



01178
1-20j.

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS EXERGETICO
DE CENTRALES TERMOELECTRICAS

HECTOR JAVIER CARDENAS MARQUEZ

T E S I S

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA
(ENERGETICA)

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO 1989



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

INTRODUCCION	3
CAPITULO 1. GENERALIDADES	5
1.1 Panorama Nacional	
1.2 La Comisión Federal de Electricidad y el uso racional de la energía eléctrica.	
1.3 Evolución del sector eléctrico.	
CAPITULO 2. LA ENERGIA Y LOS POSTULADOS TERMODINAMICOS	17
2.1 Primera Ley de la Termodinámica.	
2.2 Segunda Ley de la Termodinámica.	
2.3 Reversibilidad e irreversibilidad, entropía y el ciclo de Carnot.	
2.4 Exergía.	
2.5 Medio ambiente como estado de referencia.	
2.6 Ecuación general de la exergía.	
2.7 Exergía para un flujo de régimen abierto.	
2.8 Exergía de un flujo de calor.	
2.9 Exergía química.	
2.10 Balance exergético.	
2.11 Rendimiento exergético.	
CAPITULO 3. CICLOS TERMODINAMICOS	30
3.1 Descripción de una central termoeléctrica.	

CAPITULO 4. ANALISIS ENERGETICO DE UNA CENTRAL TERMIOELECTRICA	35
4.1 Desarrollo.	
4.1.1 Generador de vapor.	
4.1.2 Turbina de alta presión.	
4.1.3 Turbina de presión intermedia.	
4.1.4 Turbina de baja presión.	
4.1.5 Condensador.	
4.1.6 Calentadores de baja presión.	
4.1.7 Calentadores de alta presión.	
4.2 Ejemplos numericos.	
4.3 Resultados.	
CAPITULO 5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	75
BIBLIOGRAFIA.	76
INDICE	82
ANEXOS	94

INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como proposito realizar balances de exergia en centrales termoelectricas, como parte complementaria de los balances tradicionales de energia. El objetivo central es detectar las perdidas y establecer los criterios para un mejor aprovechamiento de la energia. Los resultados que aqui se presentan se enmarcan con los estudios e investigaciones que en materia de ahorro y uso eficiente de energia se realizan en el sector electrico.

La exergia es un concepto termodinamico poco usado hasta el momento en el analisis de procesos industriales se fundamenta en la 1^a y 2^a leyes de la termodinamica; mediante su uso es posible obtener la capacidad de trabajo de cualquier sustancia con base en sus propiedades termodinamicas y teniendo al medio ambiente como estado de referencia. El concepto de la exergia permite asignar cierta "calidad" a la energia de acuerdo con su capacidad de producir trabajo, y no en su contenido calorifico.

La exergia tambien es conocida como "capacidad de trabajo" o "disponibilidad de energia".

En este trabajo, el balance de exergia es aplicado a centrales termoelectricas de vapor de 350 megawatts de capacidad, por su influencia dentro del parque termoelectrico nacional, pero puede ser aplicado a centrales de vapor de diferente capacidad con las modificaciones correspondientes.

El procedimiento utilizado consiste en hacer balances de exergía en cada uno de los equipos y determinar en que medida se pierde como consecuencia de las irreversibilidades del proceso que se lleva a cabo. Estas pérdidas no se determinan cuando se aplica el 1er. principio de la termodinámica.

Los resultados obtenidos muestran cómo se distribuyen las pérdidas de exergía en cada uno de los equipos que componen la central y son comparados con los balances de energía obtenidos cuando solamente se utiliza el primer principio de la termodinámica. Las diferencias encontradas son notables y de ellas se desprenden criterios para establecer mejoras en eficiencias, diseño y operación de el proceso y los equipos con el fin de obtener ahorros de energía.

El trabajo está estructurado para dar, en primer término, un panorama de la importancia de la energía para el desarrollo económico del país, de la composición y evolución del sector eléctrico, así como el papel que tienen las centrales termoeléctricas como unidades generadoras de fluido eléctrico. A continuación se mencionan algunos conceptos básicos de la termodinámica a partir de los cuales se desarrolla la ecuación para calcular la exergía. Más adelante se describe qué es una central termoeléctrica y sus componentes principales. Posteriormente se desarrolla el procedimiento para hacer el análisis exergetico y se aplica a las centrales de San Luis Potosí y Lázaro Cárdenas, ambas con capacidad de 350 MW y, finalmente, se comentan los resultados y se dan conclusiones.

Se encontró que el análisis exergetico aplicado a Centrales Termoeléctricas es una herramienta complementaria de suma utilidad para detectar los principales puntos en donde las pérdidas exergeticas deben minimizarse para asegurar la mayor producción de energía eléctrica.

CAPITULO 1.

GENERALIDADES

En la época actual, para hablar de energía no solamente se requiere tener un enfoque técnico, adicionalmente es necesaria una visión más amplia que abarque su relación con otros sectores con los cuales está estrechamente ligada, como son la economía, el desarrollo social, la ecología, etc.

La importancia del uso de la energía a través del curso de la historia ha dado lugar a cambios significativos que modificaron los hábitos de vida en general de la sociedad, de tal forma que en la actualidad se antoja imposible pensar el vivir sin los beneficios que ésta nos brinda.

Desde los inicios de la industrialización, el mundo ha contado con dos energéticos principales: el carbón y el petróleo. El carbón sirvió como fuente de energía hasta los inicios del presente siglo, en donde hace su aparición el petróleo como alternativa energética abundante y barata, además de otras características ventajosas que le confirieron supremacía por sobre el carbón.

Es así, como con el uso del petróleo se inicia otra era en la industria a nivel mundial. Alrededor de este energético se crean emporios industriales junto con una gran infraestructura que permite desarrollar toda la tecnología petrolera.

Es posible establecer que desde los inicios de su comercialización a escala mundial, el mercado petrolero se mantuvo

estable con excepción de contados acontecimientos que repercutieron a nivel mundial, hasta el comienzo de la década de 1970, en donde, a raíz de las crisis mundiales del petróleo, sucede un cambio en la forma del uso del energético, ya que su excesiva dependencia en los países industrializados condujo a problemas estructurales graves que posteriormente dieron lugar a la implementación de políticas de ahorro, eficiencia, búsqueda y desarrollo de alternativas en la energía.

El cambio más importante provino del lado de la demanda; los programas llevados a cabo tuvieron como resultado una disminución del consumo total mundial de energía de aproximadamente 0.3% en promedio anual a partir de 1970, y de casi 3.0% en los países industrializados.

En el caso del petróleo, el ritmo de decremento anual en el periodo 1979-1982 fue de casi 5% en los países desarrollados.

Por el lado de la oferta de energía, los cambios relevantes fueron la mayor inversión en campos nuevos y en la explotación de yacimientos más costosos, así como en la investigación y desarrollo de otras fuentes energéticas, como la nuclear, el carbón y las llamadas no convencionales, como la solar y la eólica, principalmente.

Las políticas de ahorro y eficiencia marcaron la pauta para que con otro enfoque se analice el uso de la energía.

1.1 PANORAMA NACIONAL

El panorama energético a nivel nacional es complejo. Durante muchos años, la falta de información estadística y la carencia de políticas de planeación, económicas y tecnológicas, dificultaban su cuantificación para efectos de hacer estudios de prospectiva sobre el consumo en algunos rubros específicos o aún en el gran total. En años más recientes esta carencia está siendo rápidamente eliminada.

Aunado a lo anterior, se presentan problemas de origen estructural como son el alto consumo de energía por unidad de producto producido; la elevada dependencia de los hidrocarburos, así como el desequilibrio de la oferta de energía entre los diversos sectores que integran el mercado nacional. Estos factores impiden un desarrollo equilibrado de la política energética nacional.

El mercado nacional de energía en México está compuesto por cinco sectores principales: el energético, el industrial, el del transporte, el residencial y comercial y el agropecuario.

Para cuantificar la oferta y la demanda de energía a nivel nacional, se efectúan los Balances de Energía, los cuales representan en forma gráfica la manera como se distribuye la oferta energética y su destino final. De ellos es posible obtener índices del consumo de energía, que reflejan las tendencias de crecimiento, así, por ejemplo, la participación de los hidrocarburos en la producción nacional de energía convencional pasó de 75.6% en 1970 a 90.4% en 1988.

Otro índice del consumo de energía es la elasticidad energía-ingreso, que representa la relación entre la tasa de crecimiento del consumo de energía y la tasa de crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB). Este indicador pasó de 1.2 en la década de los sesentas a 1.7 en la década de los setentas, lo que reflejaba una tendencia contraria a la experimentada mundialmente. En la actual década, este valor ha tenido un comportamiento errático, variando desde 0.5 en 1984 y 1986 hasta 1.29 en 1987. Como punto de referencia, la tendencia actual de este índice en los países desarrollados es aproximadamente de 0.4.

Lo anterior muestra el alto consumo de energía en México y obliga entonces a poner atención sobre el uso de la misma y en los índices de eficiencia en aquellos sectores que por su participación son los más importantes en el panorama energético nacional.

Para plantear soluciones a la problemática descrita, el Gobierno Federal emitió el Programa Nacional de Energía 1984-1988 (PRONE), en donde se reconocen estos factores y se establecen las alternativas para su solución. Este programa fue el marco de referencia de la política energética en México durante el sexenio pasado y contempla los siguientes objetivos:

- Garantizar la autosuficiencia energética presente y futura del país.
- Coadyuvar al desarrollo económico a través de la aportación de divisas e ingresos fiscales y mediante la orientación del poder de compra del sector.
- Coadyuvar al desarrollo social, ampliando la cobertura y evitando desequilibrios regionales y ambientales.
- Ahorrar energía y promover su uso eficiente.
- Alcanzar un balance energético más racional.
- Fortalecer la autodeterminación y el avance tecnológico.
- Contribuir al fortalecimiento mundial del mercado de los hidrocarburos.

Las metas nacionales establecidas en materia del ahorro de energía se observan en la figura 1.1. Se considera que después de aplicar las medidas correctivas para usar más eficientemente la energía en nuestro país, es posible tener un ahorro del 18 al 20% del consumo histórico proyectado de energía para el año 2000.

Las políticas de ahorro de energía del presente Gobierno Federal están fundamentadas en un nivel adecuado de precios de la energía, estructuración idónea de tarifas y en la instrumentación coordinada de medidas para estimular a los consumidores a usar

mejor la energía. Se plantea que en un principio se haga el esfuerzo a nivel del sector paraestatal, haciendo énfasis en las industrias energéticas, para posteriormente llegar a todos los sectores de la nación.

Para efectos del presente trabajo, la atención se concentra en el subsector eléctrico, y de éste en la generación de electricidad.

1.2 LA COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD Y EL USO RACIONAL DE LA ENERGIA ELECTRICA.

Como entidad responsable de la producción y suministro de la energía eléctrica en el país, compete a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) asegurar el cumplimiento de los objetivos y metas propuestos por el PRONE, tendientes tanto a la necesaria conservación de la energía como a la obligación de mejorar el aprovechamiento de las instalaciones e inversiones requeridas para su disponibilidad.

Para tal fin la CFE ha elaborado el Programa Nacional de Uso Racional de Energía (PRONURE) (15), cuyos objetivos son:

- Propiciar el aprovechamiento eficiente de la energía y la diversificación energética.
- Obtener el máximo rendimiento posible de las inversiones del sector eléctrico y de los usuarios del servicio.
- Sanear la economía del sector eléctrico.
- Contribuir al desarrollo económico y social del país.

Con la implantación de este programa se prevé^e disminución en el pico de la demanda de 12%, de 10% en el consumo de energéticos y de una reducción en la capacidad proyectada para 1990 de 40000 MW a 30000 MW.

1.3 EVOLUCION DEL SECTOR ELECTRICO.

El sector eléctrico ha tenido modificaciones importantes en las últimas tres décadas, tanto en su forma estructural, como en su forma de producción.

La principal modificación estructural se debe a la nacionalización de la industria en 1980. En cuanto a la forma de producción, la tendencia que hasta 1970 se presentaba se invirtió, dando preferencia a la tecnología termoelectrica en sus diversas modalidades para la producción del fluido eléctrico.

La tabla No. 1.1 muestra el crecimiento en la capacidad instalada y en la generación por tipo de planta en la década de los sesenta. Como se puede observar, la generación bruta de electricidad provenia en 53% de centrales hidroeléctricas y en 47% por centrales termoelectricas.

Sin embargo, en el transcurso de la década de los setenta los hidrocarburos empiezan a tener un mayor impacto en las decisiones de equipamiento, modificando sustancialmente la situación anterior. Es así como a partir de entonces las plantas hidroelectricas decrecen en su aportación porcentual a la producción total y empieza una etapa de generación con base en las plantas termoelectricas compuestas por: turbinas de vapor, maquinas de combustión interna (Diesel), turbinas de gas y turbinas de gas y vapor (Ciclo combinado).

A consecuencia de ello se observa entonces que la participación de las centrales termicas aumenta a 78% y el 22% restante corresponde a hidroeléctricas. Las tablas 1.2 y 1.3 dan cuenta de esto, en la tabla 1.4 se muestra el aumento del consumo de combustibles utilizados en la generación de energía eléctrica.

El panorama anterior pone de manifiesto la necesidad de realizar análisis profundos sobre el consumo y el uso eficiente de

la energía en las plantas termoeléctricas de generación de electricidad, dada su gran influencia en sector el eléctrico.

Como se menciona en párrafos anteriores, la diversidad de tecnologías de generación termoeléctrica con que actualmente cuenta el sector eléctrico, así como la influencia que en el mismo tienen las particularidades tecnológicas, hacen que para el análisis de selección de algún tipo de ellas. En este trabajo el análisis se enfocará exclusivamente a las centrales termoeléctricas de vapor que utilizan combustóleo y carbón como fuente energética primaria.

Los análisis realizados hasta ahora del ciclo térmico de una central termoeléctrica, a fin de evaluar las pérdidas, mejorar eficiencias y obtener ahorros de energía, se basan principalmente en el uso de balances térmicos. Estos se apoyan en el principio de la conservación de la materia y en el primer principio de la termodinámica. Sin embargo, las necesidades de ahorro y eficiencia energética han demostrado que con este análisis no es suficiente para determinar el valor real de la energía aprovechable para ser convertida en trabajo. Es decir, con el análisis térmico se calcula la cantidad de energía en un ciclo o proceso, más no así su calidad. De aquí que, desde hace algunos años el estudio para determinar la calidad de la energía se ha desarrollado de manera notable, principalmente en los países europeos, dando origen a una nueva técnica de análisis llamada análisis exergetico.

El análisis exergetico tiene su base en el concepto de la energía; fue creado a mediados de la década de los treinta y está considerado como una herramienta de análisis que califica la energía por su capacidad de producir trabajo. De los resultados del mismo, se obtiene un panorama más claro de las pérdidas de energía y como consecuencia de ello su valoración en términos económicos. De aquí que este tipo de análisis sea considerado como un recurso preciso para el diagnóstico, control y optimización integral de un proceso, y para proporcionar criterios en la toma de decisiones en materia de ahorro de energía.

ARO	HIDROELECTRICAS	TERMoeLECTRICAS		TOTAL
60	1 200.00 4 455	1 108.0 4 134		2 308.0 8 589
61	1 205 4 474	VAPOR	1 203 4 974 COMBUSTION	2 435 9 448
62	1 438 5 332	995.0 4 599	181.0 348	2 612 10 387
63	1 501 5 624	1 539 5 492	204 327	3 244 11 443
64	1 747 6 742	1 897 6 297	220 361	3 664 13 400
65	2 149 8 538	1 775 5 590	241 389	4 165 14 717
66	2 482 9 954	1 771 5 742	262 468	4 515 16 162
67	2 511 10 855	1 863 6 801	288 479	4 642 17 935
68	2 509 12 406	1 933 7 078	355 533	4 797 20 016
69	3 229 13 303	2 038 8 974	391 788	5 658 23 065
70	3 229 14 805	2 353 10 360	487 885	6 069 26 030

TABLA 1.1 CRECIMIENTO EN LA CAPACIDAD INSTALADA Y EN LA GENERACION POR TIPO DE PLANTA. (MW/kWh x 10⁶)

FUENTE: REFERENCIA 22.

AÑO	HIDRO ELECTRICA	T E R M O E L E C T R I C A						TOTAL
		CICLO VAPOR	COMBINADO	TURBOGAS	GEOTERMO ELECTRICA	COMBUS- TION INTERNA	CARBO ELECTRICA	
1974	3521	3419	130	917	75	259	-	8371
1975	4044	3431	610	1419	75	251	-	9830
1976	4541	5012	610	948	75	274	-	11450
1977	4723	5061	720	1266	75	247	-	12082
1978	5225	6458	720	1267	150	234	-	14298
1979	5219	6710	720	1259	150	137	-	14625
1980	5992	6610	940	1290	150	137	-	14625
1981	6550	7485	1223	1539	180	118	300	17395
1982	6550	8325	1223	1685	205	101	300	19390
1983	6532	8655	1223	1698	205	91	600	19004
1984	6532	8929	1227	1760	205	107	600	19350
1985	6532	9599	1450	1789	425	112	900	20807
1986	6532	9949	1450	1789	535	111	900	21256

TABLA 1.2 POTENCIA REAL INSTALADA EN OPERACION (MW)

FUENTE: RESUMEN DE OPERACION 1986. CFE.

GENERACION BRUTA ANUAL
GWh

AÑO	HIDRO ELECTRICA		T E R M O E L E C T R I C A					TOTAL
	VAPOR	COMBINADO	TURBOGAS	GEOTERMO ELECTRICA	COMBUS- TION		CARBO ELECTRICA	
					INTERNA	ELECTRICA		
1974	16602	17915	198	2068	463	702	-	38008
1975	15016	19962	1646	3403	518	734	-	40879
1976	17087	22128	1932	2386	579	540	-	44632
1977	19035	25280	2045	1537	592	456	-	48945
1978	16066	30322	2488	3027	598	476	-	52977
1979	17679	33098	2317	3343	1019	454	-	58070
1980	16740	37012	3297	3624	915	310	-	61868
1981	24446	35527	3456	3202	964	251	33	67879
1982	22729	40025	5272	2438	1296	167	1278	73225
1983	20583	44822	4281	1281	1353	107	2424	74831
1984	23448	46342	4122	939	1424	100	3132	79507
1985	26067	48322	4554	853	1641	43	3652	85352
1986	19876	53247	5866	600	3394	63	6837	89383

TABLA 1.3

FUENTE: ESTADISTICAS DEL SECTOR ELECTRICO NACIONAL, 1974-1986.
(CFE).

AÑO	COMBUSTOLEO	DIESEL	GAS	MEZCLA	CARBON	K CALx10 ⁹
	M ³ x10 ³	M ³ x10 ³	M ³ x10 ⁶	M ³ x10 ³	TONx10 ³	
1974	4 194	898	1 768	11	124	64 154
1975	4 581	1 284	2 494	17	108	79 567
1976	5 394	1 157	2 029	32	121	82 819
1977	6 043	903	1 951	29	121	86 284
1978	7 171	1 198	2 581	32	-	105 091
1979	7 082	1 214	3 614	31	-	112 857
1980	8 653	1 181	3 354	22	-	126 204
1981	8 453	1 140	3 031	23	6	121 140
1982	9 703	862	3 339	5	654	136 333
1983	11 045	327	2 782	-	1 305	142 462
1984	11 870	420	2 207	-	1 615	148 537
1985	12 299	278	2 314	-	1 949	154 267
1986	13 148	234	3 013	-	3 213	173 297

TABLA 1. 4. CONSUMO DE COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA.

FUENTE: ESTADISTICAS SECTOR ELECTRICO NACIONAL. 1974-1986. CFE.

CONSUMO DE
ENERGIA

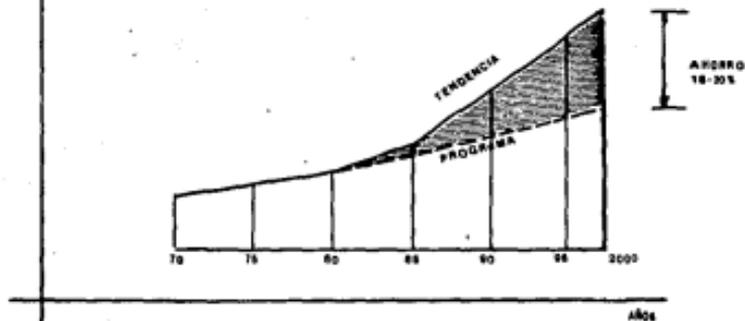


FIGURA 1.1 AHORRO DE ENERGIA

Fuente: Programa de Energia. 1982-1988. SEMIP

CAPITULO 2.

LA ENERGIA Y LOS POSTULADOS TERMODINAMICOS.

Para poder utilizar adecuadamente la energía es necesario saber cómo y de qué forma ésta se transforma y se transmite con el medio con el que está en interacción. Las formas de intercambio de energía que se efectúan en un proceso termodinámico son el calor (Q) y el trabajo (W). De aquí que un sistema que contenga materia que sea capaz de producir trabajo e intercambiar calor, puede ser tan sencillo o complicado, de acuerdo con el grado en que se requiere aprovechar estas formas de energía.

Como en todo fenómeno físico y químico, las manifestaciones de la energía están sujetas a leyes o principios bien establecidos, que se conocen bajo el nombre de la 1a. y 2a. leyes de la Termodinámica.

2.1 PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA.

La 1a. ley de la termodinámica es una expresión del principio de conservación de la energía, que en su forma más sencilla expresa que "la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma". En otros términos, la cantidad de energía de un sistema cualquiera aislado, es decir, de aquel sistema termodinámico que no intercambia calor, trabajo, o sustancia con el medio circundante, se conserva invariable. Este enunciado no niega la posibilidad de que ocurran cambios en el interior del sistema, ya que la energía puede redistribuirse libremente entre las distintas formas, pero sin que varíe la energía total del mismo.

En forma matemática la 1a. ley de la termodinámica se expresa como sigue:

$$\Delta E = Q - W \quad (2.1)$$

Donde ΔE representa el incremento total que experimenta la energía del sistema durante el tiempo que tienen lugar los intercambios de las cantidades de energía W y Q . Además ΔE puede descomponerse en varios términos, cada uno de los cuales representa el cambio de una forma particular de energía:

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U \quad (2.2)$$

donde:

Q es el calor suministrado al sistema

W es el trabajo hecho por el sistema

ΔE_c es el cambio de la energía cinética

ΔE_p es el cambio de la energía potencial

ΔU es el cambio de la energía interna

sustituyendo (2.2) en (2.1)

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = Q - W \quad (2.3)$$

La ecuación (2.3) toma la siguiente forma cuando es aplicada a un proceso de flujo estable y para la unidad de masa en un sistema:

$$\left(\frac{V_2^2}{2g_c} - \frac{V_1^2}{2g_c} \right) + \left(\frac{Z_2 g}{g_c} - \frac{Z_1 g}{g_c} \right) + \left[(u_2 + p_2 v_2) - (u_1 + p_1 v_1) \right] = Q - W \quad (2.4)$$

reordenando términos:

$$Q + u_1 + p_1 v_1 + \frac{v_1^2}{2g_c} + \frac{Z_1 g}{g_c} = u_2 + p_2 v_2 + \frac{v_2^2}{2g_c} + \frac{Z_2 g}{g_c} + W \quad (2.5)$$

Los términos "u" y "pv" se agrupan para formar la propiedad conocida como entalpía:

$$h = u + pv$$

de donde la ecuación (2.5) toma la forma

$$Q + h_1 + \frac{v_1^2}{2g_c} + \frac{Z_1 g}{g_c} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g_c} + \frac{Z_2 g}{g_c} + W \quad (2.6)$$

2.2 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA.

La 1a. ley de la termodinámica como expresión de la conservación de la energía permite la libre transformación o conversión de una forma a otra; no impone restricciones siempre y cuando la energía total sea conservada. Por medio de ella se puede saber en un proceso, cuanta energía se gasta para llevar un fluido o agente de transformación desde un punto inicial a otro. Por medio de la 2a. ley es posible saber por cuál camino o proceso es factible llevar a cabo esta transformación.

La 2a. ley generalmente está enfocada a procesos repetitivos que forman un ciclo. En los procesos cíclicos, la transformación de la energía en forma de calor a trabajo, no es total; siempre existirán pérdidas o degradaciones no cuantificadas en el análisis por la 1a. ley. Estas degradaciones son indeseables y deben reducirse al máximo cuando se pretenda optimizar el uso de la energía. La 2a. ley provee los medios necesarios para cuantificarla, es decir, es posible conocer la calidad de la energía.

La 2a. ley de la termodinámica establece el criterio para el comportamiento ideal de las máquinas térmicas, con base en el ciclo de Carnot; determina el sentido o dirección de los cambios de los procesos y establece el estado final de equilibrio para los procesos espontáneos.

2.3 REVERSIBILIDAD E IRREVERSIBILIDAD, ENTROPIA Y EL CICLO DE CARNOT.

Para comprender mejor el 2o. principio de la termodinámica, es necesario tener en cuenta los conceptos que involucran en que medida una máquina o un ciclo se acerca al ciclo ideal (de Carnot), debido principalmente a las inevitables pérdidas que se suceden en los procesos y que finalmente conducen a clasificarlos en reversibles o irreversibles.

Por definición un ciclo es reversible cuando es posible llevarlo a cabo en forma directa e inversa sin variar su trayectoria y con la obtención de la misma cantidad de calor y trabajo. Por el contrario, un proceso o ciclo irreversible es aquel en el cual la energía suministrada no es recuperable por algún medio natural, es decir, se necesita de un factor externo (calor o trabajo) para que vuelva a su forma original.

La entropía es una propiedad que describe a la sustancia en función del cambio de temperatura cuando ésta recibe o cede calor. Matemáticamente la entropía se expresa por la siguiente ecuación:

$$ds \geq \frac{dq}{T} \quad (2.7)$$

donde "s" es la entropía.

Para un proceso reversible:

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (2.8)$$

Para un proceso irreversible:

$$ds > \frac{dQ}{T} \quad (2.9)$$

Entonces, como en todo proceso irreversible se degrada la energía, una manera de cuantificar esta energía desaprovechada es mediante el incremento de la entropía; es decir el cambio de entropía es directamente proporcional al trabajo útil perdido.

El ciclo de Carnot es un ciclo fundamental en la termodinámica que describe la máxima cantidad de trabajo que es posible obtener de una máquina térmica que trabaja entre dos fuentes de calor a distinta temperatura.

Este ciclo (figura 2.1.a) consta de dos procesos a temperatura constante (isotermicos) y dos sin transferencia de calor (adiabaticos). En los procesos isotermicos es donde se da la transferencia de calor; en el proceso 1-2 se suministra calor Q_1 ; en el proceso 3-4 hay rechazo de calor Q_2 . El trabajo obtenido por la expansión se representa por el área bajo la curva 1-2-3; el trabajo suministrado para la compresión se representa por la línea 3-4-1 y el trabajo útil que se obtiene al exterior se representa por el Área 1-2-3-4-1.

En el ciclo de Carnot los procesos de compresión y expansión son a entropía constante (isentropicos) (figura 2.1.b). Sin embargo en un ciclo real (figura 2.1.c), el proceso de compresión no es isentropico, como lo muestra la línea 4'-1', por las pérdidas mecánicas, el flujo de fluidos y de calor. Nótese que este proceso no isentropico provoca un incremento en la entropía S_1 de $S_1' - S_4'$ o $S_1' - S_1$. El proceso de expansión no isentropico de 2 - 3', también resulta en un incremento de entropía de $S_3' - S_2$ o de $S_3' - S_2$.

La consecuencia de este comportamiento no isentropico para los ciclos es que existe un incremento neto en la producción de entropía. Esta producción de entropía es la medida de la

irreversibilidad de un ciclo. En los diseños de los sistemas se deberá minimizar dicha producción de entropía.

Otra fuente de producción de entropía en los sistemas de energía se muestra en la figura (2.2) donde las irreversibilidades resultantes de la transferencia de calor se deben a la diferencia finita de las temperaturas. La transferencia de calor, de la fuente de calor, a la temperatura T_1 , al ciclo, a la temperatura T_1 , es acompañada por una producción de entropía como consecuencia de la irreversibilidad originada por la diferencia de temperaturas. La cantidad de entropía producida por el proceso de transmisión de calor es:

$$\Delta S = (S_4 - S_3) - (S_2 - S_1) > 0 \quad (2.10)$$

La misma situación se tiene cuando el calor se transfiere del ciclo a T_2 a otro medio a T_2 . En este caso la entropía producida en el proceso, como resultado de la irreversibilidad es:

$$\Delta S = (S_6 - S_7) - (S_5 - S_8) > 0 \quad (2.11)$$

Estas pérdidas irreversibles causadas por la transferencia de calor debidas a una diferencia finita de temperaturas se han despreciado en el diseño y análisis de funcionamiento de los sistemas. Sin embargo, con el creciente interés por el ahorro y uso eficiente de la energía, la importancia relativa de estas pérdidas será mayor por la tendencia a la operación de ciclos combinados y sistemas de energía integrados, donde la transferencia de calor entre ciclos y sistemas será de mayor importancia.

Por lo tanto de la 2a. ley de la termodinámica se deduce que la producción de entropía debe ser minimizada para la utilización racional de la energía.

2.4 EXERGIA.

El trabajo máximo que puede obtenerse de un proceso, depende en gran medida de la forma como se presente la energía, de que el proceso sea totalmente reversible y del punto de referencia que se tenga como medida de comparación.

El trabajo máximo es un parametro para determinar la capacidad de producir un efecto util de una cierta cantidad de energía con determinadas condiciones de presión y temperatura y con referencia a un ambiente específico. A esta energía utilizable o trabajo util máximo se le denomina exergia.

2.5 MEDIO AMBIENTE COMO ESTADO DE REFERENCIA.

El medio ambiente tiene un papel importante en el análisis energético, dado que representa el nivel de referencia entre el sistema y un estado estable o de equilibrio en el cual se pierde toda capacidad de realizar trabajo. Cuando un sistema intercambia calor, trabajo o existe reacción química con el medio ambiente, las condiciones de presión y temperatura (T_0 , P_0) de este son las condiciones a las cuales el fluido de proceso (o el sistema) deberá llegar hasta agotar su capacidad de realizar trabajo, despues de esto ya no sera posible obtener trabajo adicional. Se dice entonces que el sistema llega al estado de equilibrio termodinámico.

2.6 ECUACION GENERAL DE LA EXERGIA.

La energía total de un sistema está compuesta por energía interna, energía potencial y cinética, trabajo, calor producido por reacciones químicas, calor producido por radiación, etc., por lo tanto es posible establecer una ecuación general que contenga a todos estos y que exprese la exergia del sistema:

$$Ex = (U-U_0) - T_0(S-S_0) + p_0(V-V_0) + \frac{V^2}{2} + (Z-Z_0)g + \sum_c (\mu_c - \mu_{c0})Nc + \\ + Al \text{ si Fl } o (3T^4 - T_0^4 - 4T_0T^3) + \dots \quad (2.12)$$

La ecuación (2.12), se reduce cuando al analizar ciertos procesos, la intervención de algunos términos es mínima o nula.

Por su capacidad de poder determinar la energía máxima utilizable, esta ecuación tiene aplicación en el estudio de los procesos de flujo de materia y calor en sistemas abiertos. Por lo tanto es posible determinar para el caso de ciclos de vapor para una Central Termoelectrónica, la exergía del flujo de materia, calor y exergía química en las reacciones de combustión, para este tipo de procesos.

2.7 EXERGIA PARA UN FLUJO DE MATERIA EN REGIMEN ABIERTO.

De la ecuación de la 1a. ley de la termodinámica se tiene:

$$dq = dw + dh + \frac{1}{2g} dv^2 + g dz + d\mu \quad (2.13)$$

aplicando el 2o. principio:

$$dq = T ds \quad (2.14)$$

sustituyendo:

$$T ds = dw + dh + \frac{1}{2g} dv^2 + g dz + d\mu \quad (2.15)$$

$$dw = dh - T ds + \frac{1}{2g} dv^2 + g dz + d\mu \quad (2.16)$$

$$dw = d(h - Ts + \frac{1}{2g} v^2 + gz + \mu) \quad (2.17)$$

integrando entre dos puntos específicos donde el fluido realiza el trabajo, la ecuación (2.17) queda:

$$W_{12} = (h_1 - h_2) - T(S_1 - S_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(Z_1 - Z_2) + (\mu_1 - \mu_2) \quad (2.18)$$

Al tomar como referencia el medio ambiente, el sistema estará en equilibrio y no será capaz de producir trabajo ni intercambiar calor con él. Por lo tanto los términos C_2 y Z_2 son nulos; además, si el potencial químico no varía, este término se desprecia y:

$$T = T_0; \quad h_2 = h_0; \quad S_2 = S_0; \quad \mu_1 = \mu_2$$

entonces:

$$W_{12} = (h_1 - h_0) - T_0(S_1 - S_0) + \frac{V_1^2}{2} + g(Z_1) \quad (2.19)$$

en donde al término:

$$(h_1 - h_0) - T_0(S_1 - S_0) = b \quad (2.20)$$

se le conoce como exergía específica de un flujo de materia, y se define por medio de los parámetros de presión y temperatura del flujo (P_1, T_1) y del medio ambiente (P_0, T_0) con los cuales se obtienen las entalpías y entropías respectivas.

2.8 EXERGIA DE UN FLUJO DE CALOR.

Para que exista flujo de calor, se debe cumplir que exista una diferencia de temperaturas entre la fuente caliente y la fuente fría. El 2o. principio de la termodinámica nos dice, entonces, que el máximo rendimiento de tal conversión de energía es:

$$\theta = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (\text{factor de Carnot}) \quad (2.21)$$

y el trabajo máximo o exergía está dado por:

$$W_{\max} = q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) = b_q \quad (2.22)$$

Es decir la exergía que posee la cantidad de calor "q" es función del factor de Carnot.

De la expresión anterior se nota que:

- Si T tiende a infinito, θ tenderá a la unidad, en cuyo caso la energía correspondiente al calor intercambiado será totalmente transformable en trabajo.
- Si $T > T_0$, entonces $0 < \theta < 1$. Lo que indica que, mientras más baja es la temperatura a la cual el calor está disponible, el calor "q" que puede ser transformado en trabajo será mínimo.
- Si $T = T_0$ no es posible ninguna transformación de calor en trabajo.
- Si $0 < T < T_0$ implica que $b_q < 0$; el calor transformable en trabajo es negativo y solo tiene sentido si se analiza en un ciclo frigorífico cuando se suministra trabajo al sistema.
- Si T tiende a cero el factor de Carnot tiende a un valor infinito.

2.9 EXERGIA QUÍMICA.

La exergía de un proceso en el cual tiene lugar una reacción química, está relacionada con la función entalpía libre de Gibbs (g), en donde:

$$b = -\Delta g \quad (2.23)$$

$$\Delta g = g_R - g_P \quad (2.24)$$

donde g_R y g_P son las entalpías libres de Gibbs para los reactivos y los productos que intervienen en la reacción.

2.10 BALANCE EXERGETICO.

Al realizar el análisis exergetico de un ciclo de una CTE es necesario establecer los límites de los procesos que se llevan a cabo en él. De aquí que, despreciando las pérdidas de exergía debidas a los rozamientos, el análisis se efectuará considerando el sistema como un sistema abierto en régimen permanente.

Las ecuaciones que aplican para este caso han sido ya planteadas y se derivan de los postulados de la 1a. y 2a. leyes de la termodinámica y el balance de materia. Como consecuencia de ello es posible plantear un balance exergetico que indique como se distribuyen las pérdidas o ganancias de exergía debido al flujo de calor, materia y a los intercambios de trabajo con el exterior. Por tanto:

$$\sum E_{b, dm_e} + E_{db, q} = \sum E_{b, dm_s} + dW_u + db_d \quad (2.25)$$

en donde:

$\sum E_{b, dm_e}$ y $\sum E_{b, dm_s}$ es la exergía de las masas que entran y salen en el volumen de control.

$E_{db, q}$ es la exergía debida a las transferencias de calor.

dW_u es el trabajo útil producido.

db_d es la exergía perdida por las irreversibilidades en el sistema.

2.11 RENDIMIENTO EXERGETICO.

Al igual que en el análisis por la 1a. ley es posible establecer un rendimiento de exergía que, a diferencia del rendimiento energético, presente la característica de que es determinado en función del trabajo útil (exergía útil) y el trabajo disponible (exergía neta entrante), donde la exergía útil es:

$$b_{\text{util}} = b_{\text{disponible}} - b_{\text{perdida}} \quad (2.26)$$

El rendimiento exergetico específico se calcula por medio de la siguiente relación:

$$\eta_{*k} = \frac{b_{\text{util}}}{b_{\text{disponible}}} \quad (2.27)$$

y el rendimiento exergetico total es:

$$\eta_{*k} = \frac{\sum B_s}{\sum B_e} \quad (2.28)$$

donde: B_s son las exergías que salen del sistema como efecto útil.

B_e son las exergías que entran al sistema como recursos necesarios.

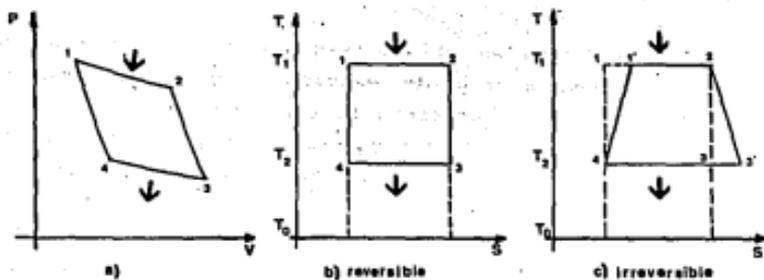
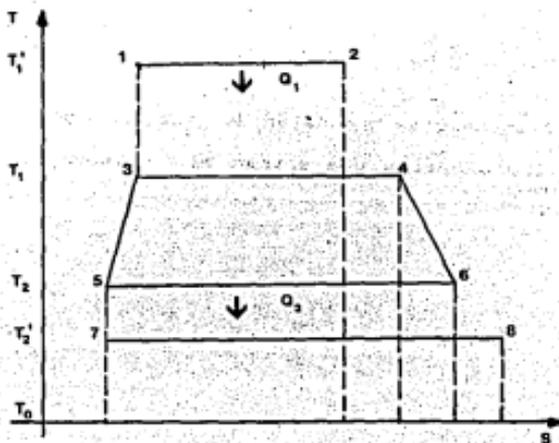


FIGURA 2.1 CICLO DE CARNOT



FI

CAPITULO 3.

CICLOS TERMODINAMICOS

Un ciclo termodinámico es la repetición sucesiva de una serie de procesos, ejecutada por un fluido de trabajo, en donde el calor suministrado al ciclo se transforma en trabajo. El ciclo de Carnot generalmente se toma de referencia para comparar y determinar el grado de eficiencia de cualquier ciclo que se efectue en el mismo intervalo de temperaturas. Cuanto más se acerque el área de un ciclo real a la del ciclo de Carnot, tanto mayor será el rendimiento térmico de dicho ciclo arbitrario.

El rendimiento del ciclo de Carnot se expresa como:

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (3.1)$$

y tiene siempre un valor menor que la unidad. Este rendimiento será igual a uno en dos casos prácticamente imposibles: cuando T_1 sea infinito y cuando T_2 sea cero. Comparando el ciclo reversible contra el ciclo irreversible se tiene que:

$$\eta_{CI} < \eta_{CR} < 1$$

En la época actual, uno de los ciclos más usados es el ciclo Rankine, el cual tiene su mayor aplicación en las plantas de fuerza de vapor o de producción de potencia. En este ciclo, la sustancia de trabajo es el agua, la cual va cambiando sus estados físicos y propiedades durante su trayectoria en el ciclo, hasta volver a su estado original y comenzar otra vez.

El ciclo Rankine se muestra en la figura (3.1) en un diagrama presión - volumen y temperatura - entropía.

Estos diagramas pertenecen a un ciclo cerrado de vapor y corresponden a una planta ideal que consta de un generador de vapor que recibe agua de alimentación a la presión de una bomba; de una turbina en la cual se produce trabajo por la expansión del vapor, y de un condensador para convertir el vapor del escape en líquido y así bombearse para repetir el ciclo (figura 3.2).

Este ciclo simple, ha tenido modificaciones tendientes a mejorar su eficiencia, ideándose ciclos más complejos como son el ciclo con recalentamiento y el regenerativo. Las modernas plantas de potencia usan una combinación de ciclo regenerativo con recalentamiento.

3.1 DESCRIPCION DE UNA CENTRAL TERMOELECTRICA.

Una central termoelectrónica (CTE) es una instalación principalmente electromecánica, en la cual se genera el fluido eléctrico.

El ciclo con el que opera una CTE convencional es el Rankine con recalentamiento y regeneración, en donde el fluido de operación es el agua, la cual cambia de estado a su paso por los diferentes componentes de la planta. La figura 3.3 muestra este ciclo en diagrama T-S.

Las CTE constan de un gran número de equipos, los cuales unidos entre sí por medio de tuberías y accesorios, conforman diferentes sistemas. Los equipos de mayor importancia son:

- Generador de vapor
- Turbina
- Condensador

- Bombas de condensado.
- Bombas de agua de alimentación
- Calentadores de alta y baja presión

La figura (3.4) es la representación esquemática de un ciclo con recalentamiento y regeneración, de una CTE de 350 MW de las usadas en la actualidad por C. F. E.

Los sistemas principales en los cuales se divide el ciclo son:

- Sistemas de vapor principal, recalentado frío y recalentado caliente.
- Sistema de agua de alimentación.
- Sistema de condensado.
- Sistema de extracciones.
- Sistema de combustible.
- Sistema de aire y gases.
- Sistema de agua de circulación.

Existen otros sistemas que ayudan al funcionamiento de la planta, como son el aire para instrumentos, aire para servicios y agua de enfriamiento entre otros.

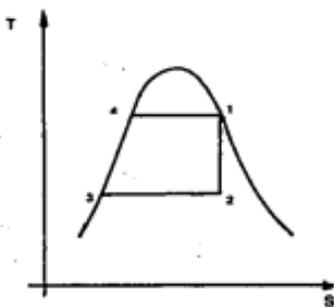
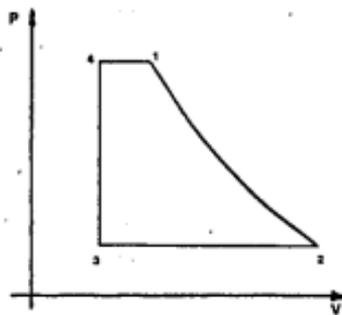


FIGURA 3.1



CICLO RANKINE

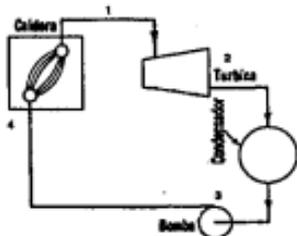


FIGURA 3.2

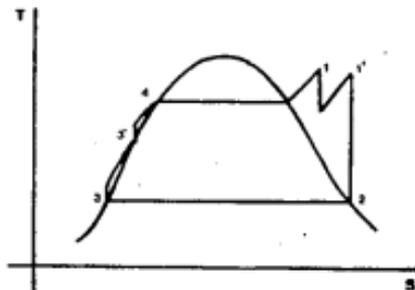


FIGURA 3.3 CICLO RANKINE
CON RECALENTAMIENTO Y REGENERACION

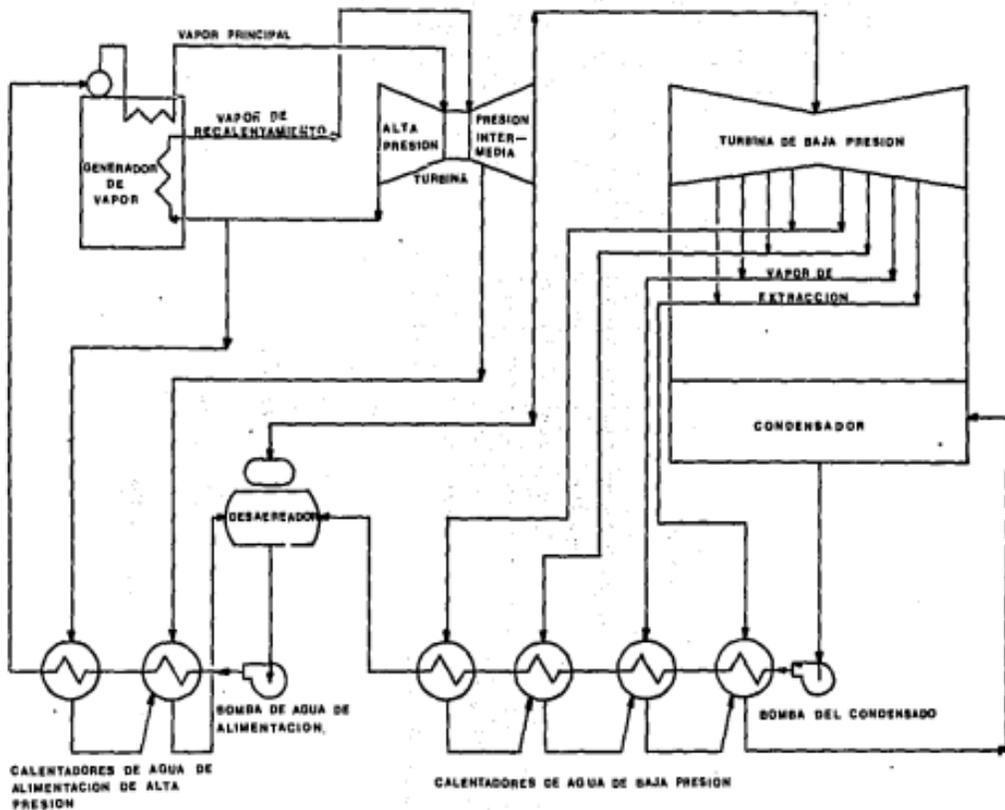


FIGURA 3.4 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UN CICLO CON RECALENTAMIENTO Y REGENERACION

CAPITULO 4

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UNA CENTRAL TERMOELECTRICA.

Para realizar el análisis energético de una central termoeléctrica (CTE), es necesario conocer las propiedades termodinámicas del fluido de proceso a las condiciones de presión y temperatura con las que operan los equipos. Estas condiciones se indican en el balance térmico de la planta y en los datos de comportamiento del generador de vapor.

La figura (4.1) muestra un balance térmico típico para una C.T.E. de 350 MW. En él se muestran las propiedades del fluido de trabajo en cada uno de los equipos a la entrada y salida, entonces según lo expuesto en el inciso 2.7, conociendo las propiedades de entalpia y entropia es posible calcular la exergía en cada uno de los puntos respectivos. En el presente trabajo, el análisis es aplicado a los equipos principales que conforman una CTE, los cuales se agrupan en:

- Generador de Vapor
- Turbina de vapor de alta presión
- Turbina de vapor de media presión
- Turbina de vapor de baja presión
- Condensador
- Calentadores de baja presión
- Calentadores de alta presión

Una vez obtenidos todos los valores de la exergia en las corrientes que interesan, se procede a la elaboración de una matriz conformada por los flujos y los equipos, con lo cual se pueden obtener los términos de las ecuaciones para el balance de exergia en cada equipo o grupo. Parte de este procedimiento fue obtenido de la referencia (20), tiene la característica de reducir los cálculos y es suficiente para obtener un resultado global, pero no por ello menos preciso de las pérdidas de exergia en una CTE.

4.1 DESARROLLO.

De acuerdo a los incisos (2.7) y (2.8), la exergia para un flujo de materia sin mezcla ni reacción, viene dado por:

$$b = (h_i - h_o) - T_o (s_i - s_o) \quad (2.20)$$

y para un flujo de calor:

$$b_q = Q \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) \quad (2.22)$$

La exergia química para un flujo de corriente con reacción y/o mezcla de componentes ya no se presenta tan sencilla como se expresó anteriormente. Particularmente hablando sobre el proceso de reacción que ocurre en un generador de vapor, (que en este caso es el proceso de combustión), es necesario calcular las energías del combustible y de los gases de combustión por medio de ecuaciones específicas que se presentan en el inciso 4.1.1 a y b, las cuales fueron obtenidas de la referencia (10).

En el presente trabajo, se dan por hechos los balances de materia y energía tanto en el ciclo agua-vapor como en el generador de vapor, por lo que las ecuaciones presentadas para estos conceptos solo se dan a manera de referencia. Así mismo, no se toman en cuenta los intercambios o pérdidas de materia con el exterior, ni las pérdidas de presión en las tuberías.

La figura (4.2) es un diagrama de flujo simplificado de una CTE, en el solo se muestran los flujos principales de agua, vapor, aire, combustible y gases que entran y salen en los equipos. El cuadro No. 1 es la matriz que se deriva del diagrama y se elabora relacionando los equipos con los flujos. Las columnas corresponden a los flujos, los cuales se representan por numeros; los renglones corresponden a los equipos. El signo positivo (+) indica que el flujo entra al equipo, el signo negativo (-) indica que sale, el cero indica que no existe relación entre flujo y equipo.

Por ejemplo, los flujos con los que tiene relación la turbina de presión intermedia (TPI) son: flujo 4 (vapor recalentado caliente), le corresponde signo (+); flujos 10 y 11 (extracciones de vapor), les corresponde signo (-), flujo 5 (vapor turbina a baja presión), le corresponde signo (-). Como los demás flujos no tienen relación con este equipo el resto del renglón se indica con ceros.

La identificación de los flujos para este diagrama es como sigue:

<i>FLUJO</i>	<i>DESCRIPCION</i>
1	Vapor sobrecalentado
2,3	Vapor recalentado frio
4	Vapor recalentado caliente
5	Vapor a turbina de baja presión
6	Vapor de escape al condensador
7,8	Condensado
9	Agua de alimentación al generador de vapor
10,11,15	Extracciones de alta presión
12,13,14,15	Extracciones a baja presión
17	Aire para combustión

- 18 Combustible
- 19 Gases de combustión

La identificación de los equipos es:

- TAP Turbina de alta presión
- TPI Turbina de presión intermedia
- TBP Turbina de baja presión
- COND Condensador
- CBP Calentadores de baja presión
- CAP Calentadores de alta presión
- GV Generador de vapor
- ALM Almacenamiento de combustible
- AMB Medio ambiente
- DER Elemento que se utiliza para entrada y salida de flujos pero en el no hay acumulación ni transformación de calor o trabajo.

Posterior a la elaboración de la matriz se plantean los balances de exergía en cada equipo. En los incisos 4.1.1 al 4.1.7 se muestra la forma de realizar los balances en cada uno de ellos.

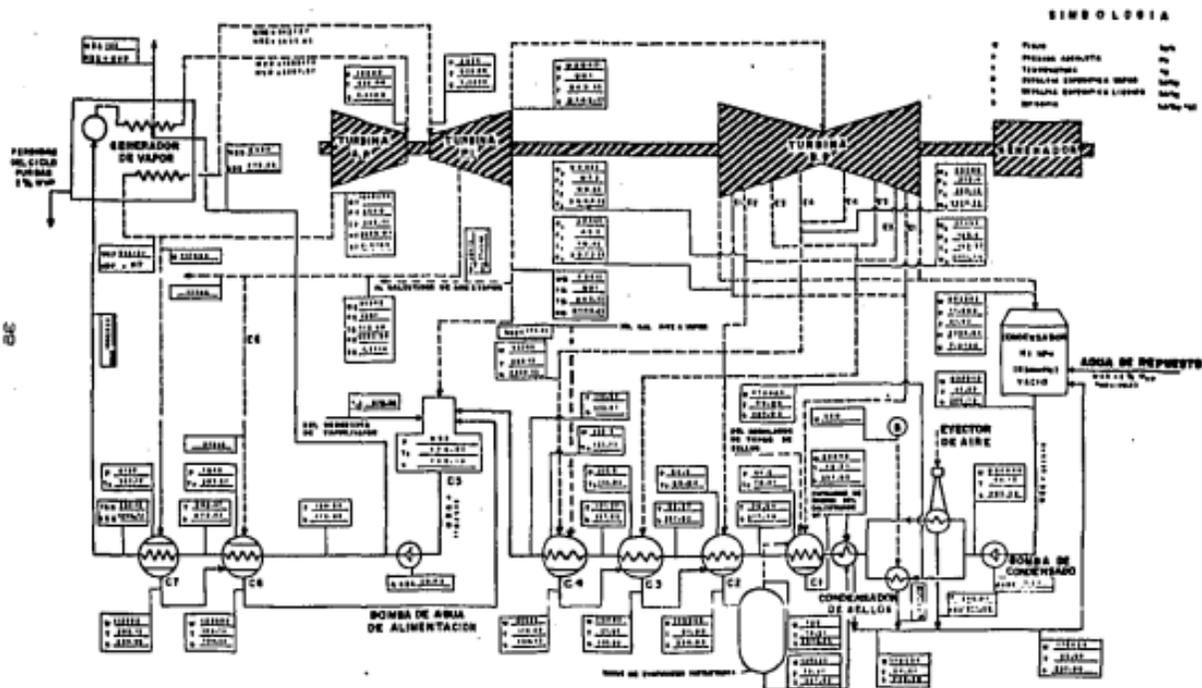


FIGURA 4.1 BALANCI TERMILO Para Una U.L. DE 500 MW

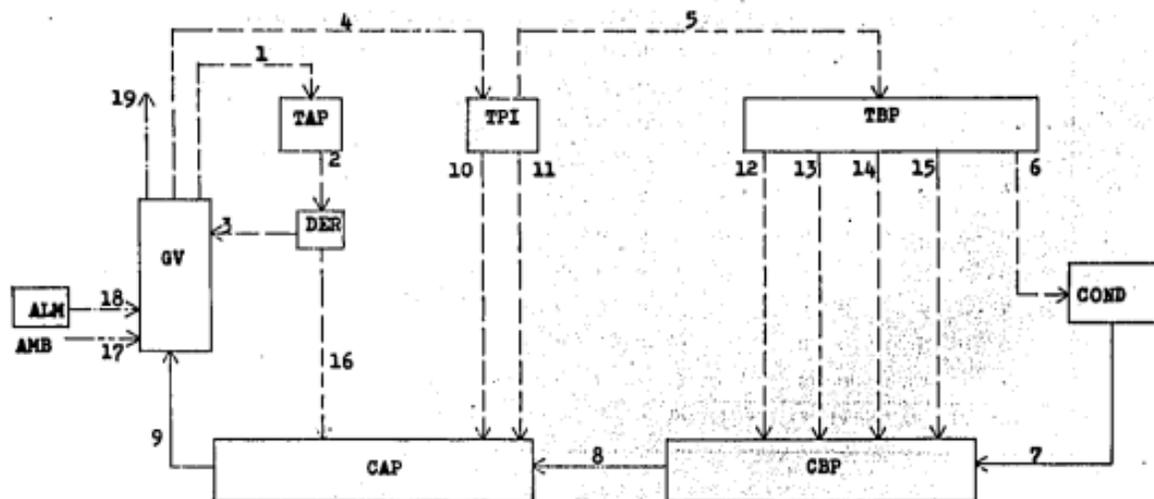


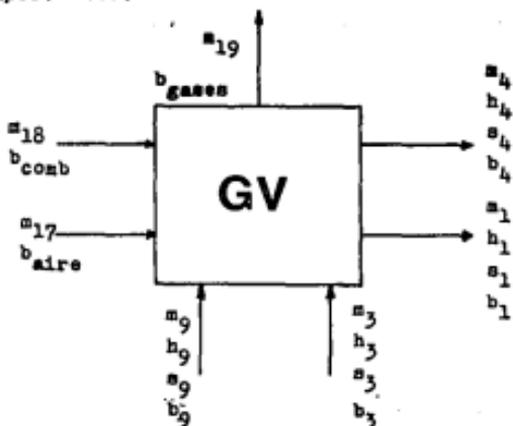
FIGURA 4.2 DIAGRAMA SIMPLIFICADO PARA UMA CENTRAL TERMOELECTRICA

	F L U J U																		
FMJ(P)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
GV	-	0	+	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	+	+	-
TMP	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TPI	0	0	0	+	-	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
YDP	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0
FOHO	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CDP	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0	+	+	+	+	0	0	0	0
CHP	0	0	0	0	0	0	0	+	-	+	+	0	0	0	0	+	0	0	0
DEP	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0
RLH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0
RNI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	+

C H R R P O 41

N H T P I 7 O F F L U J O S

4.1.1 Generador de vapor. (GV)



El balance de exergía es:

$$\Sigma B_{\text{e}} + \Sigma B_{\text{q}} = \Sigma B_{\text{s}} + W_{\text{u}} + B_{\text{d}}$$

dónde $W_{\text{u}} = 0$; y B_{d} es la exergía que se pierde en el proceso de combustión y en los procesos de transferencia de calor por concepto de pérdidas al exterior. El término B_{s} corresponde a las exergías de los flujos y a los potenciales químicos de las corrientes que entran; el término B_{q} es nulo y representa la exergía del flujo de calor si hubiera una fuente externa de calor. Por tanto, la ecuación anterior queda:

$$B_{\text{d}} = (m_{18} b_{\text{comb}}) + (m_{17} b_{\text{aire}}) + (mb)_{\text{p}} + (mb)_{\text{s}} - (m_{19} b_{\text{gases}}) - (mb)_{\text{4}} - (mb)_{\text{1}}$$

La evaluación de las exergías del combustible y los gases de combustión que escapan a la atmósfera, requieren un tratamiento aparte por tratarse de compuestos o sustancias que ya no se presentan como elementos únicos en el análisis, sino que ahora se deben considerar como mezclas de varios elementos.

Los datos que sirven como punto de partida para obtener las exergias del combustible y los gases de escape, son la composición del combustible y de los gases de combustión expresadas en porcentaje en peso. Así mismo, debe tenerse también el poder calorífico superior del combustible y las condiciones ambientales del sitio donde se localiza la planta.

a) Exergia del combustible.

La exergia del combustible se calcula por:

$$B_{\text{comb}} = b_{\text{comb}} \cdot \text{NC} \text{ (cal/kg de combustible)} \quad (4.1)$$

donde: NC es el número de moles por kg. de combustible y b_{comb} se obtiene de la siguiente ecuación:

$$b_{\text{comb}} = -[\Delta H_R^\circ - T_0 \Delta S_R^\circ + \Delta C_{pR}^\circ (T_0 - T^\circ) - \Delta C_{pR}^\circ T_0 \ln \frac{T_0}{T^\circ}] + RT_0 \ln \frac{(X_{O_2})^{\nu_{O_2}}}{(X_{CO_2})^{\nu_{CO_2}} (X_{N_2})^{\nu_{N_2}}} + C_c [(T_1 - T_0) - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0}] \text{ (cal/mol)} \quad (4.2)$$

En donde el término $\Delta H_R^\circ - T_0 \Delta S_R^\circ$ es el trabajo útil obtenido en la combustión reversible y los términos restantes de la ecuación:

$$\dots \Delta C_{pR}^\circ (T_0 - T^\circ) - \Delta C_{pR}^\circ T_0 \ln \frac{T_0}{T^\circ} + RT_0 \ln \frac{(X_{O_2})^{\nu_{O_2}}}{(X_{CO_2})^{\nu_{CO_2}} (X_{N_2})^{\nu_{N_2}}}$$

representan el trabajo de expansión de los productos de combustión; y la ecuación completa no es otra cosa más que la suma de la exergia química más la exergia física del combustible.

Los términos ΔH_R^0 , ΔS_R^0 , ΔCp_R^0 , se calculan por medio de las siguientes expresiones:

$$\Delta H_R^0 = -\frac{PCS}{HC} - 81068s \quad (\text{cal/g mol})$$

$$\Delta S_R^0 = (S^0 \nu)_{CO_2} + (S^0 \nu)_{N_2} + (S^0 \nu)_{H_2O} + 25.16s \\ - (S^0 \nu)_{O_2} - S_C^0 \quad (\text{cal/g mol K})$$

$$\Delta Cp_R^0 = (Cp_R^0 \nu)_{CO_2} + (Cp_R^0 \nu)_{N_2} + (Cp_R^0 \nu)_{H_2O} - 29.43s - (Cp_R^0 \nu)_{O_2} \\ - Cx \quad (\text{cal/g mol K})$$

Los valores S^0 y Cp_R^0 para cada componente se dan en la tabla 4.1. En el anexo 2 se muestra como se obtiene el coeficiente estequiométrico (ν) para cada componente, la ecuación para calcular S_C^0 y el valor de C_x .

b) Gases de Combustión.

La exergía de los gases de combustión, se obtiene considerando estos como mezcla de gases ideales, y viene dada por:

$$b_g = \sum Y_i * b_{gi} \quad (4.3)$$

en donde el término b_{gi} corresponde a cada uno de los componentes que conforman los gases de combustión, y esta compuesto por la contribución térmica, química y mecánica.

$$b_{gi} = (b_{gi})_t + (b_{gi})_m + (b_{gi})_q \quad (4.4)$$

Para calcular cada una de las contribuciones se usan las siguientes expresiones:

$$(b_g)_t = (A - T_o B_i)(T - T_o) + 1/2(B - T_o C)(T^2 - T_o^2) + 1/3(C - T_o D)(T^3 - T_o^3) + 1/4 D(T^4 - T_o^4) - A T_o \ln T/T_o \quad (4.5)$$

$$(b_g)_m = R T_o \ln p/P_o \quad (4.6)$$

$$(b_g)_q = R T_o \ln y_i/X_i \quad (4.7)$$

donde:

- Los valores de A, B, C y D vienen dados en la tabla 4.2
- i es para N_2 , O_2 , CO_2 , y H_2O
- T es la temperatura de los gases de combustión a la salida del precalentador de aire lado gases.
- y_i es la fracción molar de cada uno de los componentes que conforman los gases y es igual a $y_i = n_i/n_{hh}$

donde n_i es el número de moles para:

$$N_2 = n_{N_2} = (1 + ea) * 0.7901 * at + n/2$$

$$O_2 = n_{O_2} = v + ea * 0.2099 * at + n_{co}/2$$

$$CO_2 = n_{CO_2} = 1 - v - n_{co}$$

$$H_2O = n_{H_2O} = (1 + ea) * x * at + h/2 + w$$

$$CO = n_{CO} = n_{co}$$

$$SO_2 = n_{SO_2} = s$$

$$at = (1 + h/4 - o/2 + s) / 0.2099$$

$$n_{hh} = 1 + h/2 + n/2 + s + w (0.7901 + x) at + ea (1 + x) at$$

donde:

- x es la humedad absoluta y está dada por:

$$x_{H_2O} = P_{v_{H_2O}}(tr)/P_o - P_{v_{H_2O}}(tr)$$

donde: $P_v(\text{tr})_{\text{H}_2\text{O}}$ es la presión de vapor del agua a la temperatura de rocío (tr) [atm].

X_i son las fracciones molares de los componentes de los gases que conforman el aire atmosférico en el ambiente estable de referencia, y están dadas por:

$$X_{\text{CO}_2} = 0.0003 (1 - X_{\text{H}_2\text{O}})$$

$$X_{\text{N}_2} = 0.7898 (1 - X_{\text{H}_2\text{O}})$$

$$X_{\text{O}_2} = 0.2099 (1 - X_{\text{H}_2\text{O}})$$

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = P_{v_{\text{H}_2\text{O}}} (\text{lbs}) / P_0$$

La exergía química del dióxido azufre (SO_2) y monóxido de carbono, se calculan por medio de:

$$(b_{\text{CO}})_a = 87836 - T_0 * 20.74 + 1.8 [(T_0 - T^0) - T_0 \ln T_0 / T^0] + RT \ln *$$

$$* (y_{\text{CO}} P_0) + RT_0 \ln ((X_{\text{O}_2})^{1/2} / X_{\text{CO}_2})$$

$$(b_{\text{SO}_2})_a = 81088 - T_0 * 42.12 + 15.24 [(T_0 - T^0) - T_0 \ln T_0 / T^0] +$$

$$RT_0 \ln (y_{\text{SO}_2} P_0) + RT_0 \ln ((X_{\text{O}_2})^{1/2} / X_{\text{CO}_2})$$

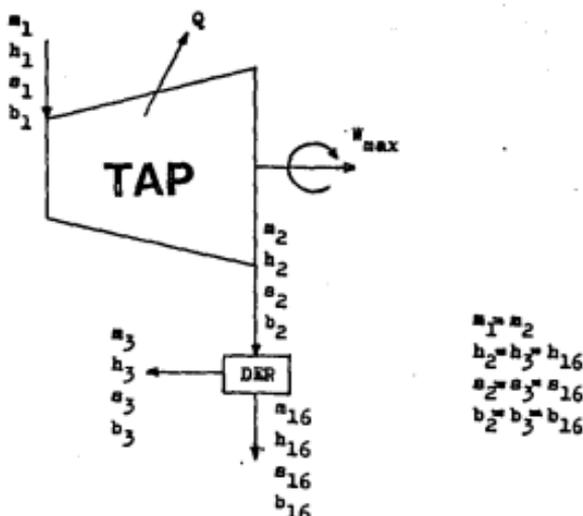
ESPECIE	S° (cal/gmol K)	$C_{p,gr}^{\circ}$ (cal/gmol K)
CO ₂	51.06	8.87
N ₂	45.77	6.96
H ₂ O	18.72	18.0
O ₂	49.0	7.02

Tabla 4.1 Valores de la entropía y calor específico para las especies de la mezcla de gases.

ESPECIE	A	B × 10 ⁻²	C × 10 ⁻⁵	D × 10 ⁻⁹
N ₂	6.903	-0.03753	0.193	-0.6861
O ₂	6.085	0.3631	-0.1709	0.3133
CO ₂	5.316	1.4285	-0.8362	1.784
H ₂ O	7.7	0.04594	0.2521	-0.8587
CO	6.726	0.04001	0.1283	-0.5307
SO ₂	6.157	1.384	-0.9103	2.057

Tabla 4.2 Valores de los coeficientes A, B, C y D en la ecuación 4.8 para los componentes de la mezcla de gases.

4.1.2 Turbina de alta presión. (TAP)



Aplicando la ecuación de exergía para flujo de materia:

$$b_1 = (h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0) \quad [\text{kJ/kg}]$$

donde: i representa la corriente respectiva

0 representa las condiciones ambientales o de referencia.

Aplicando el balance de exergía:

$$\sum b_e + \sum b_{a_i} = \sum b_s + W_{MAX}$$

como no hay pérdidas de calor al exterior, el término $\sum b_{a_i} = 0$ y la ecuación anterior queda:

$$b_e - b_s = W_{MAX}$$

Tomando en cuenta las irreversibilidades del proceso en la turbina:

$$b_d = T_0 (s_2 - s_1) \quad [\text{kJ/kg}]$$

y el trabajo real de la turbina es:

$$W_{real} = W_{max} - b_d \quad (kJ/kg)$$

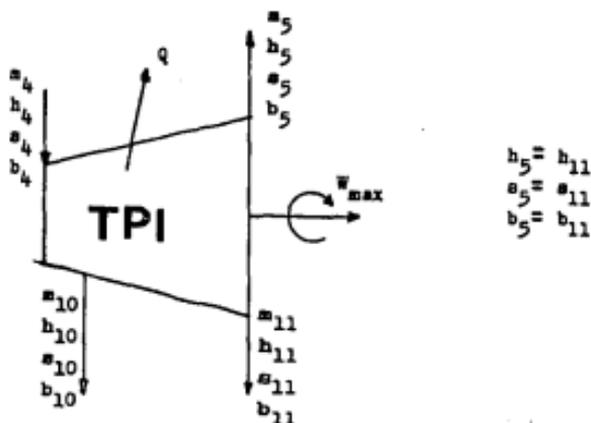
dónde:

$$W_{max} = m_1 (b_1 - b_2) \quad (kJ/h)$$

$$B_d = m_1 (T_0 C_{s_2} - s_1)$$

$$W_{REAL} = W_{max} - B_d \quad (kJ/h)$$

4.1.3 Turbina de presión intermedia. (TPI)



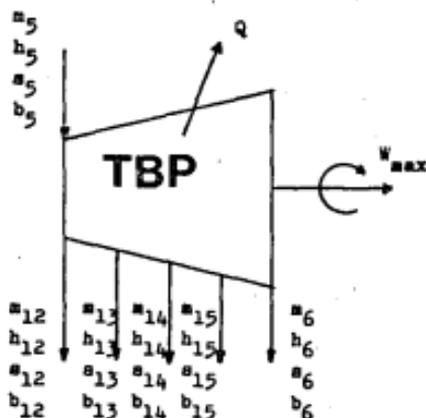
Usando el mismo procedimiento, la ecuación queda:

$$W_{max} = m_4 (b_4 - b_{10}) + C m_4 - m_{10} (b_{10} - b_{11}) \quad [\text{kJ/h}]$$

$$B_d = m_4 [(T_0 C s_{10} - s_4)] + C m_4 - m_{10} [(T_0 C s_{11} - s_{10})] \quad [\text{kJ/h}]$$

$$W_{real} = W_{max} - B_d$$

4.1.4 Turbina de baja presión. (TBP)



Al igual que en los dos casos anteriores, la ecuación queda:

$$W_{\max} = m_5 (b_5 - b_{12}) + m_{12} (b_{12} - b_{13}) + m_{13} (b_{13} - b_{14}) + m_{14} (b_{14} - b_{15}) + m_6 (b_{15} - b_6)$$

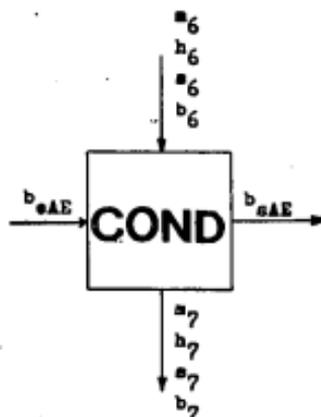
$$B_d = m_5 [T_0 (s_{12} - s_5)] + m_{12} [T_0 (s_{12} - s_{13})] + m_{13} [T_0 (s_{14} - s_{13})] + m_{14} [T_0 (s_{15} - s_{14})] + m_6 [T_0 (s_6 - s_{15})]$$

$$W_{\text{real}} = W_{\max} - B_d \quad [\text{kJ/kg}]$$

donde:

$$\begin{aligned} m_{12} &= m_5 - m_{12} \\ m_{13} &= m_{12} - m_{13} \\ m_{14} &= m_{13} - m_{14} \\ m_{15} &= m_{14} - m_{15} = m_6 \end{aligned}$$

4.1.5 Condensador: (COND)



$$\sum b_{ent} - \sum b_{qd} = \sum b_{sal}$$

$$b_d + b_{sAE} = b_7 + b_{sAE} + b_{qd} \quad [\text{kJ/kg}]$$

como: $b_{sAE} = 0$ y b_{sAE} es despreciable

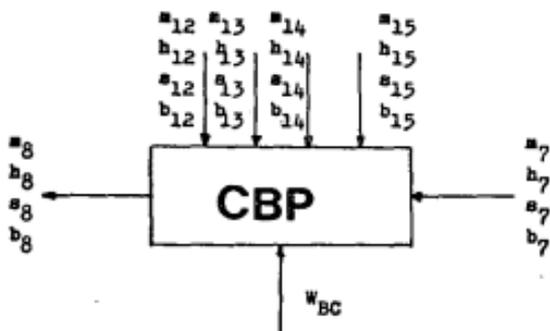
entonces la exergia total es:

$$B_{qd} = (mb)_d - (mb)_7 \quad [\text{kJ/h}]$$

El término B_{qd} representa la exergia perdida debido al intercambio de calor entre el vapor y el agua de enfriamiento en el condensador.

Un análisis riguroso del balance de exergia en el condensador debería incluir el flujo de agua de enfriamiento que entra y sale del equipo; sin embargo, tomando en cuenta que la exergia del agua a la entrada es nula, y a la salida es prácticamente despreciable, la pérdida de exergia (B_{qd}) en el condensador se considera como la disminución total de exergia del vapor que se condensa.

4.1.0 Grupo Calentadores de baja presión y bomba de condensado. (CBP).



Haciendo el balance:

$$\sum b_e + W_{BC} = \sum b_s + b_d \quad [\text{kJ/kg}]$$

por lo tanto:

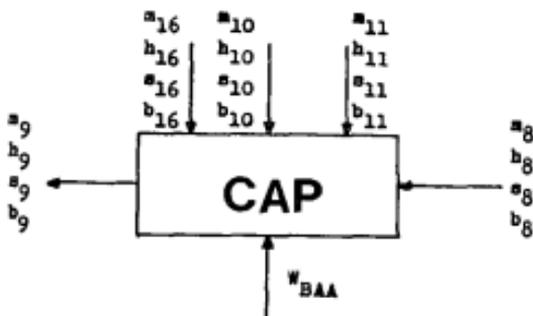
$$B_d = (mb)_{12} + (mb)_{13} + (mb)_{14} + (mb)_{15} + (mb)_7 + W_{BC} - (mb)_8 \quad [\text{kJ/h}]$$

donde:

$$W_{BC} = m_7 \times \Delta b_{BC} \quad [\text{kJ/h}]$$

Δb_{BC} es el incremento de exergía del fluido debido a la compresión en la bomba de condensado y es igual a 1.04 para CTE de 350 MW.

4.1.7 Grupo calentadores de alta presión y bomba agua de alimentación. (CAP).



Como en el caso anterior, la ecuación queda:

$$B_1 = (mb)_8 + (mb)_{10} + (mb)_{11} + (mb)_{16} + W_{BAA} - (mb)_9 \quad [\text{kJ/h}]$$

donde:

$$W_{BAA} = m_p \times \Delta b_{BAA} \quad [\text{kJ/h}]$$

Δb_{BAA} es el incremento de exergia del fluido debido a la compresión en la bomba de agua de alimentación y es igual a 21.74 para una CTE de 350 MW.

4.2 EJEMPLOS NUMERICOS.

Para ejemplificar lo anteriormente expuesto, se analizarán las CTE normalizadas de 350 MW, San Luis Potosí (S.L.P.) y Lazaro Cárdenas, bajo las siguientes consideraciones:

- 1.- Todos los análisis son en condiciones de diseño.
- 2.- Se consideran condiciones de flujo estable sin acumulación de masa ni de energía.
- 3.- Los balances de materia y energía están dados en el balance térmico de la central, y son suministrados por los fabricantes de los equipos.
- 4.- En los balances de exergía no se consideran las caídas de presión en tuberías y accesorios.
- 5.- La central de Lazaro Cárdenas se analizará usando como combustible carbón y combustóleo (sin servicios y con servicios respectivamente), la de S.L.P. solo con combustóleo.
- 6.- Los análisis de los combustibles se muestran en los anexos. Se considera el mismo tipo de combustóleo para ambas plantas y un tipo de carbón para Lazaro Cárdenas.
- 7.- Para el cálculo de la exergía de los gases de combustión, se considera esta como combustión completa, es decir, sin presencia de monóxido de carbono (CO).
- 9.- Las condiciones de referencia son:
 $T_0 = 298 \text{ K}$ y $P_0 = 1 \text{ atm}$ para L. Cárdenas.
 $T_0 = 303 \text{ K}$ y $P_0 = .8024 \text{ atm}$ para S.L.P.

9.- Algunos flujos de vapor y agua no son tomados en cuenta para el balance de exergía.

10.- Para el caso de los diagramas de flujo simplificados, se hacen ligeras modificaciones con respecto al presentado en la figura (4.2). Para la CTE Lázaro Cárdenas, de las extracciones Nos. 5 y 6, se derivan dos líneas que van al generador de vapor y al precalentador de aire/vapor, y para la CTE San Luis Potosí, de la extracción No. 5, se deriva en una sola línea para el precalentador aire/vapor y generador vapor. Estas modificaciones se muestran en las figuras (4.3) y (4.4).

Una vez hechas las consideraciones anteriores, se genera la matriz de flujos (cuadros Nos. 4.2a y 4.2b). Aplicando lo descrito en el inciso 4.1, se conforman las ecuaciones para los balances de exergía. Para la resolución de estos, se utilizó un programa de cálculo por computadora en lenguaje Basic. En los anexos 7, 8 y 9 se incluyen listados de estos programas y en los anexos 1, 2 y 3 las memorias de cálculo.

Las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 muestran las propiedades del fluido de trabajo para cada CTE tomando como condiciones de referencia las mencionadas en el punto 8 de las consideraciones. Como se mencionó anteriormente, la mayor parte de las mismas son obtenidas de los balances térmicos y de las hojas de datos de los fabricantes de los equipos. Para el cálculo de la exergía del vapor y agua, se utilizó la ecuación (2.20). La exergía del aire se obtuvo de la tabla de propiedades termodinámicas del aire, incluida en el anexo 6.

4.3 Resultados.

En los cuadros 4.3, 4.4 y 4.5 se presentan los resultados obtenidos de los balances de energía y exergía. Las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 representan los diagramas de flujos de energías y de

flujos de exergias (diagramas de Sankey), elaborados también de acuerdo a los mismos resultados. Estos diagramas son de utilidad porque muestran de un modo esquemático como se distribuye la energía en la instalación. De ellos se desprende lo siguiente:

La energía se distribuye en dos partes, una de las cuales son las pérdidas de energía que se tiene en el generador de vapor, el condensador y el concepto "otros" que se considera son aquellos debidos a pérdidas de calor en equipo auxiliar y tuberías; y la otra parte, que es el trabajo obtenido en la turbina.

Para la CTE San Luis Potosí, la distribución energética se compone por 84% en pérdidas de calor, de las cuales la mayor parte corresponden al condensador (43%), 13.75% al generador de vapor, 7.15% a otros y el 36% restante es el trabajo entregado por la turbina.

Al analizar los resultados de los balances de exergía y compararlos con los de energía, se nota como se distribuyen las pérdidas de exergía en cada uno de los equipos, destacando ahora que es el generador de vapor en donde las pérdidas exergéticas son mayores (aproximadamente el 46% del total entregado al sistema) y el condensador solo tiene 2.77%, también se observa ahora que los calentadores de alta y baja presión presentan una cierta cantidad de pérdidas, aunque estas son mínimas. La turbina contribuye con el 2.84%. No obstante el trabajo útil entregado es el mismo que en el caso de energía.

Comparando las eficiencias obtenidas por ambos métodos, se nota que esta pasa del 36% calculado por el balance de energía, a 47.44% calculado por el de exergía, es decir, exergéticamente es mayor la eficiencia de la planta, sin embargo, se destruye poco más de la mitad de la exergía disponible.

La CTE de Lázaro Cárdenas presenta las mismas características en cuanto a distribución de energías y exergías en lo que a equipos se refiere. Así se tiene que, cuando se utiliza

combustóleo las pérdidas de calor son del orden de 62%, de los cuales el generador de vapor tiene 14%, el condensador 44.87% y el resto 3.5%, en el rubro de otros; el trabajo obtenido en la turbina es de 37.7% de calor total entregado al sistema. Las pérdidas de exergía se distribuyen ahora en 45.45% para el generador de vapor, 0.59% para los calentadores de alta y baja presión, 3.30% en el condensador y 3.08% en la turbina, con una eficiencia exergética de 47.55%.

Cuando se utiliza carbón, las pérdidas de calor son de 62.84%, correspondiendo el 13.8% al generador de vapor, 45.71% al condensador y en el concepto de otros de 3.25%, el trabajo obtenido en la turbina es de 37.15%. Las pérdidas de exergía se distribuyen de la siguiente manera: 47.74% al generador de vapor, 0.22% para los calentadores de alta y baja presión, 3.6% en el condensador y 3.03 en la turbina, con una eficiencia exergética de 45.41%.

Como se puede observar, al comparar las dos plantas, la distribución energética y exergética es muy similar, resultando ser la CTE de Lázaro Cárdenas (con servicios) la más eficiente (47.55% vs. 47.44% y 45.41%), no obstante tener un CTU mayor que el de la CTE San Luis Potosí (4383 kJ/kWh vs. 4271 kJ/kWh respectivamente), esto es debido a que las pérdidas de exergía son mayores en esta última.

Otro resultado que se desprende, es que para la CTE de Lázaro Cárdenas por su característica de usar carbón o combustóleo, las eficiencias energéticas y exergéticas disminuyen al usar carbón como combustible.

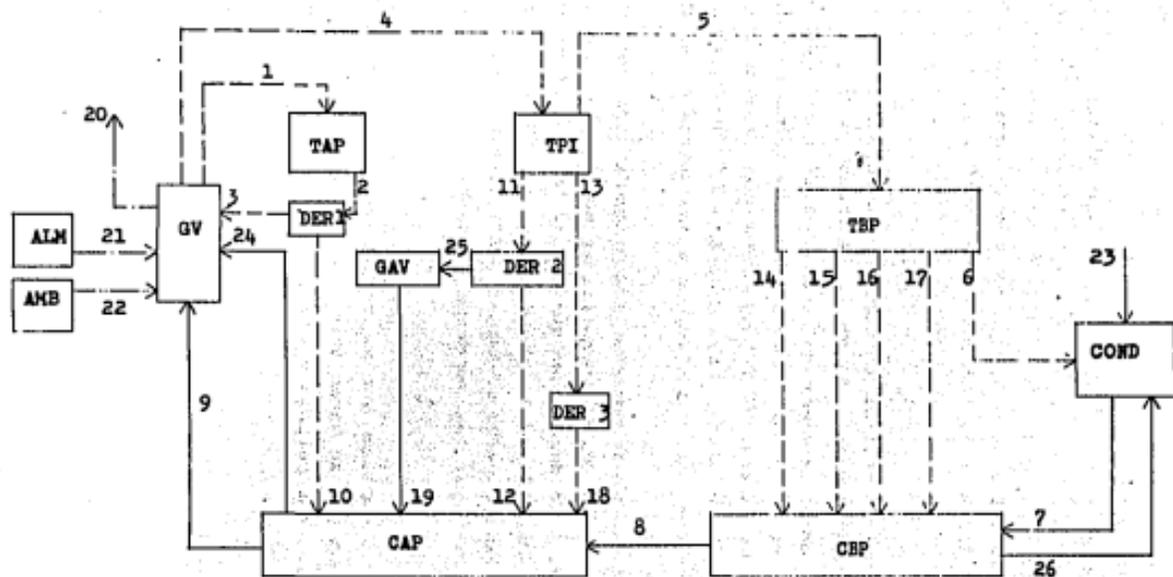


FIGURA 4.3 DIAGRAMA SIMPLIFICADO CTE SAN LUIS POTOSI

	F L U J O																											
EQUIPO	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		
QU	-	0	+	-	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	+	+	-	+	0	0		
TAP	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TPI	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	-	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TBP	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
COND	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	+	
CBP	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	
CPV	0	0	0	0	0	0	0	+	-	+	0	+	0	0	0	0	0	+	+	0	0	0	0	-	0	0		
DER 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	
DER 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
DER 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	
GRV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	+	0	
RLM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	
RMB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	-	0	0	0	0	0	

C U R D P O 4. 2.a

M A T R I Z D E F L U J O S C O T E
S A N L U I S P O I O S T

	F L U J U																													
FUJUP1	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		
GU	-	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TAP	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TP1	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	-	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TBP	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
COND	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CBP	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CBP	0	0	0	0	0	0	0	+	-	+	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
DER 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		
DER 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		
DER 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		
GUU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
RLH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
RHH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

C U R R E N T 4. 2. 6

M A T R I X D I L U T I O N C I L

L A Z A R P C I R C U I T C N S

TABLA 4.2

CTE SAN LUIS POTOSI

Propiedades termodinámicas del agua, vapor, combustible, aire y gases.

PUNTO	FLUJO MASICO (kg/h)	PRESION (bar)	TEMPERATURA (°C)	ENTALPIA (kJ/kg)	ENTROPIA (kJ/kgK)	ENERGIA (kJ/kg)
0	---	0.8108	30.0	125.7	0.4365	0
1	1'037.942	166.60	538.0	3397.4	6.42	1458.63
2	1'015.279	35.33	317.0	3024.0	6.52	1053.99
3	932.908	35.33	317.0	3023.0	6.52	1053.99
4	932.908	31.79	538.0	3539.4	7.31	1331.02
5	813.416	7.24	331.5	3125.1	7.39	892.49
6	693.568	0.111	47.9	2419.7	7.57	131.54
7	838.397	0.111	47.9	200.4	0.6778	1.64
8	838.397	7.03	137.7	579.7	1.71	68.12
9	969.451	166.60	241.3	1046.3	2.08	240.51
10	94.160	35.33	317.0	3023.0	6.52	1053.94
11	95.078	16.35	439.7	3340.4	7.35	1119.60
12	46.051	16.35	439.7	3340.4	7.35	1119.60
13	37.745	7.24	331.5	3125.1	7.39	892.48
14	30.314	3.86	257.3	2980.0	7.42	738.29
15	29.950	2.057	181.0	2951.8	7.45	601.00
16	31.403	1.001	123.4	2723.3	7.48	463.41
17	28.181	0.4089	76.4	2586.8	7.52	314.79
18	41.816	7.245	331.5	3125.1	7.39	892.48
19	49.027	14.70	129.7	546.0	1.63	58.66
20	1'288.000	atm	147.0	---	---	2897.00

PUNTO	FLUJO MASICO (kg/h)	PRESION (bar)	TEMPERATURA (°C)	ENTALPIA (kJ/kg)	ENTROPIA (kJ/kgK)	ENERGIA (kJ/kg)
21	77,000	1.50	120.0	41850	---	40283
22	1'107,000	1.90	303.0	309	0.7596	14.09
23	21,509	---	43.0	180	---	1.03
24	90,000	166	168.8	724.5	2.01	122.02
25	49,027	16.35	439.7	3340.4	7.35	1119.9
26	121,220	---	55.4	232.0	0.7614	7.85

TABLA 4.3

CTE LAZARO CARDENAS (con servicios)

Propiedades termodinámicas del agua, vapor, combustible, aire y gases.

PUNTO	FLUJO MASICO (kg/h)	PRESION (bar)	TEMPERATURA (°C)	ENTALPIA (kJ/kg)	ENTROPIA (kJ/kgK)	EXERGIA (kJ/kg)
0	---	1.013	25.00	104.90	0.3664	0
1	1'082,172	166.42	538.00	3397.97	6.41	1491.97
2	1'056,374	42.50	342.11	3069.01	6.51	1133.31
3	945,127	42.50	342.11	3069.01	6.51	1133.31
4	945,127	38.25	538.00	3533.00	7.22	1365.72
5	829,431	9.61	343.45	3145.46	7.30	974.34
6	693,392	0.11	47.82	2394.84	7.51	161.14
7	692,649	0.11	47.82	200.50	0.6739	3.09
8	692,649	10.50	148.94	628.51	1.8301	87.42
9	1'095,625	19.50	292.12	1095.74	2.77	275.56
10	112,955	42.50	342.11	3069.01	6.51	1127.35
11	95,343	16.91	418.66	3293.98	7.27	1131.60
12	37,548	16.91	418.66	3293.98	7.27	1131.60
13	73,512	9.61	343.45	3145.46	7.30	974.34
14	53,280	5.13	268.12	2998.35	7.33	818.29
15	27,137	1.68	153.32	2777.76	7.38	582.80
16	23,358	0.87	95.66	2668.83	7.40	467.91
17	32,266	0.456	79.06	2572.68	7.43	362.62
18	36,940	9.61	343.45	3145.46	7.30	974.34
19	17,795	16.91	176.84	670.86	2.37	168.88
20	36,572	9.61	151.71	754.80	2.12	127.32

PUNTO	FLUJO MASICO (kg/h)	PRESION (bar)	TEMPERATURA (°C)	ENTALPIA (kJ/kg)	ENTROPIA (kJ/kgK)	EXERGIJA (kJ/kg)
21	17,798	18.91	418.88	3283.98	7.27	1091.80
22	176,834	---	58.88	233.08	0.767	8.72
23	21,803	amb	43.00	180.00	---	1.03
24	78.98 t/h	1.47kPa	120.00	---	---	---
25	553,580	---	303.00	309.00	---	14.09
26	891,500	---	144.00	---	---	---
27	1,020	1.31	338.00	3132.88	8.215	888.89
28	8,800	208	180.00	776.00	2.11	151.50
30	750	180	456.00	3127.00	6.0299	1333.56

TABLA 4.4

CTE LAZARO CARDENAS (sin servicios)

Propiedades termodinámicas del agua, vapor, combustible, aire y gases.

PUNTO	FLUJO MASICO (kg/h)	PRESION (bar)	TEMPERATURA (°C)	ENTALPIA (kJ/kg)	ENTROPIA (kJ/kgK)	ENERGIA (kJ/kg)
0	---	1.013	25.00	104.90	0.3684	0
1	1'044,796	166.42	538.00	3397.57	6.41	1491.67
2	1'021,707	41.70	340.37	3066.51	6.52	1127.83
3	919,495	41.70	340.37	3066.51	6.52	1127.83
4	919,495	37.53	538.00	3533.74	7.23	1363.48
5	860,067	10.01	351.18	3161.00	7.30	989.88
6	715,662	0.110	47.82	2397.67	7.52	160.99
7	885,854	0.110	47.82	200.50	0.6738	3.99
8	885,854	10.41	150.46	635.06	1.84	91.02
9	1'042,642	19.75	250.99	1091.45	2.75	276.23
10	103,937	41.70	340.37	3066.51	6.52	1127.83
11	33,884	17.12	423.04	3303.15	7.27	1140.97
12	33,884	17.12	423.04	3303.15	7.27	1140.97
13	38,281	10.01	351.18	3161.00	7.30	989.88
14	57,017	9.34	274.65	3011.71	7.33	831.65
15	28,229	1.7	156.73	2788.26	7.38	593.20
16	24,382	0.908	100.30	2677.65	7.41	473.75
17	34,567	0.471	79.65	2580.16	7.44	367.32
18	38,281	10.01	351.18	3161.00	7.306	988.09
19	---	---	---	---	---	---
20	---	---	---	---	---	---

PUNTO	FLUJO MASICO (kg/h)	PRESION (bar)	TEMPERATURA (°C)	ENTALPIA (kJ/kg)	ENTROPIA (kJ/kgK)	ENERGIA (kJ/kg)
21	---	---	---	---	---	---
22	148.077	0.1640	95.87	233.84	0.787	8.72
23	20.898	---	43.00	180.00	---	1.03
24	124.220	---	77.00	---	---	---
25	483.000	---	315.00	321.60	---	15.20
26	752.000	---	128.00	---	---	---
27	1.020	1.28	335.00	3135.48	8.21	892.87
28	23.800	208.00	182.42	783.00	2.13	150.72
29	---	---	---	---	---	---
30	750	180.00	455.00	3127.00	6.02	1335.58

CUADRO 4.3 RESULTADOS.

	BALANCE DE ENERGIA 1a. LEY			BALANCE DE EXERGIA 2a. LEY		
	Perdida de calor $\times 10^6$ (kJ/kg)	Trabajo $\times 10^6$ (kJ/h)	% del calor total	Perdida de exergía $\times 10^6$ (kJ/h)	% de la exergía total	Trabajo $\times 10^6$ (kJ/h)
Generador de vapor	490.26	----	13.75	1,518.51	46.23	
Turbina alta presión	----	380.12	10.66	30.76	0.94	380.12
Turbina presión intermedia.	----	371.55	10.42	21.78	0.66	371.55
Turbina baja presión	----	530.30	14.87	40.61	1.24	530.30
Condensador	1,537.64	----	43.12	90.808	2.77	----
Calentadores baja presión	0.80	----	0.02	7.98	0.24	----
Calentadores alta presión	0.59	----	0.02	16.18	0.49	----
Otros	----	----	7.15	----	----	----
Total	----	----	100.00	----	52.56	----
Trabajo util		1281.97				1281.97
CTU ciclo (kJ/kWh)		8.080			4.271	
CTU PLANTA (kJ/kWh)		9.712			8.450	
Eficiencia %		35.95			47.44	

CTE SAN LUIS POTOSI

CUADRO 4.4 RESULTADOS.

	BALANCE DE ENERGIA 1a. LEY			BALANCE DE EXERGIA 2a. LEY		
	Perdida de calor $\times 10^6$ (kJ/kg)	Trabajo $\times 10^6$ (kJ/h)	% del calor total	Perdida de exergía $\times 10^6$ (kJ/h)	% de la exergía total	Trabajo $\times 10^6$ (kJ/h)
Generador de vapor	477.96	----	14.09	1,487.94	45.45	----
Turbina alta presión	----	347.08	10.23	31.48	0.96	347.67
Turbina presión intermedia.	----	363.70	10.72	22.38	0.68	363.70
Turbina baja presión	----	567.90	16.74	46.45	1.42	567.90
Condensador	1,522.74	----	44.87	109.71	3.35	----
Calentadores baja presión	0.343	----	0.01	11.61	0.35	----
Calentadores alta presión	0.093	----	0.00	7.78	0.24	----
Otros	----	----	3.44	----	----	----
Total	----	----	100.00	----	52.45	----
Trabajo útil		1,278.68				1279.27
CTU ciclo (kJ/kWh)		8,026.3			4,363	
CTU PLANTA (kJ/kWh)		9,642.70			8,058.5	
Eficiencia %		37.89			47.53	

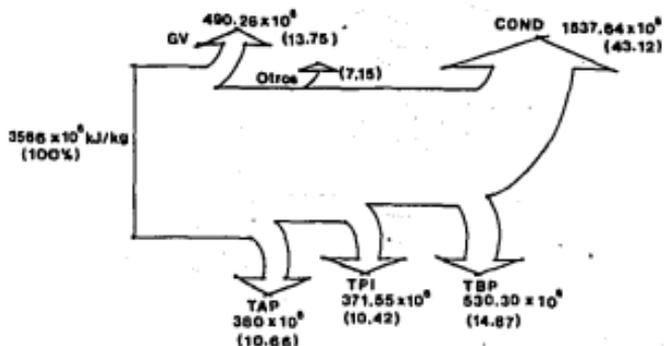
CTE LAZARO CARDENAS (CON SERVICIOS)

CUADRO 4.5 RESULTADOS.

	BALANCE DE ENERGIA 1a. LEY			BALANCE DE EXERGIA 2a. LEY		
	Perdida de calor $\times 10^6$ (kJ/kg)	Trabajo $\times 10^6$ (kJ/h)	% del calor total	Perdida de exergía $\times 10^6$ (kJ/h)	% de la exergía total	Trabajo $\times 10^6$ (kJ/h)
Generador de vapor	477.57	----	13.88	1,021.90	47.74	----
Turbina alta presión	----	338.24	0.83	33.49	0.99	338.24
Turbina presión intermedia.	----	343.17	9.97	19.17	0.56	343.17
Turbina baja presión	----	597.33	17.35	50.35	1.48	597.33
Condensador	1,573.41	----	48.71	122.374	3.6	----
Calentadores baja presión	0.35	----	0.01	1.57	0.05	----
Calentadores alta presión	0.16	----	0.0	5.83	0.17	----
Otros	----	----	3.25	----	----	----
Total	----	----	100	----	54.59	----
Trabajo útil	----	1,278.74	----	----	----	1278.74
CTU ciclo (kJ/kWh)		6,170.9			4,380	
CTU PLANTA (kJ/kWh)		9,967.91			9,047	
Eficiencia %		37.18			48.41	

CTE LAZARO CARDENAS (SIN SERVICIOS)

a) Energía



b) Exergía

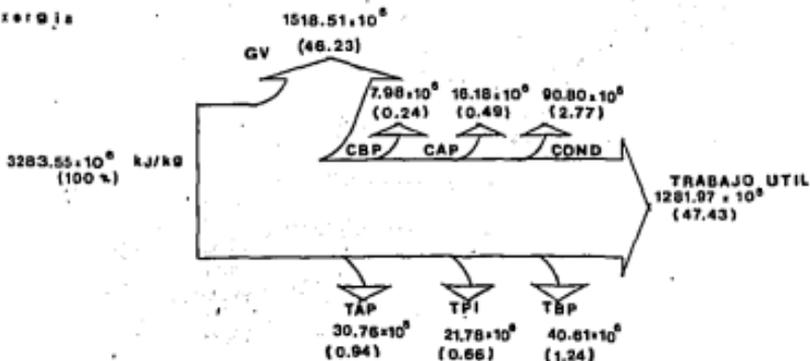
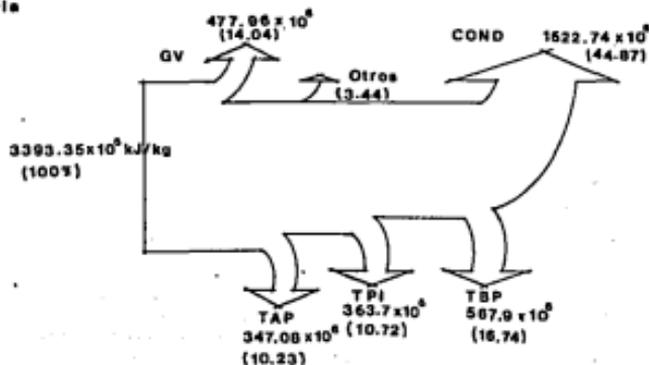


FIGURA 4.5 CTE SAN LUIS POTOSI. DIAGRAMAS DE SANKEY

a) Energía



b) Exergía

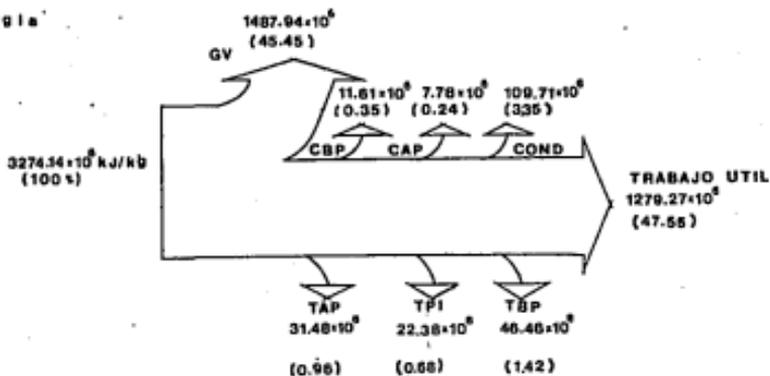
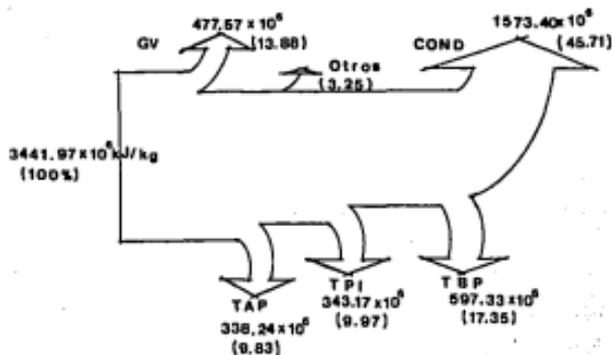


FIGURA 4.6 CTE LAZARO CARDENAS (CON SERVICIOS), DIAGRAMAS DE SANKEY

a) Energía



b) Energía

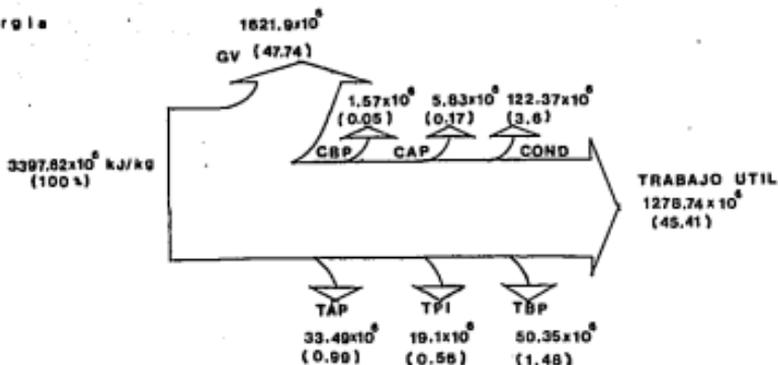


FIGURA 4.7 CTE LAZARD CARDENAS (SIN SERVICIOS), DIAGRAMAS DE SANKEY

CAPITULO 5

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Los analisis realizados al usar el concepto de exergia, demuestran que con el balance de energia no se detectan fácilmente los puntos de un proceso en el cual las perdidas de trabajo y calor son criticas y por tanto donde existen fugas de energia.

Al usar la entalpia como punto de referencia, es posible que en algunos casos se pierda el objetivo para el cual se aprovecha la energia del vapor y su capacidad de producir trabajo.

Para el caso de vapor de agua en el ciclo de una CTE, es fácil observar como mientras mayor es su presión y temperatura, mayor es su capacidad de producir trabajo. Asi, por ejemplo, el vapor a 100 bar y 538°C tiene una exergia de 1491.67 kJ/kg, mientras que el vapor que se condensa tiene solamente 161.14 kJ/kg; si los comparamos en unidades de calor, tendremos que la entalpia del vapor sobrecalentado es 3397.4 kJ/kg, y la del vapor que se condensa es de 2394.84 kJ/kg, es decir, en términos de calor, este aun es aprovechable, mientras que en términos de capacidad de trabajo ya no lo es.

Los resultados del balance de exergia muestran gran diferencia con aquellos obtenidos por el balance de energia, en cuanto a la distribución de pérdidas se refiere. Por ejemplo, en el generador de vapor solo se pierde un promedio del 15% de energia, atribuible a la transmisión de calor en el equipo y por el calor contenido en los gases de escape, sin embargo, por exergia se pierde un promedio de 47% de la capacidad de producir trabajo del combustible a consecuencia del proceso de combustión.

Otro resultado de gran contraste se encuentra en el condensador principal, en donde, de acuerdo con el balance de energía se obtiene que este equipo es el que mas pérdidas de calor tiene. Sin embargo, analizándolo exergeticamente, se encuentra que la calidad de la energía es baja y utilizable solo para procesos secundarios de calefacción o algun otro que requiera bajo nivel térmico, pero no para la producción de energía de alta calidad, como es la electricidad.

Con el método empleado para el análisis de las turbinas, es posible obtener el trabajo teórico máximo que serian capaces de producir. Esto es debido a que se emplea la exergía del fluido (en vez de la entalpia) y el trabajo útil que resulta se obtiene de restar al trabajo máximo, el trabajo perdido. Este último ahora abarca las pérdidas totales ocasionadas por las irreversibilidades internas en las turbinas. No obstante, la magnitud de estas pérdidas es pequeña y estos equipos siguen siendo de alta eficiencia.

Los calentadores de alta y baja presión presentan también, bajo el enfoque del análisis de exergía algunas pérdidas ocasionadas por las irreversibilidades en la transmisión de calor, y no obstante su escasa magnitud, demuestran que aunque no existen pérdidas por transmisión de calor al exterior, si se producen pérdidas internas que degradan la energía.

Un parámetro usado ampliamente para la evaluación del ciclo termodinámico de la planta es el consumo térmico unitario (CTU), el cual es un índice de que cantidad de energía térmica (KJ) se necesita para producir una unidad de energía eléctrica (kWh). Si este consumo se evalúa con los valores de la exergía, se obtendrá el valor efectivo de la capacidad de trabajo del fluido para generar energía.

Los resultados aquí obtenidos dan una idea clara de como se distribuyen las pérdidas de exergía dentro de un ciclo de una

CTE, en comparación con los análisis tradicionales de energía (por la Ley de la termodinámica), en los cuales no se observan aquellas.

La reducción de estas pérdidas es tema de investigación y está enfocada principalmente al generador de vapor, cuyo proceso de combustión es altamente irreversible; y en la turbina para tratar de reducir las pérdidas mecánicas en este equipo.

El análisis exergetico resulta de gran ayuda para la evaluación y selección de los equipos principales y debe ser complementado por un análisis económico, algunos trabajos (REF. (14) y (20)) al respecto proporcionan metodologías y criterios para tal fin.

La aplicación del análisis exergetico en una CTE se puede observar desde dos puntos de vista: uno, en la fase de evaluación y selección de equipo, en donde proporciona un enfoque diferente para comparar eficiencias basadas en el consumo de energía, su distribución y degradación, hasta obtener la energía eléctrica, objetivo final de una instalación de este tipo; y el segundo, que puede ser la implementación de un programa de análisis exergetico en las plantas ya existentes, como otra herramienta para realizar auditorías energéticas para detectar ineficiencias en el funcionamiento de los equipos, ocasionadas más que por el diseño, por el desgaste y envejecimiento de los mismos.

El análisis por exergía de los procesos industriales es un concepto termodinámico novedoso, que se ha utilizado a consecuencia de los programas de ahorro de energía. No obstante, su adecuada aplicación, así como la interpretación de resultados requiere de conocimientos detallados de las leyes de la termodinámica y de las reacciones químicas.

Se considera que esta técnica de análisis tiene un amplio potencial para continuar investigando sus aplicaciones y alcances en instalaciones con gran consumo de energía.

NOMENCLATURA

- A - Area [cm²]
- AE - Agua de enfriamiento
- at - Aire teórico [mol de aire seco/mol equivalente de combustible]
- b_g - Exergia de los gases de combustión [cal/mol]
- B - Exergia total [kJ/h]
- B_d - Exergia destruida total [kJ/h]
- b - Exergia específica [kJ/kg]
- b_e - Exergia de entrada [kJ/kg]
- b_d - Exergia específica destruida [kJ/kg]
- b_q - Exergia de un flujo de calor [kJ/kg]
- b_s - Exergia de salida [kJ/kg]
- C_c - Calor específico del combustible más materia inerte [cal/mol K]
- ΔCp_x - Cambio de calor específico de reactivos en estado estándar [cal/g mol K]
- C_x - Calor específico del combustible [cal/mol K]
- E - Energía [J]
- E_c - Energía cinética [J]
- E_p - Energía potencial [J]
- E_u - Energía útil [J]
- ea - Exceso de aire [%]
- F - Factor de forma [adimensional]

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- gc - Constante de conversión que relaciona las unidades de masa, tiempo, longitud y fuerza. $[9.81 \text{ kgm-m/kgf-seg}^2]$
- g_p - Entalpia libre especifica de Gibbs para productos. $[\text{J/kg}]$
- g_r - Entalpia libre de Gibbs para reactivos. $[\text{J/kg}]$
- g - Constante gravitacional $[\text{m/s}^2]$
- ΔH_A° - Cambio de entalpia de reactivos en estado estandar $[\text{cal/gmol K}]$
- h - Entalpia especifica $[\text{kJ/kg}]$
- i - Especie o componente
- m - Masa $[\text{kg}]$
- m_s - Masa de salida $[\text{kg}]$
- m_e - Masa de entrada $[\text{kg}]$
- m - mecánica
- N_t - Numero de especies o componentes
- NC - Numero de moles / kg de combustible
- n_t - Numero de moles para cada componente $[\text{mol/mol combustible}]$
- n_{hh} - Numero de moles de humos humedos por mol equivalente de combustible.
- PCS - Poder calorifico superior del combustible $[\text{kJ/kg}]$
- P_o - Presión en el estado de referencia $[\text{bar}] [\text{atm}]$
- P_v - Presión de vaporización $[\text{bar}]$
- P° - Presión en el estado estandar $[\text{bar}]$
- p - Presión. Presión parcial $[\text{bar}] [\text{atm}]$
- Q - Flujo de calor $[\text{kJ/h}]$
- q - Química
- R - Constante universal de los gases (1.987 cal/mol)
- S - Entropia especifica $[\text{kJ/kg K}]$

S°	- Entropía en estado estandar	(kJ/kg K)
ΔS°_R	- Cambio de entropía de reactivos en estado estandar	(cal/gmol \cdot K)
T	- Temperatura	(K)
T_0	- Temperatura en el estado de referencia	(K)
T°	- Temperatura en el estado estandar	(K)
T_{DBB}	- Temperatura de bulbo seco	($^{\circ}$ C)
t_r	- Temperatura de rocío	($^{\circ}$ C)
t	- Térmica	(-)
U	- Energía interna total	(kJ/h)
u	- Energía interna específica	(kJ/kg)
V	- Velocidad	(m/s)
v	- Volumen específico	(m ³ /kg)
v	- Contenido de cenizas	(%)
W_u	- Trabajo útil	(kJ/h)
W	- Trabajo	(kJ/h)
W_{max}	- Trabajo máximo	(kJ/h)
X_i	- Fracción molar del componente i a P_0, T_0	
x	- Humedad absoluta (mol H ₂ O/mol aire seco)	
Y	- Función de Darriéus	
y	- Fracción molar	
Z	- Altura	(m)

Letras griegas:

ϵ	- Emisividad
Δ	- Incremento de energía, calor, trabajo, etc.
μ	- Potencial químico (J/mol)
η	- Rendimiento

- ν - Coeficiente estequiometrico
- ρ - Densidad (kg/m^3)
- Σ - Sumatoria
- σ - Constante de Stefan-Boltzman ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)
- θ - Factor de Carnot.

Subíndices:

- i - Especie o componente.
- m - Mecánica
- q - Química
- t - Térmica

BIBLIOGRAFIA

1. Sears y G.L. Salinger. Termodinámica teórica cinética y termodinámica estadística. Ed. EW 2a. Ed.
2. Mark Kenneth. Thermodynamics. Mc. Graw Hill Book Co. 4a. Ed.
3. Kirillin V.A. y Síchev V.V. Termodinámica Técnica Ed. MIR 2a. Ed. 1986.
4. Guzman M.O. et al. Uso eficiente y conservación de la energía en México. Diagnósticos y perspectivas. El Colegio de México. 1985
5. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (SEMIP). Balance Nacional de Energía. Balances de Energía 1985-1985. México.
6. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (SEMIP). Programa Nacional de Energía. 1984-1988. México.
7. Valero A. y Lozano M.A. Los balances de energía, entropía, exergía y energía libre Rev. Ingeniería Química Mayo 1987.
8. Stecco Sergio. "Impiego del concetto di Exergia nella termodinamica dei cicli". Università Degli Studi di Firenze. Dipartimento di Energetica. Documento Interno.
9. Manfrida G. "Studio exogetico di processi di combustione". Università Degli Studi di Firenze. Dipartimento di Energetica. Documento Interno.
10. Valero A. y Lozano M.A. "Evaluación de los rendimientos energético y exogetico de calderas de vapor por perdidas separadas". Depto. de termodinámica y fisicoquímica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Zaragoza. Documento Interno.
11. Dorbecker G.E. "Aplicación de "Metode" a turbinas de vapor". VIII Seminario Nacional sobre el Uso Racional de la Energía en México. Noviembre 1987, pp. 21-29.
12. Maldonado S.R. y Dorbecker G.E. "Metodología para la evaluación energética de turbinas de vapor". IX Seminario Nacional sobre el Uso Racional de la Energía. México, 1988 pp. 309-316.

13. Tsatsaronis G. y Winhold M. "Exergo economic analysis and evaluation of energy-conversion plants. Part I. A new general methodology". Exergy Vol. 10 No. 1, pp. 69-80, 1985. Pergamon Press LTD.
14. Tsatsaronis G. y Winhold M. Exergo economic analysis and evaluation of energy-conversion plants. Part II. Analysis of a coal-fired steam power plant". Exergy Vol 10 No. 1, pp. 81-94, 1985. Pergamon Press LTD.
15. Comisión Federal de Electricidad. Programa Nacional de Uso Racional de la Energía Eléctrica. No. 1 Año 1. Junio 1981.
16. De Diego M.M. Programa de uso racional de energía de la Comisión Federal de Electricidad. Rev. ANIME pp. 4-8. Julio-Agosto 1989.
17. Propiedades termodinámicas del agua. Offset ESIME-IPN UPZ
18. Comisión Federal de Electricidad. Informe de Operación 1989.
19. Comisión Federal de Electricidad. Estadísticas 1985-1988.
20. VILLALÓN M.J.M. "Análisis exergético y termoeconómico de procesos industriales". Apuntes. División de Educación Continua. Facultad de Ingeniería UNAM. Febrero 1988.
21. Generadores de vapor para la CTE. Lázaro Cárdenas unidades 1 y 2. Oferta Correy/Mitsubishi Nov. 1984.
22. TELLEZ A.L. Sector Eléctrico. Documento Interno CFE-SUTERM 1987.
23. VIQUEIRA J. "Energía y Desarrollo Económico". Apuntes. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería. U.N.A.M. 1986.

ANEXO 1

Cálculo de los balances de materia, energía y exergía.

De la matriz de flujos se conforman las ecuaciones para el balance de materia y energía. Los datos son para la CTE San Luis Potosí.

Balance de materia.

$$GV \quad m_1 + m_2 + m_4 + m_6 - m_{22}^* + m_{24} = 0$$

$$TAP \quad m_1 - m_2 - m_2^* = 0$$

$$TPI \quad m_4 - m_5 - m_{11} - m_{13} + m_4^* = 0$$

$$TBP \quad m_5 - m_6 - m_{14} - m_{15} - m_{16} - m_{17} = 0$$

$$CON \quad m_6 - m_7 + m_{22}^* + m_{2d} + m_2^* = 0$$

$$CBP \quad m_7 - m_8 + m_{14} + m_{15} + m_{16} + m_{17} - m_{2d} = 0$$

$$CAP \quad m_8 - m_9 + m_{10} + m_{12} + m_{13} + m_{1p} - m_{24} = 0$$

* Contabiliza solo para balance de materia.

Utilizando los valores de la tabla (1)

$$GV \text{ (Lado agua)} \\ 1'037,942 + 932,908 - 932,908 + 989,451 + 90,000 - 21,509 = 0$$

$$TAP \\ 1'037,942 - 1'015,279 - 22,663 = 0$$

$$TPI \\ 932,908 - 813,418 - 95,078 - 37,745 + 13,330 = 0$$

$$TBP \\ 813,418 - 893,908 - 30,314 - 29,950 - 31,403 - 28,181 = 0$$

CON

$$693,568 - 838,397 + 21,509 + 121,220 + 2,100 = 0$$

CBP

$$838,397 - 838,397 + 30,314 + 29,950 + 31,403 + 29,553 - 121,220 = 0$$

CAP

$$838,397 - 909,451 + 84,160 + 46,051 + 41,816 + 49,027 - 90,000 = 0$$

Balance de energía.

GV

$$-(mh)_1 + (mh)_8 - (mh)_4 + (mh)_9 - (mh)_{20} + (mh)_{21} + (mh)_{22} + (mh)_{24} = Q_{PERO} \quad (\text{kg/h})$$

Donde:

$$h_{21} = \text{PCS combustible}$$

$(mh)_{20}$ = son las pérdidas en los gases de escape y su valor está comprendido entre 4.0 y 4.5% del calor total liberado. Para este caso usar 4.13%

calor total liberado = $(mh)_{21} + (mh)_{22}$; o de las hojas de comportamiento del generador de vapor.

TAP

$$m_1 (h_1 - h_2) = W_{TAP} \quad (\text{kJ/h}) \quad m_1 = m_2$$

TPI

$$(m_4 + m_4') (h_4 - h_{11}) + (m_4'' - m_{11}) (h_{11} - h_{13}) = W_{TPI} \quad (\text{kJ/kg})$$

$$h_9 = h_{13}$$

$$m_4'' = m_4 + m_4'$$

TBP

$$m_9 (h_9 - h_{14}) + m_{14} (h_{14} - h_{15}) + m_{15} (h_{15} - h_{16}) + m_{16} (h_{16} - h_{17}) + m_{17} (h_{17} - h_{18}) = W_{TBP}$$

$$m_{14}' = m_9 - m_{14}$$

$$m_{15}' = m_{14}' - m_{15}$$

$$m_{10'} = m_{10} - m_{10}$$

$$m_{17'} = m_{10'} - m_{17} = m_{10}$$

COND

$$(mh)_8 - (mh)_7 + (mh)_{20} = Q_{CED} \quad [kJ/h]$$

CBP

$$(mh)_7 + (mh)_{14} + (mh)_{15} + (mh)_{16} + (mh)_{17} - (mh)_8 + W_{BC} - (mh)_{20} + (mh)_{VCVS} + (mh)_{VEA} +$$

$$(mh)_{misc} = Q_{CED}$$

donde:

$(mh)_{VCVS}$ y $(mh)_{VEA}$ son los flujos del vapor al condensador de sellos, del eyector de aire y del cal. No. 1 respectivamente y deben ser tomados en cuenta para que el balance cierre.

CAP

$$(mh)_8 - (mh)_9 + (mh)_{10} + (mh)_{12} + (mh)_{18} + (mh)_{19} - (mh)_{24} + W_{BAA} = Q_{CED}$$

sustituyendo valores:

GV

$$\text{calor total liberado} = (41,870 \times 77,000) + (1,107,000 \times 309) = 3,566,053,000$$

$$mh_{20} = 3,566,053,000 \times 0.0413 = 147,277,999$$

$$\begin{aligned} & (-1,037,942 \times 3397.4) + (932,906 \times 3023) - (932,906 \times 3539.4) + (969,451 \times 1046.3) + \\ & (90,000 \times 724.5) - (147,277,999) + (77,000 \times 41,870) + (1,107,000 \times 309) = \\ & = 490,259,773 \end{aligned}$$

Este valor incluye además de pérdidas de calor en el generador de vapor por hidrógeno, humedad del combustible, radiación, purgas, etc., el calor transferido en el economizador.

TAP : En este caso $n_1 = n_2$

$$1'015,279 (3,397,4-3023) = 380'120,458 \text{ kJ/h}$$

TPI :

$$(932,906+13,330) \times (3539,4-3340,4) + (946,236-95,078) \times (3340,4-3125,1) = \\ = 188'300,964 + 183'254,317 = 371'555,281 \text{ kJ/h}$$

TBP :

$$913,416(3125,1-2980) + 783,102(2980-2851,8) + 753,152(2851,8-2723,3) + \\ + 721,749(2723,3-2586,8) + 693,568(2586,8-2418,7) = 118'028,861 + \\ + 100'393,876 + 98'780,032 + 98'518,738 + 118'588,791 = 530'307,899$$

donde:

$$m_{14} = 813416 - 30,314 = 783,102$$

$$m_{15} = 783102 - 29,950 = 753,152$$

$$m_{16} = 753152 - 31,403 = 721,749$$

COND:

$$(693,568 \times 2418,7) - (838,397 \times 200,4) + (121220 \times 232) = 1,537'641,203$$

CBP:

$$(838,397 \times 200,4) + (30,314 \times 2980) + (29,950 \times 2851,8) + (31,403 \times 2723,3) + \\ + (28181 \times 2586,8) - (838,397 \times 579,7) + (838,397 \times 3,23) - (121220 \times 232) + \\ + (1050 \times 3102,4) + (750 \times 3127) + (1372 \times 3102,4) = 605,794$$

CAP:

$$(838,397 \times 579,7) - (969,451 \times 1046,3) + (84,160 \times 3023) + (46,051 \times 3340,4) + \\ + (41,818 \times 3125,1) + (49,027 \times 546) - (90,000 \times 724,5) + 1'059,451(26,83) = \\ = 594,594$$

BALANCE DE EXERGIA.

GV:

$$-mb_1 + mb_2 - mb_4 + mb_6 - mb_{20} + mb_{21} + mb_{22} + mb_{24} = E_D \quad [\text{kJ/h}]$$

TAP : como $m_1 = m_2$

$$m_1 (c b_1 - b_2) = W_{\text{MAX}}$$

$$m_1 [T_0 (s_2 - s_1)] = B_{\text{PERD}}$$

$$W_{\text{MAX}} - B_{\text{PERD}} = W_{\text{REAL}} \quad [\text{kJ/h}]$$

TPI :

$$(m_4 + m_{4'}) (b_4 - b_{11}) + (m_{4''} - m_{11}) (b_{11} - b_{18}) = W_{\text{MAX}}$$

$$(m_4 + m_{4'}) [T_0 (s_{11} - s_4)] + (m_{4''} - m_{11}) [T_0 (s_{18} - s_{11})] = B_{\text{PERD}}$$

$$W_{\text{MAX}} - B_{\text{PERD}} = W_{\text{REAL}}$$

TBP :

$$m_9 (b_9 - b_{14}) + m_{14} (b_{14} - b_{19}) + m_{15} (b_{19} - b_{10}) + m_{10} (b_{10} - b_{17}) + m_{17} (b_{17} - b_{18}) = W_{\text{MAX}}$$

$$m_9 [T_0 (s_{14} - s_9)] + m_{14} [T_0 (s_{19} - s_{14})] + m_{15} [T_0 (s_{10} - s_{19})] +$$

$$+ m_{10} [T_0 (s_{17} - s_{10})] + m_{17} [T_0 (s_{18} - s_{17})] = B_{\text{PERD}}$$

$$W_{\text{MAX}} - B_{\text{PERD}} = W_{\text{REAL}} \quad [\text{kJ/h}]$$

COND

$$B_{\text{PERD}} = (mb)_d - (mb)_7 + (mb)_{2d} \quad [\text{kJ/h}]$$

CBP

$$(Cmb)_7 + (Cmb)_{14} + (Cmb)_{15} + (Cmb)_{16} + (Cmb)_{17} - (Cmb)_8 - (Cmb)_{20} + W_{BCC} = B_{PERD}$$

CAP

$$(Cmb)_8 - (Cmb)_9 + (Cmb)_{10} + (Cmb)_{12} + (Cmb)_{18} + (Cmb)_{19} - (Cmb)_{24} + W_{BAA} = B_{PERD}$$

Sustituyendo los valores:

GV

$$-(1'037,942)(1458,89) + (932,906)(1053,99) - (932,906)(1331,02) + \\ + (689,451)(240,81) - (238,299 \times 10^6) + (3269,25 \times 10^6) + (1'107,000) \times \\ (14,09) + (90,000)(122,02) = 1'518,505,380$$

TAP

$$1'015,279 (1458,89 - 1053,99) = 410'883,412 \\ 1'015,279 (303 (6,52 - 6,42)) = 30'762,954$$

$$W_{REAL} = 410'883,412 - 30'762,954 = 380'120,457$$

TPI

$$(932,906 + 13330) (1331,020 - 1119,9) + (948,236 - 95078) (1119,9 - 892,48) = \\ = 393'339,897 \\ (932,906 + 13330) (303(7,35 - 7,31)) + (948,236 - 95078) (303(7,39 - 7,35)) = \\ = 21'784,418$$

$$W_{REAL} = 393'339,897 - 21'784,418 = 371'555,282$$

TBP

$$813,416(892,48 - 738,29) + 783,102(738,29 - 601,0) + 793,152(601,0 - 483,41) + \\ + 721,749(483,41 - 314,79) + 693,568(314,79 - 131,54) = 570'921,543 \\ 813,416 [303(7,42 - 7,39)] + 738,102 [303(7,45 - 7,42)] + 793,152 \\ [303(7,48 - 7,45)] + 721,749 [303(7,52 - 7,48)] + 693,568 [303(7,57 - 7,52)] \\ = 40'204,604$$

$$W_{REAL} = 570'921,543 - 40'204,604 = 530'716,940$$

COND

$$(693,568)(131,54) - (638,397)(1,64) + (121220)(7,85) = 90'808,540$$

CBP

$$\begin{aligned} & (838,397)(1.64) + (30,314)(738.29) + (29,950)(601.0) + (31,403)(453.41) + \\ & + (26181)(314.79) - (838,397)(68.12) - (121,220)(7.85) + (838,397)(1.04) = \\ & = 7'987,757 \end{aligned}$$

CAP

$$\begin{aligned} & (838,397)(68.12) - (889,451)(240.81) + (84,180)(1053.69) + (1119.90) \times \\ & (46,051) + (41,816)(892.48) + (49,027)(58.66) - (90,000)(122.02) + \\ & + (1'059,491)(21.74) = 16'180,954 \end{aligned}$$

Resultados:

Exergía perdida en el ciclo:

Equipo	Exergía pérdida (kJ/h)
3V	1,518'505,380
TAP	30'752,954
TPI	21'784,416
TBP	40'204,604
COND	90'808,540
CBP	7'987,757
CAP	16'180,954
	<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>
	1,720'234,585

Exergía suministrada:

$$(3209.25 \times 10^6) + (14.09 \times 107,000) = 3,284'847,630 \quad [\text{kJ/h}]$$

Rendimiento total del sistema:

$$\eta_{\text{extot}} = \frac{\text{Ex disp} - \text{Ex perd}}{\text{Ex disp}} = \frac{3,284'847,630 - 1,720'234,585}{3,284'847,630} = 0.4745$$

- Cálculo del % de energía y exergía procesada en cada equipo con respecto al total disponible:

$$\begin{aligned} \text{Energía que entra a la caldera} &= (\text{PCS comb} \times \text{gasto de combustible}) + (\text{centaipia aire} \times \text{gasto de aire}) \\ &= (41870 \times 77000) + (1'107,000 \times 309) = \\ &= 3,566'053,000 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Exergía del combustible} &= (b \text{ comb}) + (b \text{ aire} \times \text{gasto aire}) \\ &= 3269.25 \times 10^6 + 15'997,630 = 3.284'847,630 \end{aligned}$$

4. ENERGIA

$$\text{GV} = \frac{490.258}{3,566.05} = 0.1375$$

$$\text{TAP} = \frac{380.12}{3,566.05} = 0.1066$$

$$\text{TPI} = \frac{371.55}{3,566.05} = 0.1042$$

$$\text{TBP} = \frac{830.71}{3,566.05} = 0.1488$$

$$\text{COND} = \frac{1,537.64}{3,566.05} = 0.43$$

$$\text{CBP} = \frac{0.60}{3,566.05} = 0.0002$$

$$\text{CAP} = \frac{0.99}{3,566.05} = 0.0002$$

$$0.9275$$

El 7.2% restante se atribuye a pérdidas de calor, rozamiento, etc., en tuberías y equipos misceláneos. (256.75×10^6 kJ/h.)

EXERGIA

$$GV = \frac{1,518.51}{3,284.84} = 0.4623$$

$$TAP = \frac{30.75}{3,284.84} = 0.0094$$

$$TPI = \frac{21.78}{3,284.84} = 0.0066$$

$$TBP = \frac{40.81}{3,284.84} = 0.0124$$

$$COND = \frac{90.80}{3,284.84} = 0.0277$$

$$CBP = \frac{7.98}{3,284.84} = 0.0024$$

$$CAP = \frac{16.18}{3,284.84} = 0.0049$$

$$0.5256$$

$$1 - 0.5247 = 0.4744 \text{ trabajo util}$$

- CTU exergetico: Del ciclo

$$C1 \quad 1'037,842(1498.5-240.81) = 1,263'995,388$$

$$C2 \quad 932,905(1231.02-1053.99) = 258'442,950$$

$$C3 \quad 750(1331.53-240.81) = 821,063$$

$$C4 \quad 1'059,451 \times 21.74 = 23'032,465$$

$$C5 \quad 838,397 \times 1.04 = 871,933$$

$$C6 \quad 21,509(1.03-240.81) = - 5'157,428$$

$$C7 = 49,027(1119,9-98,66) = 52'029,414$$

$$C8 = 90,000(88,12-122,02) = - 4'851,000$$

$$CTU_{EX} = \frac{C1+C2+C3+C4+C5+C6-C7-C8}{350,000} = \frac{1,494'827,957}{350,000} = 4271 \text{ kJ/kWh}$$

- Rendimiento Térmico.

$$\eta_T = \frac{\text{calor suministrado} - \text{calor cedido}}{\text{calor suministrado}} = \frac{3566,05 - 2285,78}{3566,05} = 0,3590$$

$$CTU_{T \text{ PLANTA}} = \frac{CTU \text{ ciclo a } 100\%}{\eta_{OV} \frac{100 - \% \text{ KW aux}}{100}}$$

donde:

$$\% \text{ KW aux} = \begin{matrix} 8 & \text{con carbón} \\ 6 & \text{con combustóleo} \end{matrix}$$

η_{TOV} si no tiene valor usar

$$\begin{matrix} \text{Gas} & = & 88,5 \\ \text{Combust} & = & 88,5 \\ \text{Carbón} & = & 89,1 \end{matrix}$$

(Referencia: Factores de evaluación y penalización. Documento interno. Gerencia de proyectos termoeléctricos. CFED)

$$CTU_{T \text{ PLANTA}} = \frac{8080}{0,8855 \times \frac{100-6}{100}} = 9712$$

$$\eta_{EX \text{ OV}} = 1 - .4823 = .5177$$

$$CTU_{EX} = \frac{CTU_{EX \text{ ciclo a } 100\%}}{\eta_{EX \text{ OV}} \frac{100 - \% \text{ KW aux}}{100}} = \frac{4271}{0,5177 \times \frac{100-6}{100}} = 8450$$

ANEXO 2

Cálculo de la exergía del combustible: Combustóleo Bunker C. CTE
San Luis Potosí.

Datos:

Poder calorífico superior (PCSD) = 41870 KJ/kg (10,000 kcal/kg;
10 x 10⁶ cal/kg) (del análisis
del combustible)

$$T_o = 303 \text{ } ^\circ\text{K} \text{ (30}^\circ\text{C)}$$

$$P_o = 0.8024 \text{ atm (609.8 mm Hg)}$$

$$T^\circ = 298 \text{ } ^\circ\text{K} \text{ (25 } ^\circ\text{C)}$$

$$P^\circ = 1 \text{ atm}$$

$$R = 1.987 \text{ cal/mol}$$

$$T_1 = 120 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (393 } ^\circ\text{K)}$$

Composición del combustible:

Componente	% Peso	kg/kg C
C	83.64	0.8364
H	11.3	0.113
S	4.2	0.042
N	0.4	0.004
O	0.4	0.004
Cenizas	0.6	0.006
	<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/> 100.0	<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/> 1.0000

Nota: En el análisis se dan los valores de N + O por diferencia.
Para efectos del cálculo se separan y ajustan a 100.0

- Cálculo del número de moles por kg de combustible (NC)

Ecuación:

$$NC = \frac{1000 C}{12.011} \left[\frac{\text{mol carbon}}{\text{kg combustible}} \right]$$

donde: C = 0.8364

sustituyendo: $NC = \frac{1000 \times 0.8364}{12.011} = 69.63$

- Ecuación para el cálculo de la exergía del combustible.

$$b_{comb} = -[\Delta H_R^0 - T_0 \Delta S_R^0 + \Delta C_{pR}^0 (T_0 - T^0) - \Delta C_{pR}^0 T_0 \ln T_0 / T^0] +$$

$$+ RT_0 \ln \frac{(X_{O_2})^{\nu_{O_2}}}{(X_{CO_2})^{\nu_{CO_2}} (X_{N_2})^{\nu_{N_2}}} + C_c [(T_1 - T_0) - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0}] \left[\frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right]$$

- Cálculo de la composición del combustible en mol/mol de carbono en el combustible.

Ecuación: $\frac{\text{kg/kg Ci} \times \text{PAc}}{\text{kg/kg Cc} \times \text{PAI}}$

donde: Ci = componente i
Cc = carbono en combustible
PA = peso atómico del carbono y componente "i" respectivamente.

Componente (mol/mol Carbono)

$$C = \frac{0.8364 \times 12}{0.8364 \times 12} = 1$$

$$h = \frac{0.113 \times 12}{0.8364 \times 1} = 1.62$$

$$s = \frac{0.042 \times 12}{0.8364 \times 32} = 0.0188$$

$$n = \frac{0.004 \times 12}{0.8364 \times 14} = 0.004099$$

$$o = \frac{0.004 \times 12}{0.8364 \times 16} = 0.003587$$

$$\text{Cenizas} = \frac{0.0006}{0.06993} = 0.0086$$

- Cálculo del cambio de entalpia de los reactivos (ΔH_R°) en estado estandar.

$$\text{Ecuacion: } \Delta H_R^\circ = - \frac{PCS}{NC} - 81068s$$

sustituyendo valores:

$$\Delta H_R^\circ = - \frac{10 \times 10^6}{69.63} - 81068 \times 0.0188 = - 145,140.33 \left[\frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right]$$

- Cálculo del cambio de entropia de los reactivos (ΔS_R°)

$$\text{Ec.: } \Delta S_R^\circ = 51.08 \nu_{\text{CO}_2} + 45.77 \nu_{\text{N}_2} + 16.72 \nu_{\text{H}_2\text{O}} + 25.16s - 49 \nu_{\text{O}_2} - S^\circ_{\text{carbon}} \left[\frac{\text{cal}}{\text{gmolK}} \right]$$

donde:

$$\nu_{\text{CO}_2} = 1 + S$$

$$\nu_{N_2} = \frac{n}{2n}$$

$$\nu_{H_2O} = \frac{h}{2n} - 2s$$

$$\nu_{O_2} = 1 + \frac{h}{4} - \frac{nO}{2n} + \frac{2W}{2n} s$$

$$S_{\text{carbon}}^{\circ} = 8.9872 - 7.52311 e^{-0.564682 \left(\frac{h}{1+n} \right)} + 4.80748(Co/1+n) + 12.9867 (n/1+n) + 10.6767 (s/1+n)$$

sustituyendo valores:

$$\nu_{CO_2} = 1 + 0.0188 = 1.0188$$

$$\nu_{N_2} = 0.004099 / 2 = 0.002050$$

$$\nu_{H_2O} = 1.62 / 2 - 2(0.0188) = 0.7724$$

$$\nu_{O_2} = 1 + 1.62/4 - 0.003587/2 + 3/2 (0.0188) = 1.4349$$

$$S_{\text{carbon}}^* = 8.9872 - 7.52311 e^{-0.564682 \left(\frac{1.62}{1.00499} \right)} + 4.8074 \left(\frac{0.003587}{1.00499} \right) + 12.9867 \left(\frac{0.04099}{1.00499} \right) + 10.6767 \left(\frac{0.0188}{1.00499} \right) = 6.1277 \left[\frac{\text{cal}}{\text{gmol}} \right]$$

$$\Delta S_R^{\circ} = 51.06(1.0188) + 45.77(0.00205) + 16.72(0.7724) + 25.16(0.0188) - 49(1.4349) - 6.1277 = -10.9365 \text{ [cal/gmolK]}$$

- Cálculo del cambio de Calor específico de los reactivos ($\Delta C_{p_R}^{\circ}$)

$$\text{Ecuación: } \Delta C_{p_R}^{\circ} = 8.87\nu_{CO_2} + 6.95\nu_{N_2} + 18\nu_{H_2O} - 29.43s - 7.02\nu_{O_2} - Cx$$

donde: $C_x = 5.5$ (Referencia 10).

sustituyendo valores:

$$\Delta C_p^0 = 8.87(1.0188) + 6.96(0.00205) + 18(0.7724) - 29.43(0.0188) - 7.02(1.4342) - 5.5 = 5.827942 \text{ cal/gmolK}$$

- Cálculo de las fracciones molares de los componentes (X_i)

Ecuación: $X_{N_2} = 0.7898 (1 - X_{H_2O})$

$$X_{O_2} = 0.2099 (1 - X_{H_2O})$$

$$X_{CO_2} = 0.0003 (1 - X_{H_2O})$$

$$X_{H_2O} = \frac{P_{v_{H_2O}}(T_0)}{P_0}$$

donde: $P_{v_{H_2O}}(T_0)$ es la presión de vapor del agua a la temperatura de bulbo seco del aire atmosférico, y se obtiene de las condiciones de saturación.

Por lo tanto a 30°C corresponde una presión de saturación igual a 0.04170 atm. (0.04225 bar).

sustituyendo valores para calcular las fracciones molares:

$$X_{H_2O} = \frac{0.04170}{0.8024} = 0.052$$

$$X_{N_2} = 0.7898 (1 - 0.052) = 0.7488$$

$$X_{O_2} = 0.2099 (1 - 0.052) = 0.1990$$

$$X_{CO_2} = 0.0003 (1 - 0.052) = 0.000284$$

$$(X_{N_2})^{v_{N_2}} = (0.7488)^{0.00205} = 0.9942$$

$$(X_{O_2})^{v_{O_2}} = (0.1990)^{1.4399} = 0.09881$$

$$(X_{CO_2})^{v_{CO_2}} = (0.000284)^{1.0188} = 0.000244$$

- Cálculo del término:

$$C_c (T) [(T_1 - T_0) - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0}]$$

$$= 10 [(393 - 303) - 303 \ln \frac{393}{303}] = 10 [(90) - 303(0.2601)] =$$

$$= 111.98$$

donde: $C_c = 8$ a 14 ; usar un valor promedio de 10 . (Referencia 10)

Nota: Si T_1 (temperatura de combustible a la entrada a los quemadores es aproximadamente igual a T_0 y T^0 , entonces el valor de este término es despreciable.

- Cálculo del término:

$$RT_0 \ln \frac{(X_{O_2})^{v_{O_2}}}{(X_{CO_2})^{v_{CO_2}} (X_{N_2})^{v_{N_2}}}$$

sustituyendo valores:

$$(1.087)(303) \ln \frac{0.09851}{(0.000344)(0.999422)} = (1.087)(303)(6.0023) = 3,613.77$$

sustituyendo valores en la ecuación b_{comb}

$$\begin{aligned} b_{comb} &= ((-145,140.33) - ((303)(-10.9365)) + (6.8279(303-298) - (6.8279) \\ &\quad (303 \ln 303/298)) + 3,613.77 + 173.51) = -((-145,140.33) - \\ &\quad - (-3313.75) + (-0.2943) + 3613.77 + 111.96) \\ &= -(-141,826.87) + (3725.44) = 145,552.31 \text{ cal/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{comb} &= 145552.31 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \times 69.63 \frac{\text{mol}}{\text{kgcomb}} = 10,134,807.54 \frac{\text{cal}}{\text{kgcomb}} = \\ &= 10,134.80 \frac{\text{kcal}}{\text{kgcomb}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{comb} &= 10,182.79 \frac{\text{kcal}}{\text{kgcomb}} \times \frac{4.186 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} = 42,424.30 \frac{\text{kJ}}{\text{kgcomb}} \times 77000 \frac{\text{kgcomb}}{\text{h}} = \\ &= 3,266.67 \times 10^6 \text{ kJ/h.} \end{aligned}$$

ANEXO 3

C.T. LAZARO CARDENAS (CON SERVICIOS)

Cálculo de la Exergia del flujo de gases a la salida del precalentador. Para calcular la Exergia de este flujo se necesitaran algunos datos de los flujos de entrada, cuando esto sea requerido, se calcularan.

$$bg = \sum y_i bg_i \quad (\text{cal/mol})$$

$$bg_i = (bg_i)_t + (bg_i)_q + (bg_i)_m$$

donde:

$$(bg_i)_t = (A-T_0) B (T-T_0) + 1/2 (B-T_0 C) (T^2-T_0^2) + 1/3 (C-T_0 D) (T^3-T_0^3) + 1/4 D (T^4-T_0^4) - A T_0 \ln T/T_0 \quad (1)$$

$$(bg_i)_m = RT_0 \ln \frac{p_i}{p_0} \quad (\text{cal/mol}) \quad (2)$$

$$(bg_i)_q = RT_0 \ln \frac{Y_i}{X_i} \quad (\text{cal/mol}) \quad (3)$$

$$i = N_2, O_2, CO_2, H_2O$$

p_i = presión parcial del componente i (atm)

y_i = fracción molar del componente i

X_i = fracción molar del componente i en el aire saturado
 $\left(\frac{\text{mol agua}}{\text{mol aire seco}} \right)$

Datos:

$$P_0 = 1 \text{ atm}$$

$$T_0 = 25^\circ \text{C} (298 \text{ K})$$

$T_0 = 144^\circ\text{C}$ (417 K) temperatura de los gases a la salida del precalentador de aire (lado gases).

composición del combustible:

	% en peso
C	= 83.84
H	= 11.3
O	= 0.04
N	= 4.2
S	= 0.04
Z	= 0.08

Cálculo de la exergía térmica:

Sustituyendo los valores de A,B,C,D, T_0 y T para cada componente, en la ecuación 1, se tiene:

		N_2	O_2	CO_2	H_2O	SO_2
M0	$T_0 = 298$ (25°C)					
M1	$T = 417$ K (144°C)					
M2	A	8.903	8.085	5.316	7.7	6.157
M3	$B \times 10^{-2}$	-0.03753	0.3631	1.4265	0.04594	1.384
M4	$C \times 10^{-5}$	0.193	-0.1709	-0.8362	0.2521	-0.9103
M5	$D \times 10^{-9}$	-0.6881	0.3133	1.784	-0.8587	2.057
b_i		132.05	135.33	181.08	154.40	192.07

- Cálculo de la exergía química.

Para calcular este valor se requiere conocer el excedente de aire para la combustión (ea), el aire teórico (at), la humedad absoluta (x), la humedad en el combustible (w), y los inquemados sólidos (v).

- Cálculo exceso de aire. Por no disponerse de análisis se usará el valor dado por el fabricantes del G.V. en sus hojas de datos:

$$ea = 20\%$$

- aire teórico = Se calcula por la siguiente relación

$$at = \frac{(1+h/4-o/2+s)}{0.2099} = \frac{(1+1.62/4-0.003587/2+0.004099)}{0.2099} = 6.778 \frac{\text{mol aire seco}}{\text{mol carbono}}$$

- humedad absoluta (x) $\frac{\text{mol H}_2\text{O}}{\text{mol aire seco}}$

$$\text{Ecuacion: } x = \frac{Pv_{\text{H}_2\text{O}}(tr)}{P_o - Pv_{\text{H}_2\text{O}}(tr)}$$

donde $Pv_{\text{H}_2\text{O}}(tr)$ es la presión de vapor del agua a la temperatura de rocío (tr). De los criterios de diseño de la CT Lázaro Cardenas se tiene que la humedad relativa es 54%, con este dato y la temperatura de bulbo húmedo, se encuentra la temperatura de rocío respectiva en una carta psicrométrica. Posteriormente a las condiciones de saturación, se busca con la tr la presión correspondiente en tablas de vapor. Entonces se tiene:

$$a \ tr = 12^\circ\text{C} \text{ corresponde } Pv = 0.01383 \text{ atm (0.01401 bar)}$$

$$x = \frac{0.01383}{1 - 0.01383} = 0.01402$$

- Cálculo del número de moles de cada componente en los gases de combustión (ni) mol/ mol carbono

$$at = 6.77 \frac{\text{mol aire seco}}{\text{mol carbono}}$$

$$ea = 20\%$$

w = 0 (no se reporta humedad en el análisis del combustible)

$$x = 0.01402 \frac{\text{mol agua}}{\text{mol aire seco}}$$

$$v = 0 \text{ (despreciable)}$$

Ecuaciones:

$$n_{N_2} = (1 + ea) 0.7901 at + \frac{n_{CO}}{2}$$

$$n_{O_2} = v + ea 0.2099 at + \frac{n_{CO}}{2}$$

$$n_{CO_2} = 1 - v - n_{CO}$$

$$n_{SO_2} = s$$

$$n_{H_2O} = (1 + ea) x at + \frac{h}{9} + w$$

$$n_{CO} = n_{CO} =$$

sustituyendo valores:

$$n_{N_2} = (1 + 0.2) 0.7901 \times 6.77 + \frac{0.004099}{2} = 6.4298$$

$$n_{CO} = 0 \text{ (se supone combustión completa)}$$

$$n_{O_2} = 0 + (0.2) (0.2099) (6.7) + 0 = 0.2813$$

$$n_{CO_2} = 1 - 0 - 0 = 1.0$$

$$n_{SO_2} = 0.0188 = 0.0188$$

$$n_{H_2O} = (1+0.2) (0.01402) (6.7) + \frac{1.62}{2} + 0 = 0.9248$$

$$n_{Tg} = n_{N_2} + n_{CO} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{SO_2} + n_{H_2O}$$

$$= 8.4268 + 0 + 0.2813 + 1.0 + 0.0188 + 0.9248$$

$$n_{Tg} = 8.0515 \frac{\text{mol}}{\text{mol comb}}$$

- Calc. del numero de moles humedos (n_{hh}) $\frac{\text{mol agua}}{\text{mol carbono}}$

$$\text{ecuación: } n_{hh} = 1 + \frac{h}{2} + \frac{n}{2} + s + w + (0.7901+x)at + ea(1+x)at$$

sustituyendo valores:

$$n_{hh} = 1 + \frac{1.62}{2} + \frac{0.004099}{2} + 0.0188 + 0 + (0.7901+0.0142)6.7 +$$

$$+ 0.2 (1+0.01402) 6.7$$

$$n_{hh} = 8.85$$

- Cálculo de la fracción molar de cada componente (Y_i)

Nota: si se tiene el análisis de los productos de combustión en % en Volumen ya no será necesario hacer el cálculo de Y_i pues este será igual al % en volumen dividido entre 100.

ecuación:

$$Y_i = \frac{n_i}{n_{hh}}$$

sustituyendo valores:

$$Y_{N_2} = \frac{8.4288}{8.65} = 0.7425$$

$$Y_{O_2} = \frac{0.2813}{8.6543} = 0.0325$$

$$Y_{CO_2} = \frac{1}{8.6543} = 0.1155$$

$$Y_{SO_2} = \frac{0.0188}{8.6543} = 0.0021$$

$$Y_{H_2O} = \frac{0.9248}{8.6543} = 0.1068$$

- Cálculo de las fracciones molares de los componentes (xi)

Ecuación: $X_{N_2} = 0.7898 (1 - X_{H_2O})$

$$X_{O_2} = 0.2099 (1 - X_{H_2O})$$

$$X_{CO_2} = 0.00031 (1 - X_{H_2O})$$

$$X_{H_2O} = \frac{P_{V_{H_2O}}(T_o)}{P_o}$$

donde: $P_{V_{H_2O}}(T_o)$ es la presión de vapor del agua a la temperatura de bulbo seco del aire atmosférico, y se obtiene de las tablas de vapor, a las condiciones de saturación.

Por lo tanto a $25^{\circ}C$ corresponde una presión de saturación igual a 0.03124 atm (0.03166 bar). Sustituyendo valores:

$$X_{H_2O} = \frac{0.03124}{1} = 0.03124$$

$$X_{N_2} = 0.7898 (1 - 0.03124) = 0.7651$$

$$X_{O_2} = 0.2099 (1 - 0.03124) = 0.2033$$

$$X_{CO_2} = 0.0003 (1 - 0.03124) = 0.00029$$

- Cálculo de la Exergia química de los componentes de los gases de escape.

sustituyendo valores en la ecuación No. 3:

$$(b_{N_2})_q = 1.997 \times 298.15 \ln \frac{0.7425}{0.7651} = -17.75$$

$$(b_{O_2})_q = 592.42 \ln \frac{0.0325}{0.2033} = -1079.08$$

$$(b_{CO_2})_q = 592.42 \ln \frac{0.1155}{0.000290} = 3544.09$$

$$(b_{H_2O})_q = 592.42 \ln \frac{0.1155}{0.0312} = 728.09$$

Para el SO_2 la ecuación es como sigue:

$$C_{b_{SO_2}} = 81.069 - (T \times 42.12) + 15.24 \left[(T_0 - T_0^0) - T_0 \ln \frac{T_0}{T_0^0} \right] +$$

$$+ RT_0 \ln (Y_{SO_2}) + RT_0 \ln \frac{(X_{O_2})^{1/2}}{(X_{CO_2})}$$

sustituyendo valores:

$$C_{b_{SO_2}} = 81.069 - (417 \times 42.12) + 15.24 \left[(298 - 298) - 298 \ln \frac{298}{298} \right] +$$

$$+ (1.987 \times 298 \times \ln 0.0021) + 1.987 \times 298 \times \ln \frac{(0.2033)^{1/2}}{0.00029} = 64224.4$$

- Cálculo de la Exergía mecánica de los componentes de los gases de escape.

Sustituyendo en la ecuación No. 2:

$$\text{donde: } p_i = Y_i \times p_o$$

sustituyendo valores:

$$p_{N_2} = 0.7429 \times 1 = 0.7429$$

$$p_{O_2} = 0.0329 \times 1 = 0.0329$$

$$p_{CO_2} = 0.1159 \times 1 = 0.1159$$

$$p_{H_2O} = 0.1068 \times 1 = 0.1068$$

$$p_{SO_2} = 0.0021 \times 1 = 0.0021$$

$$C_{b_{N_2}} = 1.987 \times 298 \ln \frac{0.7429}{1.0} = -176.23$$

$$(b_{O_2})_m = 592.12 \ln \frac{0.0328}{1.0} = -2022.25$$

$$(b_{CO_2})_m = 592.12 \ln \frac{0.1155}{1.0} = -1277.87$$

$$(b_{H_2O})_m = 592.12 \ln \frac{0.1068}{1.0} = -1324.28$$

$$(b_{SO_2})_m = 592.12 \ln \frac{0.0021}{1.0} = -3829.95$$

Calculo de la exergia total de los gases de escape. La exergia total será la suma de las exergias de los gases (física, química y térmica), multiplicado por su fracción molar:

$$b_{gi} = (b_{gi})_t + (b_{gi})_q - (b_{gi})_m$$

GAS	Térmica	+ Química	- Mecánica	bg	Yi	B gas
N ₂	132.05	(-17.75)	(-176.23)	291.24	0.7425	216.24
O ₂	136.33	(-1079.08)	(-2022.25)	1079.51	0.0328	35.40
CO ₂	181.08	3544.09	(-1277.87)	5003.04	0.1155	577.65
H ₂ O	154.40	728.08	(-1324.28)	2206.75	0.1068	235.88
SO ₂	192.07	54224.4	(-3829.95)	68046.4	0.0021	142.89

$$E_{TOTAL} = 1208.08 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}$$

- Para obtener la exergia en $(\frac{\text{kcal}}{\text{kgcomb}})$ se realiza:

$$\# \text{ total de moles} \times NC = 8.6515 \times 59.63 = 502.40 \frac{\text{mol}}{\text{kgcomb}}$$

$$\frac{\text{mol}}{\text{mol carbono}} \times \frac{\text{mol carbono}}{\text{kg comb}} = \frac{\text{mol}}{\text{kg comb}}$$

$$\begin{aligned}
 1208.06 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \times 602.60 \frac{\text{mol}}{\text{kgcomb}} &= 727.976.95 \frac{\text{cal}}{\text{kgcomb}} = 727.977 \frac{\text{kcal}}{\text{kgcomb}} \\
 &= 3047.31 \text{ kJ/kgcomb} \times 76680 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ comb} = \\
 &= 234,521,096 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}
 \end{aligned}$$

ANEXO 4

ANÁLISIS DE COMBUSTIBLE

Aceite combustible (Bunker C).

- poder calorífico superior kJ/kg (kcal/kg):		41870 (10,000)
- gravedad específica 20/4 °C :		0.987
- viscosidad SSF a 50°C :		550
- Análisis :		
- carbono	% peso	83.64
- hidrógeno	% peso	11.3
- azufre	% peso	4.2
- nitrógeno + oxig.	% peso (por dif.)	0.80
- cenizas	% peso	0.06
- vanadio	ppm	300
- sodio	ppm	40
- níquel	ppm	25
- fierro	ppm	10
- potasio	ppm	5

ANEXO 5
ANÁLISIS DE CARBÓN

C A R B O N

<u>Análisis Primario</u>	<u>Media % Peso</u>
Humedad total	9.5
Materia Volátil	31
Ceniza	12.2
Carbón Fijo	47.3
 T o t a l	 100%
<u>Valor calorífico en Kcal/kg</u>	<u>6333</u>
<u>Análisis Final (Base seca y sin cenizas)</u>	<u>% Peso</u>
Hidrógeno	5.6
Carbono	82.5
Nitrógeno	1.8
Oxígeno	8.96
Azufre	1.1
Cloro	0.04
Humedad total	
Ceniza	
<u>Conceptos Complementarios</u>	
Indice de facilidad de molienda	48
Indice de expansión libre	1-2
Relación de Sílice	80
<u>Pesos Especifico Kg/m³</u>	<u>900</u>

t	t	h	h	e	t	t	h	h	e	t	t	h	h	e
(°C)	(°K)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(°C)	(°K)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(°C)	(°K)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)
238	511,15	241,4	0,6451	9,138	274	547,15	279,8	0,7058	11,64					
239	512,15	242,5	0,6470	9,202	275	548,15	279,8	0,7077	11,73					
240	513,15	243,5	0,6490	9,267	276	549,15	280,8	0,7095	11,83					
241	514,15	244,5	0,6410	9,332	277	550,15	281,9	0,7114	11,91					
242	515,15	245,6	0,6430	9,397	278	551,15	282,9	0,7133	11,99					
243	516,15	246,6	0,6453	9,463	279	552,15	284,0	0,7152	12,07					
244	517,15	247,6	0,6473	9,529	280	553,15	285,0	0,7171	12,15					
245	518,15	248,7	0,6493	9,596	281	554,15	286,0	0,7190	12,23					
246	519,15	249,7	0,6513	9,663	282	555,15	287,1	0,7209	12,31					
247	520,15	250,7	0,6533	9,730	283	556,15	288,1	0,7228	12,40					
248	521,15	251,8	0,6552	9,798	284	557,15	289,2	0,7246	12,48					
249	522,15	252,8	0,6573	9,866	285	558,15	290,2	0,7265	12,56					
250	523,15	253,8	0,6592	9,934	286	559,15	291,2	0,7283	12,64					
251	524,15	254,9	0,6612	10,002	287	560,15	292,3	0,7302	12,72					
252	525,15	255,9	0,6632	10,070	288	561,15	293,3	0,7321	12,80					
253	526,15	257,0	0,6651	10,138	289	562,15	294,4	0,7339	12,89					
254	527,15	258,0	0,6671	10,206	290	563,15	295,4	0,7358	12,97					
255	528,15	259,0	0,6690	10,274	291	564,15	296,5	0,7377	13,05					
256	529,15	260,1	0,6710	10,342	292	565,15	297,5	0,7395	13,14					
257	530,15	261,1	0,6730	10,410	293	566,15	298,6	0,7414	13,22					
258	531,15	262,2	0,6749	10,478	294	567,15	299,6	0,7432	13,31					
259	532,15	263,2	0,6769	10,546	295	568,15	300,6	0,7450	13,39					
260	533,15	264,2	0,6789	10,614	296	569,15	301,7	0,7469	13,48					
261	534,15	265,3	0,6808	10,682	297	570,15	302,7	0,7487	13,57					
262	535,15	266,3	0,6827	10,750	298	571,15	303,8	0,7505	13,65					
263	536,15	267,3	0,6847	10,818	299	572,15	304,8	0,7523	13,74					
264	537,15	268,4	0,6866	10,886	300	573,15	305,9	0,7541	13,82					
265	538,15	269,4	0,6885	10,954	301	574,15	306,9	0,7560	13,91					
266	539,15	270,4	0,6904	11,022	302	575,15	308,0	0,7578	14,00					
267	540,15	271,5	0,6923	11,090	303	576,15	309,0	0,7596	14,09					
268	541,15	272,5	0,6943	11,158	304	577,15	310,0	0,7615	14,18					
269	542,15	273,6	0,6962	11,226	305	578,15	311,1	0,7633	14,27					
270	543,15	274,6	0,6981	11,294	306	579,15	312,2	0,7651	14,37					
271	544,15	275,6	0,7000	11,362	307	580,15	313,2	0,7669	14,46					
272	545,15	276,7	0,7020	11,430	308	581,15	314,2	0,7687	14,55					
273	546,15	277,7	0,7039	11,498	309	582,15	315,3	0,7705	14,64					
274	547,15	278,8	0,7058	11,566	310	583,15	316,3	0,7723	14,73					
275	548,15	279,8	0,7077	11,634	311	584,15	317,4	0,7741	14,82					
276	549,15	280,8	0,7095	11,702	312	585,15	318,4	0,7759	14,91					
277	550,15	281,9	0,7114	11,770	313	586,15	319,5	0,7777	15,00					
278	551,15	282,9	0,7133	11,838	314	587,15	320,5	0,7795	15,10					
279	552,15	284,0	0,7152	11,906	315	588,15	321,6	0,7813	15,20					
280	553,15	285,0	0,7171	11,974	316	589,15	322,6	0,7831	15,29					
281	554,15	286,0	0,7190	12,042	317	590,15	323,7	0,7849	15,39					
282	555,15	287,1	0,7209	12,110	318	591,15	324,7	0,7867	15,48					
283	556,15	288,1	0,7228	12,178	319	592,15	325,8	0,7885	15,58					
284	557,15	289,2	0,7246	12,246	320	593,15	326,8	0,7903	15,67					
285	558,15	290,2	0,7265	12,314	321	594,15	327,9	0,7921	15,77					
286	559,15	291,2	0,7283	12,382	322	595,15	328,9	0,7939	15,87					
287	560,15	292,3	0,7302	12,450	323	596,15	330,0	0,7957	15,97					
288	561,15	293,3	0,7321	12,518	324	597,15	331,0	0,7975	16,06					
289	562,15	294,4	0,7339	12,586	325	598,15	332,1	0,7993	16,16					
290	563,15	295,4	0,7358	12,654	326	599,15	333,1	0,8011	16,26					
291	564,15	296,5	0,7377	12,722	327	600,15	334,2	0,8029	16,36					
292	565,15	297,5	0,7395	12,790	328	601,15	335,2	0,8047	16,46					
293	566,15	298,6	0,7414	12,858	329	602,15	336,3	0,8065	16,56					
294	567,15	299,6	0,7432	12,926	330	603,15	337,3	0,8083	16,66					
295	568,15	300,6	0,7450	12,994	331	604,15	338,4	0,8101	16,77					
296	569,15	301,7	0,7469	13,062	332	605,15	339,4	0,8119	16,87					
297	570,15	302,7	0,7487	13,130	333	606,15	340,5	0,8137	16,97					
298	571,15	303,8	0,7505	13,198	334	607,15	341,5	0,8155	17,07					
299	572,15	304,8	0,7523	13,266	335	608,15	342,6	0,8173	17,17					
300	573,15	305,9	0,7541	13,334	336	609,15	343,6	0,8191	17,28					
301	574,15	306,9	0,7560	13,402	337	610,15	344,7	0,8209	17,39					
302	575,15	308,0	0,7578	13,470	338	611,15	345,7	0,8227	17,49					
303	576,15	309,0	0,7596	13,538	339	612,15	346,8	0,8245	17,59					
304	577,15	310,0	0,7615	13,606	340	613,15	347,9	0,8263	17,70					
305	578,15	311,1	0,7633	13,674	341	614,15	348,9	0,8281	17,81					
306	579,15	312,2	0,7651	13,742	342	615,15	350,0	0,8299	17,91					
307	580,15	313,2	0,7669	13,810	343	616,15	351,0	0,8317	18,02					
308	581,15	314,2	0,7687	13,878	344	617,15	352,1	0,8335	18,13					
309	582,15	315,3	0,7705	13,946	345	618,15	353,1	0,8353	18,24					
310	583,15	316,3	0,7723	14,014	346	619,15	354,2	0,8371	18,35					
311	584,15	317,4	0,7741	14,082	347	620,15	355,3	0,8389	18,45					
312	585,15	318,4	0,7759	14,150	348	621,15	356,3	0,8407	18,56					
313	586,15	319,5	0,7777	14,218	349	622,15	357,4	0,8425	18,67					
314	587,15	320,5	0,7795	14,286	350	623,15	358,4	0,8443	18,79					
315	588,15	321,6	0,7813	14,354	351	624,15	359,5	0,8461	18,90					
316	589,15	322,6	0,7831	14,422	352	625,15	360,5	0,8479	19,01					
317	590,15	323,7	0,7849	14,490	353	626,15	361,6	0,8497	19,12					
318	591,15	324,7	0,7867	14,558	354	627,15	362,7	0,8515	19,23					
319	592,15	325,8	0,7885	14,626	355	628,15	363,7	0,8533	19,35					
320	593,15	326,8	0,7903	14,694	356	629,15	364,8	0,8551	19,46					
321	594,15	327,9	0,7921	14,762	357	630,15	365,8	0,8569	19,57					
322	595,15	328,9	0,7939	14,830	358	631,15	366,9	0,8587	19,69					
323	596,15	330,0	0,7957	14,898	359	632,15	368,0	0,8605	19,80					
324	597,15	331,0	0,7975	14,966	360	633,15	369,0	0,8623	19,92					
325	598,15	332,1	0,7993	15,034	361	634,15	370,1	0,8641	20,04					
326	599,15	333,1	0,8011	15,102	362	635,15	371,1	0,8659	20,15					
327	600,15	334,2	0,8029	15,170	363	636,15	372,2	0,8677	20,27					
328	601,15	335,2	0,8047	15,238	364	637,15	373,3	0,8695	20,39					
329	602,15	336,3	0,8065	15,306	365	638,15	374,3	0,8713	20,51					
330	603,15	337,3	0,8083	15,374	366	639,15	375,4	0,8731	20,63					
331	604,15	338,4	0,8101	15,442	367	640,15	376,4	0,8749	20,75					
332	605,15	339,4	0,8119	15,510	368	641,15	377,5	0,8767	20,86					
333	606,15	340,5	0,8137	15,578	369	642,15	378,6	0,8785	20,99					
334	607,15	341,5	0,8155	15,646	370	643,15	379,6	0,8803	21,11					
335	608,15	342,6	0,8173	15,714	371	644,15	380,7	0,8821	21,23					
336	609,15	343,6	0,8191	15,782	372	645,15	381,7	0,8839	21,35					
337	610,15	344,7	0,8209	15,850	373	646,15	382,8	0,8857	21,48					
338	611,15	345,7	0,8227	15,918	374	647,15	383,9	0,8875	21,59					
339	612,15	346,8	0,8245	15,986	375	648,15	384,9	0,8893	21,72					
340	613,15	347,9	0,8263	16,054	376	649,15	386,0	0,8911	21,85					
341	614,15	348,9	0,8281	16,122	377	650,15	387,0	0,8929	21,97					
342	615,15	350,0	0,8299	16,190	378	651,15	388,1	0,8947	22,10					
343	616,15	351,0	0,8317	16,258	379	652,15	389,2	0,8965	22,22					
344	617,15	352,1	0,8335	16,326	380	653,15	390,2	0,8983	22,35					
345	618,15	353,1	0,8353	16,394	381	654,15	391,3	0,8996	22,48					

```

LIST
SLP      2-FEB-1989 14154

10 I PROGRAMA PARA BALANCE
15 INPUT *PROYECTO1*(P4\PRINT\PRINT
17 PRINT *PROYECTO1*(P4\PRINT\PRINT
20 READ M1,M2,M3,M4,M5
25 READ M6,M7,M8,M9,M10\ READ M11,M12,M13,M14,M15
30 READ M16,M17,M18,M19,M20\ READ M21,M22,M23,M24,M25
35 READ M26,M27,M28
40 READ M1,M2,M3,M4,M5\ READ M6,M7,M8,M9,M10
50 READ M11,M12,M13,M14,M15\ READ M16,M17,M18,M19,M20
55 READ M21,M22,M23,M24,M25,M26
57 READ S1,S2,S4,S5,S6\ READ S11,S13,S14,S15,S16,S17
60 READ B1,B2,B3,B4,B5\ READ B6,B7,B8,B9,B10
65 READ B11,B12,B13,B14,B15\ READ B16,B17,B18,B19,B20
70 READ B21,B22,B23,B24,B25,B26,B30
75 READ P3,E5,D4,D5,M5,T0
80 READ E6,S6,V5,C6,H5,H56
90 I ENERGIA
100 IEN EL GV
103 I Q1 ES LA PERDIDA DE CALOR EN GASES
105 Q1=.0413*((M21#P3)+(M22#M2))
107 I Q2 ES LA PERDIDA DE CALOR EN EL GV
110 Q2=-(M1#H1)+(M3#H3)-(M4#H4)+(M9#H9)+(M24#M24)+(P3#M21)+(M25#M25)-Q1
150 IEN TAP
160 M1=M2*(H1-H2)
180 IEN TPI
190 N4=M51#4
195 M1=(M4-M11)*(H11-H13)
200 M2=M4*(H4-H11)#M1
250 I EN TBP
260 N6=M5-M14
270 N7=M6-M15
280 N8=M7-M16
290 N9=M8-M17
300 M3=M5*(M5-H14)#N6*(H14-H15)+N7*(H15-H16)+N8*(H16-H17)+N9*(H17-H6)
350 I EN COND
360 Q3=(M6#H6)+(M26#M26)-(M7#H7)
400 I EN CAP
410 G1=(M7#H7)-(M8#H8)+(M14#H14)+(M15#H15)+(M16#H16)
420 G2=(M17#H17)-(M26#M26)+(M763,23)
425 G7=(V5#H5)+(750#3127)+(C6#H6)
430 G4=G1+G2+G7
450 I EN CAP
460 G5=(M8#H8)-(M9#H9)+(M10#H10)+(M19#H19)+(M12#H12)
465 D=M10+M12+M18+M19+M8
470 G6=(M18#H18)+(D#26,03)-(M24#M24)
480 G5=G5+G6
500 I BAL DE EN
510 E6=-(M1#H1)+(M3#H3)-(M4#H4)+(M9#H9)-E5+(M25#M25)+E6+(M24#M24)
520 I EN TAP
530 E1=M2#H1-B2)..

```

540 I L=H2*(T0*(S2-S1))

550 T1=E1-L1

400 I EN TPI

610 E2=H4*(B4-B11)+(H4-H11)*(B11-B13)

620 L2=H4*(T0*(S11-S4))+(H4-H11)*(T0*(S13-S11))

630 T2=E2-L2

450 I EN TBP

660 E3=H5*(B5-B14)+H6*(B14-B15)+H7*(B15-B16)+H8*(B16-B17)+H9*(B17-B6)

670 A1=H5*(T0*(S14-S5))+H6*(T0*(S15-S14))+H7*(T0*(S16-S15))

680 A2=H8*(T0*(S17-S16))+H9*(T0*(S6-S17))

685 L3=A1+A2

690 T3=E3-L3

700 I EN CDN

710 L4=(H6*B6)-(H7*B7)+(H26*B26)

750 I EN CBP

760 A5=(H7*B7)-(H8*B8)+(H14*B14)+(H15*B15)+(H16*B16)

770 A6=(H17*B17)-(H26*B26)+(H7*B7)

775 L5=A5+A6

800 I EN CAP

810 A8=(H8*B8)-(H9*B9)+(H10*B10)+(H19*B19)+(H12*B12)+(H18*B18)

820 A9=(B1-L1)-(H24*B24)

830 L6=A8+A9

834 I RENDIMIENTO DEL SISTEMA

835 Y1=ED+L1+L2+L3+L4+L5+L6

837 EY=(H22*B22)+E6

840 R1=(EY-Y1)/EY

850 I CTU

860 C1=H1*(B1-B9) C2=H4*(B4-B3) C3=750*(B30-B9) C4=D8D5

865 C5=(H7*B7) C6=H23*(B23-B9) C7=H25*(B25-B19) C8=H24*(B8-B24)

880 C=(C1+C2+C3+C4+C5+C6-C7-C8)/3.5\$EN\$PRINT\$PRINT

885 I X DE ENERGIA

908 EC=(P34*H21)+(H22*H22) P5=Q3/EC P6=Q1/EC P7=Q2/EC P8=Q3/EC

909 P9=Q3/EC P10=Q4/EC P11=Q5/EC

930 P12=P5+P6+P7+P8+P9+P10+P11

931 I X DE EX

892 X1=ED/EY X2=L1/EY X3=L2/EY X4=L3/EY

894 X5=L4/EY X6=L5/EY X7=L6/EY

895 X9=X1+X2+X3+X4+X5+X6+X7

896 R3=C/(1-X1)

897 P13=1-P12

898 P14=P5+P9+P10+P11+P13

899 P15=1-P14

900 PRINT	*BALANCE DE ENERGIA	BALANCE DE EX.	X DE CALOR	X DE EXE.*	\ PRINT\ PRINT
910 PRINT USING	*GV 000.000.000.000 KJ/H	000.000.000.000 KJ/H	.0000	.0000	*I02,ED,PS,X1
915 PRINT\PRINT					
920 PRINT USING	*TAP 000.000.000.000 KJ/H	000.000.000.000 KJ	.0000	.0000	*I01,T1,P6,X2
923 PRINT\PRINT					
925 PRINT USING	*TPI 000.000.000.000 KJ/H	000.000.000.000 KJ/H	.0000	.0000	*I02,T2,P7,X3
927 PRINT\PRINT					
930 PRINT USING	*TBP 000.000.000.000 KJ/H	000.000.000.000 KJ/H	.0000	.0000	*I03,T3,P8,X4
935 PRINT\PRINT					
940 PRINT USING	*CDN 000.000.000.000 KJ/H	000.000.000.000 KJ/H	.0000	.0000	*I04,L4,P9,X5
945 PRINT\PRINT					
950 PRINT USING	*CBP 000.000.000.000 KJ/H	000.000.000.000 KJ/H	.0000	.0000	*I04,L5,P10,X6

```

960 PRINT USING *CAP 000,000,000,000 KJ/H      000,000,000,000 KJ/H      .0000      .0000**J05,L6,P11,X7
965 PRINT*PRINT
970 PRINT USING *TOTAL                          .0000      .0000**J12,X9
980 PRINT*PRINT
1110 PRINT USING *TAP L MAX 000,000,000 KJ/H   L PERD 000,000,000 KJ/H *FE1,L1
1115 PRINT*PRINT
1120 PRINT USING *TPI L MAX 000,000,000 KJ/H   L PERD 000,000,000 KJ/H *FE2,L2
1125 PRINT*PRINT
1130 PRINT USING *TBP L MAX 000,000,000 KJ/H   L PERD 000,000,000 KJ/H *FE3,L3
1135 PRINT*PRINT
1150 PRINT USING *CTU EX CICLO 000,000 KJ/KWH   CTU EX PTA 000,000      FF%CIENCIA_EX      .0000**J0,03,R1
1155 PRINT USING *EFIC. TERN. ,0000**J15
1195 | MASA SLP
1200 DATA 1037942,1015279,932906,932906,813416
1205 DATA 693568,838397,838397,969451,84160
1210 DATA 95078,46051,37745,30314,29750
1215 DATA 31403,28181,41816,49027,1288000
1220 DATA 70000,1107000,21509,90000,49027
1225 DATA 121220,0,0
1227 | ENTALPIA
1230 DATA 3397,4,3023,3023,3539,4,3125,1
1235 DATA 2418,7,200,4,579,7,1046,3,3023
1240 DATA 3340,4,3340,4,3125,1,2980,2651,8
1245 DATA 2723,3,2586,0,3125,1,546,0
1250 DATA 0,309,180,724,5,3340,4,332
1252 | ENTROPIA
1255 DATA 6,42,6,52,7,31,7,39,7,57
1265 DATA 7,35,7,39,7,42,7,45,7,48,7,52
1267 | EX
1270 DATA 1458,69,1053,99,1053,99,1331,02,892,48
1275 DATA 131,54,1,64,68,12,240,81,1053,99
1280 DATA 1119,9,1119,9,892,48,738,29,601
1285 DATA 463,41,314,79,892,48,58,66,0
1290 DATA 0,14,09,1,03,122,02,1119,9,7,85,1335,56
1293 | OTROS
1295 DATA 41870,238,299E6,1,04,21,74,13330,303
1297 DATA 3269,25E6,0,1050,1372,3102,4,3531,72
1298 PRINT

```

Anexo 8 Listado del programa para cálculo de la exigencia del combustible.

LIST
COMB

```

10 !ESTI PROGRAMA CALCULA LA CAPACIDAD DE TRABAJO DEL COMB.
15 INPUT 'PROYECTO:':P%'PRINT\PRINT
17 PRINT 'PROYECTO:':P%'PRINT\PRINT
20 READ C,H,S,N,O:Z
30 READ P3,T0,P0,T1,P1,F:
40 READ (2,T3,A,PG,W1
60 C1=C/100
65 H1=H/100
70 S1=S/100
75 N1=N/100
80 O1=O/100
85 Z1=Z/100
120 h=1.004*C1/12.011
130 M1=h/1000
140 C2=h1*12/(C1*12)
150 H2=h1*12/(C1*1)
160 S2=h1*12/(C1*32)
170 N2=h1*12/(C1*14)
180 O2=h1*12/(C1*16)
190 Z2=1/M1
210 C3=(P3/H)-(81068+52
215 T6=C3
270 N3=1+52
280 N4=K2/2
290 N5=(H2/2)-2*52
300 N6=1+(H2/4)-(O2/2)+(1.5*52)
315 S3=0.564682*H2/(1+N2)
320 S5=7.52311*EXP(-53)
325 S6=4.80748*O2/(1+N2)
330 S7=12.9807*N2/(1+N2)
340 S8=10.6767*S2/(1+N2)
350 S0=8.8872-S5+S6+S7+S8
360 E1=(51.06*N3)+(45.77*N4)+(16.72*N5)+(25.16*S2)-(19*N6)-S0)
370 T7=E1*T0
410 C4=6.87*N3+6.96*N4+18*N5-29.43*S2-7.02*N6-5.5
415 T8=C4*(T0-T1)
425 T11=T0/T1
430 T10=C4*T0*LOG(T11)
460 X1=F*S/P0
465 X0=(1-X1)
470 X2=0.7898*X0
480 X3=0.2099*X0
490 X4=0.0003*X0
550 X6=X2*N4
560 X7=X3*N6
570 X8=X4*N3
610 X9=X7/X8*X4
615 T9=1.987*T0*LOG(X9)
650 B=T6-T7+T8-T10
710 B1=B+T9+A
720 B2=B1*M
730 B3=B2*4.186*W1/1000

```

```
750 PRINT USING "CAP. DE TRABAJO DEL COMB. ###,###,###,### cal/mol";B2
755 PRINT\PRINT
770 PRINT USING "CAP. DE TRABAJO DEL COMB. ###,###,###,### KJ/HR";B3
773 PRINT\PRINT
795 I PARA SLP
800 DATA 83.64,11.3,4.2,0.4,0.4,0.06
810 DATA 10000000,303,.8024,298,1,0.8024
820 DATA 30,393,173.5,0.04170,77000
900 END
```

Anexo 9 Listado del programa para cálculo de la exergía de los gases de combustión.

GASE

```

10 ! ESTE PROGRAMA ES PARA LOS GASES DE ESCAPE.
15 INPUT "PROYECTO:";P4\PRINT\PRINT
17 PRINT "PROYECTO:";P4\PRINT\PRINT
20 READ C,H,S,N,O,Z
30 READ T0,P0,T1,P1,T3,PV
40 READ P5,E1,N3,W1,W2,U1
100 C1=C/100\ H1=H/100\ S1=S/100\ N1=N/100\ O1=O/100\ Z=Z/100
120 M=1000*C1/12.011
130 M1=M/100
160 C2=C1*12/(C1*12)
170 H2=H1*12/(C1*1)
180 S2=S1*12/(C1*32)
190 N2=N1*12/(C1*14)
195 O2=O1*12/(C1*16)
198 Z2=Z1/M1
200 ! CALCULO DE LA B TERNICA
210 ! PARA N2
220 D1=T3-T0
225 D2=(T3^2-T0^2)
230 D3=(T3^3-T0^3)
235 D4=(T3^4-T0^4)
237 D5=LOG(T3/T0)
240 T4=(6.903 - (T0*(-3.753E-4)))*D1
250 T5= 0.5*(-3.753E-4 - (T0*1.93E-6))*D2
260 T6=0.333*(1.93E-6 - (T0*(-6.861E-10)))*D3
270 T7=0.25*(-6.861E-10)*D4
280 T8=6.903*T0*D5
290 B1=T4+T5+T6+T7-T8
300 !PARA O2
310 O5=(6.085-(T0*3.63E-3))*D1
320 O6=0.5*(3.63E-3 - (T0*(-1.709E-6)))*D2
330 O7=0.333*(-1.709E-6 - (T0*3.133E-10))*D3
340 O8=0.25*3.133E-10*D4
350 O9=6.085*T0*D5
360 B2=O5+O6+O7+O8-O9
400 !PARA CO2
410 C3=(5.316-(T0*0.014285))*D1
420 C4=0.5*(.014285-(T0*(-8.362E-6)))*D2
430 C5=0.333*(-8.362E-6 - (T0*1.784E-9))*D3
440 C6=0.25*1.784E-9*D4
450 C7=5.316*T0*D5
460 B3=C3+C4+C5+C6-C7
500 !PARA H2O
510 H3=(7.7-(T0*4.594E-4))*D1
520 H4=0.5*(4.594E-4 - (T0*2.521E-6))*D2
530 H5=.333*(2.521E-6 - (T0*(-8.587E-10)))*D3
540 H6=.25*(-8.587E-10)*D4
550 H7=7.7*T0*D5
560 B4=H3+H4+H5+H6-H7
600 !PARA SO2
610 S3=(6.157-(T0*.01384))*D1
620 S4=.5*(.01384 - (T0*(-9.103E-6)))*D2
630 S5=.333*(-9.103E-6 - (T0*2.059E-9))*D3
640 S6=.25*2.059E-9*D4

```

450 S7=4.152*T0*D5
 460 B5=S3+S4+S5+S6-S7
 700 IHUMEDAD ABSOLUTA (A2)
 710 A2=P5/(P0-P5)
 750 IAIRE TEORICO
 760 A1=(1 + (H2/4) - (O2/2) + S2)/.2099
 800 INo. MOLES
 810 M11=((1+E1)*.7901*A1)+(N2/2)
 820 N3=N3
 825 N4=1-V-N3
 830 N5=V+(E1*.2099*A1)+(N3/2)
 840 N6=S2
 850 N7=((1+E1)*A2*A1)+(H2/2)+W
 860 N8=M11+N3+N4+N5+N6+N7
 900 I MOLES HUMEDOS
 910 L1=(.7901+A2)*A1
 915 L2=E1*(1+A2)*A1
 920 L3=H2/2\L4=N2/2
 925 N9=1+L3+L4+S2+W+L1+L2
 950 IFRACCION MOLAR
 960 Y1=M11/N9
 970 Y2=N5/N9
 980 Y3=N4/N9
 990 Y4=N6/N9
 1000 Y5=N7/N9
 1005 I CALC DE X1
 1010 X1=PV/P0
 1015 X0=1-X1
 1020 X2=.7889*X0
 1025 X3=.2099*X0
 1030 X4=.0003*X0
 1050 IEX QUIH DE LOS COMPONENTES

 1060 Q1=1.987*T0*LOG(Y1/X2)
 1070 Q2=1.987*T0*LOG(Y2/X3)
 1080 Q3=1.987*T0*LOG(Y3/X4)
 1090 Q4=1.987*T0*LOG(Y5/X1)
 1100 X9=X3^.5/X4
 1110 J1=T3*42.12\ J2=15.24*((T0-T1)-(T0*LOG(T0/T1)))
 1120 J3=1.987*T0*LOG(Y4)\ J4=1.987*T0*LOG(X9)
 1130 Q5=81068-J1+J2+J3+J4
 1200 IEX FIS DE LOS COMPONENTES
 1210 P6=Y1*P0
 1220 P2=Y2*P0
 1230 P3=Y3*P0
 1240 P4=Y5*P0
 1250 P7=Y4*P0
 1300 F1=1.987*T0*LOG(Y1)
 1310 F2=1.987*T0*LOG(Y2)
 1320 F3=1.987*T0*LOG(Y3)
 1330 F4=1.987*T0*LOG(Y5)
 1340 F5=1.987*T0*LOG(Y4)

```

1400 !CALC EX TOT
1410 B6=B1+Q1-F1
1420 B7=B2+Q2-F2
1430 B8=B3+Q3-F3
1440 B9=B4+Q4-F4
1450 B10=B5+Q5-F5
1460 Z6=B6*Y1\ Z7=B7*Y2\ Z8=B8*Y3
1470 Z9=B9*Y5\ Z10=B10*Y4
1500 E2=Z6+Z7+Z8+Z9+Z10
1510 E3=E2*N8*M
1520 E4=(E3/1000)*4.186
1530 E5=E4*W2
1540 PRINT USING "CAP. DE LOS GASES ###,###,###,### CAL/MOL";E2
1545 PRINT
1546 PRINT
1550 PRINT USING "CAP. DE LOS GASES ###,###,###,### KJ/HR ";E5
1555 PRINT
1890 ! DATOS PARA LC S/S
1900 DATA 82.5,5.6,.001,1.8,8.96,0
1910 DATA 298,1,298,1,401,.03124
1920 DATA 0.01383,0.20,0,0,124220,0
2000 END

```