# ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

**Reyes León Arturo, Quinto Diez Pedro, Gutiérrez Castro Lucia Mónica**

Laboratoriode Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.

arthuro_reyes@yahoo.com.mx, pqd510@hotmail.com, moni-80-lgc@hotmail.com

## RESUMEN.

*En este trabajo se aplicó el análisis exergético para evaluar el desempeño de una torre de enfriamiento de un ciclo hibrido de 550 MW, el análisis está compuesto por los balances de masa, energía, entropía, exergía y la eficiencia energética y exergética, éste se fue aplicado a las condiciones de diseño y de operación de la Torre de Enfriamiento. Los resultados muestran una eficiencia energética de diseño de 56.78 % y de operación de 50.85 %. La eficiencia exergética de diseño de 66.39% y de operación de 78.39%.*

## ABSTRACT.

In this paper, exergy analysis was applied to evaluate the performance of a cooling tower of a cycle hybrid, the analysis consists balances of mass, energy, entropy, exergy, energy efficiency and exergy efficiency, it was applied to conditions of design and operation of the Cooling Tower. The results show an efficiency of 56.78% design and operation of 50.85%. The exergetic efficiency of 66.39% design and operation of 78.39%.

## NOMENCLATURA

| | |
|---|---|
| A | Flujo de exergía [kW] |
| $A_d$ | Destrucción de exergía [kW] |
| $\dot{E}$ | Flujo de energía [kW] |
| R | Contante de los gases [kJ/kg K] |
| $\bar{R}$ | Constante universal de los gases [kJ/kmol K] |
| T | Temperatura [$^oC$ o K] |
| Cp | Calor especifico a presión constante [kJ/kg K] |
| H | Entalpia específica [kJ/kg] |
| P | Presión [bar] |
| S | Entropía específica [kJ/kg K] |
| A | Exergía específica [kJ/kg] |
| $\dot{m}$ | Flujo másico [kg/s] |
| $\bar{g}$ | Función de Gibbs de formación [kJ/kmol] |
| M | Masa molar [kg/kmol] |
| y | Fracción molar [---] |
| Letras griegas. | |
| $\omega$ | Humedad especifica [$kg_v/kg_{as}$] |
| $\phi$ | Humedad relativa [%] |
| $\dot{\sigma}_{gen}$ | Generación de entropía [kJ/kg K] |
| $\eta_I$ | Eficiencia energética [%] |
| $\eta_{II}$ | Eficiencia exergética [%] |
| Subíndices. | |
| E | Lado Este [---] |
| W | Lado Oeste [---] |
| 0 | Estado muerto [---] |
| e | Entrada [---] |
| s | Salida [---] |
| as | Aire seco [---] |
| ase | Aire seco de entrada [---] |
| ass | Aire seco de salida [---] |
| ag | Agua [---] |
| age | Agua de entrada [---] |
| ags | Agua de salida [---] |
| agr | Agua de repuesto [---] |
| agp | Agua de la purga [---] |
| ag | Agua [---] |
| ah | Aire húmedo [---] |
| v | Vapor [---] |
| ve | Vapor de entrada [---] |
| vs | Vapor de salida [---] |
| f | Física [---] |
| q | Química [---] |
| bh | Bulbo húmedo [---] |

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la demanda de la energía en el mundo se ha incrementado rápidamente en la actualidad como resultado del incremento de la población y el crecimiento económico en el mundo. El alto crecimiento en la demanda energética y sus usos han tenido un impacto

Derechos Reservados © 2012, SOMIM
ISBN 978-607-95309-6-9

negativo en el medio ambiente. Es por esta razón que en la actualidad las necesidades en la generación de energía eléctrica, están dirigidas al máximo aprovechamiento de los recursos naturales, tecnológicos y humanos. Esto representa una preocupación constante en el sector energético para mantener su parque de generación eléctrica en condiciones óptimas de eficiencia y funcionalidad [1].

La mayoría de las centrales termoeléctricas convencionales, cuentan con sistemas de enfriamiento de torre húmeda, las cuales desechan una gran cantidad de agua a la atmósfera; aproximadamente un litro por cada MW de electricidad generado [2].

También en muchos procesos industriales o de acondicionamientos ambientales se requiere el empleo de algún sistema o equipo de disipación térmica. Por estas razones, las Torres de Enfriamiento ocupan un lugar importante en las plantas de generación eléctrica, en centros comerciales, en la industria química y metal-mecánica.

La industria de generación de energía eléctrica es un área básica de la ingeniería. Una cantidad considerable de energía eléctrica que se genera en el mundo se produce a través de las plantas de potencia de vapor. Estas plantas operan bajo el mismo principio, independientemente de que la fuente de energía sea la combustión de un combustible fósil o los procesos de fisión de un reactor nuclear.

Cuando por razones de disponibilidad de agua o por razones del medio ambiente no se dispone de un rio o lago del cual extraer agua fría y devolverla con mayor temperatura, es necesario recurrir a un circuito de refrigeración con Torres de Enfriamiento, donde el agua ha de reciclarse, y por tanto, el impacto al medio ambiente de estas centrales es menor [3].

Las Torres de Enfriamiento son intercambiadores de calor que son usados para disipar grandes cantidades de calor a la atmosfera. La transferencia de calor en una Torre de Enfriamiento, se produce por la generación de calor sensible y calor latente, al entrar en contacto el agua caliente con el aire. La masa del agua evaporada extrae el calor latente de vaporización del agua, el cual es cedido al aire, provocando el enfriamiento del agua y el aumento de la temperatura del aire.Cada kilogramo de agua que se evapora elimina aproximadamente 2270 kJ en forma de calor latente [4].

En este trabajo se presenta el análisis del comportamiento exergético de una Torre de Enfriamiento de una central de generación eléctrica de 550 MW.

## DESCRIPCIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

La Torre de Enfriamiento analizada se encuentra instalada en la central termoeléctrica de ciclo hibrido. Es una torre húmeda, de tiro inducido y flujo cruzado. Tiene la función de enfriar el agua que regresa del condensador, y está equipada con 10 ventiladores de 8 aspas cada uno, dos charolas de distribución y 2 cabezales de descarga de agua caliente. Las líneas de corriente de la torre de enfriamiento analizada se muestran en la Figura 1.

## PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

El procedimiento de cálculo se divide en las siguientes partes: a) balance de masa (conservación de la masa), b) balance de energía (conservación de la energía), c) balance de entropía (segunda ley de la termodinámica), d) balance de exergía e) eficiencia energética y f) eficiencia exergética.

Las consideraciones e hipótesis importantes para el análisis de la torre de enfriamiento son las siguientes: [5,6,7]

1. Opera de modo permanente.
2. La transferencia de calor con el medio ambiente es despreciada.
3. La transferencia de calor entre el ventilador de la Torre y el agua es despreciables.
4. El calor específico del agua y el aire se mantienen 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.

Derechos Reservados © 2012, SOMIM
ISBN 978-607-95309-6-9

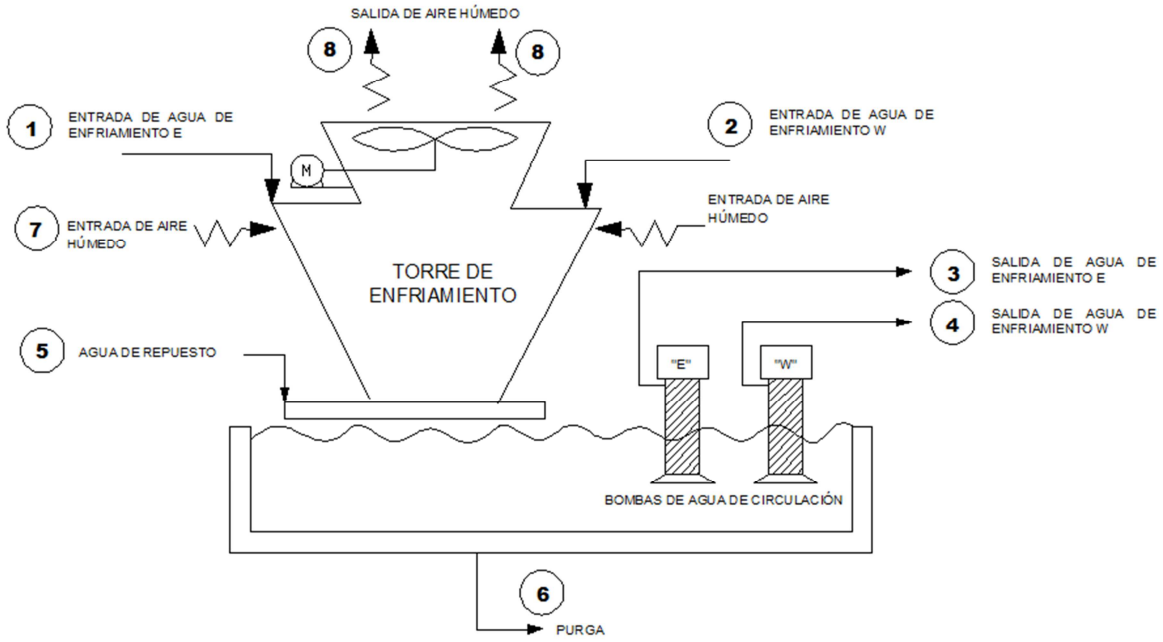


**Figura 1** Esquema de la Torre de Enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido.

**a) Balance de masa (conservación de la masa)**

Los balances de masa para el aire, el vapor de agua y el agua están dados por las ecuaciones (1) a (8)

- ✓ Balance de masa para el aire seco:

$$\dot{m}_{ase} = \dot{m}_{ass} = \dot{m}_{as} \quad \text{.....(1)}$$

- ✓ Balance de masa para el agua y él vapor de agua está dado por:

$$\begin{aligned}&\dot{m}_{age,E} + \dot{m}_{age,W} + \dot{m}_{agr} + \dot{m}_{ve} = \\ &\dot{m}_{ags,E} + \dot{m}_{ags,W} + \dot{m}_{agp} + \dot{m}_{vs}\end{aligned} \quad \text{.....(2)}$$

El balance de masa para la Torre de Enfriamiento se obtiene sumando miembro a miembro las ecuaciones (1) y (2):

$$\begin{aligned}&\dot{m}_{age,E} + \dot{m}_{age,W} + \dot{m}_{agr} + \dot{m}_{ve} + \dot{m}_{ase} = \\ &\dot{m}_{ags,E} + \dot{m}_{ags,W} + \dot{m}_{agp} + \dot{m}_{vs} + \dot{m}_{ass}\end{aligned} \quad \text{.....(3)}$$

Como:

$$\left.\begin{aligned}\dot{m}_v &= \dot{m}_{as}\omega \\ \dot{m}_{ve} &= \dot{m}_{as}\omega_e \\ \dot{m}_{vs} &= \dot{m}_{as}\omega_s\end{aligned}\right\} \quad \text{.....(4)}$$

Considerando las igualdades de la ecuación (4), el balance de masa de la torre de enfriamiento se expresa como:

$$\begin{aligned}&\dot{m}_{age,E} + \dot{m}_{age,W} + \dot{m}_{agr} + \dot{m}_{ase}\omega_e + \dot{m}_{ase} = \\ &\dot{m}_{ags,E} + \dot{m}_{ags,W} + \dot{m}_{agp} + \dot{m}_{ass}\omega_s + \dot{m}_{ass}\end{aligned} \quad \text{.....(5)}$$

Como en esta Torre de Enfriamiento se cumplen las siguientes igualdades:

$$\left.\begin{aligned}\dot{m}_{age,E} &= \dot{m}_{ags,E} \\ \dot{m}_{age,W} &= \dot{m}_{ags,W} \\ \dot{m}_{ase} &= \dot{m}_{ass} = \dot{m}_{as} \\ \dot{m}_v &= \dot{m}_{as}\omega\end{aligned}\right\} \quad \text{.....(6)}$$

Considerando las igualdades de la ecuación (6) en la ecuación (5) se obtiene lo siguiente expresión:

$$\dot{m}_{agr} = \dot{m}_{as}\left(\omega_s - \omega_e\right) + \dot{m}_{agp} \quad \text{.....(7)}$$

El flujo de másico de la purga de agua se tiene la

Derechos Reservados © 2012, SOMIM
ISBN 978-607-95309-6-9

siguiente expresión.

$$\dot{m}_{agp} = \left(\dot{m}_{age,E} + \dot{m}_{age,W}\right) * \%\ \text{purga de agua} \quad \ldots\ldots\ldots(8)$$

El porcentaje de purga se calcula en función del rango de enfriamiento.

**b) Balance de energía (conservación de la energía)**

El balance de energía para la Torre de Enfriamiento y tomando en cuenta las hipótesis 1 y 2, se expresa por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} &\dot{m}_{age,E} h_{age,E} + \dot{m}_{age,W} h_{age,W} + \dot{m}_{agr} h_{agr} + \dot{m}_{ve} h_{ve} \\ &+ \dot{m}_{ase} h_{ase} - [\, \dot{m}_{ags,E} h_{ags,E} + \dot{m}_{ags,W}\ h_{ags,W} \qquad (9) \\ &+ \dot{m}_{agp} h_{agp} + \dot{m}_{vs} h_{vs} + \dot{m}_{ass} h_{ass}\, ] = 0 \end{aligned}$$

Tomando en consideración las igualdades de la (6), la ecuación (9) se reduce a la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} &\dot{m}_{age,E}\left(h_{age,E} - h_{ags,E}\right) + \dot{m}_{age,W}\left(h_{age,W} - h_{ags,W}\right) \\ &+ \dot{m}_{agr} h_{agr} + \dot{m}_{as}\left[\left(\omega_e h_{ve} - \omega_s h_{vs}\right) + \left(h_{ase} - h_{ass}\right)\right] \\ &- \dot{m}_{agp} h_{agp} = 0 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10) \end{aligned}$$

**c) Balance de entropía (segunda ley de la termodinámica)**

El balance de entropía de la Torre de Enfriamiento está dando por ecuación siguiente:

$$\begin{aligned} &\dot{m}_{age,W} s_{age,W} + \dot{m}_{agr} s_{agr} + \dot{m}_{ve} s_{ve} + \dot{m}_{ase} s_{ase} \\ &- \left[\begin{array}{l} \dot{m}_{ags,E} s_{ags,E} + \dot{m}_{ags,W} s_{ags,W} \\ + \dot{m}_{agp} s_{agp} + \dot{m}_{vs} s_{vs} + \dot{m}_{ass} s_{ass} \end{array}\right] + \dot{\sigma}_{gen} = 0 \ldots\ldots (11) \end{aligned}$$

Tomando en consideración las igualdades de la ecuación (6), el balance de entropía se reduce a la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned} &\dot{m}_{age,E}\left(s_{age,E} - s_{ags,E}\right) + \dot{m}_{age,W}\left(s_{age,W} - s_{ags,W}\right) \\ &+ \dot{m}_{agr} s_{agr} + \dot{m}_{as}\left[\left(\omega_e s_{ve} - \omega_s s_{vs}\right) + \left(s_{ase} - s_{ass}\right)\right] \\ &- \dot{m}_{agp} s_{agp} + \dot{\sigma}_{gen} = 0 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (12) \end{aligned}$$

**d) Eficiencia energética.-**

La eficiencia energética de una Torre de Enfriamiento, se define como la relación la transferencia de energía real y la transferencia de energía máxima posible y es expresada por la ecuación siguiente: [6,7]

$$\eta_I = \frac{T_{age} - T_{ags}}{T_{age} - T_{bh,e}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

Para la torre de enfriamiento del ciclo híbrido, se expresa como:

$$\eta_I = \frac{\left(\dfrac{T_{age,E} + T_{age,W}}{2}\right) - \left(\dfrac{T_{ags,E} + T_{ags,W}}{2}\right)}{\left(\dfrac{T_{age,E} + T_{age,W}}{2}\right) - T_{bh,e}} \quad \ldots\ldots (14)$$

**e) Balance exergético**

La exergía total del sistema se define en términos de exergía física y exergía química, y se obtiene de la expresión siguiente.

$$a_t = a_f + a_q \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (15)$$

Con ésta consideración el balance de exergía se expresa con la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned} &\dot{m}_{age,E}\left[\left(a_{f,age,E} + a_{q,age.E}\right) - \left(a_{f,ags,E} + a_{q,ags,E}\right)\right] \\ &+ \dot{m}_{age,W}\left[\left(a_{f,age,W} + a_{q,age,W}\right) - \left(a_{f,ags,W} + a_{q,ags,W}\right)\right] \\ &+ \dot{m}_{agr}\left(a_{f,agr} + a_{q,agr}\right) + \dot{m}_{as}\left(a_{f,e} - a_{f,s}\right) \\ &+ \dot{m}_{ve}\left(a_{f,ve} + a_{q,ve}\right) - \dot{m}_{agp}\left(a_{f,agp} + a_{q,agp}\right) \\ &- \dot{m}_{vs}\left(a_{fvs} + a_{qvs}\right) = \dot{A}_d \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (16) \end{aligned}$$

De donde:

$$a_f = h - h_0 - T_0\left(s - s_0\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (17)$$

$$a_q = \frac{1}{M}\left\{\left[\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}\right] + \bar{R}T_0 \ln\left(\frac{1}{y^a_{H_2O}}\right)\right\} \quad (18)$$

Derechos Reservados © 2012, SOMIM
ISBN 978-607-95309-6-9

Donde para el aire seco se tiene:

$$\left(a_{fe}-a_{fs}\right)=h_{ase}-h_{ass}-T_0\left(s_{ase}-s_{ass}\right) \quad \text{.....(19)}$$

$$\left(s_{ase}-s_{ass}\right)=C_{pas}\ln\frac{T_{ase}}{T_{ass}}-R_{as}\ln\frac{p_{ase}}{p_{ass}} \quad \text{.....(20)}$$

y para el agua y el vapor de agua se tiene:

$$a_f=h_i-h_0-T_0\left(s_i-s_0\right) \quad \text{.....(21)}$$

$$a_q=\frac{1}{M}\left\{\left[\bar{g}_{H_2O(l)}-\bar{g}_{H_2O(g)}\right]+\bar{R}T_0\ln\left(\frac{1}{y^a_{H_2O}}\right)\right\} \quad (22)$$

$$y^a_{H_2O}=\frac{p_{ve}}{p_{ref}} \quad \text{.....(23)}$$

**f) Eficiencia exergética.**

La eficiencia exergética o eficiencia de segunda ley, es la medida de las perdidas por irreversibilidades que se dan en el proceso y se expresa en términos de la destrucción de exergía y la exergía suministrada. [9,10]

$$\eta_{II}=1-\frac{Ad}{A_{sum}} \quad \text{.....(24)}$$

Y que para la torre de enfriamiento se expresa como:

$$\eta_{II}=1-\frac{Ad}{A_{age,E}+A_{age,W}+A_{agr}-A_{ags,E}-A_{ags,W}} \quad \text{...(25)}$$

## RESULTADOS

Los cálculos se realizaron para las condiciones de diseño y operación de la de la Torre de Enfriamiento del ciclo híbrido. Los datos utilizados en los cálculos se muestran en las Tablas 1 y 2 [11, 12, 13, 14].Los datos de diseño son los que proporcionó el fabricante y los datos de operación se obtuvieron aplicando la normativa correspondiente.

Estos datos se utilizaron para realizar los cálculos correspondientes a los balances de masa, energía entropía, exergía y la eficiencia energética y exergética, aplicando las ecuaciones (1-25). Losresultados se muestran en las tablas 3,4 y 5.

**Tabla 1. Datos de operación tomados para el análisis**

| No. de Corriente | Temperatura (°C) | Presión (bar) | Flujo másico (kg/s) | Humedad relativa (%) |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 46.35 | 1.324 | 3089.24 | |
| **2** | 45.18 | 1.323 | 3172.22 | |
| **3** | 26.49 | 1.912 | 3089.24 | |
| **4** | 26.55 | 1.961 | 3172.22 | |
| **5** | 13.82 | 0.7800 | - | |
| **6** | 25.15 | 0.7800 | - | |
| **Vapor** | | | | |
| **7** | 13.82 | - | - | |
| **8** | 40 | - | - | |
| **Aire** | | | | |
| **7** | 13.82 | - | - | 34 |
| **8** | 40 | - | - | 90 |

**Tabla 2. Datos de diseño tomados para el análisis**

| No. de Corriente | Temperatura (°C) | Presión (bar) | Flujo másico (kg/s) | Humedad relativa (%) |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 39.44 | 1.777 | 3596 | |
| **2** | 39.44 | 1.777 | 3596 | |
| **3** | 25.5 | 1.981 | 3596 | |
| **4** | 25.5 | 1.981 | 3596 | |
| **5** | 25 | 0.7805 | - | |
| **6** | 25.5 | 0.7805 | - | |
| **Vapor** | | | | |
| **7** | 25 | - | - | |
| **8** | 34 | - | - | |
| **Aire** | | | | |
| **7** | 25 | - | - | 24.63 |
| **8** | 34 | - | - | 90 |

En la Tabla 3 se muestran los flujos másicos del agua de repuesto, la purga, el vapor de entrada y salida y el aire seco para las condiciones de operación y diseño.

**Tabla 3.Comparación de los resultados del balance de masa**

| Variable | | kg/s | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Diseño | Operación | Diferencia (D-O) |
| **Agua de repuesto** | $\dot{m}_{agr}$ | 261.67 | 273.68 | -12.01 |
| **Purga de agua.** | $\dot{m}_{agp}$ | 107.88 | 93.92 | 13.96 |
| **Vapor de entrada** | $\dot{m}_{ve}$ | 28.07 | 13.33 | 14.74 |
| **Vapor de salida** | $\dot{m}_{vs}$ | 181.86 | 179.13 | 2.73 |
| **Aire seco** | $\dot{m}_{as}$ | 4469.49 | 3092.21 | 1377.28 |

En la Tabla 4 se muestran los resultados del análisis energético para las condiciones de diseño y operación, así como la diferencia entre estos valores.

Derechos Reservados © 2012, SOMIM
ISBN 978-607-95309-6-9

**Tabla 4.Comparación delos flujos de energía y la eficiencia energética**

| Variable | | kW | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Diseño | Operación | Diferencia (D-O) |
| **Agua de entrada E** | $\dot{E}_{ageE}$ | 594061.83 | 599558.17 | -5496.34 |
| **Agua de entrada W** | $\dot{E}_{ageW}$ | 594061.83 | 600150.62 | -6088.79 |
| **Agua de entrada E** | $\dot{E}_{agsE}$ | 384518.50 | 343120.66 | 41397.84 |
| **Agua de entradaW** | $\dot{E}_{agsW}$ | 384518.50 | 353135.35 | 31383.15 |
| **Agua de repuesto** | $\dot{E}_{agr}$ | 27430.84 | 15075.29 | 12335.55 |
| **Purga** | $\dot{E}_{agp}$ | 11535.56 | 9905.54 | 1630.02 |
| **Vapor de entrada** | $\dot{E}_{ve}$ | 71528.91 | 33703.00 | 37825.91 |
| **Vapor de salida** | $\dot{E}_{vs}$ | 466061.96 | 461030.52 | 5031.44 |
| **Aire seco de entrada** | $\dot{E}_{ase}$ | 1333382.93 | 887831.37 | 445551.56 |
| **Aire seco de salida** | $\dot{E}_{ass}$ | 1373831.82 | 969125.21 | 404706.61 |
| **Eficiencia (%)** | $\eta_I$ | 56.78 | 50.85 | 5.93 |

En la Tabla 5 se muestran los resultados del análisis exergético, así como la diferencia entre los resultados de diseño y operación de la torre de enfriamiento.

## CONCLUSIONES

La metodología de cálculo de la evaluación exergética desarrollada en este trabajo ha permitido mostrar, el procedimiento necesario para evaluar el comportamiento térmico de la torre de enfriamiento.

Un análisis exergético, no sustituye a un análisis energético es un complemento. Con el análisis exergético se evalúa el suministro y recuperación de exergía de los procesos energéticos, la eficiencia exergética y la destrucción de exergía que ocurre por las irreversibilidades de los procesos.

De la comparación de los resultados del análisis energético, se observa que en las condiciones de operación los flujos de energía $\dot{E}_{ageE}$ y $\dot{E}_{ageW}$ son mayores a los obtenidos en las condiciones de diseño, mientras que la eficiencia $\eta_I$ en las condiciones de operación es menor a la obtenida en las condiciones de diseño, mientras el flujo másico de agua de Enfriamiento es mayor a las condiciones de diseño que a las condiciones de operación, lo anterior confirma que la Torre de Enfriamiento está trabajando fuera de sus condiciones de operación.

**Tabla 5.Comparación de los resultados análisis exergético**

| Variable | | kW | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Diseño | Operación | Diferencia (D-O) |
| **Agua de entrada E** | $\dot{A}_{ageE}$ | 551442.6 | 570780.4 | -19337.9 |
| **Agua de entrada W** | $\dot{A}_{ageW}$ | 551442.6 | 584556.6 | -33114.0 |
| **Agua de entrada E** | $\dot{A}_{agsE}$ | 546343.2 | 552121.9 | -5778.8 |
| **Agua de entrada W** | $\dot{A}_{agsW}$ | 546343.2 | 566989.9 | -20646.7 |
| **Agua de repuesto** | $\dot{A}_{agr}$ | 39752.0 | 46123.2 | -6371.16 |
| **Purga** | $\dot{A}_{agp}$ | 16390.3 | 16764.9 | -374.67 |
| **Vapor de entrada** | $\dot{A}_{ve}$ | 4267.3 | 2369.0 | 1898.26 |
| **Vapor de salida** | $\dot{A}_{vs}$ | 40627.2 | 68683.0 | -28055.85 |
| **Aire seco de entrada** | $\dot{A}_{ase}$ | 0 | 0 | 0 |
| **Aire seco de salida** | $\dot{A}_{ass}$ | 19729.1 | 17403.17 | 2325.92 |
| **Destrucción de exergía** | $\dot{A}_d$ | 16929.8 | 16672.62 | 257.13 |
| **Eficiencia (%)** | $\eta_{II}$ | 66.39 | 78.39 | -12.00 |

De los resultados del balance de exergía, se observa que en las condiciones de operación, $\dot{A}_{ageE}$, $\dot{A}_{ageW}$ $\dot{A}_{agsE}$, $\dot{A}_{agsW}$ $\dot{A}_{agr}$, $\dot{A}_{agp}$ y $\dot{A}_{vs}$ son mayores a los correspondientes de las condiciones de diseño, mientras que la $\eta_{II}$ a las condiciones de diseño es menor a la obtenida en las condiciones de operación. Esto confirma que la torre de enfriamiento está operando fuera de sus condiciones de diseño.

En general, el análisis energético y exergético, con los parámetros de eficiencia energética y eficiencia exergética, ayuda a puntualizar las acciones correctivas que se pueden tomar para lograr un mejor aprovechamiento de la energía con conveniencias tanto técnicas como económicas.

Con los años de operación, la Torre de Enfriamiento ha perdido su capacidad de enfriamiento, por lo que se hacen las siguientes recomendaciones técnicas, con el propósito de

Derechos Reservados © 2012, SOMIM
ISBN 978-607-95309-6-9

ayudar a mejorar la operación de la misma.

- Sustituir el relleno dañado de la Torre de Enfriamiento, para retardar la caída del agua y así aumentar el tiempo de contacto entre el agua y el aire, propiciando una mayor transferencia de calor.

- Programar un mantenimiento periódico de la Torre de Enfriamiento y seguir las recomendaciones técnicas indicadas por el fabricante de la misma.

**REFERENCIAS**

[1] C. H. Kwambai, "Exergy Analysis of Olkaria I Power Plant, Kenya", Proceding World Geothermal Congress 2010.
[2] ww.cfe.gob.mx
[3] J. Smrekar, J. Oman, "Impoving the Efficiency of Natural Draft Cooling Tower", Energy Conversion an Management, 2006
[4] M. M. Abo Elazm, A. F. Elsafty, "Theorical and Experimental Study of a Cross-Flow Induced-Draft Cooling Tower" Thermal Science Vol 13, (2009), 91-98.
[5] M. J. Moran, H. N. Shapiro, "Fundamentos de Termodinámica Técnica" 2ª Edición, Reverte 2004.
[6] M. Saravanan, R.Saravanan, S. Renganarayanan, "Energy and Exergy Analysis of Counter Flow Wet Cooling Towers" Thermal Science, Vol. 12 (2008), 69-78.
[7] T. Muangnoi, W. Asvapoositkul, S. Wongwises, "An Exergy Analysis on the Performance of a Counter flow Wet Cooling Tower", Applied Thermal Engineering, (2007).
[8] S. P. Fisenko, A. A. Brin, "Simulation of a cross-flow cooling tower performance", International Journal of Heat and Mass Transfer, (2007), 3216-3223
[9] L. Wang, N. Li, "Exergy transfer and parametric study of counter flow wet cooling towers", Applied Thermal Engineering, (2001)
[10] T. J. Kotas, "The exergy method of thermal plant analysis", Krieger. 1995.
[11] T. Muangnoi, W. Asvapoositkul, "Effects of inlet relative and inlet temperature on the performance of counter flow wet cooling tower based on exergy analysis", Energy Conversion and Management, (2008).
[12] Central Termoeléctrica Valle de México, Prontuario de Datos técnicos.
[13] Laboratorio de pruebas de la C.F.E (LAPEM), Numero de Informe K3323-2313-07", 22 de Febrero de 2007.
[14] Arturo Reyes L, "Evaluación exergética de una torre de enfriamiento de una Central Termoeléctrica de Ciclo Hibrido de 550 MW", Tesis de Maestría en Ciencias, ESIME, IPN, MÉXICO, DF, 2011.

Derechos Reservados © 2012, SOMIM
ISBN 978-607-95309-6-9