



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE  
MEXICO**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

**INDICES EXERGETICOS Y ECONOMICOS COMO  
HERRAMIENTAS EN APOYO A LA ESTRATEGIA DE  
MANTENIMIENTOS**

**T E S I S**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERIA**

**INGENIERIA DE SISTEMAS – INGENIERIA INDUSTRIAL**

**P R E S E N T A**

**CARLOS ALBERTO CUERVO PADILLA**

**TUTOR: FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO**

**DICIEMBRE, 2012**

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente: Francisca Irene Soler Anguiano**

**Secretario: Idalia Flores de la Mota**

**Vocal: Rodolfo Herrera Toledo**

**1er Suplente: Nelly Rigaud Téllez**

**2do Suplente: Mariano García Martínez**

Ciudad Universitaria, México DF

**TUTOR DE TESIS:**

**Francisca Irene Soler Anguiano**

---

**FIRMA:**

Este trabajo está dedicado a la memoria de mi tía, por todo...por siempre

### AGRADECIMIENTOS:

Deseo expresar mis agradecimientos a mi directora de tesis; Maestra Francis por su paciencia, comprensión, amistad., jurados; Dr. Rodolfo Herrera, Dra. Idalia de la Mota, Dra. Nelly Rigaud y M.I. Mariano García Martínez por sus valiosos consejos así mismo al Ing. Leonardo Huazano., Jefe del Dpto. de Instrumentación y Control; Ing. Armando García., Jefe del Dpto. Análisis y Resultados por su cooperación y amistad al elaborar este trabajo. A mi familia por la fortuna de tenerlos en mi vida y por el honor de ser parte de las tuyas. A mis amigos por ofrecerme consejos y desvelos. A mi esposa por ser mi cómplice del regalo más grande que es la vida...

# CONTENIDO

## CAPITULO 1

Introducción

1. Antecedentes y revisión bibliográfica.....	14
1.1 Industria energética.....	14
1.1.1. Uso de la Energía.....	16
1.2 Mantenimientos.....	17

## CAPITULO 2

2. Análisis Energético y económico.....	21
2.1 Descripción del proceso productivo.....	22
2.2 Termoeconomía.....	23
2.2.1 Balance de Materia.....	24
2.2.2 Balance de Energía.....	26
2.2.3 Método exergético.....	28
2.2.4 Matriz Recurso – Producto.....	30
2.2.4.1 Eficiencia Exergética.....	34
2.2.4.2 Costo exergoeconómico.....	35

## CAPITULO 3

3. Índice exergético en geotermoeléctricas.....	37
3.1 Caso unidad 13 en los Azufres II.....	37
3.1.1 Análisis Exergético y Económico.....	39
3.1.2 Comparativa de Escenarios.....	56
3.1.3 Escenarios de Producción.....	57

## **CAPITULO 4**

4. Relación exergía, costo exergoeconómicos y mantenimiento.....	64
4.1 Análisis Exergoeconómico de los equipos del proceso.....	72
4.2 Irreversibilidad del Sistema.....	91
4.3 Índices energéticos y económicos para la toma de Decisiones en los sistemas de mantenimientos.....	93
4.4 Modificación de la metodología en los sistemas de mantenimiento.....	96

## **CAPITULO 5**

5. Conclusiones.....	101
----------------------	-----

<b>ANEXOS</b> .....	105
---------------------	-----

<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	130
---------------------------	-----

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Elaboración propia con datos consultados del INEGI*
- Figura 1.2 Elaboración propia con datos consultados del INEGI*
- Figura 1.3 Uso de la energía a nivel mundial, 1970-2025 (WES, 2005)*
- Figura 2.1 Diagrama del proceso (Unidad 13, Azufres II)*
- Figura 2.2 Balance de materia del proceso geotérmico*
- Figura 2.3 Balance de Recurso, Producto y Pérdidas*
- Figura 3.1 Proceso Productivo sistema de Flasheo*
- Figura 3.2 Proceso Productivo (Unidad 13, Azufres II)*
- Tabla 3.4 Matriz de incidencias (Teoría de Grafos) para el balance de masa*
- Tabla 3.5 Exergía de los flujos eléctricos*
- Tabla 3.6 Matriz de incidencias para el balance de energía*
- Tabla 3.7 Calor ( $Q's$ ) disipado en cada equipo*
- Tabla 3.8 Vector de exergía*
- Tabla 3.9 Exergía destruida por equipos*
- Figura 3.10 Representación del balance Recurso-Producto-Pérdida*
- Tabla 3.11 Matriz de incidencias totales*
- Tabla 3.12 Costo exergético de la U13-AzII*
- Tabla 3.13 Costo exergoeconómico de cada flujo*
- Tabla 3.14 Matriz de incidencias para el balance de materia del ED*
- Tabla 3.15 Matriz de incidencias para el balance de energía del ED*
- Tabla 3.16 Exergía destruida del ED y EA*
- Tabla 3.17 Diferencias de la exergía destruida (EA-ED)*
- Figura 3.18, 3.19 Comportamiento de la exergía destruida por equipos [MW, Equipos]*
- Figura 3.20 Costo exergético EA y ED a escala*
- Figura 3.21 Costo exergético del EA y ED para flujos mayores*
- Tabla 4.21 Exergía destruida para equipos primarios*
- Figura 4.22 Porcentaje de mejora del ED respecto al EA*
- Figura 4.23 Costo Exergético del ED*

***Figura 4.24,25 Impacto de cada flujo en el proceso***

***Figura 4.26 Porcentaje de mejora económica del ED respecto al EA***

***Figura 4.27 Diagrama Secador de Vapor***

***Tabla 4.28 Diagnóstico Exergético Secador de Vapor***

***Figura 4.29 Diagrama Divisor de Flujo***

***Tabla 4.30 Diagnóstico Divisor de Flujo***

***Figura 4.31 Diagrama de flujos de Turbina***

***Tabla 4.32 Diagnóstico Exergético de Turbina***

***Figura 4.33 Diagrama de flujos Condensador***

***Tabla 4.34 Diagnóstico Condensador***

***Figura 4.35 Diagrama de Flujos Torre de Enfriamiento***

***Tabla 4.36 Diagnóstico exergético de Torre de Enfriamiento***

***Figura 4.37 Diagrama de Flujos eyector de vapor***

***Tabla 4.38 Diagnóstico Exergético Eyector***

***Figura 4.39 Diagrama de flujos bombas de condensado***

***Tabla 4.40 Diagnóstico Exergético de flujos bombas de condensado***

***Figura 4.41 Diagrama de flujos Divisor de flujo***

***Tabla 4.42 Diagnóstico Exergético de flujos Divisor de flujo***

***Figura 4.43 Diagrama de flujos Válvula***

***Tabla 4.44 Diagrama de flujos Válvula***

***Figura 4.45 Diagrama de flujos BBA Enfriamiento de Auxiliares***

***Tabla 4.46 Diagnóstico Exergético BBA Enfriamiento Auxiliares***

***Figura 4.47 Diagrama de flujos Divisor de vapor***

***Tabla 4.48 Diagnóstico Exergético de Divisor de vapor***

***Figura 4.49 Diagrama de flujos enfriador de aceite***

***Tabla 4.50 Diagnóstico Exergético Enfriador de aceite***

***Figura 4.51 Diagrama de flujos enfriador del generador***

***Tabla 4.52 Diagnóstico Exergético enfriador del generador***

***Figura 4.53 Diagrama de flujos Divisor de flujo***

***Tabla 4.54 Diagnóstico Exergético Divisor de flujo***

***Figura 4.55 Diagrama de flujos Divisor de flujo***

***Tabla 4.56 Diagnóstico flujos Divisor de flujo***

***Figura 4.57 Diagrama de flujos Interenfriador***

***Tabla 4.58 Diagnóstico Exergético Interenfriador***

***Figura 4.59 Diagrama de flujos Separadores***

***Tabla 4.60 Diagnóstico Exergético Separadores***

***Figura 4.61 Diagrama de flujos Generador Eléctrico***

***Tabla 4.62 Diagnóstico Exergético Generador Eléctrico***

***Figura 4.63 Irreversibilidad de los flujos***

***Figura 4.64 Costo de Mantenimiento por equipos***

# CAPITULO 1

## Introducción

Hoy en día, la energía juega un papel importante para el desarrollo de cualquier país. La relación que tiene el crecimiento económico y el sector energía es inevitable y dramática. Por ello es indispensable que la producción de energía sea de acuerdo a estándares de calidad y con un sistema de control bien delimitado que prepare e incentive el camino para que se continúe evolucionando en la eficiencia energética.

El sector energético es tan importante como su sector económico; de hecho, ambos se encuentran relacionados directamente. La recesión económica mundial del 2008-2012, (Sayan, 2009) deriva a que el sector energético se contrajo. Dejando ver que si un sistema económico crece, también crecen sus necesidades energéticas. La importancia del sistema energético es clave para el desarrollo económico de cualquier país, aunado a que día con día se necesitan de mayores recursos para continuar solventando las necesidades humanas consecuencia directa del aumento poblacional. La demanda energética seguirá ahí, abriendo nuevos mercados y requiriendo nuevas generaciones de consumidores. El mundo se encuentra en una transición energética, donde los recursos fósiles son hasta ahora la mayor fuente de energía en el mundo y comienza seriamente a declinar su obtención. Además encontrar nuevos campos productores en gas y petróleo se vislumbra como una tarea titánica ya que explorarlos y explotarlos ahora será en zonas con altos grados de dificultad y riesgo. Y el panorama de México no es ajeno a esta visión. Actualmente según datos de la Comisión Reguladora de Energía (Evaluación de Geotermia en México, 2011), las reservas probadas de recursos fósiles, particularmente del petróleo, son menores a 15 años. Este es un serio problema que México deberá de enfrentar en años venideros teniendo como escenario no deseable un déficit energético.

Debido a ello, la energía alterna toma mayor auge y popularidad en países desarrollados y subdesarrollados principalmente. Por fortuna México tiene envidiables oportunidades de recursos alternos, ya que cuenta con recursos eólicos probados superiores a 5 mil MW, la insolación solar es de las mejores en el mundo con 5kWh/m<sup>2</sup> al día. El recurso geotérmico es de los más grandes en América Latina y además se tienen buenos proyectos sustentables para micro eléctricas, al menos 3,5 mil MW. El recurso existe, desafortunadamente se tienen factores que frenan el impulso hacia esta transición energética, principalmente la dependencia que aún se tiene en el petróleo. Esta transición energética debe darse en un entorno más eficiente, ecológico y además económicamente sustentable. El sistema productivo por cualquier método generativo debe tener la capacidad de aprender y evolucionar hacia la eficiencia energética; esto es, consumir menos y generar más o por lo menos lo mismo.

La eficiencia energética busca reducir el consumo de energía por habitante si se habla en términos generales como enfoque de un país. En este caso la eficiencia energética buscará reducir el consumo de recursos para producir más energía eléctrica o mantenerse constantes en la línea de producción. Para que esto se aplique en una industria, pueden involucrarse muchos factores que van desde lo administrativo, sin embargo el estudio presente se enfoca en el proceso productivo.

En la actualidad las estrictas normas de calidad y la constante presión competitiva obligan a las empresas a mejorar sus procesos productivos para ofrecer una mejor relación de calidad y precio. Las mejoras pueden consistir en mejorar la ingeniería de la planta, modernizar el proceso con nuevas herramientas, maquinaria, etc. O mejorar la productividad mediante nuevas técnicas o mejores prácticas de mantenimiento.

En el caso de la Geotérmica existen factores clave como las estrategias de mantenimiento y los costos de producción que intervienen en el sistema de generación de energía eléctrica. Para lograr optimizar el proceso productivo,

se deben enfocar esfuerzos en estos dos factores, los cuales definen la vida útil de cualquier proceso industrial (Valero, 1994). Para obtener los costos productivos es necesario realizar un análisis exergético el cual permite cuantificar el consumo real del recurso usado para obtener el producto final, a lo que se llama costo exergético. Este índice muestra la cantidad de energía necesaria para obtener la energía producida. Este concepto permite una definición más precisa del rendimiento de un proceso que los rendimientos tradicionales (Hutin y Sapag, 2004). Otro de los beneficios de este análisis es que se engloban todas las variables en una única propiedad energética pudiendo entonces comparar unas con otras sin el temor de tener calidades de energías diferentes.

Los costos productivos son importantes en la vida económica de cualquier proceso y la manera de utilizarlos debe de reflejarse en las estrategias de mantenimientos. Se sabe que mas del 30% del trabajo que se realiza en una industria es debida a los mantenimientos (Asaye, 2009), así como también que el 80% de los miles de millones de dólares invertidos en la operación y mantenimiento de las industrias van destinados a corregir fallas crónicas de los equipos y diseño (Dhillon, 2008). Por ello el ahorro en los costos productivos impacta directamente la vida útil de la unidad reduciendo las fallas por salidas y creando un entorno predictivo del comportamiento productivo gracias a un sistema de mantenimientos versátil que si bien pudiera incrementar su demanda de recursos, se justifica con que la producción será a la capacidad diseñada a los menores costos posibles de producción.

Cuando el proceso en la generación de energía eléctrica se decrementa, no esta produciendo a su capacidad nominal, no se sabe el costo perdido en cada subproceso y existe la confusión de que si económicamente es mejor continuar produciendo con ese decremento o dejar de producir para implementar alguna estrategia de mantenimiento. Entonces el mantenimiento es independiente de los costos productivos e índices energéticos, por consecuencia la mayoría de las veces se necesita de mantenimientos

correctivos hacia el proceso, lo que genera costos incluso más elevados por pérdida de producción, reparación del equipo, horas laborales, entre otros.

Por lo que el objetivo de este trabajo es aplicar índices energéticos y económicos como herramientas de decisión en apoyo a las existentes estrategias de mantenimientos para la industria geotérmica además de tener las bases de una nueva herramienta de diagnóstico del proceso productivo. En apoyo al objetivo se utilizará el balance energético enlazado con el modelo económico del sistema de producción y la estrategia de mantenimientos del sistema.

La demanda de energéticos hoy y mañana será cada vez mayor, la consecuencia de estas necesidades es que cada día se busquen nuevas opciones de fuentes de energía, se continúe invirtiendo en la extracción de recursos fósiles o se persigan nuevas estrategias para el mayor aprovechamiento de los recursos naturales. El presente estudio implementa una metodología de análisis en procesos geotérmicos que facilite su monitoreo, control y simule en tiempo real la eficiencia del proceso que se describe.

# 1 Antecedentes y revisión Bibliográfica

## 1.1 La industria energética

El continente Americano, se encuentra ubicado sobre un enorme recurso energético (Hiriart Le Bert, 2011). Actualmente la utilización de la geotérmica como fuente de energía produce alrededor de 8 mil MW y cada año la construcción de nuevas plantas geotérmicas incrementa la capacidad en un 8%. Y es que se esta lejos de aprovechar al máximo esta energía, por ejemplo, EU tiene la capacidad de 15 mil MW de los cuales solamente aprovecha 2.8 mil MW, México tiene una capacidad de 8 mil MW y solamente tiene aprovechados 0.750 mil MW. La energía eléctrica a base de geotermia aun tiene un potencial enorme siendo estos dos países junto con Guatemala los de mayor oportunidad de crecimiento en el continente para el aprovechamiento de esta fuente alterna de energía.

Las plantas geotérmicas tienen un bajo promedio de emisiones de azufre, emiten solamente 0.14 kilogramos de bióxido de carbono por MWh de energía generada. No hay productos derivados de la combustión. Otra de las grandes ventajas que tiene el uso de esta energía es que necesita de poco terreno para la generación. Aproximadamente va de 0.1 a 0.3 hectáreas por MW generado. Mientras que en las carboneras se necesita de 1 a 8 (ha) y de las hidroeléctricas se necesita de 2.4 hasta 1000 (ha) por MW.

El aprovechamiento de la energía geotérmica es prometedor ya que como se puede comprobar es sustentable, económico y con poco daño al medio ambiente. El siguiente grafico muestra el desempeño energético de México de acuerdo con datos del INEGI del 2008.

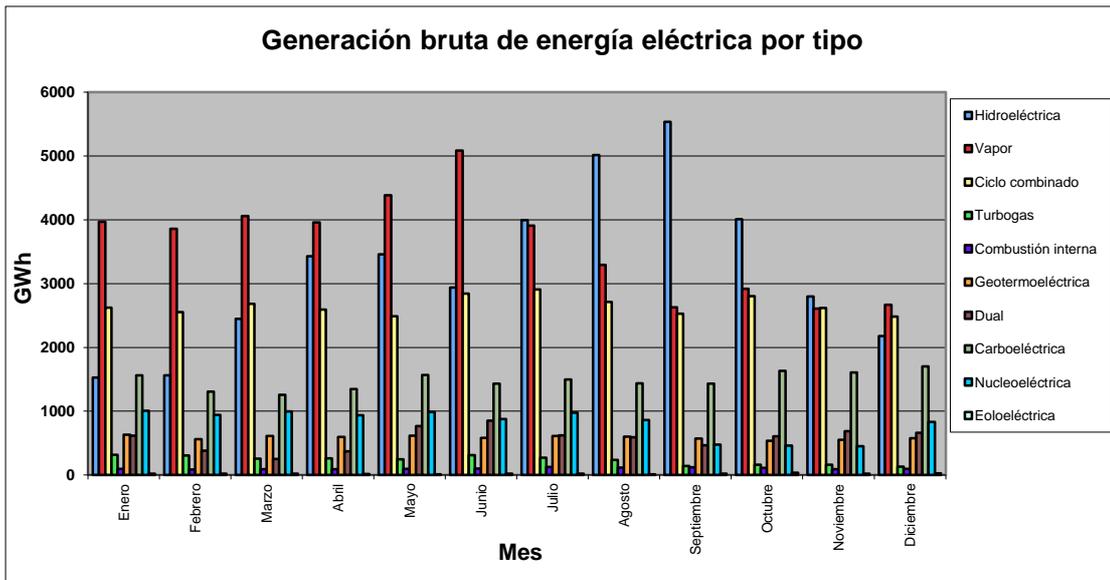


Figura 2.1 Elaboración propia con datos consultados del INEGI

Las fuentes de generación eléctrica que tienen mayor aportación son las hidroeléctricas, vapor y ciclos combinados. Tiene la energía geotérmica la aportación del 4.4163% para ese año. Para los años 2009 y 2010 la tendencia es similar.

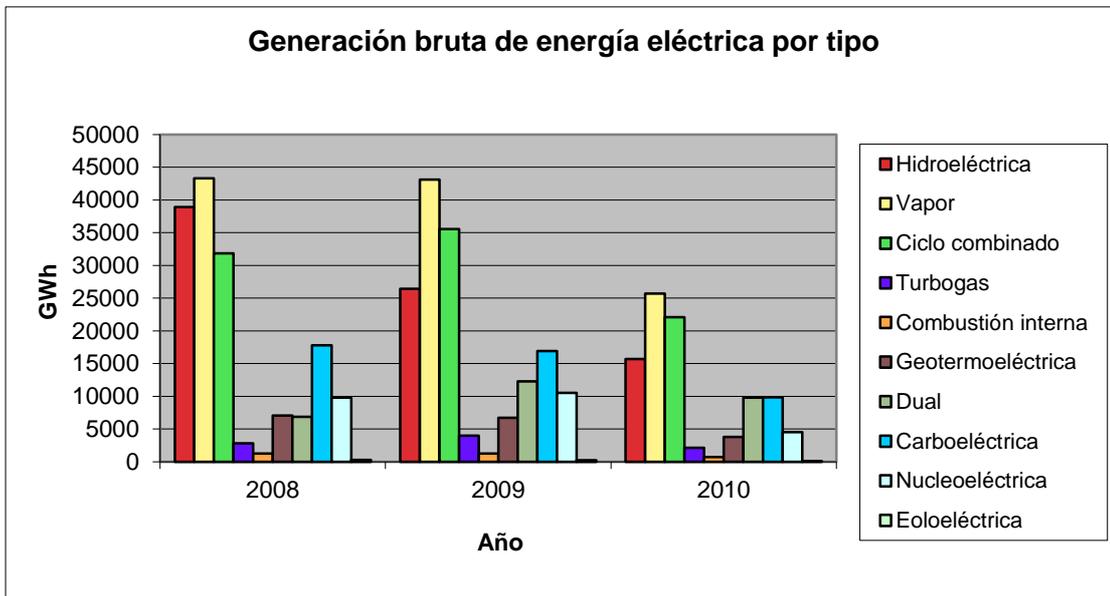


Figura 1.2 Elaboración propia con datos consultados del INEGI

Se vislumbra que de una u otra forma nuestras necesidades energéticas nos llevarán hacia sistemas energéticos alternos a los recursos fósiles. El camino está comenzado, es nuestra responsabilidad asumirlo con ahínco para que futuros modelos, plantas, unidades o sistemas renovables sean con

estándares de vanguardia y el costo para hacerlos eficientes sea lo más bajo posible. De otra forma el costo económico por tal actividad podría hacer que se incline mejor hacia nuevas explotaciones de recursos fósiles y continúe esta dependencia que como bien sabemos tiene fecha de caducidad.

Todas estas nuevas fuentes de energía tienen un reto muy importante ahora, emergen como realidades para el desarrollo económico y energético de cualquier país. Es de suma importancia que el camino hacia este desarrollo sea lo más fácil y vanguardista posible. La ventaja de tener equipos altamente eficientes y confiables no es un lujo, es una necesidad para cubrir la demanda energética.

### 1.1.1 El uso de la energía

Se prevé que el consumo de energía continúe creciendo en un rango de 2% anual para las siguientes dos décadas (Birol, Argiri 1999). El uso de recursos fósiles continuará creciendo, las condiciones serán cada vez más difíciles, sin embargo se continuará buscando la manera de obtener este recurso. Como se observa en la siguiente figura.

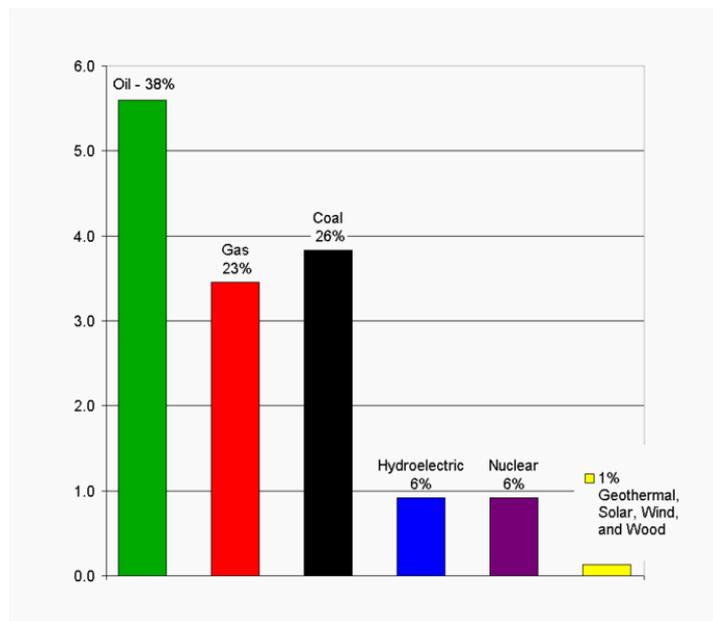


Figura 1.3 Uso de la energía a nivel mundial, 1970-2025 (WES, 2005)

El petróleo seguirá siendo la energía dominante para esta proyección. El uso del gas tendrá un crecimiento acelerado y cerca del 55% del carbón será utilizado para generar energía eléctrica. (EIA 2003). La participación de energías alternas es insuficiente si los objetivos de disminuir los gases de efecto invernadero siguen vigentes. Es primordial que los recursos energéticos con los que se cuentan sean aprovechados eficientemente.

## **1.2 Mantenimientos**

La vida útil de cualquier unidad productiva de energía eléctrica se basa en sus costos productivos y de mantenimiento. Existen diversas metodologías para el mantenimiento de unidades geotérmicas. Desde los 14 famosos principios de Henry Farol, conocido como el padre de las actividades de mantenimientos, hasta la gestión de novedosos escenarios propuestos por Derrick Anderson. El concepto de calidad/mantenimientos fue ampliamente desarrollado y probado en trabajos realizados por grandes personajes como Edwards Deming, Joseph Juran, Hill Crosby, Henry Taguchi e Ishikawa.

En todos los casos el objetivo de un sistema debe de ir enfocado a asegurar que las estrategias que se emplean sean aplicadas correctamente para conseguir la mejora o continuidad del proceso. Las estrategias de mantenimiento comúnmente abordados y aplicados en los sistemas productivos se basan en mantenimientos correctivos, preventivos, predictivos y proactivos. (Kahn, 2006). Estas metodologías tienen que ser las bases de cualquier programa de mantenimientos. La aplicación de cada metodología de mantenimiento debe ser adecuada y limitada conforme el proceso productivo lo requiera.

Existen cuatro tipos de estrategias de mantenimiento más importantes según (Kahn, 2006).

- Correctivo. Disparos de la unidad, salidas por falla

- Preventivo. Procedimientos periódicos de mantenimiento base en tiempo.
- Predictivo. Basado en las condiciones del equipo o ambiente
- Proactivo. Mitigar el mantenimiento, encontrar la causa que provoca que se necesite de mantenimientos.

Kahn también menciona que la mejor estrategia de mantenimiento es que el 10% sea correctivo, 30% preventivo, 50% predictivo y 10% proactivo (Kahn, 2006).

Mantenimiento correctivo (MC).

Como su nombre lo infiere se trata de cuando un equipo simplemente corre a la falla. Muchas veces este tipo de mantenimiento es más efectivo debido a que se coloca una nueva pieza para mejorar el 100% de la condición anterior. También como estrategia muchas veces se sobredimensiona el diseño para que cuando algo falle siga funcionando y simplemente se cambia la pieza defectuosa sin necesidad de parar la unidad.

De acuerdo con Douglas J. Plucknette; (2002) el equipo falla en condiciones como:

- La falla no puede ser predicha a través de las condiciones de monitoreo establecidas.
- No pudo ser prevenida con la utilización de mantenimiento preventivo (MP).
- No puedo ser eliminada a través del rediseño del proceso o unidad

Mantenimiento Preventivo (MP)

Es un método basado en tiempos e intervalos, las actividades de mantenimiento son planificadas y calendarizadas a fin de evitar fallas y averías. Son tareas de prevención programadas y destinadas para reducir la probabilidad de falla de cualquier equipo. (Jim, 1999).

Los objetivos finales del MP son:

1. Mejorar la confiabilidad del sistema
2. Reducir los costos de sustitución
3. Disminuir el tiempo de inactividad del proceso
4. Mejorar la gestión de intervalos de mantenimientos

Generalmente el MP incluye las siguientes tareas dentro de su gestión:

Ajustar. Parámetros y variables de control

Probar. Pruebas de conformidad de la unidad

Reconstruir. Dimensionar correctamente, reemplazar.

Inspeccionar. Utilizar checklist, usar alarmas, etc.

Calibrar. Verificación y corrección de variables

Reemplazar. Renovación de partes dañadas.

Mantenimiento predictivo (MPd)

Básicamente consiste en realizar mediciones en tiempo real así como tomar medidas correctivas cuando las mediciones indican que están por salir de los límites operativos. Para este tipo de mantenimientos es muy importante la tecnología. Ya que el proceso debe de estar en tiempo real y de la misma manera se puedan tomar decisiones sobre posibles fallas.

Mantenimiento Proactivo (MPa)

El mantenimiento proactivo se basa en los siguientes supuestos:

1. Se debe de mantener un circuito de retroalimentación a través del proceso para técnicos, ingenieros, arquitectos y diseñadores para que los errores del sistema no se repitan.
2. Visualización del mantenimiento y funciones en las actividades de apoyo como un ciclo de vida. Esta perspectiva puede enseñar a ahorrar en mantenimientos innecesarios.
3. Constantemente reevaluar los procedimientos establecidos de mantenimiento con el fin de asegurar que se estén aplicando correctamente.

Estas cuatro opciones para mantenimientos son las más utilizadas en la industria geotérmica y las que mejor podrían encontrar aplicación. La optimización en la unidad o mejora en costos de producción solamente dependerá de que tan bien se tomen las decisiones para relacionarlas con un análisis termodinámico y de cómo se programe o defina un índice de seguridad para cada uno de ellos.

En la industria geotérmica la definición y clasificación de mantenimientos no dista mucho de los conceptos anteriores. De acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad (CFE) dicha clasificación puede observarse en el Anexo 1 (Diagrama de mantenimientos).

# CAPITULO 2

## 2. Análisis energético y económico

El objetivo del presente trabajo es el de introducir índices energéticos y económicos como herramientas de apoyo en la decisión para la programación de estrategias de mantenimiento. Estos indicadores que se proponen son los exergéticos y exergoeconómicos. Para ello se requiere aplicar previamente un análisis energético que incluya un balance de materia y energía, de esta manera se delimitan los alcances del proceso y se conocen las variables que intervienen en el mismo, como por ejemplo los equipos y flujos.

Uno de los objetivos de la termodinámica es cuantificar la eficiencia y funcionamiento de los sistemas industriales en los que la energía juega un papel importante. A la hora de analizar procesos industriales se debe de plantear el interrogante de cómo discernir su eficiencia. Esto exige comparar el producto obtenido con el consumo o costo que ha sido necesario para obtenerlo. Para que esta comparación tenga significado inequívoco ambos conceptos deberán expresarse en unidades equivalentes, de igual valor termodinámico. La exergía de los sistemas y de los flujos de materia y energía ha sido definida por distintos autores como la propiedad que cuantifica la capacidad de la energía en términos del trabajo real aprovechable. Propiedad a través de la cual debe juzgarse la equivalencia termodinámica de los sistemas y de los flujos de materia y energía (Valero, 1994).

El concepto de exergía permite entonces una definición realista del rendimiento de un proceso que los tradicionales. Los análisis energéticos convencionales, basados en el primer principio de la termodinámica, constituyen en realidad una simple contabilidad energética. El análisis exergético, basado en el segundo principio de la termodinámica, tiene en

cuenta no sólo la cantidad de energía sino su calidad. Esto permite definir la eficiencia con todo rigor. La cantidad de la energía, disponibilidad o exergía, como se le denomina a esta propiedad termodinámica, permite por ende, evaluar un nuevo tipo de pérdidas energéticas no distinguidas hasta el momento por los tradicionales métodos de análisis aplicado al primer principio termodinámico. (Hutin y Sapag, 2000)

## **2.1 Descripción del proceso**

La teoría de grafos se encarga de estudiar las propiedades de las gráficas. Un grafo es un conjunto de objetos llamados nodos y una selección de vértices llamados aristas que pueden llevar o no orientación. El grafo está representado por una matriz de A aristas y N nodos donde el conjunto  $[A,N]$  contiene la información de la arista en cuestión. Esta herramienta matemática será utilizada en éste análisis para determinar en el proceso las interacciones que tiene cada nodo o en su defecto cada equipo con las diversas aristas o flujos del proceso productivo.

Este primer paso ayudará entonces a conocer mejor el sistema productivo y establecer las equivalencias termodinámicas. La ventaja que tiene esta herramienta en primera instancia es que muestra una visión global del sistema, sus funciones, las relaciones que tiene cada dispositivo así como el rol que juegan dentro del proceso. Esta parte también ayudará a entender mejor el desempeño del proceso y cada uno de sus elementos. Tiene además la versatilidad de abordar desde los procesos más complicados hasta los más sencillos.

La descripción de procesos geotérmicos por medio de la teoría de grafos considerará las tres fases más importantes: La fase de distribución del flujo térmico, producción/aprovechamiento y reintegración o recirculación del flujo térmico al ambiente o subprocesos. La descripción de todo proceso comienza con el análisis del mismo estableciendo el papel que juega cada dispositivo dentro del proceso productivo o disipativo. Al tener este control también se

sabe dónde se desarrollan las actividades más significativas energéticamente hablando, su aprovechamiento y pérdidas.

Este análisis preliminar coloca al proceso en una red matricial dónde cada nodo es un equipo y cada lazo el flujo de trabajo que genera un producto determinado, como se puede ver en el siguiente diagrama.

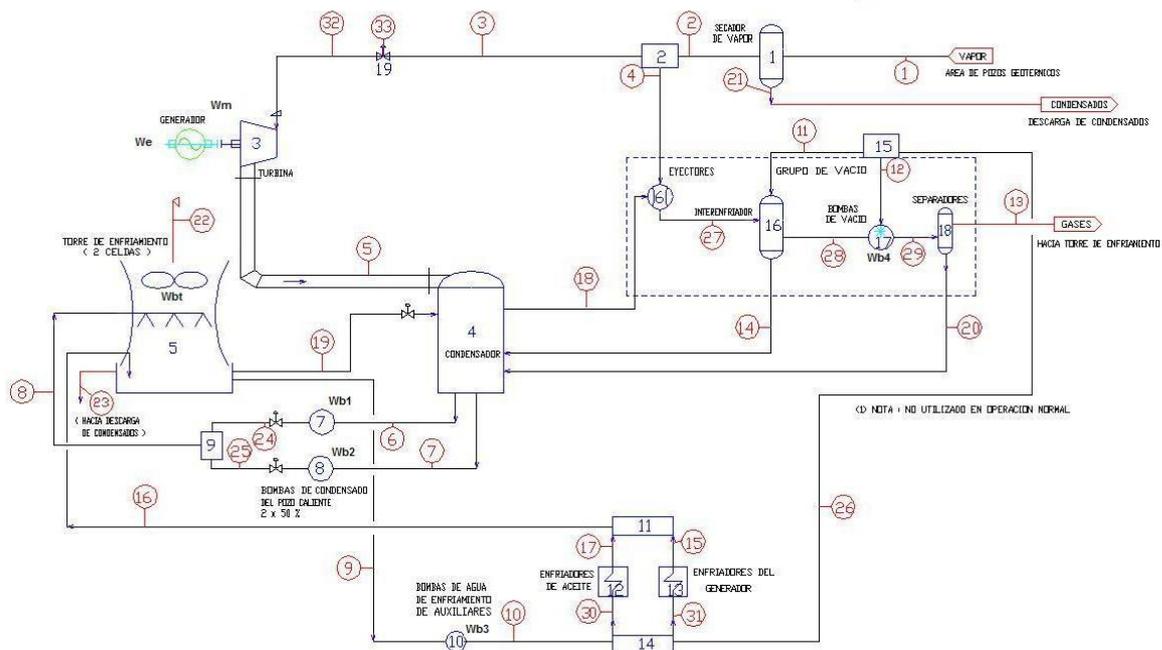


Figura 2.1.1 Diagrama del proceso (Unidad 13, Azufres II)

Se involucra la descripción del flujo térmico, específicamente se proponen aquellas propiedades termodinámicas del flujo que definen los estados termodinámicos para llevar a cabo los balances de materia y energía que se necesitan previos a aplicar el análisis exergético.

## 2.2 Termoeconomía

La termoeconomía trata con sistemas energéticos creados por el hombre, es decir máquinas. A las que el hombre deliberadamente les da un fin, les infunde un comportamiento propositivo bien establecido por su eficiencia. Este tipo de sistemas abiertos, producen un producto, P, consume

recursos, F y desecha residuos, R, los cuales están medidos en términos de exergía.

Cuando se considera el ambiente económico, la perspectiva se amplía al introducir dos factores adicionales en el análisis. Los recursos energéticos y de materias primas procesados tendrán una escala de costos o precios de mercado no ligada necesariamente a sus exergias respectivas. Por otro lado deberán contabilizarse también costos de mantenimiento y amortización de la instalación industrial que posibilita la existencia del proceso productivo.

La idea es que el costo económico del o los productos finales sea menor si el proceso productivo mejora sus características operativas. Teniendo en cuenta lo anterior expuesto, puede definirse el costo exergoeconómico de un flujo o producto a la suma de dos contribuciones: la primera procede del costo monetario de la exergía de entrada a la planta industrial necesaria para producir dicho flujo, que es por definición su costo exergético, y la segunda que engloba el resto de los costos originados en el proceso productivo asociado a su obtención (operación, mantenimientos, etc). (Valero, 1994)

Cabe destacar que el costo exergoeconómico de cada flujo debe de estar en función de la exergía de dichos flujos y de la teoría económica para tener un balance global de lo que encierra la termoeconomía.

### **2.2.1 Balance de materia**

El balance de materia tiene sus orígenes en 1745 cuando Lomonósov introdujo el concepto de la conservación de la masa después ampliado por Lavoisier en 1785, que básicamente dice que en un sistema cerrado, la masa total inicial es igual a la masa total final. Einstein introdujo un concepto más general enunciando el principio de que la materia no se conserva en algunos casos especiales como en fisiones nucleares, pero siempre existe conservación de la materia más la energía. Partiendo de este principio pero para el caso macroscópico utilizamos esta “ley” como herramienta para

controlar la variable gasto dentro de las propiedades de cada flujo. Esto ayudará a discernir el primer obstáculo que puede presentar cualquier proceso, atribuyéndole su ineficiencia por “fugas” no contempladas dentro del sistema y claramente demandantes de mantenimientos correctivos. El balance de materia es el primer paso en materia de análisis energético que se debe de dar para cumplir con el razonamiento sistémico de que todo lo que entra a un proceso debe de ser equivalente a lo que de el salga, energéticamente hablando.

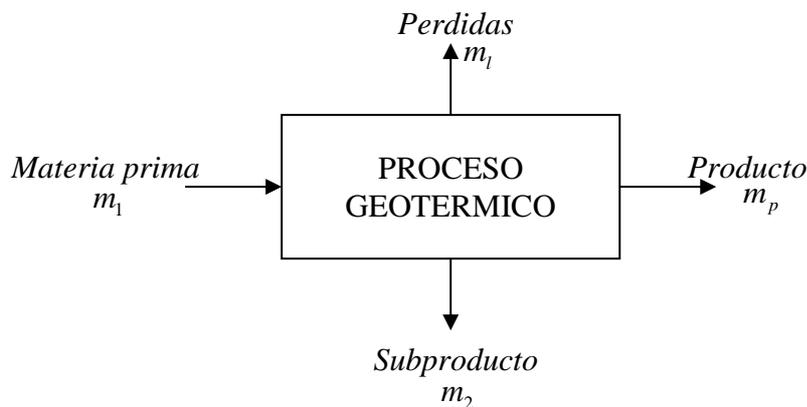


Figura 2.2 Balance de materia del proceso geotérmico

La condición a cumplir será que:  $m_1 = m_2 + m_p + m_l$  y así sucesivamente para cada elemento del proceso, asegurando como se menciona anteriormente, que la variable gasto o flujo másico sea contemplada como elemento importante dentro del análisis exergético-económico y en la toma de decisiones dentro del programa de mantenimientos.

Si se hace entonces el procedimiento para cada uno de los equipos se obtiene un sistema de ecuaciones que puede ser distribuido en una matriz debido a su dependencia y conexión con el proceso. La matriz A de incidencias representa el sistema de ecuaciones. Esta matriz al ser multiplicada por el vector de flujo másico se obtiene el balance de materia que en el caso ideal debe de ser cero:

$$A \cdot x \cdot F_{\text{másico}} = 0$$

## 2.2.2 Balance de energía

El balance de energía hace alusión a la primera ley de la termodinámica argumentando que la cantidad total de energía en cualquier sistema aislado permanece invariable con el tiempo, sin embargo la energía puede transformarse en otra forma de energía. Esta “ley” simplemente enuncia que la energía no se crea ni se destruye solamente cambiar de forma.

La fórmula que describe este razonamiento es la siguiente:  $\Delta U = Q - W$ , dónde  $Q$  representa la cantidad de energía térmica suministrada a algún proceso o sistema,  $W$  es el trabajo efectuado por el proceso y  $\Delta U$  es la diferencia del incremento de la energía interna del proceso. Sin embargo un proceso geotérmico no es un sistema cerrado así que haremos uso de la ecuación general de conservación de la energía para sistemas abierto la cual es como sigue:

$$\Delta E_{sistema} = Q + W + \sum_{entrada} m \left( h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right) - \sum_{salida} m \left( h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right)$$

Dónde:

$mh$  es la energía térmica del flujo (entalpía por la masa)

$\frac{mV^2}{2}$  es la energía cinética del flujo ( $V$  representa la velocidad)

$mgz$  es la energía potencial del flujo

$Q$  energía térmica suministrada o deficitaria del sistema

$W$  trabajo efectuado por el sistema o ingresado a el

$\Delta E_{sistema}$  es la energía interna del sistema

Pero para caso práctico, la energía potencial se tomará equivalente en el proceso geotérmico debido a que la diferencia en la altura ( $z$ ) de los flujos no representa impacto al sistema en general por lo que se puede prescindir de

su cálculo. Mismo caso es la energía cinética cuya velocidad de fluido térmico a la entrada y salida no representa diferencia significativa del proceso en general. Entonces solamente nos quedamos con la energía térmica del flujo. La ecuación mostrada representa el balance total de la energía del proceso.

$$\Delta E_{\text{sistema}} = Q + W + \sum m(h_{\text{entrada}} - h_{\text{salida}})$$

El balance de energía es un paso importante por dos razones esenciales. La primera es que en proceso que incluye varios subprocesos conectados, permite identificar de manera general la eficiencia de cada uno de ellos, ayudando a identificar la cantidad de energía aprovechada y “pérdida” en los equipos. La segunda es que al ser un sistema conectado de varios subprocesos, el balance de energía brinda la oportunidad de controlar los equipos de manera matricial, ya que el flujo térmico que pasa primero al equipo 1 y que de él sale un producto o recurso para el equipo 2, las ecuaciones del balance individual para cada equipo identifican estas conexiones y se sabe que están en función una de la otra, de esta manera se pueden organizar las ecuaciones de cada equipo del sistema en una matriz gracias a sus interacciones.

Además de ello el balance de energía ayuda a delimitar el sistema, clasificar las energías como internas o externas así como definir si estas energías son recursos o pérdidas en el proceso.

De igual manera que el balance de materia, para este análisis también se obtiene una matriz de incidencias A de energías del sistema, y al ser multiplicada por el vector de flujos energéticos (kW), se obtiene el balance que para el caso ideal debe de ser cero.

$$A \times F_{\text{energético}} = 0$$

El sistema de ecuaciones debe de incluir aquellos flujos con entalpia, calores cedidos, trabajo ingresado al sistema y trabajo producido.

### 2.2.3 Método exergético

La exergia se define como la propiedad de un sistema que cuantifica el máximo trabajo que puede obtenerse cuando interactúa únicamente con el ambiente, pasa de un estado termodinámico inicial al estado inicial o de referencia, (Reistad, 1970). El valor de la exergia de un sistema depende de cómo esté configurado el estado o ambiente de referencia (AR). Tanto el estado del sistema como su estado de equilibrio con el AR deben satisfacer la condición de equilibrio termodinámico para que la exergia sea función de estado, (Valero, 1994). Esta función de estado debe permitir formular la relación de equivalencia termodinámica entre los flujos de materia y energía del proceso.

Obtener la exergia de cada flujo es el siguiente paso para generalizar las diferentes calidades de energía en una sola. Como se menciona a inicio de este capítulo, el método exergético se basa en el segundo principio de la termodinámica. Este principio define que la dirección del proceso termodinámico imposibilita que ocurran en sentido contrario. Para el caso de la energía argumenta que esta no puede convertirse totalmente de un tipo a otro sin que sucedan pérdidas en el proceso o irreversibilidades. Este principio se apoya completamente en la existencia de la propiedad termodinámica llamada entropía. La entropía ( $S$ ) es una magnitud física que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para realizar trabajo. Se trata de una función de estado y su valor para sistemas aislados crece en el transcurso del proceso que se da de manera natural. Esto da a entender por ejemplo que la entropía del universo crece a medida que pasa el tiempo. Entonces la entropía generada describe lo irreversible de un sistema termodinámico en su transición o transformación.

En resumen, este segundo principio tiene las siguientes cualidades:

1. Valora no solo la cantidad de energía de un sistema sino la calidad, entendiendo por esto la capacidad para generar trabajo o transformarse en otra forma de energía.

2. Describe el sentido permisible de la evolución de un proceso y define a través de él los criterios de equilibrio y estabilidad de los sistemas.
3. Establece un criterio cuantitativo de la irreversibilidad de un proceso.

Este principio permite introducir el elemento entropía generada para definir la eficiencia de cualquier proceso térmico con todo el rigor. La cantidad de la energía disponible o exergía, como se le denomina a esta propiedad termodinámica, permite evaluar un nuevo tipo de pérdidas energéticas no distinguidas hasta el momento por los tradicionales métodos de análisis aplicado al primer principio termodinámico. (Hutin y Sapag, 2000)

Existen diferentes maneras de calcular la exergía de un recurso, como combustible líquido, sólido, gaseoso, etc. Para los procesos geotérmicos cerrados y ajenos a procesos químicos secundarios, el recurso es el vapor que si bien puede tener porcentajes de otros elementos como azufre, dióxido de azufre, etc. Generalmente no son lo suficientemente determinantes en el fluido como para hacer el cálculo para ese tipo de gas. En el caso geotérmico entonces bastará con calcular la exergía física de ese flujo de acuerdo con la fórmula para flujos térmicos:

$$b_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)$$

Donde:

$b_i$ : Exergía física del flujo  $i$

$h_i$  y  $h_0$ : Entalpía del flujo  $i$  y del AR

$T_0$ : Temperatura del AR

$s$  y  $s_0$ : Entropía del flujo y del AR

La fórmula anterior se utiliza para calcular la exergía de cada flujo en la parte del proceso que le va correspondiendo. Los datos termodinámicos de cada flujo y especialmente la entalpía y entropía, serán obtenidos a partir de su condición de presión, temperatura y calidad del vapor. Se utiliza el ciclo Rankin para un ciclo termodinámico, el cual relaciona el consumo de calor

con la producción de trabajo que opera con vapor para obtener las entalpías y entropías del flujo térmico.

Como ya tenemos un sistema de ecuaciones para el proceso completo, el energético, se puede utilizar y multiplicar ahora la matriz A por el vector de exergía de cada flujo. Como resultado se obtiene un vector de exergía destruida o mejor dicho no aprovechada para cada equipo.

$$A \cdot x \cdot B_{\text{exergía}} = D_{\text{destrucción}}$$

Este vector de exergía “destruida” es entonces el indicador de esa energía que puede ser aprovechada. Este resultado puede ser tomado como el primer indicador para efectos de mantenimientos preventivos o correctivos del sistema.

## 2.2.4 Matriz Recurso-Producto

Desde el punto de vista de Le Golf se puede afirmar que los equipos y los flujos de una instalación industrial son los productos funcionales que ésta utiliza, consume, produce y procesa. Así, al conjunto de objetos manufacturados que permite fabricar unos productos funcionales a partir de otros se le llama equipo, planta o instalación, etc.; y al procesamiento o método por el cual se consigue dicha transformación se le denomina proceso u operación industrial. La exergía como función de estado refleja la mínima cantidad de trabajo técnico necesaria para construir un producto funcional a partir del ambiente de referencia, donde este último representa formalmente a aquellos recursos del ambiente físico disponibles en cantidades limitadas y con un valor termodinámico nulo. La exergía es independiente del proceso utilizado para fabricar un producto y por otra parte representa el costo mínimo necesario, evaluado éste con referencia a dicha propiedad. Puesto que los procesos reales son irreversibles resultará siempre que la exergía necesaria

para obtener un producto funcional, costo exergético, sí será función del proceso utilizado y se cumplirá que, (Valero, 1994):

Costo exergético > exergia

Para la optimización exergética se sugiere hacer mínimo/máximo estos cocientes:

$$k = \frac{\text{Costo Exergético}}{\text{Exergia}} \qquad \eta_{\text{exergética}} = \frac{\text{Exergia}}{\text{Costo Exergético}}$$

Un sistema térmico tiene el propósito de obtener un producto (P) y su obtención será a través del consumo de recursos que se denominan con la letra R. Para realizar una verdadera definición de este propósito productivo se requiere establecer flujos que constituyen los productos de cada subsistema o equipo, los recursos así como las pérdidas (L), aquellos flujos que se transfieren al medio sin ser utilizados. Producto (P) se define como la exergia contenida en la utilidad deseada de un equipo analizado. El combustible, recurso o insumo se define como la exergia utilizada para conseguir una utilidad deseada, los residuos o pérdidas (L), son flujos que no tienen ninguna utilidad en el proceso.

Para obtener la definición insumo-producto es necesario examinar simultáneamente las transformaciones energéticas que tienen lugar en ellos. Esta definición debe de cumplir con las siguientes condiciones (Hutin y Sapag, 2000):

- Todos los flujos que entran o salen de una componente, deben estar presentes en la definición R-P una y solo una vez, como recurso, producto o pérdida.
- Cada flujo o combinación de flujos constituye el recurso, producto y pérdidas de cada componente debe tener un valor de su función exergia mayor o igual a cero.

$$\text{recurso} - \text{producto} > 0$$

$$\text{recurso} - \text{producto} = \text{irreversibilidad}(I)$$

Así como también la irreversibilidad del proceso productivo se definió como:

$$I = \text{destrucción} + \text{pérdidas}$$

En el caso de aquellos procesos que presenten un único producto identificable, como lo es la geotermia para producir energía eléctrica. El costo necesario, también denominado Combustible, es la exergía necesaria que se debe suministrar al proceso para conseguir materializar el producto deseado, estará constituido en la central geotérmica por la exergía de los flujos del combustible, en este caso el vapor.

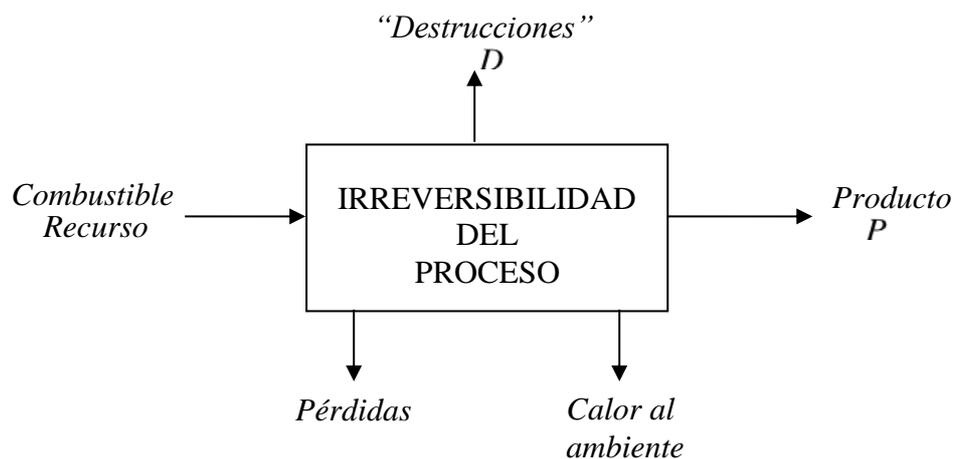


Figura 2.3 Balance de Recurso, Producto y Pérdidas

Siguiendo este diagrama, planteamos las ecuaciones de Recurso-Producto para cada equipo, aprovechando que todos los equipos se encuentran conectados.

$$\text{producto}(P) = \text{recurso}(R) - \text{pérdidas}(L) - \text{destrucción}(D)$$

El costo exergético es una función termodinámica, asociada a un flujo. Esta función completa la información obtenida del balance y rendimiento exergético. Este concepto es la base de la termoeconomía con las siguientes características.

- El costo exergético de un flujo depende de los límites del sistema. No es un valor absoluto.
- Cuando un flujo atraviesa los límites del sistema, ingresando al mismo, su costo exergético es igual a su exergía.
- El balance de exergía para un subsistema es conservativo.

$$B^* = \text{Costo Exergético} = B_{\text{exergía}} + I$$

$$\text{o bien: } [A] \cdot [B^*] = 0$$

Puesto que se tienen una matriz R-P con más incógnitas que ecuaciones, generalmente es así en todos los procesos industriales (flujos vs equipos), es necesario de ecuaciones o restricciones adicionales que completen el sistema.

Si tenemos en cuenta los valores del flujo de entrada y las proposiciones R-P-L, se arman las ecuaciones restantes para solucionar el sistema de ecuaciones de la siguiente manera:

$$[\alpha] \cdot [B^*] = [\omega]$$

Dónde:

$\alpha$  son las ecuaciones que complementan el sistema matricial (tener una matriz con el mismo número de ecuaciones e incógnita de lo contrario se tendrían múltiples soluciones del sistema)

$\omega$  es la solución para cada ecuación adicional propuesta

Combinando ambos sistemas se puede llegar al planteamiento matemático que permite resolver éste sistema:

$$\begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} \cdot [B^*] = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A \\ \omega \end{bmatrix} \cdot [B^*] = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix} \rightarrow [B^*] = \begin{bmatrix} A \\ \omega \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}$$

Valero propone los siguientes postulados para la asignación de costos exergéticos (completar la matriz recurso-producto) con las siguientes bases:

1. El costo exergético de un flujo  $B^*$ , Recurso ( $R^*$ ) o producto ( $P^*$ ), es la cantidad real de exergía que ha sido necesaria para producirlo.
2. Un análisis detallado de la naturaleza del proceso global y papel que juegan todos y cada uno de los subsistemas en la formación progresiva de los productos finales (Definición R-P-L) es lo único que se requiere para resolver la asignación de costos.
3. El costo exergético de los flujos de entrada a un equipo debe ser repercutido a los flujos útiles que abandonan el mismo.

Con estas bases se tienen las siguientes proposiciones:

**Proposición 1:** El costo exergético es una propiedad conservativa.

**Proposición 2:** Para las componentes múltiples del insumo total de un subsistema el costo exergético unitario de los flujos de salida debe ser igual al de los flujos de entrada.

**Proposición 3a:** Si un subsistema tiene un producto total formado por varias componentes entonces todas ellas tendrán el mismo costo exergético.

**Proposición 3b:** Si una componente del producto tiene varios flujos de salida se les asignará a todos ellos el mismo costo exergético unitario.

**Proposición 4:** En ausencia de valoración externa a los flujos de pérdidas debe asignárseles un costo exergético nulo ya que no tienen utilidad posterior.

**Proposición 5:** En ausencia de valoración externa, el costo exergético de los flujos de entrada al sistema es igual a su exergía.

### 2.2.4.1 Eficiencia exergética

Dentro de un proceso industrial, existen diferentes maneras de calcular la eficiencia del mismo, sin embargo la que tiene mejor aproximación es la eficiencia exergética. Una forma simple de interpretarla es que la exergía de entrada debe de ser igual a la salida más las irreversibilidades que se dieron

en el proceso de forma o no natural. Esto es que lo que entro al proceso tendría que ser igual a lo que salió más las pérdidas “naturales” que se llevaron en la transformación de cada flujo.

$$B_{entrada} = B_{salida} + I$$

Entonces la eficiencia exergética es la proporción de la exergía de salida entre el total de exergía de entrada.

$$\eta_{exergética} = \frac{B_{salida}}{B_{entrada}}$$

El rendimiento exergético vendrá dado por la fórmula:

$$\eta_{exergética} = \frac{\text{producto}(P)}{\text{recurso}(R)} = 1 - \frac{\text{pérdidas}(L) + \text{destrucción}(D)}{\text{recurso}(R)}$$

Cumpliendo la condición:  $0 < \eta_{exergética} < 1$

### 2.2.4.2 Costo Exergoeconómico

Para aquellas instalaciones en que la energía tiene un papel importante en el desempeño del proceso industrial los costos económicos de los flujos internos están relacionados con la eficiencia termoeconómica de la planta que da también lugar a los costos de amortización y mantenimientos.

El costo exergoeconómico de un flujo procede del costo monetario de la exergía de entrada, el insumo principal, que se necesita para producir dicho flujo que es por definición su costo exergético. También se le asocian costos de mantenimiento, operación, capital, etc.

De igual manera entonces que el método exergético, podemos plantear el balance para costos exergoeconómicos de los flujos internos del proceso de la siguiente manera:  $[A] \bullet [\Psi] = -Z$

Dónde

[A] Representa la matriz de incidencias (R-P)

[Ψ] Costo exergoeconómicos de los flujos

Z Son las contribuciones no energéticas al proceso (monetarias)

Y de la misma manera que el método exergético, se necesita resolver este sistema de ecuaciones. Se completa la matriz de incidencias con las proposiciones exergéticas de Valero y además se añade un vector  $\omega$  de valoración económica de los flujos de entrada al proceso.

$[\alpha] \cdot [\Psi] = \omega_z$ , y así:

$$\begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} \cdot [\Psi] = \begin{bmatrix} -Z \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

Y encontrar solución al sistema de ecuaciones.

$$[\Psi] = \begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

# CAPITULO 3

## 3. Índice exergético en geotermoeléctricas

### 3.1 Caso unidad 13 en los Azufres II

El método exergético será de gran ayuda para obtener un análisis detallado de cada equipo que interviene en el proceso de la generación de energía eléctrica además de que es la base del análisis económico, puesto que el índice de evaluación está en función de esta energía útil o exergía pudiéndose comparar ahora todos los flujos de la unidad tanto energética como económicamente. Ahora se introduce la variable mantenimiento en función de los dos aspectos anteriores. En materia de desaprovechamiento energético y en los costos productivos y de mantenimiento. Este nuevo análisis será un indicador completo en la planeación de mantenimientos así como en la toma de decisiones para estas actividades.

El siguiente caso que se presenta es el de una unidad en la central geotermoeléctrica de los Azufres Michoacán. Esta central se divide en dos sectores: Los Azufres I y II. El primero cuenta con una unidad de 50 MW General Electric, siete unidades de 5 MW de diferentes marcas (Mitsubishi, Toshiba, etc.), y dos unidades de ciclo combinado de 1.5 MW. Para un total instalado de 88 MW. El segundo es un moderno sector creado con la intención de duplicar la capacidad de generación de energía eléctrica existente. Cuenta con cuatro unidades Alstom de 25 MW productivos cada una (100 MW netos). Para un total instalado de 188 MW.

La unidad 13 sirvió como modelo para implementar esta metodología poco usada en la industria y hasta ahora no utilizada en la programación de mantenimientos. Esta U-13 es marca ALSTOM con capacidad de generar 26 MW netos. Su esquema en generación eléctrica es condensación de

“Flasheo Simple”. De la cual se describen sus características principales con la siguiente figura:

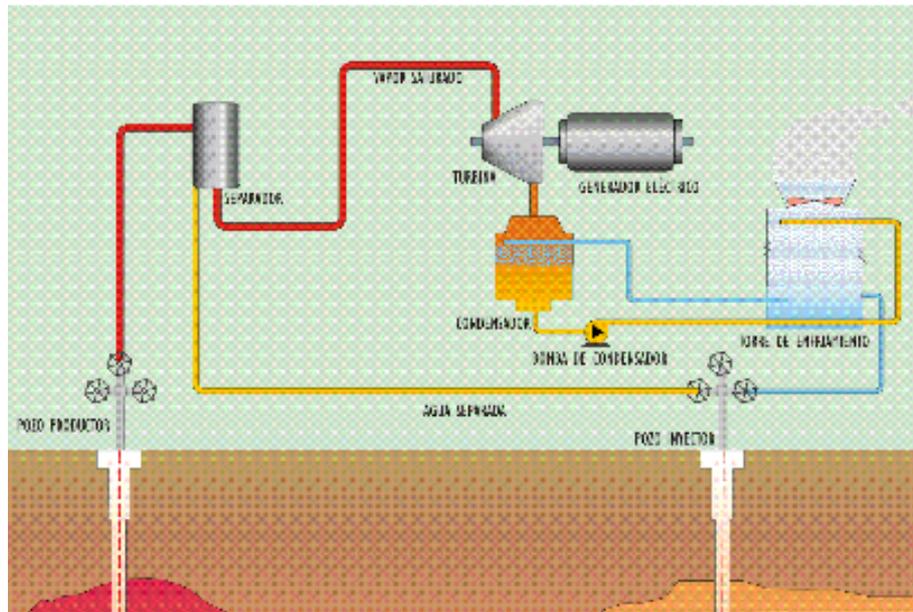


Figura 3.1 Proceso Productivo sistema de Flasheo

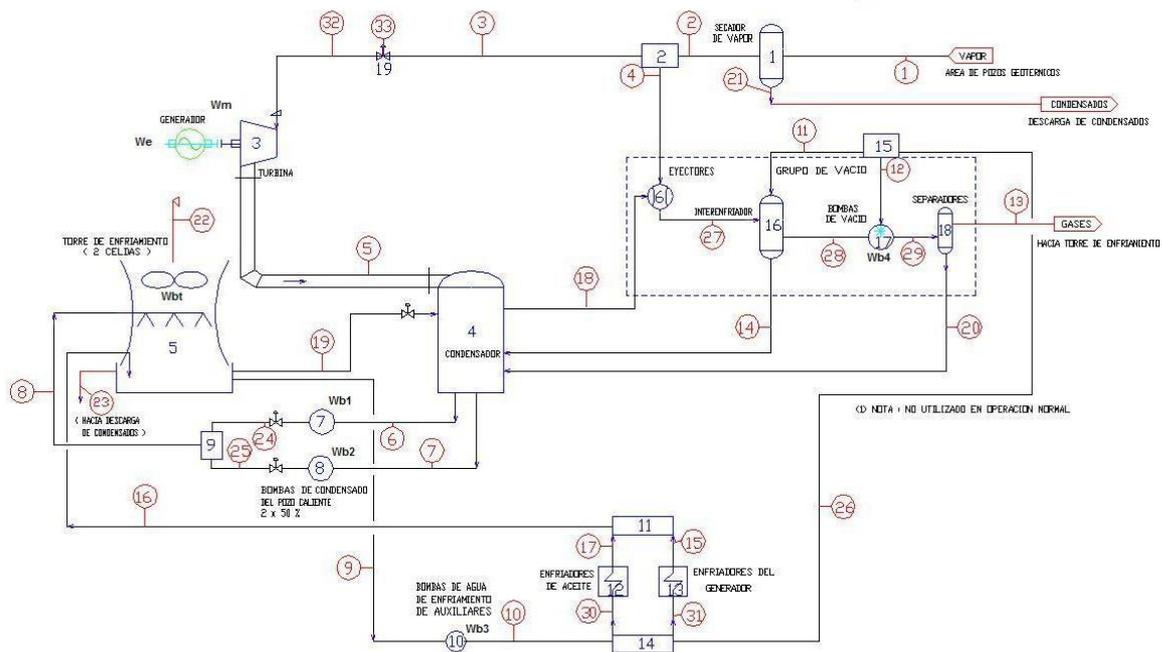
Las unidades de “Flasheo Simple” utilizan el ciclo de generación Rankin a condensación en donde el vapor en el principio del proceso ingresa a un secador, extrayéndole la humedad que tiene desde el pozo productivo. El vapor secado ingresa a la turbina para ser utilizado en la generación de energía eléctrica. Ya con menor energía se descarga a un condensador donde se le lleva su estado líquido, en este paso se le extraen también los gases incondensables que este tenga. El líquido ahora es enviado a la torre de enfriamiento para posteriormente “inyectar” nuevamente el agua al pozo de reinyección y con ello contribuir a que continúe el ciclo. La característica principal de este proceso es que el vapor se descarga a presiones inferiores que la atmosférica. La principal ventaja de este proceso es su alta eficiencia, la desventaja es que requiere de muchos equipos auxiliares complejos, el período de construcción es largo, los gases incondensables que se extraen del flujo primario se incrementarán con el tiempo y requieren de agua externa para la condensación del vapor. Este complejo es frecuentemente utilizado en equipos de potencias grandes como de 20 a 60 MW, incluso mayores a 100 MW.

### 3.1.1 Análisis Energético y Económico

La unidad 13 tiene la siguiente estructura productiva general:

Es importante conocer bien el proceso. Como se mencionaba esta unidad es de “flasheo simple” y el sistema emplea seis etapas principales en la generación de energía y de las cuales se puede hacer incluso una evaluación independiente. En primera instancia para el análisis, se enumeran los flujos en el proceso antes de entrar y salir a cada equipo tendremos un flujo diferente. De la misma manera se numeran los equipos involucrados, todo esto con la intención de abreviar posteriormente las ecuaciones o los balances que se vayan implementando.

El proceso tiene en total 40 flujos, incluyendo los 33 de vapor, trabajo mecánico, eléctrico generado y cinco flujos extras que ingresan al sistema por medio de las bombas mecánicas. Incluye también de manera 10 flujos por calor perdido que son contabilizados en el sistema para los diversos equipos pero se asignan como uno solo como pérdidas en tuberías. El proceso cuenta como 20 equipos y tubería (Secador de vapor, Divisores de vapor, Turbina, Condensador, Torre de enfriamiento, Eyector, Bombas, Intercambiadores, Interenfriador, Separador, Válvula y Generador). El diagrama simplificado, con flujos primarios y secundarios del proceso se muestra abajo. Cada flujo está identificado con un número consecutivo, de la misma manera con los equipos.



**Figura 3.2 Proceso Productivo (Unidad 13, Azufres II)**

En apoyo con la CFE (Departamento de Instrumentación y Control) en los azufres. Se obtienen las propiedades principales de cada flujo que se utilizarán posteriormente para implementar en primera instancia los balances de materia y energía (Anexo; Propiedades termodinámicas). Las propiedades son únicamente del flujo primario (vapor) para sus diferentes estados termodinámicos así como la cantidad o flujo másico.

De la figura esencialmente encontramos las siguientes etapas primarias:

1. Distribución y secado del vapor
2. Turbina-Generador
3. Condensador
4. Extracción de Gases incondensables
5. Torre y auxiliares de enfriamiento
6. Reinyección

## Balance de materia

Este primer análisis nos dará la seguridad de estar evaluando únicamente los flujos descritos con el principio de que la cantidad de materia o insumo que entra a un proceso debe de ser la misma o en suma de sus salidas. Se utilizará el flujo másico para efectuar el balance (kg/hr), como ya se tienen las características de cada flujo de vapor, se toma cada equipo como nodo. El flujo o flujos a la entrada deben de ser los mismos en cantidad a las salidas que éste tenga, la resta de estos entonces debe de ser igual a cero en el mejor de los casos.

- Para el Secador de Vapor tendríamos que entra el flujo 1, sale el 2 y el 21

$$m_1 = m_2 + m_{21}$$

- Divisor de vapor 1:  $m_2 = m_3 + m_4$
- Turbina:  $m_{32} = m_5$
- Condensador:  $m_5 + m_{14} + m_{19} + m_{20} = m_6 + m_2 + m_{18}$
- Torre de enfriamiento:  $m_8 + m_{16} = m_9 + m_{19} + m_{22} + m_{23}$
- Eyector:  $m_4 + m_{18} = m_{27}$
- Bomba 1  $m_6 = m_2$
- Bomba 2:  $m_7 = m_{25}$
- Divisor de vapor 2:  $m_{24} + m_{25} = m_8$
- Bomba 3:  $m_9 = m_{10}$
- Divisor de vapor 3:  $m_{15} + m_{17} = m_{16}$
- Enfriador de aceite:  $m_{30} = m_{17}$
- Enfriador del generador:  $m_{31} = m_{15}$
- Divisor de vapor 4:  $m_{10} = m_{30} + m_{31}$
- Divisor de vapor 5:  $m_{26} = m_{11} + m_{12}$
- Interenfriador:  $m_{11} + m_{27} = m_{14} + m_{28}$
- Bombas de vacío:  $m_{12} + m_{28} = m_{29}$
- Separador:  $m_{29} = m_{13} + m_{20}$
- Válvula:  $m_3 = m_{32} + m_{33}$
- Tubería:  $m_1 = m_{13} + m_{21} + m_{23} + m_{33}$



El balance de energía tiene un razonamiento similar al de materia, basado en el primer principio de la termodinámica. La energía que obtendremos de cada flujo será mediante la propiedad termodinámica entalpía que al ser multiplicada por su flujo másico, se obtiene la energía de ese flujo:

$$mh = \left[ \frac{kg}{s} \cdot \frac{kJ}{kg} \right] = \left[ \frac{kJ}{s} \right] = \frac{kWs}{s} = kW$$

Este procedimiento se hace con cada flujo de vapor tomando como referencia sus propiedades de acuerdo al Anexo (Propiedades termodinámicas). Para este análisis también se incluirán aquellas energías disipadas en forma de calor por la interacción del flujo con cada equipo. Estos flujos de energía no utilizados se tomarán en cuenta como pérdidas por fricción o aislamiento deficiente. En ambos casos serán asignados en el equipo de Tuberías. Así el balance de energía para el equipo 1 debela tener la siguiente forma:

- Secador de vapor  $[mh]_1 = [mh]_2 + [mh]_{21} + Q_1$
- Divisor de vapor 1  $[mh]_2 = [mh]_3 + [mh]_4 + Q_2$
- Turbina  $[mh]_{32} = [mh]_5 + Wm$
- Condensador  
 $[mh]_5 + [mh]_{14} + [mh]_{19} + [mh]_{20} = [mh]_6 + [mh]_7 + [mh]_{18} + Q_4$
- Torre enfriamiento  
 $[mh]_8 + [mh]_{16} + [mh]_9 + [mh]_{19} = [mh]_{22} + [mh]_{23} + Wbt + Q_5$
- Eyectores  $[mh]_4 = [mh]_{18} + [mh]_{27} + Q_6$
- Bomba 1  $[mh]_6 + Wb_1 = [mh]_{24} + Q_7$
- Bomba 2  $[mh]_7 + Wb_2 = [mh]_{25} + Q_8$
- Divisor de vapor 2  $[mh]_{24} + [mh]_{25} = [mh]_8 + Q_9$
- Bomba 3  $[mh]_9 + Wb_3 = [mh]_{10} + Q_{10}$
- Divisor de vapor 3  $[mh]_{15} + [mh]_{17} = [mh]_{16} + Q_{11}$
- Enfriador del aceite  $[mh]_{30} = [mh]_{17} - Q_{12}$
- Enfriador del generador  $[mh]_{31} = [mh]_{15} - Q_{13}$
- Divisor de vapor 4  $[mh]_{10} = [mh]_{26} + [mh]_{30} + Q_{14}$
- Divisor de vapor 5  $[mh]_{26} = [mh]_{11} + [mh]_{12} + Q_{15}$



Para este caso, se utiliza el Anexo de propiedades termodinámicas de los flujos para obtener el vector energético que se obtuvo de multiplicar el flujo másico de cada flujo por su entalpía. Si el vector resultado es aproximado a cero en cada uno de los equipos, se asegura que la energía que se utiliza en el proceso como recurso es la misma como producto. Este balance da un primer panorama de aquellos equipos que disipan calor.

Las Q's de "pérdidas" son los faltantes de energía o energía disipada en cada dispositivo. El análisis concuerda con que las mayores pérdidas en estos sistemas geotérmicos ocurren en la torre de enfriamiento y el condensador. Como se puede ver en la siguiente tabla:

		<b>Energía</b>	<b>Energía</b>
		[kJ/hr]	[kJ/s] ó [kW]
<b>Secador de vapor</b>	<b>Q1</b>	132940.1	36.9278056
<b>Divisor 1</b>	<b>Q2</b>	755040	209.733333
<b>Condensador</b>	<b>Q4</b>	556915.3	154.698694
<b>Torre enfriamiento</b>	<b>Q5</b>	61787803.1	17163.2786
<b>Eyectores</b>	<b>Q6</b>	722604	200.723333
<b>Bomba A</b>	<b>Q7</b>	2.10712E-08	5.8531E-12
<b>Bomba B</b>	<b>Q8</b>	2.10712E-08	5.8531E-12
<b>Divisor 2</b>	<b>Q9</b>	0	0
<b>Bomba 3</b>	<b>Q10</b>	8.42556E-09	2.3404E-12
<b>Divisor 3</b>	<b>Q11</b>	71828.1	19.95225
<b>Enfriadores</b>	<b>Q12</b>	-466137.6	-129.48267
<b>Enfriadores</b>	<b>Q13</b>	-2252223	-625.6175
<b>Divisor 4</b>	<b>Q14</b>	19743.4	5.48427778
<b>Divisor 5</b>	<b>Q15</b>	44906.4	12.474
<b>Interenfriador</b>	<b>Q16</b>	733824.6	203.840167
<b>Bomba vacio</b>	<b>Q17</b>	1221091.5	339.192083
<b>Separador</b>	<b>Q18</b>	40599	11.2775
<b>Valvula</b>	<b>Q19</b>	1.03726E-07	2.8813E-11
<b>Tubería</b>	<b>Q20</b>	2005179.12	556.9942
	<b>QT</b>	<b>65374114.02</b>	<b>18159.4761</b>

**Tabla 3.7 Calor (Q's ) disipado en cada equipo**

En el caso del signo negativo de los enfriadores de auxiliares del proceso (intercambiadores), se debe a que el flujo de agua ya condensado y enfriado por la torre pasa por un complejo para enfriar el aceite de la turbina y el generador por transferencia de calor. Por ello se debe la "ganancia" de energía de estos flujos aunque se sabe que físicamente no existe tal

definición pero esa es la interpretación de su signo negativo. En el balance se tomarán como que aportan trabajo al proceso.

## **Análisis Exergético**

Los análisis anteriores de materia y energía son la antesala para realizar el análisis de exergia, cuyo fin último es conocer que equipos están perdiendo o destruyendo energía y en que cantidad, que de hecho no es la energía que se pierde ni se destruye sino la energía útil que no se utiliza. Pero antes de ello se recuerda que es la exergia.

“La exergia de un sistema termodinámico es la mínima cantidad de trabajo técnico necesario para constituirlo a partir del ambiente de referencia ( AR )” (Valero, 1994). O también como lo define Resitad, “La exergia se define como la propiedad de un sistema que cuantifica el máximo trabajo que puede obtenerse cuando interactuamos únicamente con el ambiente, pasa por su estado termodinámico inicial al estado muerto”. Esta metodología mide entonces la cantidad de energía útil que se puede extraer de un flujo, tomando en cuenta que durante el proceso hay energía que irremediamente no puede ser utilizada para hacer trabajo. Es energía de intercambio, cuando un flujo con cierta cantidad de energía pasa de un estado inicial a uno final termodinámicamente el cambio de fase requirió de energía cedida para que pudiese ser posible. Esta energía cedida es debido a una transferencia de entropía. Además el método define que no puede obtenerse más energía que la que el estado de referencia, (estado ambiente) dónde se lleva a cabo el proceso. Le exergia es la energía real que lleva el proceso restándole las irreversibilidades del mismo.

La fórmula abajo es la que se utiliza para obtener la exergia de flujos térmicos, en este caso agua. Le exergia de un flujo  $i$  dependerá de la diferencia de su entalpía y del ambiente, así como de la diferencia de

entropías multiplicada por la temperatura del ambiente de referencia. No se puede obtener más energía que la que el ambiente ofrece.

$$b_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)$$

Dónde:

$b_i$ : Exergía física del flujo  $i$

$h_i$  y  $h_0$ : Entalpía del flujo  $i$  y del AR

$T_0$ : Temperatura del AR

$s$  y  $s_0$ : Entropía del flujo y del AR

Flujo	Vector de exergias
1	139.17
2	138.12
3	133.75
4	4.13
5	105.34
6	68.60
7	68.60
8	137.51
9	2.15
10	2.17
11	1.28
12	0.21
13	3.88
14	5.68
15	1.15
16	1.36
17	0.22
18	4.53
19	30.57
20	0.59
21	1.01
22	90.12
23	0.31
24	68.76
25	68.76
26	1.50
27	8.43
28	3.82
29	4.49
30	0.10
31	0.57
32	133.51
33	0.24
Wm	27.85
We	24.75
Wb1	0.15
Wb2	0.15
Wb3	0.02
Wb4	0.84
Wbt	0.24

En el caso de los flujos externos como la energía utilizada por las bombas para operar o el calor disipado en los equipos, tendremos las siguientes consideraciones. Para las bombas, turbina y generador, su exergía es la energía que utilizan para operar, esto debido a que tomamos en cuenta que este flujo llega o sale del ambiente como un producto "terminado". Para el caso de todas aquellas energías disipadas, las Q's, tienen energía pero exergía cero ya que no es posible obtener energía de un flujo que no participa ya en el sistema. No así el caso de la Q12 y Q13 las cuales entran al sistema como un intercambio de calor entre el ambiente y el equipo, de alguna manera es trabajo que no le costó al proceso y lo utiliza en el mismo.

Para hacer el cálculo de todos los flujos exergéticos, específicamente los de vapor, se aplica la fórmula anterior descrita con ayuda de los datos del Anexo de propiedades termodinámicas. Es importante que se recuerde que estos datos fueron obtenidos gracias a las propiedades

Tabla 3.8 Vector de exergía

termodinámicas como temperatura, presión y calidad de vapor de los flujos para así encontrar la entalpía y entropía de los mismos.

Por ejemplo para el flujo 1:

La exergía calculada sería de la siguiente manera:

$$b_1 = \left[ \frac{kJ}{kg} \right] - [^{\circ}K] \cdot \left[ \frac{kJ}{kg \ ^{\circ}K} \right] = \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

$$b_1 = (2712.5 - 80.741) - (19.22) \cdot (6.4916 - 0.2854) = 2512.4758 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

La exergía multiplicada por el flujo másico dará la energía real del flujo:

$$B_1 = \left( 2512.4758 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \right) \cdot \left( 55.3916667 \left[ \frac{kg}{s} \right] \right) = 139170.2241 \left[ \frac{kJ}{s} \right]$$

$$B_1 = 139170.2241 [kW] \cdot \frac{1 [MW]}{1000 [kW]} = 139.17022 [MW]$$

Este mismo proceso se realiza con cada uno de los 33 flujos de vapor y se obtiene un vector de Exergía real de cada flujo. Como se puede constatar en el Anexo; Tabla de exergía y exergía real. Ahora se tiene un nuevo vector de energía del proceso conformado por la exergía de cada flujo y la de los trabajos adicionales de los equipos ( $W$ 's). Se tiene también la matriz de incidencias o las ecuaciones del balance de energía. El siguiente paso será multiplicar esta matriz (sin contar con los flujos que no aportan nada al proceso) por el vector nuevo de exergía y de esta manera obtener la exergía útil desaprovechada por equipos. Se multiplica el vector de exergía de la figura por la matriz de incidencias del Anexo (matriz de balance de energía) y obtener la energía no aprovechada por equipo:

$$A \times B_{exergía} = D_{destrucción}$$

Como se ve en la ecuación el vector resultado D hace referencia a esta energía que se "destruye" en cada nodo o en cada equipo del proceso como se puede ver en la tabla:

<b>Exergia Destruida [MW]</b>	<b>Equipos</b>
0.03979453796	<b>Secador de vapor</b>
0.24322226133	<b>Divisor 1</b>
0.32678780975	<b>Turbina</b>
0.45803609143	<b>Condensador</b>
15.96077341806	<b>Torre enfriamiento</b>
0.22626856593	<b>Eyectores</b>
0.08921363456	<b>Bomba 1</b>
0.08622363456	<b>Bomba 2</b>
0.00000000000	<b>Divisor 2</b>
0.00000000000	<b>Bomba 3</b>
0.01883572283	<b>Divisor 3</b>
-0.25072080756	<b>Intercambiador</b>
-1.21137733280	<b>Intercambiador</b>
0.00548427778	<b>Divisor 4</b>
0.01260040887	<b>Divisor 5</b>
0.20844417352	<b>Interenfriador</b>
0.37993186311	<b>Bomba vacio</b>
0.01285353466	<b>Separador</b>
0.00000000000	<b>Valvula</b>
18.11657212732	<b>Tuberia</b>
3.10311000000	<b>Generador</b>

**Tabla 3.9 Exergia destruida por equipos**

Este primer resultado es muy importante porque desde este punto de partida se puede comenzar a vislumbrar cuando un equipo comienza a perder su eficiencia. En este caso llama la atención lo que se pierde en el generador. La unidad tiene la capacidad de generar 26.6 MW hora netos. Mientras que en su estado actual está generando 24.76 MW. La energía que no se obtiene del mismo es de aproximadamente 2.7 MW haciendo notar que este elemento no está entregando su capacidad. Hasta ahora este resultado es mejor que el ofrecido por un balance de energía común. También es importante destacar la gran cantidad de energía que se pierde en tuberías, si se mejoran sus condiciones muy seguramente la eficiencia de toda la unidad se incrementará. En el caso de los intercambiadores, el signo negativo representa el trabajo que realizan enfriando flujos dentro del mismo proceso. Este método es también la base del siguiente análisis: el económico. Gracias a que el proceso ahora se encuentra generalizado en un mismo indicador energético y en función de este deberá ir enfocado el modelo económico.

La metodología de mantenimiento ahora existente debe de tomar como un primer indicador este resultado anterior si se busca un concepto general de la funcionalidad del proceso.

## Costo exergético y económico

Para que el modelo económico funcione, Recurso-Producto, debe de estar éste en función de una unidad que sea general en el sistema, en este caso en su exergía. Este análisis tiene la ventaja de saber cuanto cuesta el producto en función de lo que se le ha suministrado de recurso. Para ello se necesita de un nuevo sistema de ecuaciones viendo cada flujo como recurso, producto o pérdida a la entra o salida de cada equipo del proceso y así con cada flujo del proceso.

$$B_1^* = \text{Costo Exergético} = B_{\text{exergía}} + \sum Irr$$

Por ejemplo, la figura que se muestra es el esquema del que se obtiene la ecuación Recurso-Producto:

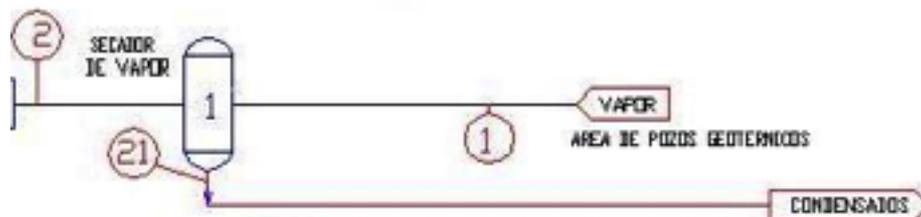


Figura 3.10 Representación del balance Recurso-Producto-Pérdida

El flujo 1 entra al secador de vapor como un recurso de este, de ahí se obtienen dos flujos el 2 y el 21 y ambos salen como producto porque antes y después de entrar al equipo cambian sus características termodinámicas.

Entonces la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$R_{\text{flujo1}} = P_{\text{flujo2}} + D_{\text{flujo21}}$$



Entonces para completar el sistema de ecuaciones se hace uso de las proposiciones de Valero. Todas las proposiciones deberán ir en función del costo exergía.

De esta manera se obtiene una matriz de incidencias completa (40x40), como la que se muestra en la tabla de los Anexos. Que al ser multiplicada por el vector costo exergético dará como resultado un vector indicador de la energía que cuesta para tener en funcionamiento cada flujo. Y haciendo el mismo procedimiento pero ahora multiplicando por un vector económico, en este caso el costo del recurso principal se obtiene el costo económico de cada flujo. Se utiliza la misma matriz de incidencias con las ecuaciones complementarias obtenidas y ahora se multiplica por el precio del vapor a la entrada y como resultado se obtiene un vector que indica el costo de cada flujo en cada parte del proceso. De esta manera se puede distinguir el costo que presenta cada subproceso.

$[\alpha] \cdot [\Psi] = \omega_z$ , y así:

$$\begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} \cdot [\Psi] = \begin{bmatrix} -Z \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

Y encontrar solución al sistema de ecuaciones.

$$[\Psi] = \begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

### Costo exergetico

Flujo	Vector de exergias	Costos exergeticos	Costo exergetico unitario
1	139.17	139.170224	1
2	138.12	139.170224	1.007589603
3	133.75	135.0008681	1.009367022
4	4.13	4.169355885	1.009367022
5	105.34	106.5103773	1.011143792
6	68.60	5888.944024	85.84399338
7	68.60	5888.944024	85.84399338
8	137.51	11778.19719	85.65148916
9	2.15	783.7350724	363.8669395
10	2.17	783.7540957	360.6901497
11	1.28	466.3233659	364.6704462
12	0.21	75.31833947	364.6704462
13	3.88	0	0
14	5.68	513.8434502	90.41652221
15	1.15	205.6293875	178.1234307
16	1.36	242.1123903	178.3233389
17	0.22	36.48300288	164.2412155
18	4.53	388.5679396	85.84399338
19	30.57	11124.72286	363.8669395
20	0.59	421.3793006	711.3666494
21	1.01	0	0
22	90.12	0	0
23	0.31	112.0946498	363.8669395
24	68.76	5889.098596	85.65148916
25	68.76	5889.098596	85.65148916
26	1.50	541.6417054	361.6028027
27	8.43	392.7372955	46.58342188
28	3.82	345.2172111	90.41652221
29	4.49	421.3793006	93.8811636
30	0.10	36.48300288	361.6028027
31	0.57	205.6293875	361.6028027
32	133.51	135.0008681	1.011143792
33	0.24	0	0
<b>Wm</b>	27.85	28.49049085	1.023008529
<b>We</b>	24.75	28.49049085	1.1512891
<b>Wb1</b>	0.15	0.154571667	1
<b>Wb2</b>	0.15	0.154571667	1
<b>Wb3</b>	0.02	0.019023333	1
<b>Wb4</b>	0.84	0.84375	1
<b>Wbt</b>	0.24	0.243	1

Tabla 3.12 Costo exergetico de la U13-AzII

Con los flujos de entrada y salida del sistema, se puede llegar a discernir la eficiencia del proceso.

$$n_{exergía} = \frac{B_{salida}}{B_{entrada}}$$

Un indicador del sistema es la eficiencia de todo el proceso y si este se ve de manera grupal, aglomerando los equipos como uno solo y tomando las entradas y salidas de él. Los flujos con exergía útil de salida son el 21, 23 y  $W_m$  mientras que los de entrada son el 1,  $W_{b1}$ ,  $W_{b2}$ ,  $W_{b3}$ ,  $W_{b4}$  y  $W_{bt}$ . Cuyos datos pueden ser consultados en la Tabla 3.12. El resultado es una eficiencia exergética del 18.53%.

Del costo exergético se puede comprobar que el flujo 8 es el que tiene mayor costo exergético dentro del proceso, sin embargo es un resultado esperado ya que la función del condensador es bajar la capacidad exergética del flujo utilizado en la turbina. Siguiendo el sistema de enfriamiento de auxiliares y los flujos respectivos al sistema de vacío. En este aspecto se destaca el costo exergético del flujo 14 que es el agua condensada del interenfriador hacia el condensador. Si la carga térmica en el interenfriador disminuye la eficiencia del proceso mejora pues ya no se introduce más carga térmica hacia el condensador.

Ahora para obtener el costo exergoeconómico, se realiza el mismo procedimiento de obtención del costo exergético y para obtener el vector de costos económicos se colocan las entradas de los flujos del proceso que tienen un precio económico, en este caso el vapor geotérmico. El flujo 1 es la entrada vendido a CFE en toneladas por hora, cuyo precio es de 14.2 Pesos/Tonelada de acuerdo con datos del Área de Suministro de Vapor en CFE. Realizando la respectiva conversión para obtener el costo/segundo multiplicado por el factor de planta de la unidad durante un año de resultados, esto es el cociente de la energía neta entregada y la energía que puede ser entregada a plena carga. Se muestra a continuación la conversión.

Sea:

$P_v$ , el precio del vapor en pesos/segundo

$M_v$ , es el flujo de vapor hacia la turbina

$FP = 0.92$ , es el factor de planta anual

$$P_v = 14.2 \left[ \frac{\text{pesos}}{\text{Ton}} \right] \cdot FP \cdot M_v = 14.2 \left[ \frac{\text{pesos}}{\text{Ton}} \right] \cdot (0.92) \cdot 194.85 \left[ \frac{\text{Ton}}{\text{Hrs}} \right] \cdot \left( \frac{1}{3600} \left[ \frac{\text{Hrs}}{\text{seg}} \right] \right)$$

$$P_v = 0.7071 \left[ \frac{\text{pesos}}{\text{seg}} \right]$$

El vapor cuesta 0.7071 pesos/ segundo. Este dato se coloca sobre el vector de costos y se multiplica por el sistema de ecuaciones (la matriz inversa del anexo), se obtiene el costo de cada flujo en función del costo del vapor como se muestra en tabla 3.13

	costo de los flujos	
	\$/s	\$/año
1	0.707102611	18974674.30
2	0.707102611	18974674.30
3	0.685918752	18406218.15
4	0.021183859	568456.15
5	0.541162928	14521782.46
6	29.544547	792810191.95
7	29.544547	792810191.95
8	59.08909399	1585620383.90
9	3.931774624	105506812.96
10	3.931774624	105506812.96
11	2.339354125	62775164.32
12	0.377841389	10139146.96
13	0	0.00
14	2.577986793	69178728.80
15	1.031558766	27681260.54
16	1.21457911	32592501.68
17	0.183020345	4911241.14
18	1.949426536	52311691.45
19	55.80955169	1497615834.00
20	2.109819116	56615730.08
21	0	0.00
22	0	0.00
23	0.562346787	15090238.62
24	29.544547	792810191.95
25	29.544547	792810191.95
26	2.717195513	72914311.28
27	1.970610396	52880147.60
28	1.731977727	46476583.12
29	2.109819116	56615730.08
30	0.183020345	4911241.14
31	1.031558766	27681260.54
32	0.685918752	18406218.15
33	0	0.00
34	0.144755824	3884435.69
35	0.144755824	3884435.69
36	0	0.00
37	0	0.00
38	0	0.00
39	0	0.00
40	0	0.00

Tabla 3.13 Costo exergoeconómico de cada flujo

El flujo más costoso es el flujo 8. El objetivo del proceso no es la producción de agua pero en caso de que así fuera este el precio para obtenerla sería de 59 pesos/segundo. Un parámetro clave es conocer el precio que tiene el flujo involucrado en la generación de energía eléctrica, esto es con el flujo 34 y 35 ( $W_m$ : Trabajo mecánico y  $W_e$ : Trabajo Generado) los cuales tiene el precio dentro del proceso de 0.144755 pesos/segundo, alejado de los 0.7071 pesos/segundo del precio del recurso.

La empresa vende el MW neto a 1000 pesos aproximadamente. Si esta es una unidad con la capacidad de generar 26.6 MW netos cada hora al mes por ejemplo se tiene la capacidad de generar 798 MW netos/mes. Tomando en cuenta un mes de 30 días. Se obtienen ganancias netas por la energía de 798 mil pesos/mes. Convirtiendo a pesos / segundo, el flujo obtiene ganancias por 0.30787 \$/s. Si el costo del flujo en el proceso baja, las ganancias se incrementan considerablemente.

Los valores del ejemplo anterior es de un estado decrementado. La mejor manera de comparar este escenario es aplicando el mismo método exergético con la unidad a su capacidad nominal.

### **3.1.2 Comparativa de escenarios**

El caso anterior descrito es de la unidad 13 en su estado actual. Se propone un escenario adicional de análisis con la unidad generando a la capacidad nominal apoyado con las pruebas de rendimiento que se aplican a la unidad posterior a un mantenimiento mayor. En la mayoría de los casos, estas pruebas de rendimiento son una excelente aproximación de cómo la unidad debe de estar operando. Entonces se tomarán los datos de dichas pruebas como la referencia que se necesita para saber si la unidad se encuentra dentro de los parámetros deseados.

### 3.1.3 Escenarios de producción (Escenario Deseado)

El escenario deseado de producción (ED) será tomado en cuenta bajo las condiciones óptimas de generación de energía eléctrica. Si bien no son estrictamente óptimas, el escenario que se plantea es simplemente el que la unidad se encuentre generando a la capacidad por la que fue diseñada. Entonces los datos que se muestran son para una generación constante aproximada de 26.6 MWh.

De la misma manera en como se construyó el caso anterior, aplicamos la misma metodología para este escenario deseado. Nuevamente se comienza con la descripción del proceso, en cuyo caso es el mismo, se utilizan la misma cantidad de flujos y equipos.

### Balance de materia

El balance de materia utiliza la misma matriz de incidencias que se obtuvo del balance del escenario actual. El parámetro que cambia es el gasto sin ser significativo, dicha propiedad se puede consultar el Anexo (Propiedades termodinámicas del ED). Tanto para los flujos de vapor como para los de energía. De igual manera la multiplicación de esta matriz por el nuevo vector gasto es cero. Confirmando el balance de materia como se observa en la figura de abajo.

$$A \times F_{Exergético}^{Deseado} = 0$$

Equipo	Flujos																																	Resultado				
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9	m10	m11	m12	m13	m14	m15	m16	m17	m18	m19	m20	m21	m22	m23	m24	m25	m26	m27	m28	m29	m30	m31	m32	m33	[t/h]	[g/h]			
1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2E-14	-2E-08	
2	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1E-14	-1E-08	
3	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.6E-14	4E-08	
5	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-9E-13	-9E-07	
6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-2E-15	-2E-09	
7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
9	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2E-15	-2E-09
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	-3E-14	-3E-08
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-4E-16	-4E-10
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
19	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-5E-14	-5E-08

Tabla 3.14 Matriz de incidencias para el balance de materia del ED



Se utiliza la formula ya descrita para obtener la exergia de cada flujo  $b_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)$ . Las propiedades termodinámicas necesarias para obtener las exergias de igual manera se obtendrán del Anexo. La exergia “destruida” del ED es la siguiente:

$$A \times B_{exergia}^{ED} = D_{destrucción}$$

Escenarios de la Unidad 13

ED		EA	
<b>Exergia Destruida [MW]</b>	<b>Equipos</b>	<b>Exergia Destruida [MW]</b>	<b>Equipos</b>
0.07578818942	Secador de vapor	0.03979453796	Secador de vapor
0.20731904340	Divisor 1	0.24322226133	Divisor 1
0.30529635278	Turbina	0.32678780975	Turbina
0.66425523486	Condensador	0.45803609143	Condensador
15.56563950733	Torre enfriamiento	15.96077341806	Torre enfriamiento
0.18056993547	Eyectores	0.22626856593	Eyectores
0.13585739680	Bomba 1	0.08921363456	Bomba 1
0.14054739680	Bomba 2	0.08622363456	Bomba 2
0.81493587200	Divisor 2	0.00000000000	Divisor 2
0.00448033333	Bomba 3	0.00000000000	Bomba 3
0.00156798869	Divisor 3	0.01883572283	Divisor 3
-0.21483551787	Intercambiador	-0.25072080756	Intercambiador
-1.21038033280	Intercambiador	-1.21137733280	Intercambiador
0.00165430556	Divisor 4	0.00548427778	Divisor 4
0.00861844444	Divisor 5	0.01260040887	Divisor 5
0.06358611000	Interenfriador	0.20844417352	Interenfriador
0.02990372352	Bomba vacio	0.37993186311	Bomba vacio
0.52259217842	Separador	0.01285353466	Separador
0.17887158469	Valvula	0.00000000000	Valvula
18.94841285796	Tuberia	18.11657212732	Tuberia
0.14000000000	Generador	3.10311000000	Generador

Tabla 3.16 Exergía destruida del ED y EA

De ambos análisis pueden obtenerse conclusiones importantes para el sistema de mantenimientos. Por ejemplo, aquellos equipos del proceso primario de generación de energía eléctrica como lo es la turbina, el generador, condensador, torre de enfriamiento, bomba de vacío y enfriamiento de auxiliares, tienen una mejora significativa para el ED siendo los más importantes, el generador, torre de enfriamiento, eyectores, interenfriador y bomba de vacío. La diferencia de la “destrucción” de exergia

se muestra en la siguiente tabla, se trata de la resta de ambos vectores del EA y ED por lo que la negatividad del valor solo hace referencia a que es mayor en uno que en otro ya que físicamente el resultado no tiene esta interpretación.

Exergia Destruida [MW]	Equipos
-0.03599365146	Secador de vapor
0.03590321793	Divisor 1
0.02149145697	Turbina
-0.20621914342	Condensador
0.39513391073	Torre enfriamiento
0.04569863046	Eyectores
-0.04664376224	Bomba 1
-0.05432376224	Bomba 2
-0.81493587200	Divisor 2
-0.00448033333	Bomba 3
0.01726773413	Divisor 3
-0.03588528969	Intercambiador
-0.00099700000	Intercambiador
0.00382997222	Divisor 4
0.00398196443	Divisor 5
0.14485806352	Interenfriador
0.35002813959	Bomba vacio
-0.50973864376	Separador
-0.17887158469	Valvula
-0.83184073063	Tuberia
2.96311000000	Generador

Tabla 3.17 Diferencias de la exergia destruida (EA-ED)

La gráfica del EA vs ED es como se muestra en la figura:

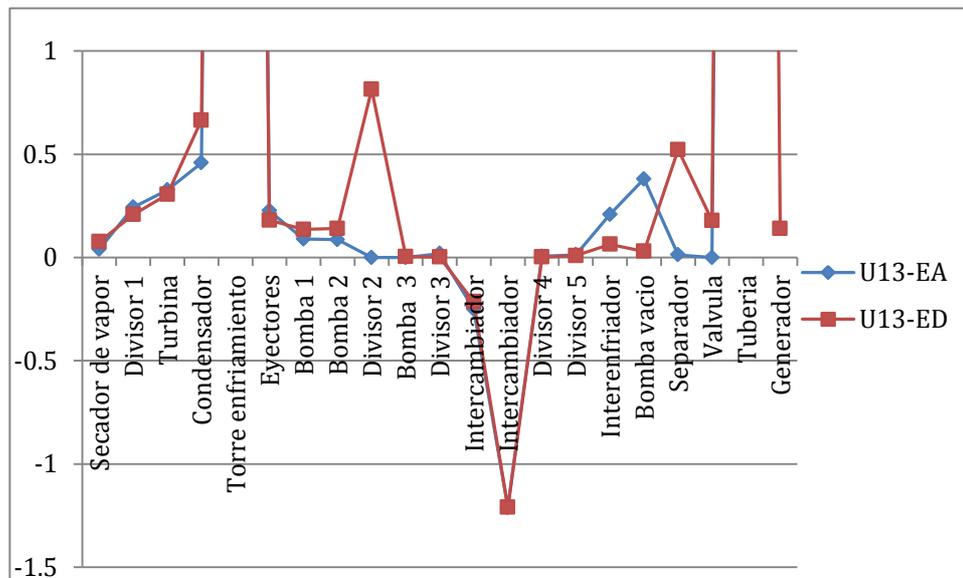


Figura 3.18 Comportamiento de la exergia destruida por equipos [MW, Equipos]

La gráfica anterior está a una escala de 1 MW, los equipos donde ocurre mejora energética, son aquellos que intervienen en el proceso primario de la generación de energía eléctrica. Como lo es el generador y el sistema de vacío principalmente. Y en la siguiente gráfica se muestra también el comportamiento de la exergía para el EA y ED. Los procesos con mayor diferencia de exergía son la torre de enfriamiento y tubería.

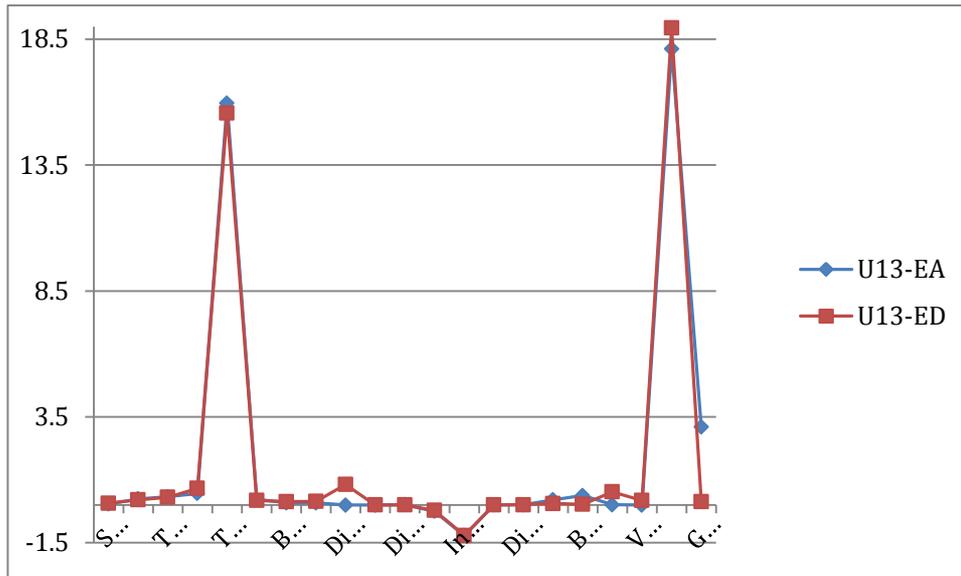


Figura 3.19 Comportamiento de la exergía destruida por equipos [MW, Equipos]

Al tener menos exergía destruida en el sistema del ED, el costo exergético para obtener cada producto del proceso entonces será también menor que el de la unidad en EA. El cálculo para obtener el costo exergético es el mismo procedimiento empleado del análisis anterior.

$$\begin{bmatrix} A \\ \alpha_{ED} \end{bmatrix} \cdot [B_{ED}^*] = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{ED-Z} \end{bmatrix}$$

$$[B_{ED}^*] = \begin{bmatrix} A \\ \alpha_{ED} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ B_{ED-Z} \end{bmatrix}$$

La matriz de incidencias Recurso-Producto ya se tiene elaborada. Se sustituyen los parámetros del ED y se establece el sistema ecuaciones, se utilizan las ecuaciones complementarias del sistema anterior debido a que las relaciones de equivalencia exergética son las mismas pero con diferentes

parámetros. Las propiedades de los flujos del ED se pueden consultar en el Anexo así como también el sistema de ecuaciones su solución.

Conforme los resultados, el que se tenga menor costo exergético en el ED se debe principalmente a dos factores determinantes: El primero es que la cantidad o gasto de entrada en un sistema haya sido menor. En este caso no es así pues la diferencia fue poco más de una tonelada por hora respecto al EA. La segunda es referente a la eficiencia de cada equipo. Esto significa que el ED tiene un costo exergético menor porque el aprovechamiento del flujo en el proceso es mejor.

Los flujos con costo exergético menores a 1000 MW se muestran en la gráfica siguiente (con escala menor para el apreciamiento de los flujos con poca diferencia). La gráfica muestra claramente que de un escenario a otro podría existir mejora energética en el proceso. Esto significa que la unidad en ED emplea el mismo recurso energético (vapor) sin embargo las irreversibilidades en el proceso son menores por lo que el costo exergético es menor también.

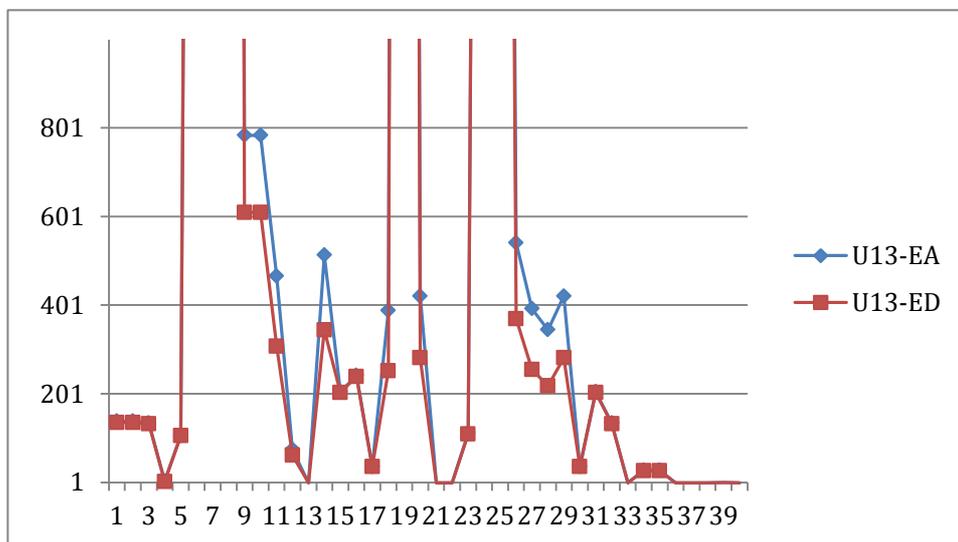


Figura 3.20 Costo exergético EA y ED a escala

La siguiente gráfica con escala de 550 a 11500 MW.

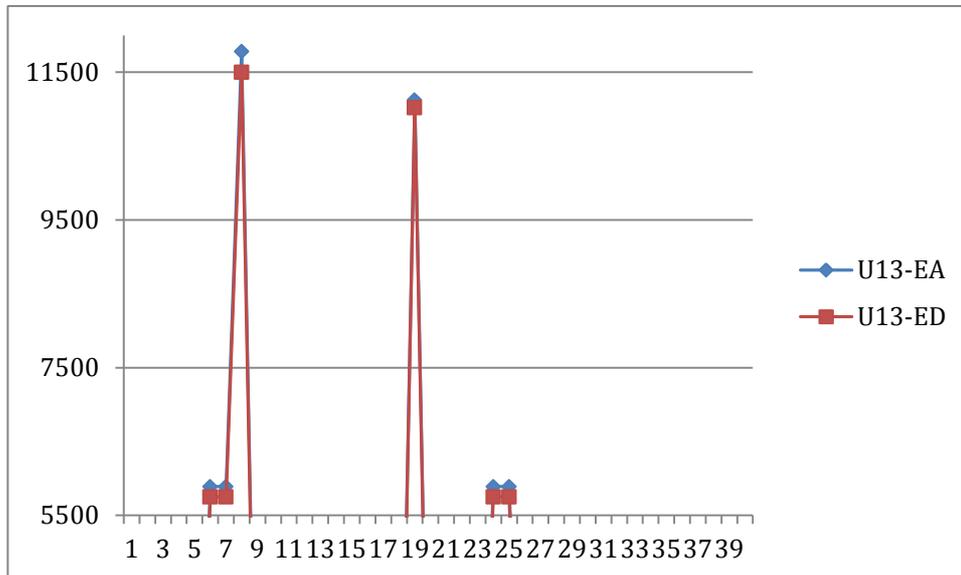


Figura 3.21 Costo exergético del EA y ED para flujos mayores

Para cualquier flujo el ED siempre representa menor costo exergético en el proceso que el EA.

La eficiencia exergética del EA calculada en el capítulo 2, resultó ser del 18.53%, realizando el mismo procedimiento pero para un escenario deseado esta resulta ser del 20.21%.

## CAPITULO 4

### 4. Relación exergia, costo exergoeconómicos y mantenimiento

La ayuda de los análisis anteriores de exergia y costos económicos y exergético, ayudarán a identificar equipos y flujos primarios para la estrategia de mantenimientos. El ED tiene menores costos de producción y energéticos que el EA como ha quedado demostrado. Se conocen los equipos y el costo de los flujos.

<b>Exergia Destruida [MW]</b>	<b>Equipos</b>
-0.03599365146	<b>Secador de vapor</b>
0.021491457	<b>Turbina</b>
-0.206219143	<b>Condensador</b>
0.395133911	<b>Torre enfriamiento</b>
0.04569863	<b>Eyectores</b>
0.144858064	<b>Interenfriador</b>
2.96311	<b>Generador</b>

Tabla 4.21 Exergia destruida para equipos primarios

La gráfica 3.21 muestra aquellos equipos en dónde existe mejora. En el caso del secador de vapor y condensador la diferencia del EA-ED indica que se tiene mayor concentración de energía en estos equipos. La transferencia de energía en este equipo es mayor por lo que existe mayor “destrucción” o intercambio de energía lo que es un resultado muy positivo pues es exactamente la función que debe tener un condensador. Mismo caso para el secador de vapor aunque la diferencia es mínima. El generador tiene la diferencia más importante. Este análisis preliminar es un buen indicador de la consistencia en el desempeño de cada equipo del proceso. La cantidad de exergia “destruida” será el factor determinante para evaluar el tipo de mantenimiento a realizarse.

Por otro lado, otra manera de inferir los equipos en función de sus flujos como productos y recursos, es por medio del costo exergético. Lo que cuesta

energéticamente cada flujo en el proceso. La tabla de costo exergético para el EA y ED así como su diferencia puede ser consultada en el Anexo. De dicha tabla los flujos marcados son los que representan más de 2 puntos porcentuales del EA respecto al ED. Los flujos 11, 14, 18, 20, 26, 27, 28 y 29 representan el mayor porcentaje de costo exergético y coincidentemente son flujos del sistema grupo de vacío, los cuales son: el flujo de agua de enfriamiento de auxiliares al intercondensador, condensado de la salida del interenfriador hacia el condensador, los gases a la salida del condensador hacia el eyector, el condensado del separador de vapor hacia el condensador, el agua de enfriamiento a auxiliares destinada al intercondensador y grupo de vacío, gases y vapor a la salida del eyector hacia el intercondensador, gases del intercondensador hacia el grupo de vacío y los gases del grupo de vacío hacia el separador de humedad respectivamente para cada flujo, lo importante de estos resultados es que la mayoría de estos grupos tiene relación con el sistema de vacío y sistema de condensado para el intercondensador. Los resultados concuerdan con los parámetros operativos de la unidad en el EA y ED.

El flujo más importante del sistema respecto a la producción y objetivo del sistema es el 34. Es el resultado del proceso, la generación de energía eléctrica, y este flujo en el ED tiene un porcentaje de mejora de 4.41% respecto al EA, lo que se traduce en 2.7 MW más cada hora.



Figura 4.22 Porcentaje de mejora del ED respecto al EA

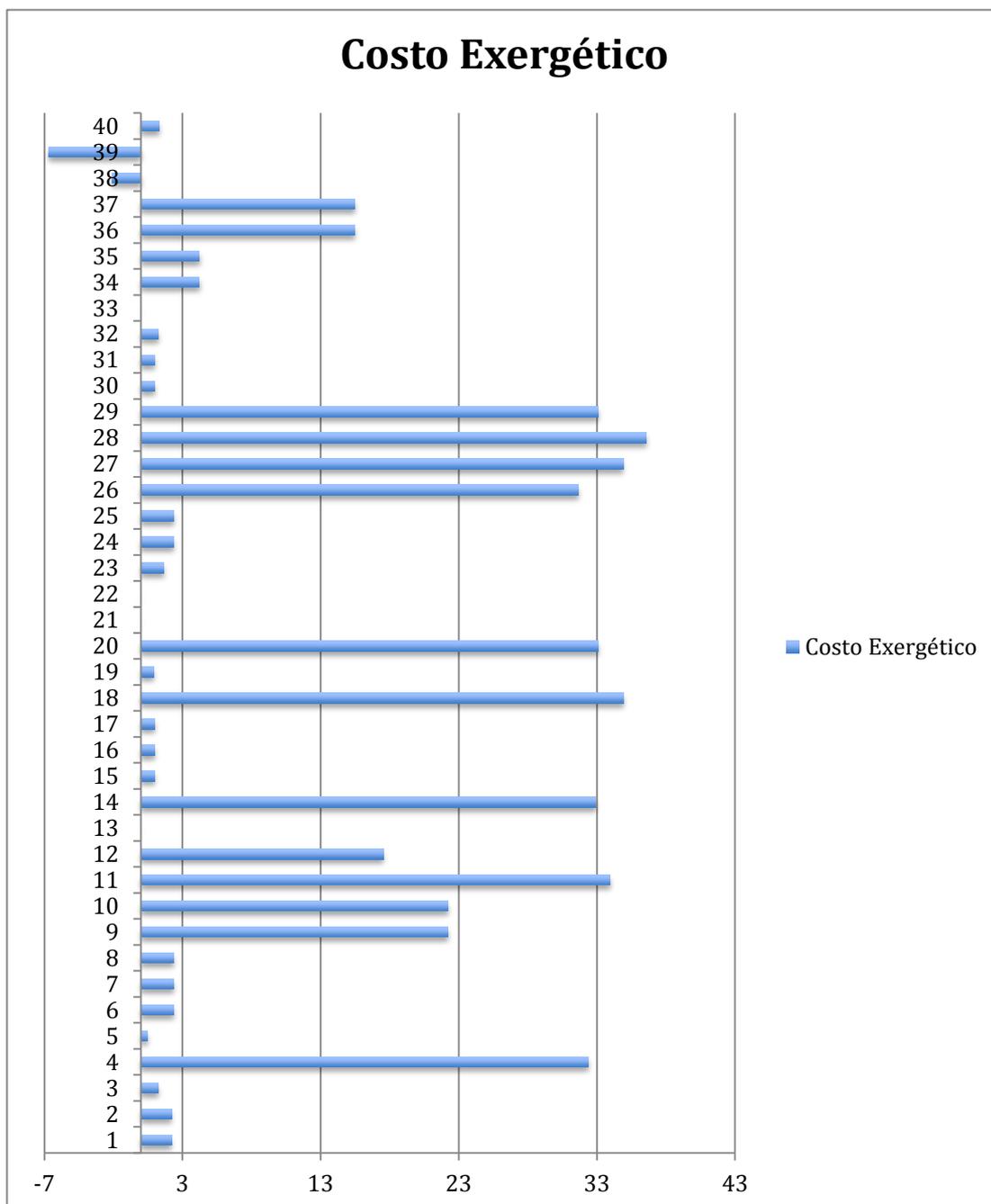


Figura 4.23 Costo Exergético del ED

A pesar de los resultados de la gráfica anterior, muchos de los flujos en que se observa un incremento importante de mejora del ED al EA, dentro del proceso no tienen una contribución dominante. Son flujos de energía pequeños comparados con el flujo de vapor principal y el agua condensada del sistema. Se describen a continuación:

El flujo 1 es la llegada de vapor al sistema, en la gráfica no se observa porcentaje de mejora importante porque prácticamente es la misma cantidad y calidad de flujo. El flujo 2 es el vapor acondicionado de la línea de llegada de vapor, de igual manera no tiene cambio relevante de un estado a otro. El flujo 3 es el vapor ya acondicionado hacia la turbina de vapor, este tiene mayor contenido energético porque para el ED se utiliza un poco más de vapor ya que tiene condiciones de generar los 26.6 MW. El flujo 4 es el vapor que se utiliza para el eyector de vapor cuya función es extraer gases incondensables. Este flujo puede mejorar aproximadamente el 32% esto significa que para estos gases del condensador e interenfriador al ED se le invierte menor cantidad de flujo que al EA. EL flujo 5 es la salida de vapor/agua de la turbina hacia el condensador, se tiene un mejor aprovechamiento del vapor en el ED respecto EA. El flujo 6 y 7 es el agua salida del condensador hacia las bombas de agua de condensado, existe mejora pero como el flujo es un poco mayor para el ED respecto al EA esta mejora debe de ir por su contenido energético, el condensador en el ED es más eficiente que en el EA.

El flujo 8 es la suma del flujo 6 y 7 por lo que la interpretación es la misma para este flujo. El flujo 9 va destinado a enfriamiento de auxiliares, específicamente para el generador y para el aceite (ambos son de contacto superficial), exergéticamente es mejor el ED que el EA principalmente porque este último requiera más agua para enfriar estos dos equipos. El flujo 10 es prácticamente el mismo que el 9 pero posterior a un incremento de presión por la bomba de enfriamiento de auxiliares, en el diagrama de mejora incluso tiene el porcentaje equivalente. El flujo 11 es agua de enfriamiento de auxiliares para que el intercondensador haga la función condensar el agua de su mezcla vapor/gases, la mejora es del 34% se debe a que en el EA se emplea más agua de enfriamiento que en el ED entonces las opciones de esta deficiencia son: porque el intercondensador no esta haciendo bien su función, baja eficiencia, porque se tiene una mayor cantidad de vapor a condensar o lo que condensa tiene mayor contenido energético tomando en cuenta el estado entálpico del flujo no cambió de un estado a otro. El flujo 12 proveniente de enfriamiento de auxiliares es para las bombas de vacío, estas bombas ocupan un sello de agua para la extracción de gases incondensables

del inter/condensador. La diferencia radica en que en el EA se utilizan las 3 bombas del grupo de vacío a diferencia del ED con solo dos de ellas. El flujo 13 son los gases incondensables del sistema para el ED es menor el flujo por la calidad del vapor pero es relativamente similar. El flujo 14 es el resultado del agua condensada en el interenfriador que regresa al condensador, la diferencia de mejora del ED al EA es porque solamente se tienen dos bombas de vacío con sus respectivos eyectores. Para el EA son tres y esto incrementa la carga térmica hacia el condensador afectando la eficiencia del mismo. El flujo 15 es el agua utilizada para el enfriamiento del generador, en realidad existe mejora, en el gráfico se puede ver un porcentaje negativo y esto se debe a que “adquiere” mayor contenido energético que en el EA lo que significa que enfría con mayor eficiencia. El flujo 16 es la mezcla de agua utilizada para enfriar el generador y aceite de igual manera existe mejor enfriamiento del ED respecto al EA. El flujo 17 es el agua utilizada para enfriamiento de aceite con mejor resultado para el ED respecto al EA. El flujo 18 es la salida de vapor/gases del condensador hacia el eyector, el EA tiene más flujo de vapor/gases pues su contenido de gases incondensables también es mayor. El flujo 19 es el agua ya enfriada de la torre de enfriamiento hacia el condensador mejora aproximadamente 1% pero la mejora es muy considerable ya que representa el recurso de enfriamiento principal para que el condensador haga su función y al tener un mejor sistema de condensación se tiene mejor vacío dentro del sistema ayudando a la turbina a extraer mejor la mezcla de vapor/gases. El flujo 20 es el remanente de condensado del separador de gases y mejora un 33% respecto al EA pero como es un flujo pequeño no impacta dentro del proceso pero si reafirma la conclusión de que el grupo de vacío requiere de más recursos para extraer los gases incondensables del intercondensador y condensador. El flujo 21 es el condensado de las líneas de vapor principal que salen del secador de vapor hacia reinyección. El flujo 22 es el vapor del agua caliente que se va a enfriamiento en la torre de enfriamiento. El flujo 23 de reinyección es prácticamente el mismo de un estado a otro. El flujo 24 y 25 es el agua salida de las bombas de condensado con destino hacia la torre de enfriamiento la diferencia es debida a que proviene más agua del condensador del EA al ED, se reafirma la conclusión de que el EA lleva una

carga térmica un poco mayor por el grupo de vacío. El flujo 26 es el mismo flujo 10 referente al agua de enfriamiento de auxiliares, el EA utiliza más recursos para el grupo de vacío que el ED. El flujo 27 es la mezcla de vapor/gases extraídos del condensador hacia el interenfriador mejorando un 35%. El flujo 28 solo de gases incondensables es mayor en el EA que en el ED. El flujo 29 es de gases incondensables posterior a las bombas de vacío. El flujo 30 y 31 es de agua de enfriamiento de auxiliares a la entrada de enfriadores de aceite y del generador. Mejora el ED respecto al EA. El flujo 32 es el vapor hacia la turbina la diferencia es debida a una ligera variación en la cantidad de flujo de un estado a otro. El flujo 33 es vapor hacia la atmósfera prácticamente cero en ambos estados. Finalmente tenemos el  $W_m$  y  $W_e$  flujos de trabajo mecánico y eléctrico respectivamente, la mejora del ED respecto al EA es que al tener un mejor vacío en el sistema se extrae con mayor rapidez la mezcla de vapor / gases haciendo el ciclo más eficiente y pudiendo tener un aprovechamiento mejor en la turbina. La mejora es del 1.2% pero suficiente para incrementar aproximadamente 2.7 MW. Por último los flujos  $W_{b1}$ ,  $W_{b2}$ ,  $W_{b3}$ ,  $W_{b4}$  y  $W_{bt}$ . En el caso del  $W_{b1}$  y  $W_{b2}$  la mejora es porque se tiene un poco menos cantidad de condensado y por ello el trabajo mecánico y la alimentación eléctrica disminuyen un poco también.

Porcentaje de impacto del EA (exergia del flujo/exergia total entrada)

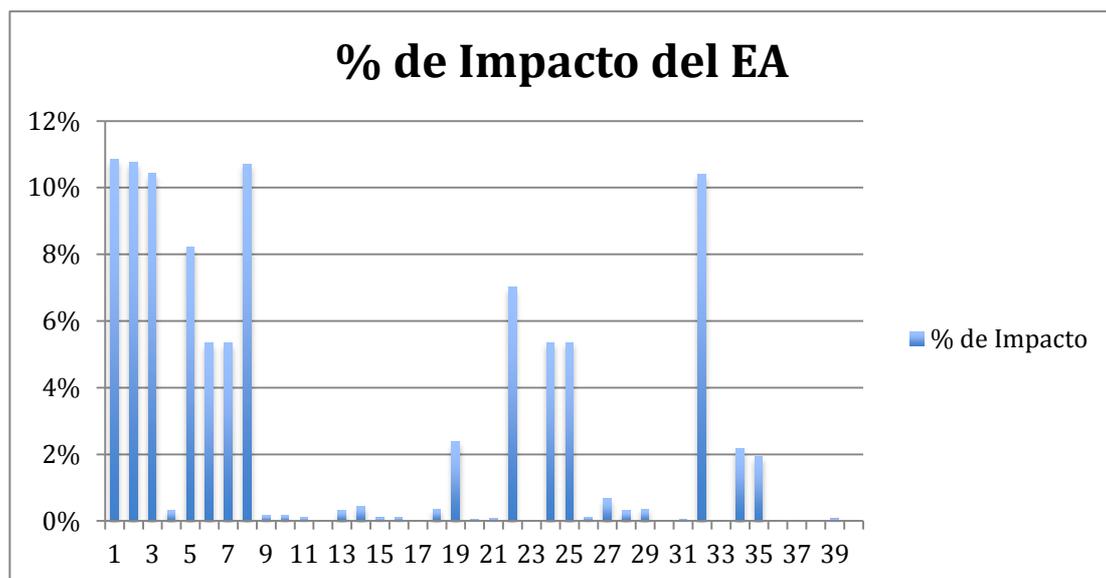


Figura 4.24 Impacto de cada flujo en el proceso

Estos flujos que representan más del 40% de mejora, como se muestra en la Figura 4.24, realmente dentro del proceso su impacto es menor al 0.5% como se aprecia en la Figura 4.25. Este indicativo los hace candidatos al programa de mantenimiento preventivo y predictivo de la central.

#### Porcentaje de impacto del ED

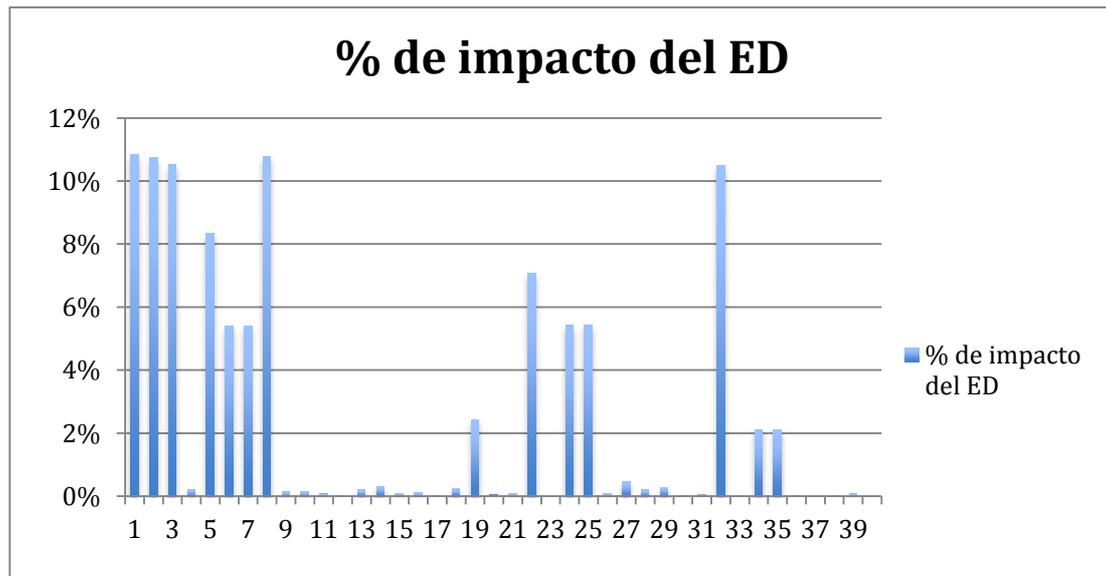


Figura 4.25 Impacto de cada flujo en el proceso

El impacto en ambos escenarios es similar dentro del proceso, la congruencia de los resultados significan el control que se tiene del sistema así que un parámetro operativo diferente al historial de comportamiento significa un dato valioso para la evaluación del proceso pues claramente el resultado es reflejo de otro comportamiento dentro del sistema que puede ser aun más importante (los sistemas se encuentran intercomunicados y dependen unos de otros) por ese motivo es tan importante el análisis exergético que identifica estos cambios de comportamiento a nivel equipo, flujo energético y económico. Una buena herramienta y base de apoyo para decidir las acciones a tomar para su control o corrección.

Todos los flujos por debajo del 2% son considerados como “secundarios” en la estrategia del mantenimiento. Y los restantes están involucrados dentro del programa de mantenimiento mayor. Este indicador, costo exergético, muestra

la relevancia de los flujos en el proceso, factor determinante para elegir el recurso económico que se destina hacia el programa de mantenimiento.

Finalmente tenemos el costo económico de cada flujo gracias a los análisis anteriores. De manera particular podemos ver cuanto cuesta cada flujo en función de la exergía del mismo ya siendo como producto o como recurso dentro del sistema. Particularmente interesa saber cuanto cuesta el flujo del producto del trabajo mecánico de la turbina, del  $W_m$  al  $W_e$  respectivamente flujo 34 y 35. Dentro del análisis exergético el impacto en el sistema de estos flujos es del 2.12%.

Porcentaje económico de mejora del ED respecto al EA

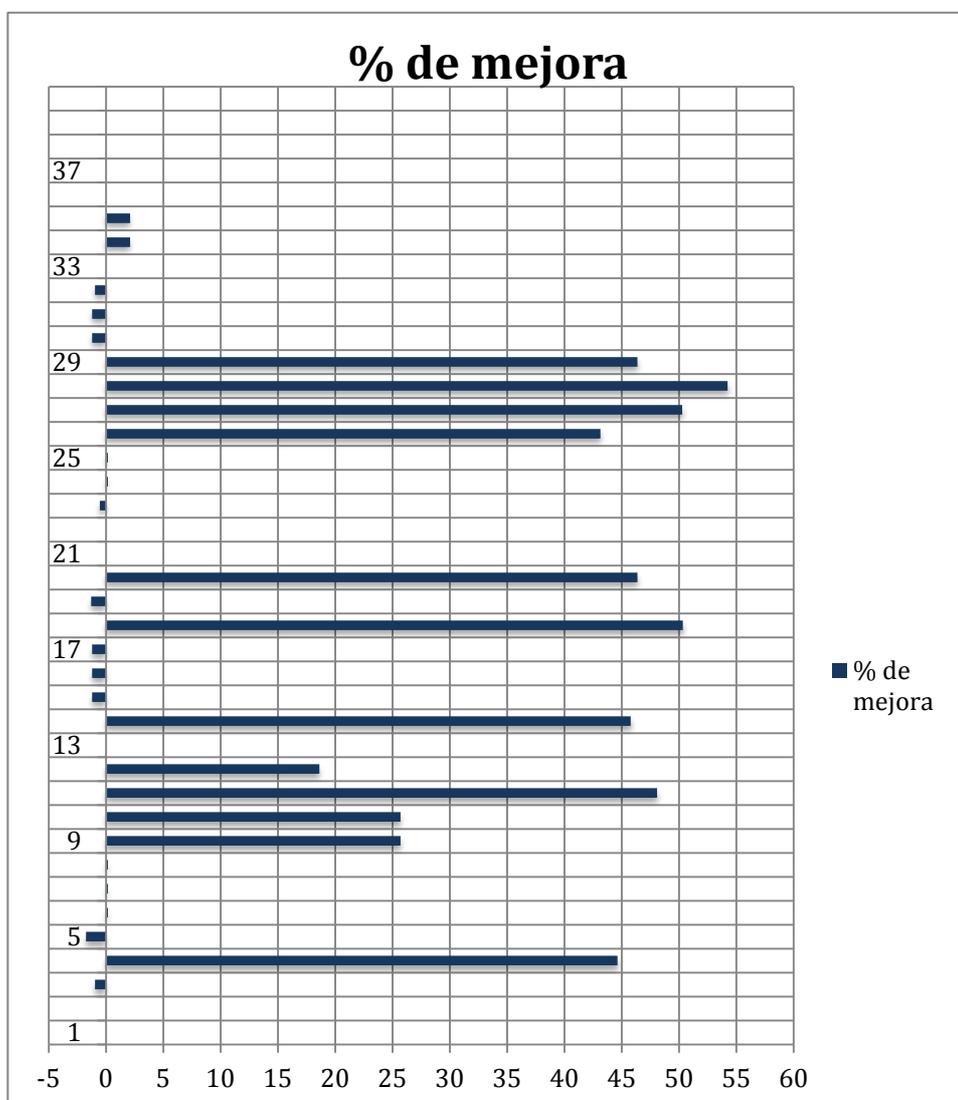


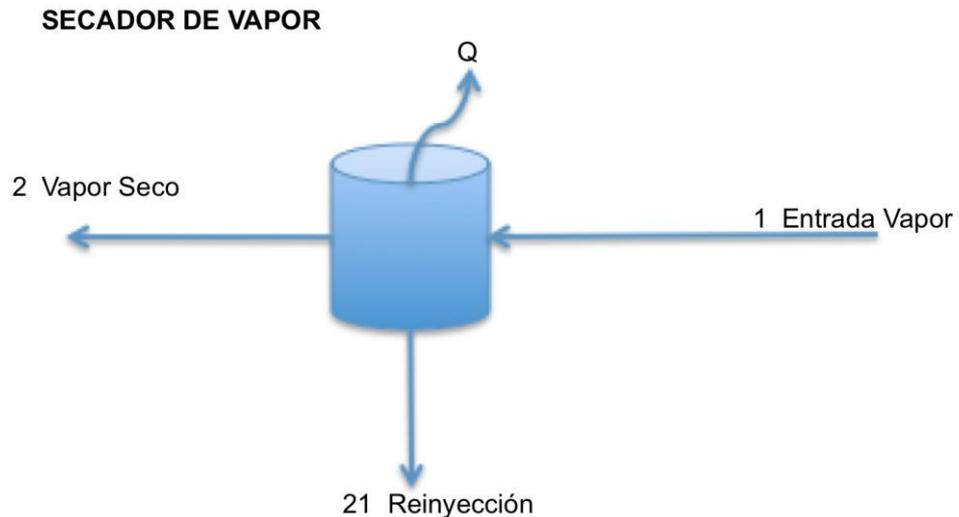
Figura 4.26 Porcentaje de mejora económica del ED respecto al EA

Existen además varios flujos que denotan una mejora en el sistema de manera económica de acuerdo con los resultados de análisis exergoeconómico. De acuerdo al análisis exergético anterior los flujos de mayor relevancia son los siguientes: 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 19, 22, 24, 25, 32, 34 y 35. De los cuales solamente los siguientes tienen un elevado porcentaje para la mejora o impacto dentro del sistema: 19, 32, 34 y 35. El flujo 19 es el que sale de la torre de enfriamiento como agua de enfriamiento recurso del condensador, el flujo 32 es el vapor que ingresa a la turbina y que posteriormente es transformado en trabajo mecánico, el flujo 34 es el trabajo mecánico realizado por la turbina y el flujo 35 es la energía eléctrica obtenida por el generador. Únicamente, la torre de enfriamiento, el condensador, la turbina y el generador tienen flujos determinantes para mejorar la eficiencia de la unidad y el grupo de vacío es un reflejo de la eficiencia de estos equipos. De estos flujos el 19 representaría una mejora substancial en la obtención de su costo como se puede consultar en la Tabla de costos exergoeconómicos del Anexo. Este flujo en conjunto con la torre de enfriamiento y el condensador es un claro indicador de la eficiencia del proceso, es clave para el modo operativo de la unidad.

#### **4.1 Análisis exergoeconómico de los equipos del proceso**

##### **Secador de Vapor**

En primera instancia del proceso se encuentra el secador de vapor, este equipo tiene la función de acondicionar el vapor geotérmico a la entrada del proceso. El vapor es suministrado gracias a uno o varios pozos focalizados en una tubería especial. Muchas veces los pozos que suministran vapor a las unidades se encuentran a distancias de hasta 10 km, aunque la tubería lleva un aislante especial no deja de existir cierto impacto con el ambiente entonces el vapor a la llegada de la unidad puede contener mayor cantidad de partículas de agua que a la salida del pozo geotérmico por ello el secador de vapor se encarga de dar el último acondicionamiento al vapor para evitar que llegue con humedad hacia la turbina.



**Figura 4.27 Diagrama Secador de Vapor**

Se tiene una llegada de vapor, una salida y un flujo de condensados. Las características de cada flujo se pueden consultar en los anexo. De acuerdo con el análisis exergético se tiene la siguiente tabla que describe la exergia del flujo, el costo exergético y exergoeconómico, irreversibilidad del flujo, eficiencia del equipo, destrucción de energía y la diferencia del costo económico de un estado a otro como se muestra abajo.

ED							
Flujo	Exergia [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	Diferencia costos [ED,EA] \$/año
1	136.090877	136.0908766	18974674.30	-5.68434E-13	0.99211	0.075788189	0.00
2	135.017401	136.0908766	18974674.30	1.073475591			
21	0.9976874	0	0.00	0			
EA							
1	139.170224	139.170224	18974674.3	1.08002E-12	0.99247	0.039794538	
2	138.121933	139.170224	18974674.3	1.048290674			
21	1.00849614	0	0	0			

**Tabla 4.28 Diagnóstico Exergético Secador de Vapor**

La exergia de un estado a otro no cambia significativamente, el costo exergético tampoco y es porque la cantidad de flujo de vapor varía muy poco en función del tiempo y mantiene sus condiciones termodinámicas al pasar por este equipo. La eficiencia del equipo es aproximadamente del 99% así que el equipo no representa un impacto negativo al proceso su estado operativo es muy consistente en ambos escenarios. El mantenimiento predictivo es recomendable ya que la variación que tenga en función de sus flujos es fácilmente identificable.

## Divisor de flujo

Este dispositivo es una toma auxiliar del vapor principal hacia eyectores. Los eyectores requieren de vapor a presión alta para que al pasarla por el eyector forme un vacío y pueda extraerse otro flujo a menor presión en el sistema.

### DIVISOR 1

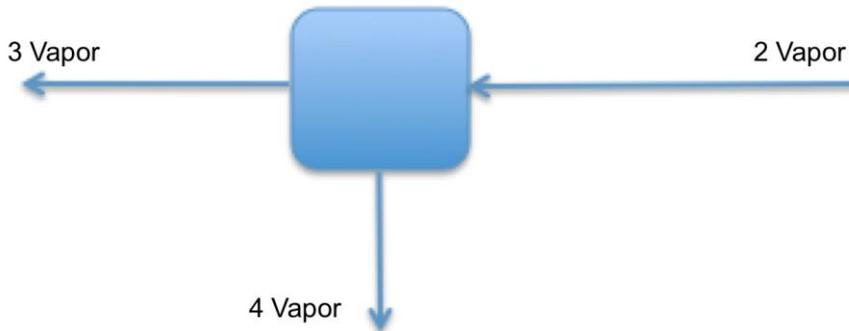


Figura 4.29 Diagrama Divisor de Flujo

Al equipo se tiene una llegada de vapor del secador de vapor y la salida con el flujo 3 hacia turbina y con el flujo 4 hacia el eyector. La tabla de resultados de los flujos se muestra abajo:

ED							Diferencia costos [ED,EA] \$/año
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	
2	135.017401	136.0908766	18974674.30	1.073475591		0.207319043	0.00
3	132.017567	133.2718308	18581624.61	1.254263695			175406.46
4	2.79251491	2.819045848	393049.69	0.026530939			-175406.46
EA							0.243222261
2	138.121933	139.170224	18974674.3	1.048290674			
3	133.748047	135.0008681	18406218.15	1.252820916			
4	4.13066387	4.169355885	568456.1516	0.03869202			

Tabla 4.30 Diagnóstico Divisor de Flujo

Los resultados obtenidos muestran irreversibilidad en ambos estados muy similares, propiamente no es equipo sin embargo se tiene menor aprovechamiento de energía con el EA. En el caso del costo exergoeconómico se puede ver mejora para el ED existe algo singular con el sistema, ya se sabe que el EA requiere de 3 bombas de vacío para obtener un buen vacío en condensador lo que requiere más vapor para eyectores y esto se aprecia en el costo anual ya que mientras que para el ED es esa cantidad más caro, y para el EA el flujo hacia el eyector es la misma cantidad

más caro. Significa que para el ED se aprovechó mejor el flujo de vapor hacia turbina y para el EA la cantidad que no se suministro hacia turbina fue por los requerimientos del grupo de vacío. El área de oportunidad es el mantenimiento rutinario a la tubería de este dispositivo. El ahorro puede significar alrededor de los 170 mil pesos anuales.

## Turbina

Este equipo es el encargado de inducirle movimiento al rotor gracias a que el vapor a la entrada golpea los álabes de la turbina haciendo el intercambio de velocidades con este. Tiene a la llegada el flujo de vapor 32, el producto es trabajo mecánico y el flujo 5 es el vapor utilizado ya con baja presión hacia el condensador.

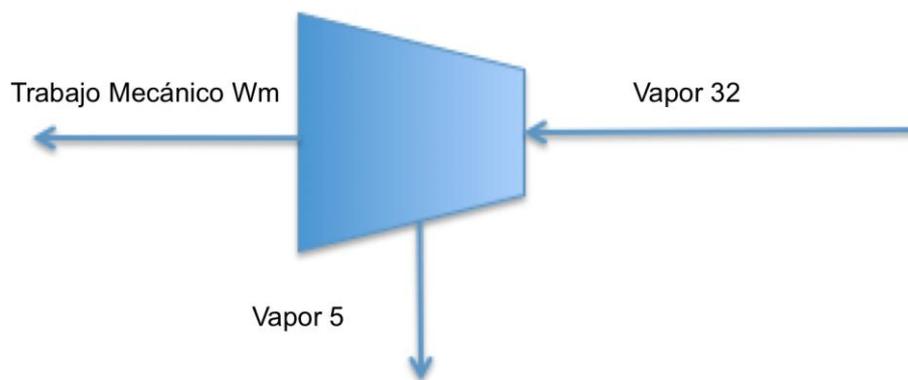


Figura 4.31 Diagrama de flujos de Turbina

La tabla de resultados del equipo se muestran a continuación:

ED							
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	Diferencia costos [ED,EA] \$/año
32	131.611044	133.2718308	18581624.61	1.660786815	0.20241	0.305296353	175406.46
5	104.665748	105.9865144	14777328.51	1.320766771			255546.04
Wm	26.64	27.2853164	3804296.11	0.645316396			-80139.58
EA							
32	133.513027	135.0008681	18406218.15	1.487841446	0.20859	0.32678781	
5	105.336529	106.5103773	14521782.46	1.173848405			
Wm	27.84971	28.49049085	3884435.686	0.640780851			

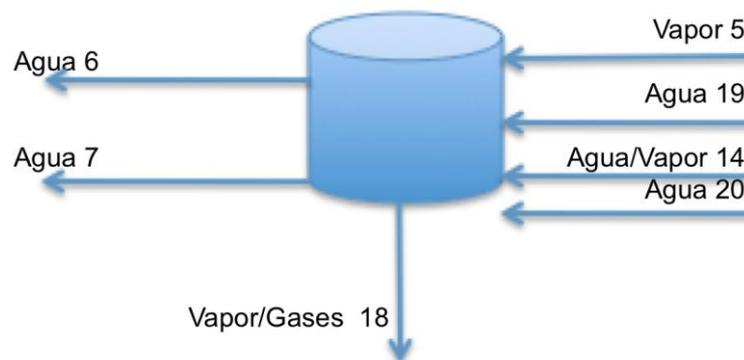
Tabla 4.32 Diagnóstico Exergético de Turbina

De la tabla anterior se tienen las siguientes conclusiones importantes. La exergía de los flujos es menor para el ED así como su costo exergético.

Disminuye la energía no aprovechada, La irreversibilidad es muy similar de un estado a otro siendo para el EA en turbina menos irreversible, y en el caso del costo económico de los flujos, el análisis del flujo 32 es con el mismo razonamiento que lo fue para el flujo 3. El flujo 5 aumenta 255 mil pesos anuales respecto al EA. La eficiencia de la turbina es la misma para ambos estados, aproximadamente del 20%. A pesar de que el flujo  $W_m$  es exergéticamente menor del ED al EA, también tiene un costo anual menor de 80 mil pesos.

### Condensador

Este equipo tiene la función de condensar el vapor ya utilizado de la turbina para que posteriormente el agua obtenida sea enviada hacia la torre de enfriamiento para posteriormente utilizarla como recurso del condensador y continuar con la condensación del vapor que vaya ingresando al sistema.



**Figura 4.33 Diagrama de flujos Condensador**

El flujo 6 y 7 es del agua condensada hacia bombas de condensado, el flujo 5 es el vapor/gases extraído de la turbina, el flujo 19 es el agua que se utiliza como enfriamiento para el condensado, el flujo 14 es la mezcla de agua caliente/vapor que proviene del interenfriador y el flujo 20 es el agua remanente del separador. Los parámetros exergéticos de cada flujo es como se muestra en la tabla de abajo:

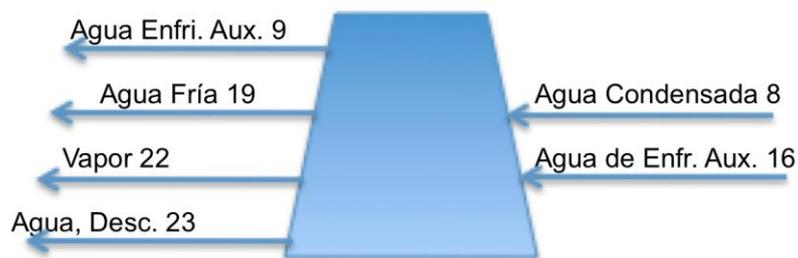
ED							Diferencia costos [ED,EA] \$/año
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	
5	104.665748	105.9865144	14777328.51	1.320766771	0.74614	0.522592178	255546.04
14	3.90831111	344.7266976	47447897.23	340.8183865			-21730831.58
19	30.5767998	11021.31459	1516861897.02	10990.73779			19246063.02
20	0.43441139	281.9287283	38679710.41	281.4943169			-17936019.66
6	67.9665631	5750.577263	791486096.06	5682.6107			-1324095.89
7	67.9665631	5750.577263	791486096.06	5682.6107			-1324095.89
18	2.98788845	252.8020046	34794641.06	249.8141162			-17517050.39
EA							
5	105.336529	106.5103773	14521782.46	1.173848405	0.73417	0.458036091	
14	5.68307028	513.8434502	69178728.80	508.16038			
19	30.5736016	11124.72286	1497615834.00	11094.14926			
20	0.59235178	421.3793006	56615730.08	420.7869488			
6	68.6005368	5888.944024	792810191.95	5820.343488			
7	68.6005368	5888.944024	792810191.95	5820.343488			
18	4.52644296	388.5679396	52311691.45	384.0414966			

**Tabla 4.34 Diagnóstico Condensador**

La eficiencia del ED respecto al EA es mejor por 1.3% a pesar de que la salida de agua del condensador es menor por 1 Ton/hr la mejora se debe a que tiene un mejor sistema de vacío, los flujos 14, 18 y 20 son menores en cantidad de exergía así como el flujo de entrada 5 es menor. Este resultado concuerda con la “destrucción” de energía que es mayor para el ED y es debido a que tiene un mejor proceso de condensación. Por el lado económico resalta la gran diferencia del flujo 19 de un estado a otro, una pequeña diferencia en el estado termodinámico de este flujo significaría un gran ahorro energético y económico.

### Torre de enfriamiento

La función de la torre de enfriamiento es enfriar la carga térmica o agua proveniente principalmente del condensador y de equipos secundarios de auxiliares y estarla continuamente utilizando en el proceso como fluido intercambiador de calor. La eficiencia de este equipo de diseño es del 97.2%



**Figura 4.35 Diagrama de Flujos Torre de Enfriamiento**

Como se puede observar en la figura anterior al condensador entran dos flujos, el 8 es el que proviene del agua condensada en el condensador, y el 16 es el flujo utilizado en los enfriadores del generador y de aceite del proceso. Tiene el flujo 9 de salida que es agua fría para el enfriamiento de auxiliares, el 19 de igual manera pero para el condensador, el flujo 22 es vapor del enfriamiento en la torre y el 23 es agua hacia reinyección. Las características exergeticas de cada flujo se muestran en la tabla de abajo.

ED							
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	Diferencia costos [ED,EA] \$/año
8	135.382195	11501.41574	1582972192.11	11366.03355	0.88207	15.56563951	-2648191.78
9	1.69176139	609.790255	83925342.61	608.0984936			-21581470.35
16	1.35771566	239.6753016	32985425.72	238.317586			-32592501.68
19	30.5767998	11021.31459	1516861897.02	10990.73779			19246063.02
22	88.839637	0	0.00	0			0.00
23	0.30580346	110.2259282	15170378.20	109.9201247			80139.58
EA							
8	137.513046	11778.19719	1585620383.90	11640.68415	0.87767	15.96077342	
9	2.15390569	783.7350724	105506812.96	781.5811667			
16	1.35771566	242.1123903	32592501.68	240.7546747			
19	30.5736016	11124.72286	1497615834.00	11094.14926			
22	90.1174162	0	0.00	0			
23	0.30806495	112.0946498	15090238.62	111.7865849			

**Tabla 4.36 Diagnóstico exergetico de Torre de Enfriamiento**

La eficiencia de la torre de enfriamiento es del 88. 2% para el ED y del 87. 7% para el EA. Resultados similares pero con mejora potencial significativa por la cantidad de flujo y carga térmica que maneja. La eficiencia concuerda también con la “destrucción” de energía siendo para el ED de 15.56 MW y para el EA de 15.96 MW. El costo exergetico en los flujos relevantes como el 8 y 19 es también menor para ED. El costo exergoeconómico del equipo tiene un balance positivo para el ED pues los costos relevantes son para el flujo 9 y 16 de enfriamiento de auxiliares entrada y salida. El flujo 19 resulta ser económicamente más caro dentro del proceso para el ED.

### **Eyector de Vapor**

La función del eyector de vapor es extraer los gases incondensables que se encuentran en el condensador. El funcionamiento se basa en la transmisión de energía por impacto de un fluido a presión/velocidad alta respecto a otro.

En este caso el vapor proveniente de la línea principal de vapor con gases/vapor en el condensador.



Figura 4.37 Diagrama de Flujos eyector de vapor

Este tipo de dispositivos utilizados en los sistemas de vacío son los más simples. Sus parámetros operativos se muestran a continuación:

ED							Diferencia costos [ED,EA] \$/año
Flujo	Exergia [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	
4	2.79251491	2.819045848	393049.69	0.026530939		0.180569935	-175406.46
18	2.98788845	252.8020046	34794641.06	249.8141162			-17517050.39
27	5.59983342	255.6210505	35187690.75	250.0212171			-17692456.85
EA							
4	4.13066387	4.169355885	568456.1516	0.03869202		0.226268566	
18	4.52644296	388.5679396	52311691.45	384.0414966			
27	8.43083826	392.7372955	52880147.6	384.3064572			

Tabla 4.38 Diagnóstico Exergético Eyector

De acuerdo con la tabla anterior el ED tiene mejor comportamiento respecto al EA. La irreversibilidad es menor también así como la “destrucción” de exergia. Estos resultados se deben principalmente a que el EA requiere de equipo extra en el sistema de vacío lo que hace que se incremente el costo exergético y económico.

### Bombas de condensado

La función de las bombas de condensado es enviar el agua caliente del condensador hacia la torre de enfriamiento en su parte superior. La diferencia solo representa un cambio de presión del flujo a la entrada y a la salida.



Figura 4.39 Diagrama de flujos bombas de condensado

El comportamiento exergético se muestra en la siguiente tabla.

ED							Diferencia costos [ED,EA] \$/año
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	
6	67.9665631	5750.577263	791486096.06	5682.6107		0.135857397	-1324095.89
24	68.0985657	5750.707871	791486096.06	5682.609305		0.140547397	-1324095.89
Wb1	0.130608	0.130608	0.00	0			0.00
EA							
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	
6	68.6005368	5888.944024	792810191.9	5820.343488		0.089213635	
24	68.7565231	5889.098596	792810191.9	5820.342073		0.086223635	
Wb1	0.15457167	0.154571667	0	0			

Tabla 4.40 Diagnóstico Exergético de flujos bombas de condensado

La diferencia de un estado a otro es el costo económico del flujo, existe una diferencia mejor para el ED ya que el flujo que maneja es un poco menor respecto al EA. Esto se puede comprobar con la energía suministrada al motor de la bomba o Wb1 siendo mayor para el EA.

## Divisor de flujo 2

Este divisor es simplemente el cabezal de las bombas de condensado anterior a la llegada hacia la torre de enfriamiento. Se unen ambas salidas de los flujos para mantener interconectadas las bombas de condensado en tal caso de que una se averíe o tenga que salir por alguna inspección o mantenimiento.



Figura 4.41 Diagrama de flujos Divisor de flujo

Se tiene la llegada de los flujos 24 y 25 de las bombas de condensado para subir el agua hacia la torre de enfriamiento. El flujo 8 es la suma de estos dos flujos con propiedades termodinámicas casi iguales en lo que presión y temperatura se refiere. Pueden ser consultados en la tabla de Anexos.

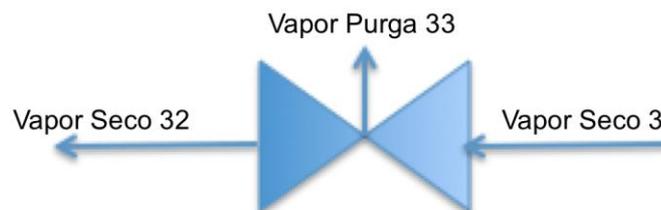
ED							Diferencia costos [ED,EA] \$/año
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	
8	135.382195	11501.41574	1582972192.11	11366.03355		0.814935872	-2648191.78
24	68.0985657	5750.707871	791486096.06	5682.609305			-1324095.89
25	68.0985657	5750.707871	791486096.06	5682.609305			-1324095.89
EA							0
8	137.513046	11778.19719	1585620383.90	11640.68415			
24	68.7565231	5889.098596	792810191.95	5820.342073			
25	68.7565231	5889.098596	792810191.95	5820.342073			

**Tabla 4.42 Diagnóstico Exergético de flujos Divisor de flujo**

El divisor de vapor anterior no juega un papel determinante dentro del proceso. Sin embargo tiene un mejor desempeño dentro del sistema para el ED siendo menores los costos exergéticos y exergoeconómicos. La diferencia es que para el ED se tiene exergía no utilizada.

### Válvula

Este dispositivo es simbólico pero hace referencia a las válvulas de paro y de control anteriores al acceso de vapor hacia la turbina. Las válvulas de paro son dispositivos de seguridad, cualquier problema que se tenga en la unidad eléctrica o mecánicamente estas cerrarán impidiendo la entrada de vapor hacia la turbina y evitando que continúe girando. La válvula de control también es de seguridad pero principalmente es para regular la cantidad de vapor hacia la turbina o en su defecto regular la presión de vapor a la entrada. Por diseño ambas válvulas deben de estar abiertas al 100% en el modo operativo normal.



**Figura 4.43 Diagrama de flujos Válvula**

El flujo 3 es el que proviene del secador de vapor y el flujo 32 es el vapor que ingresa a la turbina. El flujo 33 es el remanente de vapor disipado al momento de interactuar con las válvulas de paro y la válvula de control. El desempeño exergético se muestra a continuación para este equipo:

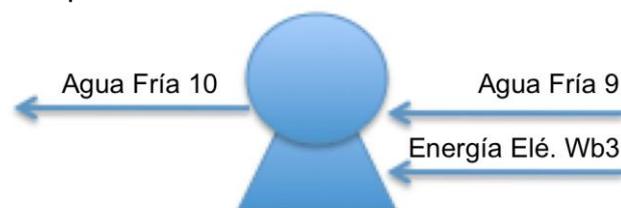
ED							Diferencia costos [ED,EA] \$/año
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	
3	132.02	133.2718308	18581624.61	1.251830757		0.178871585	175406.46
32	131.61	133.2718308	18581624.61	1.661830757			175406.46
33	0.23	0	0.00	0			
EA							0
3	133.75	135.0008681	18406218.15	1.252820916			
32	133.513027	135.0008681	18406218.15	1.487841446			
33	0.23502053	0	0				

**Tabla 4.44 Diagrama de flujos Válvula**

Los flujos de un estado a otro no tienen un cambio relevante dentro del sistema. Para el equipo se observa que el EA tiene mejor desempeño aunque la exergía y costo exergético es mayor, la irreversibilidad es menor y no tiene “destrucción” de exergía. Es un equipo de mantenimientos predictivos y preventivos menores sin embargo no dejan de ser parte importante del proceso. Este análisis muestra que el EA tiene un mejor comportamiento posterior al mantenimiento que se le haya realizado lo que significa que algo cambió para el equipo, un mal mantenimiento a las válvulas, procedimiento de cierre incorrecto, material inapropiado etc. Muchas veces estas circunstancias pueden ocasionar que un equipo trabaje mejor antes que cuando se le realizó mantenimiento.

### Bombas enfriamiento de Auxiliares

Las bombas de enfriamiento de auxiliares tiene la finalidad de alimentar de agua, de la torre de enfriamiento, a los enfriadores del generador y de aceite que son de contacto superficial.



**Figura 4.45 Diagrama de flujos BBA Enfriamiento de Auxiliares**

A este equipo se tiene el ingreso de agua fría proveniente de la torre de enfriamiento, el flujo 9, y la salida del agua hacia los equipos de enfriamiento de auxiliares, el flujo 10. De igual manera que a un motor, a este se le suministra una corriente eléctrica representada por el Wb3. La energía de todo el sistema es obtenida del proceso de generación. El desempeño exergético para ambos estados es como se muestra:

ED							Diferencia costos [ED,EA] \$/año
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	
9	1.69176139	609.790255	83925342.61	608.0984936		0.004480333	-21581470.35
10	1.70670306	609.809677	83925342.61	608.102974			-21581470.35
Wb3	0.019422	0.019422	0.00	0			0.00
EA							
9	2.15	783.7350724	105506813	781.5811667			0
10	2.17292903	783.7540957	105506813	781.5811667			
Wb3	0.01902333	0.01902333	0	0			

**Tabla 4.46 Diagnóstico Exergético BBA Enfriamiento Auxiliares**

La energía eléctrica que se le suministra al motor de la bomba de agua es prácticamente la misma para ambos estados. La diferencia es de 300 kW aproximadamente. El aspecto importante es el costo exergético y la irreversibilidad de los flujos de este equipo. Existe una diferencia exergética 0.46 MW para ambos flujos y un costo exergético menor en 174 MW del ED respecto al EA, así como la irreversibilidad de los flujos. Esto significa que el ED tiene mejor sistema de enfriamiento ó que la temperatura en el generador y aceite es mayor en el EA. En la tabla de propiedades de los Anexo los flujos 9 y 10 para el ED son de 74.7 kg/s, mientras que el agua que utiliza el EA es de 95.1 kg/s. El sistema de enfriamiento en el EA es más demandante por el grupo de vacío que es más intenso. El costo exergoeconómico es mejor para el ED, si se logra disminuir el agua de enfriamiento de auxiliares representaría económica y energéticamente avance en la eficiencia ya que también disminuye la carga térmica en el condensador principal.

### **Divisor de Flujo**

El objetivo del siguiente dispositivo es el de suministrar el agua para los sistemas de enfriamiento del generador, aceite y grupo de vacío.



**Figura 4.47 Diagrama de flujos Divisor de vapor**

El flujo 10 es el que llega de la bomba de enfriamiento de auxiliares, el flujo 30 y 31 es el que ingresa para el enfriamiento de aceite y del generador respectivamente y el flujo 26 es de enfriamiento y sello para el grupo de vacío. Cuyos parámetros operativos se observan a continuación:

ED							Diferencia costos [ED,EA] \$/año
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	
10	1.70670306	609.809677	83925342.61	608.102974		0.001654306	-21581470.35
26	1.0349084	370.1343754	50939916.89	369.099467			-21974394.38
30	0.10098092	36.11576717	4970449.38	36.01478625			59208.24
31	0.56915943	203.5595344	28014976.33	202.990375			333715.79
EA							0.005484278
10	2.17292903	783.7540957	105506813	781.5811667			
26	1.49789134	541.6417054	72914311.28	540.143814			
30	0.10089248	36.48300288	4911241.143	36.3821104			
31	0.56866093	205.6293875	27681260.54	205.0607265			

**Tabla 4.48 Diagnóstico Exergético de Divisor de vapor**

En la tabla anterior se observa un mejor desempeño para el ED, el costo exergético es menor para cada flujo, la irreversibilidad de los flujos también es mejor. Lo destacable es el análisis económico, como el ED tiene un mejor enfriamiento en los flujos 10 y 26 se muestra el posible ahorro. Mientras que los flujos 30 y 31 son más caros en el ED y esto se debe a que se tiene un mayor intercambio de calor en los sistemas auxiliares de enfriamiento.

### Enfriador de aceite

El enfriador de aceite tiene la función de mantener la en un rango adecuado la temperatura de aceite de lubricación de las chumaceras. Para ello utiliza agua ya enfriada de la torre de enfriamiento.



Figura 4.49 Diagrama de flujos enfriador de aceite

A la llegada del enfriador el flujo 30 de enfriamiento de auxiliares y la salida el flujo 17 ya una vez hecho el intercambio de calor de manera superficial.

ED							Diferencia costos [ED,EA] \$/año
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	
17	0.20486288	36.11576717	4970449.38	35.91090429		-0.21483552	59208.24
30	0.10098092	36.11576717	4970449.38	36.01478625			59208.24
EA							
17	0.22213062	36.48300288	4911241.143	36.26087226		-0.25072081	
30	0.10089248	36.48300288	4911241.143	36.3821104			

Tabla 4.50 Diagnóstico Exergético Enfriador de aceite

El costo exergético y la exergía de cada flujo en el ED y EA es menor para el 17 y mayor para el 30. En el caso de la “destrucción” de exergía el signo negativo representa el intercambio de calor efectuado por el proceso de enfriamiento, el flujo al entrar al equipo y al salir de este gana temperatura por ello la razón del signo negativo.

### Enfriador del Generador

La función de este equipo es el enfriamiento de los devanados del generador por contacto superficial.



Figura 4.51 Diagrama de flujos enfriador del generador

La entrada al equipo es el flujo 31 de enfriamiento de auxiliares y el flujo 15 que es el agua utilizada en el enfriamiento. La siguiente tabla muestra los parámetros operativos:

ED							Diferencia costos [ED,EA] \$/año
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Eficiencia equipo	Destrucción [MW]	
15	1.15442077	203.5595344	28014976.33	202.4051137		-1.21038033	59208.24
31	0.56915943	203.5595344	28014976.33	202.990375			59208.24
EA							
15	1.15442077	205.6293875	27681260.54	204.4749667		-1.21137733	
31	0.56866093	205.6293875	27681260.54	205.0607265			

Tabla 4.52 Diagnóstico Exergético enfriador del generador

El intercambio de calor en el generador es similar de un estado a otro no representa un impacto significativo dentro del proceso.

### Divisor de Flujo 5

La finalidad del dispositivo es juntar el flujo que proviene del enfriador de aceite y del enfriador del generador para posteriormente reintegrarlo a las piletas de la torre de enfriamiento.



Figura 4.53 Diagrama de flujos Divisor de flujo

Al divisor de flujo llega el agua de enfriamiento de auxiliares 26 y la salida del flujo 12 de enfriamiento hacia el grupo de vacío y el flujo 11 de enfriamiento del interenfriador.

ED							Diferencia costos [ED,EA] \$/año
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Destrucción [MW]		
11	0.85408654	308.0287271	42392597.94	307.1746406	0.008618444	-20382566.38	
12	0.17220341	62.10564827	8547318.95	61.93344486		-1591828.01	
26	1.0349084	370.1343754	50939916.89	369.099467		-21974394.38	
EA							
11	1.27875283	466.3233659	62775164.32	465.0446131	0.012600409		
12	0.2065381	75.31833947	10139146.96	75.11180138			
26	1.49789134	541.6417054	72914311.28	540.143814			

Tabla 4.54 Diagnóstico Exergético Divisor de flujo

La diferencia del análisis exergético de ED al EA indican que el grupo de vacío para el EA requiere más recurso energético. El ahorro es significativo de un estado a otro si se tratan de igualar las condiciones del ED.

### Bomba de Vacío

El grupo de vacío tiene la función primordial de extraer los gases incondensables del condensador y del interenfriador. Para ello tiene como equipos de apoyo el eyector, interenfriador, bombas de vacío y separadores. Todos estos equipos conforman el grupo de vacío.

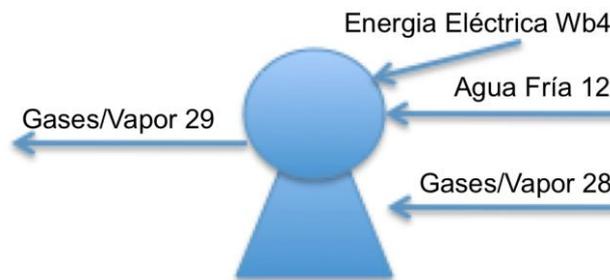


Figura 4.55 Diagrama de flujos Divisor de flujo

El flujo 12 es para enfriamiento de la chumacera de la bomba de vacío y un flujo mayor de agua es para realizar un sello de agua en la bomba de vacío. El flujo 28 es la mezcla de gases y vapor del intercondensador, el flujo 29 son los gases incondensables de todo el sistema. Wb4 representa la energía eléctrica suministrada a los motores de las bombas de vacío. El análisis exergético de los flujos tiene los siguientes parámetros:

ED						
Flujo	Exergia [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Destrucción [MW]	Diferencia costos [ED,EA] \$/año
12	0.17220341	62.10564827	8547318.95	61.93344486	0.029903724	-1591828.01
28	2.48202275	218.92308	30132391.46	216.4410573		-16344191.66
29	3.52432244	281.9287283	38679710.41	278.4044058		-17936019.66
Wb4	0.9	0.9	0.00	0		0.00
EA						
12	0.2065381	75.31833947	10139146.96	75.11180138	0.379931863	
28	3.81807664	345.2172111	46476583.12	341.3991345		
29	4.48843287	421.3793006	56615730.08	416.8908677		
Wb4	0.84375	0.84375	0	0		

Tabla 4.56 Diagnóstico flujos Divisor de flujo

El sistema de vacío para el ED requiere de menos recurso para cumplir su función que el EA. La “destrucción” de exergía es evidentemente mayor para el EA. El análisis económico también es congruente con los resultados, el posible ahorro económico de un estado a otro con un mantenimiento especializado para este sistema es demostrado.

### Interenfriador

El interenfriador recibe la mezcla de vapor y gases incondensables que descargan los eyectores, la función es condensar el vapor y liberar los gases incondensables para que posteriormente sean extraídos por las bombas de vacío.

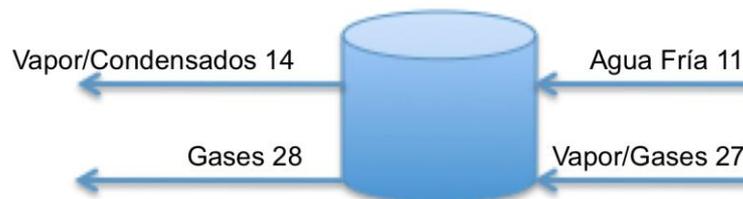


Figura 4.57 Diagrama de flujos Interenfriador

El flujo 11 es el agua fría como recurso del interenfriado para que por contacto superficial el vapor sea condensado, el flujo 14 es una mezcla de vapor y agua caliente mayoritariamente de agua hacia el condensador, el flujo 27 son los gases y vapor provenientes de los eyectores y el flujo 28 son los gases extraídos del intercondensador y condensador hacia las bombas de vacío para su posterior disipación a la atmósfera.

ED						
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Destrucción [MW]	Diferencia costos [ED,EA] \$/año
11	0.85408654	308.0287271	42392597.94	307.1746406	0.06358611	-20382566.38
14	3.90831111	344.7266976	47447897.23	340.8183865		-21730831.58
27	5.59983342	255.6210505	35187690.75	250.0212171		-17692456.85
28	2.48202275	218.92308	30132391.46	216.4410573		-16344191.66
EA						
11	1.27875283	466.3233659	62775164.32	465.0446131	0.208444174	
14	5.68307028	513.8434502	69178728.8	508.16038		
27	8.43083826	392.7372955	52880147.6	384.3064572		
28	3.81807664	345.2172111	46476583.12	341.3991345		

Tabla 4.58 Diagnóstico Exergético Interenfriador

El análisis exergético muestra que para el ED la exergía de los flujos y el costo exergético es menor, principalmente debido a que utiliza menos recurso de agua e ingresa menos cantidad de vapor y gases hacia este. La destrucción de exergía evidentemente es mayor para el EA y el análisis económico muestra un mejor desempeño. La conclusión es que el ED tiene mejor respuesta de condensación con la cantidad de flujo que le envía los eyectores, además de que requiere de menor cantidad de agua fría para este propósito. En este punto es importante verificar el sistema de enfriamiento del intercondensador y condensador, específicamente que la tubería se encuentre libre de lodos o acumulados sólidos que estén impidiendo o dificultando el flujo de agua de enfriamiento y extracción de gases.

## Separadores

La función del separador es precisamente separar los gases incondensables de la remanente mezcla de agua y vapor utilizada para el sello de agua de las bombas de vacío y enfriamiento de la chumacera de la bomba. El separador envía los gases incondensables hacia los ventiladores de la torre de enfriamiento para su disipación en la atmósfera.



Figura 4.59 Diagrama de flujos Separadores

El flujo 13 son gases incondensables hacia la atmósfera, el flujo 20 es el agua utilizada en las bombas de vacío y el flujo 29 son los gases extraídos de las bombas de vacío.

ED						
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Destrucción [MW]	Diferencia costos [ED,EA] \$/año
13	2.56731887	0	0.00	-2.567318868	0.522592178	0.00
20	0.43441139	281.9287283	38679710.41	281.4943169		-17936019.66
29	3.52432244	281.9287283	38679710.41	278.4044058		-17936019.66
EA						
13	3.88322756	0	0	-3.883227556	0.012853535	
20	0.59235178	421.3793006	56615730.08	420.7869488		
29	4.48843287	421.3793006	56615730.08	416.8908677		

Tabla 4.60 Diagnóstico Exergético Separadores

De igual manera que para el interenfriador, el recurso utilizado para la extracción de gases tiene un mejor desempeño en el ED, el ahorro económico de un estado a otro es posible si se mejoran las condiciones de enfriamiento en condensador e intercondensador.

### Generador Eléctrico

El objetivo del generador eléctrico es transformar la energía mecánica que realizó la turbina al girar acoplada a un rotor por el que se le induce una corriente eléctrica que a su vez produce un campo magnético cuyo campo es cortado en el estator del generador.



Figura 4.61 Diagrama de flujos Generador Eléctrico

$W_m$  representa el trabajo mecánico hecho por la turbina y  $W_e$  representa el trabajo eléctrico realizado por el generador. Con el siguiente desempeño:

ED						
Flujo	Exergía [MW]	Costo Exergético [MW]	Costo Exergo económico [MW]	Irreversibilidad [MW]	Destrucción [MW]	Diferencia costos [ED,EA] \$/año
$W_m$	26.64	27.2853164	3804296.11	0.645316396	0.14	-80139.58
$W_e$	26.5	27.2853164	3804296.11	0.785316396		-80139.58
EA						
$W_m$	27.84971	28.49049085	3884435.686	0.640780851	3.10311	
$W_e$	24.7466	28.49049085	3884435.686	3.743890851		

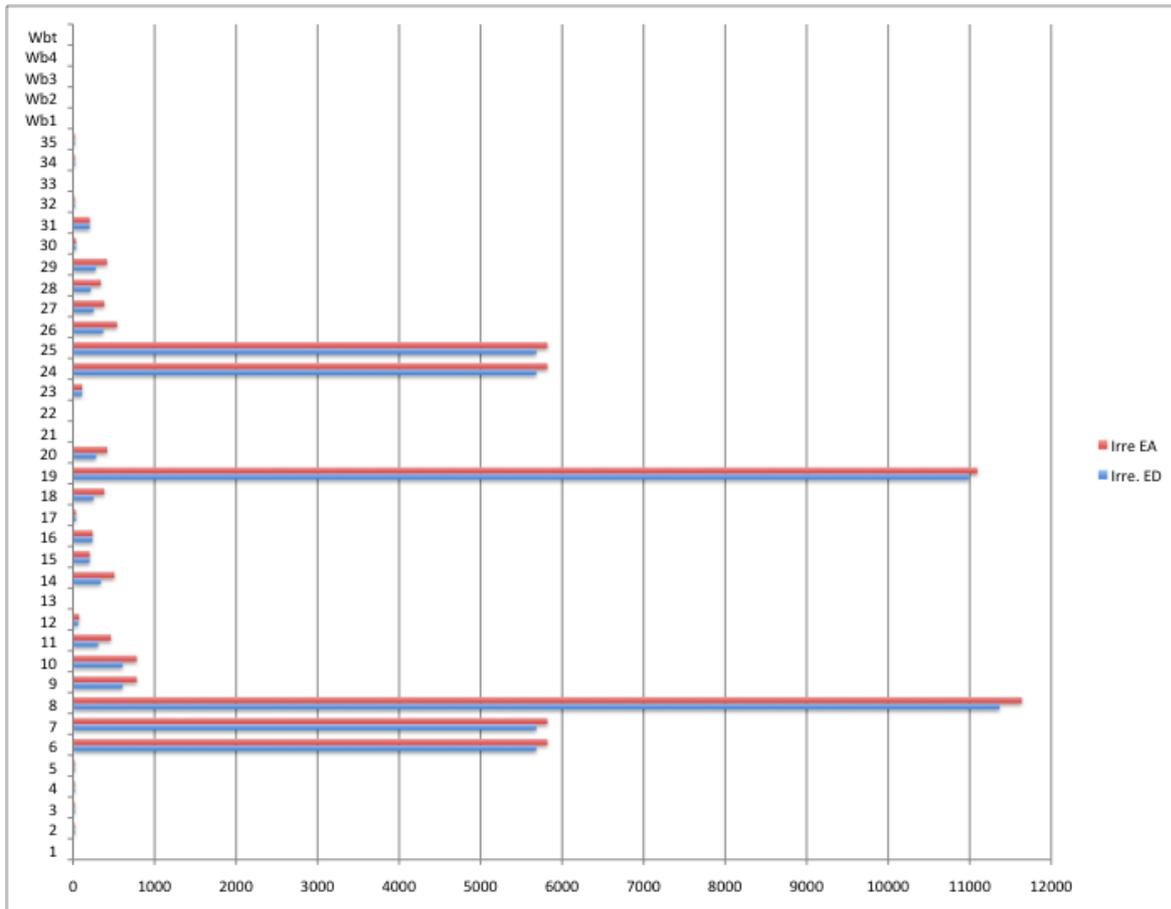
Tabla 4.62 Diagnóstico Exergético Generador Eléctrico

En el caso del generador eléctrico, a pesar de que para el ED los flujos exergéticos son menores, la generación de energía es mayor se tiene mayor aprovechamiento de estos flujos en el generador eléctrico. El problema no es en el generador eléctrico ya que la generación puede limitarse si no se tienen las condiciones de temperatura, vacío, etc. Dentro del sistema. En análisis previos se ha comprobado que el sistema con mayor diferencia es el sistema de vacío y enfriamiento de auxiliares que van prácticamente de la mano junto con el sistema de condensado. La mejora económica es importante pues con el ED se tienen 2.7 MW cada hora más de producción que en el EA lo que aproximadamente representa 3 mil pesos con los precios de venta de generación cada hora.

#### **4.2 Irreversibilidad del sistema**

En términos termodinámicos, la irreversibilidad se refiere a que todos los procesos naturales son irreversibles en el tiempo. En el proceso geotérmico para la generación de energía eléctrica se tienen flujos en diferentes estados termodinámicos que interactúan dando como resultado otros flujos en otro estado termodinámico. Durante esta interacción la estructura atómica de cada estado cambia y para cada cambio existe cierta energía de transformación derivada de la interacción molecular como calor, rozamiento atómico, colisiones, etc. Esta entropía del sistema será mayor a razón de las condiciones de los estados termodinámicos.

La gráfica siguiente muestra la irreversibilidad de cada flujo del proceso es EA y ED en MW.



**Figura 4.63 Irreversibilidad de los flujos**

De acuerdo con la gráfica se puede observar que ambos procesos son consistentes con la cantidad de irreversibilidad en sus flujos, tienen el mismo patrón para cada uno de ellos. Los flujos con mayor entropía en ellos son el flujo 6 y 7, agua condensada caliente a la salida del condensador, el flujo 8 es la suma de los flujos 6 y 7 posteriores a las bombas de agua de condensado. El flujo 9 y 10 es agua de enfriamiento de auxiliares hacia enfriadores de aceite, generador y grupo de vacío. El flujo 19 es el de enfriamiento hacia el condensador y flujo 24 y 25 también es de agua a la salida del condensador.

Por cantidad de irreversibilidad en los flujos anteriores descritos, el sistema de condensado es el primero, resultado esperado debido a que precisamente la función del condensador es bajar la capacidad térmica del flujo utilizado en la turbina. Destacan entonces los sistemas de agua de enfriamiento de

auxiliares y el agua de enfriamiento de la torre de enfriamiento hacia el condensador. Las tablas con mayor detalle de irreversibilidad por sistema pueden consultarse en los Anexos.

### **4.3 Índices energéticos y económicos para la toma de decisiones en los sistemas de mantenimientos**

Para la modificación o implementación de nuevas actividades de mantenimiento en la metodología existente, se cuenta con tres indicadores del análisis exergético: La exergia, el costo exergético y el costo exergoeconómico.

La exergia tiene la facultad de mostrar los equipos que pierden energía y que podría seguir siendo utilizada. El costo exergético va en función de lo que le cuesta al proceso producir un bien o un flujo pero energéticamente hablando. Y finalmente el costo exergoeconómico que tiene la propiedad de mostrar el costo de cada flujo del proceso en función del costo de sus insumos primarios externos al proceso.

Estos tres elementos ayudarán previo a la programación de mantenimientos ya que se tendrá información detallada de cada flujo y equipo en tiempo real o de manera estadística se podrán comparar con diferentes escenarios productivos.

El primer indicador muestra la cantidad de energía no utilizada de cualquier flujo para cada equipo del proceso. Los equipos que tengan mayores pérdidas de exergia destruida son candidatos para su revisión en mantenimiento mayor programado como MM. Mientras que los equipos de los procesos secundarios serán puestos como mm.

El siguiente indicador, costo exergético, es una excelente herramienta para conocer el costo energético de la energía eléctrica en función de la energía

que fue invertida para su obtención. Este indicador tiene el mismo objetivo que el que emplea comúnmente CFE con el análisis de régimen térmico (kcal/kWh, el vapor que se invierte sobre la cantidad de energía eléctrica producida). Sin embargo este indicador pasa por alto la energía que el flujo térmico tiene que ceder para pasar de un estado termodinámico a otro. Principio que el análisis exergético respeta, por tal motivo éste análisis es más apropiado a la hora de evaluar el rendimiento de cada flujo en el proceso.

La figura 3.23 muestra aquellos flujos que tienen posibilidad de que su costo energético sea menor al actual y además que tienen relevancia específica dentro del proceso, esto es que la cantidad de energía que cargan sus flujos es considerablemente mayor al resto. Por ello la clasificación de mantenimientos e inspección puede fácilmente comenzar con estos flujos. El análisis es muy consistente con el estado actual, anteriormente, en base a la experiencia se sabía que varios flujos como el 1, 6, 7 y 19 (vapor principal, salidas del condensador y de torre de enfriamiento a condensador respectivamente), influyen de manera directa en la generación de energía eléctrica y un cambio energético en ellos (temperatura, presión, entalpía, etc) tiene mucho impacto dentro del proceso. En mantenimientos anteriores frecuentemente la anomalía o deficiencia del proceso era por el cambio de estado termodinámico de estos flujos ocasionado por desperfectos o averías de los equipos. Sin embargo no se tenía conocimiento o cálculos de lo que energéticamente representaba cada uno de ellos para el proceso general. Ahora con el análisis de costos exergéticos es más sencillo plantear una programación de mantenimiento. Los flujos que necesitan un MC en referencia a su decremento o exergía “destruida” en referencia a los EA y ED serán evidentes, pero se puede hacer mucho antes de llegar a una situación así. Los mantenimientos preventivos y predictivos deben de considerar mucho este análisis antes de que sea necesario parar la unidad y hacer todo el procedimiento de un MM.

Por último los costos exergoeconómicos del proceso se conocen a partir del costo exergético de los flujos. El costo económico de cada flujo es en

referencia al costo como insumo, en este caso el vapor a la entrada del proceso. De acuerdo con el departamento de instrumentación y control y de análisis y resultados de CFE, el costo del insumo a la entrada (flujo 1 de vapor) resultó ser de 0.7071026 Pesos/Seg, este precio se coloca en el vector de costo de insumos y para obtener los costos de cada flujo en función de sus insumos se multiplica este vector por la matriz inversa del sistema F-P. El resultado como claramente se puede ver en la tabla 3.13, es del costo económico de todos los flujos en función del primero (flujo 1). Aquellos flujos que representan elevados costos deben tener un continuo monitoreo dentro del proceso.

Uno de los flujos de referencia tiene que ser el que produce la energía eléctrica (flujos 34 y 35). Para este caso fue de 0.1447 pesos/seg en el EA y para el ED fue de 0.1417 pesos/seg. Lo que habla de que realmente existe ahorro económico en la producción, si el sistema se encuentra a su capacidad nominal y operativamente normal. En el caso del sistema de enfriamiento el flujo más representativo es el 19 cuyo precio de un estado a otro varía aproximadamente 0.71 pesos/seg. La tabla que se muestra abajo es de acuerdo con datos proporcionados por el Dpto. de Análisis y Resultados de la CFE. Se trata de los costos de un mantenimiento mayor para la unidad 13 cuyos costos desglosados pueden consultarse en la tabla de Anexos.

EQUIPO	COSTO DE MANTENIMIENTO MAYOR	COSTO POR SEGUNDO [\$/Seg]
Secador de vapor	\$410,355.07	\$0.006506
Divisores de Vapor	\$267,055.79	\$0.004234
Turbina	\$794,942.15	\$0.012604
Condensador	\$96,200.00	\$0.001525
Torre enfriamiento	\$502,393.60	\$0.007965
Eyectores	\$39,444.68	\$0.000625
Bombas Condensado	\$19,575.64	\$0.000310
Bomba Enfr. Aux	\$62,162.79	\$0.000986
Enfriadores	\$24,314.37	\$0.000386
Interenfriador	\$111,795.09	\$0.001772
Bomba vacío	\$11,359.98	\$0.000180
Separador	\$23,322.00	\$0.000370
Valvula	\$20,673.45	\$0.000328
Generador	\$2,884,607.16	\$0.045735
<b>TOTAL</b>	<b>\$5,268,201.78</b>	<b>\$0.08</b>

Figura 4.64 Costo de Mantenimiento por equipos

De la siguiente tabla se observa que el mantenimiento que requiere de mayor inversión es para el generador, siguiéndole la turbina y posteriormente la torre de enfriamiento. En el caso del Generador el elevado costo no significa que se encuentre dañado, es costoso el desmontaje, montaje, revisión del sistema de excitación, pruebas eléctricas, hermeticidad, etc. Si el mantenimiento se realizó con dos años de diferencia respecto al anterior, al final nos resulta un costo por mantenimiento de \$ 0.08 pesos/seg. Si el costo del flujo We es de \$ 0.1417 pesos/seg. La diferencia es de \$ 0.0617 pesos/seg a favor de este flujo de energía. Significa entonces un mantenimiento mayor sustentable. Una parte importante de este análisis es la facilidad con que se puede determinar la sustentabilidad de un mantenimiento mayor.

#### **4.4 Apoyo a la metodología de mantenimiento**

El análisis anterior exergético y económico aporta la suficiente información para plantear actividades estratégicas de los equipos primarios, con posibilidad de mejora y secundarios como para que en base a ello y la experiencia que se tiene operativamente de la unidad, en apoyo con los diferentes departamentos involucrados en los procedimientos de mantenimiento Mayor (MM) y menor (mm), se puedan implementar nuevas actividades de mantenimiento en la metodología que CFE ya tiene.

Actividades previas al procedimiento de mantenimiento

Este tipo de actividades son importantes porque el objetivo es que el mantenimiento en su versión MM ó mm esté focalizado hacia los equipos y flujos, que en base al análisis, presenten mayor complicaciones en su modo operativo preventivo. Lo siguiente es el procedimiento común que CFE aplica en mantenimientos menores o mayores.

## Inicio del Mantenimiento

1. Solicitud de registro para la salida de unidad de mantenimiento ante el CENACE (autorización y registro)
  - ⌘ Revisión de equipos pendientes en mejora con poco impacto dentro del proceso y estudios de termografía (*15 días de anticipación y previa autorización*). Con la finalidad de tener un panorama de referencia de las condiciones operativas de la unidad y el análisis de actividades estratégicas para el mantenimiento en equipos secundarios del proceso.
  - ⌘ Implementación del método exergético. Identificación de equipos y flujos. Primer diagnóstico de exergía perdida en equipos y flujos respecto a un ED. Los resultados anteriores muestran por ejemplo al secador de vapor, condensador, torre de enfriamiento, turbina, generador y eyectores como los principales equipos con diferencia significativa del EA.
2. Reunión de la superintendencia general con las áreas de producción y mantenimiento (*en la reunión deberá presentarse el organigrama que se aplicará durante el mantenimiento*)
3. Toma de lecturas y parámetros de la unidad a diferentes cargas (*25%, 50%, 75% y 100% para registrar el estado operativo de equipos principales y auxiliares y tener una comparación pre y post mantenimiento*)
  - ⌘ Toma de lecturas y parámetros de la unidad a diferentes cargas. Evaluación exergética y económica en cada carga (50, 75 y 100% de carga de diseño) y realizar una comparativa pre y post mantenimiento con la intención de conocer el rango posible de mejora o ineficiencia de cada equipo y flujo.
  - ⌘ Obtener los costos económicos y energéticos con la unidad en diferentes cargas para conocer si en verdad el mantenimiento disminuyó la energía perdida y mejoró la relación Recurso-Producto del equipo y la unidad en general. En este caso el costo exergético y económico resulta ser mejor en un ED que estado actual, así quedo demostrado en

este análisis la diferencia de uno y otro y los posibles flujos con mejora continua y de mayor impacto hacia la eficiencia energética.

- ⌘ Verificación de la eficiencia exergética de la unidad como indicador de apoyo en la evaluación operativa de la unidad y como su eficiencia en EA se debe de acercar a su ED. En este ejercicio la eficiencia del EA fue del 18% mientras que para el ED fue del 21%. Existe mejoría, además es un indicador importante para la salud de la planta.

### **Salida de la unidad a mantto.**

4. Realizar las pruebas periódicas programadas anuales de la unidad de acuerdo a los procedimientos ya establecidos.
  - ⌘ Aplicación del método exergético para la correcta evaluación del proceso productivo
5. Iniciar el descenso de carga hasta un 25%, operando la unidad en automático y en arco parcial.
  - ⌘ Con registradores digitales, medir las propiedades termodinámicas de los flujos del sistema productivo hasta el descenso completo de carga
6. Conforme se baje carga deberá mantenerse la presión constante y a partir del 50% de carga deberá disminuirse paulatinamente la presión y temperatura del vapor hasta el mínimo valor recomendado por el fabricante. Y continuar con el decremento hasta el 25% de carga
  - ⌘ Asegurar que el enfriamiento en equipos primarios (torre de enfriamiento, condensador, turbina, etc) haya concluido para continuar con el descenso de carga hasta poner fuera a la unidad con el objetivo de tener “fríos” los equipos y dar paso a las actividades técnicas de chequeo y reparación.
  - ⌘ Determinar tiempos de mantto. Para cada equipo del proceso, realizar un programa de actividades con la intención de cubrir las necesidades de la unidad en el menor tiempo posible

## **Actividades durante el mantenimiento**

En forma conjunta las áreas de producción y mantenimiento, se realizarán recorridos de inspección por los distintos sistemas y equipos de interés con el propósito de evaluar en forma preliminar la severidad de los efectos de la operación a los que fueron sometidos, asentando en un reporte lo más relevante para efectuar un análisis detallado y programar las actividades correctivas necesarias durante el mismo mantenimiento, o bien posterior a este. Las especificaciones se deberán realizar sin contratiempos a fin de no retrasar los trabajos de mantenimiento un ejemplo de ello puede consultarse en los Anexos.

Los resultados arrojados del análisis exergético deben ser guía en la identificación de equipos y lazos de flujo cuya eficiencia y costo exergético hayan sido determinantes de un EA a un ED para la generación de energía eléctrica.

## **Actividades posteriores al mantenimiento**

Como alternativa de mejora continua, se plantean las siguientes actividades en apoyo a la estrategia de mantenimientos no correctivos. En común acuerdo con el departamento de instrumentación y control así como el de mantenimiento, las siguientes actividades en base a la experiencia son importantes para mantener un estado operativo y productivo conforme, el cual puede ser consultado en Anexos.

Se trata de las actividades posteriores a un mantenimiento programado. La unidad no puede tener la misma condición que cuando fue entregada la primera vez. Pero sí deberá de mostrar un estado de mejoría respecto a historial de su comportamiento. Para esto la aplicación de la teoría exergética determinará la mejoría en los equipos y la diferencia de eficiencias del estado anterior al actual. El estado operativo anterior debe ser comparado con el estado operativo después del mantenimiento, el presente estudio muestra

que la mejora existe y que el análisis exergético es una herramienta importante para utilizarla continuamente durante el proceso productivo de la unidad a fin de monitorear su estado termodinámico y económico.

### 5. Conclusiones

Muchas de las industrias ven al mantenimiento como una actividad ajena necesaria de recursos para arreglar el sistema defectuoso. Cuando el sistema de mantenimientos es un importante factor en la vida útil de la unidad y por lo tanto es una actividad económica importante del proceso y no externo a él. Y más aún será cuando las actividades y estrategias que se empleen sean apropiadas para cada equipo y flujo a través del método descrito en este trabajo.

La energía geotérmica es sumamente importante, cada día se reafirma como una de las mejores opciones en la generación de energía eléctrica por su relación costo vs producción. En México esta alternativa energética es la segunda mejor ubicada con esta relación, solamente detrás de la energía hidráulica. CFE despacha la energía generada geotérmicamente en segundo lugar y siempre es energía base en el sistema nacional de energía. Este es un claro parámetro de que la disponibilidad de ella es muy alta y de bajo costo en su obtención.

Actualmente existen muchas metodologías para la gestión de mantenimientos como six sigma, Lean, etc. Sin embargo en la industria geotérmica Mexicana no existe una metodología particular que se encargue de tomar en cuenta el proceso productivo. Las estrategias que se implementan son en base a la experiencia operativa y por recomendación de la empresa proveedora de la unidad en función de sus horas de operación. Existen sin embargo aplicaciones metodológicas para la eliminación de residuos en el proceso. El método exergético se convierte en una buena herramienta que apoyará considerablemente en las decisiones que tome la gerencia en cuanto a la evaluación productiva de cualquier unidad.

El MC, MP, MPd y MPa tienen que ser herramientas menos generales en la implementación a dichos mantenimientos. Estas estrategias tendrán la capacidad de revisar, identificar y aislar el problema para tratarlo apropiadamente ganando tiempo de respuesta e incluso anticipando comportamientos en el proceso. La gran mayoría de los problemas en mantenimiento para centrales geotérmicas, están relacionados con las propiedades químicas y físicas de sus flujos (Clety, 2008). Las características de estos flujos son factor esencial a la hora de planear, diseñar o aplicar un programa de mantenimientos.

El método exergético es utilizado para clasificar dos elementos primarios, los equipos y los flujos del proceso. La ventaja principal es que esta clasificación está evaluada por el rendimiento económico y energético de dichos elementos.

El mantenimiento y los costos productivos son parte significativa en la vida útil de la unidad y claramente en el costo final del producto. Un equipo, sistema o máquina tiene la cualidad primera de fallar, el mantenimiento debe de mantenerlo vivo operativamente hablando. Pero este objetivo se complica cuando la intervención de este es siempre correctiva. Con el transcurso del tiempo el problema no se elimina incluso incrementa su potencial.

La principal estrategia en la metodología de mantenimientos para plantas geotérmicas es el mantenimiento correctivo. Sin embargo no es herramienta suficiente para asegurar que la unidad se encuentre la mayor parte del tiempo operando a su capacidad nominal. La parte experimental que tiene la unidad es valiosa pero puede ser mejor si a ello se le agregan elementos que ayuden a facilitar la identificación de los problemas que tiene, puede tener o tendrá cualquier unidad productiva. El primer indicador que diagnostica adecuadamente el proceso es el vector de exergía destruida en el sistema. Esta conclusión se refuerza con el historial de análisis del sistema ya que se puede observar la evolución que tiene la entropía, conforma más va pasando el tiempo, la eficiencia de la unidad en operación debe tener una tendencia

hacia la baja. Sin duda la prioridad de un sistema de mantenimiento adecuado es que esta gráfica sea con la menor pendiente posible.

Otra gran herramienta de interpretación es el vector exergía de cada uno de los flujos en el sistema. Este indicador integra al conjunto de energías dentro del proceso lo que lo hace más sencillo para su comparación y monitoreo. Para finalmente introducir estas variables en el modelo económico descrito y tener otro indicador respecto a cuanto cuesta la producción de cualquier flujo dentro del sistema. Este trabajo pone las bases, ya con los flujos y equipos identificados y matricialmente ligados, para que se continúen utilizando estos indicativos pero ahora con el respectivo historial que se vaya generando.

La programación de mantenimientos tiene un fin sencillo. Los resultados del caso Azufres II tiene la facultad de mostrar el deterioro del proceso, los equipos primordiales y aquellos flujos dónde un cambio de estado termodinámico será impactante en la generación de energía eléctrica. Por ello el mantenimiento preventivo y predictivo deben ser la acción ejecutora de acuerdo a los resultados mostrados. Puntualmente se tiene el comportamiento de los equipos y los flujos, que serán tomados como parámetro seguro sobre la rutina de mantenimientos para aplicar al sistema según sea el caso y destinados a cada departamento de mantenimiento.

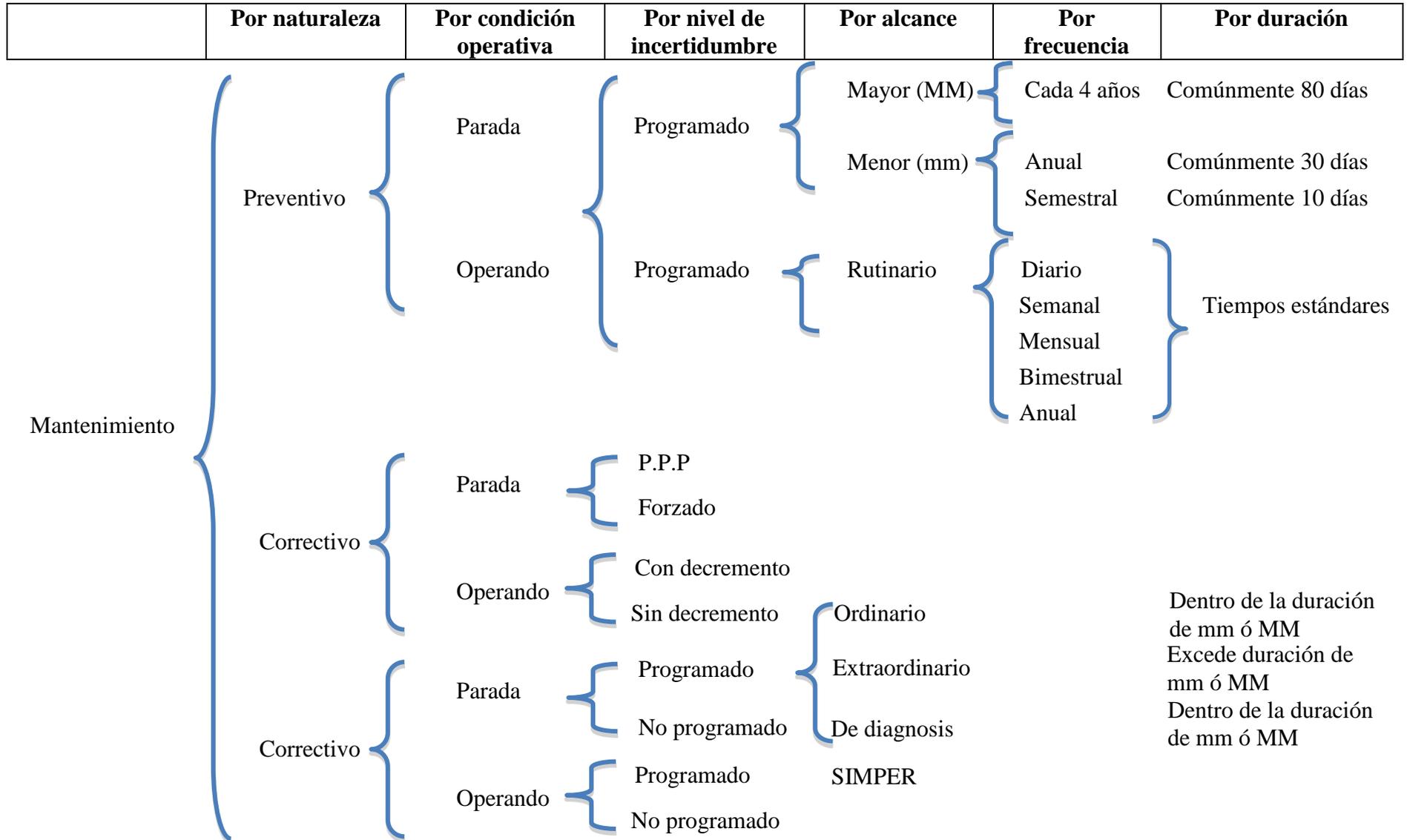
Cada flujo y cada equipo se encuentran relacionados y el modelo muestra su comportamiento a diferentes estados termodinámicos del flujo de trabajo. Este comportamiento resulta ser un parámetro primario para realizar mantenimientos predictivos y preventivos con la unidad en servicio y para aquellos equipos que puedan atenderse en esta condición. Cabe resaltar que el presente modelo o simulación integra los componentes principales del proceso y de los que se obtiene un análisis confiable como diagnóstico, así como también una visión acertada de la operación económica de la unidad en su ciclo productivo.

De esta manera se presenta el modelo termodinámico general y termoeconómico de la Unidad 13 en la central geotermoeléctrica los Azufres. El modelo permite simular el desarrollo económico y termodinámico tanto de la planta como de cada equipo que integra el proceso, de esta manera es posible monitorear cada parámetro del proceso y observar la influencia que tiene en otros. Comportamiento que a su vez puede ser simulado en el proceso sin la necesidad de sacrificar generación o vida útil de los equipos para realizar dichas pruebas. Otra aportación importante es que brinda parámetros para su aplicación práctica en la toma de decisiones en el aspecto operativo y de mantenimiento, herramienta útil a la hora de evaluar un estado operativo.

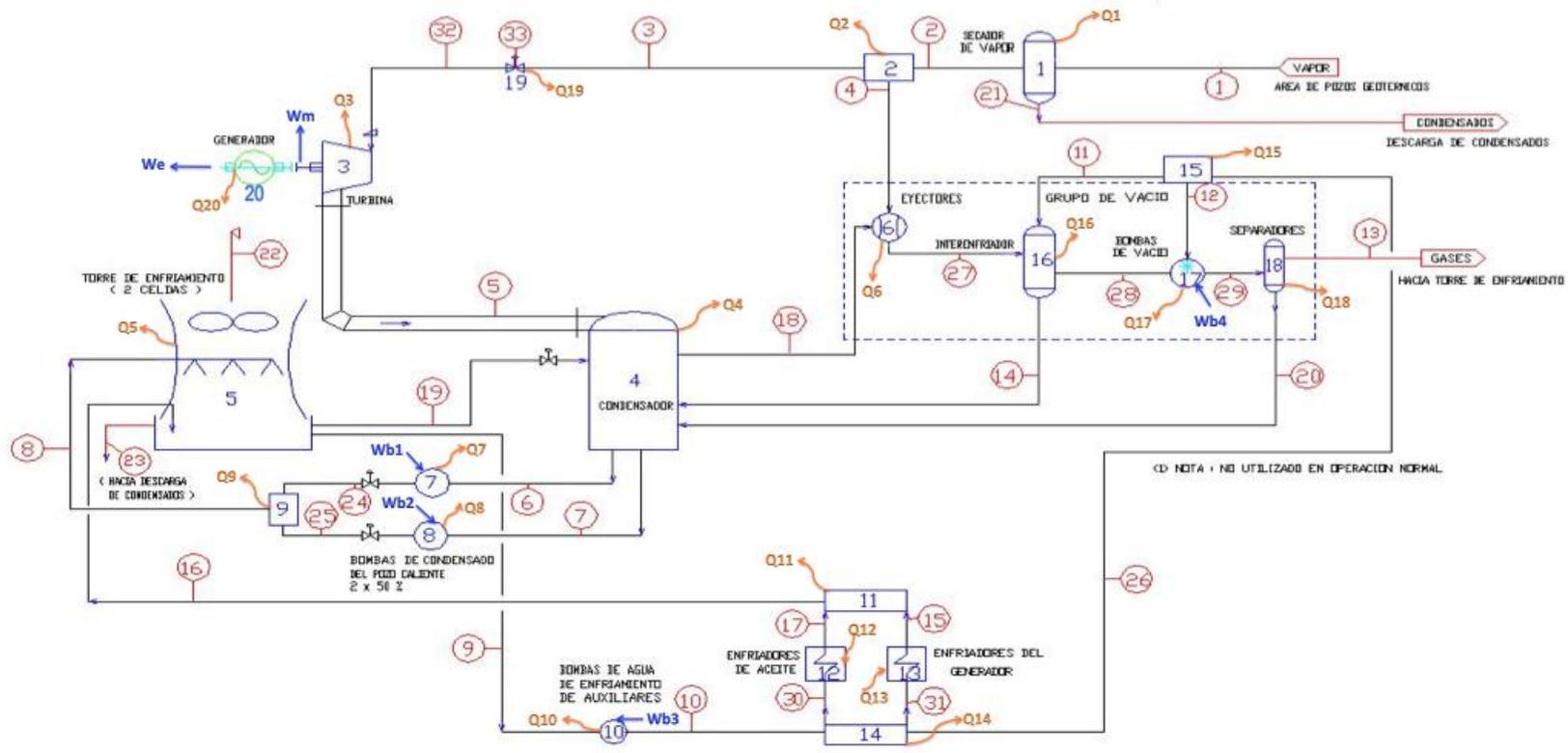
Este trabajo brinda las bases para simular el proceso productivo de la unidad ya que recoge datos y propiedades de cada flujo en cada paso del proceso, sin este control y monitoreo sería difícil el análisis anterior o el margen de error sería muy grande. Actualmente el presente análisis es aplicado en la central geotermoeléctrica los Azufres Unidad 13, apoyando en modelos focalizados de mantenimiento preventivo y predictivo que disminuyen los tiempos de mantenimientos correctivos o programados, de esta manera se aprovechen los recursos humanos y financieros con los que cuenta la planta.

## **ANEXOS**

1. Diagrama de mantenimientos



## 2. Diagrama del proceso



Dónde:

- \* Las Q's son los calores disipados en los equipos
- \* Los flujos están numerados del 1 al 33
- \* Las W's son trabajos obtenidos o consumidos en el sistema
- \* Los equipos están numerados del 1 al 20

3. de propiedades termodinámicas para el EA

Flujo	Gasto m[kg/s]	Presion [atm]	Temperatura [ C ]	Calidad x	Entalpia h[kJ/kg]	Entropia s[kJ/kg C]
AR	0	0.7275	19.22	0	80.741	0.2854
1	55.3916667	9	174.8	0.97	2712.5	6.4916
2	53.7777778	8.9	174.4	0.999	2771	6.6265
3	52.1666667	8	170.4	0.999	2767.1	6.6589
4	1.61111111	8	170.4	0.999	2767.1	6.6589
5	52.075	0.118	48.9	0.85	2240	7.0141
6	736.055556	0.41	43.03	0	180.23	0.6126
7	736.055556	0.41	43.03	0	180.23	0.6126
8	1472.11111	2.8	43.03	0	180.44	0.6125
9	95.1166667	1.01	25	0	104.96	0.3673
10	95.1166667	3.16	25	0	105.16	0.3673
11	56.7	0.5	25	0	104.87	0.3674
12	9.06944444	2.4	25	0	105.09	0.3674
13	1.66388889	0.7	37	1	2568.9	8.3152
14	58.65	0.27	43.98	0	184.17	0.6252
15	24.925	3.08	31	0	130.23	0.4505
16	29.3472222	2.56	31	0	130.18	0.4506
17	4.42222222	3.11	32	0	134.41	0.4643
18	1.95277778	0.112	29.74	1	2555.8	8.4596
19	1354.31944	0.319	25	0	104.89	0.3673
20	9.01944444	0.7	37	0	155.07	0.5322
21	1.61388889	8.9	174.8	0	740.29	2.0889
22	38.4	0.7	43.03	1	2579.7	8.2017
23	13.6222222	0.7	25	0	104.93	0.3673
24	736.055556	2.6	43.03	0	180.44	0.6125
25	736.055556	2.5	43.03	0	180.44	0.6125
26	65.7694444	2.5	25	0	105.09	0.3673
27	3.56388889	0.5	79	0.999	2640	7.6202
28	1.61388889	2.4	75	1	2635.3	7.6832
29	10.6833333	0.7	42	0.16	552.62	1.8021
30	4.42222222	2.8	25	0	105.13	0.3673
31	24.925	2.8	25	0	105.13	0.3673
32	52.075	7.5	170.4	0.999	2765	6.6757
33	0.09166667	8	174.4	0.999	2771	6.6265

La tabla de propiedades termodinámicas de la Unidad 13 de la geotérmica los Azufres, se obtuvo del monitoreo continuo de los operadores de esta unidad. Los parámetros no son constantes, dependen de la cantidad de vapor que se le esté suministrando a la unidad en ese momento. Sin embargo la tabla mostrada es un excelente referente del su estado operativo normal.

#### 4. Matriz de incidencias para el balance de materia (teoría de Grafos)

Equipo	Flujos																																	Vector Resultado				
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9	m10	m11	m12	m13	m14	m15	m16	m17	m18	m19	m20	m21	m22	m23	m24	m25	m26	m27	m28	m29	m30	m31	m32	m33	[t/h]				
Secador de vapor	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.66454E-15		
Divisor 1	2	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.15463E-14		
Turbina	3	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Condensador	4	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.55795E-13	
Torre de enfriamiento	5	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.62901E-13		
Eyectores	6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0		
Bomba 1	7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Bomba 2	8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Divisor 2	9	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bomba 3	10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Divisor 3	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.77636E-15
E. Aceite	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
E. Generador	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Divisor 4	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	
Divisor 5	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Interenfriador	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.68754E-14	
Bomba de vacío	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Separador	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Valvula	19	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0
Tubería	20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-7.10543E-15

La teoría de Grafos esencialmente señala que es un conjunto de nodos en el cual cada nodo puede alcanzar a cualquier otro a través de un camino sin importar lo alejado que se encuentre. Esta serie de nodos interconectados es lo que delimita el sistema y proceso productivo geotérmico en este trabajo. La Figura 3.2 es el proceso de generación de energía eléctrica a través del vapor, cada equipo en el representa un nodo y cada flujo conectado a cada equipo representa el lazo. El equipo o nodo 1 tiene relación con el lazo o flujo 1,2 y 21. Si esto se relaciona con el principio de conservación de masas en un sistema, se pueden definir como las entradas y salidas de los flujos para un equipo. Para este caso definimos la entrada de un flujo con un +1 y la salida con un -1. Se Crea una “red” de incidencias y se obtiene una matriz como la mostrada. Al final esta matriz es un conjunto de ecuaciones que al multiplicarlas por el valor de cada lazo (flujo), el resultado es un vector que determina la equivalencia de los lazos, para este caso la conservación de masa en el sistema al pasar de un nodo 1 al nodo 20. Deseable que esta sea cero lo que significa que la entrada fue igual a la salida.



6. Tabla de energía, exergía y exergía real del EA

Flujo	Gasto m[kg/s]	Entalpia h[kJ/kg]	Exergía b[kJ/kg]	Energía E[MW]	Exergía real B[MW]
AR	0	80.741	0	0	0
1	55.3916667	2712.5	2512.47584	145.777517	139.170224
2	53.7777778	2771	2568.38306	144.676151	138.121933
3	52.1666667	2767.1	2563.86033	140.138395	133.748047
4	1.61111111	2767.1	2563.86033	4.32802283	4.13066387
5	52.075	2240	2029.93339	112.443412	105.708781
6	736.055556	180.23	93.200216	73.2294312	68.6005368
7	736.055556	180.23	93.200216	73.2294312	68.6005368
8	1472.11111	180.44	93.412138	146.768006	137.513046
9	95.1166667	104.96	22.644882	2.30363055	2.15390569
10	95.1166667	105.16	22.844882	2.32265388	2.17292903
11	56.7	104.87	22.55296	1.3681143	1.27875283
12	9.06944444	105.09	22.77296	0.2208319	0.2065381
13	1.66388889	2568.9	2333.82624	4.14002011	3.88322756
14	58.65	184.17	96.898044	6.06611085	5.68307028
15	24.925	130.23	46.315778	1.23351333	1.15442077
16	29.3472222	130.18	46.263856	1.45089732	1.35771566
17	4.42222222	134.41	50.230542	0.23733624	0.22213062
18	1.95277778	2555.8	2317.95088	4.83324021	4.52644296
19	1354.31944	104.89	22.574882	32.7054603	30.5736016
20	9.01944444	155.07	69.585504	0.67040629	0.62762259
21	1.61388889	740.29	624.88573	1.0644388	1.00849614
22	38.4	2579.7	2346.80771	95.9600256	90.1174162
23	13.6222222	104.93	22.614882	0.32950793	0.30806495
24	736.055556	180.44	93.412138	73.3840028	68.7565231
25	736.055556	180.44	93.412138	73.3840028	68.7565231
26	65.7694444	105.09	22.774882	1.6014202	1.49789134
27	3.56388889	2640	2418.28414	9.12091471	8.61849599
28	1.61388889	2635.3	2412.37328	4.12277439	3.89330244
29	10.6833333	552.62	442.728026	5.04124065	4.72981108
30	4.42222222	105.13	22.814882	0.10785358	0.10089248
31	24.925	105.13	22.814882	0.60789583	0.56866093
32	52.075	2765	2561.43743	139.782787	133.386854
33	0.09166667	2771	2568.38306	0.24660707	0.23543511
Wm					27.339375
We					24.7466
Wb1					0.2452
Wb2					0.24221
Wb3					0.01902333
Wb4					0.78488372
Wbt					0.243

La tabla que se muestra incluye el vector de exergía. Primeramente obtenido de la fórmula exergética para fluidos geotérmicos (vapor). Para ello fue necesario conocer la entalpía y entropía de cada flujo de acuerdo con su temperatura y presión. Se introduce en la fórmula y se obtiene un vector de exergía  $b$  [kJ/kg] que al ser multiplicado por el flujo másico en [kg/s] da un vector  $B$  en [kJ/s], posteriormente se realiza la conversión para dejar sus unidades en Watts, en este caso MW.

El parámetro  $W_e$  es la energía a la salida del generador monitoreada desde un cuarto de control y en tiempo real. Es la energía que se está generando con los parámetros y flujos dados.

$W_{b1}$  y  $W_{b2}$  es la energía con que se alimentan las bombas de circulación. Esto es el agua condensada en el condensador que es enviada a la torre de enfriamiento por estas bombas su exergía es su misma energía.

$W_{b3}$  y  $W_{b4}$  es la energía que consume la bomba de enfriamiento de auxiliares y las bombas de vacío respectivamente.

$W_{bt}$  es la energía que consumen los motores de los ventiladores de la torre de enfriamiento.

7. Tabla de Insumos totales del EA

Recurso

MATRIZ DE INCIDENCIAS DE RECURSOS																																													
EQUIPO/FLUJO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	Wm	We	Wb1	Wb2	Wb3	Wb4	Wbt					
Secador de vapor	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Divisor 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Turbina	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Condensador	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Torre enfriamiento	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Eyectores	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bomba 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bomba 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Divisor 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bomba 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Divisor 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Enfriadores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Enfriadores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Divisor 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Divisor 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Interenfriador	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bomba vacio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Separador	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valvula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Generador	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

La tabla anterior es la representación matricial de los flujos que entran o salen de cada equipo o nodo (+1 entra al nodo, -1 sale del nodo) como recursos del proceso. Haciendo esto para cada equipo con sus respectivos flujos, se tiene una matriz de incidencias como la que se muestra. La energía eléctrica suministrada a cualquier equipo será tomado como recurso de este como es el caso de Wb1, Wb2, Wb3, Wb4 y Wbt.



MATRIZ DE INCIDENCIAS EQUIPO/FLUJO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	Wm	We	Wb1	Wb2	Wb3	Wb4	Wbt						
Secador de vapor	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Divisor 1	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Turbina	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Condensador	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Torre enfriamiento	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Eyectores	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bomba 1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Bomba 2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Divisor 2	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bomba 3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Divisor 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Enfriadores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Enfriadores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Divisor 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Divisor 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Interenfriador	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bomba vacio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Separador	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Valvula	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0		
Generador	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Finalmente se concluye con la anterior matriz que es la representación de cada flujo que entra o sale a cada equipo como recurso, producto o pérdida. Esta matriz es resultado de la operación Matriz R= Matriz P + Matriz L . A su vez esta matriz representa un sistema de 40 variables por 20 ecuaciones o equipos.





10. Ecuaciones anexas a la matriz R-P-L del EA y ED.

Para completar el sistema de ecuaciones de las matrices de incidencia del EA y el ED, que son las mismas proposiciones, se utilizan las equivalencias o propuestas de Valero.

$$A_{21} = *B_1 = B_1$$

Ecn 1: El costo exergético del flujo 1 tiene su mismo valor de exergia

$$A_{22} = *B_{13} = 0$$

Ecn 2: El costo exergético del flujo 13 (Residuo gases incondensables) es de valor 0

$$A_{23} = *B_{21} = 0$$

Ecn 3: El costo exergético del flujo 21 (Residuo, condensado del secador de vapor) es de valor 0

$$A_{24} = *B_{33} = 0$$

Ecn 4: El costo exergético del flujo 33 (Vapor fugado en válvula) es de valor 0

$$A_{25} = *B_{22} = 0$$

$$A_{26} = \frac{1}{B_5} - \frac{1}{B_{32}} = 0$$

Ecn 5: El costo exergético del flujo 22 (Vapor a la atmósfera) es de valor 0

$$A_{27} = *Wb_1 = Wb_1$$

Ecn 6: El costo exergético entre su exergia del flujo 5 y 32 es de igual valor

$$A_{28} = *Wb_2 = Wb_2$$

Ecn 7: El costo exergético del flujo Wb1 es su mismo valor de exergia

$$A_{29} = *Wb_3 = Wb_3$$

Ecn 8: El costo exergético del flujo Wb2 es su mismo valor de exergia

Ecn 9: El costo exergético del flujo Wb3 es su mismo valor de exergia

$$A_{30} = *Wb_4 = Wb_4$$

Ecn10: El costo exergético del flujo Wb4 es su mismo valor de exergia

$$A_{31} = *Wb_t = Wb_t$$

Ecn 11: El costo exergético del flujo Wbt es su mismo valor de exergia

$$A_{32} = \frac{*B_3}{B_3} - \frac{*B_4}{B_4} = 0$$

Ecn 12: El costo exergético entre su exergia del flujo 3 y 4 es de igual valor

$$A_{33} = \frac{*B_6}{B_6} - \frac{*B_7}{B_7} = 0$$

Ecn13: El costo exergético entre su exergia del flujo 6 y 7 es de igual valor

$$A_{34} = \frac{*B_9}{B_9} - \frac{*B_{19}}{B_{19}} = 0$$

Ecn14: El costo exergético entre su exergia del flujo 9 y 19 es de igual valor

$$A_{35} = \frac{*B_{11}}{B_{11}} - \frac{*B_{12}}{B_{12}} = 0$$

Ecn15: El costo exergético entre su exergia del flujo 11 y 12 es de igual valor

$$A_{36} = \frac{*B_{26}}{B_{26}} - \frac{*B_{30}}{B_{30}} = 0$$

Ecn16: El costo exergético entre su exergia del flujo 26 y 30 es de igual valor

$$A_{37} = \frac{*B_{30}}{B_{30}} - \frac{*B_{31}}{B_{31}} = 0$$

Ecn17: El costo exergético entre su exergia del flujo 30 y 31 es de igual valor

$$A_{38} = \frac{*B_{19}}{B_{19}} - \frac{*B_{23}}{B_{23}} = 0$$

Ecn18: El costo exergético entre su exergia del flujo 19 y 23 es de igual valor

$$A_{39} = \frac{*B_{14}}{B_{14}} - \frac{*B_{28}}{B_{28}} = 0$$

Ecn19: El costo exergético entre su exergia del flujo 14 y 28 es de igual valor

$$A_{40} = \frac{*B_7}{B_7} - \frac{*B_{18}}{B_{18}} = 0$$

Ecn20: El costo exergético entre su exergia del flujo 7 y 18 es de igual valor

Las ecuaciones anteriores son las propuestas al arreglo matricial de ecuaciones recurso-producto. Las ecuaciones que complementan esta matriz da la posibilidad de resolver el cálculo del costo exergético y exergoeconómico al despejar en la fórmula. Como se menciona anteriormente las ecuaciones adicionales son de acuerdo a las propuestas de Valero.

11. Tabla resultado de costo exergetico de EA

Balance costos exergeticos	Flujo	Vector de exergias	Costos exergeticos	Costo exergetico unitario	Impacto
0	1	139.17	139.170224	1	10.83342%
0	2	138.12	139.170224	1.007589603	10.75182%
0	3	133.75	135.0008681	1.009367022	10.41134%
0	4	4.13	4.169355885	1.009367022	0.32154%
0	5	105.34	106.5103773	1.011143792	8.19971%
0	6	68.60	5888.944024	85.84399338	5.34007%
0	7	68.60	5888.944024	85.84399338	5.34007%
0	8	137.51	11778.19719	85.65148916	10.70442%
0	9	2.15	783.7350724	363.8669395	0.16767%
0	10	2.17	783.7540957	360.6901497	0.16915%
0	11	1.28	466.3233659	364.6704462	0.09954%
0	12	0.21	75.31833947	364.6704462	0.01608%
0	13	3.88	0	0	0.30228%
0	14	5.68	513.8434502	90.41652221	0.44239%
0	15	1.15	205.6293875	178.1234307	0.08986%
0	16	1.36	242.1123903	178.3233389	0.10569%
0	17	0.22	36.48300288	164.2412155	0.01729%
0	18	4.53	388.5679396	85.84399338	0.35235%
0	19	30.57	11124.72286	363.8669395	2.37994%
0	20	0.59	421.3793006	711.3666494	0.04611%
139.170224	21	1.01	0	0	0.07850%
0	22	90.12	0	0	7.01501%
0	23	0.31	112.0946498	363.8669395	0.02398%
0	24	68.76	5889.098596	85.65148916	5.35221%
0	25	68.76	5889.098596	85.65148916	5.35221%
0	26	1.50	541.6417054	361.6028027	0.11660%
0.15457167	27	8.43	392.7372955	46.58342188	0.65628%
0.15457167	28	3.82	345.2172111	90.41652221	0.29721%
0.01902333	29	4.49	421.3793006	93.8811636	0.34939%
0.84375	30	0.10	36.48300288	361.6028027	0.00785%
0.243	31	0.57	205.6293875	361.6028027	0.04427%
0	32	133.51	135.0008681	1.011143792	10.39305%
0	33	0.24	0	0	0.01829%
0	Wm	27.85	28.49049085	1.023008529	2.16790%
0	We	24.75	28.49049085	1.1512891	1.92635%
0	Wb1	0.15	0.154571667	1	0.01203%
0	Wb2	0.15	0.154571667	1	0.01203%
0	Wb3	0.02	0.019023333	1	0.00148%
0	Wb4	0.84	0.84375	1	0.06568%
0	Wbt	0.24	0.243	1	0.01892%

El costo exergetico se obtiene de la multiplicación de la matriz inversa de incidencias con el vector de exergia de cada flujo resultado anticipado de la explicación de la teoría exergetica. De esta manera se obtiene el costo exergetico de cada flujo como se observa en la tabla. El costo unitario es el producto de la división del costo exergetico de entrada entre cada flujo del sistema. El porcentaje de impacto es el resultado de dividir la exergia de cada flujo entre la exergia total del sistema.

12. Propiedades de flujos del escenario Deseado (ED)

Flujo	Gasto m[kg/s]	Presion [atm]	Temperatura [ C ]	Calidad x	Entalpia h[kJ/kg]	Entropia s[kJ/kg C]	Exergia b[kJ/kg]	Energia E[MW]	Exergia real B[MW]
AR	0	0.7275	19.22	0	80.741	0.2854	0	0	0
1	54.16111111	9	175	0.97	2712.7	6.4901	2512.70467	142.549824	136.090877
2	52.56666667	8.9	174.5	0.999	2771.1	6.6257	2568.49843	141.423205	135.017401
3	51.47777778	8	171	0.999	2767.7	6.654	2564.55451	138.318678	132.017567
4	1.08888889	8	171	0.999	2767.7	6.654	2564.55451	2.9257998	2.79251491
5	51.3888889	0.118	51	0.854	2246.3	6.9878	2036.73887	111.285671	104.665748
6	725.6	0.41	43.15	0	180.73	0.6142	93.669464	72.5520184	67.9665631
7	725.6	0.41	43.15	0	180.73	0.6142	93.669464	72.5520184	67.9665631
8	1451.2	2.8	43	0	180.31	0.6121	93.289826	144.494533	135.382195
9	74.7083333	1.03	25	0	104.96	0.3673	22.644882	1.80936113	1.69176139
10	74.7083333	3.18	25	0	105.16	0.3673	22.844882	1.82430279	1.70670306
11	37.8	0.5	25	0	104.91	0.3673	22.594882	0.9135882	0.85408654
12	7.56111111	2.4	25	0	105.09	0.3673	22.774882	0.18410549	0.17220341
13	1.1	0.7	37	1	2569	8.3152	2333.92624	2.7370849	2.56731887
14	39.1277778	0.27	44.74	0	187.35	0.6352	99.885844	4.17137326	3.90831111
15	24.925	3.12	31	0	130.23	0.4505	46.315778	1.23351333	1.15442077
16	29.3472222	2.57	31	0	130.18	0.4506	46.263856	1.45089732	1.35771566
17	4.42222222	3.14	31	0	130.24	0.4505	46.325778	0.21889558	0.20486288
18	1.28888889	0.112	29.84	1	2556	8.4576	2318.18932	3.19033382	2.98788845
19	1354.46111	0.319	25	0	104.89	0.3673	22.574882	32.7088814	30.5767998
20	7.51111111	0.7	34	0	142.54	0.4916	57.835836	0.46417916	0.43441139
21	1.59444444	8.9	175	0	741.17	2.0909	625.72729	1.05301735	0.9976874
22	37.8555556	0.7	43.02	1	2579.7	8.2018	2346.80579	94.5994813	88.839637
23	13.5222222	0.7	25	0	104.93	0.3673	22.614882	0.32708903	0.30580346
24	725.6	2.41	43.15	0	180.91	0.6141	93.851386	72.6826264	68.0985657
25	725.6	2.41	43.15	0	180.91	0.6141	93.851386	72.6826264	68.0985657
26	45.3611111	2.8	25	0	105.13	0.3673	22.814882	1.10631214	1.0349084
27	2.37777778	0.11	51	0.999	2586.1	8.1048	2355.07013	5.95718696	5.59983342
28	1.05	0.118	51	1	2594	8.06	2363.83119	2.63892195	2.48202275
29	8.61111111	0	37	0.15	517.2	1.6997	409.276154	3.75839694	3.52432244
30	4.42222222	3	25	0	105.15	0.3673	22.834882	0.10794202	0.10098092
31	24.925	3	25	0	105.15	0.3673	22.834882	0.60839433	0.56915943
32	51.3888889	8	170	0.999	2764.7	6.6787	2561.07977	137.925671	131.611044
33	0.08888889	8	170	0.999	2764.7	6.6787	2561.07977	0.23857413	0.22765154
Wm									26.64
We									26.5
Wb1									0.26786
Wb2									0.27255
Wb3									0.019422
Wb4									0.9
Wbt									0.23973

La tabla que se muestra es la de propiedades termodinámicas de la unidad o sistema en el estado deseado o ED. Tabla base para obtener exergia y exergia real de acuerdo con los parámetros de cada flujo.





16. Análisis del Costo exergetico del ED

Balance costos exergeticos	Flujo	Vector de exerantias	Costos exergeticos	Costo exergetico unitario	Impacto
0	1	136.09	136.0908766	1	11%
0	2	135.02	136.0908766	1.007950646	11%
0	3	132.02	133.2718308	1.009500733	11%
0	4	2.79	2.819045848	1.009500733	0%
0	5	104.67	105.9865144	1.012618902	8%
0	6	67.97	5750.577263	84.60891654	5%
0	7	67.97	5750.577263	84.60891654	5%
0	8	135.38	11501.41574	84.95515751	11%
0	9	1.69	609.790255	360.4469623	0.135%
0	10	1.71	609.809677	357.3027386	0.136%
0	11	0.85	308.0287271	360.6528295	0.068%
0	12	0.17	62.10564827	360.6528295	0.014%
0	13	2.57	0	0	0%
0	14	3.91	344.7266976	88.2034946	0%
0	15	1.15	203.5595344	176.330451	0%
0	16	1.36	239.6753016	176.528347	0%
0	17	0.20	36.11576717	176.2923879	0%
0	18	2.99	252.8020046	84.60891654	0%
0	19	30.58	11021.31459	360.4469623	2%
0	20	0.43	281.9287283	648.9901842	0%
136.090877	21	1.00	0	0	0%
0	22	88.84	0	0	7%
0	23	0.31	110.2259282	360.4469623	0%
0	24	68.10	5750.707871	84.44682812	5%
0	25	68.10	5750.707871	84.44682812	5%
0	26	1.03	370.1343754	357.6494078	0%
0.130608	27	5.60	255.6210505	45.64797398	0%
0.130608	28	2.48	218.92308	88.2034946	0%
0.019422	29	3.52	281.9287283	79.99515745	0%
0.9	30	0.10	36.11576717	357.6494078	0%
0.23973	31	0.57	203.5595344	357.6494078	0%
0	32	131.61	133.2718308	1.012618902	10%
0	33	0.23	0	0	0%
0	Wm	26.64	27.2853164	1.024223588	2%
0	We	26.50	27.2853164	1.029634581	2%
0	Wb1	0.13	0.130608	1	0%
0	Wb2	0.13	0.130608	1	0%
0	Wb3	0.02	0.019422	1	0%
0	Wb4	0.90	0.9	1	0%
0	Wbt	0.24	0.23973	1	0%

La tabla mostrada es el resultado de la multiplicación de la matriz inversa por el vector de exerancia de cada flujo. Arroja como resultado un vector de costo exergetico. Mismo que sirve como base comparativa de un estado a otro.

17. Comparativa costo exergetico del EA y ED

U13-EA		U13-ED	
	Costos exergeticos		Costos exergeticos
	139.170224		136.0908766
	139.170224		136.0908766
	135.0008681		133.2718308
	4.169355885		2.819045848
	106.5103773		105.9865144
	5888.944024		5750.577263
	5888.944024		5750.577263
	11778.19719		11501.41574
	783.7350724		609.790255
	783.7540957		609.809677
	466.3233659		308.0287271
	75.31833947		62.10564827
	0		0
	513.8434502		344.7266976
	205.6293875		203.5595344
	242.1123903		239.6753016
	36.48300288		36.11576717
	388.5679396		252.8020046
	11124.72286		11021.31459
	421.3793006		281.9287283
	0		0
	0		0
	112.0946498		110.2259282
	5889.098596		5750.707871
	5889.098596		5750.707871
	541.6417054		370.1343754
	392.7372955		255.6210505
	345.2172111		218.92308
	421.3793006		281.9287283
	36.48300288		36.11576717
	205.6293875		203.5595344
	135.0008681		133.2718308
	0		0
	28.49049085		27.2853164
	28.49049085		27.2853164
	0.154571667		0.130608
	0.154571667		0.130608
	0.019023333		0.019422
	0.84375		0.9
	0.243		0.23973

La Tabla mostrada es referente a la comparativa del costo exergetico para el ED y EA. Para la obtención de los mismos se tomo como base los vectores de exerxia para cada estado.

18. Costo exergoeconomico del EA y ED

Costo exergoeconómico EA		Costo exergoeconómico ED	
Costo de los flujos		Costo de los flujos	
\$/s	\$/año	\$/s	\$/año
0.707102611	18974674.3	0.707102611	18974674.30
0.707102611	18974674.3	0.707102611	18974674.30
0.685918752	18406218.15	0.692455379	18581624.61
0.021183859	568456.1516	0.014647232	393049.69
0.541162928	14521782.46	0.550686004	14777328.51
29.544547	792810191.9	29.49520377	791486096.06
29.544547	792810191.9	29.49520377	791486096.06
59.08909399	1585620384	58.99040754	1582972192.11
3.931774624	105506813	3.127528196	83925342.61
3.931774624	105506813	3.127528196	83925342.61
2.339354125	62775164.32	1.579785572	42392597.94
0.377841389	10139146.96	0.318520964	8547318.95
0	0	0	0.00
2.577986793	69178728.8	1.768174329	47447897.23
1.031558766	27681260.54	1.043994885	28014976.33
1.21457911	32592501.68	1.22922166	32985425.72
0.183020345	4911241.143	0.185226775	4970449.38
1.949426536	52311691.45	1.296643154	34794641.06
55.80955169	1497615834	56.52676777	1516861897.02
2.109819116	56615730.08	1.441422592	38679710.41
0	0	0	0.00
0	0	0	0.00
0.562346787	15090238.62	0.565333236	15170378.20
29.544547	792810191.9	29.49520377	791486096.06
29.544547	792810191.9	29.49520377	791486096.06
2.717195513	72914311.28	1.898306535	50939916.89
1.970610396	52880147.6	1.311290386	35187690.75
1.731977727	46476583.12	1.122901629	30132391.46
2.109819116	56615730.08	1.441422592	38679710.41
0.183020345	4911241.143	0.185226775	4970449.38
1.031558766	27681260.54	1.043994885	28014976.33
0.685918752	18406218.15	0.692455379	18581624.61
0	0	0	0.00
0.144755824	3884435.686	0.141769375	3804296.11
0.144755824	3884435.686	0.141769375	3804296.11
0	0	0	0.00
0	0	0	0.00
0	0	0	0.00
0	0	0	0.00
0	0	0	0.00

La tabla mostrada es referente al costo económico de cada flujo de un escenario a otro. Como ya se ha explicado se ha tomado como referencia el costo de vapor que proporciona CFE suministro de vapor.

### 19. Costo exergético para el EA y ED

Flujo	EA	ED	Diferencia	% incremento
1	139.170224	136.0908766	3.07934741	2.26271407
2	139.170224	136.0908766	3.07934741	2.26271407
3	135.0008681	133.2718308	1.72903737	1.29737647
4	4.169355885	2.819045848	1.35031004	47.8995415
5	106.5103773	105.9865144	0.52386292	0.49427319
6	5888.944024	5750.577263	138.366761	2.40613689
7	5888.944024	5750.577263	138.366761	2.40613689
8	11778.19719	11501.41574	276.78145	2.40649896
9	783.7350724	609.790255	173.944817	28.5253521
10	783.7540957	609.809677	173.944419	28.5243782
11	466.3233659	308.0287271	158.294639	51.3895701
12	75.31833947	62.10564827	13.2126912	21.2745403
13	0	0	0	0
14	513.8434502	344.7266976	169.116753	49.0582115
15	205.6293875	203.5595344	2.06985301	1.01682931
16	242.1123903	239.6753016	2.43708872	1.01682931
17	36.48300288	36.11576717	0.36723571	1.01682931
18	388.5679396	252.8020046	135.765935	53.7044535
19	11124.72286	11021.31459	103.408269	0.93825713
20	421.3793006	281.9287283	139.450572	49.4630587
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	112.0946498	110.2259282	1.86872162	1.69535576
24	5889.098596	5750.707871	138.390725	2.40649896
25	5889.098596	5750.707871	138.390725	2.40649896
26	541.6417054	370.1343754	171.50733	46.3365041
27	392.7372955	255.6210505	137.116245	53.6404356
28	345.2172111	218.92308	126.294131	57.6888152
29	421.3793006	281.9287283	139.450572	49.4630587
30	36.48300288	36.11576717	0.36723571	1.01682931
31	205.6293875	203.5595344	2.06985301	1.01682931
32	135.0008681	133.2718308	1.72903737	1.29737647
33	0	0	0	0
34	28.49049085	27.2853164	1.20517445	4.41693414
35	28.49049085	27.2853164	1.20517445	4.41693414
36	0.154571667	0.130608	0.02396367	18.3477786
37	0.154571667	0.130608	0.02396367	18.3477786
38	0.019023333	0.019422	-0.0003987	-2.05265506
39	0.84375	0.9	-0.05625	-6.25
40	0.243	0.23973	0.00327	1.36403454

La siguiente tabla es el costo exergético de cada flujo y para cada estado. También se cuenta con una columna de diferencia del costo del EA respecto al ED, y una columna de % de incremento de este estado respecto al otro. Ambas columnas son referencias de la variación de la calidad o incremento térmico del flujo con una unidad a su capacidad nominal y en decremento.

MANTENIMIENTO UNIDAD 13			
DEPARTAMENTO	CONCEPTO	SISTEMA	PRECIO
MECANICO	DESMONTAR BBA Enfri. Aux	BBA Enfr. Aux	\$1,496.27
	DESMONTAR BBA Enfri. Aux	BBA Enfr. Aux	\$60,108.34
	MANTTO. A BOMBAS DE CONDENSADO "B"	BBA Condensado	\$19,017.46
	MANTTO.TANQUE,BBAS LUBRICACIÓN,ENFRIADOR	Enfr. Aceite	\$12,344.22
	REVISIÓN Y MANTTO. SIST. AGUA SERVICIOS	Torre Enfriamiento	\$0.00
	REVISION Y MANTTO.A SISTEMA DE LAVADO	Secador Vapor	\$3,778.00
	REV. Y MANTTO. FILTRO VAPOR DERECHO	Secador Vapor	\$11,034.98
	REV. Y MANTTO. FILTRO VAPOR IZQUIERDO	Secador Vapor	\$19,357.98
	REV/MANTO.REDUCTORES D'VELOCIDAD TORRE	Torre Enfriamiento	\$299,466.52
	MANTTO.A DRENES D'VAPOR PPAL Y TURBINA	Divisores de Vapor	\$20,673.45
	REV.Y MANTTO. VALVULA D'CONTROL DERECHA	Válvula	\$0.00
	MANTTO.EYECTORES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS	Eyectores	\$39,444.68
	DESARMADO Y EXTRACCION DE ROTOR GEN-ELEC	Generador	\$15,336.76
	INSERCIÓN DE ROTOR Y ARMADO GEN ELECTRIC	Generador	\$35,142.41
	DESMONTAJE DE TUBOS DE DESFOGUE	Turbina	\$1,496.27
	MANTTO.VVLAS,D'AGUA Y GASES TORRE ENFTO.	Torre Enfriamiento	\$17,955.23
	MANTTO.A VVLAS MANUALES DE VAPOR-DUCTO	Secador Vapor	\$22,248.51
	DESACOPLAR TUR-GEN TOMA D'LEC.Y ALINEACI	Generador	\$3,366.60
	DESMON.TAPA LATERAL D'CARCAZA CUB.INTERM	Turbina	\$15,897.86
	DESMON.CARCAZA SUP.MEDICION D'CLAROS TUR	Turbina	\$4,488.81
	DESMONTAJE CHUMACERA SUP.1Y2 Y DE EMPUJE	Turbina	\$561.10
	DESM.ROTOR TURB,INSPECC.Y MEDICION MUÑO	Turbina	\$3,553.64
	DESMONTAJE DE CHUMACERAS 1 Y 2 INFERIORE	Turbina	\$1,496.27
	DESM,INSPEC.DIAFRAGMAS SUP/INF SELLO VAP	Turbina	\$3,086.05
	LIMPIEZA MECANICA A CARCAZA	Turbina	\$23,674.62
	LIMP.MEDIC.PBAS NO DEST.CHU,RADIAL,EMPUJ	Turbina	\$1,683.30
	MONT.ALINAC.NIVEL.DIAFRAG.SELLO VAPOR I	Turbina	\$24,688.44
	MONTAJE Y NIVELACION CHUM 1,2Y D'EMP INF	Turbina	\$3,366.60
	INSERC.ROTOR TURBINA,MONTAJE CHU 1,2,EMP	Turbina	\$9,164.65
	MONT.TAPA CHUM 1,2 SUPERIOR,TOMA LECTURA	Turbina	\$6,733.21
	MONTAJE CARCAZA SUPERIOR,TUBOS DESFOGUE	Turbina	\$42,106.11
	ALINEACION Y ACOPLAMIENTO D'TURBOGRUPO	Turbina	\$27,693.36
	RECIRCULACION DE ACEITE	Turbina	\$17,113.57
	PBAS.RODADO,BALANCEO DINAMICO Y SINCRONI	Generador	\$68,641.33
	MANTTO.A ENFRIADORES DEL GENERADOR ELECT	Generador	\$57,994.31
	REVISION D'SELLOS DE GENERADOR ELECTRIC	Generador	\$103,946.09
	EXTRACCION DE ROTOR GENERADOR ELECTRIC	Generador	\$0.00
	LIMPIEZA DE PARTES MECANICAS	Turbina	\$5,236.94
	ALINEACION-ACOPLAMIENTO DE TURBO-GENERAD	Turbina	\$28,044.57
	MONTAJE DE ENFRIADORES	Enfriadores	\$11,970.15

20. Tabla de costos de un Mantenimiento Mayor para U13

<b>INSTRUMENTACION Y CONTROL</b>	DESMONTAJE DE INSTRUMENTACIÓN TURBO GRUP	Turbina	\$10,171.35
	MANTTO.A SISTEMA SUPERVISORIO TB-GRUPO	Turbina	\$47,482.15
	MANTTO.SISTEMA ACEITE LUBRICACION/SELLOS	Generador	\$17,872.12
	MANTTO.A SISTEMA DE VAPOR PRINCIPAL	Secador Vapor	\$86,191.88
	MANTTO.SISTEMA AGUA CIRCULACION CONDENSA	Bba Condensado, Enfr. Aux	\$1,116.37
	MANTTO.SIST.CONTROL	Turbina	\$6,450.12
	MONTAJE DE INSTRUMENTACION TB-GRUPO	Turbina	\$50,935.07
	PRUEBAS DE INSTRUMENTACION	Turbina	\$12,280.04
	APOYO EN RODADO Y SINCRONIZACION D'UNIDA	Turbina	\$13,631.79
	INSTALACION DE INSTRUMENTACION Y PRUEBAS	Turbina	\$19,102.28
<b>ELECTRICO</b>	PRUEBAS INICIALES A ESTATOR Y ROTOR	Generador	\$767.06
	DESMONTAR CUBIERTA Y PARTES DE ANILLOS C	Generador	\$3,643.55
	INSTALACION DE ESCOBILLAS Y PORTAESCOBIL	Generador	\$5,561.20
	DESARMADO Y EXTRACCION DE ROTOR	Generador	\$40,251.60
	MANTTO A ROTOR Y ESTATOR DE GENERADOR	Generador	\$38,985.29
	PRUEBAS ELECTRIC A ROTOR/ESTATOR LAPEM	Generador	\$858.00
	INSERCIÓN DE ROTOR Y ARMADO GENERADOR	Generador	\$15,443.27
	PRUEBA DE HERMETICIDAD DEL GENERADOR	Generador	\$9,971.81
	PRUEBAS FIN. ESTATOR Y ROTOR Y CONEXION	Generador	\$2,301.19
	MONT D/CUBIERTA Y PARTES ANILLOS COLECTO	Generador	\$767.06
	REV/MANTO.TABLERO INT.MEDIA TENSION 4.16	Generador	\$10,547.11
	INST.PUESTA EN SERV.D'SIST.D'EXCITACION	Generador	\$1,701,914.71
	MANTTO. CONTROL Y MOTOR DE BOMBA CD	Generador	\$1,342.36
	MANTTO. A MOTORES DE LUB. Y SELLOS	Generador	\$5,236.18
	MANTTO. Y PRUEBAS A INTERRUPTOR DE MAQ.	Generador	\$18,356.50
	REV.MANTTO A CENTRO CTRL.MOTORES(CCMS)	BBA Vacío	\$11,359.98
	MANTTO.A MOTORES TORRE DE ENFRIAMIENTO	Torre Enfriamiento	\$81,374.60
	REVY MANTTO A VALVULAS MOTORIZADAS	Secador Vapor	\$687.93
	APOYO EN RODADO Y SINCRONISMO DE UNIDAD,	Generador	\$34,002.46
	EXTRACCION DE ROTOR GENERADOR ELECTRICO	Generador	\$4,794.15
LIMPIEZA DE ROTOR,GENERADOR ELECTRICO	Generador	\$35,458.70	
INSERCIÓN Y ARMADO DE GENERADO ELECTRICO	Generador	\$21,802.94	

<b>SERVICIOS CONTRATISTAS</b>	INST.Y PUESTA EN SERV.SISTEMA EXCITACION	Generador	\$630,302.40
	MANTTO. SISTEMA CONTRA INCENDIO	Torre Enfriamiento	\$98,800.00
	REPARACIÓN DE PARTES TURBINA	Turbina	\$414,804.00
	PINTURA DE EQUIPOS U-13	Divisores Vapor	\$198,780.87
	AISLAMIENTO CON LAMINA DE ALUMINIO	Divisores Vapor	\$31,178.12
	AISLAMIENTO COLCHONETA	Divisores Vapor	\$33,196.80
	LIMPIEZA CONDENSADOR	Condensador	\$96,200.00
	DETECCIÓN DE ACIDO SULFHIDRICO	Separador	\$23,322.00
	CAMBIO DE FLUXERIA INTER	Intercondensador	\$111,795.09
	INSTALAR PORTATESTIGO EN TUB.D'SOPLADO	Divisores Vapor	\$3,900.00
	COLOCAR RELLENO EN TORRE DE ENFRIAMIENTO	Torre Enfriamiento	\$4,797.25

## BIBLIOGRAFÍA

ATTALA, L. FERRARA, G: Thermo-economic optimization method as design tool in gas-steam combined plant realization. Energy Conversion and Management. No. 42(2001) p. 2163-2172

BOSCH Fernando: Modelo termoeconómico de una central térmica de ciclo combinado. Medellín 2007. Tesis Maestría. Universidad Pontificia Bolivariana. Instituto de energía y termodinámica

BLODGETT Leslie y Kara Slack: Basics of Geothermal Energy Production and Use. 209 Pennsylvania Avenue SE, Washington, D.C. 2003.

CHRISTODOULO P: Energy economy optimization in separation processes. Optimizing the separation of sucrose-water and non sugars. En: International Sugar Journal (1998), p. 56-61.

CORREAS Luis: On the thermo-economic approach to the diagnosis of energy system malfunctions: Suitability to real time monitoring. En: Int.J.Thermodynamics. Vol.7, No.2 (Jun. 2004); p. 85-94

CORREAS Luis: Diagnóstico termoeconómico de la operación de un ciclo combinado. Zaragoza 2001. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. Dpto. Ingeniería Mecánica.

EI-SAYED, Y.M and Evans, R.B. Thermo-economics and the design of heat Systems. En: Journal of engineering for power. Vol. 92 (1970); p. 27-35

HUTIN ADELA and Fernando Sapag. Estudio Termoeconómico de un ciclo combinado en Argentina. Universidad Católica de Chile, 2009.

KWAMBAI Clety: Analysis of management methods and application to maintenance of geothermal power plants. Iceland Reykjavík 2008. Tesis Maestría. University of Iceland, Geothermal training programme.

LOZANO, M.A. Metodología para el análisis exergético de calderas de vapor en centrales térmicas. 1987, Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España.

MARCUELLO Uche, Valero Antonio y otros: Exergy cost assessment of water resources; physical hydromonics. Zaragoza 1990. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza.

NIEMBRO, I. J., & GONZÁLEZ-BENÍTEZ, M. Energía y Exergía: Enfoques hacia la Sostenibilidad mediante el Análisis de Ciclo de Vida. Paper presented at the Congreso Nacional del Medio Ambiente, Cumbre del Desarrollo Sostenible, Fondo Documental, Comunicación técnica escrita, Temática: Cambio climático. Madrid, España, 2008.

PAZ Dora y Cárdenas Gerónimo: Valoración económica de las pérdidas de exergía de las operaciones térmicas en la industria azucarera de caña. En: Revista Industrial y Agrícola de Tucumán. Tomo 82 (2005) p. 11-16

REINI, Mauro y TACCANI, Rodolfo. On the Thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions - The role of the fuel impact formula. En: Int. J. Thermodynamics. Vol.7, No.2 (Jun. 2004); p. 61-72

SERRA Luis. Optimización exergoeconómica de sistemas térmicos. Zaragoza 1994. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, Dpto. de Ingeniería Mecánica.

TOFFOLO, Andrea. y LAZZARETTO, Andrea. On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Indicators to diagnose malfunctions: Application of a new indicator for the location of causes. En: Int.J.Thermodynamics, Vol.7,No.2 (Jun. 2004), p. 41 - 49

TORRES, Cesar. Exergoeconomía simbólica. Metodología para el análisis termoeconómico de los sistemas energéticos. Zaragoza, 1991. 218p. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Departamento de Ingeniería Mecánica.

TRAVERSO Alberto y Massardo Aristide. Thermoeconomic analysis of mixed gas-steam cycles. En: Applied thermal engineering. Vol 22 (2002) p. 1-21.

VERDA Vittorio. Thermoeconomics analysis and diagnosis of energy utility Systems. En: International Journal Thermodynamics. Vol 7, No. 2 (2004); p. 73-83

VERDA, Vittorio.; SERRA, Luis. y VALERO, Antonio. Thermoeconomic diagnosis: Zooming strategy applied to highly complex energy systems. Part 1: Detection and localization of anomalies. En: Transaction of the ASME. Journal of Energy Resources Technology. Vol. 127 (Mar. 2005); p.42-49

VALERO, Antonio y otros: On the thermoeconomics approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Part 2: Malfunction definitions and assessment. En: Energy. Vol 29 (2004) p. 1889-1907

VALERO, Antonio y Miguel A. Lozano Serrano: Curso de Termoeconomía. Vol. 1. Zaragoza España, Julio 1994.

VALERO Antonio y otros. Thermoeconomic philosophy applied to the operating analysis. En: International Journal Thermodynamics. Vol 7, No.2 (2004) p. 33-39.

ZALETA, Alejandro y otros. A reconciliation method based on a module simulator. En: Int. J Thermodynamics. Vol.7, No.2 (Jun. 2004); p.51 - 60

ZHANG Chao y otros. Energy cost analysis of a coal fired power plant based on structural theory of thermoeconomic. En: Energy conversion and Management. Vol. 47 (2006); p. 817-843.