

Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y METALURGICA



TESIS

**ALGORITMO DE EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO
EXERGETICO DE UN SISTEMA PRODUCTIVO**

Presentado Por

Máximo Junior Zapata Mateo

**PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO
QUIMICO**

ASESOR: Dr. Alberto Irhaam Sánchez Guzmán

HUACHO – PERÚ

2018

MIEMBROS DEL JURADO

M(o). RODRIGUEZ ESPINOZA, RONALD FERNANDO
PRESIDENTE

M(o). COCA RAMIREZ, VICTOR RAÚL
SECRETARIO

Ing. TORRES CORCINO, EDELMIRA
VOCAL

Dr. SANCHEZ GUZMAN, ALBERTO IRHAAM
ASESOR

INDICE

DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
RESUMEN	ix
SUMMARY	x
CAPITULO I.....	12
GENERALIDADES	12
1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	12
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
1.2.1 PROBLEMA GENERAL	12
1.2.2 PROBLEMAS ESPECIFICOS	12
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	13
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
1.4 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO	13
CAPITULO II:.....	15
MARCO TEÓRICO	15
2.1 Sistemas termodinámicos (Martin,T.,Serrano, A., 2009.), (Jaramillo,O., 2008)	15
2.2.1 Sistemas termodinámicos y su entorno. (Martin,T.,Serrano, A., 2009.)	15
2.2.2. Energía: trabajo y calor	16
2.2.3. Formas de transferencia de calor	18
2.2.4 Estados termodinámicos (Delgadillo,S., 2011)	18

2.2.5. Propiedades de estado (Gomez, T., 2005), (Moran,M., Shapiro, H., 2004.)	19
2.2.6. Propiedades intensivas y extensivas (Gomez, T., 2005)	20
2.3 Balance de masa, energía y entropía en sistemas cerrados estacionarios. (Gomez, T., 2005)	21
2.3.1 Sistema estacionario y no estacionario	21
2.3.2 ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE (Gomez, T., 2005), (Smith & Van Ness, 1991)	21
3.1. Descripción del sistema	36
3.2 Especificación de los volúmenes de control	37
3.3. Ambiente de referencia del sistema. Estado muerto	37
3.4. Simplificaciones	38
3.5. Balances de energía, materia y exergía.	39
3.6. Análisis exergético y diagrama de flujo exergético	39
3.7. Eficiencia exergética y sumideros de exergía	40
3.8. DESCRIPCIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	43
3.9. TERMODINÁMICA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	44
3.9.1 BALANCE DE MASA. (Moran,M.,Shapiro, H., 2004)	44
3.9.3. Balance para el aire seco	48
3.9.4. Balance para el aire seco	49
3.10. BALANCE DE ENTROPIA.	50
3.11. BALANCE DE EXERGÍA.	53
3.12. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA	58

3.12.1. EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	59
3.12.2. EFICIENCIA EXERGÉTICA.....	60
3.13. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO.....	61
3.13.1. Balances de masas	63
CAPITULO V:	67
RESULTADOS	67
CAPITULO VI:	68
CONCLUSIONES.....	68

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Definición de las corrientes de la torre de enfriamiento	62
Tabla N° 2. Características termodinámicas de las corrientes de la torre de enfriamiento	65

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Tipos de sistemas termodinámicos. (Martin,T.,Serrano, A., 2009.).....	16
Figura N° 2 Esquema donde se representa un sistema termodinámico rodeado por su ambiente.	17
Figura N° 3 Flujos de energía en un volumen de control y de forma alternativa.....	24
Figura N° 4 Ilustración del enunciado de Kelvin Planck	27
Figura N° 5 Ilustración del enunciado de Clausius.	28
Figura N° 6 Variación de entropía en procesos con irreversibilidades internas.....	31
Figura N° 7 7Diagrama de flujo de cálculo	42
Figura N° 8 Flujo de masa en un volumen de control.....	45
Figura N° 9 9Esquema de la torre de enfriamiento, indicando los flujos de masa.....	46
Figura N° 10 Flujos de energía en un volumen de control y de forma alternativa.....	48
Figura N° 11 Esquema de la torre de enfriamiento, indicando los flujos de energía.	49
Figura N° 12 Flujos de entropía para un volumen de control.	53
Figura N° 13 Esquema de la torre de enfriamiento, indicando los flujos de entropía.....	54
Figura N° 14 Flujos de exergía en un volumen de control.....	55
Figura N° 15 Esquema de la torre de enfriamiento, indicando los flujos de exergía.	57
Figura N° 16 Esquema de la torre de enfriamiento y la definición de las corrientes.	62
Figura N° 17 Rendimientos, energético y exergetico de la torre de enfriamiento comparados con los respectivos rendimientos del estudio base.	66

DEDICATORIA

A DIOS POR SU BENDICIONES REALIZADAAS HACIA MI PERSONA

A MI FAMILIA POR SU CONFIANZA Y APOYO

AGRADECIMIENTO

**A MI FAMILIA, A MI ASESOR, AL PERSONAL DOCENTE Y
ADMINISTRATIVO QUE ME BRINDARON EL APOYO NECESARIO**

RESUMEN

En este estudio se evaluaron los rendimientos energéticos y exergeticos de un equipo de un proceso complejo por su dimensión, es decir de la torre de enfriamiento, acopiando información y siguiendo una metodología general establecida para estos casos, eso si ordenándola y aplicándola, se presenta un algoritmo de cálculo manual ilustrativo, tomando como referencia el estudio de (Reyes León A., 2011), los resultados obtenidos y comparados con los de la referencia son menores, pero dentro del margen de error aceptables.

El estudio permite concluir que los rendimientos energéticos y exergeticos en los equipos de un proceso, son complementarios y permiten evaluar el estado de eficiencia del funcionamiento de cada equipo en proceso y el exergetico, en qué medida las irreversibilidades consumen la energía que se suministra al proceso.

Palabras Clave: Algoritmo – Evaluación- Rendimiento Exergetico - Sistema Productivo

SUMMARY

In this study the energy and exergetic performances of a complex process equipment were evaluated by its dimension, that is, the cooling tower, gathering information and following a general methodology established for these cases, that if ordering and applying it, a illustrative manual calculation algorithm, taking as a reference the study of (Reyes León A., 2011), the results obtained and compared with those of the reference are smaller, but within the acceptable margin of error.

The study allows to conclude that the energy and exergetic performances in the equipment of a process, are complementary and allow to evaluate the state of efficiency of the operation of each equipment in process and the exergetic, to what extent the irreversibilities consume the energy that is supplied to the process.

Keywords: Algorithm - Evaluation - Exergetic Performance - Productive System

INTRODUCCIÓN

El presente estudio es un compendio de información de la combinación de la primera y segunda leyes de la termodinámica, esta información fue acopiada, seleccionada, ordenada y en base a referencias y autores confiables (Martin,T.,Serrano, A., 2009.),

(Reyes León A., 2011), (Moran,M., Shapiro, H., 2004.), se seleccionó el algoritmo más apropiado para evaluar manualmente el rendimiento exergetico y energético de una unidad de equipo de un proceso, en este caso se tomó una torre de enfriamiento como componente de un proceso integral de producción de energía eléctrica.

El estudio contiene el planteamiento del problema, los objetivos, el marco teorico, la metodología, la aplicación al caso concreto, los resultados y las conclusiones.

En forma general, se presentan los balances de masa, luego los balances de energía, los balances de entropía, los balances exergeticos y los rendimientos energéticos y exergeticos. Etas ecuaciones, se aplican a cada caso de una unidad de equipo correspondiente, tal como se muestra para el caso de una torre de enfriamiento, planteadas naturalmente, las condiciones de operación a las que debe funcionar la torre.

Los resultados obtenidos manualmente, se comparan con los obtenidos por la referencia y se encontró muy limitada desviación, aceptable dentro del error. Se concluye con la importancia de estos dos grandes parámetros, el rendimiento energético y el rendimiento exergetico de una unidad de equipo.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

El análisis del rendimiento de las unidades que consumen energía en un proceso es muy importante evaluarlo para ubicar, si los hubieran, algunos cuellos de botella que afectan el rendimiento global del proceso, de modo tal que corregidos el rendimiento global mejore. Tal situación puede evaluarse mediante la aplicación de la primera y segunda leyes de la termodinámica combinadas, para tal fin se deben conocer las propiedades termodinámicas de las corrientes de ingreso y salida de cada etapa del proceso en análisis y las correspondientes expresiones termodinámicas que caracterizan el funcionamiento energético de la respectiva etapa de análisis.

Lo antedicho, impone la interpretación y buen manejo de las dos leyes referidas combinadas definiendo el término denominado la exergía, que expresa la energía útil que se utiliza en la unidad de análisis. Esto conduce a la definición de un problema general y sus respectivos específicos.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

¿Es posible evaluar el rendimiento exergético de un sistema termodinámico mediante la aplicación de la primera y segunda leyes de la termodinámica combinadas?

1.2.2 PROBLEMAS ESPECIFICOS

- ¿Es posible calcular los requerimientos energéticos de un sistema termodinámico?

- ¿Puede determinarse tanto la eficiencia como viabilidad energética de equipos y procesos mediante el balance de entropía y segunda ley de la Termodinámica?
- ¿Es posible formular y resolver balances de exergía en sistemas cerrados, volúmenes de control y ciclos para evaluar su irreversibilidad?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Aplicar la primera y segunda leyes de la termodinámica tanto para sistemas cerrados como de flujo para determinar los requerimientos de energía en varias aplicaciones de interés para la ingeniería química (flujo de fluidos, generación de potencia, refrigeración, aire acondicionado) y evaluar la eficiencia exergética de dichas aplicaciones.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Calcular requerimientos energéticos de equipos y procesos utilizando la primera ley de la Termodinámica.
- Estimar tanto la eficiencia como viabilidad energética de equipos y procesos mediante el balance de entropía y segunda ley de la Termodinámica.
- Plantear y resolver balances de exergía en sistemas cerrados, volúmenes de control y ciclos para evaluar su irreversibilidad.

1.4 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

En todo proceso productivo, el motor de cambio es la energía que a lo largo del proceso, generalmente se transforma en diferentes formas, según su uso; por ejemplo, al calentar

un líquido se usa la energía en forma de calor, este líquido se evapora y se transporta con capacidad de desplazamiento, conduciendo cierta entropía; este fluido puede mover los accesorios de una turbina, entregar parte de su entalpía realizando un trabajo mecánico en la turbina y el resto de entalpía queda en el fluido inicial. En este concreto caso, el rendimiento de la turbina, depende de la energía útil que llevaba el vapor a su ingreso y que fue utilizada para convertirse en trabajo útil en la turbina.

Tal como lo expuesto, la termodinámica, mediante el balance de exergía, permite evaluar la magnitud de la energía útil que una corriente transporta y que se aprovecha en una unidad de proceso. Esto hace necesario elaborar un algoritmo de cálculo de la exergía en el sistema con la finalidad de hacerlo aplicable y no sólo sea una expresión teórica. De este modo construir una herramienta de cálculo para conocer el rendimiento de cada equipo de un proceso.

CAPITULO II:

MARCO TEÓRICO

2.1 Sistemas termodinámicos (Martin,T.,Serrano, A., 2009.), (Jaramillo,O., 2008)

Un sistema termodinámico se define como la parte del universo objeto de estudio. Por ejemplo, puede ser una célula, una persona, el vapor de una máquina de vapor, la mezcla de gasolina y aire en un motor térmico, un reactor químico, un destilador, una torre de enfriamiento de agua, la atmósfera terrestre, etc.

2.2.1 Sistemas termodinámicos y su entorno. (Martin,T.,Serrano, A., 2009.)

El sistema termodinámico puede estar separado del resto del universo (denominado alrededores del sistema) por paredes reales o imaginarias. Es muy importante definir la frontera del sistema como una superficie y no otro sistema, el espesor de una superficie es matemáticamente cero por lo que la frontera no puede contener materia u ocupar algún lugar en el espacio. Las paredes que separan un sistema de sus alrededores pueden ser aislantes (llamadas paredes adiabáticas) o permitir el flujo de calor (diatérmicas).

La interacción de un modo específico entre el sistema y sus alrededores, define los tipos de sistemas termodinámicos como aislados, cerrados o abiertos.

Sistema aislado: es aquél que no intercambia ni materia ni energía con los alrededores.

Sistema cerrado: es aquél que intercambia energía (calor y trabajo) pero no materia con los alrededores (su masa permanece constante).

Sistema abierto: es aquél que intercambia energía y materia con los alrededores.

En la figura 1, se representan los distintos tipos de sistemas termodinámicos.

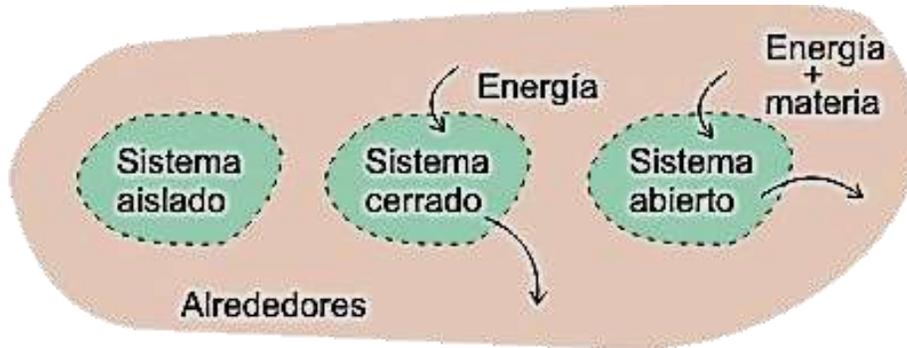


Figura N° 1 Tipos de sistemas termodinámicos. (Martin,T.,Serrano, A., 2009.).

2.2.2. Energía: trabajo y calor

Calor y trabajo, son formas de energía que se manifiestan como consecuencia de las interacciones que pueden experimentar los sistemas termodinámicos con sus alrededores. Tanto el calor como el trabajo únicamente se evidencian en las fronteras de los sistemas y solamente aparecen cuando estos experimenten cambios en sus estados termodinámicos.

En las interacciones que experimentan los sistemas, éstos pueden recibir o ceder energía. En el presente estudio, una de las convenciones de signos que se utiliza es: trabajo que produce el sistema positivo y el que recibe negativo. Así mismo, el calor suministrado al sistema se considera positivo y el cedido por él negativo.

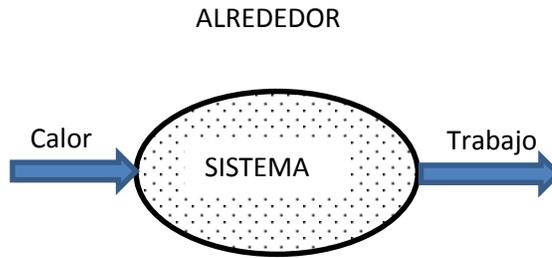


Figura N° 2 Esquema donde se representa un sistema termodinámico rodeado por su ambiente.

Matemáticamente, el trabajo no es una diferencial exacta, sino una forma diferencial inexacta. Es una función de línea, no una función de estado. Está asociado a procesos y se manifiesta en la frontera del sistema, no es una propiedad del sistema. El trabajo total en un proceso se calcula mediante la integral de línea a lo largo de ese proceso, y depende del camino:

$$\int_1^2 \delta W = W \quad (1)$$

En cambio, la variación de una función de estado no depende del camino, sólo depende de los estados inicial y final. Por ejemplo, en el caso del volumen sí se cumple que:

$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1 \quad (2)$$

El calor es una interacción entre dos sistemas que no es en forma de trabajo, y que modifica la energía del sistema. Por experiencia se conoce que la causa de un flujo de calor es una diferencia de temperatura entre dos sistemas.

2.2.3. Formas de transferencia de calor

Existen dos mecanismos básicos de transmisión del calor, que son la conducción y la radiación térmica. Además, se pueden obtener relaciones empíricas para calcular transferencias de energía que incluyan ciertos modos combinados, tales como la convección.

En todos los casos, lo que se mide es la velocidad instantánea de transferencia de calor;

y ésta depende de la diferencia de temperaturas entre los dos sistemas y de las características de la pared (aislante o conductora). En todo caso, puede decirse que un proceso *rápido* tenderá a ser adiabático.

A continuación se realiza una breve descripción de las características fundamentales de estos modos de transmisión de calor. (Moran, M., Shapiro, H., 2004.)

2.2.4 Estados termodinámicos (Delgadillo, S., 2011)

El estado termodinámico de un sistema se define mediante los valores de sus variables o propiedades termodinámicas. Para un estado dado; cada una de las propiedades tiene uno y solo un valor.

Un cambio de estado de un sistema, se presenta como resultado de una transferencia de energía a través de las fronteras del sistema o a transformaciones

de energía dentro del mismo. Cuando los valores de las propiedades no cambian con el tiempo se dice que el estado del sistema está en equilibrio; en realidad por definición, todo estado termodinámico es un estado de equilibrio. La Termodinámica que es el motivo de nuestro estudio, es la “Termodinámica del Equilibrio”, que es el estudio del cambio de estado de equilibrio de un sistema debido a la transferencia de energía a través de las fronteras del sistema o a la transformación de energía dentro del sistema.

2.2.5. Propiedades de estado (Gomez, T., 2005), (Moran, M., Shapiro, H., 2004.)

Propiedad es cualquier magnitud física evaluable de un sistema. El estado de un sistema está definido por el conjunto de propiedades (temperatura, presión, composición, etc.) que caracterizan este sistema, pero no por su entorno ni por su historia.

Algunas propiedades que definen el estado del sistema son independientes; por tanto, es posible escoger arbitrariamente algunas magnitudes como *variables de estado*, y considerar otras como *funciones* de esas variables de estado. Los siguientes términos son sinónimos: propiedad, variable de estado, función de estado.

Características matemáticas de una propiedad o función de estado

Una propiedad o función de estado es una función de variables de estado. Para que una función \emptyset sea una función de estado, es necesario y suficiente que la

diferencial $d\phi$ sea una diferencial exacta. Las siguientes cuatro afirmaciones son equivalentes; si una de ellas se cumple, las otras tres también se cumplen:

1. ϕ es una función de estado;
2. $d\phi$ es una diferencial exacta
3. $\oint d\phi = 0$
4. $\int_i^f d\phi = \phi_f - \phi_i$, independiente del camino recorrido.

2.2.6. Propiedades intensivas y extensivas (Gomez, T., 2005).

Propiedades extensivas: Son aquellas que dependen de la masa del sistema, por ejemplo el volumen, y todas las clases de energía. Si un sistema está constituido por N subsistemas, el valor de una propiedad extensiva X para el sistema total, vendrá dado por

$$X = \sum_{i=1}^N X_i \quad (3)$$

siendo X_i la propiedad extensiva del subsistema i . Es decir, las propiedades extensivas

son aditivas. Para designar las propiedades extensivas se utilizan letras mayúsculas (la masa m es una excepción importante).

Propiedades intensivas: Se definen en un punto. Son independientes del tamaño, masa

o magnitud del sistema: por ejemplo la presión, temperatura, viscosidad y altura.

Las

propiedades extensivas se convierten en intensivas si se expresan por unidad de masa (*propiedad específica*), de moles (*propiedad molar*) o de volumen (*densidad de propiedad*). Las propiedades intensivas se representan con letras minúsculas, con la excepción de la temperatura T .

2.3 Balance de masa, energía y entropía en sistemas cerrados estacionarios. (Gomez, T., 2005)

2.3.1 Sistema estacionario y no estacionario

El estado termodinámico de un sistema se denomina estacionario si una o más variables que lo caracterizan se mantienen constantes en el tiempo. De modo que, si X es una variable de un sistema termodinámico, el sistema es estacionario, si:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

Por el contrario, el sistema se denomina no estacionario, si una o más variables que lo caracterizan cambian en el tiempo. De modo que, si X es una variable de un sistema termodinámico, el sistema es no estacionario, si:

$$\frac{\partial X}{\partial t} \neq 0 \quad (5)$$

2.3.2 ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE (Gomez, T., 2005), (Smith & Van Ness , 1991)

BALANCE DE ENERGÍA EN SISTEMAS CERRADOS

El principio que rige un balance general, es el de conservación de la propiedad en estudio (sea materia, energía, entalpia, entropía, exergía, etc), derivando en en expresión de balance particular para cada una de la propiedades referidas. Asi, la expresión general de balance, llamando X a la propiedad, puede expresarse, asi:

RAPIDEZ DE ACUMULACIÓN DE PROPIEDAD EN EL SISTEMA = FLUJO DE PROPIEDAD DE ENTRADA-FLUJO DE PROPIEDAD A LA SALIDA + RAPIDEZ DE

Esto, es:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \left(\sum_{i=1}^N \dot{X}_i \right)_{entrada} - \left(\sum_{i=1}^N \dot{X}_i \right)_{salida} + \left(\sum_{i=1}^N \dot{X}_i \right)_{producida\ en\ sistema} \quad (6)$$

2.3.3 Ecuación de balance de masa

Para un sistema estacionario, sin reacción química, siendo X= m, la ecuación de balance de masa, de la expresión anterior se simplifica a:

$$0 = (\sum_{i=1}^N \dot{m}_i)_{entrada} - (\sum_{i=1}^N \dot{m}_i)_{salida} \quad (7)$$

O también:

$$0 = (\dot{m}_i)_{entrada} - (\dot{m}_i)_{salida} \quad (8)$$

2.3.4 Ecuación de balance de energía (Gomez, T., 2005), (Smith & Van Ness , 1991)

Los balances de energía es la ley de conservación de la energía, este principio es denominado la primera ley de la termodinámica. Esta puede expresarse del modo siguiente:

La velocidad a la cual la energía (en sus formas, cinética, potencial e interna) ingresa a un sistema a través de un fluido, más la velocidad a la cual ingresa energía en forma de calor –menos la velocidad a la cual la energía abandona el sistema por el fluido circulante, menos la velocidad a la cual el sistema realiza trabajo sobre sus alrededores, es igual a la velocidad a la cual la energía se acumula en el sistema:

$$\Delta \dot{E} = (\sum \dot{E}_i)_{entrada} - (\sum \dot{E}_i)_{salida}$$

En forma detallada:

$$\Delta \dot{E} = (\dot{E}C + \dot{E}P + \dot{U} + \dot{Q})_{entrada} - (\dot{E}C + \dot{E}P + \dot{W})_{salida} \quad (9)$$

Siendo el sistema estacionario, $\Delta \dot{E} = 0$, la expresión del balance de energía, es:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Delta \dot{U} + \Delta \dot{E}_c + \dot{E}_p \quad (10)$$

Esta es la expresión de la primera ley de la termodinámica para sistemas estacionarios.

Este balance corresponde al principio de conservación de energía (primera ley de la termodinámica). Para un volumen de control, en estado permanente como se muestra en la figura 3 en donde se indican los diferentes flujos de energía, se tiene:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{E}_e - \dot{W}_{vc} - \sum \dot{E}_s = 0 \quad (11)$$

Los flujos de energía que entran y salen con los flujos de masa son

$$\dot{E} = \dot{m} \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right) \quad (12)$$

por lo que la ecuación (11) se escribe como:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{W}_{vc} - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{c_s^2}{2} + gz_s \right) = 0 \quad (13)$$

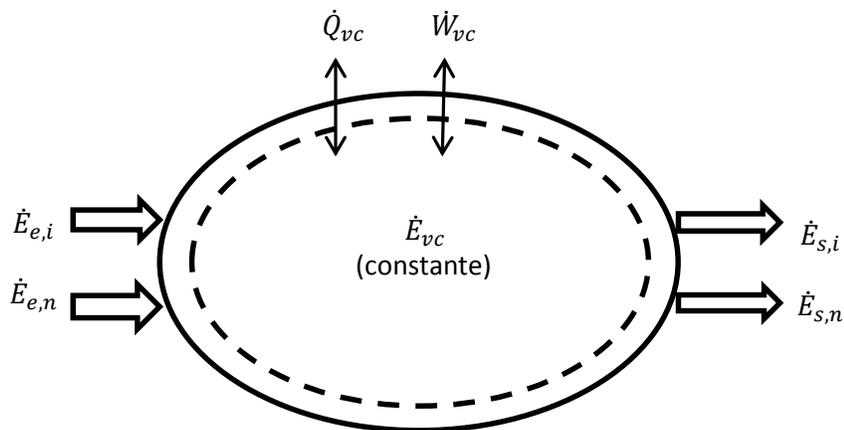


Figura N° 3 Flujos de energía en un volumen de control y de forma alternativa

Esta misma expresión se escribe:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right) = \dot{W}_{vc} + \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{c_s^2}{2} + gz_s \right) = 0 \quad (14)$$

EL SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA (Gomez, T., 2005), (Smith & Van Ness , 1991)

El segundo principio de la Termodinámica establece la existencia y propiedades de una nueva función de estado, llamada <entropía>, S. Su importancia es capital, pero su fundamentación ha resultado muy dificultosa, hasta el punto de existir más de media docena de formulaciones distintas.

En un extremo están los enunciados clásicos de Kelvin y Clausius relativos a la operación de máquinas térmicas. Razonando sobre los procesos que pueden llevarse a cabo con estas máquinas y siguiendo un camino cuando menos artificioso se llega a demostrar la existencia de esta nueva función de estado. En el otro extremo se encuentra la formulación de Caratheodory, rigurosa pero muy abstracta, hasta el punto de que ha sido sistemáticamente rechazada durante el último siglo en la inmensa mayoría de los tratados.

Entre estos dos extremos se encuentran un cierto número de formulaciones que pretenden conseguir un equilibrio entre la fundamentación experimental de los enunciados clásicos y el rigor matemático de la formulación de Caratheodory.

Aquí seguiremos una de esas vías intermedias, exponiendo la argumentación de Buchdahl tal y como es recogida en Adkins.

Comencemos reflexionando sobre los procesos que pueden suceder en sistemas térmicamente aislados. Sobre estos sistemas puede efectuarse trabajo, pero no transferirse o extraerse calor. Llamaremos a estos procesos adiabáticos. A su vez, el trabajo puede efectuarse de dos formas distintas: reversible o irreversiblemente.

El trabajo irreversible no puede recuperarse, y tampoco puede devolverse al sistema a su estado inicial mediante más trabajo. Por ejemplo, mediante una manivela movemos un eje que se introduce en un recipiente rígido, térmicamente aislado que contiene un líquido. En el extremo del eje hay una hélice que remueve el líquido. La fricción de la hélice con el líquido disipa energía mecánica y como consecuencia el líquido se calienta. Después, no podremos enfriarlo haciendo girar la hélice en sentido contrario y tampoco va a suceder que espontáneamente el líquido se enfríe y parte de su energía interna se invierta en hacer girar la hélice. No hay marcha atrás. Si se hace trabajo de forma irreversible sobre un sistema térmicamente aislado, estados anteriores del sistema quedan inaccesibles.

La incapacidad de la primera ley de identificar si un proceso puede llevarse a cabo es remediado al introducir otro principio general, la *segunda ley de la termodinámica*. La primera ley no restringe la dirección de un proceso, pero satisfacerla no asegura que el proceso ocurrirá realmente. Cuando los procesos no se pueden dar, esto se puede detectar con la ayuda de una propiedad llamada entropía. Un proceso no sucede a menos que satisfaga la primera y la segunda ley de la Termodinámica.

El empleo de la segunda ley de la termodinámica no se limita a identificar la dirección de los procesos. La segunda ley también afirma que la energía tiene calidad, así como cantidad. La

primera ley tiene que ver con la cantidad y la transformación de la energía de una forma a otra sin importar su calidad. Preservar la calidad de la energía es un interés principal de los ingenieros, y la segunda ley brinda los medios necesarios para determinar la calidad, así como el nivel de degradación de la energía durante un proceso. La naturaleza establece que el total de energía asociada con una fuente térmica nunca puede ser transformada íntegra y completamente en trabajo útil. De aquí que todo el trabajo se puede convertir en calor pero no todo el calor puede convertirse en trabajo.

SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA. DEFINICIONES CLÁSICAS

(Gomez, T., 2005), (Smith & Van Ness , 1991)

Definición de Kelvin-Planck

“Es imposible construir un aparato que opere cíclicamente, cuyo único efecto sea absorber calor de una fuente de temperatura y convertirlo en una cantidad equivalente de trabajo”.

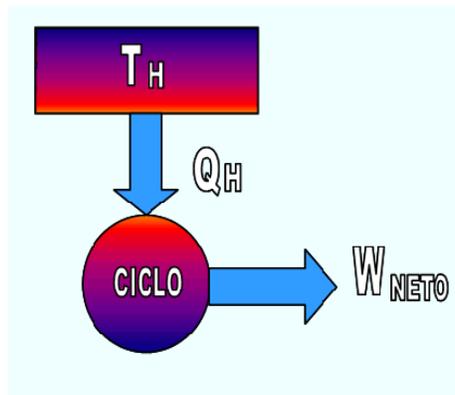


Figura N° 4 Ilustración del enunciado de Kelvin Planck

Definición de Clausius

“Es imposible construir un aparato que opere en un ciclo cuyo único efecto sea transferir calor desde una fuente de baja temperatura a otra de temperatura mayor”.

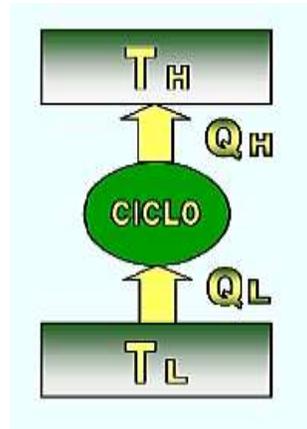


Figura N° 5 Ilustración del enunciado de Clausius.

En cualquier proceso la energía del universo se conserva (Primer Principio de la Termodinámica). Por otra parte, una transformación macroscópica sólo puede tener lugar si la entropía del universo aumenta (Segundo Principio de la Termodinámica).

Si la S del universo permanece constante no hay un cambio macroscópico, el sistema y los alrededores permanecen en equilibrio o cuasiequilibrio. Cuando se habla de **procesos** reversibles en realidad se está haciendo la aproximación de suponer que todos los estados intermedios del sistema a lo largo de la trayectoria son estados de equilibrio o cuasiequilibrio.

Por tanto el análisis del incremento $\Delta S_{\text{universo}}$ de un proceso hipotético, nos permite conocer a priori si este va a tener lugar o no; así:

$\Delta S_{\text{universo}} > 0$:proceso espontáneo o irreversible

$\Delta S_{\text{universo}} = 0$:sistema en equilibrio o proceso reversible

pero este análisis puede resultar complicado porque hace necesario conocer además del $\Delta S_{\text{sistema}}$ también el $\Delta S_{\text{alrededores}}$.

$$\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{alrededores}}$$

El interés de realizar esta “predicción” es conocer si el proceso en análisis va a tener lugar, caso contrario habría que buscar procesos acoplados que hagan factible el proceso para la obtención del sistema en el estado final buscado (ejemplo, el agua no fluye de forma natural de abajo a arriba, pero si acoplamos un proceso en el que una masa superior baje, será posible que una determinada masa de agua suba).

Condición General de Espontaneidad y Equilibrio

- Si un sistema aislado no se encuentra en equilibrio, evolucionará espontáneamente aumentando su entropía:

$$dS_{\text{universo}} = dS_{\text{sistema}} + dS_{\text{alrededores}} = dS_{\text{sistema}} > 0 \quad \begin{array}{l} \textit{proceso espontáneo,} \\ \textit{proceso irreversible} \\ \textit{sistema aislado} \end{array}$$

La $S_{\text{alrededores}}$ permanece constante porque los alrededores no intervienen en el proceso termodinámico al estar el sistema aislado

$$dS_{\text{universo}} = dS_{\text{sistema}} + dS_{\text{alrededores}} = dS_{\text{sistema}} = 0 \quad \begin{array}{l} \textit{proceso espontáneo,} \\ \textit{proceso irreversible} \\ \textit{sistema aislado} \end{array}$$

En un sistema cerrado que no se encuentre en equilibrio, los procesos espontáneos tienen lugar de forma que:

$$dS_{\text{universo}} = dS_{\text{sistema}} + dS_{\text{alrededores}} > 0$$

¿Cómo se alcanza el equilibrio en un sistema cerrado?

Para evitar calcular la $dS_{\text{alrededores}}$, y centrarnos sólo en lo que ocurre en el sistema, podemos suponer que los alrededores son tan grandes que cualquier transferencia de energía desde o hacia el sistema no modifica su temperatura T , además como $dq_{\text{alrededores}} = -dq_{\text{sistema}}$, la condición general de espontaneidad se puede escribir como:

$$dS_{\text{universo}} = dS_{\text{sistema}} + dS_{\text{alrededores}} = dS_{\text{sistema}} + \frac{dq_{\text{alrededores}}}{T} > 0$$

$$dS_{\text{sistema}} > -\frac{dq_{\text{alrededores}}}{T}$$

$$dS_{\text{sistema}} > \frac{dq_{\text{sistema}}}{T}$$

Ecuación de balance de entropía en procesos irreversibles. (Gomez, T., 2005), (Smith & Van Ness , 1991)

Supongamos dos procesos entre los mismos estados, uno internamente reversible y el otro irreversible (Figur 6). La diferencia de entropía entre los estados 1 y 2 se calcula integrando $\delta Q/T$ para un proceso reversible cualquiera, por ejemplo el denominado R:

$$S_2 - S_1 = \left(\frac{\partial Q}{T}\right)_{\text{rev.int}} = \left(\frac{\partial Q}{T}\right)_R \quad (15)$$

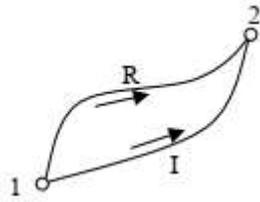


Figura N° 6 Variación de entropía en procesos con irreversibilidades internas.

El proceso 1R2 se puede invertir (es reversible); le llamamos proceso 2R1. Considerar ahora el ciclo irreversible 1I2R1 :

$$\left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\right)_s + \left(\int_2^1 \frac{\delta Q}{T}\right)_T \leq 0 \quad (16)$$

$$\left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\right)_R + \left(\int_2^1 \frac{\delta Q}{T}\right)_{\bar{R}} = 0 \quad (17)$$

$$\left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\right)_R \geq \left(\int_2^1 \frac{\delta Q}{T}\right)_I = 0 \quad (18)$$

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} \quad (19)$$

$$dS \geq \frac{\partial Q}{T} \quad \therefore \delta Q \leq TdS \quad (20)$$

Luego el calor intercambiado es *menor que el área* bajo la línea de estados en el plano T-s (Figura 6).

La inecuación (19) se transforma en ecuación añadiendo un término positivo o nulo, denominado *entropía generada*:

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} + \sigma, \text{ siendo } \sigma \geq 0 \quad (21)$$

Se plantean así tres posibilidades:

$\sigma > 0$, proceso irreversible (con irreversibilidades internas)

$\sigma = 0$, proceso reversible (sin irreversibilidades internas)

$\sigma < 0$, proceso imposible

BALANCE DE ENTROPÍA EN SISTEMAS CERRADOS

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\partial Q}{T} \right)_f + \sigma \quad (22)$$

BALANCE DE ENTROPÍA EN VOLÚMENES DE CONTROL

En régimen transitorio:

$$\frac{dS_{VC}}{dx} + \sum \dot{m}_s S_s - \sum \dot{m}_e S_e = \int_1^2 \left(\frac{\partial Q}{T} \right)_f + \dot{\sigma} \quad (23)$$

En régimen estacionario:

$$\Delta \dot{S} = \sum \dot{m}_s S_s - \sum \dot{m}_e S_e = \int_1^2 \left(\frac{\partial Q}{T} \right)_f + \dot{\sigma} \quad (24)$$

2.6. Balance de exergía en sistemas estacionarios y no estacionarios. (Moran, M., Shapiro, H., 2004.)

2.6.1 Ecuación del balance de exergía

El análisis exergético de procesos se basa en la combinación de la primera con la segunda ley de la termodinámica. La primera ley está restringida por la segunda ley ya que no establece los criterios para determinar la dirección de los procesos, la irreversibilidad, el trabajo máximo reversible y la eficiencia termodinámica de los procesos.

La combinación del principio de conservación de la energía y el principio del incremento de la entropía del universo permite obtener la ecuación general del balance de exergía:

$$\left(\frac{d\phi}{dt}\right)_{VC} = \{\sum(\dot{\phi}_F)_{salida} + \dot{W}_{producida}\} - (\sum \dot{Q}_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)) = -T_0 \dot{S}_{gen} \quad (25)$$

$\left(\frac{d\phi}{dt}\right)_{VC}$: Acumulación de exergía en el VC

$\dot{\phi}_F$: Flujo de energía del fluido en la corriente

ϕ : $(h - h_0) + e_c + e_p - T_0(S - S_0)$, exergía del fluido

$\dot{W}_{producida} = \dot{\phi}_w$, flujo neto de exergía producida por potencia al eje

$-(\sum \dot{Q}_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)) = \dot{\phi}_Q$ = flujo neto de exergía suministrada debido al flujo de calor desde una fuente térmica a T_k .

$T_0 \dot{S}_{gen} = \dot{\phi}_{destruida}$, flujo de exergía destruida debido a irreversibilidades

T_0 : temperatura de los alrededores (aprox 300K)

El flujo de calor desde una fuente térmica tiene un signo negativo con respecto a la fuente, es decir que el flujo neto de exergía desde la fuente es positivo y por lo tanto es suministrada al proceso. Si el depósito térmico es un sumidero, el flujo de exergía por la transferencia de calor, es producido por el sistema.

Para cualquier proceso a estado estacionario:

$$\{\sum(\dot{\phi}_F)_{entrada} + (\dot{\phi}_Q)_{sum}\} = \{\sum(\dot{\phi}_F)_{salida} + (\dot{\phi}_w)_{prod}\} + \dot{\phi}_{destruida} \quad (26)$$

Se observa que la exergía está representada por la exergía del fluido, exergía por trabajo, exergía por transferencia de calor y exergía destruida por la También se observa que mientras la materia y la energía se conservan, la entropía se genera y la exergía se destruye. Es decir que los procesos reales a medida que generan entropía, destruyen exergía o potencial para producir trabajo útil. La expresión anterior representa el balance general de exergía de un proceso termodinámico.

$$\dot{\Phi}_{sum} = \dot{\Phi}_{prod} + \dot{\Phi}_{destruida} \quad (27)$$

El objetivo de un proceso permite establecer el tipo de energía y exergía que se suministra y el tipo de energía y exergía producida. La energía suministrada o producida lleva consigo su exergía o energía disponible y su energía indisponible.

Así, la eficiencia termodinámica de un proceso basado en la segunda ley estará dada por:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{\Phi}_{prod}}{\dot{\Phi}_{sum}} = 1 - \frac{\dot{\Phi}_{destruida}}{\dot{\Phi}_{sum}}$$

La dificultad reside en identificar estos términos para un sistema o instalación particular. En muchos casos pueden existir distintas interpretaciones válidas dentro de un orden lógico, que suelen depender de si los flujos exergéticos residuales que abandonan el sistema son o no aprovechados para otros usos en otra instalación o en otro elemento de la misma instalación.

Exergía termomecánica de un fluido en sistemas cerrados

$$\Phi = m[(u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)] \quad (29)$$

En términos de la entalpía:

$$\Phi = m[(h - h_0) - v(P - P_0) - T_0(s - s_0)] \quad (30)$$

Exergía de una sustancia pura en sistemas abiertos

$$\Phi = m \left[\left((h - h_0) + \frac{1}{2} \bar{u}^2 + g(Z - Z_0) - T_0(s - s_0) \right) \right] \quad (31)$$

Donde las propiedades con el subíndice 0 corresponden a las condiciones de los alrededores, las cuales se toman como $T_0 = 300 \text{ K}$ y $P_0 = 100 \text{ kPa} = 1 \text{ bar}$

CAPITULO III

ALGORITMO METODOLÓGICO PARA UN ANÁLISIS EXERGÉTICO.

(Moran,M., Shapiro, H., 2004.), (Reyes León A., 2011).

Se propone una metodología básica y generalizada para un análisis exergético de bienes de equipo. Esta consiste en:

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

3.1. Descripción del sistema

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

3.2 Especificación de los volúmenes de control

Con el fin de aplicar el método de análisis exergético a un sistema, este debe ser dividido convenientemente en volúmenes de control. Generalmente esta división se hace en componentes del equipo o ciclo, o bien etapas del proceso a analizar. La frontera del volumen de control puede ser tanto real como imaginaria. En el caso de que exista intercambio de calor entre el volumen de control y el ambiente, debe especificarse la temperatura de la frontera en las partes donde ocurre el intercambio de calor. Es decir, debe especificarse si el gradiente de temperaturas se encuentra dentro o fuera de esta, ya que en el primer caso, la destrucción de la exergía debida a una caída de la temperatura del fluido se considera una irreversibilidad interna al componente, mientras que el segundo caso se considera una pérdida de exergía y por lo tanto una irreversibilidad externa.

3.3. Ambiente de referencia del sistema. Estado muerto.

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

- La temperatura ambiente, T_0 , para el reservorio de energía.
- La presión atmosférica, p_0 , para el reservorio de volumen.

Los valores de éstas magnitudes, y por tanto, el ambiente del referencia al sistema será definido tomando como referencia los valores estándar de temperatura y presión, es decir,

$$p_0 = 101,325 \text{ kPa y } T_0 = 298 \text{ K.}$$

3.4. Simplificaciones

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

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

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

3.5. Balances de energía, materia y exergía.

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

3.6. Análisis exergético y diagrama de flujo exergético

Los diagramas de Sankey son la representación gráfica del balance exergético del sistema por excelencia. En ellos, cada proceso sufrido por el sistema es representado con líneas horizontales, marcando mediante líneas de flujo, que forman flechas, los flujos de exergía entrantes y salientes del sistema. El grosor de estas líneas representa el

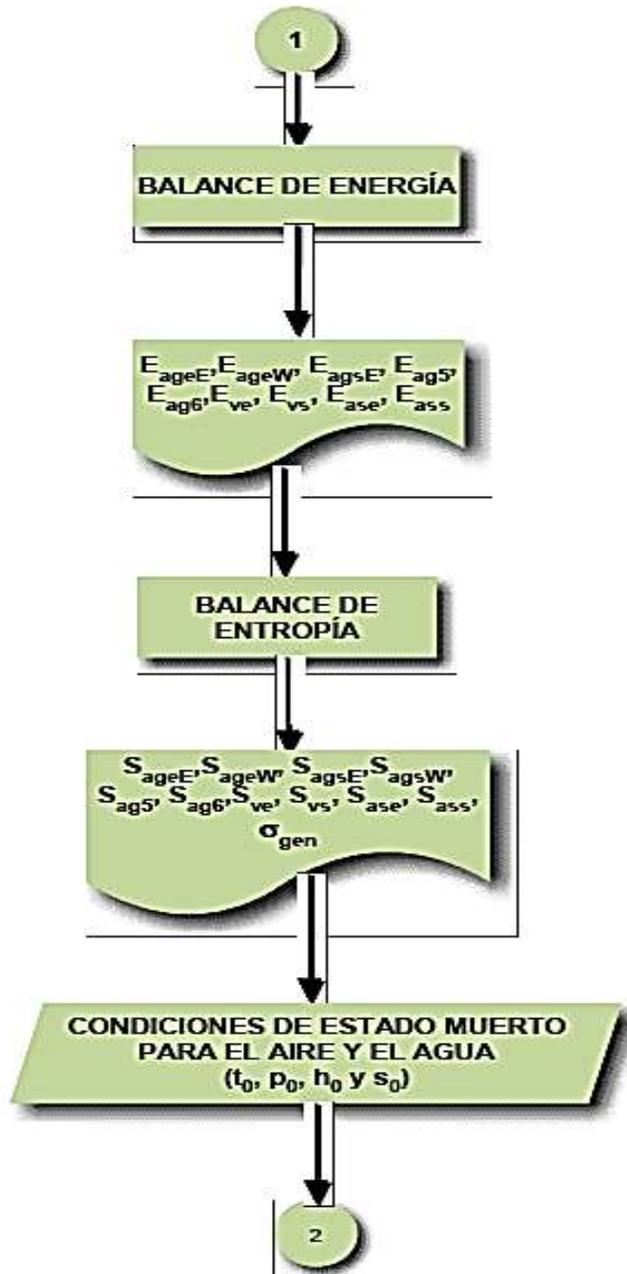
porcentaje de exergía perdida. Estos diagramas facilitan la interpretación energética del sistema, y por lo tanto, su posterior optimización, ya que resumen en una gráfica toda la información exergética obtenida en los balances.

3.7. Eficiencia exergética y sumideros de exergía

El rendimiento exergético, expresado anteriormente brinda un parámetro para evaluar el aprovechamiento exergético del sistema, y de esta manera, proponer distintas modificaciones, como por ejemplo la recuperación de flujos de exergía que están siendo desaprovechados, y también la cantidad de exergía que está siendo utilizada.

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

De modo que a modo de diagrama de flujo de cálculo simplificado se puede utilizar el diagrama que sigue, (Reyes León A., 2011).



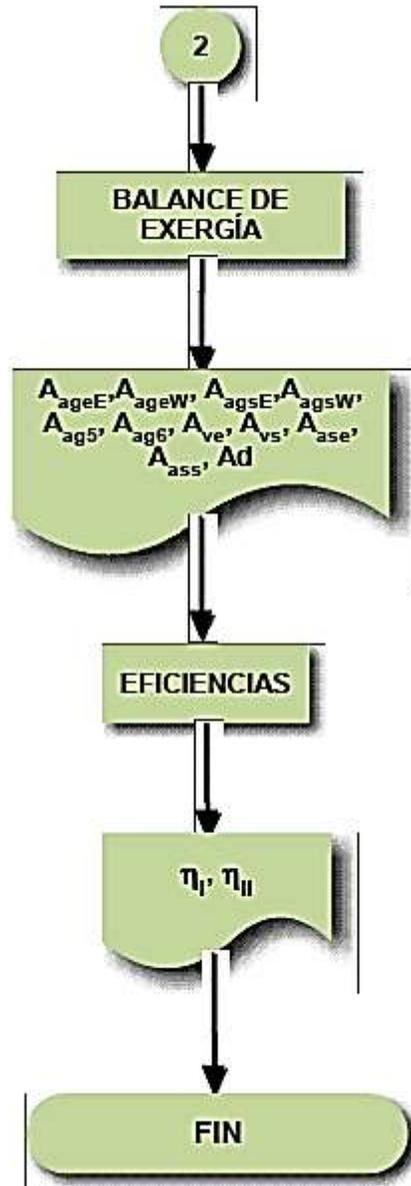


Figura N° 7 7Diagrama de flujo de cálculo
(Reyes León A., 2011).

3.8. DESCRIPCIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

Un sistema de producción de energía eléctrica, en una de sus etapas descarga vapor de baja calidad de un sistema de turbinas y que para recircularse en el sistema debe condensarse previamente; para ello se utiliza agua de enfriamiento que se obtiene mediante una torre de enfriamiento que sirve para condensar el vapor descargado de las turbinas , así como el enfriamiento de los equipos auxiliares del sistema (ventiladores, bombas etc.), y para que estos se mantengan a temperaturas adecuadas que les permitan a estos operar en condiciones normales. El agua proviene de una planta de tratamiento de agua.

Los equipos principales del sistema de enfriamiento son:

- Torre de enfriamiento.
- Bombas de agua de circulación.
- Condensador principal.

En este sistema, el vapor que escapa de la turbina de vapor fluye sobre la parte exterior de los tubos del condensador, condensándose y transfiriendo calor al agua de circulación a través de los tubos, es decir, cediendo calor latente del vapor a calor sensible del agua de circulación. El agua caliente de circulación que abandona el condensador va a la torre de enfriamiento donde fluye hacia la parte inferior a través del relleno de la misma, donde se fracciona el agua en pequeñas gotas para aumentar la superficie de contacto entre el agua y el aire, logrando así una mejor transferencia de calor (el flujo de aire es suministrado por los ventiladores de

la torre). El agua de circulación después de haber sido enfriada llega a la pileta donde se colecta, y de ahí se bombea al condensador para cerrar el ciclo de enfriamiento.

3.9. TERMODINÁMICA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

En este capítulo se describen los balances termodinámicos que rigen la operación de las torres de enfriamiento cuando operan en estado permanente. Los balances incluidos son los balances de masa, energía, entropía y exergía.

3.9.1 BALANCE DE MASA. (Moran,M.,Shapiro, H., 2004)

El principio de conservación de la masa para un volumen de control en estado estacionario se expresa como:

“LA VELOCIDAD DE VARIACIÓN DE LA MASA CONTENIDA EN EL VOLUMEN DE CONTROL ES EL CAUDAL NETO DE MASA DE ENTRADA A TRAVÉS DE LA FRONTERA DEL VOLUMEN DE CONTROL (ENTRADA – SALIDA)”.

Esto se expresa como:

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{vc} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s = \sum_{i=1}^k \dot{m}_i = 0 \quad (32)$$

O:

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = 0 \quad (33)$$

En la figura 8 se muestra esquemáticamente un volumen de control que cuenta con varias entradas y salidas de masa, y que se usa para describir el balance de masa en un volumen de control en estado permanente.

Para este volumen de control, el balance de masa de la ecuación (33), se expresa:

$$(\dot{m}_{e,1} + \dots + \dot{m}_{e,n}) - (\dot{m}_{s,1} + \dots + \dot{m}_{s,n}) = 0 \quad (34)$$

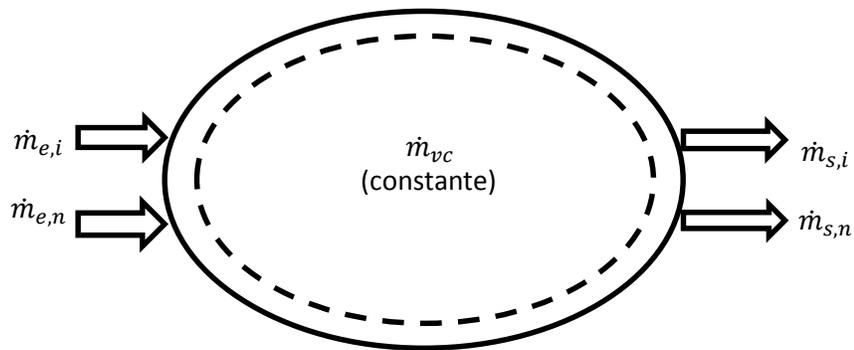


Figura N° 8 Flujo de masa en un volumen de control.

En el caso de las torres de enfriamiento, los flujos de masa están compuestos por agua y aire. En el caso particular del aire húmedo, éste está compuesto por aire seco y vapor de agua. La representación esquemática de los flujos de masa en la torre de enfriamiento se muestra en la figura 9.

El flujo másico de aire húmedo se expresa como la suma de flujo de aire seco más el flujo de vapor de agua contenido:

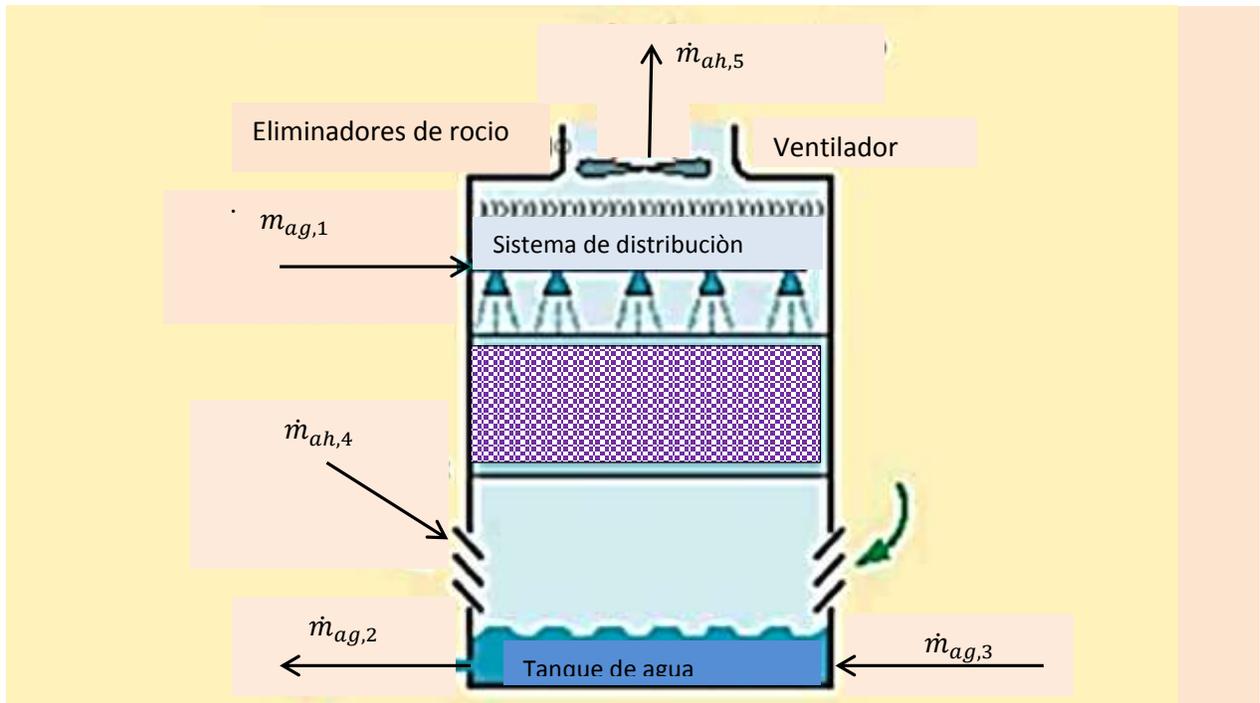


Figura N° 9 9Esquema de la torre de enfriamiento, indicando los flujos de masa.

$$\dot{m}_{ah} = \dot{m}_{as} + \dot{m}_v \quad (35)$$

La aplicación del balance de masa para la torre de enfriamiento en estado permanente, se describe a continuación:

Balance de masa para el aire seco:

$$\dot{m}_{as4} = \dot{m}_{as5} = \dot{m}_{as} \quad (36)$$

Balance de masa para el agua:

$$\dot{m}_{ag1} + \dot{m}_{ag3} + \dot{m}_{v4} = \dot{m}_{ag2} + \dot{m}_{v5} \quad (37)$$

Debido a que:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{as}\omega \quad (38)$$

Por lo tanto la ecuación (38) se reescribe de la forma siguiente:

$$\dot{m}_{ag1} + \dot{m}_{ag3} + \dot{m}_{as4}\omega_4 = \dot{m}_{ag2} + \dot{m}_{as5}\omega_5 \quad (39)$$

3.9.2. BALANCE DE ENERGÍA.

Este balance corresponde al principio de conservación de energía (primera ley de la termodinámica). Para un volumen de control, en estado permanente como se muestra en la figura 10 en donde se indican los diferentes flujos de energía, se tiene:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{E}_e - \dot{W}_{vc} - \sum \dot{E}_s = 0 \quad (40)$$

Los flujos de energía que entran y salen con los flujos de masa son

$$\dot{E} = \dot{m} \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right)$$

por lo que la ecuación (40) se escribe como:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{W}_{vc} - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{c_s^2}{2} + gz_s \right) = 0 \quad (41)$$

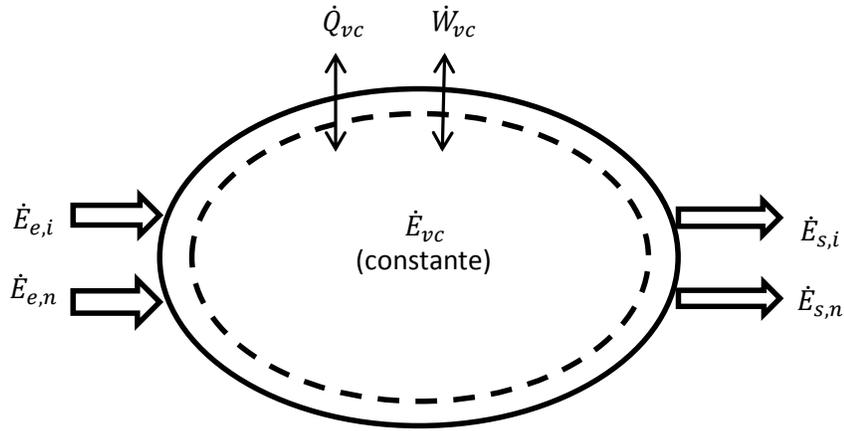


Figura N° 10 Flujos de energía en un volumen de control y de forma alternativa

Esta misma expresión se escribe:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right) = \dot{W}_{vc} + \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{c_s^2}{2} + gz_s \right) = 0 \quad (42)$$

Aplicando el balance de energía a la torre de enfriamiento mostrada en la figura 11, en la que no hay intercambio de calor y trabajo con el exterior, $\dot{Q}_{vc} = 0$, $\dot{W}_{vc} = 0$, e ignorando la variación de energía cinética y potencial tanto para la corriente de aire seco como para el agua, se obtienen las siguientes expresiones:

3.9.3. Balance para el aire seco.

$$\dot{m}_{as4}h_{as4} = \dot{m}_{as5}h_{as5} \quad (43)$$

Aplicando el balance de energía a la torre de enfriamiento mostrada en la figura 11, en la que no hay intercambio de calor y trabajo con el exterior, $\dot{Q}_{vc} = 0$, $\dot{W}_{vc} = 0$, e ignorando la variación de energía cinética y potencial tanto para la corriente de aire seco como para el agua, se obtienen las siguientes expresiones:

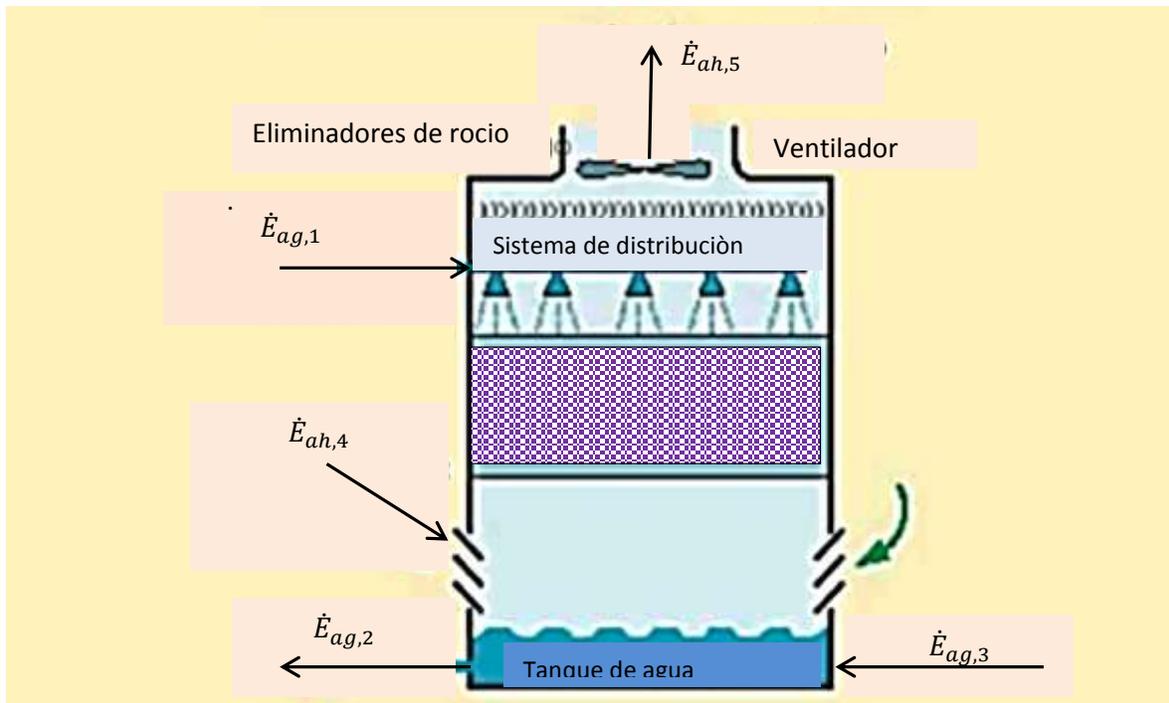


Figura N° 11 Esquema de la torre de enfriamiento, indicando los flujos de energía.

3.9.4. Balance para el aire seco.

$$\dot{m}_{as4}h_{as4} = \dot{m}_{as5}h_{as5} \quad (44)$$

Balance para el agua

$$\dot{m}_{ag1}h_{ag1} + \dot{m}_{ag3}h_{ag3} + \dot{m}_{v4}h_{v4} = \dot{m}_{ag2}h_{ag2} + \dot{m}_{v5}h_{v5} \quad (45)$$

Combinando los balances de energía para las corrientes de agua y de aire (ecuaciones 45 y 46) se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{ag1}h_{ag1} + \dot{m}_{ag3}h_{ag3} + \dot{m}_{v4}h_{v4} + \dot{m}_{as4}h_{as4} - \dot{m}_{ag2}h_{ag2} - \dot{m}_{v5}h_{v5} - \dot{m}_{as5}h_{as5} = 0 \quad (46)$$

En función de las humedades específicas se tiene:

$$\dot{m}_{ag1}h_{ag1} + \dot{m}_{ag3}h_{ag3} + \dot{m}_{as4}\omega_4h_{v4} + \dot{m}_{as4}h_{as4} - \dot{m}_{ag2}h_{ag2} - \dot{m}_{as5}\omega_5h_{v5} - \dot{m}_{as5}h_{as5} = 0 \quad (47)$$

3.10. BALANCE DE ENTROPÍA.

Un balance de energía por sí solo no permite predecir la dirección en la que un proceso se desarrolla, ni permite distinguir los procesos que son posibles de los que no lo son. Para resolver esta situación se utiliza la segunda ley de la termodinámica, para complementar la información proporcionada por la primera ley. Los enunciados más comunes de la segunda ley de la termodinámica son:

a. **Enunciado de Clausius.**- Es imposible la existencia de un sistema que pueda funcionar de modo que su único efecto sea una transferencia de energía mediante calor de un cuerpo frío a otro más caliente. (Moran, M., Shapiro, H., 2004.), (Reyes León A., 2011), (Cengel, Y.A., Boles M.A., 2007)

b. Enunciado de Kelvin-Planck.- Es imposible construir un sistema que, operando según un ciclo termodinámico, ceda una cantidad neta de trabajo a su entorno mientras recibe energía por transferencia de calor procedente de un único reservorio térmico. (Moran,M., Shapiro, H., 2004.), (Reyes León A., 2011), (Cengel, Y.A., Boles M,A., 2007)

Otra información valiosa que proporciona la segunda ley de la termodinámica es la evaluación de las irreversibilidades que se presentan en los procesos y que son evaluadas a través de la generación de entropía. La segunda ley de la termodinámica se puede expresar a través de un balance de entropías, que para un volumen de control en estado estacionario, se expresa por la ecuación siguiente:

$$\sum \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum \dot{S}_e - \sum \dot{S}_s = 0 \quad (48)$$

En función de las entalpías específicas se tiene:

$$\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}_{vc} = 0 \quad (49)$$

En la ecuación (1.15) aparecen los términos de transferencia de entropía por transferencia de calor y por transferencia de masa, así como la generación de entropía, debido a las irreversibilidades que ocurren en el volumen de control.

Aplicando el balance de entropía a la torre de enfriamiento, para la corriente de aire seco como para el agua, se obtienen las siguientes expresiones:

Balance para el aire seco.

$$\dot{S}_{as4} - \dot{S}_{as5} + \dot{\sigma}_{gen\ as} = 0 \quad (50)$$

En función de las entalpías específicas se tiene:

$$\dot{m}_{as4} s_{as4} - \dot{m}_{as5} s_{as5} + \dot{\sigma}_{gen} = 0 \quad (51)$$

Balance para el agua

$$\dot{S}_{ag1} + \dot{S}_{ag3} + \dot{S}_{v4} - (\dot{S}_{ag2} + \dot{S}_{v5}) + \dot{\sigma}_{gen,ag} = 0 \quad (52)$$

En función de las entalpías específicas se tiene:

$$\dot{m}_{ag1} s_{ag1} + \dot{m}_{ag3} s_{ag3} + \dot{m}_{v4} s_{v4} - (\dot{m}_{ag2} s_{ag2} - \dot{m}_{v5} s_{v5}) + \dot{\sigma}_{gen,ag} = 0 \quad (52)$$

Combinando los balances de entropía para las corrientes de agua y de aire

(ecuaciones 51 y 52 se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{ag1} s_{ag1} + \dot{m}_{ag3} s_{ag3} + \dot{m}_{v4} s_{v4} + \dot{m}_{as4} s_{as4} - \dot{m}_{ag2} s_{ag2} - \dot{m}_{v5} s_{v5} - \dot{m}_{as5} s_{as5} + \dot{\sigma}_{gen} = 0 \quad (53)$$

En función de las humedades específicas se tiene:

$$\dot{m}_{ag1}S_{ag1} + \dot{m}_{ag3}S_{ag3} + \dot{m}_{sa4}\omega_4S_{v4} + \dot{m}_{as4}S_{as4} - \dot{m}_{ag2}S_{ag2} - \dot{m}_{sa5}\omega_5S_{v5} - \dot{m}_{as5}S_{as5} + \dot{\sigma}_{gen} = 0 \quad (54)$$

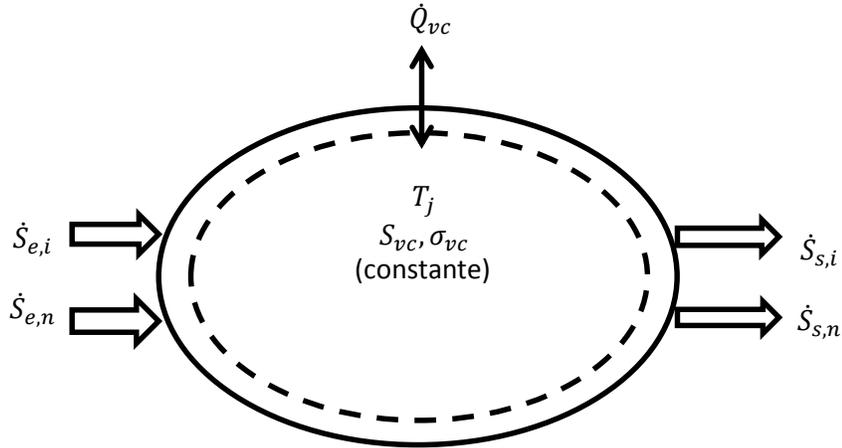


Figura N° 12 Flujos de entropía para un volumen de control.

3.11. BALANCE DE EXERGÍA.

La exergía es el trabajo máximo teórico que puede desarrollar un sistema, al pasar de su estado termodinámico inicial al estado de equilibrio con sus alrededores o medio ambiente de referencia. (Moran, M., Shapiro, H., 2004.), (Reyes León A., 2011), (Cengel, Y.A., Boles M.A., 2007)

Mientras que la energía es una medida de la cantidad, la exergía es una medida de la calidad de la energía. La exergía como la energía, puede ser transportada a través del límite de un sistema. Para cada transferencia de energía, existe una correspondiente transferencia de exergía

El balance de exergía es una herramienta que sirve para identificar el tipo, localización, y magnitud de las pérdidas de energía. La identificación y cuantificación de estas pérdidas permite la evaluación y la propuesta de mejoras a los sistemas termodinámicos.

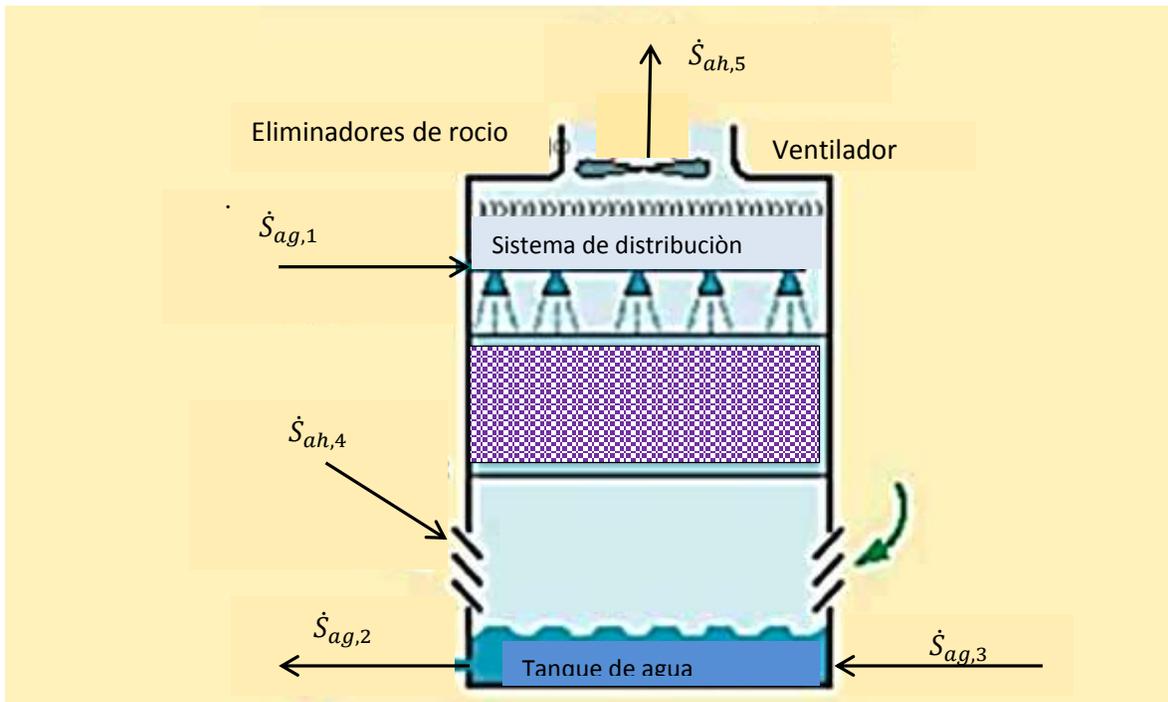


Figura N° 13 Esquema de la torre de enfriamiento, indicando los flujos de entropía.

El balance exergético es un método que emplea los principios de conservación de la masa y la energía junto con el segundo principio de la termodinámica para el diseño y análisis de sistemas térmicos.

Para un volumen de control en estado permanente como se muestra en la figura 1.7 el balance de exergía queda expresado por (Moran, M., Shapiro, H., 2004.), (Reyes León A., 2011), (Cengel, Y.A., Boles M,A., 2007).

$$\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e a_{fe} - \sum_s \dot{m}_s a_{fs} - \dot{A}_d = 0 \quad (55)$$

La ecuación (1.15) establece que la destrucción de exergía es igual a la diferencia entre la suma de las exergías de entrada y la suma de las exergía de salida.

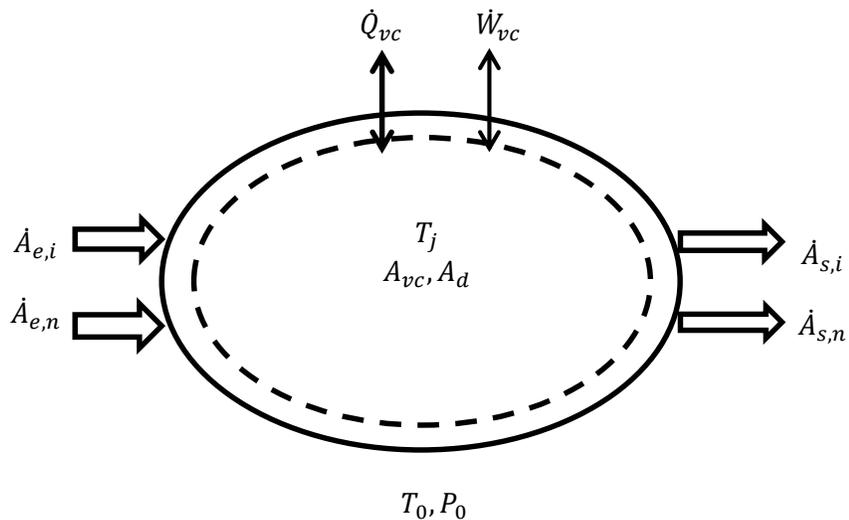


Figura N° 14 Flujos de exergía en un volumen de control

Para un flujo de masa, la exergía total se expresa por la ecuación siguiente.

$$A_t = A_c + A_p + A_f + A_q \quad (56)$$

Ignorando los cambios de energía cinética y potencial, la exergía total se expresa por la ecuación siguiente:

$$A_t = A_f + A_q \quad (57)$$

Considerando solo la exergía específica total, esta queda como:

$$a_t = a_f + a_q \quad (58)$$

Donde

$$a_f = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (59)$$

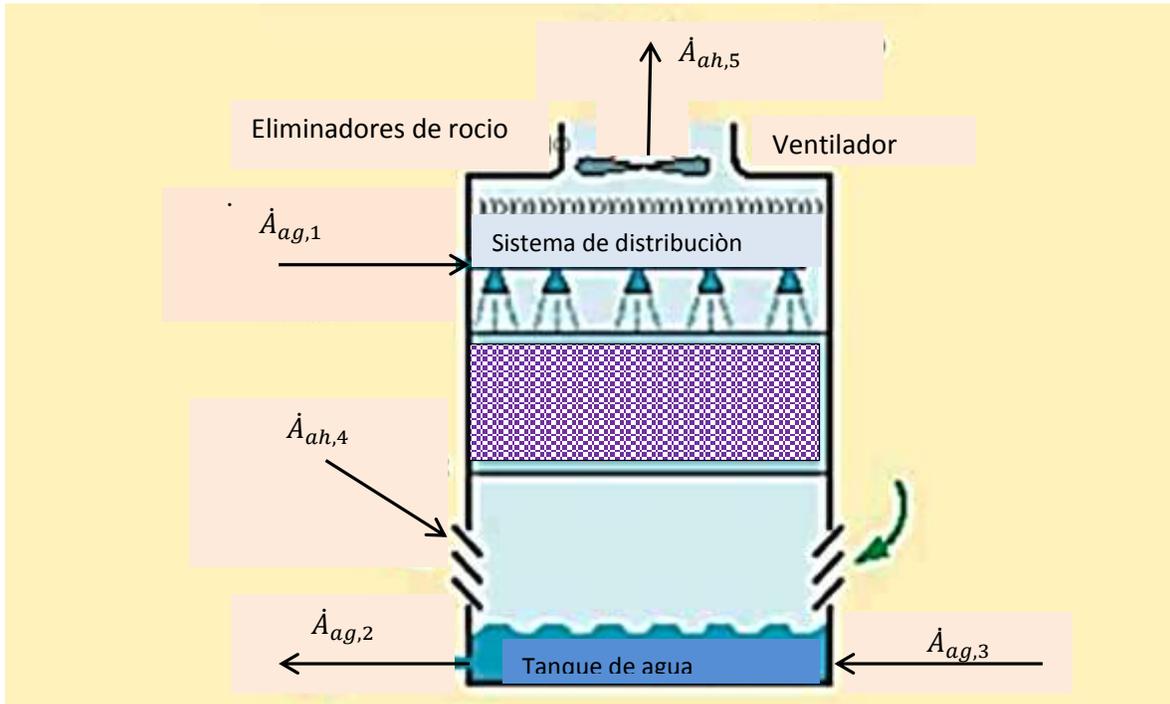


Figura N° 15 Esquema de la torre de enfriamiento, indicando los flujos de exergía.

$$a_q = \frac{1}{M} \left\{ [\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}] + \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^0} \right) \right\} \quad (60)$$

Aplicando el balance de exergía a la torre de enfriamiento mostrada en la figura

15, se obtienen las siguientes expresiones:

Balance para el aire seco.

$$\dot{m}_{as4} a_{as4} - \dot{m}_{as5} a_{as5} - \dot{A}_{d,as} = 0 \quad (61)$$

Balance para el agua.

$$\dot{m}_{ag1}a_{ag1} + \dot{m}_{ag3}a_{ag3} + \dot{m}_{v4}a_{v4} - \dot{m}_{ag2}a_{ag2} - \dot{m}_{v5}a_{v5} - \dot{A}_{d,ag} = 0 \quad (62) \quad (1.25)$$

Combinando los balances de exergía para las corrientes de agua y de aire

(ecuaciones 61 y 62) se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{ag1}a_{ag1} + \dot{m}_{ag3}a_{ag3} + \dot{m}_{v4}a_{v4} + \dot{m}_{as4}a_{as4} - \dot{m}_{ag2}a_{ag2} - \dot{m}_{v5}a_{v5} - \dot{m}_{as5}a_{as5} - \dot{A}_d = 0 \quad (63)$$

En función de las humedades específicas se tiene:

$$\dot{m}_{ag1}a_{ag1} + \dot{m}_{ag3}a_{ag3} + \dot{m}_{as4}\omega_4a_{av4} + \dot{m}_{as4}a_{as4} - \dot{m}_{ag2}a_{ag2} - \dot{m}_{as5}\omega_5a_{v5} - \dot{m}_{as5}a_{as5} - \dot{A}_d = 0 \quad (64)$$

3.12. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA

Las irreversibilidades acompañan siempre a las corrientes dentro de los dispositivos de un volumen de control y degradan el comportamiento de estos dispositivos. Es por esta razón que es útil disponer de parámetros para comparar el comportamiento real con el que se alcanzaría en condiciones ideales. En el desarrollo de estos parámetros es necesario reconocer que el flujo real a través de muchos dispositivos de ingeniería es prácticamente adiabático. El comportamiento ideal de los equipos tiene lugar cuando el flujo es también internamente reversible y, por tanto, isoentrópico. Así una medida para ver si se consigue es comparar el comportamiento

real con el comportamiento a condiciones isoéntropicas, dicha comparación es conocida como eficiencia energética.

Dado que la exergía tiene su origen en la segunda ley de la termodinámica, un parámetro de comportamiento de un volumen de control basado en el concepto de exergía, se conoce como eficiencia de segunda ley (eficiencia exergética). La eficiencia energética mide la forma en que se usa la energía, mientras que la eficiencia exergética indicara la forma en que se utilizara la exergía.

3.12.1. EFICIENCIA ENERGÉTICA

La eficiencia energética es una medida del desempeño de una maquina térmica, y es la fracción del calor de entrada que es convertido a la salida en el trabajo neto [3]. Para las maquinas térmicas la salida deseada es el trabajo neto, mientras que la entrada que se requiere es la cantidad de calor suministrado al fluido. En términos generales, la eficiencia energética se expresa como la relación entre la salida deseada entre la entrada requerida, quedando así:

$$\eta_I = \frac{\textit{Salida deseada}}{\textit{Entrada requerida}} \quad (65)$$

La eficiencia energética de la torre de enfriamiento se define como la relación entre la transferencia reala de energía y la máxima trasferencia de energía posible. (Moran,M., Shapiro, H., 2004.)

$$\eta_I = \frac{\dot{Q}_{ag}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{\dot{m}_{ag} C_{p,ag} \Delta T_{ag}}{q_{t,min}(T_{ag,e} - T_{e,ah})} \quad (66)$$

Donde $T_{e,ah}$ es igual a la temperatura de bulbo húmedo de la torre de enfriamiento, por lo que la ecuación anterior, se escribe como:

$$\eta_I = \frac{\dot{Q}_{ag}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{\dot{m}_{ag} C_{p,ag} \Delta T_{ag}}{q_{t,min}(T_{ag,e} - T_{e,bh})} \quad (67)$$

Por otra parte la eficiencia energética para una torre de enfriamiento se obtiene de la siguiente expresión . (Wang L., Li N., 2001)

$$\eta_I = \frac{T_{ag,e} - T_{ag,s}}{T_{ag,e} - T_{bh,e}} \quad (68)$$

Aplicando la ecuación precedente, a la torre de enfriamiento de la figura 15, se tiene:

$$\eta_I = \frac{T_{ag,1} - T_{ag,2}}{T_{ag,1} - T_{bh,e}} \quad (69)$$

3.12.2. EFICIENCIA EXERGÉTICA.

La eficiencia de segunda ley, es la medida de las pérdidas por irreversibilidades que se dan en el proceso, y se expresa como. (Moran,M., Shapiro, H., 2004.), (Reyes León A., 2011)

$$\eta_{II} = \frac{\text{Exergía recuperada}}{\text{Exergía suministrada}} \quad (70)$$

La eficiencia de segunda ley, puede ser expresada en términos de destrucción de

exergía y exergía suministrada:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{A_d}{\sum A_s} \quad (71)$$

Aplicado la ecuación precedente a la torre de enfriamiento de la figura 15, la eficiencia de segunda ley se expresa como sigue:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{A_d}{A_{ag,e} + A_{ag,rep}} = 1 - \frac{A_d}{A_{ag,1} + A_{ag,s} - A_{ag,2}} \quad (72)$$

La eficiencia exergética mide la fracción de exergía total que entra al sistema que no se pierde por la irreversibilidad de los procesos que se efectúan en el sistema. Si el proceso fuera ideal, es decir sin destrucción de exergía (sin irreversibilidades), la eficiencia exergética sería del 100%.

3.13. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO

En la figura 16 se muestra el esquema de una torre de enfriamiento de una planta eléctrica con la identificación de las corrientes involucradas en la misma. Sólo consideramos como volumen de control la torre de enfriamiento, representado en el esquema que sigue.

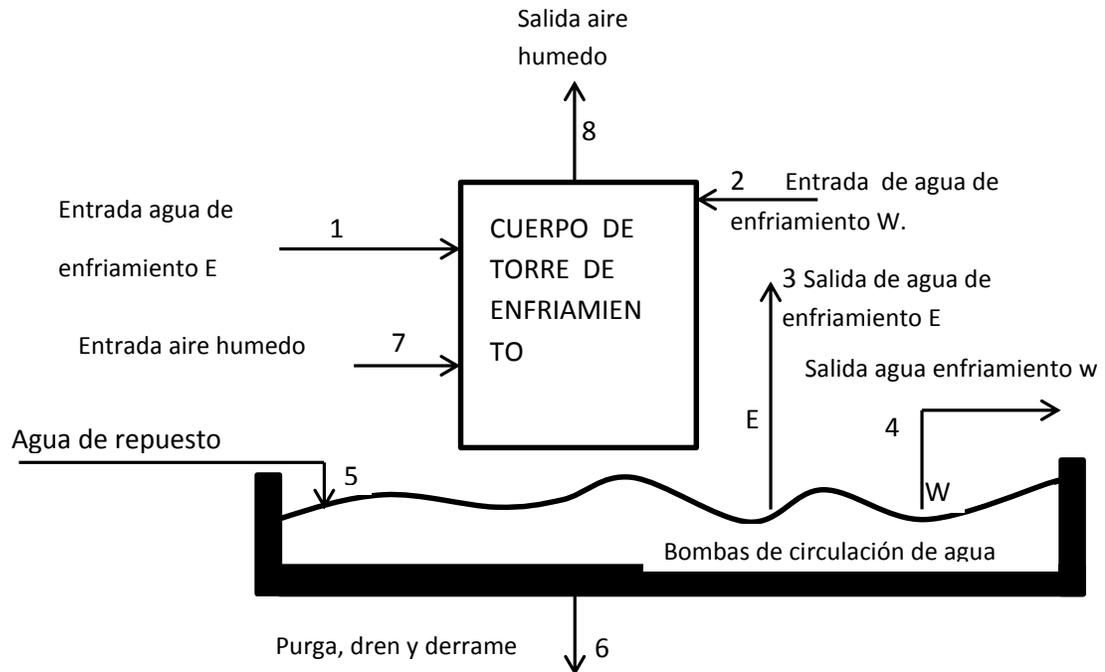


Figura N° 16 Esquema de la torre de enfriamiento y la definición de las corrientes.

Número de corriente	Contenido de corriente	Nomenclatura
1	Agua de enfriamiento de entrada E	\dot{m}_{ageE}
2	Agua de enfriamiento de entrada W	\dot{m}_{ageW}
3	Agua de enfriamiento de salida E	\dot{m}_{agsE}
4	Agua de enfriamiento de salida W	\dot{m}_{agsW}
5	Agua de reposición	\dot{m}_{ag5}
6	Purga	\dot{m}_{ag6}
7	Aire húmedo de entrada	$\dot{m}_{ahe} = (\dot{m}_{ase} + \dot{m}_{ye})$
8	Aire húmedo de salida	$\dot{m}_{ahs} = (\dot{m}_{ass} + \dot{m}_{ys})$

Tabla N° 1 Definición de las corrientes de la torre de enfriamiento

En la torre de enfriamiento, que opera a contraflujo, el flujo de agua descende, mientras que el flujo de aire asciende. Se asume que las condiciones del aire y del agua solo cambian con su posición vertical en la torre. Las condiciones e hipótesis importantes para el modelo son las siguientes. (Moran, M., Shapiro, H., 2004.), (Reyes León A., 2011).

1. La torre de enfriamiento opera de modo permanente.
2. La transferencia de calor y masa con el medio ambiente son despreciables.
3. La transferencia de calor entre el ventilador de la torre y el agua son despreciables.
4. El calor específico del agua y el aire son constantes.
5. Los coeficientes de transferencia de calor y masa son constantes a través de la torre.
6. Las pérdidas de agua por arrastre del aire son despreciables.
7. Las temperaturas del agua y el aire son uniformes en cualquier sección de la torre.

Aplicando las ecuaciones de balance, indicadas anteriormente y considerando los conceptos de aire húmedo, humedad absoluta al esquema de la torre de enfriamiento definida en el estudio, se tiene:

$$\omega_e = \frac{0.622\phi_e p_{ge}}{p - \phi_e p_{ge}} \quad (3.1)$$

$$p_{ve} = \phi_e p_{ge} \quad (3.2)$$

$$p_{ase} = p - p_{ve} \quad (3.3)$$

$$\omega_s = \frac{0.622\phi_s p_{gs}}{p - \phi_s p_{gs}} \quad (3.4)$$

$$p_{vs} = \phi_s p_{gs} \quad (3.5)$$

$$p_{ass} = p - p_{vs} \quad (3.6)$$

3.13.1. Balances de masas

Balance de masa para el aire seco, Balance de masa para el agua, Balance de energía, Balance de entropías, Balance de exergía se obtiene la eficiencia energética y finalmente la eficiencia exérgica. Siendo la primera:

$$\eta_I = \frac{\left(\frac{T_{ageE1}+T_{ageW2}}{2}\right) - \left(\frac{T_{agsE3}+T_{agsW4}}{2}\right)}{\left(\frac{T_{ageE1}+T_{ageW2}}{2}\right) - T_{bbe}} \quad (3.28)$$

(79)

Y la segunda:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{A_d}{A_{ageE} + A_{ageW} + A_{ag5} - A_{agsE} - A_{agsW}} \quad (3.29)$$

(80)

Para aplicar las ecuaciones de balance indicadas, es necesario definir las propiedades termodinámicas de las corrientes de la torre de enfriamiento en análisis. Los datos de presión y temperatura son datos de operación y los otros que figuran en la tabla se han leído de tablas o calculado con sus respectivas ecuaciones de cada corriente; así tenemos la tabla siguiente:

Corriente	T(°C)	P(bar)	\dot{m} (kg/s)	h(kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	ϕ (%)
Agua						
1	46,35	1,324	3089,24	194,08	2,0,6563	
2	45,18	1,3239	3172,22	189,19	0,6410	
3	26,49	1,9132	3089,24	111,07	0,3881	
4	26,55	1,9613	3172,22	111,32	0,3889	
5	13,82	0,78		58,04	0,2073	
6	25,15	0,78		105,47	0,3694	
Vapor						
7	13,82			2526,21	8,8081	
8	40			2573,54	8,2557	
Aire						
7	13,82			287,12		34
8	40			313,41		90

t_{bs} = Temperatura bulbo seco: 7,93°C

t_{bh} = Temperatura bulbo humedo: 7,93°C

Rango de enfriamiento: 20,61°C

Tabla N° 2. Características termodinámicas de las corrientes de la torre de enfriamiento (Reyes León A., 2011).

Eficiencias

De conformidad con las expresiones respectivas, anteriores, las eficiencias energéticas y exergeticas son las siguientes:

- a. Para el estudio base. (Reyes León A., 2011).

$$\eta_I = \frac{T_{age} - T_{ags}}{T_{age} - T_{bhe}} = \frac{\frac{46,35+45,18}{2} - \frac{26,49+26,55}{2}}{\frac{46,35+45,18}{2} - 7,93} = 50,85\%$$

$$\eta_{II} = 1 - \frac{A_d}{A_{ageE} + A_{ageW} + A_{ags} + A_{agsE} + A_{agsW}} = \frac{18197,53}{564261,14 + 577823,36 + 48019,90 - 545577,73 - 560297,32} = 78,39\%$$

- b. Las eficiencias energéticas y exergeticas calculadas, manualmente para el estudio, siguiendo el mismo procedimiento expresado y con las respectivas fórmulas, son las siguientes:

$$\eta_I = 48,70\%$$

$$\eta_{II} = 75,38\%$$

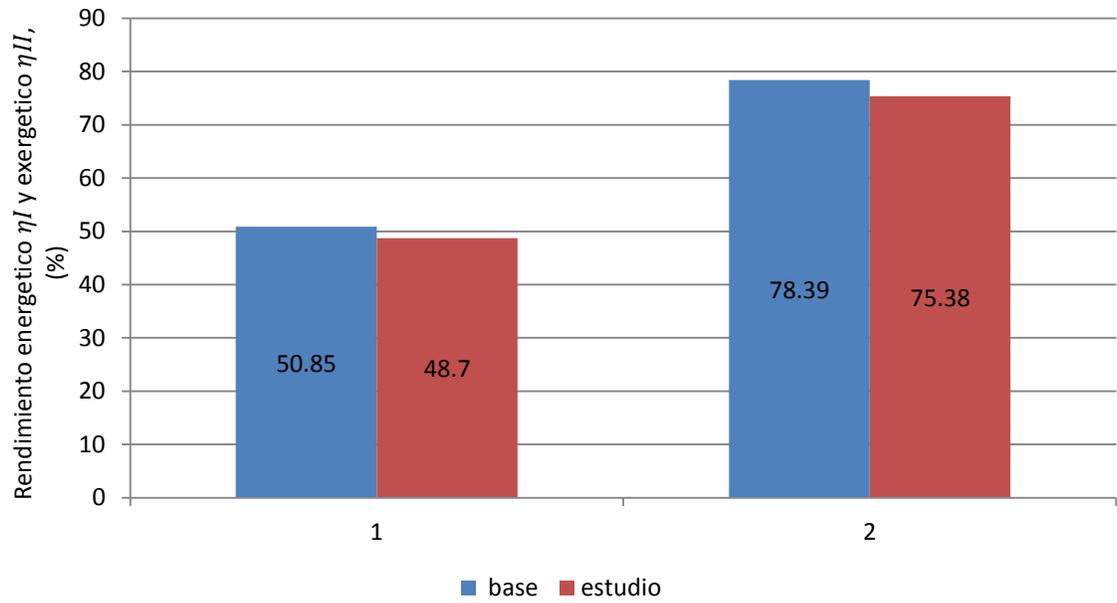


Figura N° 17 Rendimientos, energético y exergetico de la torre de enfriamiento comparado con los respectivos rendimientos del estudio base.

CAPITULO V:

RESULTADOS

Los resultados obtenidos para los rendimientos energéticos (designados en la figura anterior con número

1) y exergeticos (designados en la figura anterior con número

2) de la torre de enfriamiento, mediante la aplicación del algoritmo de cálculo, manualmente, presenta resultados aceptables, respecto a los obtenidos por el estudio base, obviamente con las mismas características del sistema termodinámico en estudio, es así, la diferencia en el rendimiento energético es del orden del 2% y del exergetico es del orden del 3%.

CAPITULO VI:

CONCLUSIONES

En el estudio se muestra la metodología para evaluar el rendimiento exergetico de un equipo de un proceso, en este caso de la torre de enfriamiento; del mismo modo se haría para todos los equipos del proceso, de este modo podría concluirse los que presentan más bajo rendimiento exergetico y merecería atención porque afectarían al proceso integral.

Por otro lado, para analizar los cuellos de botella energéticos del sistema es necesario disponer con los rendimientos de cada una de las unidades de equipos que conforman el proceso y así reparar o cambiar los de más bajo rendimiento energético y así normalizar el funcionamiento del proceso eficientemente, desde el punto de vista del aprovechamiento de la energía, en el estudio se mostrado la forma de obtener el rendimiento energético de la torre de enfriamiento como un componente del sistema integral.

Los dos análisis, el energético y exergetico de un proceso, no son excluyentes ni interferentes, más bien son complementarios, el análisis exergetico evalúa el suministro y recuperación de exergía que generan las irreversibilidades de los procesos, identificando de este modo el uso inadecuado de la energía.

CAPITULO VII

REVISION BIBLIOGRAFICA

7.1 Fuentes Bibliográficas

Cengel, Y.A., Boles M,A. (2007). Termodinàmica. Mexico: 5ta ediciòn, Mc Graw Hill.

Delgadillo,S. (2011). Termodinàmica Bàsica. Instituto politècnico Nacional. Mexico: IPN.

Gomez, T. (2005). Termodinàmica, notas de clase. Universidad de Navarra. España: Tecnun.

Jaramillo,O. (2008). Notas del curso de termodinàmica para Ingenieria.Universidad Nacional Autònoma. Mexico: UNAM.

Martin,T.,Serrano, A. (2009.). *sistemas termodinàmicos.Universidad politècnica de Madrid.*

Recuperado el 30 de noviembre de 2018, de
<http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/termo1p/sistema.html>

Moran,M., Shapiro, H. (2004.). Fundamentos de termodinàmica Tècnica. Zaragoza. España: Editorial Revertè.

Moran,M.,Shapiro, H. (2004). Fundamentos de Termodinàmica Tèrmica. Mèxico: Revertè,S.A.

Reyes León A. (2011). EVALUACIÓN EXERGÉTICA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE CICLO HÍBRIDO DE 550 MW. Mexico: EVALUACIÓN EXERGÉTICA DE UNA TORRE DE.

Smith & Van Ness . (1991). "Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química". Mc Graw Hill, México .

Wang L., Li N. (2001). "Exergy transfer and parametric study of counter flow wet cooling towers". *Applied Thermal Engineering 31*. USA: Krieger.