

**ANÁLISIS EXERGÉTICO EN CIRCUITOS ELÉCTRICOS DE LA SEDE
ADMINISTRATIVA UIS - BUCARICA**

CRISTIAN ANDRÉS DÍAZ DURÁN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2007**

**ANÁLISIS EXERGÉTICO EN CIRCUITOS ELÉCTRICOS DE LA SEDE
ADMINISTRATIVA UIS - BUCARICA**

CRISTIAN ANDRÉS DÍAZ DURÁN

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Electricista**

Director:

Dr. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

Codirector:

M.S.c. CARLOS ARTURO CÁRDENAS GUERRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2007

A ti Dios, por ser mi fortaleza y fuente de verdad
A mis padres, por la formación y el apoyo constante
A mis hermanos, como parte de la persona que soy
A Susana Marín, por ser el regalo maspreciado de parte de Dios
A mi tía Luz Mila, por la confianza y el respaldo
A Ricardo Montero y Alexis Marulanda, por enseñarme que las cosas
son posibles de realizar
A tí, Yesid Gómez (QEPD), porque me enseñaste el verdadero
significado de una amistad

“El hombre hace muchos planes, pero sólo se realiza el propósito divino”

Pro. 19:21

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Gabriel Ordóñez Plata, por sus valiosos aportes en los momentos más importantes del desarrollo de este proyecto.

De forma muy especial agradezco al M.S.c. Carlos Arturo Cárdenas Guerra por ser fortaleza en los momentos de incertidumbre, y quién ofreció el apoyo necesario para sobrepasar las adversidades.

En general, un agradecimiento a todas aquellas personas que una u otra manera aportaron su grano de arena en los diferentes aspectos de mi vida, y que hoy una vez se han podido condensar todos esos aportes, estos se ven reflejados en el desarrollo total de mi trabajo de grado.

“Un amigo es siempre afectuoso, y en tiempos de angustia es como un hermano”

Pro. 17:17

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Metodología.....	2
1.4 Objetivos.....	3
1.5 Estructura del documento	3
2. TEORÍA DEL COSTO EXERGÉTICO.....	5
2.1 Conceptos de la teoría del costo exergético.....	5
3. CARACTERIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA ENERGÉTICA.....	12
3.1 Descripción del sistema.....	12
3.2 Diagnóstico energético.....	15
3.3 Balance exergético de los elementos.....	20
3.3.1 Sistemas de iluminación.....	20
3.3.1.1 Nivel de desagregación y asignación de flujos.....	21
3.3.2 Sistemas de refrigeración.....	29
3.3.2.1 Nivel de desagregación y asignación de flujos.....	30
3.3.3 Sistemas informáticos.....	36
3.3.3.1 Nivel de desagregación y asignación de flujos.....	37
4. IMPLEMENTACIÓN DEL ANÁLISIS TERMOECONÓMICO EN CIRCUITOS ELÉCTRICOS.....	41

4.1	Criterios de selección de los circuitos analizados.....	41
4.1.1	Cálculo de potencia en los circuitos eléctricos.....	42
4.1.2	Cálculo de irreversibilidades en los circuitos eléctricos.....	46
4.2	Aplicación de los modelos para el análisis termoeconómico.....	49
4.2.1	Sistemas de refrigeración.....	49
4.2.1.1	Tablero P3-T5.....	49
4.2.1.2	Tablero P2-T2.....	52
4.2.2	Sistemas de iluminación.....	54
4.2.2.1	Tablero P3-T2.....	54
4.2.3	Sistemas informáticos.....	56
4.2.3.1	Tablero P3-T2.....	57
4.3	Análisis de resultados.....	59
4.4	Evaluación financiera.....	63
4.5	Propuesta para URE.....	66
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	74
	ANEXOS.....	76

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Matriz de incidencia de la planta de cogeneración.....	9
Tabla 2. Matriz de incidencia del sistema de refrigeración.....	11
Tabla 3. Datos de placa del transformador principal.....	12
Tabla 4. Información del suministro eléctrico.....	15
Tabla 5. Historial de consumos.....	16
Tabla 6. Cuadro de cargas T1.....	17
Tabla 7. Cuadro de cargas T2.....	18
Tabla 8. Cuadro de cargas T3.....	18
Tabla 9. Cuadro de cargas T4.....	18
Tabla 10. Cuadro de cargas de TG-1.....	18
Tabla 11. Mediciones de carga en los circuitos eléctricos.....	19
Tabla 12. Cuadro de carga Tele-UIS.....	20
Tabla 13. Flujos lámpara incandescente.....	22
Tabla 14. Flujos lámpara fluorescente.....	26
Tabla 15. Flujos sistema de refrigeración.....	31
Tabla 16. Flujos sistemas informáticos.....	38
Tabla 17. Corriente de neutro en tableros principales.....	43
Tabla 18. Corriente I_e en tableros principales.....	43
Tabla 19. Potencia en tableros de protección.....	44
Tabla 20. Potencia en cajas eléctricas de T2.....	44
Tabla 21. Potencia en cajas eléctricas de T3.....	45
Tabla 22. Potencia en cajas eléctricas de T1.....	45
Tabla 23. Irreversibilidades en tableros de protección.....	47
Tabla 24. Irreversibilidades en cajas eléctricas de T3.....	47
Tabla 25. Irreversibilidades en cajas eléctricas de T4.....	48
Tabla 26. Características climáticas de Bucaramanga (IDEAM).....	49

Tabla 27. Inventario de elementos, tablero P3-T5.....	50
Tabla 28. Resultados sistemas de refrigeración tablero P3-T5.....	51
Tabla 29. Inventario de elementos, tablero P2-T2.....	52
Tabla 30. Resultados sistemas de refrigeración tablero P2-T2.....	53
Tabla 31. Inventario de luminarias, tablero P3-T2.....	55
Tabla 32. Resultados sistemas de iluminación tablero P3-T2.....	55
Tabla 33. Inventario de sistemas informáticos, tablero P3-T2.....	57
Tabla 34. Factores de utilización sistemas informáticos tablero P3-T2.....	57
Tabla 35. Resultados sistemas informáticos tablero P3-T2.....	59
Tabla 36. Ahorro económico sistemas informáticos tablero P3-T2.....	65
Tabla 37. Factores para el cálculo del costo de funcionamiento de los sistemas de refrigeración (8000BTU).....	68
Tabla 38. Factores para el cálculo del costo de funcionamiento de los sistemas de refrigeración (12000BTU).....	68
Tabla 39. Factores para el cálculo del costo de funcionamiento de los sistemas de refrigeración (24000BTU).....	68

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modelo de planta de cogeneración simple de una industria azucarera.....	9
Figura 2. Modelo de un sistema de refrigeración.....	10
Figura 3. Subestación y tablero de distribución.....	14
Figura 4. Diagrama de bloques del sistema energético.....	17
Figura 5. Diagrama del sistema de iluminación.....	20
Figura 6. Determinación de flujos exergéticos en lámparas incandescentes.....	21
Figura 7. Esquema para la medición del flujo luminoso.....	24
Figura 8. Determinación de flujos exergéticos en lámparas fluorescentes.....	26
Figura 9. Diagrama del sistema de refrigeración.....	30
Figura 10. Determinación de flujos exergéticos en sistemas de refrigeración.....	31
Figura 11. Diagrama de los sistemas informáticos.....	36
Figura 12. Determinación de flujos exergéticos en sistemas informáticos.....	37
Figura 13. Conexión de las cargas del sistema.....	42

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Ley 697 de 2001 (LEY URE).....	77
Anexo B. Tabla de propiedades para el vapor de agua.....	84
Anexo C. Programa para el cálculo de flujos exergéticos en los sistemas de aire acondicionado.....	85

LISTA DE ECUACIONES

Pág.

Capítulo 2

Ecuación 1. Rendimiento termodinámico.....	5
Ecuación 2. Cálculo de irreversibilidades.....	6
Ecuación 3. Costo exergético.....	7
Ecuación 4. Balance de materia.....	10
Ecuación 5. Balance de energía.....	10
Ecuación 6. Balance de exergía.....	10

Capítulo 3

Ecuación 7. Potencia activa lámpara incandescente.....	22
Ecuación 8. Potencia activa lámpara incandescente con $FP = 1$	22
Ecuación 9. Potencia aparente lámpara incandescente.....	22
Ecuación 10. Exergía flujo 1 lámpara incandescente.....	23
Ecuación 11. Cálculo de nivel de iluminación.....	23
Ecuación 12. Exergía flujo 2 lámpara incandescente.....	25
Ecuación 13. Exergía flujo 3 lámpara incandescente.....	25
Ecuación 14. Rendimiento exergético lámpara incandescente.....	25
Ecuación 15. Exergía de entrada lámpara fluorescente.....	27
Ecuación 16. Potencia activa lámpara fluorescente con $FP = 0,95$	27
Ecuación 17. Potencia aparente lámpara fluorescente.....	27
Ecuación 18. Exergía flujo 1 lámpara fluorescente.....	27
Ecuación 19. Potencia activa flujo 2 lámpara incandescente.....	28
Ecuación 20. Exergía flujo 2 lámpara fluorescente.....	28

Ecuación 21. Exergía flujo 4 lámpara fluorescente.....	28
Ecuación 22. Exergía flujo 5 lámpara fluorescente.....	29
Ecuación 23. Pérdidas exergéticas lámpara fluorescente.....	29
Ecuación 24. Pérdidas exergéticas lámpara fluorescente teniendo en cuenta los flujos de entrada y salida en el sistema.....	29
Ecuación 25. Rendimiento exergético lámpara fluorescente.....	29
Ecuación 26. Potencia activa sistemas de refrigeración.....	32
Ecuación 27. Potencia aparente sistemas de refrigeración.....	32
Ecuación 28. Exergía flujo 1 sistemas de refrigeración.....	32
Ecuación 29. Disponibilidad a condiciones iniciales.....	32
Ecuación 30. Disponibilidad a condiciones finales.....	32
Ecuación 31. Exergía flujo 2 sistemas de refrigeración.....	33
Ecuación 32. Entalpía aire atmosférico.....	33
Ecuación 33. Entalpía aire seco.....	33
Ecuación 34. Cálculo humedad específica.....	34
Ecuación 35. Presión parcial del vapor de agua.....	34
Ecuación 36. Entropía aire atmosférico.....	34
Ecuación 37. Entropía aire seco.....	35
Ecuación 38. Exergía flujo 3 sistemas de refrigeración.....	35
Ecuación 39. Rendimiento exergético sistemas de refrigeración.....	36
Ecuación 40. Exergía de entrada sistemas informáticos.....	38
Ecuación 41. Potencia activa sistemas informáticos con $\cos \varphi = 0,97$	38
Ecuación 42. Potencia aparente sistemas informáticos.....	38
Ecuación 43. Tiempo de utilización sistemas informáticos.....	39
Ecuación 44. Exergía flujo 2 sistemas informáticos.....	39
Ecuación 45. Tiempo de no utilización sistemas informáticos.....	40
Ecuación 46. Exergía flujo 3 sistemas informáticos.....	40
Ecuación 47. Rendimiento exergético sistemas informáticos.....	40

Capítulo 4

Ecuación 48. Potencia aparente para sistemas trifásicos.....	42
Ecuación 49. Cálculo de la corriente I_e para el cálculo de la potencia en sistemas trifásicos desbalanceados.....	42
Ecuación 50. Cálculo de irreversibilidades en circuitos eléctricos.....	46
Ecuación 51. Cálculo del factor de potencia.....	46
Ecuación 52. Cálculo aritmético del factor de potencia.....	48
Ecuación 53. Costos en los períodos de utilización.....	65
Ecuación 54. Costos en los períodos de no utilización.....	65

TITULO: ANÁLISIS EXERGÉTICO EN CIRCUITOS ELÉCTRICOS DE LA SEDE ADMINISTRATIVA UIS – BUCARICA¹

AUTOR: Cristian Andrés Díaz Durán²

PALABRAS CLAVES:

Exergía, Termoeconomía, Balances Exergéticos, Rendimientos Exergéticos.

Este trabajo de grado presenta el análisis exergético desde un enfoque termoeconómico realizado en los circuitos eléctricos de la sede administrativa UIS-Bucarica y los resultados obtenidos una vez finalizado.

Para ello se realizó el reconocimiento y la caracterización de la infraestructura energética y se elaboraron diagramas con los respectivos balances exergéticos de los elementos del sistema (iluminación, aire acondicionado e informáticos).

Basados en esto, se determinaron los circuitos de mayor carga e irreversibilidad en los cuales se basó principalmente el análisis, puesto que son la parte más representativa del sistema. Mediante los diagramas de flujos exergéticos elaborados para cada uno de los elementos, se determinó y realizó la medición de las variables correspondientes (temperatura, humedad, luxes, corriente, tensión) y mediante estos datos se calculó la magnitud de cada uno de los flujos que intervienen en cada elemento.

Seguido esto, se analizaron los resultados obtenidos y se efectuó una evaluación financiera, cuantificando el costo que representa para la instalación la presencia de las irreversibilidades y mostrando algunas alternativas a tener en cuenta con el fin de seguir obteniendo los mismos resultados o aun mejores, pero con un consumo energético inferior o igual que conlleve no solo a realizar un manejo adecuado de recurso, sino también poder obtener ahorros económicos (propuesta para URE).

Por último, se muestran las conclusiones y recomendaciones basadas en los resultados obtenidos mediante el análisis exergético y mostrando algunas de las ventajas que posee este tipo de estudios, pero a su vez, mencionando las posibles mejoras a tener en cuenta en la realización de futuros trabajos relacionados con este campo de la ingeniería puesto que es un área en desarrollo con gran proyección a muy corto plazo.

¹ Trabajo de Grado

² Universidad Industrial de Santander UIS; Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E³T); Programa de Ingeniería Eléctrica; Dr. Gabriel Ordóñez Plata, Director de Proyecto; M.S.c Carlos Cárdenas Guerra, Codirector de Proyecto.

TITLE: ANALYSIS EXERGÉTICO IN ELECTRICAL CIRCUITS OF ADMINISTRATIVE SEAT UIS - BUCARICA³

AUTHOR: Cristian Andrés Diaz Durán⁴

KEYWORDS:

Exergía, Termoeconomía, Exergéticos Balance, Exergéticos Yields.

This degree work presents an exergetic analysis of the UIS-Bucarica Administrative Offices electrical circuits on a thermo-economics approach

The power infrastructure recognition and its characterization were made in order to elaborate the exergetic balance diagrams of the system elements (illumination, conditioned air and computers).

On this basis, the greater load and irreversibility circuits were identified as fundamentals for the analysis, since they are the most representative part of the system. Through the exergetic flow charts for each element, the respective variables (temperature, humidity, luxes, current, tension) were measured; and by means of these data the magnitude of each one of the flows that take part in each element was calculated.

Followed this, the obtained results were analyzed and a financial evaluation took place, quantifying the cost that the presence of the irreversibilities represents for the installations and showing up some alternatives to consider with the purpose of getting sustainable results or improvements at equal or lower power consumption that entails not only to make an adequate handling of the resource, but also to be able to obtain economic savings (proposal for URE).

Finally, it shows up conclusions and recommendations based on the results obtained by means of the exergetic analysis as well as some of the advantages that this type of studies represents; at the same time that future works and improvements are suggested, since it is a developing area with great perspectives at very short term.

³ Work of Degree

⁴ Universidad Industrial de Santander (UIS); Physical-Mechanical Engineering Faculty; School of Electric, Electronic and Telecommunications Engineering (E³T); Electric Engineering Program; Dr. Gabriel Ordóñez Plata, Project Director; M.S.c Carlos Cárdenas Guerra, Project Co director.

1. INTRODUCCIÓN

Dada la necesidad de contar con sistemas energéticos que ofrezcan mayor calidad y a su vez un ahorro que conlleve a la preservación de los recursos naturales como fuentes indispensables de la generación de la energía eléctrica, se observa la necesidad de realizar diagnósticos de los principales focos o centros de utilización de la energía. De ahí, el surgimiento de la implementación del análisis termoeconómico, que permiten la localización y cuantificación de las irreversibilidades de los elementos que componen el sistema, permitiendo establecer estrategias para lograr disminuir estas irreversibilidades y de esta forma optimizar el aprovechamiento energético.

A continuación se muestran los antecedentes, la justificación, la metodología y los objetivos de este trabajo de grado.

1.1 Antecedentes

Con el transcurrir del tiempo, la energía eléctrica ha tomado una mayor importancia en los procesos productivos debido a los diversos beneficios que se pueden obtener a partir de los diferentes procesos de transformación (luz, calor, movimiento, etc) sin importar el desperdicio energético que se tenga, sino su beneficio o producto final de la transformación.

Actualmente, cuando las fuentes de recursos energéticos no renovables se agotan debido a la gran demanda, y los precios energéticos se elevan considerablemente, se requiere la implementación de planes que permitan obtener ahorros energéticos para alcanzar un desarrollo sostenible mundial [Valero-01].

Por esto que en las dos últimas décadas se han realizado estudios del rendimiento energético de los sistemas basados en la termoeconomía, permitiendo establecer la cantidad de exergía que se está desaprovechando (irreversibilidades), lo cual eleva los costos de funcionamiento o los costos de producción de un determinado bien o servicio.

A nivel Nacional, el Gobierno Colombiano mediante la Ley 697 de 2001, ver anexo 1, ha establecido estímulos normativos, como: incentivos tributarios, de mercado, institucionales y ambientales con el fin de motivar a las diferentes instituciones a realizar investigaciones e implementaciones de programas para el uso racional y eficiente de la energía así como la utilización de energías alternativas para la generación de energía eléctrica.

1.2 Justificación

La Universidad Industrial de Santander en su constante desarrollo considera que la energía debe utilizarse de forma racional, por esta razón la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones ha propuesto diferentes proyectos para realizar un análisis energético desde un enfoque exergético en algunos circuitos eléctricos de las instalaciones de la UIS para diagnosticar el uso de la energía y así proponer posteriormente programas de Uso Racional de la Energía (URE).

1.3 Metodología

La metodología empleada, consiste en caracterizar la infraestructura eléctrica mediante la descripción del sistema y la realización de un diagnóstico energético, que permita la elaboración de los balances exergético de los elementos presentes en la instalación y posteriormente evaluar y analizar los

diferentes flujos exergéticos que intervienen en el sistema, tomando como base el análisis termoeconómico.

1.4 Objetivos

El objetivo general de este trabajo, es realizar un análisis en los circuitos de energía eléctrica de baja tensión de la sede administrativa UIS-Bucarica desde un enfoque termoeconómico. Para lograr este objetivo, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar la caracterización de la infraestructura energética de la sede UIS-Bucarica.
- Determinar las irreversibilidades del sistema.
- Realizar mediciones de variables eléctricas para ajustar los modelos exergéticos que se establezcan para los elementos del sistema de la sede UIS - Bucarica.
- Analizar los resultados obtenidos, determinando las principales pérdidas exergéticas del sistema.

1.5 Estructura del documento

La estructuración del documento de este trabajo de grado, se describe a continuación.

En el capítulo 1 se encuentra la introducción, la justificación, la metodología y los objetivos.

En el capítulo 2 se presentan las definiciones de algunos conceptos de la teoría del costo exergético, necesarios para una mejor comprensión del trabajo que se presenta.

La caracterización de la infraestructura energética de la red de baja tensión en la que se realizó el análisis exergético se presenta en el capítulo 3.

En el capítulo 4, se describe la aplicación del análisis termoeconómico en los circuitos de mayor consumo de la sede UIS - Bucarica, mostrando la aplicación de los modelos con los balances exergéticos y el cálculo de las irreversibilidades de los elementos que los conforman, así como la oportunidad de ahorro energético que se puede lograr.

Finalmente, el capítulo 5 contiene las conclusiones, los aportes del proyecto y las recomendaciones para el desarrollo de futuros trabajos.

2. TEORÍA DEL COSTO EXERGÉTICO

La teoría del costo exergético se fundamenta en el costo energético que implica obtener un producto después de un determinado proceso. Es decir, que un sistema es eficiente o presenta un menor costo exergético, cuando al compararlo con otro sistema permite obtener un mismo producto final, pero con una menor energía de entrada.

A continuación se muestran algunos de los conceptos fundamentales para la realización del análisis exergético.

2.1 Conceptos de la teoría del costo exergético

A continuación se presentan algunas definiciones relacionadas con el costo exergético de un proceso.

➤ Eficiencia termodinámica:

Consiste en analizar el funcionamiento de un determinado elemento y a su vez compararlo con otro que ofrezca un igual servicio, con el fin de determinar que nivel de eficiencia presenta uno respecto del otro, para ello es necesario que todos los flujos que intervengan en el sistema se expresen en las mismas unidades (igual valor termodinámico) [Valero-89], [Valero-00] [Wall-98] [Bonilla-06], ver ecuación 1.

$$\eta = \frac{\text{Exergía de salida}}{\text{Exergía de entrada}} \quad [1]$$

➤ Exergía (disponibilidad):

Es el trabajo útil que se puede realizar partiendo de una cantidad de energía determinada en cierto estado específico, es decir, el máximo aprovechamiento que se puede obtener de una determinada fuente energética.

Un sistema entrega el máximo trabajo posible cuando está sometido a un proceso reversible desde el estado inicial especificado hasta el estado de su medio (estado muerto). Es de resaltar, que la exergía no se conserva ya que existen pérdidas en el proceso asociadas generalmente al calor. La disponibilidad no es la cantidad de trabajo que un dispositivo puede llegar a entregar, por el contrario, la disponibilidad corresponde a la energía de entrada del dispositivo (energía disponible) de la cual solo se puede aprovechar una determinada parte dependiendo de las irreversibilidades que se puedan llegar a presentar en los elementos que conforman un proceso. [Çengel-01] [Wall-98] [Bonilla-06].

➤

➤ Trabajo reversible:

Es el trabajo útil obtenido a la salida de un determinado proceso que a su vez se puede convertir en la entrada de un proceso siguiente (disponibilidad del proceso siguiente) [Çengel-01].

➤ Trabajo irreversible:

Es la pérdida de oportunidad para realizar un trabajo y representa la energía consumida por el sistema en su funcionamiento, ver ecuación 2.

$$Exergía\ entrante - Exergía\ saliente = Irreversibilidad > 0 \quad [2]$$

“Con una entrada de energía constante, cuanto más pequeña es la irreversibilidad asociada a un proceso, tanto mayor será el trabajo producido o tanto menor el trabajo que será consumido” [Çengel-01].

Por lo anterior, se puede decir que la principal actividad en un estudio termoeconómico es localizar las fuentes primarias de irreversibilidades asociadas con cada componente del sistema, y realizar todos los esfuerzos para minimizarlas.

➤ Costo exergético:

Se define como la cantidad de exergía necesaria para generar un producto, o como el inverso de la eficiencia en un determinado sistema [Valero-89], ver ecuación 3.

$$k = \frac{1}{\eta_b} = \frac{F}{P} = 1 + \frac{PERDIDAS(L) + DESTRUCCION(D)}{PRODUCTO(P)} \quad [3]$$

Donde:

k Es el costo exergético unitario necesario para producir un determinado producto.

F Es la exergía de entrada necesaria para obtener un determinado producto.

P Es la exergía de salida del proceso.

➤ Nivel de desagregación:

Es la colección de equipos y sus relaciones que constituyen el sistema total. Para una misma planta física pueden haber distintos niveles de

desagregación, desde el más simple, que estaría constituido como la planta completa vista como un solo equipo, hasta niveles en el que se podría dividir la planta en centenares de equipos y separar los flujos en función de su naturaleza, componente mecánica, térmica, química, etc.

El nivel de desagregación depende del tipo y profundidad del análisis, de la cantidad de medidas disponibles, y permite separar la irreversibilidad total del sistema en tantas componentes como equipos se consideren. La elección del nivel de desagregación afectará las conclusiones del análisis [Capte UIS-98].

➤ Matriz de incidencia:

Es una forma alternativa de representar los flujos exergéticos en un sistema, es mediante su matriz de incidencia. Las relaciones entre los componentes de un sistema a través de flujos, puede ser representada por una matriz $A(n \times m)$.

Donde:

n: Es el número de componentes que conforman el sistema.

m: Es el número de flujos presentes en el sistema.

Esta matriz está definida de tal forma que sus elementos representan los flujos que entran y salen de los equipos, así:

1 si es un flujo de entrada

-1 si es un flujo de salida

Debido a que los elementos presentes en las instalaciones no poseen un nivel de complejidad alto, se considera como ejemplo el sistema de la figura 1 [Valero-89], para el cual se obtiene la matriz de incidencia correspondiente, la cual se muestra en la tabla 1.

Figura 1. Modelo de planta de cogeneración simple de una industria azucarera

Fuente: Teoría del Coste exergético: I conceptos básicos

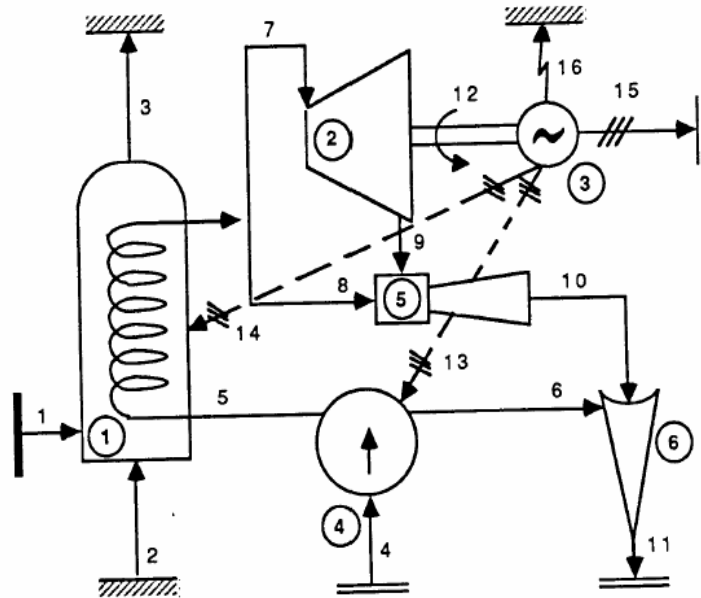


Tabla 1. Matriz de incidencia de la planta de cogeneración

		Flujos															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Equipos	1	1	1	-1	0	1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	-1
	4	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0
Planta Total		1	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	-1
Entorno		-1	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1

En el caso de que el sistema funcione en estado estacionario, la matriz de incidencia permite expresar los balances de materia, energía y exergía como se muestran en las ecuaciones 4, 5 y 6 respectivamente.

$$[A]_x\{M\} = 0 \quad [4]$$

$$[A]_x\{H\} = 0 \quad [5]$$

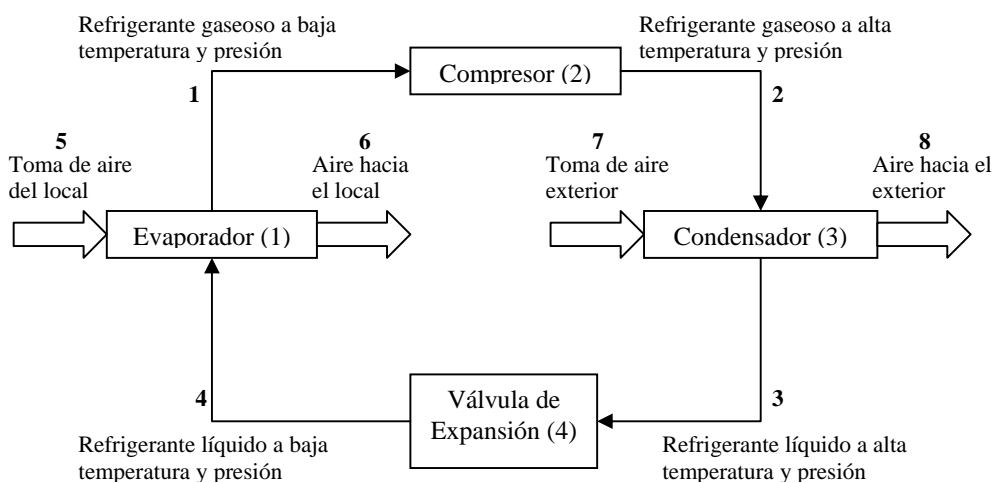
$$[A]_x\{B\} = I \quad [6]$$

Siendo M , H , B vectores ($m \times 1$) que contienen la masa, energía y exergía de cada uno de los flujos. El elemento i -ésimo del vector I ($n \times 1$) representa la exergía destruida en dicho componente debido a irreversibilidades internas y externas [Capte UIS-98].

A manera de ejemplo para el caso de los sistemas de la sede administrativa UIS-Bucárica, se realizó la matriz de incidencia de los sistemas de refrigeración, cuyo esquema se muestra en la figura 2.

Figura 2. Modelo de un sistema de refrigeración

Fuente: El autor



La matriz de incidencia correspondiente al sistema de la figura 2 se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Matriz de incidencia del sistema de refrigeración.

	Flujos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Equipos 1	-1	0	0	1	1	-1	0	0
2	1	-1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	-1	0	0	0	1	-1
4	0	0	1	-1	0	0	0	0
Planta total	0	0	0	0	1	-1	1	-1
Entorno	0	0	0	0	-1	1	-1	1

➤ Reglas de asignación de costos:

Consiste en un procedimiento racional con el fin de determinar el costo exergético mínimo, necesario para poder obtener un determinado producto. Esta asignación de costos se debe hacer teniendo en cuenta cada uno de los diferentes equipos en los cuales se ha desagregado el sistema general [Valero-89].

Con esto se logra determinar el costo exergético que puede llegar a tener cada uno de los elementos del proceso, y con base en ello localizar las pérdidas en un determinado punto del mismo.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA ENERGÉTICA

La caracterización de la infraestructura energética, permite tener una descripción detallada de los diferentes elementos que la componen. Para el sistema energético de la sede UIS-Bucarica se elaboraron modelos que permiten determinar las irreversibilidades del sistema mediante la aplicación de balances exergéticos.

A continuación se describe el sistema eléctrico, y posteriormente se realiza un diagnóstico energético que permite conocer el consumo energético de la sede UIS-Bucarica. Finalmente se obtienen los modelos exergéticos de los elementos que lo conforman.

3.1 Descripción del sistema

La sede UIS-Bucarica se alimenta de un circuito de la Empresa Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. a un nivel de tensión de 13,2 kV mediante una red subterránea.

Esta red proviene de la subestación 28 SUR y se conecta a un transformador de 300kVA, el cual tiene una relación de transformación de 13,2kV/220-127V (ver tabla 3)

Tabla 3. Datos de placa del transformador.

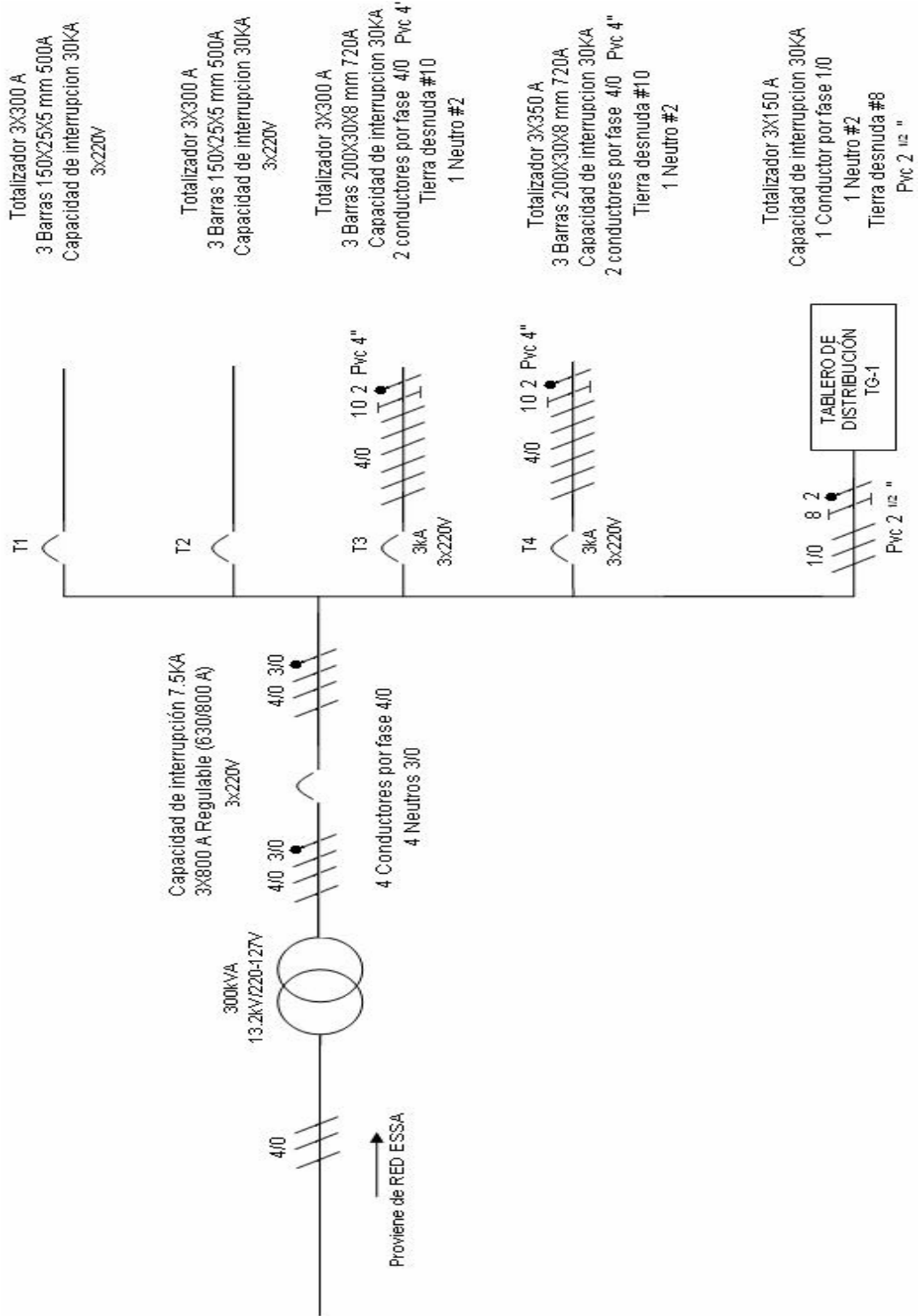
Potencia nominal	300kVA
Tensión nominal del primario	13,2 kV
Tensión nominal del secundario	220-127V
Corriente nominal del primario	13,12 A
Corriente nominal del secundario	787,3 A

El secundario del transformador se conecta al sistema con un totalizador trifásico principal, al cual se conectan cuatro totalizadores trifásicos de un tablero de distribución independiente, los cuales distribuyen los flujos de energía para las diferentes cargas del sistema como se muestra en la figura 3, donde además de la conexión del sistema están las características de cada uno de los elementos utilizados. Esta información fue obtenida del levantamiento realizado por los estudiantes Alvin Quintero y Diofer Gómez de las instalaciones eléctricas de la red de la sede UIS – Bucárica (proyecto de grado dirigido por el profesor Ciro Jurado Jérez [Gomez&Quintero-07]).

Las instalaciones de esta sede corresponden a un centro administrativo y prestador de servicios, en el cual se pueden destacar las diferentes asesorías en diversos campos sociales, como lo son asesorías jurídicas, asesorías para obras civiles, entre otras. Además, en sus instalaciones se cuenta con diferentes grupos de investigación privados, y del sector público (incubadora de empresas) encargados de buscar nuevas alternativas de solución a los diferentes problemas nacientes en la sociedad; también en la sede funciona la Asociación Colombiana de Ingenieros Electricistas, Mecánicos y afines.

Figura 3. Subestación y tablero de distribución

Fuente: El autor



3.2 Diagnóstico energético

Como parte del diagnóstico energético se obtuvieron los principales datos del suministro eléctrico en las instalaciones (ver tabla 4) así como la información de los consumos registrados por la Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. en la sede UIS-Bucárica durante los meses de febrero a julio del 2006⁵, información registrada en la tabla 5. Esta información muestra el historial del comportamiento de los consumos de energía eléctrica de la sede así como el costo de la energía eléctrica requerida para realizar las actividades de la sede.

Tabla 4. Información del suministro eléctrico

CLASE DE USUARIO	No residencial
ESTRATO	0/2
FACTOR UTILIZACIÓN	9,6
CARGA CONTRATADA	500kW
SUBESTACIÓN	28 SUR
CIRCUITO	CTO 2 SUR
TRANSFORMADOR	0120773
NIVEL DE TENSIÓN	2

En la tabla de información del suministro (ver tabla 4), se muestra una carga contratada de 500kW, pero en la tabla de datos del transformador (ver tabla 3) se muestra que la capacidad del transformador es de 300kVA, lo cual indica que existe mas carga contratada que la que realmente se encuentra instalada. En los apartados posteriores cuando se realizan las mediciones de carga, se puede constatar que la carga no supera la mitad de la capacidad del transformador, pero aún así tienen contratados 500kW. Esta información se puede corroborar en el proyecto de grado de la referencia [Gomez&Quintero-07]

⁵ Estos meses corresponden a los meses previos a la realización del estudio de consumos de energía en la sede UIS-Bucárica.

Las instalaciones de la sede UIS-Bucarica, ofrecen un servicio normal de 8 horas diarias (8am-12pm y 2pm-6pm) de lunes a viernes, y los sábados 4 horas (8am-12pm) de servicio al público, pero la mayor parte de sus oficinas, extiende su jornada laboral a un total de 10 horas diarias en promedio.

Tabla 5. Historial de consumos

MESES	CONS. ACTIVA (kWh)	(\$/kWh)	VALOR TOTAL
FEBRERO	30 690	225,32	6 915 070,8
MARZO	25 080	228,15	5 722 002,0
ABRIL	24 750	227,24	5 624 190,0
MAYO	27 720	233,34	6 468 184,8
JUNIO	27 060	234,78	6 353 146,8
JULIO	21 780	239,91	5 225 239,8
PROMEDIO	26 180	231,45	6 051 305,7

Con el propósito de determinar las respectivas cargas para cada uno de los totalizadores y del tablero de distribución ubicado en el primer nivel del establecimiento y dado que durante la realización de este proyecto se estaba realizando simultáneamente el proyecto de grado de [Gomez&Quintero-07] consistente en el levantamiento de las redes de baja tensión de la sede UIS-Bucárica, se realizó una inspección de la red eléctrica en la cual se obtuvo el esquema de distribución de cargas de forma global, ver figura 4, donde se designa la nomenclatura de los totalizadores como T1, T2, T3 y T4, y al tablero de distribución ubicado en el primer piso como TG-1; esta nomenclatura es la que se utilizará en el capítulo 4.

Debido a la complejidad que presenta la red eléctrica, y el no tener la posibilidad de acceso a todas las instalaciones, no fue posible la identificación total de todos los circuitos que la conforman, aunque el resultado final, fue la asignación de los principales tableros de control distribuidos en cada uno de los diferentes niveles conectados a su respectivo

totalizador, ya mencionados anteriormente, ver tablas 6,7,8,9 y 10. Por tal motivo en el análisis solo se tiene en cuenta los circuitos que se identificaron.

Figura 4. Diagrama de bloques del sistema energético

Fuente: El autor

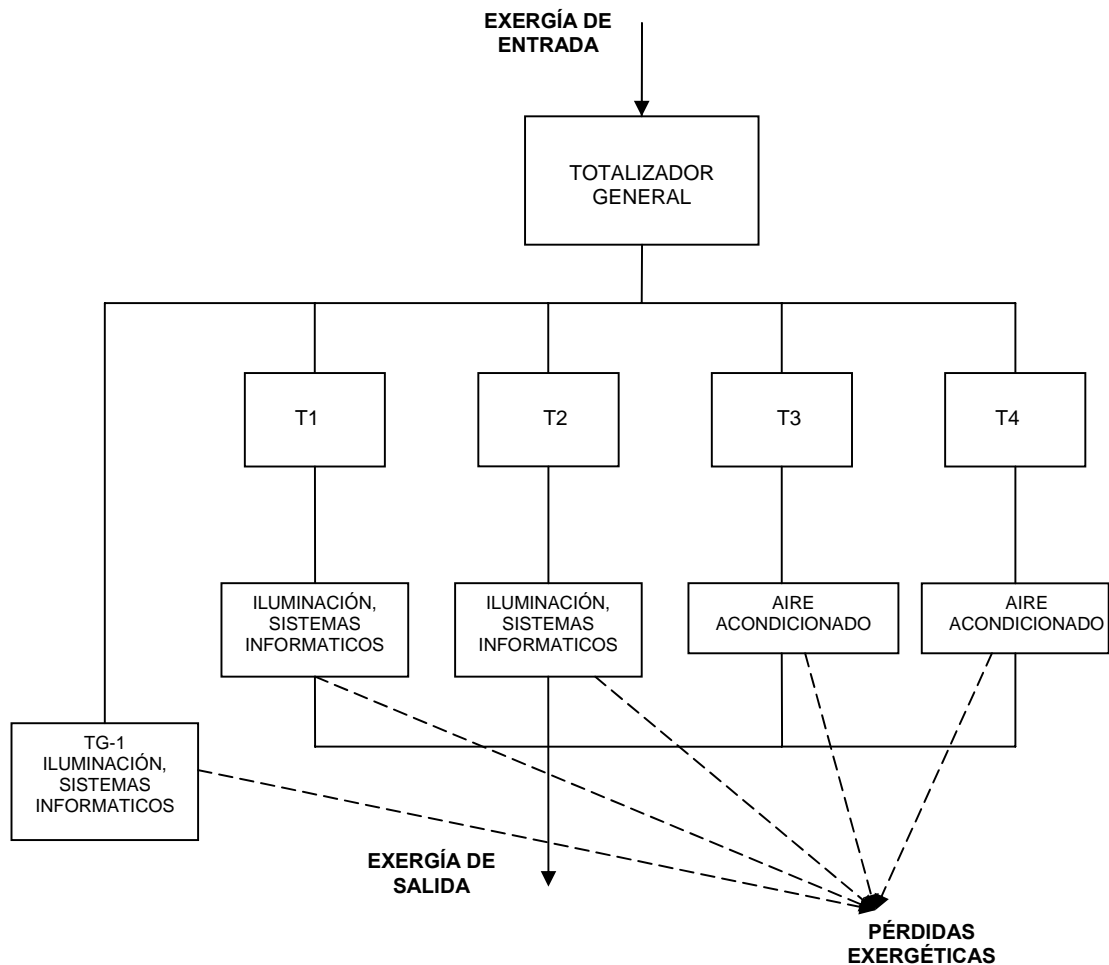


Tabla 6. Cuadro de cargas T1

TABLERO N°	DESCRIPCIÓN
P1-T8	Iluminación y tomacorrientes salón Santander
P3-T1	Iluminación y tomacorrientes Incubadora Bucaramanga Emprendedora
P3-T2	Iluminación y tomacorrientes Incubadora

	Bucaramanga Emprendedora
P3-T3	Iluminación y tomacorrientes pasillo piso 3

Tabla 7. Cuadro de cargas T2

TABLERO N°	DESCRIPCIÓN
P2-T1	Iluminación y tomacorrientes pasillo piso 2
P2-T3	Iluminación y tomacorrientes oficinas piso 2
P2-T4	Iluminación y tomacorrientes oficinas y pasillos piso 2
P2-T9	Iluminación y tomacorrientes oficinas y pasillos piso 2
P1-T3	Iluminación y tomacorrientes salón Hormiga
P0-T1	Iluminación y tomacorrientes subterráneo

Tabla 8. Cuadro de cargas T3

TABLERO N°	DESCRIPCIÓN
P1-T1	Aire acondicionado salón Río de Oro
P3-T4	Aire acondicionado oficinas piso 3
P3-T5	Aire acondicionado oficinas piso 3

Tabla 9. Cuadro de cargas de T4

TABLERO N°	DESCRIPCIÓN
P2-T2	Aire acondicionado oficinas piso 2
P2-T8	Aire acondicionado oficinas piso 2
P2-T10	Aire acondicionado oficinas piso 2

Tabla 10. Cuadro de cargas de TG-1

TABLERO N°	DESCRIPCIÓN
P1-T5	Iluminación y tomas salón Macaregua, Río de Oro, Baños y pasillos piso 1
P1-T4	Iluminación y tomas recepción, patio español y luces de exterior piso 1
P1-T7	Iluminación y tomas pasillo consultorio jurídico piso 1
P1-T9	Iluminación, tomas y aire acondicionado oficina consultorio jurídico piso 1

P1-T10	Iluminación y tomas salas de conciliación
P1-TG4	Iluminación y tomas almacén, pasillo y terraza piscina piso 1
P1-TG3	Iluminación y tomas lavandería y piscina piso 1

Una vez identificadas las cargas para cada uno de los totalizadores y la del tablero TG-1, el siguiente paso fue la medición de las corrientes en cada uno de ellos, esto se realizó en las barras de la subestación puesto que en su momento no se disponía de los planos de la instalación eléctrica y además era importante considerar las variaciones de la carga instalada a lo largo del día; por lo tanto las medidas se efectuaron en diferentes instantes de tiempos y se obtuvo una corriente promedio, con la cual posteriormente se calculó la potencia en cada uno de los tableros. Los valores de las corrientes de cada tablero así como su valor promedio se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Mediciones de carga en los circuitos eléctricos

CIRCUITO		MEDICIÓN REALIZADA I[A]					
TABLERO	FASE	1	2	3	4	5	PROMEDIO
T1	la	24,8	36,2	40,0	40,4	50,6	38,40
	lb	35,9	35,7	39,3	40,1	45,7	39,34
	lc	47,7	46,8	58,4	42,9	34,6	46,08
T2	la	67,5	70,7	63,1	78,6	83,0	72,58
	lb	59,7	54,7	58,8	75,3	83,2	66,34
	lc	67,5	92,3	45,9	73,0	98,2	75,38
T3	la	79,1	73,9	71,0	76,0	34,0	66,80
	lb	71,4	80,1	83,0	70,1	74,2	75,76
	lc	41,8	53,0	52,6	35,8	64,0	49,44
T4	la	15,4	13,2	31,0	47,3	63,5	34,08
	lb	14,5	22,9	25,5	44,9	53,9	32,34
	lc	22,5	22,0	37,2	45,4	58,5	37,12
TG-1	la	30,7	22,7	24,0	24,0	25,3	25,34
	lb	37,2	28,0	33,4	32,5	30,2	32,26
	lc	36,3	27,7	31,4	30,9	33,3	31,92

Se encontró que la emisora Tele-UIS cuenta con un circuito independiente que suministra la energía para los sistemas de iluminación e informáticos y a su vez a la unidad de refrigeración.

En las mediciones realizadas en el circuito de Tele-UIS (Tu) se tuvo en cuenta que estuviera encendido el sistema de aire acondicionado. En la tabla 12 Se muestran los valores de corriente medidos y el valor promedio calculado.

Tabla 12. Cuadro de carga Tele-UIS

FASE	1	2	3	4	PROMEDIO
la	32,4	34,7	26,8	39,0	33,23
lb	18,2	27,2	16,1	34,6	24,03
lc	29,6	40,5	25,5	44,2	34,95

3.3 Balance exergético de los elementos

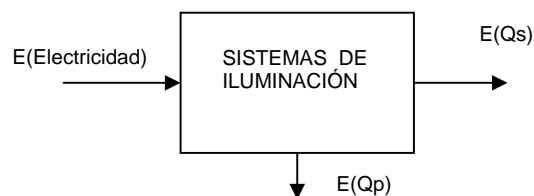
El balance incluye la caracterización de cada uno de los elementos, se definen los diversos flujos que intervienen en cada uno de ellos; siendo estos, variables medibles de las cuales parte el análisis exergético para la detección de las irreversibilidades del sistema. Estos flujos a su vez, dependen del nivel de desagregación del sistema.

3.3.1 Sistemas de iluminación

Realizando el diagrama con el balance energético general que se muestra en la figura 5, se determinan los principales flujos energéticos que intervienen en este proceso, los cuales son:

Figura 5. Diagrama del sistema de iluminación

Fuente: El autor



E (Electricidad): Energía eléctrica suministrada.

$E (Q_p)$: Pérdidas energéticas totales del proceso.

$E (Q_s)$: Energía de salida o aprovechada, que para este caso corresponde a energía lumínica.

3.3.1.1 Nivel de desagregación y asignación de flujos

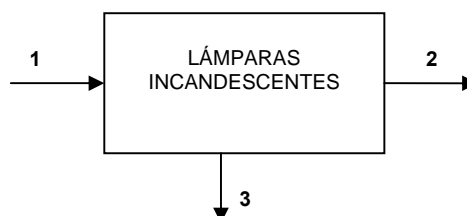
Partiendo del diagrama con su respectivo balance exergético, y teniendo en cuenta los componentes reales que intervienen en un sistema de iluminación, se determinó la implementación de dos modelos con el fin de tener en cuenta los tipos de luminarias más empleadas en las instalaciones administrativas.

Lámparas incandescentes:

Para este tipo de iluminación se determinó que el nivel de desagregación es 1, ver figura 6.

Figura 6. Determinación de flujos exergéticos en lámparas incandescentes

Fuente: El autor



Donde:

Flujo 1: Electricidad de entrada

Flujo 2: Energía de salida (luz)

Flujo 3: Pérdidas por calentamiento

La tabla 13 muestra los flujos energéticos (E) y exergéticos (B) correspondientes a la lámpara incandescente.

Tabla 13. Flujos lámpara incandescente

FLUJO	ENERGÍA (E)	EXERGÍA (B)
1	$E_1 = P_1$	$B_1 = P_1$
2	$E_2 = L_2$	$B_2 = f(L_2)$
3	$E_3 = Q_3$	$B_3 = f(Q_3)$

Flujo 1

Para el cálculo de este flujo, se determina la potencia activa suministrada al elemento, ver ecuación 7, y se integra durante el tiempo de operación del sistema.

$$B_1 = \int_T P_1 dt \quad [7]$$

$$P_1 = S * FP$$

Siendo:

S : Es la potencia aparente suministrada.

FP : Es el factor de potencia de la carga.

Teniendo en cuenta que los sistemas de iluminación incandescentes son cargas resistivas, $FP = 1$ por lo tanto se tiene que la potencia activa se calcula según la ecuación 8:

La potencia aparente para este caso es como se muestra en la ecuación 9 y por lo tanto, la exergía del flujo 1 se obtiene mediante la ecuación 10.

$$P_1 = S \quad [8]$$

Siendo:

$$S = V * I \quad [9]$$

$$B_1 = V * I * \int_T dt \quad [10]$$

Flujo 2

Para el cálculo de este flujo, se determina la cantidad de potencia lumínica emitida por la lámpara, con el fin establecer su respectivo valor en unidades de energía. Para ello se debe medir el flujo luminoso emitido sobre las principales superficies de trabajo, ver ecuación 11.

$$lu = \frac{lumi}{A} \quad [11]$$

De donde:

lu: Es el nivel de iluminación dado en luxes (lx), y es una propiedad medible por medio del luxómetro.

A: Es el área sobre el cual incide el flujo luminoso.

lumi: Es el flujo luminoso emitido por la lámpara dado en lumen (lm), el cual se puede determinar una vez se hallen las anteriores variables.

Para la medición del flujo luminoso, se tiene en cuenta la siguiente metodología:

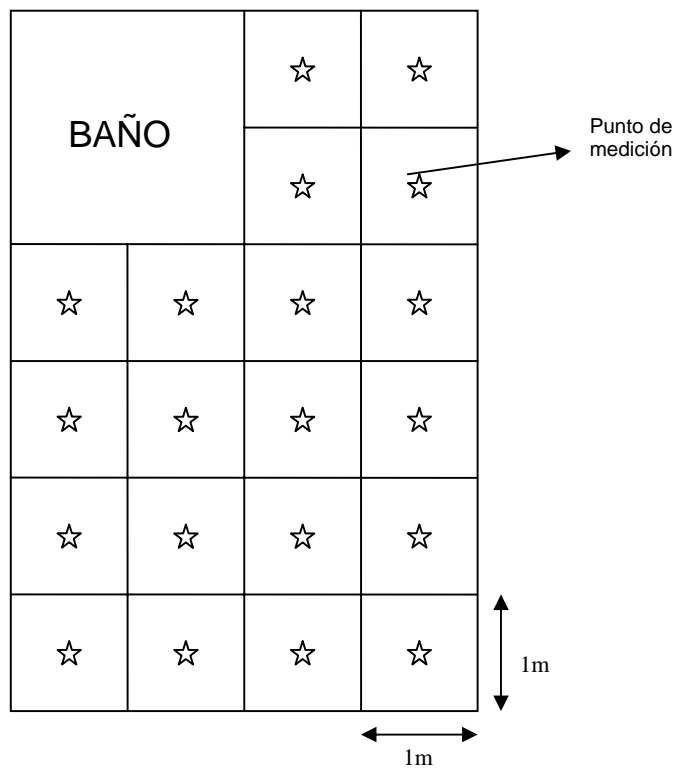
- Se determina la zona de incidencia del flujo luminoso.
- Se realizan divisiones espaciales equivalentes a un metro cuadrado ($1m^2$).
- Se realiza la medición en el centro del espacio delimitado de $1m^2$ por medio del luxómetro tal y como se indica en la figura 7.

Realizando la sumatoria de todos estos valores obtenidos, y dividiendo en el numero de muestras, se encuentra el valor promedio de *luxes*.

Al valor promedio se le aplica la relación de transformación lm/W para el caso de lámparas incandescentes con longitud de onda de 555 nm es de $F_c = 683\text{ lm/m}^2$ [DCM-06], determinando la potencia emitida por la luminaria, este resultado es multiplicado por el área de incidencia.

Figura 7. Esquema para la medición del flujo luminoso

Fuente: El autor



Por lo tanto el flujo exergético de salida (luminoso) corresponde al mostrado en la ecuación 12.

$$B_2 = \frac{l\bar{u}}{Fc} * A * \int dt \quad [12]$$

Donde:

$l\bar{u}$ Es la cantidad de *luxes* promedio medidos

A Es el área de incidencia del flujo luminoso en m^2

dt Es el intervalo tiempo de operación del sistema de iluminación

Flujo 3

Teniendo en cuenta la propiedad aditiva del balance exergético, se determina el flujo 3 realizando la sumatoria de los flujos de entrada del sistema igual a la suma de los flujos de salida, ver ecuación 13.

$$B_3 = B_1 + B_2 \quad [13]$$

Donde:

B_1 : Es la exergía de entrada.

B_2 : Es la exergía de salida.

B_3 : Son las pérdidas exergéticas del sistema.

El rendimiento exergético corresponde a la relación entre la exergía del flujo luminoso de salida y la exergía del flujo eléctrico de entrada, ver ecuación 14.

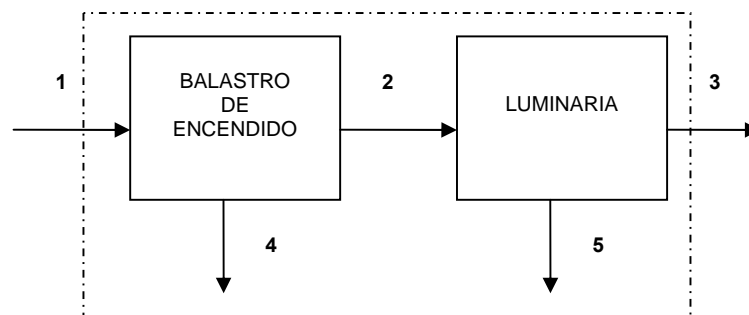
$$\eta\% = \frac{B_2}{B_1} \times 100 \quad [14]$$

🔌 Lámparas fluorescentes:

Para este tipo de lámparas, se determina un nivel de desagregación 2, y se realiza el correspondiente balance exergético, ver figura 8.

Figura 8. Determinación de flujos exergéticos en lámparas fluorescentes

Fuente: El autor



Flujo 1: Electricidad de entrada

Flujo 2: Energía de salida del balastro

Flujo 3: Energía de salida (luz)

Flujo 4: Pérdidas en balastro de encendido

Flujo 5: Pérdidas en luminaria

La tabla 14 muestra los flujos energéticos (E) y exergéticos (B) correspondientes a la lámpara fluorescente.

Tabla 14. Flujos lámpara fluorescente

FLUJO	ENERGÍA (E)	EXERGÍA (B)
1	$E_1 = P_1$	$B_1 = P_1$
2	$E_2 = S_2$	$B_2 = P_2$
3	$E_3 = L_3$	$B_3 = f(L_3)$
4	$E_4 = Q_4$	$B_4 = f(Q_4)$

5	$E_5 = Q_5$	$B_5 = f(Q_5)$
----------	-------------	----------------

Flujo 1

La exergía del flujo 1 corresponde a la energía activa consumida por la lámpara fluorescente, ver ecuación 15.

$$B_1 = \int_{\tau} P_1 dt \quad [15]$$

$$P_1 = S_1 * FP$$

El factor de potencia promedio para este caso es de 0,95 tomado de los datos de placa de los elementos, por lo tanto la potencia activa, y la potencia aparente para las lámparas fluorescentes están definidas por las ecuaciones 16 y 17, respectivamente.

$$P_1 = S_1 * 0,95 \quad [16]$$

y

$$S_1 = V * I \quad [17]$$

La exergía de entrada para las lámparas fluorescentes se calcula mediante la ecuación 18.

$$B_1 = V * I * 0,95 * \int_{\tau} dt \quad [18]$$

Flujo 2

Para el cálculo de este flujo se tiene en cuenta el rendimiento que presentan los balastos encargados de proporcionar el arranque a las luminarias [De Gregorio-06], por lo tanto la potencia activa para este flujo se calcula mediante la ecuación 19.

$$P_2 = P_1 * Fb$$

$$B_2 = \int_T P_2 * dt \quad [19]$$

Donde Fb corresponde al rendimiento del balastro según el sistema de iluminación a utilizar.

La exergía del flujo 2 se puede calcular mediante la ecuación 20.

$$B_2 = V * I * Fb * \int_T dt \quad [20]$$

Flujo 3

Este flujo se puede calcular mediante el método propuesto para el flujo 2 de la lámpara incandescente, solo que para este caso, la relación de transformación lm/W corresponde a $Fc = 59 \text{ lm/m}^2$.

Flujo 4

Al utilizar la propiedad aditiva con la que se cuenta en el análisis exergético, se tiene que el flujo 4 corresponde al calculado mediante la ecuación 21:

$$B_4 = B_1 - B_2 \quad [21]$$

Donde:

B_1 : Es la exergía del flujo 1.

B_2 : Es la exergía del flujo 2.

B_4 : Es la exergía del flujo 4.

Flujo 5

Al tener los flujos anteriores, la exergía del flujo 5 se calcula mediante la ecuación 22.

$$B_5 = B_2 - B_3 \quad [22]$$

Por lo tanto, se dice que las pérdidas exergéticas totales del sistema corresponden a la suma de las pérdidas exergéticas de cada uno de sus elementos, ver ecuación 23.

$$B_T = B_4 + B_5 \quad [23]$$

Reemplazando 21 y 22 en 23, se tiene que:

$$B_T = B_1 - B_3 \quad [24]$$

Al igual que para el sistema de iluminación incandescente, se tiene que el rendimiento exergético para el sistema de luz fluorescente corresponde al mostrado en la ecuación 25.

$$\eta\% = \frac{B_3}{B_1} \times 100 \quad [25]$$

3.3.2 Sistemas de refrigeración

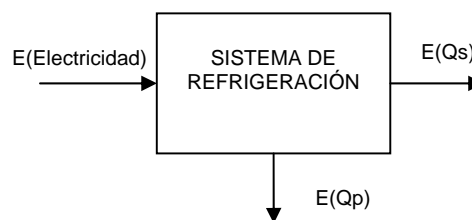
Existen dos unidades centrales de refrigeración de las cuales una de ellas es la encargada de suministrar el aire acondicionado a los salones Hormiga y Santander, y la otra unidad se encuentra operando en la emisora Tele-UIS.

Debido a que la utilización de estos salones no es periódica, sino que depende de las necesidades que surjan de conferencias seminarios o eventos, no se tienen en cuenta estas unidades, ya que tal y como se planteó al comienzo de este proyecto, el análisis se realiza para aquellas cargas eléctricas que se utilizan periódicamente (todos los días) en las instalaciones y a los circuitos con las cargas mas representativas, lo cual tiene en cuenta tanto el consumo de energía como los periodos de utilización.

Se decidió tomar los diferentes sistemas de refrigeración como cajas negras, es decir, que solo se tiene en cuenta las entradas y salidas energéticas de forma general para la determinación de las irreversibilidades como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Diagrama del sistema de refrigeración

Fuente: El autor



Las variables energéticas que se tienen en cuenta son:

E(Electricidad): Energía eléctrica suministrada.

E(Qp): Pérdidas energéticas totales del proceso.

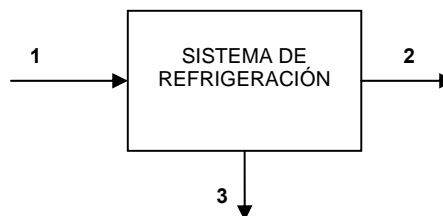
E(Qs): Energía de salida o aprovechada.

3.3.2.1 Nivel de desagregación y asignación de flujos

Los sistemas de refrigeración para este caso se consideran con nivel de desagregación es 1, siendo el balance exergético el mostrado en la figura 10.

Figura 10. Determinación de flujos exergéticos en sistemas de refrigeración

Fuente: El autor



Los flujos exergéticos son:

Flujo 1: Electricidad de entrada

Flujo 2: Energía de salida (aire refrigerado)

Flujo 3: Pérdidas exergéticas

En la tabla 15 se muestran los flujos energéticos (E) y exergéticos (B) correspondientes a los sistemas de refrigeración.

Tabla 15. Flujos sistema de refrigeración

FLUJO	ENERGÍA (E)	EXERGÍA (B)
1	$E_1 = P_1$	$B_1 = P_1$
2	$E_2 = T_2$	$B_2 = f(T_2)$
3	$E_3 = Q_3$	$B_3 = f(Q_3)$

Para este caso sólo se realiza el balance exergético del sistema para los flujos de entrada y salida del mismo, debido a que los aires que se encuentran instalados no se tienen acceso para la realización de mediciones en los flujos internos.

Las características de los diferentes flujos se describen a continuación.

Flujo 1

La exergía del flujo 1 corresponde a la energía activa consumida por el sistema de refrigeración durante el tiempo de operación del elemento, para lo cual se considero un factor de potencia de 0,8. La escogencia de este valor se obtuvo después de revisar diferentes valores de potencia de estas unidades de aire acondicionado así como información proporcionada por una empresa técnica especialista en la instalación de sistemas de refrigeración, por lo tanto la potencia activa y la potencia aparente se calculan mediante las ecuaciones 26 y 27, respectivamente.

$$P_1 = S_1 * 0,8 \quad [26]$$

Donde:

$$S_1 = V * I \quad [27]$$

La exergía del flujo 1 se obtiene utilizando la ecuación 28.

$$B_1 = V * I * 0,8 * \int_T dt \quad [28]$$

Flujo 2

Este flujo corresponde a la exergía de salida que para este caso es la corriente de aire refrigerado y corresponde a la diferencia de la disponibilidad energética inicial obtenida con la ecuación 29 y la final del sistema, obtenida con la ecuación 30. la exergía de este flujo se evalúa con la ecuación 31, teniendo en cuenta las condiciones de referencia sobre las cuales se calculan las respectivas disponibilidades [Montes-00]

$$B_i = H_i - H_0 - T_0 * (S_i - S_0) \quad [29]$$

$$B_f = H_f - H_0 - T_0 * (S_f - S_0) \quad [30]$$

$$B_2 = B_f - B_i = H_f - H_i - T_0 * (S_f - S_i) \quad [31]$$

Las variables de las ecuaciones 29, 30 y 31 corresponden a:

H_0 , H_f y H_i Son las entalpías de referencia, de estado final y de estado inicial, respectivamente.

S_0 , S_f y S_i Son las entropías de referencia, de estado final y de estado inicial, respectivamente.

T_0 Es la temperatura de referencia del sistema.

Dado que el aire atmosférico es la mezcla de aire seco con vapor de agua, la entalpía se define mediante la ecuación 32.

$$h = h_a + w * h_g \quad [32]$$

Donde:

h Es la entalpía total para la condición dada

h_a Es la entalpía del aire seco

h_g Es la entalpía del vapor de agua

w Es la humedad específica para la condición dada

Para obtener la entalpía del aire seco, es necesario especificar el rango temperatura ambiente de trabajo. Para temperaturas entre -10°C y 50°C, esta entalpía se evalúa mediante la ecuación 33.

$$h_a = C_p * T = 1,005 * T \quad [33]$$

El valor de la entalpía del vapor de agua se obtiene utilizando la tabla de propiedades para el vapor de agua del anexo 2, en la cual se encuentran los diferentes valores de entalpía para diferentes temperaturas. En dado caso que el valor de la temperatura de trabajo no se encuentre dentro de los valores establecidos en la tabla, se debe realizar una interpolación entre los valores de temperatura más cercanos.

La humedad específica del aire se calcula mediante la ecuación 34.

$$w = \frac{0,622 * P_v}{P - P_v} \quad [34]$$

Siendo:

$$P_v = \phi * P_g \quad [35]$$

Donde:

P_v Es la presión del vapor de agua

P Es la presión del aire atmosférico (presión del medio ambiente)

ϕ Es la humedad relativa del medio

P_g Es la presión de saturación del agua (ver anexo 2)

La entropía se calcula mediante la ecuación 36.

$$S = S_a + w * S_g \quad [36]$$

Donde:

S Es la entropía total del estado calculado

S_a Es la entropía del aire seco para una determina temperatura

w Es la humedad específica

S_g Es la entropía del vapor de agua para una determinada temperatura
El cálculo de la entropía del aire seco se obtiene mediante la ecuación 37.

$$S_a = C_p * \ln(T) \quad [37]$$

Donde:

C_p Es el calor específico del aire seco

T Es la temperatura a la que se desea acondicionar el salón.

Para determinar la entropía del vapor de agua se utiliza la tabla de las propiedades del vapor de agua (ver anexo 2) para la temperatura establecida.

La humedad específica es igual a la obtenida para la entalpía ya que se cumplen las mismas condiciones de temperatura, presión y humedad relativa.

Las mediciones de temperatura y humedad relativa para cada uno de los casos se realizaron con un higrómetro; una vez realizadas estas mediciones y con la ayuda de una interfaz realizada en *Matlab*, ver anexo 3, se determina el valor de los flujos exergéticos de entrada y salida para los respectivos sistemas de refrigeración y a su vez el rendimiento exergético que cada uno de ellos presenta.

Flujo 3

El flujo 3 se calcula mediante la ecuación 38.

$$B_3 = B_1 - B_2 \quad [38]$$

Este flujo representa las pérdidas globales del sistema de refrigeración, teniendo en cuenta que el nivel de desagregación para este caso corresponde al uno.

Una vez se calculan los respectivos flujos, se determina el rendimiento exergético para cada uno de los sistemas de refrigeración, utilizando la ecuación 39.

$$\eta\% = \frac{B_2}{B_1} \times 100 \quad [39]$$

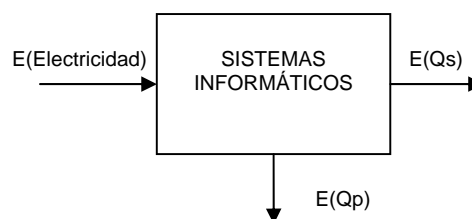
3.3.3 Sistemas informáticos

Para el caso de los sistemas informáticos y debido a la complejidad para determinar el producto final, se propone realizar el análisis exergético teniendo en cuenta sólo los períodos de utilización de los equipos; esto se fundamenta en que los sistemas informáticos hoy en día tienen un alto rendimiento energético, lo que significa un nivel bajo de irreversibilidades, por tanto, es más representativo la cuantificación de pérdidas en aquellos períodos de tiempo en los cuales el equipo se encuentra consumiendo energía sin estarse utilizando.

De acuerdo con esta consideración, el diagrama con el balance energético se muestra en la figura 11.

Figura 11. Diagrama de los sistemas informáticos

Fuente: El autor



Las variables energéticas de los sistemas informáticos son:

E(Electricidad): Energía eléctrica suministrada.

E(Qp): Perdidas energéticas totales del proceso.

E(Qs): Energía de salida.

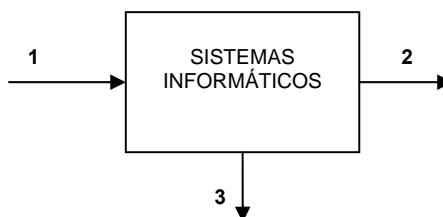
3.3.3.1 Nivel de desagregación y asignación de flujos

Teniendo en cuenta que las pérdidas propias del equipo son menores comparadas con las pérdidas que se presentan en los períodos de no utilización tal y como se describió anteriormente, se puede realizar el balance exergético del sistema sin tenerlas en cuenta, ya que también se excluyen en los períodos de utilización.

Por lo tanto, se establece que el nivel de desagregación para los sistemas informáticos es 1, siendo el balance exergético el mostrado en la figura 12.

Figura 12. Determinación de flujos energéticos en sistemas informáticos

Fuente: El autor



Los flujos energéticos y exergéticos de los sistemas informáticos son:

Flujo 1: Electricidad de entrada

Flujo 2: Energía de salida (aprovechamiento exergético)

Flujo 3: Perdidas exergéticas (periodos de no utilización)

La tabla 16 muestra los flujos energéticos (E) y exergéticos (B) correspondientes a los sistemas informáticos.

Tabla 16. Flujos sistemas informáticos

FLUJO	ENERGÍA (E)	EXERGÍA (B)
1	$E_1 = S_1$	$B_1 = P_1$
2	$E_2 = S_1$	$B_2 = P_1(t_1)$
3	$E_3 = S_1$	$B_3 = P_1(t_2)$

Las características de los flujos de los sistemas informáticos se describen a continuación:

Flujo 1

La exergía del flujo 1 corresponde a la energía activa consumida por los sistemas informáticos durante un determinado tiempo de operación, la cual está descrita mediante la ecuación 40.

$$B_1 = \int_{\tau} P_1 dt \quad [40]$$

$$P_1 = S_1 * FP$$

El factor de potencia (FP) para este caso se considero como 0,97; dato obtenido del promedio de factores de potencia de los computadores de las diferentes oficinas de la sede UIS-Bucárca. La potencia activa y la potencia aparente se calculan mediante las ecuaciones 41 y 42, respectivamente.

$$P_1 = S_1 * 0,97 \quad [41]$$

y

$$S_1 = V * I \quad [42]$$

Por lo tanto la exergía de estos sistemas es igual a:

$$B_1 = V * I * 0,97 * \int_T dt$$

Para este caso, el tiempo considerado corresponde a aquel en el cual el equipo se encuentra encendido (periodos de utilización y de no utilización).

El análisis exergético para los sistemas informáticos se realizará para una hora de operación, por lo tanto el flujo 1 se asume constante para todos los equipos. Si se considera que un computador operando requiere aproximadamente una corriente de 1,5A, la exergía del flujo 1 para los sistemas informáticos es igual a:

$$B_1 = 120 * 1,5 * 0,97 * 3600 = 628,56kJ$$

Flujo 2

Para el cálculo de este flujo, se tiene en cuenta la misma potencia de entrada del flujo 1, pero el tiempo de la integral corresponde al tiempo durante el cual el equipo se encuentra encendido y se obtiene un beneficio específico, este tiempo se expresa en forma porcentual basados en la hora de operación descrita para el flujo 1 y recibe el nombre de factor de utilización (Fu), ver ecuación 43. Por consiguiente la exergía del flujo 2 se calcula mediante la ecuación 44.

$$t_1 = (Fu) * (t) \quad [43]$$

$$B_2 = (Fu) * (B_1) \quad [44]$$

Flujo 3

La exergía de este flujo se puede calcular de forma numérica, ya que la variable determinante al igual que en el flujo 1 y 2 corresponde al tiempo,

solo que para este caso corresponde a aquel donde el equipo se encuentra encendido, pero no se obtiene ningún beneficio (no utilización). En la ecuación 45 se muestra forma mediante la cual se calcula el tiempo durante el cual el equipo se encuentra encendido y no se obtiene beneficio alguno.

$$t_2 = t - t_1 \qquad t_2 = t * (1 - Fu) \qquad [45]$$

La exergía para el flujo 3 de los sistemas informáticos se calcula mediante la ecuación 46.

$$B_3 = (1 - Fu) * (B_1) \qquad [46]$$

Finalmente el rendimiento exergético se obtiene mediante la ecuación 47.

$$\eta\% = \frac{B_2}{B_1} \times 100 \qquad [47]$$

De donde se puede decir, que para los sistemas informáticos, el rendimiento exergético corresponde al mismo valor del factor de utilización (Fu) antes definido.

Con todo lo anterior, ya se tienen las herramientas suficientes para implementar el análisis Termoeconómico en los circuitos eléctricos de la sede UIS-Bucarica con el fin de determinar y cuantificar las irreversibilidades del sistema.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ANÁLISIS TERMOECONÓMICO EN CIRCUITOS ELÉCTRICOS

Una vez caracterizada la infraestructura energética, se procederá a realizar la implementación del análisis termoeconómico con el propósito de identificar las principales irreversibilidades de los elementos del sistema. Lo anterior permitirá determinar la irreversibilidad total que corresponderá a la suma de las irreversibilidades en cada uno de los elementos.

A continuación se describen los criterios de selección utilizados para la escogencia de los circuitos analizados, y posteriormente, la aplicación de los modelos descritos en el capítulo 3, determinando de esta manera los rendimientos exergéticos de los elementos que componen el sistema, finalizando con el análisis de los resultados obtenidos y la evaluación financiera que permite establecer los posibles ahorros económicos (termoeconomía) que se pueden llegar a obtener mediante la implementación de este trabajo.

4.1 Criterios de selección de los circuitos analizados

El análisis exergético se realiza a los circuitos de mayor carga y de mayor irreversibilidad. Para este caso se contó con 6 tableros denominados T1, T2, T3, T4, TG-1 y Tu. Una vez determinados los tableros de mayor carga y de mayor irreversibilidad, y teniendo en cuenta que estos son los encargados de distribuir los flujos de potencia a las cajas ubicadas en los diferentes niveles de las instalaciones, nuevamente se determina la potencia consumida y las irreversibilidades para cada una de estas cajas, en las cuales se centra el análisis exergético propuesto en este proyecto.

4.1.1 Cálculo de potencia en los circuitos eléctricos

Para determinar el circuito de mayor potencia, se consideró una carga trifásica en estrella con neutro a tierra y tensión equilibrada de $V_{LL} = 208V$ pero con carga desbalanceada como se estableció en el capítulo 3 (tabla 11). El sistema se muestra en la figura 13.

Tomando como base el criterio propuesto por el estudio IEEE 1459 se obtiene la potencia equivalente trifásica.

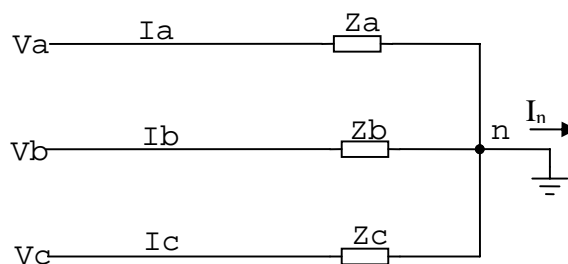
$$S_{3\phi} = 3.V_e.I_e \quad [48]$$

Siendo la tensión equivalente igual a la tensión de fase $\left(\frac{V_{LL}}{\sqrt{3}}\right)$ por estar el sistema equilibrado en tensión. La corriente equivalente se obtiene aplicando la ecuación 49.

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}} \quad [49]$$

Figura 13. Conexión de las cargas del sistema

Fuente: El autor



En la ecuación 49 las corrientes I_a , I_b , I_c corresponden a las corrientes de línea del sistema trifásico desbalanceado, e I_n a la corriente del neutro.

Tomando las diferentes corrientes de línea mostradas en las tablas 11 y 12 del capítulo 3 y considerando que se encuentran desfasadas $\frac{2\pi}{3}$, se realizó en cálculo de las corrientes de neutro para cada uno de los tableros; los resultados se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Corriente de neutro en tableros principales

TABLERO	I_n [A]
T1	7,26
T2	8,02
T3	23,18
T4	4,19
TG-1	6,76
Tu	6,47

Con las corrientes de neutro de la tabla 17 y las corrientes de línea mostradas en las tablas 11 y 12, se obtiene la corriente equivalente I_e para cada uno de los tableros, los cuales se muestran en la tabla 18.

Tabla 18 Corriente trifásica equivalente I_e de los tableros principales

TABLERO	I_e [A]
T1	41,63
T2	71,68
T3	66,29
T4	34,65
TG-1	30,26
Tu	18,89

Teniendo en cuenta la ecuación 48 y las corrientes mostradas en la tabla 18, se obtiene la potencia aparente equivalente trifásica de cada uno de los

circuitos tomando como referencia las corrientes promedio medidas, ver tabla 19.

Tabla 19. Potencia en tableros de protección

TABLERO	Se [VA]
T1	14 985,41
T2	25 805,79
T3	23 864,61
T4	12 475,57
TG-1	10 894,31
Tu	6 801,34
S total	94 827,03

Con este análisis se encontró que los tableros de mayor consumo, corresponden a T2 y T3 con un 52,38% de la carga total consumida. Una vez realizada esta selección, se procedió a calcular la potencia consumida por las diferentes cajas eléctricas conectadas a los totalizadores, con el fin de determinar las que presentan el mayor consumo energético. Los valores obtenidos se presentan en las tablas 20 y 21.

Tabla 20. Potencia en cajas eléctricas de T2

CAJA	FASE	I[A]	Se[VA]
P2-T1	la	3,5	1 617,60
	lb	5,7	
	lc	1,4	
P2-T3	la	7,6	4 003,78
	lb	7,3	
	lc	14,5	
P2-T4	la	8,2	4 395,69
	lb	14,7	
	lc	11,5	
P2-T9	la	1,7	1 193,08
	lb	4,3	
	lc	0,5	
P1-T3	la	0	0
	lb	0	
	lc	0	
P0-T1	la	0,5	180,00
	lb	0,5	

	lc	0,5	
		TOTAL	<u>11 390,14</u>

Tabla 21. Potencia de cajas eléctricas de T3

CAJA	FASE	I[A]	Se[VA]
P1-T1	la	0	0
	lb	0	
	lc	0	
P3-T4	la	20,9	10 582,92
	lb	35,5	
	lc	27,1	
P3-T5	la	15	13 986,54
	lb	42,8	
	lc	41,6	
		TOTAL	<u>24 569,46</u>

Las mediciones de potencia para el circuito T1 se presentan en la tabla 22.

Tabla 22. Potencia en cajas eléctricas de T1

CAJA	FASE	I[A]	Se[VA]
P1-T8	la	0	0
	lb	0	
	lc	0	
P3-T1	la	9,3	3 575,44
	lb	12	
	lc	6,6	
P3-T2	la	23	10 471,15
	lb	25,6	
	lc	35,1	
P3-T3	la	5,7	1 681,24
	lb	0,5	
	lc	3,5	
		TOTAL	<u>15 727,83</u>

Considerando las potencias aparentes equivalentes trifásicas, se seleccionaron las cajas eléctricas a las cuales se le realizará el análisis exergético. Por el circuito T1 la caja *P3-T2* y por el circuito T3 la caja *P3-T5*.

4.1.2 Cálculo de irreversibilidades en los circuitos eléctricos

Teniendo en cuenta que la irreversibilidad de un circuito eléctrico se puede relacionar con el valor de la potencia no activa que se requiere, se obtiene el valor de potencia no activa del sistema trifásico mediante la ecuación 50.

$$Q = S_e \sqrt{1 - FP^2} \quad [50]$$

Donde

FP Es el valor del factor de potencia de la carga y se obtiene como la relación mostrada en la ecuación 51.

$$FP = \frac{P}{S_e} \quad [51]$$

Tomando los factores de potencia encontrados para cada uno de los elementos en el capítulo 3, se determinó que para los tableros en los cuales la carga consiste en solo sistemas de refrigeración, mantener el mismo factor de potencia de 0,8 para realizar los cálculos, y que para los tableros en los cuales se encuentran sistemas de iluminación e informáticos, se consideró un factor de potencia para estos circuitos de 0,96 que corresponde al valor promedio de los factores de potencia establecidos para los dos tipos de carga.

Debido a que el tablero "*Tu*" tiene conectado sistemas de refrigeración, iluminación e informáticos, se consideró un factor de potencia de 0,88; que

corresponde al valor promedio entre los factores establecidos para cada uno de los tipos de la carga instalada, también es considera que la potencia de estas cargas es la misma.

Por lo tanto se encontró que las irreversibilidades para cada uno de los totalizadores son las que se muestran en la tabla 23.

Tabla 23. Irreversibilidades en tableros de protección

TABLERO	Q [VAR]
T1	4 195,92
T2	7 225,62
T3	14 318,77
T4	7 485,34
TG-1	3 050,41
Tu	3 230,46
S total	<u>39 506,52</u>

De acuerdo con los resultados de la tabla 23, se establece que los circuitos eléctricos de mayor irreversibilidad son “T3” y “T4” para la realización del análisis termoeconómico.

Las irreversibilidades para cada una de las cajas eléctricas de los circuitos “T3” y “T4” son las que se muestran en las tablas 24 y 25, respectivamente.

Tabla 24. Irreversibilidades en cajas eléctricas de T3

CAJA	Q [VAR]
P1-T1	0
P3-T4	6 349,75
P3-T5	8 391,92
TOTAL	<u>14 741,67</u>

Tabla 25. Irreversibilidades en cajas eléctricas de T4

CAJA	Q [VAR]
P2-T2	2 659,17
P2-T8	2 282,12
P2-T10	1 356,69
TOTAL	6 297,98

Teniendo en cuenta los datos de las tablas 24 y 25, se estableció que las cajas eléctricas a analizar son la *P3-T5* por el circuito *T3* y la *P2-T2* por el circuito *T4*.

Identificadas las cajas eléctricas de mayor consumo y las de mayor irreversibilidad, se encontró que la caja *P3-T5* del circuito *T3* cumple con las dos condiciones, por lo tanto, el análisis se realizará a las cajas *P3-T2* del circuito *T1*, la caja *P3-T5* del circuito *T3* y la caja *P2-T2* del circuito *T4*.

Teniendo en cuenta la potencia total y las irreversibilidades del sistema, se puede obtener un factor de potencia global, (ver ecuación 52), que permite tener una primera aproximación a la eficiencia energética del sistema eléctrico.

$$FP = \frac{\sqrt{S_e^2 - Q^2}}{S_e} \quad [52]$$

$$FP = \frac{\sqrt{94\,827,03^2 - 39\,506,52^2}}{94\,827,03} = 0,9091$$

Para este sistema, el factor de potencia global es de 0,9091.

4.2 Aplicación de los modelos para el análisis termoeconómico

Ya una vez identificados los diferentes circuitos a analizar, se realizó la aplicación de los modelos descritos en el capítulo 3 con el fin de realizar la medición de las diferentes variables que intervienen en el proceso y a su vez, lograr la determinación de las irreversibilidades de cada uno de los elementos del sistema.

4.2.1 Sistemas de refrigeración

Para el caso de los sistemas de refrigeración, tal y como se describió en el capítulo 3, se realizó el cálculo de los flujos exergéticos mediante la implementación de la interfaz creada en *Matlab*, por lo tanto el trabajo consistió en realizar las mediciones eléctricas de corriente y tensión, así como las mediciones de la humedad relativa y temperatura para la condición inicial y final de operación del sistema teniendo en cuenta el tiempo necesario para realizar dicho cambio.

Para el caso de la presión atmosférica, esta fue tomada de los datos sobre las condiciones climáticas de Bucaramanga otorgadas por el *IDEAM*, ver tabla 26.

Tabla 26. Características climáticas de Bucaramanga (IDEAM)

Altura sobre el nivel del mar	960m
Temperatura promedio	23°C
Presión atmosférica	90,299 kPa
Humedad relativa [Φ]	86,08%

4.2.1.1 Tablero P3-T5

El primer paso fue la realización de un inventario de los diferentes equipos de refrigeración existentes en cada uno de los circuitos del tablero, ver tabla 27, en donde se especifica la capacidad de cada uno de ellos y el tiempo durante el cual se presta servicio o se desempeña alguna actividad en el recinto.

Tabla 27. Inventario de elementos, tablero P3-T5

OFICINA N°	N° DE UNIDADES	CAPACIDAD (BTU)	h/día
301	1	12000	10
305	1	12000	10
306	1	12000	10
307	1	8000	10
308	1	12000	10
309	1	12000	10
CIDLIS	3	24000	10

En la oficinas 302, 303 y 304, no se realizó ningún tipo de mediciones dado a que estas oficinas se encuentran inhabilitadas.

Una vez realizado el inventario, se procedió al análisis exergético de cada uno de los elementos, para este análisis se consideró un tiempo de operación de 20 minutos, el cual se determinó como un tiempo apreciable para la toma de las mediciones debido a la sobre carga que presentan los diferentes equipos de refrigeración, que a su vez no permite la existencia de periodos de carga y descarga para los equipos. Los sistemas de refrigeración utilizados en la sede UIS-Bucárica están conectados a la tensión de línea del sistema trifásico, es decir la tensión de alimentación es de 208V.

Realizadas las mediciones, se procedió a ingresar los datos a la interfaz creada en *Matlab* y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 28, en la cual se muestran las principales características de operación de cada equipo y el cálculo de la exergía de entrada y de salida, así como el rendimiento exergético que presenta cada una de los equipos analizados.

Tabla 28. Resultados sistemas de refrigeración tablero P3-T5

Oficina N°	Equipo N°	Capacidad [BTU]	Corriente de carga [A]	Humedad relativa inicial [%]	Temperatura inicial [°C]	Humedad relativa final [%]	Temperatura final [°C]	Temperatura de referencia [°C]	Exergía de entrada "B ₁ " [kJ]	Exergía de salida "B ₂ " [kJ]	Rendimiento exergético "η" [%]
301	1	12000	7	80	25,5	74	24,1	23	1 397,76	16,99	1,22
305	1	12000	6	80	25	67	24	23	1 198,08	21,20	1,77
306	1	12000	5,8	70	24,5	57	23,8	23	1 158,14	18,45	1,59
307	1	8000	4	65	27,1	62	26,1	23	798,72	10,83	1,36
308	1	12000	6,6	71	27	65,8	25,1	23	1 317,89	20,48	1,55
309	1	12000	----	----	----	----	----	----	----	----	----
CIDLIS	1 y 2	24000	23	66,5	25	60	23	23	4 592,64	18,70	0,41
	3	24000	13	73	24,8	61	24,1	23	2 595,84	17,75	0,68

A continuación se presenta un cálculo tipo para obtener los datos de la fila 1 de la tabla 28.

Reemplazando los valores obtenidos de tensión, corriente, factor de potencia, temperatura, humedad relativa y tiempo en las ecuaciones 28, 31, 32, 33, 34, 35,36 y 37 descritas en el capítulo 3 se obtiene lo siguiente:

$$B_1 = (208) * (7) * 0,8 * (1200) = 1 397,76 [kJ]$$

Para la exergía de salida se tiene que:

$$H_i = 1,005 * (25,5) + \left(\frac{0,622 * (0,8) * (3,2767)}{90,299 - (0,8 * 3,2767)} \right) * (2441,12) = 71,02347 [kJ / kg]$$

$$S_i = 1,005 * \ln(25,5) + \left(\frac{0,622 * (0,8) * (3,2767)}{90,299 - (0,8 * 3,2767)} \right) * (8,54753) = 3,41382 [kJ / kg * K]$$

$$H_f = 1,005 * (24,1) + \left(\frac{0,622 * (0,74) * (3,0196)}{90,299 - (0,74 * 3,0196)} \right) * (2444,424) = 62,79917 [kJ / kg]$$

$$S_f = 1,005 * \ln(24,1) + \left(\frac{0,622 * (0,74) * (3,0196)}{90,299 - (0,74 * 3,0196)} \right) * (8,57766) = 3,33350 [kJ / kg * K]$$

$$B_2 = 62,79917 - 71,02347 - (296) * (3,33350 - 3,41382) = 16,99 [kJ]$$

$$\% \eta = 1,21552\%$$

4.2.1.2 Tablero P2-T2

Realizando el inventario de los sistemas de refrigeración existentes para este tablero, se encontraron los equipos mostrados en la tabla 29 con sus respectivas características.

Tabla 29. Inventario de elementos, tablero P2-T2

OFICINA N°	N° DE UNIDADES	CAPACIDAD (BTU)	h/día
211	1	12000	10
213	1	12000	10
219	1	12000	10
220	1	12000	10

Nuevamente se realizó el análisis exergético para estos sistemas de refrigeración durante un tiempo de 20 minutos, en los cuales se tomaron las medidas de las variables mencionadas en el capítulo 3.

Teniendo en cuenta las mediciones realizadas durante el tiempo establecido, y la tensión de operación de los equipos que para este caso es de 208V, se ingresaron los datos a la interfaz creada en *Matlab* y los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla 30.

No fue posible realizar las mediciones en la oficina 213, debido a que esta oficina es el archivo de la UIS, y por lo tanto no se pueden realizar cambios de humedad sin que se vean afectadas las propiedades de los documentos allí almacenados.

Tabla 30. Resultados sistemas de refrigeración tablero P2-T2

Oficina N°	Equipo N°	Capacidad [BTU]	Corriente de carga [A]	Humedad relativa inicial [%]	Temperatura inicial [°C]	Humedad relativa final [%]	Temperatura final [°C]	Temperatura de referencia [°C]	Exergía de entrada "B ₁ " [kJ]	Exergía de salida "B ₂ " [kJ]	Rendimiento exergético "η" [%]
211	1	12000	6,3	71	25,5	65,8	24	23	1 257,98	15,78	1,25
213	1	12000	----	----	----	----	----	----	----	----	----
219	1	12000	6,5	76	25,5	68	24,2	23	1 297,92	18,19	1,40
220	1	12000	6,5	80	25	67,2	24	23	1 297,92	20,98	1,62

A continuación se presenta un cálculo tipo para obtener los datos de la oficina 211 de la tabla 30.

Al igual que en el cálculo tipo, se reemplazan los valores de las variables en las ecuaciones 28, 31, 32, 33, 34, 35,36 y 37 descritas en el capítulo 3 se obtiene lo siguiente:

$$B_1 = (208) * (6,3) * 0,8 * (1200) = 1 257,98 [kJ]$$

Para la exergía de salida se tiene que:

$$H_i = 1,005 * (25,5) + \left(\frac{0,622 * (0,71) * (3,2767)}{90,299 - (0,71 * 3,2767)} \right) * (2441,12) = 65,78137 [kJ / kg]$$

$$S_i = 1,005 * \ln(25,5) + \left(\frac{0,622 * (0,71) * (3,2767)}{90,299 - (0,71 * 3,2767)} \right) * (8,54753) = 3,39547 [kJ / kg * K]$$

$$H_f = 1,005 * (24) + \left(\frac{0,622 * (0,658) * (3,003)}{90,299 - (0,658 * 3,003)} \right) * (2444,66) = 58,13858 [kJ / kg]$$

$$S_f = 1,005 * \ln(24) + \left(\frac{0,622 * (0,658) * (3,003)}{90,299 - (0,658 * 3,003)} \right) * (8,57984) = 3,31334 [kJ / kg * K]$$

$$B_2 = 58,13858 - 65,78137 - (296) * (3,31334 - 3,39547) = 15,78 [kJ]$$

$$\% \eta = 1,2544\%$$

4.2.2 Sistemas de iluminación

Para los sistemas de iluminación se aplicaron los modelos propuestos en el capítulo 3, y a su vez se realizó la medición de las diferentes variables que intervienen en estos elementos, en el caso de los sistemas de iluminación fluorescente, solo se tuvieron en cuenta los flujos de entrada y salida así como las irreversibilidades totales del sistema, debido a que por la instalación de los elementos, no fue posible determinar el rendimiento de los balastos para cada uno de los sistemas instalados.

Una vez realizadas las respectivas mediciones, se hicieron los cálculos del rendimiento exergético de las luminarias para un periodo de una hora de operación en el cual se asume que las condiciones de operación de las luminarias son constantes.

4.2.2.1 Tablero P3-T2

En este tablero inicialmente se realizó un inventario de los elementos existentes en cada uno de los circuitos, ver tabla 31, identificando los diferentes sistemas de iluminación empleados en cada oficina para determinar el modelo a seguir para la realización del balance exergético.

Tabla 31. Inventario de luminarias, tablero P3-T2

OFICINA N°	LUMINARIAS
301	2
302	---
303	---
304	---
305	4
306	4
307	4
308	4
309	4
CIDLIS	18
Pasillo	9

En la oficinas 302, 303 y 304, no se realizó ningún tipo de mediciones dado a que estas oficinas se encuentran inhabilitadas.

En la oficina 301, la iluminación está compuesta por bombillos incandescentes de 60W, de los cuales uno se encontraba fuera de servicio, por lo tanto solo se realizaron las respectivas mediciones a la luminaria en funcionamiento.

Posteriormente, se realizó el análisis exergético para cada una de los elementos, de lo cual se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 32.

Tabla 32. Resultados sistemas de iluminación tablero P3-T2

Oficina N°	Corriente de carga [A]	Tensión de operación [V]	Tiempo de operación [s]	Luxes promedio [lux]	Área de trabajo [m ²]	Exergía de entrada [kJ]	Exergía de salida [kJ]	Rendimiento exergético [%]
301	0,6	120	3600	260	24	259,20	32,89	12,69
305	0,9	120	3600	173,1	26	369,36	274,61	74,35
306	0,6	120	3600	88,56	26	246,24	140,5	57,06
307	1,1	120	3600	181,5	26	451,44	287,94	63,78
308	1,1	120	3600	186,15	26	451,44	295,32	65,42
309	1	120	3600	213,11	26	410,40	338,09	82,38
CIDLIS	3,5	120	3600	216,1	60	1 436,40	791,14	55,08

Tomando la oficina 308 como ejemplo para la realización del cálculo de los flujos exergéticos, se tiene que:

$$B_1 = (120) * (1,1) * 0,95 * (3600) = 451,44 [kJ]$$

$$B_2 = \frac{(186,15)}{59} * (26) * (3600) = 295,316 [kJ]$$

$$\% \eta = 65,4164\%$$

4.2.3 Sistemas Informáticos

Para los sistemas informáticos, se tuvo en cuenta el factor de utilización (Fu) descrito en el capítulo 3, el cual se calculó para cada uno de los equipos presentes en la instalación.

Como el factor de utilización corresponde al porcentaje del tiempo en el cual el equipo se encuentra encendido y se obtiene un beneficio específico, y dado a que los sistemas informáticos se consideran como una caja negra en el cual no se tienen en cuenta las pérdidas propias del equipo en su parte de diseño y construcción, se encontró que el rendimiento exergético de cada equipo es igual al factor de utilización del mismo, por tal motivo el cálculo del rendimiento exergético para los sistemas informáticos se realizó teniendo en cuenta los equipos existentes en cada una de las oficinas.

Para realizar este cálculo, se debe hallar el factor de utilización promedio de los equipos presentes en cada una de las oficinas, que corresponde a la suma de los factores de utilización de los equipos existentes en cada oficina dividido por el número de equipos presentes.

La exergía de entrada total corresponde al flujo 1 mencionado en el capítulo 3 multiplicado por el número de equipos presentes en cada oficina. La exergía de salida corresponde a la exergía de entrada total, multiplicada por el factor de utilización promedio para cada oficina, y de esta manera, el rendimiento exergético de los sistemas informáticos para cada oficina, corresponde al mismo valor del factor de utilización promedio anteriormente calculado.

4.2.3.1 Tablero P3-T2

Realizado el inventario de los sistemas informáticos existentes en los circuitos alimentados por el tablero P3-T2, se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 33.

Tabla 33. Inventario de sistemas informáticos, tablero P3-T2

SISTEMAS INFORMÁTICOS TABLERO P3-T2	
OFICINA N°	COMPUTADORES
301	1
302	----
303	----
304	----
305	6
306	3
307	3
308	7
309	5
CIDLIS	26

En la tabla 34 se muestran los diferentes factores de utilización para cada uno de los equipos presentes en las oficinas, con su respectivo factor de utilización promedio.

Tabla 34. Factores de utilización sistemas informáticos tablero P3-T2

N° DE EQUIPOS	OFICINA N°						
	301	305	306	307	308	309	CIDLIS
1	70%	80%	100%	90%	80%	70%	75%
2	----	85%	85%	90%	85%	90%	80%

3	----	85%	80%	90%	85%	90%	80%
4	----	90%	----	----	85%	90%	80%
5	----	85%	----	----	75%	90%	85%
6	----	80%	----	----	75%	----	85%
7	----	----	----	----	----	----	85%
8	----	----	----	----	----	----	75%
9	----	----	----	----	----	----	75%
10	----	----	----	----	----	----	70%
11	----	----	----	----	----	----	80%
12	----	----	----	----	----	----	80%
13	----	----	----	----	----	----	80%
14	----	----	----	----	----	----	100%
15	----	----	----	----	----	----	100%
16	----	----	----	----	----	----	75%
17	----	----	----	----	----	----	75%
18	----	----	----	----	----	----	80%
19	----	----	----	----	----	----	85%
20	----	----	----	----	----	----	85%
21	----	----	----	----	----	----	90%
22	----	----	----	----	----	----	85%
23	----	----	----	----	----	----	85%
24	----	----	----	----	----	----	80%
25	----	----	----	----	----	----	90%
26	----	----	----	----	----	----	85%
Factor de utilización promedio	70%	84,17%	88,33%	90%	80,83%	86%	82,5%

Los equipos con factor de utilización del 100%, corresponden a los servidores o administradores de red, lo que quiere decir, que durante todo el tiempo en el cual el equipo se encuentra encendido, se está obteniendo un aprovechamiento energético de este elemento.

En la tabla 35 se muestran los resultados del análisis exergético en los sistemas informáticos de las oficinas alimentadas por los circuitos del tablero P3-T2, estos resultados son el factor de utilización promedio para cada oficina, los flujos exergéticos de entrada y de salida, así como el rendimiento exergético para los diferentes equipos.

Tabla 35. Resultados sistemas informáticos tablero P3-T2

Oficina N°	Factor de utilización (Fu)	Exergía de entrada [kJ]	Exergía de salida [kJ]	Rendimiento exergético [%]
301	70,00%	628,56	439,99	70,00
305	84,17%	3 771,36	3 174,21	84,17
306	88,33%	1 885,68	1 665,68	88,33
307	90,00%	1 885,68	1 697,10	90,00
308	80,83%	4 399,92	3 551,35	80,83
309	86,00%	3 142,80	2 702,79	86,00
CIDLIS	82,50%	16 342,56	13 482,57	82,50

4.3 Análisis de resultados

Una vez determinados los flujos exergéticos en los elementos del sistema, el siguiente paso consiste determinar las principales causas de las pérdidas de energía y posteriormente cuantificar un posible ahorro a obtener.

Por parte de los sistemas de refrigeración, se encontró que la causa principal de las pérdidas exergéticas o del bajo rendimiento exergético es la sobre carga que presentan los diferentes equipos, es decir, que teniendo en cuenta el volumen de trabajo, su capacidad de refrigeración es muy baja, motivo por el cual los equipos presentan un trabajo continuo (alto consumo de exergía) pero no realizan cambios significativos en las propiedades del ambiente a acondicionar (baja exergía de salida).

La capacidad de un sistema de refrigeración se puede calcular teniendo en cuenta una relación de 210 BTU por cada m³ a refrigerar [Ashrae-06]. Llevando esto a los diferentes sistemas de refrigeración analizados, se tiene que la capacidad mínima que debería tener un sistema de refrigeración es de 14112 BTU. Sumando a esto la carga térmica promedio de 4 computadores y 4 personas (para las oficinas 301 a la 309), se puede determinar que la

capacidad con la que debe contar un sistema de refrigeración en estas oficinas es del orden de 15000 ó 18000 BTU según las condiciones de operación a las cuales vayan a estar expuesto, garantizando un desempeño óptimo por parte de la unidad de refrigeración y un incremento en el rendimiento exergético del equipo.

Al contar con una unidad de refrigeración de mayor capacidad, el consumo de energía eléctrica aumenta, pero se logra tener periodos de trabajo más cortos con los cuales se logran cambios significativos en las propiedades del ambiente a acondicionar.

Un equipo de refrigeración de 15000 BTU con una carga térmica promedio de las presentadas en las instalaciones de la UIS-Bucarica en un tiempo de 20 minutos es capaz de llevar un ambiente con humedad relativa del 80% y temperatura de 26°C, a unas condiciones de 50% de humedad relativa y una temperatura de 23,5°C, con una corriente de carga de 7,5A a una tensión de operación de 208V.

Realizando los cálculos correspondientes para el cálculo de la exergía de los flujos del sistema se tiene lo siguiente:

$$B_1 = (208) * (7,5) * 0,8 * (1200) = 1\,497,60 \text{ [kJ]}$$

$$H_i = 1,005 * (26) + \left(\frac{0,622 * (0,8) * (3,3844)}{90,299 - (0,8 * 3,3844)} \right) * (2439,94) = 73,04150 \text{ [kJ / kg]}$$

$$S_i = 1,005 * \ln(26) + \left(\frac{0,622 * (0,8) * (3,3844)}{90,299 - (0,8 * 3,3844)} \right) * (8,53706) = 3,43852 \text{ [kJ / kg * K]}$$

$$H_f = 1,005 * (23,5) + \left(\frac{0,622 * (0,5) * (2,92)}{90,299 - (0,5 * 2,92)} \right) * (2445,84) = 48,61910 \text{ [kJ / kg]}$$

$$S_f = 1,005 * \ln(23,5) + \left(\frac{0,622 * (0,5) * (2,92)}{90,299 - (0,5 * 2,92)} \right) * (8,59076) = 3,26060 [kJ / kg * K]$$

$$B_2 = |48,61910 - 73,04150 - (296) * |3,26060 - 3,43852|| = 50,60 [kJ]$$

$$\% \eta = 3,38\%$$

Comparando estos resultados con los obtenidos en la tabla, se encuentra que aunque el consumo energético aumenta, el rendimiento exergético también se incrementa, es decir, que se tiene un mayor aprovechamiento energético con un equipo de mayor capacidad, puesto que realiza cambios más significativos en las propiedades del ambiente a acondicionar.

Para los sistemas de iluminación, se encontró que los rendimientos exergéticos presentados son el reflejo de la tecnología empleada en dichos sistemas. En la mayoría de los casos se cuenta con sistemas *slimline* los cuales tienen un bajo costo inicial, pero el rendimiento exergético es bajo al compararlo con otros sistemas de iluminación.

Se resalta la implementación de sistemas de iluminación incandescente en la oficina 301, el cual presenta el menor rendimiento exergético de los circuitos analizados, esto es debido a que en los sistemas de iluminación incandescente, la mayor parte de la energía se transforma en calor.

Para los sistemas informáticos se encontraron diferentes rendimientos exergéticos que varían según el aprovechamiento (factor de utilización) que se le da a los elementos. Teniendo en cuenta los periodos de no utilización de los diferentes elementos, se encontró que en la mayor parte del tiempo en el cual no se obtiene aprovechamiento alguno, los equipos se encuentran consumiendo la misma energía que en los periodos de utilización, es decir

que el modo *stand by* con el que cuentan los equipos no se está aprovechando para ahorros de energía.

Teniendo en cuenta lo anterior, se comprobó que un sistema informático operando en *stand by* o con la pantalla apagada solo consume el 60% de la energía total, lo cual representa un ahorro energético importante.

Para este tipo de sistemas solo se tiene en cuenta la posibilidad del ahorro parcial mediante la opción de *stand by* y no se considera la opción de apagar el equipo por completo, ya que los periodos de no utilización se presentan de forma irregular y el sistema se puede ver afectado por el constante reinicio, por consiguiente es conveniente establecer opciones de ahorro de energía para el monitor que traen los computadores y programar el apagado automático de la pantalla del equipo una vez transcurra un tiempo de inactividad (se recomienda máximo 2 minutos).

Otro aspecto es el desbalance de cargas en las instalaciones, lo cual genera la circulación de una corriente de neutro que aumenta la aparición de potencia no activa en el sistema.

Para el caso del tablero T3 con carga desbalanceada, se presenta un consumo de potencia de 23 864,61VA incluyendo los efectos que implican la circulación de la corriente de neutro. Ahora, asumiendo una carga balanceada con un valor de corriente por cada línea igual al promedio de las corrientes que circulan para la carga desbalanceada ($I=64A$), se tiene que la potencia que consumen las cargas conectadas al tablero T3 corresponde a 23 040,00; lo que indica un aumento de 824,61VA por la circulación de la corriente de neutro debido al desbalance de carga.

Un segundo problema que se presenta por el desbalance de cargas en un sistema de energía eléctrica, es posibilidad de diseñar circuitos sobredimensionados. Por ejemplo, si se toma la corriente promedio medida para el tablero principal T3 (64A) y teniendo en cuenta que las corrientes de línea fueron:

$$I_a = 66,80A \quad I_b = 75,76A \quad I_c = 49,44A$$

Se puede ver que este desbalance en corriente implica la utilización de conductores de mayor calibre que soporten la circulación de las corrientes mas elevadas, lo que representa una mayor inversión por el mayor costo de los conductores de mayor calibre.

4.4 Evaluación financiera

En la parte financiera, se realizó la proyección para la adquisición de nuevos sistemas de refrigeración teniendo en cuenta el ahorro económico que se puede alcanzar con el reemplazo de cada equipo.

En primer lugar se realizó la proyección para las unidades de 12000BTU, en las cuales se recomienda la instalación de unidades de 15000BTU ó 18000BTU. En este caso solo se analizó el reemplazo de las unidades por equipos de 15000BTU.

Un sistema de refrigeración de 12000BTU consume en promedio una potencia de 1,3kW/h; teniendo en cuenta el costo del kW/h para las instalaciones de la UIS-Bucarica que es de \$231,45 en promedio; se tiene que el costo de operación de un sistema de refrigeración de 12000BTU que funciona de forma continua durante una hora es de \$300,89.

Para el caso de la unidad de refrigeración de 15000BTU, la potencia promedio consumida es de 1,40kW; considerando un tiempo de carga de 40

minutos y 20 minutos de descarga durante una hora de operación, se tiene que el costo de operación de la unidad durante el periodo de trabajo estimado para una hora, es de \$216,64; lo que significa un ahorro de \$84,245 por hora.

Se estableció que en promedio un aire acondicionado funciona durante 10 horas al día aproximadamente 25 días en el mes. Por lo tanto cuantificando el ahorro mensual que se puede llegar a obtener, este sería de \$21061,25, lo que anualmente significa un ahorro de \$ 252 735.

Las unidades de refrigeración de 15000BTU tienen un costo inicial de \$1 200 000; por consiguiente, teniendo en cuenta el ahorro económico anual que se puede llegar a tener por la sustitución de los equipos, esta inversión se ve recuperada en un tiempo de 4,75 años sin tener en cuenta la vida útil del equipo ni el valor del dinero en el tiempo.

Para los sistemas informáticos, no se realizó ninguna proyección para la sustitución de equipos, puesto a que el análisis se centró en los tiempos de operación de cada equipo.

En el capítulo 3 se mencionó que un computador en condiciones normales de trabajo, presenta un consumo de 1,5A; y con las mediciones realizadas durante el análisis, se encontró que este consumo se reduce a 0,9A. Es decir que un equipo operando normalmente consume 0,1746kW/h; y con la pantalla apagada solo consume 0,10476kW/h.

El ahorro económico que se puede llegar a obtener en los diferentes sistemas informáticos se calcula mediante la diferencia del costo económico actual y el costo económico proyectado. El costo económico proyectado se calcula sumando el costo del equipo durante el periodo de tiempo que es

utilizado más el costo que implica tener el equipo encendido con la pantalla en *stand by* en los periodos de no utilización de la siguiente manera:

Costo en los periodos de utilización:

$$C_{pu} = 0,1746 * Fu * 231,45 * N_e^{\circ} \quad [53]$$

Costo en los periodos de no utilización:

$$C_{pnu} = 0,1746 * (1 - Fu) * 231,45 * N_e^{\circ} \quad [54]$$

Donde,

Fu es el factor de utilización promedio para cada oficina

N_e° es el numero de equipos presentes en cada oficina

En la tabla 36 se muestra que el ahorro económico que se puede llegar a obtener en los sistemas informáticos durante una hora de operación para los equipos conectados al tablero P3-T2 es de \$137,08, lo que mensualmente trabajando 10 horas diarias durante 25 días corresponde a \$34 269,54, y anualmente es de \$411 234,51 sin tener que realizar ningún tipo de inversiones; simplemente programando el modo *stand by* en los diferentes equipos informáticos de la instalaciones de la sede UIS-Bucarica.

Tabla 36. Ahorro económico sistemas informáticos tablero P3-T2

Oficina N°	Factor de utilización	Costo económico actual [\$]	Costo económico proyectado [\$]			Ahorro económico [\$]
			Costo en los periodos de utilización	Costo en los periodos de no utilización	Costo total en una hora de operación	
301	70,00%	40,41	28,29	7,46	35,75	4,66
305	84,17%	242,47	204,08	23,03	227,11	15,35
306	88,33%	121,23	107,09	8,49	115,57	5,66
307	90,00%	121,23	109,11	7,27	116,38	4,85

308	80,83%	282,88	228,65	32,54	261,19	21,69
309	86,00%	202,06	173,77	16,97	190,74	11,32
CIDLIS	82,50%	1 050,69	866,82	110,32	977,14	73,55
					TOTAL	137,08

Los costos de la energía para la oficina 305 así como los posibles ahorros se describen a continuación.

$$C_{actual} = (0,1746) * (231,45) * (6) = 242,46702 \text{ [\$]}$$

$$C_{pu} = 0,1746 * (0,8417) * 231,45 * (6) = 204,08449 \text{ [\$]}$$

$$C_{pnu} = 0,10476 * (1 - 0,8417) * 231,45 * (6) = 23,02952 \text{ [\$]}$$

$$C_t = C_{pu} + C_{pnu} = 227,11401 \text{ [\$]}$$

$$Ahorro = C_{actual} - C_t = 15,35301 \text{ [\$]}$$

Se calcula que en el tablero P3-T2 se encuentran conectados alrededor del 40% de los sistemas informáticos presentes en las instalaciones, por lo tanto para calcular el ahorro total que se puede obtener, se asume que los equipos restantes presentan un comportamiento similar a los equipos analizados, de esta manera se encuentra que el ahorro mensual es de \$57 116; lo que anualmente corresponde a \$685 400.

4.5 Propuesta para URE

A continuación se presenta una propuesta de URE; en ella se proponen algunos cambios en la tecnología empleada, una nueva asignación de costos a los flujos que intervienen en los equipos y algunas consideraciones en cuanto al manejo e instalación de los elementos.

✓ Capacidad de los sistemas de refrigeración

Partiendo del análisis de resultados, se considera como una alternativa viable el cambio de los sistemas de refrigeración teniendo en cuenta su capacidad

de trabajo, puesto que se logra obtener un mayor rendimiento exergético y a su vez un ahorro económico que a largo plazo permite recuperar la inversión inicial por la adquisición de los equipos.

✓ **Asignación de costos en sistemas de refrigeración**

Teniendo en cuenta que la universidad presta el servicio de alquiler o arriendo de algunas oficinas con el servicio de aire acondicionado, se realizó un análisis del consumo de energía de estos equipos y su costo mensual para compararlo con el valor que se cobra por la utilización de este servicio.

Para este caso se encontró que la UIS, realiza un cobro mensual de \$ 40 000 por el servicio de aire acondicionado los cuales van incluidos en el contrato de arrendamiento firmado por las dos partes, pero en el cual no se especifica la capacidad límite con la que debe contar este sistema de refrigeración.

Teniendo en cuenta la sobre carga que presentan los diversos sistemas de refrigeración y el trabajo continuo al que se ven sometidos diariamente, se realizó el calculo del costo económico que representa el tener funcionando las unidades de 8000, 12000 y 24000 BTU durante un rango de 6 a 12 horas diarias y de 23 a 30 días por mes, para de esta manera poder comparar dicho costo con el valor del cobro mensual que hace la universidad por este servicio.

En las tablas 37, 38 y 39 aparecen una serie de factores para determinadas condiciones de trabajo de los diferentes sistemas de refrigeración mediante los cuales se puede determinar el costo económico del funcionamiento de cada equipo, para ello se debe determinar las condiciones de trabajo a las cuales está sometido cada equipo y buscar el factor que representa esas condiciones para después multiplicar dicho factor por el valor del kW-h en las instalaciones.

Tabla 37. Factores para el cálculo del costo de funcionamiento de los sistemas de refrigeración (8000BTU)

Días Horas	23	24	25	26	27	28	29	30
6	129,168	134,784	140,4	146,016	151,632	157,248	162,864	168,48
7	150,696	157,248	163,8	170,352	176,904	183,456	190,008	196,56
8	172,224	179,712	187,2	194,688	202,176	209,664	217,152	224,64
9	193,752	202,176	210,6	219,024	227,448	235,872	244,296	252,72
10	215,28	224,64	234	243,36	252,72	262,08	271,44	280,8
11	236,808	247,104	257,4	267,696	277,992	288,288	298,584	308,88
12	258,336	269,568	280,8	292,032	303,264	314,496	325,728	336,96

Tabla 38. Factores para el cálculo del costo de funcionamiento de los sistemas de refrigeración (12000BTU)

Días Horas	23	24	25	26	27	28	29	30
6	186,001	194,088	202,17	210,263	218,350	226,437	234,524	242,61
7	217,002	226,437	235,87	245,306	254,741	264,176	273,611	283,04
8	248,002	258,785	269,56	280,350	291,133	301,916	312,698	323,48
9	279,002	291,133	303,26	311,501	327,525	339,655	351,786	363,91
10	310,003	323,481	336,96	350,438	363,916	377,395	390,873	404,35
11	341,003	355,829	370,65	385,482	400,308	415,134	429,960	444,78
12	372,003	388,177	404,35	420,526	436,700	452,874	469,048	485,22

Tabla 39. Factores para el cálculo del costo de funcionamiento de los sistemas de refrigeración (24000BTU)

Días Horas	23	24	25	26	27	28	29	30
6	348,753	363,916	379,0	394,243	409,406	424,569	439,732	454,89
7	406,879	424,569	442,2	459,950	477,640	495,331	513,021	530,71
8	465,004	485,222	505,4	525,657	545,875	566,092	586,310	606,52
9	523,130	545,875	568,6	591,364	614,109	636,854	659,599	682,34
10	581,256	606,528	631,8	657,072	682,344	707,616	732,888	758,16
11	639,381	667,180	694,9	722,779	750,578	778,377	806,176	833,97
12	697,507	727,833	758,1	788,486	818,812	849,139	879,465	909,79

Los cálculos mostrados en las tablas anteriores se calcularon de la siguiente manera:

$$F = \frac{(V) * (I) * 0,8 * (N^{\circ}_{\text{días}}) * (N^{\circ}_{\text{horas}})}{1000}$$

Por lo tanto, para un unidad de 12000BTU la cual presenta un consumo aproximado en corriente de 8A, y para un periodo de operación de 9 horas durante 26 días al mes, se tiene que:

$$F = \frac{(208) * (8) * 0,8 * (26) * (9)}{1000} = 311,501$$

Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando como ejemplo que las oficinas trabajan 10 horas diarias durante 25 días del mes, se determina que el costo real que implica tener funcionando las trece unidades analizadas es de \$ 955 758,88. Teniendo en cuenta el valor cobrado por la UIS al ofrecer este servicio (\$ 40 000 por unidad), los ingresos mensuales son de \$ 520 000, por consiguiente se sugiere que la universidad revise el consumo real que tienen los equipos de aire acondicionado para establecer si el cobro actual por oficina es el adecuado o no. Es de resaltar que este posible ahorro económico es solo teniendo en cuenta los sistemas analizados, por lo tanto falta incluir las demás unidades de refrigeración presentes en las instalaciones.

✓ **Modo stand by en sistemas informáticos**

En el análisis económico se mostró el ahorro que se puede obtener mediante la implementación de la modalidad *stand by* en los diferentes sistemas informáticos sin la necesidad de realizar ningún tipo de inversión económica, se debe incentivar a los usuarios de las instalaciones al uso de la opción

stand by en los diferentes equipos con el fin de obtener ahorros energéticos que se ve representados en ahorros económicos para el funcionamiento del establecimiento.

✓ **Disminución de la altura de montaje de las luminarias**

Durante la realización de las diferentes mediciones para el análisis exergético de los sistemas de iluminación, se encontró que los niveles de iluminación con los que cuentan las diferentes oficinas están muy por debajo del requerimiento mínimo para instalaciones prestadoras de servicios administrativos, por lo tanto se sugiere la disminución de la altura de montaje de las luminarias a una distancia de 2,5

Una de las soluciones más económicas que se puede dar a este problema con el fin de mejorar el nivel de iluminancia en las diferentes zonas de trabajo, es la disminución de la altura de montaje de las luminarias, ya que en la actualidad esta medida supera los 3m. Se recomienda la disminución de dicha altura a una distancia de 1,70m máximo respecto a la superficie de trabajo.

En el siguiente capítulo se muestran las conclusiones y las recomendaciones una vez realizado el análisis exergético de la infraestructura eléctrica de la sede UIS-Bucarica.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos una vez realizado el trabajo de grado y teniendo en cuenta el análisis exergético realizado en los circuitos eléctricos de la sede administrativa UIS-Bucarica, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Realizar la caracterización de la infraestructura energética de un sistema permite conocer en detalle los diversos procesos que pueden afectar su rendimiento exergético.
- El diagrama con los respectivos balances exergéticos de los dispositivos que conforman el sistema permite establecer los diferentes flujos que intervienen en un determinado proceso, para que una vez cuantificados, se obtenga el rendimiento exergético del sistema global o de algún dispositivo en particular dependiendo del nivel de desagregación.
- El cálculo de la exergía para los diferentes flujos de un sistema depende de las propiedades inherentes al flujo (gas, aire, agua, electricidad, etc.), es decir, que se deben plantear diferentes alternativas para el cálculo de la exergía teniendo en cuenta las variables que puedan medirse en el sistema, las cuales están determinadas por el nivel de desagregación.
- El nivel de desagregación de un sistema permite determinar los puntos críticos que generan la mayor parte de las irreversibilidades, para de esta manera brindar soluciones puntuales que permitan un mejor aprovechamiento energético.
- Una vez obtenido el rendimiento exergético de los diferentes dispositivos del sistema, se determina el rendimiento exergético global, y al mismo tiempo se puede cuantificar el costo de las pérdidas

exergéticas que se presentan en el sistema, y como ellas afectan directamente al producto final.

- Con el desarrollo de este trabajo se dejó planteada una alternativa para la realización de análisis exergético en instalaciones de usuarios comerciales, o en aquellas en las que prevalezcan los elementos mencionados en este trabajo como lo son los sistemas de refrigeración, iluminación y los sistemas informáticos.
- Es necesario que la sociedad sea consciente de la importancia del URE, con el fin de lograr no solo procesos mas eficientes desde el punto de vista energético, sino que a su vez, poder aportar en la preservación de los recursos energéticos no renovables, como fuentes indispensables para la generación de energía. Esta conciencia URE se logra a partir de detalles como los mostrados en el desarrollo de este trabajo de grado, es decir, mediante la implementación del modo *stand by* para las computadoras, la instalación de lámparas de mayor eficiencia, estudios para la determinación de la capacidad en los sistemas de refrigeración, y otros aspectos que dependerán del tipo de proceso que requiera la utilización de energía.
- Este trabajo de grado fue una oportunidad importante para aplicar los conocimientos adquiridos durante mi formación profesional y a la vez me permitió iniciarme en actividades de investigación, realizadas con el objeto de proponer soluciones técnicas a los diferentes problemas planteados durante su desarrollo, lo cual reforzó mis criterios de decisión y me fortaleció a nivel personal.

Una de las recomendaciones a tener en cuenta para futuros estudios basados en el análisis exergético desde el punto de vista de la termoeconomía, es el poder considerar el aumento del nivel de desagregación del sistema mediante la determinación de otras variables medibles, que permitan localizar los principales focos de irreversibilidades de

una manera puntual, ya que para este caso el análisis se realizó con un solo nivel de desagregación y por consiguiente solo se determinaron las irreversibilidades del sistema global, mas no los elementos puntuales que las generan. Para realizar esto se requiere de equipos que permitan la medición de variables como presión, humedad relativa, torque, vibraciones, entre otras.

Se encontró que la selección inadecuada de las unidades de aire acondicionado han provocado consumos energéticos mayores y por consiguiente mayores costos, por lo tanto, es necesaria la realización de estudios para cuantificar adecuadamente la energía consumida por los equipos de refrigeración presentes en las instalaciones de la sede UIS Bucárica, con el fin de reajustar los cobros hechos a los arrendatarios los cuales dependen del tipo de aire acondicionado empleado y de los periodos de trabajo que se presentan.

BIBLIOGRAFÍA

- [Capte UIS-98] Centro piloto de capacitación y optimización de centrales térmicas y estudios energéticos, “Proyecto CLÍOPE caso piloto planta Termobarranca”, Escuela de ingeniería mecánica, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, 1998.
- [Valero-01] A. Valero, J. Guayar, J. Marín y J. Turegano, “La Exergía: un planteamiento mas preciso del ahorro del energía”, Escuela técnica superior de ingenieros industriales, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España.
- [Valero-89] A. Valero, j. Guayar y M. Lozano, “Teoría del Coste exergético: I conceptos básicos”, Centro politécnico superior de ingenieros, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, Abril 1989.
- [Valero-00] A. Valero y C. Torres, “Curso de doctorado: termoeconomía”, Centro politécnico superior de ingenieros, universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, 2000.
- [Çengel-01] Y. Çengel y M. Boles, “Termodinámica”, Mc Graw Hill, México, junio 2001, Vol. I y II, p. 387-394.
- [Philips-06] Philips Dialux plugin, “Software para el calculo de flujos luminosos en interiores”, Mayo 2006.
- [De Gregorio-06] G. De Gregorio, “Balastos electrónicos: ahorro de energía-mejor factor de potencia”, Departamento Técnico de Industrias Wamco, Wamco S.A.

- [DCM-06] DCM Sistemas, “Medidas de luz”, <http://dcmsistemas.com/medidas.html>.
- [Montes-00] P. Montes, R. Blasco, R. Gaitán, J. García, R. Ros, J. González y J. Corberán, “Modelado de sistemas de refrigeración por compresión de vapor”, Departamento de termodinámica aplicada, Universidad politécnica de Valencia, Valencia, España, 2000.
- [Wall-98] G. Wall, “Exergetics”, Physical Resource Theory Group, Mölndal, Sweden, 1998.
- [Bonilla-06] W. Bonilla, “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”, Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, 2006.
- [Ashrae-06] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, <http://www.ashrae.org/>.
- [Gomez&Quintero-07] D. Gomez, A. Quintero, “Estudio y rediseño de las instalaciones eléctricas de la sede UIS-Bucarica”, Escuela de Ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, 2007.

ANEXOS

ANEXO A

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 cadenas energéticas, 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 10MW.

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 diseñara 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.**

ANEXO B

Tabla de propiedades para el vapor de agua (vapor saturado)

Temp. (°C)	Presión (kPa)	Entalpia h_g (kJ/kg)	Entropía S_g (kJ/(kg.K))
10	1,2276	2477,7	8,9008
15	1,7051	2465,9	8,7814
20	2,339	2454,1	8,6672
25	3,169	2442,3	8,5580
30	4,246	2430,5	8,4533
35	5,628	2418,6	8,3531
40	7,384	2406,7	8,2570
45	9,593	2394,8	8,1648

ANEXO C

Programa para el cálculo de flujos exergéticos en los sistemas de aire acondicionado

A continuación se encuentra la interfaz realizada en Matlab con el propósito de calcular los flujos exergéticos de entrada y de salida para los sistemas de aires acondicionados en general.

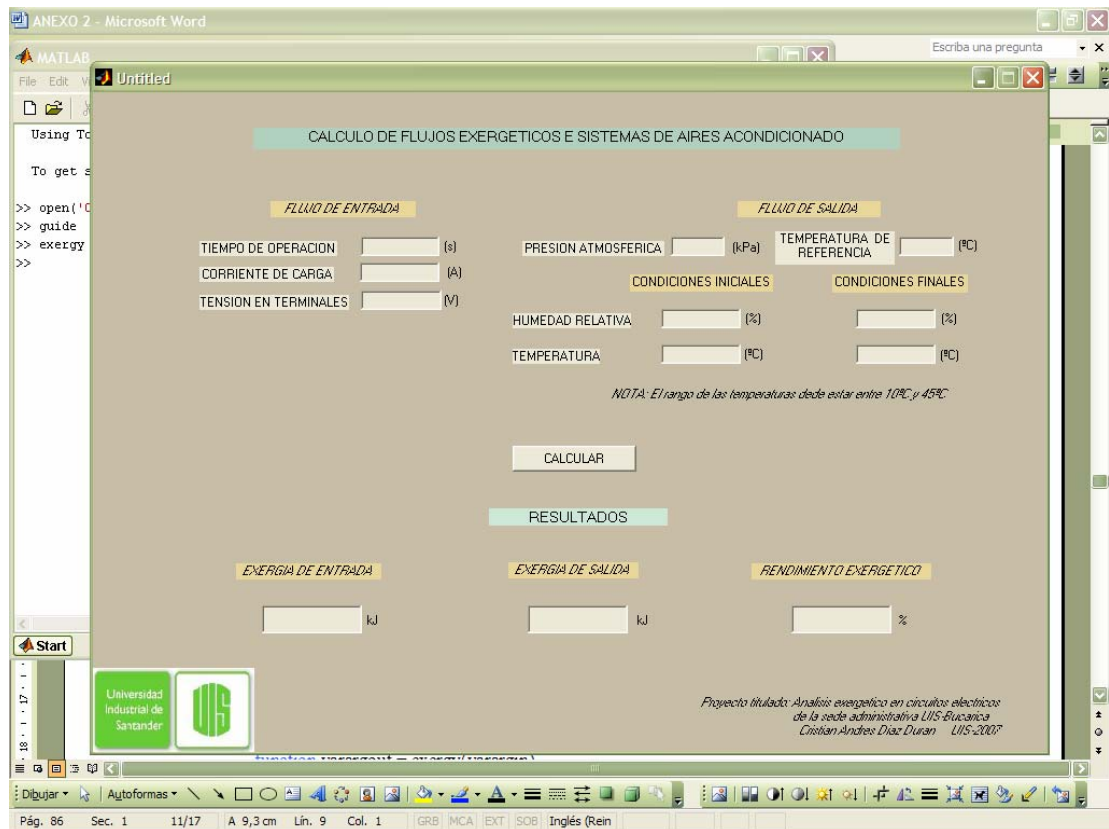
Para la utilización de este programa, se debe contar previamente con los siguientes datos del sistema:

1. Corriente de carga, en amperes.
2. Tensión de operación, en volts.
3. Tiempo de operación [s].
4. Presión atmosférica de la zona de trabajo [kPa].
5. Temperatura ambiente de la zona de trabajo [°C]
6. Humedad relativa para las condiciones iniciales [%]
7. Temperatura en condiciones iniciales [°C]
8. Humedad relativa para las condiciones finales [%]
9. Temperatura en condiciones finales [°C]

Las condiciones iniciales corresponden al instante en el cual el sistema de aire acondicionado empieza a realizar su labor. Las condiciones finales por su parte, corresponde a las condiciones alcanzadas en la zona de trabajo, una vez ha transcurrido el tiempo de operación del sistema de refrigeración.

Una vez se tengan los anteriores datos, basta con ser introducidos en las casillas correspondientes y hacer click en "CALCULAR".

El programa por su parte arroja de forma inmediata los flujos exergéticos de entrada y salida para el sistema, así como el rendimiento exergético del mismo.



El elemento a tener en cuenta en la realización de la interfaz fue la tabla de propiedades para el vapor de agua, ver Anexo B, en la cual se tiene especial cuidado con los intervalos de temperatura mostrados ya que no presentan un comportamiento lineal, y requiere de hacer linealizaciones parciales entre intervalos de temperatura que permitan aproximar las propiedades descritas y de esta manera poder realizar los cálculos correspondientes.

Una vez se logra identificar las propiedades para cada una de las temperaturas a trabajar (inicial y final), dichos valores son introducidos en las

formulas indicadas en el capítulo 3 calculando las exergías para cada uno de los flujos y el rendimiento exergético del sistema de refrigeración

El programa realizado en *MATLAB* es el siguiente:

```
function varargout = exergy(varargin)
% EXERGY M-file for exergy.fig
%   EXERGY, by itself, creates a new EXERGY or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = EXERGY returns the handle to a new EXERGY or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   EXERGY('Property','Value',...) creates a new EXERGY using the
%   given property value pairs. Unrecognized properties are passed via
%   varargin to exergy_OpeningFcn. This calling syntax produces a
%   warning when there is an existing singleton*.
%
%   EXERGY('CALLBACK') and EXERGY('CALLBACK',hObject,...) call the
%   local function named CALLBACK in EXERGY.M with the given input
%   arguments.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help exergy

% Last Modified by GUIDE v2.5 18-Oct-2006 00:02:16

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @exergy_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @exergy_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin & isstr(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
```

```

    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before exergy is made visible.
function exergy_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   unrecognized PropertyName/PropertyValue pairs from the
%           command line (see VARARGIN)

% Choose default command line output for exergy
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes exergy wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = exergy_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on mouse press over figure background, over a disabled or
% --- inactive control, or over an axes background.
function figure1_WindowButtonDownFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to figure1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

V = str2double(get(handles.edit5,'String'));
I = str2double(get(handles.edit3,'String'));
t = str2double(get(handles.edit4,'String'));
P = str2double(get(handles.edit6,'String'));
y1 = str2double(get(handles.edit7,'String'));
T1 = str2double(get(handles.edit9,'String'));
y2 = str2double(get(handles.edit8,'String'));
T2 = str2double(get(handles.edit10,'String'));
To = str2double(get(handles.edit15,'String'));

```

%La exergia de entrada corresponde a:

```
B1=((V*I*.9)*t)/1000;
```

```

%      T      P      Sg
%      (°C)   (kPa)   (kJ/(kg.K))
Datos=[ 10  1.2276  8.9008; %1
        15  1.7051  8.7814; %2
        20  2.3390  8.6672; %3
        25  3.1690  8.5580; %4
        30  4.2460  8.4533; %5
        35  5.6280  8.3531; %6
        40  7.3840  8.2570; %7
        45  9.5930  8.1648]; %8

```

% Para el calculo de la presión de saturación (Ps1, Ps2) y la entropía para el vapor de
 % agua para cada una de las condiciones especificadas en el problema (Sg1, Sg2), se
 % tiene que:

% Para las condiciones iniciales:

```

if T1<Datos(2,1)
    Ps1=(.0955*T1)+.2726;
    Sg1=(-.02388*T1)+9.1396;
else
    if T1<Datos(3,1)
        Ps1=(.12678*T1)-.1966;
        Sg1=(-.02284*T1)+9.124;
    else
        if T1<Datos(4,1)
            Ps1=(.166*T1)-.981;
            Sg1=(-.02184*T1)+9.104;
        else
            if T1<Datos(5,1)
                Ps1=(.2154*T1)-2.216;
                Sg1=(-.02094*T1)+9.0815;
            else

```



```

end
end
end
end
end
end
end

```

```

% Por lo tanto, las presiones del vapor de agua para cada una de las
% condiciones son:

```

```

Pv1=(y1/100)*(Ps1);      Pv2=(y2/100)*(Ps2);

```

```

% Partiendo de las presiones de vapor de agua anteriormente calculadas, se
% puede determinar el valor de la humedad específica para las condiciones
% dadas:

```

```

w1=((.622)*(Pv1))/(P-Pv1);  w2=((.622)*(Pv2))/(P-Pv2);

```

```

% Para el cálculo de la entalpía del vapor de agua, se tiene que:

```

```

hg1=2501.3+(1.82*T1);      hg2=2501.3+(1.82*T2);

```

```

% Las entalpías para el aire seco son:

```

```

ha1=1.005*T1;              ha2=1.005*T2;

```

```

% La entropía para el aire seco en cada una de las condiciones, esta dada por:

```

```

Sa1=1.005*log(T1+273);     Sa2=1.005*log(T2+273);

```

```

% Por lo tanto, la entalpía y la entropía total para cada una de las condiciones,
% corresponden a:

```

```

h1=ha1+(w1*hg1);          h2=ha2+(w2*hg2);
S1=Sa1+(w1*Sg1);          S2=Sa2+(w2*Sg2);

```

```

% Por lo tanto, la exergía de salida para el sistema de aire acondicionado,
% esta dada por:

```

```

B2=abs(h2-h1-((To+273)*abs(S2-S1)));

```

```

% El rendimiento exergético, esta dado por:

```

```

n=(B2/B1)*100;

```

```

set(handles.edit11,'String',B1);
set(handles.edit12,'String',B2);
set(handles.edit13,'String',n);

```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
grafica=imread('C:\MATLAB6p5\work\UIS','jpg');
handles.axes4=image(grafica);
axis off
% hObject    handle to axes4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes4
```