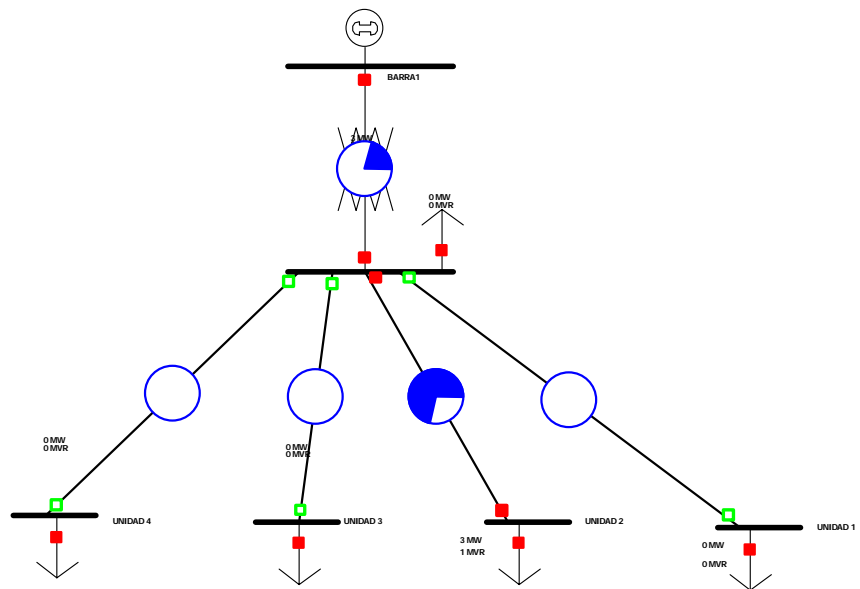


**Unidad 2:**

*Bombeo hacia el tanque "estadio"*

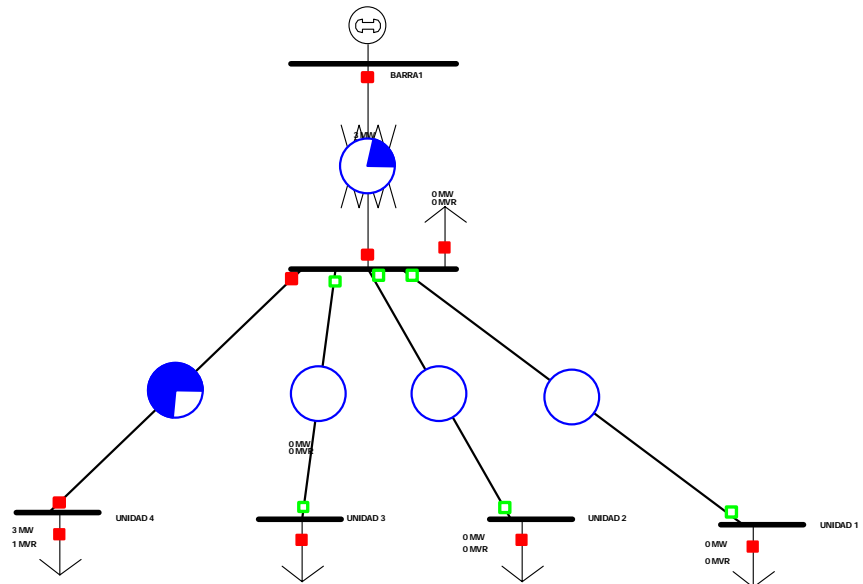


*Bombeo hacia el tanque "morrórico"*

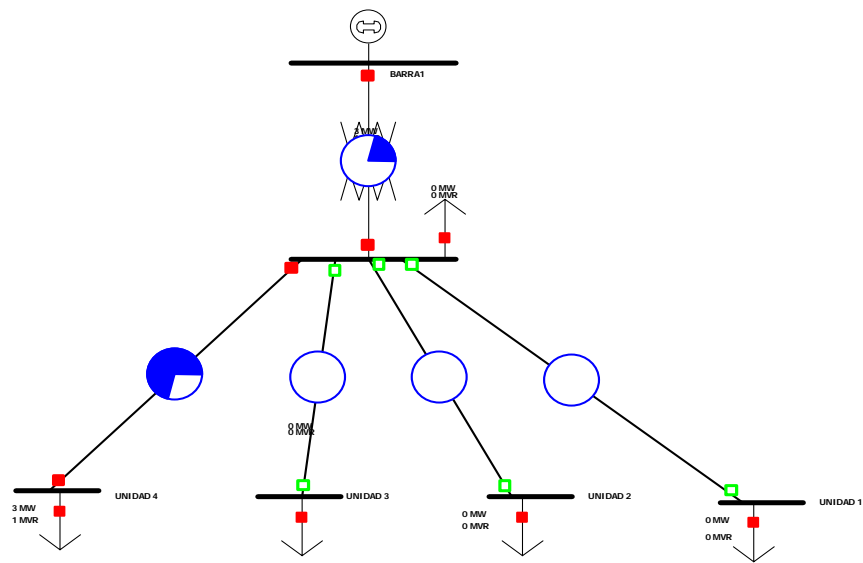


**Unidad 4:**

*Bombeo hacia el tanque “estadio”*



*Bombeo hacia el tanque “morrórico”*



**Unidad 1:**

Bombeo al tanque "estadio"

<b>ELEMENTOS</b>	<b>TRANSFORMADOR PRINCIPAL</b>	<b>MOTOR DE INDUCCION</b>
<b>VALORES</b>		
<b>TENSIÓN EN EL PRIMARIO (kV)</b>	115	_____
<b>TENSIÓN EN EL SECUNDARIO (kV)</b>	4,16	_____
<b>TENSIÓN EN EL MOTOR ( kV)</b>	_____	4,15
<b>POTENCIA ACTIVA DEL MOTOR (MW)</b>	_____	3,1
<b>POTENCIA REACTIVA DEL MOTOR (MVA<sub>r</sub>)</b>	_____	1,4

<b>FACTOR DE POTENCIA EN EL MOTOR</b>	_____	0,91
<b>CORRIENTE (A)</b>	17,5	472,9

Bombeo al tanque "morrórico"

<b>ELEMENTOS</b>	<b>TRANSFORMADOR PRINCIPAL</b>	<b>MOTOR DE INDUCCION</b>
<b>VALORES</b>		
<b>TENSIÓN EN EL PRIMARIO (kV)</b>	115	_____
<b>TENSIÓN EN EL SECUNDARIO (kV)</b>	4,16	_____
<b>TENSIÓN EN EL MOTOR ( kV)</b>	_____	4,15
<b>POTENCIA ACTIVA DEL MOTOR (MW)</b>	_____	2,98
<b>POTENCIA REACTIVA DEL MOTOR (MVar)</b>	_____	1,35
<b>FACTOR DE POTENCIA EN EL MOTOR</b>	_____	0,91
<b>CORRIENTE (A)</b>	16,8	455,2

**Unidad 2:**

Bombeo al tanque "estadio"

<b>ELEMENTOS</b>	<b>TRANSFORMADOR PRINCIPAL</b>	<b>MOTOR DE INDUCCION</b>
<b>VALORES</b>		
<b>TENSIÓN EN EL PRIMARIO (kV)</b>	115	_____
<b>TENSIÓN EN EL SECUNDARIO (kV)</b>	4,12	_____
<b>TENSIÓN EN EL MOTOR ( kV)</b>	_____	4,11
<b>POTENCIA ACTIVA DEL MOTOR (MW)</b>	_____	3,1
<b>POTENCIA REACTIVA DEL MOTOR (MVar)</b>	_____	1,4
<b>FACTOR DE POTENCIA EN EL MOTOR</b>	_____	0,91
<b>CORRIENTE (A)</b>	17,3	472,5

Bombeo al tanque “morrórico”

ELEMENTOS	TRANSFORMADOR PRINCIPAL	MOTOR DE INDUCCION
VALORES		
TENSIÓN EN EL PRIMARIO (kV)	115	_____
TENSIÓN EN EL SECUNDARIO (kV)	4,12	_____
TENSIÓN EN EL MOTOR ( kV)	_____	4,11
POTENCIA REACTIVA DEL MOTOR (MVA <sub>r</sub> )	_____	1,35
FACTOR DE POTENCIA EN EL MOTOR	_____	0,91
CORRIENTE (A)	16,9	459,3

**Unidad 4:**

Bombeo al tanque “estadio”

ELEMENTOS	TRANSFORMADOR PRINCIPAL	MOTOR DE INDUCCION
VALORES		
TENSIÓN EN EL PRIMARIO (kV)	115	_____

<b>TENSIÓN EN EL SECUNDARIO (kV)</b>	4,12	_____
<b>TENSIÓN EN EL MOTOR ( kV)</b>	_____	4,11
<b>POTENCIA ACTIVA DEL MOTOR (MW)</b>	_____	3,1
<b>POTENCIA REACTIVA DEL MOTOR (MVA<sub>r</sub>)</b>	_____	1,4
<b>FACTOR DE POTENCIA EN EL MOTOR</b>	_____	0,91
<b>CORRIENTE (A)</b>	17,7	482,1

Bombeo al tanque “morrórico”

<b>ELEMENTOS</b>	<b>TRANSFORMADOR PRINCIPAL</b>	<b>MOTOR DE INDUCCION</b>
<b>VALORES</b>		
<b>TENSIÓN EN EL PRIMARIO (kV)</b>	115	_____
<b>TENSIÓN EN EL SECUNDARIO (kV)</b>	4,12	_____
<b>TENSIÓN EN EL MOTOR ( kV)</b>	_____	4,11

<b>POTENCIA ACTIVA DEL MOTOR (MW)</b>	_____	2,98
<b>POTENCIA REACTIVA DEL MOTOR (MVar)</b>	_____	1,35
<b>FACTOR DE POTENCIA EN EL MOTOR</b>	_____	0,91
<b>CORRIENTE (A)</b>	17,1	464,7

Con los valores de tensión, corriente y factor de potencia encontrados a partir de la simulación se calculan los flujos de exergía esperados en el transformador, y a partir de las condiciones nominales en los demás elementos así:

1. Transformador principal:

$$P_i = \text{potencia de entrada} = \sqrt{3} * V_{LP} * I_{LP} * FP_P \text{ [MW]}$$

$$T = \text{tiempo [h]}$$

$$E_i = \text{exergía de entrada} = P_i * \text{tiempo [MW-h]}$$

$$P_s = \text{Potencia de salida} = \sqrt{3} * V_{LS} * I_{LS} * FP_S \text{ [MW]}$$

$$E_s = \text{Exergía de salida} = P_s * T \text{ [MW-h]}$$

Donde:

$$V_{LP} = \text{Tensión de línea en el primario en kV}$$

$$I_{LP} = \text{Corriente en el primario en kA}$$

$$V_{LS} = \text{Tensión de línea en el secundario en kV}$$

$I_{LS}$  = Corriente de línea en el secundario en kA

$FP_P$  : Factor de potencia en el primario =0,9

$FP_S$  : Factor de potencia en el secundario = 0,91

Unidad 1:

- Bombeo al tanque “estadio”

$T = 13,66$  [h]

$P_i = \sqrt{3} * V_L * I_L * FP = \sqrt{3} * 115 * 0,0175 * 0,9 = 3,14$  [MW]

$E_i = P_i * T = 3,14 * 13,66 = 42,85$  [MW-h]

$P_s = \sqrt{3} * V_{LS} * I_{LS} * FP_S = \sqrt{3} * 4,16 * 0,4729 * 0,91 = 3,1$  [MW]

$E_s = P_s * T = 3,1 * 13,66 = 42,35$ [MW-h]

- Bombeo al tanque “morrórico”

$T = 4,416$  [h]

$P_i = \sqrt{3} * V_L * I_L * FP = \sqrt{3} * 115 * 0,0168 * 0,9 = 3,01$  [MW]

$E_i = P_i * T = 3,01 * 4,416 = 13,29$  [MW-h]

$P_s = \sqrt{3} * V_{LS} * I_{LS} * FP_S = \sqrt{3} * 4,16 * 0,4552 * 0,91 = 2,98$  [MW]

$E_s = P_s * T = 2,98 * 4,416 = 13,1$  [MW-h]

Siguiendo el procedimiento de cálculo anteriormente mostrado, se obtuvieron los siguientes resultados para las unidades 2 y 4.

Unidad 2:

- Bombeo al tanque “estadio”

$T = 15,25$  [h]

$P_i = 3,101$  [MW]

$$E_i = 47,295 \text{ [MW-h]}$$

$$P_s = 3,068 \text{ [MW]}$$

$$E_s = 46,791 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque "morrórico"

$$T = 3,25 \text{ [h]}$$

$$P_i = 3,02 \text{ [MW]}$$

$$E_i = 9,84 \text{ [MW-h]}$$

$$P_s = 3,01 \text{ [MW]}$$

$$E_s = 9,78 \text{ [MW-h]}$$

Unidad 4:

- Bombeo al tanque "estadio"

$$T = 14,083 \text{ [h]}$$

$$P_i = 3,17 \text{ [MW]}$$

$$E_i = 44,68 \text{ [MW-h]}$$

$$P_s = 3,06 \text{ [MW]}$$

$$E_s = 44,5 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque "morrórico"

$$T = 2,66 \text{ [h]}$$

$$P_i = 3,06 \text{ [MW]}$$

$$E_i = 8,15 \text{ [MW-h]}$$

$$P_s = 3,04 \text{ [MW]}$$

$$E_s = 8,10 \text{ [MW-h]}$$

2. Conductores eléctricos de alimentación:

La exergía de entrada y salida en los conductores eléctricos de alimentación corresponde a la exergía de salida del transformador principal y a la exergía de entrada al motor que se encuentre operando, respectivamente.

### 3. Motores:

Utilizando la tabla 8 se encontró que los motores demandan una potencia eléctrica de 3,1 MW cuando la dirección de bombeo es al tanque “estadio” y de 2,98 MW cuando es al tanque “morrórico”. La potencia mecánica de salida en cada una de las direcciones de bombeo es de 3,019 MW y 2,88 MW, respectivamente.

Con los datos de potencia anteriormente señalados, se calcula la exergía de entrada ( $E_i$ ) y salida ( $E_s$ ), así:

Motor 1:

- Bombeo al tanque “estadio”

$$T = 13,66 \text{ [h]}$$

$$E_i = P_i * T = 3,1 \text{ MW} * 13,66 \text{ h} = 42,3 \text{ [MW-h]}$$

$$E_s = P_s * T = 3,019 \text{ MW} * 13,66 \text{ h} = 41,2 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque “morrórico”

$$T = 4,416 \text{ [h]}$$

$$E_i = P_i * T = 2,98 \text{ MW} * 4,416 \text{ h} = 13,15 \text{ [MW-h]}$$

$$E_s = P_s * T = 2,88 \text{ MW} * 4,416 \text{ h} = 12,7 \text{ [MW-h]}$$

Para el motor 2 y 4 se obtuvieron los siguientes resultados:

Motor 2:

- Bombeo al tanque “estadio”

$$T = 15,25 \text{ [h]}$$

$$E_i = 47,27 \text{ [MW-h]}$$

$$E_s = 46,03 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque “morrórico”

$$T = 3,25 \text{ [h]}$$

$$E_i = 9,68 \text{ [MW-h]}$$

$$E_s = 9,36 \text{ [MW-h]}$$

Motor 4:

- Bombeo al tanque “estadio”

$$T = 14,083 \text{ [h]}$$

$$E_i = 43,65 \text{ [MW-h]}$$

$$E_s = 42,5 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque “morrórico”

$$T = 2,66 \text{ [h]}$$

$$E_i = 7,92 \text{ [MW-h]}$$

$$E_s = 7,66 \text{ [MW-h]}$$

4. Bombas:

Con la curva característica de la bomba y la del sistema se calculan el rendimiento y la potencia requerida en el eje de la bomba para la altura de intercepto entre las dos curvas. Este intercepto se busca para un caudal a transportar hacia el tanque “estadio” de 746,5 lt/s y 669,2 lt/s hacia el tanque “morrórico”. Esto se presenta

para una altura de 350 m cuando el bombeo se hace para el tanque “estadio” y 380 m cuando se hace para el tanque “morrórico”, así:

$$H_b = -0,000000258 * Q^3 + 457,3372 \text{ [m]}, Q \text{ en lt/s}$$

$$P_{ib} = -0,001108 * Q^2 + 3,3488 * Q + 1136,642 \text{ [KW]}, Q \text{ en lt/s}$$

$$n = -0,000186 * Q^2 + 0,2491 * Q + 4,3235 \text{ [%]}, Q \text{ en lt/s}$$

$$H_1 = 345,2 + 0,0000086 * Q^2 \text{ [m]}$$

$$H_2 = 376,14 + 0,0000086 * Q^2 \text{ [m]}$$

Donde Q es el caudal a llevar hacia cada tanque,  $H_b$  es la altura de elevación de la bomba,  $P_{ib}$  la potencia de entrada suministrada por el motor, n el rendimiento de la bomba,  $H_1$  la altura dinámica del sistema hacia el tanque “estadio” y  $H_2$  la altura dinámica hacia el tanque “morrórico” obteniendo los siguientes valores:

- Bombeo al tanque “estadio”

$$H_1 = 350 \text{ [m]}$$

$$Q = 746,5 \text{ [lt/s]}$$

$$P_{ib} = 3,019 \text{ [MW]}$$

$$n = 86,6 \text{ %}$$

Llamaremos  $P_{sb}$  a la potencia a la salida de la bomba

$$P_{sb} = 2,61 \text{ [MW]}$$

- Bombeo al tanque “morrórico”

$$H_2 = 380 \text{ [m]}$$

$$Q = 669,2 \text{ [lt/s]}$$

$$P_{ib} = 2,88 \text{ [MW]}$$

$$n = 87,7 \%$$

$$P_{sb} = 2,52 \text{ [MW]}$$

A continuación se procede a calcular el flujo de exergía en las bombas para cada condición y tiempo de operación donde:

$E_{ib}$  = Exergía a la entrada de la bomba

$E_{sb}$  = Exergía a la salida de la bomba (exergía de entrada a la tubería)

Bomba 1:

- Bombeo al tanque “estadio”

$$T = 13,66 \text{ [h]}$$

$$E_{ib} = P_{ib} * T = 3,019 \text{ MW} * 13,66 \text{ h} = 41,22 \text{ [MW-h]}$$

$$E_{sb} = P_{sb} * T = 2,61 \text{ MW} * 13,66 \text{ h} = 35,65 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque “morrórico”

$$T = 4,416 \text{ h}$$

$$E_{ib} = P_{ib} * T = 2,88 \text{ MW} * 4,416 \text{ h} = 12,7 \text{ [MW-h]}$$

$$E_{sb} = P_{sb} * T = 2,52 \text{ MW} * 4,416 \text{ h} = 11,1 \text{ [MW-h]}$$

Bomba 2:

- Bombeo al tanque “estadio”

$$T = 15,25 \text{ [h]}$$

$$E_{ib} = 46,03 \text{ [MW-h]}$$

$$E_{sb} = 39,8 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque “morrórico”

$$T = 3,25 \text{ [h]}$$

$$E_{ib} = 9,36 \text{ [MW-h]}$$

$$E_{sb} = 8,19 \text{ [MW-h]}$$

Bomba 4:

- Bombeo al tanque "estadio"

$$T = 14,083 \text{ [h]}$$

$$E_{ib} = 42,51 \text{ [MW-h]}$$

$$E_{sb} = 36,7 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque "morrónico"

$$T = 2,66 \text{ [h]}$$

$$E_{ib} = 7,66 \text{ [MW-h]}$$

$$E_{sb} = 6,7 \text{ [MW-h]}$$

## 5. Tubería

Con los datos de caudal y altura teóricos se determinó el flujo de exergía esperado en el agua a la salida de la tubería de la manera en que se describió en el diagnóstico de la tubería anteriormente.

- Bombeo al tanque "estadio"

$$y_{1p} = 2,5257 \text{ [MW]}$$

- Bombeo al tanque "morrónico"

$$y_{1p} = 2,4670 \text{ [MW]}$$

Unidad 1:

- Bombeo al tanque “estadio”

$$E_{st} = 2,5257 \text{ MW} * 13,66 \text{ h} = 34,50 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque “morrórico”

$$E_{st} = 2,4670 \text{ MW} * 4,416 \text{ h} = 10,89 \text{ [MW-h]}$$

Unidad 2:

- Bombeo al tanque “estadio”

$$E_{st} = 2,5257 \text{ MW} * 15,25 \text{ h} = 38,51 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque “morrórico”

$$E_{st} = 2,4670 \text{ MW} * 3,25 \text{ h} = 8,017 \text{ [MW-h]}$$

Unidad 4:

- Bombeo al tanque “estadio”

$$E_{st} = 2,5257 \text{ MW} * 14,083 \text{ h} = 35,56 \text{ [MW-h]}$$

- Bombeo al tanque “morrórico”

$$E_{st} = 2,4670 \text{ MW} * 2,66 \text{ h} = 6,5622 \text{ [MW-h]}$$

*2. Comparación entre el rendimiento exergético medido con el teórico.*

A continuación se lista el rendimiento exerético de los flujos de exergía, con el fin de mostrar la desviación de la operación real del sistema en condiciones nominales, con respecto a la esperada (teórica).

### Unidad 1

#### Bombeo al tanque “estadio”

FLUJO (MW-h)	EXERGÍA MEDIDA		EXERGÍA TEÓRICA		RENDIMIENTO EXERGÉTICO $n = \frac{SALIDA}{ENTRADA}$	
	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	MEDIDO	TEORICO
TRANSFORMADOR	45,75	45,23	42,85	42,35	0,9	0,98
CONDUCTOR	45,23	45,19	42,35	42,3	0,989	0,99
MOTOR	45,19	39,76	42,3	41,2	0,884	0,98
BOMBA	39,76	32,04	41,2	35,65	0,81	0,86
TUBERÍA	32,04	31,65	35,65	34,50	0,97	0,97

#### Bombeo al tanque “morrórico”

FLUJO (MW-h)	EXERGÍA MEDIDA		EXERGÍA TEÓRICA		RENDIMIENTO EXERGÉTICO $n = \frac{SALIDA}{ENTRADA}$	
	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	MEDIDO	TEORICO
TRANSFORMADOR	14,81	14,64	13,29	13,15	0,98	0,989
CONDUCTOR	14,64	14,63	13,15	13,1	0,99	0,99

MOTOR	14,63	12,39	13,1	12,7	0,846	0,97
BOMBA	12,39	10,35	12,7	11,1	0,842	0,874
TUBERÍA	10,35	10,25	11,1	10,89	0,98	0,98

## Unidad 2

### Bombeo al tanque “estadio”

FLUJO (MW-h)	EXERGÍA MEDIDA		EXERGÍA TEÓRICA		RENDIMIENTO EXERGÉTICO $n = \frac{SALIDA}{ENTRADA}$	
	ELEMENTOS	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	MEDIDO
TRANSFORMADOR	48,81	48,25	47,295	46,791	0,988	0,989
CONDUCTOR	48,25	48,23	48,03	47,27	0,99	0,99
MOTOR	48,23	44,80	47,27	46,03	0,93	0,98
BOMBA	44,80	36,57	46,03	39,8	0,82	0,86
TUBERÍA	36,57	36,11	39,8	38,5	0,98	0,98

### Bombeo al tanque “morrórico”

FLUJO (MW-h)	EXERGÍA MEDIDA		EXERGÍA TEÓRICA		RENDIMIENTO EXERGÉTICO $n = \frac{SALIDA}{ENTRADA}$	
	ELEMENTOS	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	MEDIDO
TRANSFORMADOR	10,44	10,3195	9,84	9,78	0,988	0,99

CONDUCTOR	10,3195	10,3165	9,78	9,68	0,99	0,99
MOTOR	10,3165	9,12	9,68	9,36	0,88	0,96
BOMBA	9,12	7,62	9,36	8,19	0,84	0,87
TUBERÍA	7,62	7,54	8,19	8,017	0,98	0,98

**Unidad 4**  
Bombeo al tanque “estadio”

FLUJO (MW-h)	EXERGÍA MEDIDA		EXERGÍA TEÓRICA		RENDIMIENTO EXERGÉTICO $n = \frac{SALIDA}{ENTRADA}$	
	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	MEDIDO	TEORICO
TRANSFORMADOR	48,43	47,91	44,68	44,5	0,989	0,996
CONDUCTOR	47,91	47,87	44,5	43,65	0,99	0,99
MOTOR	47,87	42,36	43,65	42,51	0,884	0,973
BOMBA	42,36	35,20	42,51	36,7	0,833	0,863
TUBERÍA	35,20	34,45	36,7	35,56	0,97	0,97

## Bombeo al tanque “morrórico”

FLUJO (MW-h)	EXERGÍA MEDIDA		EXERGÍA TEÓRICA		RENDIMIENTO EXERGÉTICO	
	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	MEDIDO	TEORICO
TRANSFORMADOR	9,03	8,9364	8,15	8,10	0,989	0,993
CONDUCTOR	8,9364	8,9296	8,10	7,92	0,99	0,977
MOTOR	8,9296	7,76	7,92	7,66	0,869	0,967
BOMBA	7,76	6,80	7,66	6,7	0,87	0,875
TUBERÍA	6,84	6,7659	6,7	6,5622	0,988	0,985

El rendimiento exergético de los elementos indica el grado de irreversibilidad que aportan a la cadena energética del sistema de bombeo, haciendo que la relación producto/insumo se aleje de la relación producto/insumo nominal. Las causas de estas diferencias serán estudiadas cuando se haga el análisis exergético y de irreversibilidad.

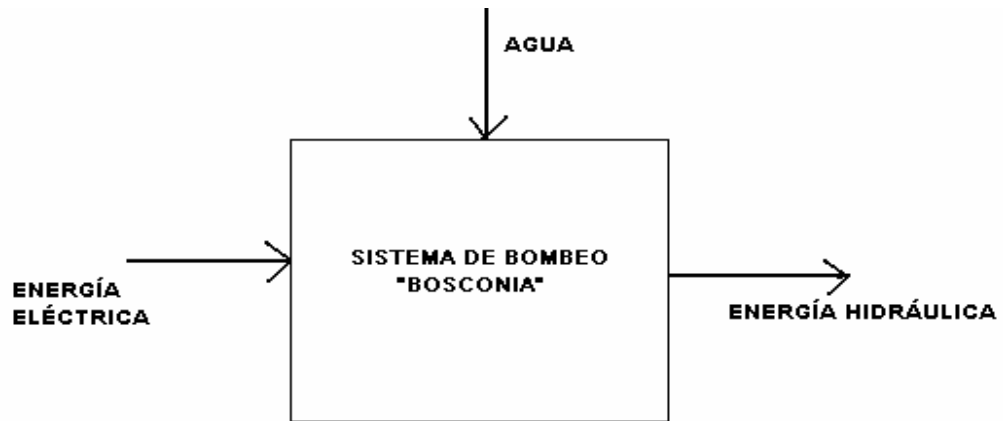
### 3. Análisis termoeconómico:

#### 1. Cálculo de costos exergéticos

El sistema de bombeo “Bosconia” se consideró como una entidad que reúne 5 elementos y 6 flujos de exergía por cada uno de sus elementos, con la característica de tener un flujo de entrada (insumo) y un solo flujo de salida

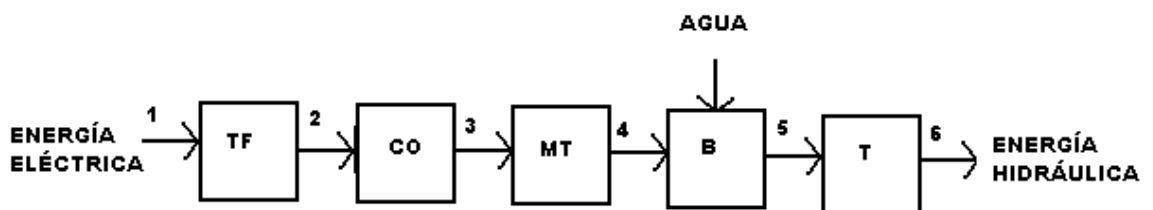
(producto). Los demás flujos son internos entre elementos y hacen parte de salidas para unos y entrada para otros, sin llegar a tener bifurcaciones.

El propósito de la bomba es aumentar la presión y suministrar movimiento al flujo de agua que le entra; para esto utiliza la energía mecánica producida por el motor, siendo de esta manera la bomba la que realiza un trabajo sobre el agua y no lo contrario; por esta razón el agua no es un insumo para el sistema. El agua se trata como una materia prima y no hace parte del balance exergético para los flujos insumo y producto.



En esta primera parte se busca determinar el rendimiento y consumo exergético e irreversibilidad en los 5 elementos y el costo exergético unitario de cada flujo insumo y producto.

El diagrama del sistema físico del sistema de bombeo Bosconia consta de 5 elementos y 6 flujos así:



Donde los números 1, 2, 3, 4, 5 y 6 y las variables TF, CO, MT, B y T hacen referencia a los flujos de exergía y elementos de la siguiente manera:

Flujo 1: Flujo de entrada del sistema global (insumo)

Flujo 6: Flujo de salida del sistema global (producto)

Los flujos internos de insumo son: 2,3, 4 y 5

Lo flujos internos producto son: 2, 3, 4, 5 y 6

TF: Transformador

CO: Conductor

MT: Motor

B: Bomba

T: Tubería

El análisis se hará para las 3 unidades de bombeo en sus dos condiciones hacia el tanque “estadio” y hacia el tanque “morrórico” con los flujos de exergía medidos de la siguiente manera:

### 1. unidad 1

Bombeo al tanque “estadio”:

FLUJO 1	FLUJO 2	FLUJO 3	FLUJO 4	FLUJO 5	FLUJO 6
45,75 MW-h	45,23 MW-h	45,19 MW-h	39,76 MW-h	32,04 MW-h	31,65

- Rendimiento y consumo exergético

$$\text{Rendimiento exergético } (n_i) = \frac{P_i}{F_i} \text{ [adimensional]}$$

$$n_1 = \frac{P_1}{F_1} = \frac{F_2}{F_1} = \frac{45,23}{45,75} = 0,98$$

$$n_2 = \frac{P_2}{F_2} = \frac{F_3}{F_2} = \frac{45,19}{45,23} = 0,99$$

$$n_3 = \frac{P_3}{F_3} = \frac{F_4}{F_3} = \frac{39,76}{45,19} = 0,87$$

$$n_4 = \frac{P_4}{F_4} = \frac{F_5}{F_4} = \frac{32,04}{39,76} = 0,81$$

$$n_5 = \frac{P_5}{F_5} = \frac{F_6}{F_5} = \frac{31,65}{32,04} = 0,97$$

$$\text{Consumo exergético } (k_i) = k_i = \frac{1}{n_i} = \frac{F_i}{P_i} \text{ [adimensional]}$$

$$k_1 = \frac{1}{n_1} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{45,75}{45,23} = 1,02$$

$$k_2 = \frac{1}{n_2} = \frac{F_2}{F_3} = \frac{45,23}{45,19} = 1,01$$

$$k_3 = \frac{1}{n_3} = \frac{F_3}{F_4} = \frac{45,19}{39,76} = 1,14$$

$$k_4 = \frac{1}{n_4} = \frac{F_4}{F_5} = \frac{39,76}{32,04} = 1,23$$

$$k_5 = \frac{1}{n_5} = \frac{F_5}{F_6} = \frac{32,04}{31,65} = 1,03$$

- Matriz de incidencia [A]

Al construir la matriz de incidencia elemento – nodo (A), se obtuvo para el sistema ejemplo:

A =

1	-1	0	0	0	0
0	1	-1	0	0	0
0	0	1	-1	0	0
0	0	0	1	-1	0
0	0	0	0	1	-1

Esta matriz es constante para el sistema de bombeo Bosconia, ya que su topología no cambia cuando se bombea al tanque “estadio” o al tanque “morrórico” con cualquier unidad.

- Vector de exergía de cada flujo [B]

[B] =

45,75
45,23
45,19
39,76
32,04
31,65

[MW-h]

- Exergía destruida en cada componente [I]

$$[A] * [B] = [I]$$

Al efectuar este producto se obtuvo:

$$[I] =$$

0,52
0,04
5,43
7,72
0,39

[MW-h]

- Matriz de incidencia  $[A_f]$  y  $[A_p]$

Al igual que la matriz de incidencia  $[A]$ , las matrices  $[A_f]$  y  $[A_p]$  se obtienen al determinar la conexión de los elementos, pero chequeando para la  $[A_f]$  el insumo, y para la  $[A_p]$  el producto, obteniendo los siguientes resultados:

$$[A_f] =$$

1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0

$[A_p] =$

0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	1

- Exergía de cada insumo

$[A_f] * [B] = [F]$

Al realizar el producto se obtiene:

$[F] =$

45,75
45,23
45,19
39,76
32,04

[MW-h]

- Exergía de cada producto

$[A_p] * [B] = [P]$

Al realizar el producto se obtiene:

$[P] =$

45,23
45,19
39,76
32,04
31,65

[MW-h]

- Cálculo del costo exergético de cada flujo

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

Donde  $[Aa]$  es la matriz aumentada de  $[A]$ ,  $[B^*]$  es el vector de costos exergéticos de cada flujo y  $[Y]$  la solución del sistema  $[Aa] x [B^*]$ . Estas matrices y vectores se definen por medio de las proposiciones 2,3 y 4.

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

Para el caso Bosconia la matriz  $[Aa]$  es:

1	-1	0	0	0	0
0	1	-1	0	0	0
0	0	1	-1	0	0
0	0	0	1	-1	0
0	0	0	0	1	-1
<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

En donde la fila que se agregó a la matriz  $[A]$  es la resaltada en negrilla y de acuerdo con la proposición 2 indica que el costo exergético del flujo de entrada al sistema global, es el valor de su exergía; las filas correspondientes a las proposiciones 3,4 y 5 son cero y no se incluyen porque no representan costo alguno en el sistema según lo visto en el capítulo 3.

El vector de costos  $[B^*]$  es:

$B1^*$
$B2^*$
$B3^*$
$B4^*$
$B5^*$
$B6^*$

[MW-h]

y la solución  $[Y]$  es :

0
0
0
0
0
$B1$

El vector de costos  $[B^*]$  y el vector solución  $[Y]$  son constantes para el sistema de bombeo, puesto que la topología del sistema permanece constante.

Al realizar el producto  $[Aa] \times [B^*] = [Y]$  se obtiene:

$$B1^* - B2^* = 0$$

$$B2^* - B3^* = 0$$

$$B3^* - B4^* = 0$$

$$B4^* - B5^* = 0$$

$$B5^* - B6^* = 0$$

$$B1^* = B1$$

Esto implica que:  $B1^*=B2^*=B3^*=B4^*=B5^*=B6^*=B1=45,75$  MW-h, el valor de B1 para el cálculo en las otras unidades de bombeo, corresponderá al valor de la exergía del flujo insumo del sistema global para cada condición de bombeo.

Entonces el vector  $[B^*]$  es:

45,75
45,75
45,75
45,75
45,75
45,75

[MW-h]

- Costo exergético de cada insumo

$$[A_f] * [B^*] = [F^*]$$

Al realizar el producto se obtiene:

$$[F^*] =$$

45,75
45,75
45,75
45,75
45,75

[MW-h]

- Costo exergético de cada producto:

$$[A_p] * [B^*] = [P^*]$$

$[P^*] =$

45,75
45,75
45,75
45,75
45,75

[MW-h]

- Costo exergético unitario de cada insumo y producto

$$[K^*_{f,i}] = \frac{[F^*_i]}{[F_i]} \quad [K^*_{p,i}] = \frac{[P^*_i]}{[P_i]}$$

El costo exergético de cada insumo es:

$$K^*_{f,1} = \frac{[F^*_1]}{[F_1]} = \frac{45,75}{45,75} = 1$$

$$K^*_{f,2} = \frac{[F^*_2]}{[F_2]} = \frac{45,75}{45,23} = 1,01149$$

$$K^*_{f,3} = \frac{[F^*_3]}{[F_3]} = \frac{45,75}{45,19} = 1,01239$$

$$K^*_{f,4} = \frac{[F^*_4]}{[F_4]} = \frac{45,75}{39,76} = 1,1506$$

$$K^*_{f,5} = \frac{[F^*_5]}{[F_5]} = \frac{45,75}{32,04} = 1,4279$$

El costo exergético de cada producto es:

$$K^*_{p,1} = \frac{[P^*_1]}{[P_1]} = \frac{45,75}{45,23} = 1,01149$$

$$K_{p,2}^* = \frac{[P_2^*]}{[P_2]} = \frac{45,75}{45,19} = 1,01239$$

$$K_{p,3}^* = \frac{[P_3^*]}{[P_3]} = \frac{45,75}{39,76} = 1,1506$$

$$K_{p,4}^* = \frac{[P_4^*]}{[P_4]} = \frac{45,75}{32,04} = 1,4279$$

$$K_{p,5}^* = \frac{[P_4^*]}{[P_4]} = \frac{45,75}{31,65} = 1,4454$$

El procedimiento de cálculo mostrado para la unidad 1 cuando bombea al tanque “estadio” se sigue para cuando bombea al tanque “morrórico” y para las unidades 2 y 4 en sus condiciones de bombeo.

Al realizar el procedimiento se obtienen las siguientes irreversibilidades y costos:

Bombeo al tanque “morrórico”

FLUJO 1	FLUJO 2	FLUJO 3	FLUJO 4	FLUJO 5	FLUJO 6
14,8185 MW-h	14,6463 MW-h	14,6357 MW-h	12,3942 MW-h	10,35 MW- h	10,25 MW- h

Rendimiento exergetico:

$$n_1 = 0,98$$

$$n_2 = 0,99$$

$$n_3 = 0,846$$

$$n_4 = 0,84$$

$$n_5 = 0,98$$

Consumo exergetico:

$$k_1 = 1,02$$

$$k_2 = 1,01$$

$$k_3 = 1,182$$

$$k_4 = 1,19$$

$$k_5 = 1,02$$

Irreversibilidad en los elementos:

[I] =

0,172
0,01
2,24
2,04
0,1

[MW-h]

La exergía de cada flujo y sus costos exergéticos se pueden ver en la siguiente tabla:

FLUJO	[B] (MW-h)	[B*] (MW-h)	K*(pu)
1	14,8185	14,8185	1
2	14,6463	14,8185	1,01175
3	14,6357	14,8185	1,01249
4	12,3942	14,8185	1,1955
5	10,35	14,8185	1,4317
6	10,25	14,8185	1,4457

## Unidad 2:

Bombeo al tanque “estadio”

FLUJO 1	FLUJO 2	FLUJO 3	FLUJO 4	FLUJO 5	FLUJO 6
48,81 MW-h	48,25 MW-h	48,23 MW-h	44,80 MW-h	36,57 MW-h	36,11 MW-h

Rendimiento exergético:

$$n_1 = 0,9885$$

$$n_2 = 0,999$$

$$n_3 = 0,9289$$

$$n_4 = 0,82$$

$$n_5 = 0,98$$

Consumo exergético:

$$k_1 = 1,0116$$

$$k_2 = 1,001$$

$$k_3 = 1,0765$$

$$k_4 = 1,2195$$

$$k_5 = 1,0204$$

Irreversibilidad en los elementos:

[I] =

0,56
0,02
3,43
8,23
0,46

[MW-h]

La exergía de cada flujo y sus costos exergéticos son:

FLUJO	[B] (MW-h)	[B*] (MW-h)	K*(pu)
1	48,81	48,81	1
2	48,25	48,81	1,0116
3	48,23	48,81	1,0118
4	44,80	48,81	1,0894
5	36,57	48,81	1,3347
6	36,11	48,81	1,3517

Bombeo al tanque “morrórico”

FLUJO 1	FLUJO 2	FLUJO 3	FLUJO 4	FLUJO 5	FLUJO 6
10,44 MW-h	10,3195 MW-h	10,3165 MW-h	9,1216 MW-h	7,6212 MW-h	7,5478 MW-h

Rendimiento exergético:

$$n_1 = 0,9884$$

$$n_2 = 0,9997$$

$$n_3 = 0,8841$$

$$n_4 = 0,84$$

$$n_5 = 0,98$$

Consumo exergético:

$$k_1 = 1,01173$$

$$k_2 = 1,0003$$

$$k_3 = 1,13109$$

$$k_4 = 1,1904$$

$$k_5 = 1,0204$$

Irreversibilidad en los elementos:

[I] =

0,12
0,003
1,19
1,5
0,0734

[MW-h]

La exergía de cada flujo y sus costos exergéticos son:

FLUJO	[B] (MW-h)	[B*] (MW-h)	K*(pu)
1	10,44	10,44	1
2	10,3195	10,44	1,01167
3	10,3165	10,44	1,01197
4	9,1216	10,44	1,1445
5	7,6212	10,44	1,3698
6	7,5478	10,44	1,3831

#### Unidad 4:

Bombeo al tanque “estadio”

FLUJO 1	FLUJO 2	FLUJO 3	FLUJO 4	FLUJO 5	FLUJO 6
48,43 MW-h	47,9117 MW-h	47,873 MW-h	42,3626 MW-h	35,20 MW-h	34,45 MW-h

Rendimiento exergético:

$$n_1 = 0,9892$$

$$n_2 = 0,9991$$

$$n_3 = 0,8848$$

$$n_4 = 0,83$$

$$n_5 = 0,97$$

Consumo exergético:

$$k_1 = 1,0109$$

$$k_2 = 1,0009$$

$$k_3 = 1,1301$$

$$k_4 = 1,2048$$

$$k_5 = 1,03$$

Irreversibilidad en los elementos:

[I] =

0,5183
0,0387
5,5104
7,16
0,75

[MW-h]

La exergía de cada flujo y sus costos exergéticos son:

FLUJO	[B] (MW-h)	[B*] (MW-h)	K*(pu)
1	48,43	48,43	1
2	47,9117	48,43	1,0108
3	47,873	48,43	1,01163
4	42,3626	48,43	1,1432

5	35,20	48,43	1,3758
6	34,45	48,43	1,4058

Bombeo al tanque "morrórico"

FLUJO 1	FLUJO 2	FLUJO 3	FLUJO 4	FLUJO 5	FLUJO 6
9,03 MW-h	8,93648 MW-h	8,9296 MW-h	7,7667 MW-h	6,8431 MW-h	6,7659 MW-h

Rendimiento exergético:

$$n_1 = 0,9896$$

$$n_2 = 0,99$$

$$n_3 = 0,8697$$

$$n_4 = 0,885$$

$$n_5 = 0,98$$

Consumo exergético:

$$k_1 = 1,01050$$

$$k_2 = 1,01010$$

$$k_3 = 1,1498$$

$$k_4 = 1,13$$

$$k_5 = 1,0204$$

Irreversibilidad en los elementos:

[I]=

0,0935
0,0068
1,1629

0,9236
0,0772

[MW-h]

La exergía de cada flujo y sus costos exergéticos son:

FLUJO	[B] (MW-h)	[B*] (MW-h)	K*(pu)
1	9,03	9,03	1
2	8,93648	9,03	1,0104
3	8,9296	9,03	1,01124
4	7,7667	9,03	1,1626
5	6,8431	9,03	1,3195
6	6,7659	9,03	1,3346

## 2. Análisis de costos exergéticos

Con los resultados del cálculo de costos se analiza las dos condiciones de bombeo así:

- **Bombeo al tanque “estadio”**

Como el tiempo de operación de una unidad no es el mismo para todas, debido a que cada unidad se utiliza para satisfacer una demanda de agua en los tanques, la cual presenta variaciones en el transcurso del día, se tomara los costos exergéticos calculados anteriormente y se recalcularan para un tiempo de operación promedio diario por tanque de destino con el fin de identificar la opción mas económica para un mismo tiempo de operación.

UNIDAD DE BOMBEO	COSTO EXERGÉTICO DE CADA FLUJO $B_{in}$ (MW-h)
1	47,89
2	45,76
4	49,17

$$B_{in} = \left( \frac{B_i}{T_{oi}} \right) * T_{o.promedio}$$

Donde :

$B_{in}$  = Es el costo exergético para un tiempo de operación promedio de 14,3 h

$B_i$  = Es el costo exergético calculado para el tiempo de operación de cada unidad así:

$$B_1 = 45,75$$

$$B_2 = 48,81$$

$$B_3 = 48,43$$

$T_{oi}$  = Tiempo de operación de cada unidad así:

$$T_{o1} = 13,66 \text{ [h]}$$

$$T_{o2} = 15,25 \text{ [h]}$$

$$T_{o3} = 14,083 \text{ [h]}$$

$T_{o.promedio}$  = Tiempo de operación promedio calculado a partir del tiempo de operación de cada unidad.

De esta tabla se puede observar que el mayor costo exergético se presenta cuando se bombea con la unidad 4 y el menor costo exergético con la unidad 2, hecho que significa una menor demanda de energía.

Haciendo el mismo procedimiento a partir de los costos exergéticos para cuando se bombea al tanque “morrórico” y con un tiempo promedio de operación de 3,4 h diarias para este tanque, se obtienen los siguientes resultados:

- **Bombeo al tanque “morrórico”**

<b>UNIDAD DE BOMBEO</b>	<b>COSTO EXERGÉTICO DE CADA FLUJO <math>B_{in}</math> (MW-h)</b>
<b>1</b>	11,40
<b>2</b>	10,92
<b>4</b>	<b>11,54</b>

El mayor costo exergético ocurre cuando se bombea con la unidad 4.

Las diferencias encontradas entre los flujos de exergía medidos y esperados ya se introdujeron en este capítulo en la parte de evaluación del sistema. Las posibles razones para que existan estas diferencias pueden explicarse analizando las irreversibilidades de los elementos.

La irreversibilidad en los elementos es sinónimo de pérdida de energía, que hace que los insumos empleados no se aprovechen en un 100% ocasionando una desmejora en el producto del sistema. Para el caso en estudio será una disminución de la potencia hidráulica suministrada al agua llevada a los tanques.

Los elementos: transformador, conductores, y tubería presentan una irreversibilidad que se mantiene con la misma tendencia para las diferentes condiciones de bombeo como ya se mostró con los vectores irreversibilidad en el cálculo de costos exergéticos. Esta irreversibilidad siempre está presente y es menor a la que se encuentra en los motores y bombas sin importar la condición de bombeo lo que significa un menor impacto en el costo exergético global y de los

flujos. De esta manera la irreversibilidad en motores y bombas quedan asociadas a un desgaste de la tecnología utilizada.

A continuación se muestra la irreversibilidad de los elementos que componen a las unidades de bombeo. Estas irreversibilidades se recalcularon para un tiempo de operación promedio de 14,3 h para el tanque “estadio” y 3,4 h para el tanque “morrórico” a partir de las irreversibilidades determinadas con el análisis exergético para cada condición y tiempo de operación por unidad ya descritos; esto con el fin de identificar el elemento con mayor irreversibilidad para un mismo tiempo de operación que permita caracterizar al sistema.

### Unidad 1

- **Bombeo al tanque “estadio”**

ELEMENTO	IRREVERSIBILIDAD $I_{in}$ (MW-h)
<b>MOTOR</b>	5,68
<b>BOMBA</b>	8,08

Siendo 
$$I_{in} = \left( \frac{I_e}{T_{oi}} \right) * T_{o.promedio}$$

Donde:

$I_{in}$  = Es la irreversibilidad para un tiempo de operación promedio de 14,3 h

$I_e$  = Es la irreversibilidad para el tiempo de operación del elemento motor o bomba así:

$I_e = 5,43$  (motor)

$I_e = 7,72$  (bomba)

$T_{oi}$  = tiempo de operación de cada unidad así:

$$T_{o1} = 13,66 \text{ [h]}$$

$$T_{o2} = 15,25 \text{ [h]}$$

$$T_{o4} = 14,083 \text{ [h]}$$

$T_{o,\text{promedio}}$  = tiempo de operación promedio calculado a partir del tiempo de operación de cada unidad.

Haciendo el mismo procedimiento a partir de las irreversibilidades para cuando se bombea al tanque “morrórico” y con un tiempo promedio de operación de 3,4 h diarias para este tanque, se obtienen los siguientes resultados:

- **Bombeo al tanque “morrórico”**

ELEMENTO	IRREVERSIBILIDAD (MW-h)
MOTOR	1,72
BOMBA	1,57

Siguiendo con las demás unidades se obtiene los siguientes resultados:

## Unidad 2

- **Bombeo al tanque “estadio”**

ELEMENTO	IRREVERSIBILIDAD (MW-h)
MOTOR	3,21
BOMBA	7,71

- **Bombeo al tanque “morrórico”**

ELEMENTO	IRREVERSIBILIDAD (MW-h)
MOTOR	1,24
BOMBA	1,56

#### Unidad 4

- **Bombeo al tanque “estadio”**

ELEMENTO	IRREVERSIBILIDAD (MW-h)
MOTOR	5,59
BOMBA	7,27

- **Bombeo al tanque “morrórico”**

ELEMENTO	IRREVERSIBILIDAD (MW-h)
MOTOR	1,48
BOMBA	1,18

Este resultado muestra que:

- El motor y la bomba para la unidad uno tienen una irreversibilidad de gran impacto debido a que la bomba presenta más irreversibilidad cuando se bombea al tanque “estadio” con respecto al motor y el motor cuando se bombea al tanque “morrórico” con respecto a la bomba.
- La bomba para la unidad 2 es la de mayor irreversibilidad

- La unidad 4 presenta la misma situación que la unidad 1.

### 3. Valoración económica de costos exergéticos

La valoración económica del costo exergético de un flujo (costo económico) consiste en llevar el valor de la exergía del costo a unidades monetarias como (pesos, dólares, etc.).

Para esto se multiplica la tarifa de la energía por el costo exergético de los flujos anteriormente calculados. Para este caso se asumió un valor de 170 \$/ kW-h = 170000 \$/ MW-h (valor promedio del costo de energía para usuarios no regulados durante las 24 horas) debido a no tener acceso a este dato.

A continuación se muestran los costos así:

Los valores en negrilla hacen referencia a los costos más bajos para el bombeo.

- **Bombeo al tanque “estadio”**

UNIDAD DE BOMBEO	COSTO ECONÓMICO (\$)
1	8 141 300
2	<b>7 779 200</b>
4	8 358 900

- **Bombeo al tanque “morrórico”**

UNIDAD DE BOMBEO	COSTO ECONÓMICO (\$)
1	1 938 000
2	<b>1 856 400</b>
4	1 961 800

#### 4. Propuesta para URE

Con la información obtenida a partir del análisis termoeconómico, se harán dos propuestas: una a nivel de procedimiento y otra a nivel de tecnología, que contribuyan a mantener un caudal de bombeo cercano o igual al teórico y una reducción de los costos exergéticos e irreversibilidades del sistema.

##### 1. Propuesta a nivel de procedimiento

A partir de la valoración económica se tiene que la unidad con menor costo económico es la 2 y la de mayor costo económico la 4. A partir de esto se propone:

Utilizar la **unidad 2** para bombear al tanque “estadio” y al tanque “morrórico”, suministrando una caudal de 700 lt/s y 630 lt/s por un costo de \$7 779 200 y 1 856 400 respectivamente y sacar a mantenimiento la unidad 4. Los caudales suministrados están por debajo del teórico (746,5 lt/s y 669,2 lt/s) pero son los que más se acercan, consiguiendo mantener el producto con un contenido de exergía aceptable comparado con el teórico (simulado).

Se deja la unidad 1 como reserva porque al emplearla se incurre en el menor costo económico después de la unidad 2.

*Por cada día en que se utilice la unidad 1 como reserva, se debe sumar su costo económico al costo mensual que se tendría si la unidad 2 operará sola.*

El ahorro diario que se obtiene haciendo el bombeo con la unidad 2 en lugar de hacerlo con la unidad 4 (más desfavorable) es:

$$\text{Ahorro diario} = C_{\text{md}} - C_{\text{p}}$$

Donde:

$C_{\text{md}}$  = costo económico diario para la unidad mas desfavorable en pesos

$C_{\text{p}}$  = costo económico diario para la unidad propuesta en pesos

- Bombeo al tanque “estadio”

$$\text{Ahorro diario} = 8\,358\,900 - 7\,779\,200 = \$\,579\,700$$

$$\text{Ahorro mensual} = \text{Ahorro diario} * 30 = \mathbf{\$17\,391\,000}$$

- Bombeo al tanque “morrórico”

$$\text{Ahorro diario} = 1\,961\,800 - 1\,856\,400 = \$105\,400$$

$$\text{Ahorro mensual} = \text{Ahorro diario} * 30 = \mathbf{\$3\,162\,000}$$

Si se requiere bombear en un mismo día de operación a los dos tanques (primero a “estadio” y luego a “morrórico” o viceversa) se tiene un costo diario total de:

\$ 9 635 600 y un costo mensual de \$ 289 068 000 ahorrándose mensualmente \$ 20 553 000 sin realizar ningún cambio en la tecnología actual, pero sometiendo a la unidad 2 a un uso de hasta 17,7 h diarias, lo que obliga a una monitorización diaria de su operación, con el fin de detectar cualquier cambio en su índice de eficiencia que cause una disminución del producto (caudal) así como a un

mantenimiento programado mensual para conservar las condiciones mecánicas y eléctricas actuales de la unidad.

## 2. Propuesta a nivel de tecnología

Del análisis de irreversibilidad arriba realizado se logró determinar cuales eran los elementos con una mayor irreversibilidad:

Esto muestra la oportunidad de ahorro de energía en la operación global del sistema si se hace un reemplazo de los elementos con mayor irreversibilidad en el proceso, por elementos nuevos.

Un motor y una bomba nuevos en el proceso de bombeo, presentan las siguientes irreversibilidades para un tiempo promedio de operación a estadio de 14,3 h y 3,4 a morrorico.

El valor del kW-h empleado es el mismo que se ha usado para los anteriores cálculos.

- Motor

<b>BOMBEO</b>	<b>IRREVERSIBILIDAD (MW-h)</b>	<b>IRREVERSIBILIDAD (\$) X DÍA</b>	<b>IRREVERSIBILIDAD (\$) X MES</b>
ESTADIO	1,15	196 911	5 907 330
MORRORICO	0,34	57 800	1 734 000

- Bomba

<b>BOMBEO</b>	<b>IRREVERSIBILIDAD (MW-h)</b>	<b>IRREVERSIBILIDAD (\$ X DÍA)</b>	<b>IRREVERSIBILIDAD (\$ X MES)</b>
ESTADIO	5,84	994 279	29 828 370
MORRORICO	1,15	195 500	5 865 000

A continuación se presenta la propuesta para cada unidad así:

***Estas propuestas están dadas para cuando solo una unidad opera todos los días supliendo la demanda de los dos tanques.***

1. Propuesta unidad 1

- Reemplazo del motor existente por uno nuevo

Al reemplazar el motor por uno nuevo se tendrá una menor irreversibilidad en esta parte del proceso, contribuyendo así a elevar la eficiencia global y a un ahorro de energía satisfaciendo las condiciones nominales de operación:

<b>BOMBEO</b>	<b>AHORRO DE ENERGÍA MENSUAL (AH) \$</b>
ESTADIO	23 103 000
MORRORICO	7 038 000

Donde:

$$HA = (I_A - I_P) * V * 30$$

$I_A$  = irreversibilidad del equipo actual en MW-h

$I_P$  = irreversibilidad del equipo propuesto en MW-h

$V$  = Costo en pesos del MW-h (\$170 000)

- Reemplazo de la bomba existente por una nueva

Realizando el mismo procedimiento que para el reemplazo del motor se obtienen los siguientes resultados para la bomba:

<b>BOMBEO</b>	<b>AHORRO DE ENERGÍA MENSUAL (AH) \$</b>
ESTADIO	11 424 000
MORRORICO	2 142 000

## 2. Propuesta unidad 2

- Reemplazo de la bomba existente por una nueva

Al reemplazar la bomba existente se obtendrían los siguientes ahorros:

<b>BOMBEO</b>	<b>AHORRO DE ENERGÍA MENSUAL (AH) \$</b>
ESTADIO	9 537 000
MORRORICO	2 091 000

## 3. Propuesta unidad 4

- Reemplazo del motor existente por uno nuevo

Los ahorros que se obtendrían son:

<b>BOMBEO</b>	<b>AHORRO DE ENERGÍA MENSUAL (AH) \$</b>
ESTADIO	22 644 000
MORRORICO	5 814 000

- Reemplazo de la bomba existente por una nueva

Los ahorros que se obtendrían son:

<b>BOMBEO</b>	<b>AHORRO DE ENERGÍA MENSUAL (AH) \$</b>
ESTADIO	7 293 000
MORRORICO	153 000

Se recomienda la propuesta unidad 1, ya que es la de mayor opción de ahorro. Además se estaría ganando eficiencia en una de las unidades que actualmente presenta el mayor impacto en irreversibilidad sobre el proceso cuando es utilizada. Se recomienda usar la unidad 2 como reserva por presentar menor irreversibilidad, pero por cada día que se utilice, se debe sumar su ahorro diario al ahorro diario que se obtiene cuando se usa solo a la unidad 1 con el fin de contabilizar las veces que se utiliza la unidad 2 y su incidencia en el ahorro mensual, pues con la unidad 2 (actual) los ahorros que se obtienen son menores que los de la unidad 1 (nueva).

## 6. EVALUACIÓN FINANCIERA

Se hará el estudio financiero de la propuesta a nivel de tecnología expuesta en el capítulo anterior con el fin de indicar la opción más acertada.

*Los datos obtenidos de precios de motores fueron suministrados por CERLEC LTDA y de precios de bombas por CONSULTECNICA LTDA.*

**Costo de una bomba= \$501 879 600**

**Costo de un motor= \$500 000 000**

Para el cálculo del tiempo de recuperación de la inversión no se tuvo en cuenta el tiempo de depreciación de los equipos (aproximadamente 10 años) ni la devaluación de la moneda.

### 1. Propuesta unidad 1

*Ahorro mensual= \$43 707 000*

*Ahorro anual = \$524 484 000*

*Valor del motor y bomba nuevos= \$1001 879 600*

*Tiempo de recuperación de la inversión = 1,91 años*

### 2. Propuesta unidad 2

*Ahorro mensual= \$11 628 000*

*Ahorro anual = \$139 536 000*

*Valor de la bomba nueva= \$501 879 600*

*Tiempo de recuperación de la inversión = 3,6 años*

### **3. Propuesta unidad 4**

*Ahorro mensual= \$35 904 000*

*Ahorro anual = \$430 848 000*

*Valor del motor y bomba nuevos= \$1001 879 600*

*Tiempo de recuperación de la inversión = 2,3 años*

***Se tiene que la propuesta unidad 1 es la más atractiva por tener un tiempo de recuperación menor a las demás.***

Se tendría una unidad en operación satisfaciendo condiciones nominales, con la recomendación de usar la unidad 2 como reserva en las condiciones actuales. Se elige a la unidad 2 como reserva por tener una menor irreversibilidad que las demás.

***Contemplando la propuesta unidad 1 y unidad 4 se tendrían dos unidades para satisfacer condiciones nominales alternándose su uso. Esto significa que cada unidad operaría 15 días al mes con lo que se tendría un ahorro mensual de:***

$$\text{Ahorro mensual} = (A_1 + A_4) * \frac{15}{30}$$

Donde  $A_1$  y  $A_4$  son los ahorros mensuales obtenidos con la propuesta unidad 1 y unidad 4 trabajando solo una unidad todos los días.

$$\text{Ahorro mensual} = (43\,707\,000 + 35\,904\,000) * \frac{15}{30} = \$39\,805\,500$$

*Ahorro anual=\$477 666 000*

*Valor de dos motores y dos bombas=\$2003 759 200*

*Tiempo de recuperación de la inversión=4,1 años*

Al realizar el mismo procedimiento se obtuvieron los siguientes resultados para cuando se elige propuesta 1 y 2, y propuesta 4 y 2.

Propuesta 1 y 2:

*Ahorro mensual= \$ 27 667 500*

*Ahorro anual = \$332 010 000*

*Valor de dos bombas y un motor= \$1503 759 200*

*Tiempo de recuperación de la inversión = 4,5 años*

Propuesta 4 y 2:

*Ahorro mensual= \$ 23 766 000*

*Ahorro anual = \$285 192 000*

*Valor de dos bombas y un motor= \$1503 759 200*

*Tiempo de recuperación de la inversión = 5,2 años*

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos de la aplicación del análisis termoeconómico al sistema de bombeo “bosconia” del AMB S.A E.S.P permiten concluir lo siguiente:

- Una matriz de incidencia ha sido encontrada para caracterizar los flujos de exergía e irreversibilidades en cualquier punto del proceso de bombeo con la característica de ser fija para las dos condiciones de bombeo del sistema.
- El expresar los flujos de exergía en MW-h ha sido útil para mostrar que así como en sistemas químicos, térmicos y mecánicos se han realizado aplicaciones de la termoeconomía, cuyas variables son más familiares al lenguaje termodinámico, también se puede aplicar a sistemas eléctricos volviendo versátil esta metodología de análisis energético.
- Los resultados muestran una desviación entre la exergía medida y teórica debido a la pérdida de eficiencia en algunos elementos. Esta pérdida de eficiencia se observó como un aumento de la irreversibilidad con respecto al caso teórico.
- Los equipos eléctricos presentan mayor eficiencia que los mecánicos, lo que se traduce en una menor irreversibilidad en los procesos donde estén involucrados y un mayor impacto de los equipos mecánicos sobre la eficiencia total del proceso al aportar más irreversibilidad haciendo menos eficiente el proceso.
- Los resultados obtenidos, demuestran la ventaja del análisis de exergía como herramienta de diagnóstico sobre el de energía, porque permite determinar en mayor detalle la degradación de la energía en procesos de conversión energética.
- El análisis de irreversibilidad revela las posibilidades de URE que existen si se cambian los equipos existentes por nuevos, ya que por medio de la

matriz [A] y [B ] queda caracterizado el sistema para un insumo cualquiera y el correspondiente producto.

- Una combinación del análisis de exergía en el proceso de bombeo con los principios termo-económicos se utilizo como herramienta para plantear una opción a nivel de procedimiento que permitiera obtener un menor costo económico de operación, una vez identificado el costo exergético.

Algunas recomendaciones generales para URE son:

### **1. Cuidado con las reparaciones.**

La reparación inadecuada de un motor puede ocasionar un incremento en las pérdidas y adicionalmente en los motores de corriente alterna, la reducción del factor de potencia. Todo esto conduce a una disminución de su eficiencia.

*Por ejemplo un motor que sufrió un desperfecto en su devanado y que por ello hay que rebobinarlo, puede disminuir su eficiencia considerablemente, si durante el proceso de reparación se presenta:*

- *Calentamiento desmedido del hierro al quitar el devanado*
- *Daños en las ranuras al quitar el devanado dañado y montar el nuevo*
- *Diferente calidad y calibre del alambre*
- *Diferente número de vueltas*
- *Daños a los cojinetes y mal alineamiento.*
- *Mayor tiempo de secado final.*

*Por esto es importante que cuando un motor sea reparado, los trabajos los efectúe personal calificado para garantizar que la compostura sea realizada correctamente y que los materiales empleados sean de calidad igual o superior a los originales.*

La misma atención se debe prestar a las partes eléctricas del motor, como a los componentes mecánicos, tales como los cojinetes, el eje y el sistema de ventilación o enfriamiento. Con frecuencia los daños que sufren los devanados tienen su origen en desperfectos mecánicos. Un motor mal reparado al ser instalado nuevamente, gastará más energía que antes. Cuando los daños sean mayores puede resultar más económico sustituir un motor que componerlo.

## **2. Motores eléctricos y el factor de potencia.**

Los motores de inducción por su simplicidad de construcción, su velocidad prácticamente constante, su robustez y su costo relativamente bajo, son los motores más utilizados en la industria. Sin embargo, tienen el inconveniente de que aún en óptimas condiciones, consumen potencia reactiva (kVAr) por lo que son una de las causas principales del bajo factor de potencia en las instalaciones industriales.

El factor de potencia es indicativo de la eficiencia con que se está utilizando la energía eléctrica para producir un trabajo útil.

Un bajo factor de potencia significa energía desperdiciada y afecta a la adecuada utilización del sistema eléctrico. Por esta razón en las tarifas eléctricas, se ofrece una reducción en las facturas de electricidad en instalaciones con un factor de potencia mayor del 90% y también se imponen cuotas a manera de multas si el factor de potencia es menor que la cifra señalada.

Ya que los motores de inducción son una de las causas principales del bajo factor de potencia se pueden tomar las siguientes medidas con respecto a éstos para corregirlo:

- Selección justa del tipo, potencia y velocidad de los motores que se instalan.

- Empleo de motores trifásicos en lugar de monofásicos.
- Aumento de la carga de los motores a su potencia nominal (evitar sobredimensionamiento del motor).
- Evitar el trabajo prolongado en vacío de los motores.
- Reparación correcta y de alta calidad de los motores.
- Instalación de capacitores en los circuitos con mayor número de motores o en los motores de mayor capacidad.

Corregir el bajo factor de potencia en una instalación es un buen negocio, no sólo porque se evitarán los cargos en la facturación sino porque los equipos operan más eficientemente, reduciendo los costos por consumo de energía.

**3. Motivación en el personal para el ahorro de energía.** Ahorrar energía es tarea de todos y de todos los días. Porque de no hacerlo quizás mañana ya no exista energía que ahorrar. Los resultados que se obtengan de cada empresa, en cada hogar, con cada usuario, contribuirán a asegurar un mejor futuro, particular y colectivo.

Establecer una campaña permanente de ahorro de energía en las instalaciones, dentro de la cual es fundamental concientizar al personal. Motivarlo a que participe activamente y tomar cuenta sus opiniones y sugerencias. Muchas de ellas pueden representar verdaderas oportunidades de ahorro.

Otras recomendaciones generales son:

1. Elegir correctamente la potencia del motor. El rendimiento máximo se obtiene cuando éste opera entre el 75% y el 95% de su potencia nominal y cae bruscamente para cargas reducidas o cuando trabaja sobrecargado.

Adicionalmente los motores de inducción a cargas bajas o en vacío tienen un factor de potencia muy bajo.

2. Seleccionar el motor de acuerdo con su ciclo de trabajo. Operar un motor para servicio continuo, en accionamientos de operación intermitente, con frecuentes arranques y paros, ocasiona una depreciación de sus características de operación y eficiencia. Además de que se puede dañar el aislamiento de los devanados por la elevación de la temperatura.
3. Seleccionar el armazón del motor, de acuerdo con el ambiente en que va a estar trabajando. Los motores abiertos son más sencillos y por lo tanto menos costosos, además de operar con mayor factor de potencia. Sin embargo, en condiciones adversas del medio, los motores cerrados serán los indicados.
4. Seleccionar correctamente la velocidad del motor. Si la carga lo permite prefiera motores de alta velocidad, son más eficientes y si se trata de motores de corriente alterna, trabajan con un mejor factor de potencia.
5. Utilizar motores de inducción trifásicos en lugar de monofásicos. En motores de potencia equivalente, su eficiencia es de 3 a 5% mayor y su factor de potencia mejora notablemente.
6. Utilizar motores sincrónicos en lugar de motores de inducción. Cuando se requieren motores de gran potencia y baja velocidad la elección de un motor síncronico debe ser considerada.

Compite en costo con uno de inducción de características similares, su eficiencia es de 1 al 3% mayor, su velocidad es constante y contribuye a mejorar el factor de potencia de la instalación.

7. Sustituir los motores antiguos o de uso intenso. Los costos de operación y mantenimiento de motores viejos o de motores que por su uso han depreciado sus características de operación, pueden justificar su sustitución por motores normalizados y de alta eficiencia.

8. Efectuar correctamente la instalación eléctrica y el montaje de los motores y su carga. Las normas técnicas de instalaciones eléctricas y las recomendaciones de los fabricantes son consulta obligada para asegurar el funcionamiento adecuado de los equipos.
9. Realizar en forma correcta la conexión a tierra de los motores. Una conexión defectuosa o la ausencia de ésta, puede poner en peligro la vida de los operarios si se presenta una falla a tierra. Además de ocasionar corrientes de fuga que no son liberadas por el equipo de protección con un dispendio de energía.
10. Evitar concentrar motores en locales reducidos o en lugares que puedan dificultar su ventilación. Un sobrecalentamiento del motor se traduce en una disminución de su eficiencia.
11. Corregir la caída de tensión en los alimentadores. Una tensión reducida en las terminales del motor, acarrea entre otros, un incremento de la corriente, sobrecalentamiento y disminución de su eficiencia. Las normas permiten una caída máxima del 3% (o del 5% en la combinación de alimentador y circuito derivado) pero es recomendable que no rebase el 1%.
12. Balancear la tensión de alimentación en los motores trifásicos de corriente alterna. El desequilibrio entre fases no debe excederse en ningún caso del 5%, pero mientras menor sea el desbalance, los motores operan con mayor eficiencia.
13. Compensar la energía reactiva demandada por los motores de corriente alterna más importantes o con mayor número de horas de funcionamiento, mejorando el factor de potencia de la instalación, con lo que se reducen las pérdidas de la potencia y de la tensión en los conductores.
14. Evitar hasta donde sea posible el arranque y la operación simultánea de motores, sobre todo los de mediana y gran capacidad, para disminuir el valor máximo de la demanda.
15. Utilizar arrancadores a tensión reducida, en aquellos motores que realicen un número elevado de arranques. Con esto se evita un calentamiento

excesivo en los conductores y se logra disminuir las pérdidas durante la aceleración.

- 16.** Utilizar arrancadores estrella-delta o de devanado partido, como alternativa de los arrancadores a tensión reducida cuando la carga impulsada no requiera de alto par de arranque. Son más económicos y eficientes en términos de energía, pero tienen el inconveniente de que el par de arranque se reduce notoriamente.
- 17.** Sustituir en los motores de rotor devanado, los reguladores con resistencias para el control de la velocidad, por reguladores electrónicos más eficientes. En las resistencias se llega a consumir hasta un 20% de la potencia que el motor toma de la red.
- 18.** Instalar arrancadores electrónicos en lugar de los reóstatos convencionales para el arranque de los motores de corriente directa. Permiten una mayor eficiencia en el arranque con el consiguiente ahorro de energía.
- 19.** Sustituir motores con engranajes, poleas, bandas u otro tipo de transmisión, para reducir la velocidad del motor, por motores de velocidad ajustable con reguladores electrónicos.
- 20.** Instalar motores de velocidad ajustable con reguladores electrónicos, en aquellos accionamientos, en donde la carga sea variable y se pueda controlar ajustando la velocidad. Por ejemplo en sistemas de bombeo o compresión que deben suministrar caudales variables y que para hacerlo utilicen válvulas u otros dispositivos de control. La eficiencia total del motor y su carga se eleva notablemente con ahorros importantes de energía.
- 21.** Evaluar la posibilidad de conectar la ventilación solamente durante las bajas velocidades, en aquellos motores de velocidad ajustable y ventilación separada provista por equipos auxiliares. Con esto se puede reducir el consumo de energía en el sistema de ventilación.
- 22.** Preferir el acoplamiento individual, en accionamientos con un grupo de, motores, así se consigue mejor que cada motor trabaje lo más cerca posible de su máxima carga.

- 23.** Acoplar directamente el motor a la carga siempre que el accionamiento lo permita. Con esto se evitan pérdidas en el mecanismo de transmisión.
- 24.** Instalar acoplamientos flexibles en aquellos motores sometidos a un número elevado de arranques súbitos. Con esto se pueden atenuar los efectos de una alineación defectuosa, reducir los esfuerzos de torsión en la flecha del motor y disminuir las pérdidas por fricción.
- 25.** Instalar equipos de control de la temperatura del aceite de lubricación de cojinetes en los motores de gran capacidad a fin de minimizar las pérdidas por fricción y elevar la eficiencia.
- 26.** Mantener en buen estado y correctamente ajustados los equipos de protección contra sobrecalentamientos o sobrecargas en los motores. Los protegen de daños mayores y evitan que operen con baja eficiencia.
- 27.** Revisar periódicamente las conexiones del motor, junto con las de su arrancador y demás accesorios. Conexiones flojas o mal realizadas con frecuencia originan un mal funcionamiento del motor y ocasionan pérdidas por disipación de calor.
- 28.** Mantener en buen estado los porta escobillas, escobillas, conmutadores y anillos colectores en motores de corriente directa, síncronos y de rotor devanado. Un asentamiento incorrecto de las escobillas sobre el conmutador en los anillos colectores, provoca sobrecalentamientos y pérdidas de energía.
- 29.** Mantener en óptimas condiciones los sistemas de ventilación y enfriamiento de los motores, para evitar sobrecalentamientos que puedan aumentar las pérdidas en los conductores del motor y dañar los aislamientos.
- 30.** Verificar periódicamente la alineación del motor con la carga impulsada. Una alineación defectuosa puede incrementar las pérdidas por rozamiento y en caso extremo ocasionar daños mayores en el motor y en la carga.
- 31.** Reparar o cambiar los ejes del motor y de la transmisión, si se han doblado por sobrecarga o por mal uso. Un eje en mal estado incrementa las pérdidas

por fricción y puede ocasionar daños severos sobre todo en los cojinetes del motor.

- 32.** Mantener en buen estado los medios de transmisión entre el motor y la carga, tales como: poleas, engranes, bandas y cadenas. Si estos no se encuentran en condiciones apropiadas o su instalación es incorrecta, pueden ocasionar daños importantes, además de representar una carga inútil para el motor.
- 33.** Mantener en óptimas condiciones los cojinetes del motor. Una cantidad considerable de energía se pierde en cojinetes en mal estado o si su lubricación es inadecuada (insuficiente o excesiva). Repárelos o sustitúyalos si tienen algún desperfecto y siga las instrucciones del fabricante para lograr una correcta lubricación.
- 34.** Efectuar rutinariamente la limpieza del motor, con el propósito de eliminar la suciedad, el polvo y objetos extraños, que impidan su óptimo funcionamiento.
- 35.** Mantener actualizados los manuales de operación de los motores, incorporando en éstos las modificaciones que tengan lugar.
- 36.** Colocar carteles con instrucciones concretas para los operarios, con la finalidad de que los motores operen con la mayor seguridad y eficiencia.

## BIBLIOGRAFÍA

AHERN, John. Exergy method of energy systems analysis. USA: Umi, 1980. p. 127.

BAENA AMÍN, Camilo. Incentivos regulatorios. Bogotá: Departamento de derecho minero energético 2004. <http://www.uexternado.edu.co/faceuno>

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

CAMPOS AVELLA, Juan Carlos. Eficiencia energética. Barranquilla: Departamento de ingeniería mecánica, 2004. <http://www.uniatlantico.edu.co/inge>

CATON J., 2000. On the destruction of availability (exergy) due to combustion processes-with specific application to internal-combustion engines energy. USA, 2000. p. 1907-1117.

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

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Eficiencia en sistemas de bombeo. México: 2003. <http://cna.gob.mx/>

CONAE. Uso eficiente de la energía. México: ,2004. <http://conae.gob.mx/wb>

CORNELISSEN R. Thermodynamics and sustainable development: the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility. Netherlands.1997. Ph.D. Thesis, University of Twente. <http://Cornelissen.neth>

Costa M., Schaeffer R. and Worrell E. Exergy accounting of energy and material flows in steel production systems.USA: energy, 2001. <http://costaenergy.us>

Cheftel J. Proteínas alimentarias, bioquímica, propiedades funcionales, valor nutritivo, modificaciones químicas. Zaragoza: Acribia, 1989. <http://bioquimichefel.se>

Doldersum A. Exergy analysis proves viability of process modifications. in: Journal of energy conversion & management. USA. Vol. 39, no16-18 (may 1997); p. 1781-1789.

Jones J. y Dugan R. Ingeniería termodinamica.USA: Prentice Hall ,1997. p.47.

Fang Z., Larson D.L., Fleischmen G,. Exergy analysis of a milk processing System. in American Society of Agricultural Engineers. New york. Vol. 38, no 6 (September 1995); p. 1825-1832.

Fernández-Parra M.I., Nebra S. A.,. The Exergy of Sugar Cane Juice and Bagasse: Proposal of Calculation Method. España: 2004 <http://ecos2004.imp.mx/ecos2004>

GELVEZ F, Julio. Ahorro de Energía. Bucaramanga: Ediciones UIS. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 1992. p 22.

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

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MANEJO EFICIENTE DE LA ENERGIA ELÉCTRICA. Modelación y metodología para estudios de puesta a tierra. Medellín: Gimel.no 25(enero. 2002) p. 20

Hinderink A.P., Kerkhof F.P.J., Lie A.B.K., De Swaan Arons J. and Van Der Kooi H.J.,. Exergy analysis with a flow sheeting simulator-I. Theory calculating exergies of material streams. in: Journal of Chemical Engineering Science. Oslo. Vol. 51, no 20 (may 1996) p. 4963-4700.

IEC 60020-2 parte 1

IEEE, Standard 43 -1974, 80 -1980,142 -1982

IES. Lighting handbook. USA: Illuminating Engineering Society of north America, 1981.Vol.2

NTC 2050 código eléctrico colombiano. Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación.

Karakus A.A., Boyar S., Akdeniz R.C. and Hepbasli A. An exergy analysis in a mixed feed industry: evaluation of an extruder pellet line. Rouse: EE & AE', 2002. <http://karahusanalysisexergi.ro>

Kotas T. J.,. The exergy method of thermal plants. USA: Krieger Publishing Company,1995. <http://kotas.es>

Lozano M. y Valero A. Análisis energético y exergético de calderas de vapor. Zaragoza: Conferencia nacional de ahorro energético, 1982.

MEZA, Julio y VEGA, Raúl. Uso racional de la energía eléctrica en el sector metalmecánico. Bucaramanga, 1993. p. 147. Proyecto de grado para optar el título de ingeniero Electricista. Dirigido por el Ingeniero Ciro Jurado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de fisicomecánicas. Escuela de Ing. Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

NEMA, Standard MG, part 18, p.7, 1980

PROCOBRE PERÚ. Uso eficiente de la energía eléctrica. [en línea]. Perú: Procobre, 2004. [http://www.procobreperu.org/pub\\_ene\\_optimizand2003\\_1.htm](http://www.procobreperu.org/pub_ene_optimizand2003_1.htm)

Quijano J.. Exergy analysis for the Ahuacachapan and Berlin Geothermal Fields. El Salvador: 2000. [http://cibernetia.com/tesis\\_](http://cibernetia.com/tesis_)

RETIE. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. COLOMBIA.2005

Rivero R., y Anaya A. Exergy analysis of a distillation tower for crude oil fractionation. Computer Aided Energy Systems Analysis.[on line]. España:1990. <http://anayaexergy.se>

Rostein E., 1983. The exergy balance: a diagnostic tool for energy optimization. in: Journal of Food Science.USA. no.48 (January. 1983); p 945-950.

SEGURA, José. Termodinámica técnica. España: Reverte, 1988. p. 211-229

SILVANIA. Catalogo de Iluminación. Colombia: silvania, 2004. 50 p.

Sciubba E., Beyond thermoeconomics? The concept of extended exergy accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. in: Exergy, an international journal. Sweden. (may, 2001); p. 68-84.

Szargut J., Morris D.R. and Steward F. R. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical process. USA: Hemisphere Publishing, 1988.

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

ZEMANSKY, M.w. Termodinámica técnica fundamental. España: Reverté, 1972. p. 149.

# ***ANEXOS***

**Anexo 1.** Ley URE y decreto 3683

**DIARIO OFICIAL 44573**

**LEY 697 DE 2001**

**(octubre 3)**

Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.

El Congreso de Colombia, DECRETA:

**Artículo 1°.** Declárase el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, fundamental para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales.

**Artículo 2°.** El Estado debe establecer las normas e infraestructura necesarias para el cabal cumplimiento de la presente ley, creando la estructura legal, técnica, económica y financiera necesaria para lograr el desarrollo de proyectos concretos, URE, a corto, mediano y largo plazo, económica y ambientalmente viables asegurando el desarrollo sostenible, al tiempo que generen la conciencia URE y el conocimiento y utilización de formas alternativas de energía.

**Artículo 3°.** Definiciones. Para efectos de interpretar y aplicar la presente ley se entiende por:

1. URE: Es el aprovechamiento óptimo de la energía en todas y cada una de las

cadena energética, desde la selección de la fuente energética, su producción, transformación, transporte, distribución, y consumo incluyendo su reutilización cuando sea posible, buscando en todas y cada una de las actividades, de la cadena el desarrollo sostenible.

2. Uso eficiente de la energía: Es la utilización de la energía, de tal manera que se obtenga la mayor eficiencia energética, bien sea de una forma original de energía y/o durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución y consumo de las diferentes formas de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad, vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables.

3. Desarrollo sostenible: Se entiende por desarrollo sostenible el que conduzca al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de la vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades.

4. Aprovechamiento óptimo: Consiste en buscar la mayor relación beneficio-costos en todas las actividades que involucren el uso eficiente de la energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables.

5. Fuente energética: Todo elemento físico del cual podemos obtener energía, con el objeto de aprovecharla. Se dividen en fuentes energéticas convencionales y no convencionales.

6. Cadena Energética: Es el conjunto de todos los procesos y actividades tendientes al aprovechamiento de la energía que comienza con la fuente energética misma y se extiende hasta su uso final.

7. Eficiencia Energética: Es la relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables.

8. Fuentes convencionales de energía: Para efectos de la presente ley son fuentes convencionales de energía aquellas utilizadas de forma intensiva y ampliamente comercializadas en el país.

9. Fuentes no convencionales de energía: Para efectos de la presente ley son fuentes no convencionales de energía, aquellas fuentes de energía disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente.

10. Energía Solar: Llámese energía solar, a la energía transportada por las ondas electromagnéticas provenientes del sol.

11. Energía Eólica: Llámese energía eólica, a la energía que puede obtenerse de las corrientes de viento.

12. Geotérmica: Es la energía que puede obtenerse del calor del subsuelo terrestre.

13. Biomasa: Es cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico y toda materia vegetal originada por el proceso de fotosíntesis, así como de los procesos metabólicos de los organismos heterótrofos.

14. Pequeños aprovechamientos hidroenergéticos: Es la energía potencial de un caudal hidráulico en un salto determinado que no supere el equivalente a los 10

MW.

**Artículo 4°.** Entidad responsable. El Ministerio de Minas y Energía, será la entidad responsable de promover, organizar, asegurar el desarrollo y el seguimiento de los programas de uso racional y eficiente de la energía de acuerdo a lo dispuesto en la presente ley, y cuyo objetivo es:

1. Promover y asesorar los proyectos URE, presentados por personas naturales o jurídicas de derecho público o privado, de acuerdo con los lineamientos del programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás formas de energía no convencionales (PROURE), estudiando la viabilidad económica, financiera, tecnológica y ambiental.

2. Promover el uso de energías no convencionales dentro del programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás formas de Energía no Convencionales (PROURE), estudiando la viabilidad tecnológica, ambiental y económica.

**Artículo 5°.** Creación de PROURE. Créase el Programa de Uso Racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales "PROURE", que diseñará el Ministerio de Minas y Energía, cuyo objeto es aplicar gradualmente programas para que toda la cadena energética, esté cumpliendo permanentemente con los niveles mínimos de eficiencia energética y sin perjuicio de lo dispuesto en la normatividad vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables.

**Artículo 6°.** Obligaciones especiales de las empresas de servicios públicos. Además de las obligaciones que se desprendan de programas particulares que se diseñen, las Empresas de Servicios Públicos que generen, suministren y comercialicen energía eléctrica y gas y realicen programas URE, tendrán la obligación especial dentro del contexto de esta ley, de realizar programas URE para los usuarios considerando el aspecto técnico y financiero del mismo y

asesorar a sus usuarios para la implementación de los programas URE que deban realizar en cumplimiento de la presente ley.

**Artículo 7°.** Estímulos y sanciones.

1. Para la investigación: El Gobierno Nacional propenderá por la creación de programas de investigación en el Uso Racional y Eficiente de la Energía a través de Colciencias, según lo establecido en la Ley 29 de 1990 y el Decreto 393 de 1991.

2. Para la educación: El Icetex beneficiará con el otorgamiento de préstamos a los estudiantes que quieran estudiar carreras o especializaciones orientados en forma específica a aplicación en el campo URE.

3. Reconocimiento Público: El Gobierno Nacional creará distinciones para personas naturales o jurídicas, que se destaquen en el ámbito nacional en aplicación del URE; las cuales se otorgarán anualmente. El Ministerio de Minas y Energía dará amplio despliegue a los galardonados en los medios de comunicación más importantes del país.

4. Generales: El Gobierno Nacional establecerá los incentivos e impondrá las sanciones, de acuerdo con el programa de uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales, de acuerdo a las normas legales vigentes.

**Artículo 8°.** Divulgación. El Ministerio de Minas y Energía en coordinación con las entidades públicas y privadas pertinentes diseñará estrategias para la educación y fomento del Uso Racional y Eficiente de la Energía dentro de la ciudadanía, con base en campañas de información utilizando medios masivos de comunicación y otros canales idóneos. Las empresas de servicios públicos que presten servicios de Energía eléctrica y gas deberán imprimir en la carátula de recibo de factura o cobro, mensajes motivando, el Uso racional y Eficiente de la Energía y sus

beneficios con la preservación del medio ambiente.

**Artículo 9°.** Promoción del uso de fuentes no convencionales de energía. El Ministerio de Minas y Energía formulará los lineamientos de las políticas, estrategias e instrumentos para el fomento y la promoción de las fuentes no convencionales de energía, con prelación en las zonas no interconectadas.

**Artículo 10.** El Gobierno Nacional a través de los programas que se diseñen, incentivará y promoverá a las empresas que importen o produzcan piezas, calentadores, paneles solares, generadores de biogás, motores eólicos, y/o cualquier otra tecnología o producto que use como fuente total o parcial las energías no convencionales, ya sea con destino a la venta directa al público o a la producción de otros implementos, orientados en forma específica a proyectos en el campo URE, de acuerdo a las normas legales vigentes.

**Artículo 11.** Vigencia. La presente ley rige a partir de la fecha de su promulgación y deroga las disposiciones que le sean contrarias.

**El Presidente del honorable Senado de la República, Carlos García Orjuela.  
El Secretario General del honorable Senado de la República, Manuel  
Enríquez Rosero. El Presidente de la honorable Cámara de Representantes,  
Guillermo Gaviria Zapata.**

**El Secretario General de la honorable Cámara de Representantes,  
Angelino Lizcano Rivera.**

**REPUBLICA DE COLOMBIA – GOBIERNO NACIONAL**

**Publíquese y cúmplase. Dada en Bogotá, D. C., a 3 de octubre de 2001.**

**ANDRES PASTRANA ARANGO**

**El Ministro de Minas y Energía,  
Luis Ramiro Valencia Cossio.**

## **DECRETO 3683 DE 2003**

(Diciembre 19)

Por el cual se reglamenta la Ley 697 de 2001 y se crea una Comisión Intersectorial

El presidente de la república de Colombia, en ejercicio de sus facultades constitucionales y legales, en especial las establecidas en el artículo 189, numeral 11 de la constitución política y en el artículo 45 de la Ley 489 de 1998 y, en desarrollo de la Ley 697 de 2001, y

### **CONSIDERANDO:**

Que la constitución política de 1991 en su artículo 80, establece que el estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.

En el mismo sentido el artículo 334 prevé que la dirección general de la economía estará a cargo del estado y este intervendrá por mandato de la ley en la explotación de los recursos naturales.

Que la Ley 697 de 2001 declaró asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, el uso racional y eficiente de la energía así como el uso de fuentes energéticas no convencionales; declaración que impone la necesidad de expedir la reglamentación necesaria para garantizar que el país cuente con una normatividad que permita el uso racional y eficiente de los recursos energéticos existentes en el territorio nacional.

Que el objetivo de la Ley 697 de 2001 es promover y asesorar los proyectos URE y el uso de energías no convencionales, de acuerdo con los lineamientos del programa de uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no

convencionales, PROURE, estudiando su viabilidad económica, financiera, tecnológica y ambiental.

Que así mismo la Ley 697 ordenó que el Gobierno Nacional estableciera los estímulos que permitan desarrollar en el país el uso racional y eficiente de la energía y las fuentes energéticas no convencionales.

Que la Ley 155 de 1959 y el Decreto 3466 de 1982 introducen mecanismos de protección de los consumidores, en especial, respecto a la fijación de normas sobre la calidad de los productos.

Que la Ley 99 de 1993 en su artículo 5º, numerales 32 y 33, asigna al ministerio del medio ambiente, hoy ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, la función de promover la formulación de planes de reconversión industrial ligados a la implantación de tecnologías ambientalmente sanas, así como también promover, en coordinación con las entidades competentes y afines, la realización de programas de sustitución de los recursos naturales no renovables, para el desarrollo de tecnologías de generación de energías no contaminantes ni degradantes.

Que la ley general de educación, 115 de 1994 en su artículo 5º, establece como un fin de la educación, la adquisición de una conciencia para la conservación, protección y mejoramiento del medio ambiente, de la calidad de vida, del uso racional de los recursos naturales.

Que la Ley 142 de 1994, establece la obligación de informar a los usuarios acerca de la manera de utilizar con eficiencia y seguridad el servicio público respectivo, como función social de la propiedad en las entidades prestadoras de servicios públicos. (Artículo 11.4).

Que la Ley 633 de 2000, artículo 83, es del tenor que todos los recursos del fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas no interconectadas se utilizarán para financiar planes, programas y proyectos de inversión destinados a la construcción e instalación de la infraestructura eléctrica que permitan la ampliación de la cobertura y satisfacción de la demanda de energía en las zonas no interconectadas.

Que Colombia mediante la Ley 164 de 1994 ratificó la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático, la cual tiene por objeto estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera,

Que dentro de los mecanismos que prevé la convención se encuentran herramientas para los países que buscan promover y apoyar la cooperación para el desarrollo, la aplicación y la difusión, incluida la transferencia, de tecnologías, prácticas y procesos que controlen, reduzcan o prevengan las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero en los sectores pertinentes, entre ellos la energía, el transporte, la industria, la agricultura, la silvicultura y la gestión de desechos.

Que los proyectos a los que hace mención directa e indirectamente el presente decreto pueden ser elegibles a los mercados de reducciones de emisiones verificadas de gases de efecto invernadero.

Que en el plan de implementación de la cumbre mundial sobre desarrollo sostenible realizada en Johannesburgo en el 2002, en la cual Colombia participó, se establece que el acceso a la energía facilita la erradicación de la pobreza y que para esto se deben incluir medidas relacionadas con el uso eficiente de energía, fuentes renovables de energía, diversificación de fuentes energéticas, investigación y desarrollo en tecnologías de uso eficiente de energía y políticas que reduzcan distorsiones en el mercado energético, entre otras.

DECRETA:

## TITULO PRELIMINAR

Artículo 1°. *Objetivo.* El objetivo del presente decreto es reglamentar el uso racional y eficiente de la energía, de tal manera que se tenga la mayor eficiencia energética para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad del mercado energético colombiano, la protección al consumidor y la promoción de fuentes no convencionales de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables.

Artículo 2°. *Definiciones.* Además de las definiciones contenidas en la Ley 697 de 2001, para efectos del presente decreto, se tendrán en cuenta las siguientes:

**Cogeneración:** Es el proceso mediante el cual a partir de una misma fuente energética se produce en forma combinada energía térmica y eléctrica, en procesos productivos industriales y/o comerciales para el consumo propio o de terceros y cuyos excedentes pueden ser vendidos o entregados en la red.

**Cogenerador:** Es la persona natural o jurídica que produce y aprovecha la energía térmica y la eléctrica resultante del proceso de cogeneración, quien puede además vender sus excedentes energéticos o comprarlos en caso de faltantes, y que puede o no ser el propietario del sistema de cogeneración.

**Fuentes no convencionales de energía:** Son aquellas fuentes disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran fuentes no convencionales de energía, entre otras, la energía solar, energía eólica, energía geotérmica, energía proveniente de fuentes

de biomasa, pequeños aprovechamientos hidroenergéticos, energía proveniente de los océanos.

**Servicios energéticos:** Es una gama de servicios técnicos y comerciales que buscan optimizar y/o reducir el consumo de toda forma de energía por parte de los usuarios finales. Para el caso del servicio público de energía eléctrica y gas es un servicio inherente.

Artículo 3°. *Campo de aplicación.* El presente decreto se aplica a toda la cadena de energéticos convencionales y no convencionales del territorio nacional.

## TITULO I

### ESTRUCTURA INSTITUCIONAL

#### CAPITULO I

##### **Gestión Ministerio de Minas y Energía**

Artículo 4°. El ministerio de minas y energía, formulará los lineamientos de las políticas y diseñará los instrumentos para el fomento y la promoción de las fuentes no convencionales de energía, con prelación en las zonas no interconectadas; así como la ejecución de proyectos en eficiencia energética en Colombia; para lo cual realizará las gestiones necesarias para definir estrategias comunes con otras entidades de la rama ejecutiva que desarrollen funciones relacionadas con el tema de uso racional de energía, con el objetivo de organizar y fortalecer el esquema institucional más adecuado para el cumplimiento de dicha gestión.

## CAPITULO II

### **Comisión Intersectorial para el uso racional y eficiente de la energía y fuentes no convencionales de energía, CIURE**

Artículo 5°. *Comisión Intersectorial.* Créase la comisión intersectorial para el uso racional y eficiente de la energía y fuentes no convencionales de energía, CIURE, con el fin de asesorar y apoyar al ministerio de minas y energía en la coordinación de políticas sobre uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales en el sistema interconectado nacional y en las zonas no interconectadas.

Parágrafo. La comisión intersectorial será presidida por el ministro de minas y energía o su delegado.

Artículo 6°. *Integración.* La comisión intersectorial estará integrada por los siguientes miembros permanentes:

- a) El ministro de minas y energía o su delegado
- b) El ministro de comercio, industria y turismo o su delegado
- c) El ministro de ambiente, vivienda y desarrollo territorial o su delegado
- d) El director ejecutivo de la Comisión de regulación de energía eléctrica y gas, CREG, o su delegado
- e) El director del instituto colombiano para el desarrollo de la ciencia y la tecnología "Francisco José de Caldas", Colciencias, o su delegado

Parágrafo. Para efectos de cumplir con sus funciones y cuando lo estime necesario, la comisión podrá apoyarse en otras entidades públicas de la rama ejecutiva del orden nacional, que tengan competencia en el tema o cuya participación resulte de utilidad de acuerdo con el asunto a tratar. Estos tendrán la calidad de invitados.

Artículo 7°. *Secretaría Técnica*. La comisión intersectorial contará con una secretaría técnica que será ejercida por la unidad de planeación minero energética, UPME, y tendrá a su cargo la coordinación de las sesiones y los grupos de trabajo, la preparación de documentos y la elaboración de las actas respectivas.

Artículo 8°. *Mecanismos de participación*. La Comisión podrá citar a las sesiones en calidad de invitados, a los representantes de los gremios, empresas, ONG, centros tecnológicos, universidades o consumidores que tengan relación directa o indirecta con la temática del uso racional y eficiente de la energía y fuentes no convencionales de energía.

Artículo 9°. *Objeto*. La comisión intersectorial se constituye como una instancia de asesoría, consulta y apoyo del ministerio de minas y energía, en el desarrollo de las siguientes funciones:

- a) Coordinar las políticas del uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales de energía que diseñen cada una de las entidades, en el ámbito de su competencia
- b) Impartir orientación superior a las entidades de la rama ejecutiva del poder público, que desarrollen funciones relacionadas con el uso racional y eficiente de energía y las fuentes no convencionales de energía

- c) Impulsar los programas y proyectos sobre uso racional y eficiente de energía, cogeneración y fuentes no convencionales de energía
- d) Impartir lineamientos específicos para el diseño, implementación y seguimiento del programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE;
- e) Efectuar el seguimiento de las metas, y variables energéticas y económicas que permitan medir el avance en la implementación del programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE
- f) Coordinar la consecución de recursos nacionales o internacionales para desarrollar los programas y proyectos sobre uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales de energía, así como definir las estrategias que permitan la identificación de nuevas fuentes y/o la consolidación de las existentes
- g) Estudiar, recomendar, hacer seguimiento y coordinar con las entidades competentes el otorgamiento de estímulos relacionados con el uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales de energía
- h) Apoyar el desarrollo de programas de eficiencia energética para el transporte de pasajeros en los centros urbanos y para el transporte de carga
- i) Seleccionar a las personas naturales o jurídicas que deban ser galardonadas con la orden al mérito URE
- j) La Comisión Intersectorial, además asesorará al Gobierno para la toma de decisiones estratégicas en el contexto de los objetivos de la ley y en condiciones de crisis del sector energético.

Parágrafo. La Comisión de que trata el presente artículo, deberá adoptar su propio reglamento de funcionamiento, en un término de dos (2) meses contados a partir de la publicación del presente decreto en el **Diario Oficial**.

Artículo 10. *Funcionamiento*. La comisión intersectorial se reunirá ordinariamente una (1) vez cada trimestre.

La comisión podrá deliberar cuando se encuentren presentes por lo menos tres de sus miembros y decidirá con el voto favorable de la mitad más uno de los votos presentes.

### CAPITULO III

#### **Mecanismo institucional de promoción**

Artículo 11. *Lineamientos generales del programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE*. Para el diseño del programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE, el ministerio de minas y energía tendrá en cuenta aspectos sociales, ambientales, culturales, informativos, financieros y técnicos, a fin de crear las condiciones del uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales de energía, según los siguientes criterios:

- a) Fomentar la utilización de fuentes energéticas convencionales y no convencionales con criterios de uso racional y eficiente, incluso a través de sistemas de cogeneración
  
- b) Tener en cuenta que el programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE, es un elemento contributivo a la competitividad de la economía colombiana

c) Fomentar una cultura nacional de uso racional y eficiente de la energía y uso de fuentes no convencionales de energía

d) Generar beneficios reales y una adecuada protección a los consumidores y usuarios

e) Fomentar la modernización e incorporación de tecnologías y procesos eficientes en la cadena de suministro y uso de los energéticos

f) Fomentar el uso de energéticos eficientes, económicos y de bajo impacto ambiental

Parágrafo. Para el diseño del programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE, el ministerio de minas y energía podrá contar con la participación de los distintos agentes, públicos y privados de cada una de las cadenas energéticas

Artículo 12. *Alcance de la promoción.* El alcance de la promoción del programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE, se orientará al desarrollo de las siguientes actividades:

a) Celebrar convenios administrativos con otras entidades que se relacionen con el tema

b) Convocar a los gremios, universidades, organismos no gubernamentales, y centros de desarrollo tecnológico con el fin de lograr acuerdos para la ejecución de programas del programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE

c) Crear las condiciones para que se desarrollen los convenios y programas PROURE y en general el mercado URE en Colombia

d) Propender por la utilización del gas natural en el sector residencial, industrial, comercial y vehicular, de manera que se dé cumplimiento a unas metas de demanda, que establecerá el programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE, para ser logradas en forma gradual

e) Impulsar estrategias que permitan la prestación de servicios energéticos por parte de las empresas de servicios públicos y el surgimiento de empresas de servicios energéticos

f) Promover esquemas sostenibles que permitan el surgimiento y fortalecimiento de entidades ejecutoras de proyectos de uso racional y eficiente de energía

g) Promover la constitución de fondos voluntarios y celebrar acuerdos de la misma naturaleza con la industria, las empresas de servicios públicos, los gremios, las entidades de cooperación internacional y otras para el desarrollo de programas y actividades de apoyo al cumplimiento de los objetivos de la ley;

h) Las demás necesarias para el logro de la promoción del programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE

Parágrafo 1º. El ministerio de minas y energía diseñará un programa acompañado de proyectos piloto para la promoción de fuentes renovables en las zonas no interconectadas, ZNI, para ser presentado ante el fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas no Interconectadas, FAZNI. Dichos programas serán prioridad de acuerdo con lo establecido en la Ley 697 de 2001 y harán parte del programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE.

Parágrafo 2°. Colciencias presentará al fondo de apoyo financiero para la energización de las Zonas no Interconectadas, FAZNI, planes programas y proyectos para la investigación y desarrollo tecnológico de fuentes renovables en las zonas no interconectadas, ZNI. Dichos programas serán prioridad de acuerdo con lo establecido en la Ley 697 de 2001 y harán parte del Programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE.

## TITULO II

### ESTIMULOS

#### CAPITULO I

##### **Estímulos para la investigación y la educación**

Artículo 13. *Estímulos para la investigación.* Colciencias, a través de los programas nacionales del sistema nacional de ciencia y tecnología que sean pertinentes, desarrollará estrategias y acciones en conjunto con otras entidades, para crear líneas de investigación y desarrollo tecnológico en el uso racional y eficiente de la energía y/o fuentes no convencionales de energía, en un término no mayor a seis (6) meses contados a partir de la publicación del presente decreto en el **Diario Oficial**.

Artículo 14. *Estímulos para la educación.* El Icetex implementará el otorgamiento de préstamos a estudiantes de carreras o especializaciones relacionadas con el tema de uso racional y eficiente de la energía y/o fuentes no convencionales de energía en un término de seis (6) meses contados a partir de la publicación del presente decreto en el **Diario Oficial**. Así mismo, organizará un sistema de información que contenga la oferta de programas de posgrados nacionales e

internacionales en relación con el uso eficiente y racional de la energía y/o fuentes no convencionales de energía.

## CAPITULO II

### **Reconocimientos**

*Artículo 15. Creación de la Condecoración al uso racional y eficiente de la energía y fuentes no convencionales.* En desarrollo del numeral 3 del artículo 7º de la Ley 697 de 2001, créase la orden al mérito URE para distinguir y estimular a quienes se destaquen por el uso racional y eficiente de la energía y fuentes no convencionales.

El otorgamiento de esta condecoración, se hará mediante decreto ejecutivo, a propuesta del ministerio de minas y energía.

Esta condecoración se otorgará en las siguientes categorías:

- a) Categoría de industria y comercio: Modalidad que se concederá a las personas jurídicas que se destaquen en el ámbito nacional en la aplicación del URE
- b) Categoría de investigación: Modalidad que se concederá a las personas naturales y jurídicas que se dediquen a la investigación sobre uso racional y eficiente de la energía y fuentes no convencionales de energía
- c) Categoría de enseñanza especializada: Modalidad que se concederá a las instituciones de educación formal desde la educación primaria, secundaria, pregrado, posgrado, a nivel de especialización o maestría en las que se incluyan

asignaturas dedicadas a la enseñanza y divulgación del uso racional y eficiente de la energía y fuentes no convencionales de energía.

Artículo 16. *Requisitos para obtener la distinción.* La orden al mérito URE se otorgará a quienes reúnan los siguientes requisitos:

a) En la categoría de industria y comercio: Haberse destacado a nivel nacional en la aplicación de un programa URE

b) En la categoría de investigación: Haber realizado por lo menos un proyecto de investigación sobre el uso racional y eficiente de la energía y fuentes no convencionales de energía y manifestar por escrito que es autor de la obra y responder de esa titularidad ante terceros. Cuando se trate de grupos, Centros de desarrollo tecnológico o instituciones de Investigación, deben estar reconocidos por Colciencias

c) En la categoría de enseñanza: Contar con programa de educación formal desde la educación primaria, secundaria, pregrado, posgrado, a nivel de especialización o maestría en el que se enseñe y divulgue el uso racional y eficiente de la energía y fuentes no convencionales de energía.

Artículo 17. *Procedimiento.* Para el otorgamiento del título honorífico, adóptase el siguiente procedimiento:

a) Las personas que aspiren a obtener el título honorífico se inscribirán ante la UPME, especificando la categoría en la que desean participar y anexando los documentos que demuestren el cumplimiento de los requisitos establecidos en el presente decreto. Las inscripciones se realizarán en el mes de enero de cada año;

b) La UPME realizará una evaluación previa de los aspirantes con apoyo en el concepto del consejo del programa nacional de energía y minería de colciencias para su posterior remisión a la comisión intersectorial, CIURE

c) En el mes de julio de cada año la comisión intersectorial enviará el resultado al ministerio de minas y energía, a fin de que esta cartera proponga al presidente de la república el otorgamiento de la condecoración

d) El ministerio de minas y energía dará amplio despliegue a los galardonados en los medios de comunicación más importantes del país.

### TITULO III

#### MECANISMOS DE FINANCIACION

Artículo 18. *Financiamiento del programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE.* El Ministerio de minas y energía, sus unidades administrativas especiales CREG y UPME, en coordinación con las entidades públicas pertinentes, identificarán e implementarán los modelos y fuentes de financiación para la gestión y ejecución del programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE, y los aplicables a los proyectos de uso racional y eficiente de energía, URE, y de promoción de energías no convencionales, de conformidad con los lineamientos establecidos en el programa de uso racional y eficiente de energía y demás formas de energía no convencionales, PROURE.

Parágrafo. Para el cumplimiento de lo establecido en el presente artículo, las entidades enunciadas, contarán con un plazo no superior de cuatro (4) meses contados a partir de la publicación del presente decreto.

## TITULO IV

### OBLIGACIONES DE LAS EMPRESAS Y OTRAS ENTIDADES Y DERECHOS DE LOS CONSUMIDORES

#### CAPITULO I

##### **Obligaciones de las empresas de servicios públicos y entidades de la rama ejecutiva del orden nacional**

Artículo 19. *Obligaciones de las empresas de servicios públicos.* Las empresas de servicios públicos que generen, suministren y comercialicen energía eléctrica y gas y realicen programas URE, deberán presentar cada tres (3) años información de los aspectos técnicos y financieros de sus programas URE a la unidad de planeación minero energética, UPME, para su seguimiento, análisis e incorporación en la planeación energética nacional.

Artículo 20. *Contenido de las facturas del servicio público domiciliario de energía eléctrica y gas.* Las empresas de servicios públicos que presten servicios de energía eléctrica y gas deberán imprimir en la carátula de recibo de factura o cobro, mensajes motivando el uso racional y eficiente de la energía y sus beneficios con la preservación del medio ambiente.

Parágrafo. De conformidad con el inciso séptimo del artículo 146 de la Ley 142 de 1994, las empresas de energía y gas, podrán incluir el cobro de otros servicios como los servicios energéticos en la factura del servicio público domiciliario respectivo sin que se altere la fórmula tarifaria.

Artículo 21. *Obligaciones especiales de las entidades de la rama ejecutiva del orden nacional.* Las entidades de la rama ejecutiva del orden nacional del sector

central y descentralizadas por servicios a que hace referencia la Ley 489 de 1998, deberán motivar y fomentar la cultura de uso racional y eficiente de la energía.

## CAPITULO II

### **Derecho de los consumidores**

Artículo 22. *Derecho de información.* Con fundamento en el Decreto 070 de 2001, el ministerio de minas y energía en coordinación con las demás autoridades competentes, expedirá los reglamentos técnicos de eficiencia energética que, entre otros aspectos, establecerán las condiciones para el porte de la etiqueta URE de los equipos de uso final de energía, la creación del sello de excelencia energética y las condiciones de comercialización de dichos equipos en lo relacionado con eficiencia energética, con el propósito de proteger los derechos de información de los consumidores.

## CAPITULO III

### **Aplicación de criterios URE para uso de otros energéticos**

Artículo 23. *Usos del petróleo crudo y/o sus mezclas.* A partir del primero de febrero de 2004 y con criterios de autoabastecimiento energético y de uso racional y eficiente de la energía, el petróleo crudo y/o sus mezclas que se explote en el territorio nacional y que se destine para consumo interno, solamente podrá ser utilizado para refinación.

Parágrafo 1°. Los refinadores comprarán el petróleo crudo y/o sus mezclas que se explote en el territorio nacional y que se destine para consumo interno, a precios de referencia internacional acordados entre las partes.

Parágrafo 2°. La restricción señalada en el presente artículo no aplica para crudos y/o mezclas de crudos con calidad igual o inferior a 14 grados API, excepto en lo relacionado con el contenido de azufre de que trata el artículo 1° del decreto 2107 del 30 de noviembre de 1995, o la norma que lo aclare, modifique o derogue.

No obstante lo anterior, los interesados previo a la comercialización de dichos productos, presentarán para aprobación y registro ante el ministerio de minas y energía, dirección de hidrocarburos, la solicitud respectiva, la cual deberá indicar detalladamente la logística asociada al referido proceso de comercialización y los consumidores finales de dichos crudos y/o mezclas de crudos.

En este sentido, las personas naturales o jurídicas que almacenen, manejen o distribuyan crudo o las mezclas que lo contengan, deberán cumplir como mínimo con lo dispuesto en los capítulos X, XI, XII del decreto 1895 del 15 de septiembre de 1973 y lo establecido en los decretos 283 de 1990 y 353 de 1991 o las normas que los aclaren, adicionen, modifiquen o deroguen.

Parágrafo 3°. Las personas naturales o jurídicas que transporten crudo o mezclas que lo contengan deberán portar una guía única, cuyo formato deberá comprender como mínimo lo descrito en el artículo 2° del decreto 300 del 15 de febrero de 1993 o las normas que lo aclaren, adicionen, modifiquen o deroguen. En el mismo sentido es obligación de las compañías encargadas de explotar el crudo, diligenciar la guía única de transporte de que trata el presente parágrafo.

## TITULO V

### DISPOSICIONES FINALES

Artículo 24. *Inventario de fuentes de energías convencionales y no convencionales.* La UPME hará un inventario de fuentes de energía convencionales y no convencionales que será tomado como referencia para la

formulación y estructuración de planes, programas y proyectos a consideración del comité de administración del FAZNI, en todo caso priorizando aquellos que utilicen fuentes no convencionales de energía.

Artículo 25. *Vigencia.* El presente decreto rige un mes después, contado a partir de la fecha de su publicación en el **Diario Oficial**.

Publíquese y cúmplase.

Dado en Bogotá, D. C., a 19 de diciembre de 2003.

ÁLVARO URIBE VÉLEZ

El Ministro de Minas y Energía,

*Luis Ernesto Mejía Castro.*

El Ministro de Comercio, Industria y Turismo,

*Jorge Humberto Botero Angulo.*

La Ministra de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial,

*Sandra Suárez Pérez.*

## **ANEXO 2.** Lista de chequeo típica

### 1. Transformadores.

- a) Tamaño del transformador \_\_\_\_\_
- b) El aislante líquido está nivelado en el transformador \_\_\_\_\_
- c) El aislante líquido es el adecuado para ser usado \_\_\_\_\_
- d) ¿Cuándo fue la última vez que se cambió o midió?
- e) Chequee la tensión de entrada y salida \_\_\_\_\_
- f) Chequee las condiciones de aislamiento \_\_\_\_\_
- g) Chequee la seguridad en las conexiones \_\_\_\_\_
- h) Chequee el calibre apropiado de la conexión \_\_\_\_\_
- i) Están las líneas del transformador a los interruptores correctamente diseñadas \_\_\_\_\_
- j) Si las líneas de transmisión son de aluminio chequee las condiciones más a menudo \_\_\_\_\_

### 2. Interruptores principales.

- a) Están los circuitos debidamente protegidos (chequee si tiene protección correcta de breakers) \_\_\_\_\_
- b) Chequee la seguridad en las conexiones \_\_\_\_\_
- c) Están las líneas de salida debidamente diseñadas \_\_\_\_\_
- d) Están en buenas condiciones los contactos \_\_\_\_\_

e) Conservación general del sitio (chequeo por humedad, escape en sólidos, suciedad, ventilación, calor excesivo) \_\_\_\_\_

### 3. Equipo eléctrico de trabajo.

a) ¿Están los circuitos debidamente protegidos? \_\_\_\_\_

b) ¿Son correctas y seguras las conexiones? \_\_\_\_\_

c) Tiene usted las lecturas de tensión e intensidad en la entrada del motor \_\_\_\_\_

d) ¿Está limpio el motor? \_\_\_\_\_

e) Están los rodamientos en buenas condiciones y debidamente lubricados \_\_\_\_\_

f) ¿Está el motor debidamente conectado a tierra? \_\_\_\_\_

g) ¿Está disipando calor? \_\_\_\_\_

### 4. Todos los equipos de conducción

a) Chequee seguridad en las conexiones \_\_\_\_\_

b) Chequeo de tierras \_\_\_\_\_

c) Chequee la entrada de tensión e intensidad del motor \_\_\_\_\_

d) Están bien diseñadas las líneas de salida \_\_\_\_\_

e) Chequee el nivel de aceite, tensión y condiciones generales de reducción de velocidad \_\_\_\_\_

f) Chequeo adecuado del aislamiento \_\_\_\_\_

g) Chequee viraje de correas por excesivo rodamiento\_\_\_\_\_

#### 5. Bombas.

a) Chequee seguridad en las conexiones\_\_\_\_\_

b) Chequeo de tensión e intensidad en el motor\_\_\_\_\_

c) ¿Son las líneas de entrada correctamente dimensionadas? \_\_\_\_\_

d) Chequeo por mantenimiento propio\_\_\_\_\_

e) ¿Tiene la bomba la mínima cantidad de agua necesaria para su operación?\_\_\_\_\_

f) ¿Se tiene el mínimo número de líneas de agua conectadas necesariamente?\_\_\_\_\_

g) Chequeo de fugas en líneas de agua\_\_\_\_\_

h) Están sus tuberías con:

1. Mínima longitud posible\_\_\_\_\_

2. Hechas de buen material\_\_\_\_\_

3. Tienen diámetros correctos\_\_\_\_\_

4. Libres de curvas agudas\_\_\_\_\_

5. Todas diseñadas para el mínimo calor requerido\_\_\_\_\_

i) ¿El motor se recalienta?\_\_\_\_\_

#### 6. Miscelánea.

a) ¿Es aquí innecesario el uso de calentadores, iluminación, aire acondicionado?\_\_\_\_\_

b) ¿Están los compresores adecuadamente mantenidos?\_\_\_\_\_

c) ¿Están los compresores operando con la presión adecuada?\_\_\_\_\_

**Anexo 3. Pérdidas norma ICONTEC para transformadores trifásicos**

**TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS: Pérdidas norma ICONTEC NTC 818**

Potencia kVA	Pérdidas W año 1979	Pérdidas W año 1987	Pérdidas W año 1995
5	171	154	120
10	259	231	190
15	369	330	265
25	550	501	390
37.5	759	682	540
50	946	853	670
75	1,287	1,177	920
100	1,595	1,540	1,160
167.5	2,010	2,140	1,740

**TRANSFORMADORES TRIFASICOS: Pérdidas norma ICONTEC NTC 819**

Potencia kVA	Pérdidas W año 1979	Pérdidas W año 1987	Pérdidas W año 1995
15	539	501	390
30	891	831	650
40	1,271	1,177	890
75	1,848	1,738	1,355
112.5	2,629	2,470	1,905
150	3,300	3,108	2,410
225	4,576	4,466	3,505
300	5,852	5,720	4,440
400	7,446	7,310	5,660
500	8,965	8,828	6,870
630	11,000	10,835	8,425
750		13,101	90830
800	16,640	13,409	10,420

1.000	16,665	16,385	12,880
1.250	20,075	19,564	15,590
1.600	25,520	25,086	19,220
2.000	30,910	30,377	23,400

#### ANEXO 4. Letra de código

Letra de código	kva./HP	Letra de código	kVAp/HP	Letra de código	kVAp/HP
A	0.1 - 3.14	G	5.6 - 6.29	N	11.2 - 12.49
B	3.15 - 3.54	H	6.3 - 7.09	P	12.5 - 13.99
C	3.55 - 3.99	J	7.1 - 7.99	R	14.0 - 15.99
D	4.00 - 4.49	K	8.0 - 8.99	S	16.0 - 17.99
E	4.50 - 4.99	L	9.0 - 9.99	T	18.0 - 19.99
F	5.0 - 5.59	M	10.0 - 11.19	U	20.0 y más

**Anexo 5. Factor o constante “K” que sustituye al término  $(\tan\phi_2 - \tan\phi_1)$**

Factor de potencia inicial	Factor K														
	Factor de potencia deseado														
	0.86	0.87	0.88	0.89	0.9	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.66	0.54	0.57	0.59	0.62	0.65	0.68	0.71	0.74	0.77	0.81	0.84	0.88	0.93	0.99	1.13
0.67	0.51	0.54	0.56	0.59	0.62	0.65	0.68	0.71	0.74	0.77	0.81	0.85	0.90	0.96	1.10
0.68	0.48	0.51	0.53	0.56	0.59	0.62	0.65	0.68	0.71	0.75	0.78	0.82	0.87	0.93	1.07
0.69	0.45	0.48	0.50	0.53	0.56	0.59	0.62	0.65	0.68	0.72	0.75	0.79	0.84	0.90	1.04
0.70	0.42	0.45	0.48	0.50	0.53	0.56	0.59	0.62	0.65	0.69	0.72	0.77	0.81	0.87	1.02
0.71	0.39	0.42	0.45	0.48	0.50	0.53	0.56	0.59	0.62	0.66	0.70	0.74	0.78	0.84	0.99
0.72	0.37	0.39	0.42	0.45	0.48	0.50	0.53	0.56	0.60	0.63	0.67	0.71	0.76	0.82	0.96
0.73	0.34	0.37	0.39	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.64	0.68	0.73	0.79	0.93
0.74	0.31	0.34	0.36	0.39	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.58	0.61	0.65	0.70	0.76	0.90
0.75	0.28	0.31	0.34	0.37	0.39	0.42	0.45	0.48	0.51	0.55	0.59	0.63	0.67	0.73	0.88
0.76	0.26	0.28	0.31	0.34	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.52	0.56	0.60	0.65	0.71	0.85
0.77	0.23	0.26	0.28	0.31	0.34	0.37	0.40	0.43	0.46	0.50	0.53	0.57	0.62	0.68	0.82
0.78	0.20	0.23	0.26	0.29	0.31	0.34	0.37	0.40	0.43	0.47	0.51	0.55	0.59	0.66	0.80
0.79	0.18	0.20	0.23	0.26	0.29	0.32	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.52	0.57	0.63	0.77
0.80	0.15	0.18	0.21	0.23	0.26	0.29	0.32	0.35	0.38	0.42	0.45	0.49	0.54	0.60	0.75
0.81	0.13	0.15	0.18	0.21	0.24	0.26	0.29	0.32	0.36	0.39	0.43	0.47	0.52	0.58	0.72
0.82	0.10	0.13	0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30	0.33	0.36	0.40	0.44	0.49	0.55	0.69
0.83	0.07	0.10	0.13	0.16	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30	0.34	0.38	0.42	0.46	0.53	0.67
0.84	0.05	0.07	0.10	0.13	0.16	0.19	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.44	0.50	0.64
0.85	0.02	0.05	0.08	0.10	0.13	0.16	0.19	0.22	0.25	0.29	0.32	0.36	0.41	0.47	0.62
0.86	---	0.02	0.05	0.08	0.10	0.13	0.16	0.19	0.23	0.26	0.30	0.34	0.39	0.45	0.59
0.87	---	---	0.02	0.05	0.08	0.11	0.14	0.17	0.20	0.23	0.27	0.31	0.36	0.42	0.56
0.88	---	---	---	0.02	0.05	0.08	0.11	0.14	0.17	0.21	0.24	0.28	0.33	0.39	0.54
0.89	---	---	---	---	0.02	0.05	0.08	0.11	0.14	0.18	0.22	0.26	0.30	0.37	0.51
0.90	---	---	---	---	---	0.02	0.05	0.08	0.12	0.15	0.19	0.23	0.28	0.34	0.48
0.91	---	---	---	---	---	---	0.03	0.06	0.09	0.12	0.16	0.20	0.25	0.31	0.45
0.92	---	---	---	---	---	---	---	0.03	0.06	0.09	0.13	0.17	0.22	0.28	0.42
0.93	---	---	---	---	---	---	---	---	0.03	0.06	0.10	0.14	0.19	0.25	0.39
0.94	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.03	0.07	0.11	0.16	0.22	0.36
0.95	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.03	0.07	0.12	0.18	0.32
0.96	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.04	0.08	0.14	0.29
0.97	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.04	0.10	0.25
0.98	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.06	0.20
0.99	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.14

**Ejemplo.** Determinar la potencia reactiva necesaria para elevar el factor de potencia actual de 0.83 a 0.96 si la potencia promedio es de 720 kW.

- Localice el factor de potencia inicial 0.83
- Localice el factor de potencia deseado 0.96
- Localice el valor K donde confluyen el factor de potencia inicial y deseado
- $K = 0.38$
- Determine la potencia reactiva en kVAr

Potencia reactiva (Kva)= $P \cdot K$

Potencia reactiva =  $720 \times 0.38 = \mathbf{273.85 \text{ kVAR}}$

Buscar en listas de capacitores, el número de capacitores con determinadas potencias para que en conjunto, puedan suministrar los 273.85 kVAr requeridos.

**Anexo 6.** Niveles de iluminación en luxes recomendados por el RETIE

Exámenes:	<input type="checkbox"/>	<i>Iglesias</i>	<input type="checkbox"/>
Examen General	500	Altars	1000
Examen Urgencias	1000	Coros	300
Examen Odontológico	700	Nave central	300
Silla odontología-localizado	10000	<i>Oficinas</i>	<input type="checkbox"/>
Examen óptico	100	Recepción	300
Examen otorino	500	Circulación	200
Laboratorio	1000	Salas de juntas	700
<i>Instituciones educativas</i>	<input type="checkbox"/>	Archivos	300
Aulas de clase	500	Diseño gráfico	1500
Dibujo	1000	Contabilidad	1000
Sistemas	500	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Exámenes:	<input type="checkbox"/>	<i>Iglesias</i>	<input type="checkbox"/>
Examen General	500	Altars	1000
Examen Urgencias	1000	Coros	300
Examen Odontológico	700	Nave central	300
Silla odontología-localizado	10000	<i>Oficinas</i>	<input type="checkbox"/>
Examen óptico	100	Recepción	300
Examen otorino	500	Circulación	200
Laboratorio	1000	Salas de juntas	700
<i>Instituciones educativas</i>	<input type="checkbox"/>	Archivos	300
Aulas de clase	500	Diseño gráfico	1500
Dibujo	1000	Contabilidad	1000
Sistemas	500	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

<i>Oficinas de correo</i>	<input type="checkbox"/>	<i>Terminales de transporte</i>	<input type="checkbox"/>
Recepción	300	Taquillas	1000
Clasificación	1000	Salas de espera	300
<i>Restaurantes y cafeterías</i>	<input type="checkbox"/>	Abordajes	500
Autoservicios	1000	Plataformas	200
Cajas de pago	500	<i>Vitrinas</i>	<input type="checkbox"/>
Ambiente general	300	Diurno	1000
Ambiente íntimo	100	Nocturno	2500
Anuncios	500	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cocina comercial	700	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Teatros y salas de cine</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Previo e intermedios	50	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Accesos	200	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Salas de espera	50	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

<i>Tiendas y locales de venta</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ventas por dependiente	700	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ventas autoservicio	1000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mostradores y estantes:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Con dependiente	1000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Autoservicio	1500	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anuncios	2000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bodegas activas	200	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bodegas inactivas	50	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cargue y descargue	200	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Parqueo clientes	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## **ANEXO 7. Resultados de la lista de chequeo**

### 1. Transformadores.

- a) Tamaño del transformador \_\_\_ 12 MVA \_\_\_\_\_
- b) El aislante líquido está nivelado en el transformador \_\_\_ O.K \_\_\_\_\_
- c) El aislante líquido es el adecuado para ser usado \_\_\_ O.K \_\_\_\_\_
- d) ¿Cuándo fue la última vez que se cambió o midió? RTA: 4 MESES
- e) Chequee la tensión de entrada y salida \_\_\_ O.K \_\_\_\_\_
- f) Chequee las condiciones de aislamiento \_\_\_ O.K \_\_\_\_\_
- g) Chequee la seguridad en las conexiones \_\_\_ O.K \_\_\_\_\_
- h) Chequee el calibre apropiado de la conexión \_\_\_ O.K \_\_\_\_\_
- i) Están las líneas del transformador a los interruptores correctamente diseñadas \_\_\_ O.K \_\_\_\_\_
- j) Si las líneas de transmisión son de aluminio chequee las condiciones más a menudo \_\_\_ O.K \_\_\_\_\_

### 2. Interruptores principales.

- a) Están los circuitos debidamente protegidos (chequee si tiene protección correcta de breakers) \_\_\_ O.K \_\_\_\_\_
- b) Chequee la seguridad en las conexiones \_\_\_ O.K \_\_\_\_\_
- c) Están las líneas de salida debidamente diseñadas \_\_\_ O.K \_\_\_\_\_

d) Están en buenas condiciones los contactos \_\_O.K\_\_\_\_

e) Conservación general del sitio (chequeo por humedad, escape en sólidos, suciedad, ventilación, calor excesivo) \_\_O.K\_\_\_\_

### 3. Equipo eléctrico de trabajo.

a) ¿Están los circuitos debidamente protegidos? \_\_O.K\_\_\_\_

b) ¿Son correctas y seguras las conexiones? \_\_O.K\_\_\_\_

c) Tiene usted las lecturas de tensión e intensidad en la entrada del motor \_\_O.K\_\_\_\_

d) ¿Está limpio el motor? \_\_O.K\_\_\_\_

e) Están los rodamientos en buenas condiciones y debidamente lubricados \_\_O.K\_\_\_\_

f) ¿Está el motor debidamente conectado a tierra? \_\_O.K\_\_\_\_

g) ¿Está disipando calor? \_\_O.K\_\_\_\_

### 4. Todos los equipos de conducción

a) Chequee seguridad en las conexiones \_\_O.K\_\_\_\_

b) Chequeo de tierras \_\_O.K\_\_\_\_

c) Chequee la entrada de tensión e intensidad del motor \_\_O.K\_\_\_\_

d) Están bien diseñadas las líneas de salida \_\_O.K\_\_\_\_

e) Chequee el nivel de aceite y tensión \_\_O.K\_\_\_\_

f) Chequeo adecuado del aislamiento \_\_O.K\_\_\_\_

g) Chequee viraje de correas por excesivo rodamiento \_\_O.K\_\_\_\_

#### 5. Bombas.

a) Chequee seguridad en las conexiones \_\_O.K\_\_\_\_

b) Chequeo de tensión e intensidad en el motor \_\_O.K\_\_\_\_

c) ¿Son las líneas de entrada correctamente dimensionadas? \_\_O.K\_\_\_\_

d) Chequeo por mantenimiento propio \_\_O.K\_\_\_\_

e) ¿Tiene la bomba la mínima cantidad de agua necesaria para su operación? \_\_O.K\_\_\_\_

f) ¿Se tiene el mínimo número de líneas de agua conectadas necesariamente? \_\_O.K\_\_\_\_

g) Chequeo de fugas en líneas de agua \_\_X\_\_\_\_

h) Están sus tuberías con:

1. Mínima longitud posible \_\_O.K\_\_\_\_

2. Hechas de buen material \_\_O.K\_\_\_\_

3. Tienen diámetros correctos \_\_O.K\_\_\_\_

4. Libres de curvas agudas \_\_O.K\_\_\_\_

5. Todas diseñadas para el mínimo calor requerido \_\_O.K\_\_\_\_

i) ¿El motor se recalienta? \_\_O.K\_\_\_\_

6. Miscelánea.

a) ¿Es aquí innecesario el uso de calentadores, iluminación, aire acondicionado? \_\_X\_\_

b) ¿Están los compresores adecuadamente mantenidos? \_\_O.K\_\_

c) ¿Están los compresores operando con la presión adecuada? \_\_O.K\_\_

Estos resultados no muestran anomalías en la disposición de los equipos; se requiere indagar acerca de la operación de cada uno de ellos con el fin de identificar aquellos con mayor pérdida de energía