

T.D/621.3/E91

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

ESCUELA DE POSGRADO

**SECCIÓN DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**“MEJORAMIENTO DE UNA PLANTA TÉRMICA MEDIANTE
LA IMPLEMENTACIÓN DE CALDERA PIROTUBULAR
VERTICAL PARA USO INDUSTRIAL Y DOCENTE”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PRESENTADO POR:
Mg. Jorge Eduardo Esquerre Verástegui**

CALLAO – 2016

PERÚ

Jorge Esquerre

pm/verastegui

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO

MIEMBROS DEL JURADO

DOCTOR	: FERNANDO JOSÉ OYANGUREN RAMÍREZ	PRESIDENTE
DOCTOR	: JUAN HERBER GRADOS GAMARRA	SECRETARIO
DOCTOR	: CÉSAR LORENZO TORRES SIME	MIEMBRO
DOCTOR	: SANTIAGO LINDER RUBIÑOS JIMENEZ	MIEMBRO
DOCTOR	: CIRO ITALO TERÁN DIANDERAS	ASESOR

N° DE LIBRO : 01
FOLIO : 039
FECHA DE APROBACIÓN : abril 22, 2016
RESOLUCIÓN DIRECTORAL : 033-2016-UPG-FIEE

DEDICATORIA

A Jehová Dios, por la vida y por todo lo bueno que nos brinda a lo largo de nuestra vida y a mi familia (mi amada esposa Juana y mis queridos hijos Richard y Katherine y a mi nietecito Anthony), que con todo su amor, comprensión, apoyo incondicional y moral me han brindado a lo largo de mi carrera profesional.

AGRADECIMIENTO

Con el respeto y admiración mi profundo agradecimiento a mi Familia, Profesores y Asesores, quienes con su apoyo, sapiencia y dedicación hicieron posible para la culminación de mi trabajo de investigación.

Juana, Richard, Katherine y Tonicito

Dr. Ciro Terán Dianderas

Mg. Juan Carlos Oruna Lara

INDICE

RESUMEN	PAG. 7
ABSTRACT	PAG. 9
I.- PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	PAG. 11
1.1 Identificación del problema	PAG. 11
1.2 Formulación del problema	PAG. 11
1.3 Objetivos de la investigación (general y específicos)	PAG. 12
1.4 Justificación	PAG. 12
II.- MARCO TEORICO	PAG. 14
2.1 Antecedentes en el ámbito internacional y nacional	PAG. 14
- Antecedentes en el ámbito internacional	PAG. 14
- Aporte propio tras el análisis del estudio de los antecedentes del ámbito internacional	PAG. 105
- Antecedentes en el ámbito nacional	PAG. 118
- Aporte propio tras el análisis del estudio de los antecedentes del ámbito nacional	PAG. 150
2.2 Calderas	PAG. 157
2.3 Clasificación de las calderas	PAG. 158
2.4. Principio de funcionamiento de las calderas de tubos de fuego	PAG. 177

2.5 Generación de vapor – Ciclo combinado	PAG. 183
2.6 Turbina de gas	PAG. 209
2.7 Turbinas de vapor	PAG. 216
MARCO FILOSÓFICO	PAG. 220
MARCO Epistemológico, Metodológico y Ontológico	PAG. 230
III.- VARIABLES E HIPÓTESIS	PAG. 246
3.1 Definición de variables	PAG. 246
3.2 Operacionalización de variables	PAG. 249
3.3 Hipótesis general e hipótesis específicas	PAG. 256
IV.- METODOLOGÍA	PAG. 257
4.1. Tipo de investigación	PAG. 257
4.2 Diseño de la investigación	PAG. 257
4.3 Población y muestra	PAG. 258
4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	PAG. 258
V.- RESULTADOS	PAG. 261
5.1 Diseño y Cálculos de la caldera	PAG. 261
5.2 Eficiencia de la caldera	PAG. 282
VI.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS	PAG. 311
6.1. Contrastación de hipótesis con los resultados	PAG. 311
VII. CONCLUSIONES	PAG. 312
VIII. RECOMENDACIONES	PAG. 314

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS PAG. 315

ANEXOS

• Matriz de consistencia PAG. 323

• Presupuesto para la construcción del prototipo de la caldera
pirotubular vertical PAG. 324

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Ventajas del gas seco sobre otros combustibles.....	124
2 Tipos de impactos ambientales	143
3 Parámetros técnicos según combustible	203
4 Precios de las Turbinas de Gas	210
5 Variable 1 = Caldera Pirotubular Vertical	249
6 Variable 2 = Planta Térmica	252

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
1	Esquema Simplificado De Un Sistema De Ciclo Combinado.....	41
2	Central térmica de ciclo combinado	42
3	Incremento de la demanda de energía mundial desde 1800 hasta nuestros días. 51	51
4	Evolución de precio anual medio del barril de petróleo en los últimos años.....	52
5	Sistemas solares	55
6	Ruta que sigue el flujo térmico a través del sistema Caldera Solar.....	55
7	Esquema general de la instalación.....	67
8	Ciclo Rankine de baja temperatura, ciclo cerrado.....	84
9	Ciclo Rankine de baja temperatura, ciclo abierto.....	85
10	Ciclo Kalina.....	86
11	Ciclo Uehara.....	87
12	Ciclo Sotec.....	88
13	Ciclo Híbrido Y Desalinización.....	89
14	Ciclo Otec para evaporación Flash	90
15	Diagrama de funcionamiento de un ciclo combinado.....	101
16	Repotenciación de central a vapor con turbina a gas	128
17	Lavoro Especifico Kj/Kg.....	135
18	Caldera de recuperación de calor sin quemador, flujo de gas horizontal.....	164
19	Caldera de recuperación de calor de circulación positiva	164
20	Caldera de Vaporización Instantánea.....	171
21	Caldera.....	173

22	Una caldera simple más un precalentador de aire de combustión.....	175
23	Una caldera simple más economizador.....	176
24	Caldea Automática Piro tubular.....	178
25	Tipos de bombas hidráulicas.....	179
26	Turbina de vapor.....	180
27	Diagrama T-s, P-v y Eficiencia del ciclo Bryton.....	188
28	Diagrama T-s, P-v y Eficiencia del ciclo Rankine.....	190
29	GRAFICO T vs S Rankine de Recalentamiento.....	191
30	Esquema de una planta de ciclo combinado	193
31	Diagrama de funcionamiento de Ciclo Combinado.....	196
32	Diagrama T-s de funcionamiento de Ciclo Combinado.....	197
33	Curva aproximada del proceso de arranque de un ciclo combinado.....	199
34	Operación conjunta de ambos ciclos de la planta de ciclo combinado.....	205
35	Rango de variación en eficiencia y potencia de salida del ciclo combinado.....	206
36	Ciclo de Bryton - Diagrama P-V y T-S del ciclo de Bryton.....	212
37	Ciclo de Brayton - Diagrama P-V y T-S del ciclo de Brayton.....	216
38	Diagrama T-S con expansión de vapor.....	219
39	Pérdidas en la Caldera.....	284

RESUMEN

La presente tesis es un proyecto de diseño novedoso e innovador en el campo de equipos térmicos ya que se busca desarrollar un método Novedoso Para El Mejoramiento De Una Planta Térmica Mediante La Implementación De Caldera Piro tubular Vertical Para Uso Industrial Y Docente, mediante la cual se espera realizar la determinación de los parámetros operativos adecuados, donde debido al novedoso diseño de la caldera (Modelo Medusa) permitirá aprovechar el calor al máximo ya que se reduce las pérdidas de calor debido a que los tubos Piro tubulares serán solo de fuego y estarán en contacto directo con el agua y ya no habrá pérdidas de calor por la existencia de tubos de humo (la temperatura de los tubos de humo desciende hasta un 30% de la temperatura inicial del tubo de fuego) también ya no habrá pérdidas por las tapas de las calderas Piro tubulares, como existen ahora, esto mejorará la eficiencia energética y el control de las emisiones gaseosas en la operación de calderas y equipos térmicos dentro del **Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)** en el litoral peruano, por esta razón la presente Investigación nos permitirá diseñar un equipo acorde con las necesidades del Mercado Industrial de nuestro País y mediante este diseño y construcción se pueda utilizar dicho equipo como medio Industrial y didáctico docente.

Por otro lado nos permitirá disminuir las emisiones gaseosas al medio ambiente mediante la disminución del uso de combustible, lo cual repercute directamente en la economía de la empresa y la contaminación ambiental. Dicho proyecto de tesis se

sustenta en la necesidad de implantar en las Universidades una metodología estándar de Investigación Productiva o propiciar el desarrollo de una Pequeña Empresa Productiva Universitaria para el desarrollo de la misma, así como de todo el personal involucrado en ella.

El eje conductor de nuestra investigación consistirá en considerar la planta industrial de vapor como sistema que efectúa un ciclo termodinámico. Los avances de la tecnología suponen un constante reto, en cuanto a saber aprovechar de la mejor manera sus nuevas posibilidades. Nuestra intención es desarrollar una aplicación basada en tecnologías relativamente novedosas. Para desarrollar nuestro prototipo, consideraremos un prototipo central, y haremos un modelo en el que, efectuando simplificaciones razonables, y teniendo en cuenta ciertos límites, consigamos integrar la mayor cantidad de aspectos posibles.

Abstract

This thesis is a project of new design and innovative in the field of thermal equipment as it seeks to develop a method new to the improvement of a thermal plant by implementing Caldera Firetube Vertical for industrial use and Teaching, by which it is expected make the determination of suitable operating parameters, where due to the innovative design of the boiler (Medusa Model) will allow use of the heat to maximum as heat loss is reduced because the fire tube tubes will only fire and be in direct contact water and there will be no heat loss by the existence of smoke tubes (the temperature of the smoke tubes down to 30% of the initial temperature of the fire tube) also there will be losses caps boilers firetube, as there are now, this will improve energy efficiency and control of gaseous emissions in the operation of boilers and heating systems within the Clean Development Mechanism (CDM), for this reason in the Peruvian coast this research will allow us to design a equipment meets the needs of the industrial market in our country and through this design and build the equipment can be used as a teaching tool Industrial and teacher.

On the other hand it will allow us to reduce gaseous emissions to the environment by reducing the use of fuel, which has a direct impact on business economics and environmental pollution. This draft thesis is based on the need to establish a standard in universities productive research methodology or foster the development of a small college productive enterprise for the development of the same, as well as all staff involved in it.

The driver of our research will be to consider axis industrial steam plant as a system that performs a thermodynamic cycle. Advances in technology are a constant challenge, as to know how best to take advantage of their new opportunities. We intend to develop an application based on relatively new technologies. To develop our prototype, we will consider a central prototype, and make a model in which, making reasonable simplifications, and taking into account certain limits, get integrate as many possible aspects.

I.- PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La ingeniería de la combustión es la “ciencia de quemar combustible para liberar calor y capacitarlo para desarrollar trabajo útil o proporcionar calefacción”. La operación de una unidad generadora de vapor comprende:

1. La conversión del potencial energético del combustible en energía térmica.
2. La transmisión de esta energía a un medio (generalmente vapor de agua), que pueda emplearse en un trabajo útil.

El problema básico de una Planta Térmica o Central Eléctrica De Ciclo Combinado, por el cual se pretende mejorar la planta térmica mediante implementar una caldera pirotubular vertical, lo cual consiste en disponer la superficie total de absorción de calor de una manera tal, que extraiga el calor máximo obtenible del combustible y de los productos de la combustión, y que este calor sea convertido en trabajo lo máximo posible, determinándose de esta forma la eficiencia de la Planta, pero al mismo tiempo aparece el problema económico de obtener la máxima eficiencia al costo mínimo posible.

1.2.- FORMULACION DEL PROBLEMA

¿Cómo el uso de equipos inadecuados en las plantas térmicas afecta el medio ambiente y el aspecto económico de las empresas?

Problemas Secundarios

- ¿Cómo la falta de equipos de uso eficiente en plantas térmicas afecta el ahorro energético y la eficiencia energética en la industria?
- ¿Cómo el mal uso y la falta de conocimientos en las plantas térmicas afecta el medio ambiente?

1.3.- OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo General

Desarrollar un prototipo de una Caldera Piro-tubular Vertical para la Planta Térmica para mejorar el medio ambiente y el aspecto económico de las empresas.

Objetivos Específicos

- Desarrollar un prototipo de planta térmica con caldera piro-tubular vertical para uso industrial, que permitirá el ahorro energético y mejora en la eficiencia energética en la Industria.
- Elaborar una guía de experiencias de laboratorios para uso docente con la finalidad de mejorar los conocimientos en el uso de plantas térmicas.

1.4.- JUSTIFICACIÓN

La necesidad de poder mejorar la eficiencia y el ahorro de energía y por ende el ahorro de dinero en el uso de las plantas térmicas mediante el uso de una caldera

Piro-tubular Vertical y la necesidad de capacitar a los alumnos de las Universidades así como a los alumnos de los diversos Centros Superiores de Estudio de nuestro País en el tema de Plantas Térmicas que es muy limitado, por el alto costo que resulta el de comprar una caldera por parte de estas instituciones y también su mantenimiento, es que se ha pensado en el Mejoramiento De Una Planta Térmica Mediante La Implementación De Caldera Piro-tubular Vertical Para Uso Industrial Y Docente.

Por otro lado el calentamiento de la atmósfera es el principal desafío medioambiental que hoy afronta la humanidad a nivel mundial. Ninguna población es ajena al problema y a sus consecuencias. El calentamiento global es consecuencia del aumento del contenido de ciertos gases denominados “gases de efecto invernadero (GEI)” que impiden la disipación hacia el espacio de la energía radiante que recibe la tierra.

En los años venideros las naciones en desarrollo como el Perú aumentarán inevitablemente y de manera importante sus emisiones de gases de efecto invernadero como una consecuencia del aumento de energía requerido para su desarrollo económico, efecto del Gas Natural de Camisea.

En esta medida, el presente proyecto de investigación se torna importante porque aportará una Tecnología para evitar la contaminación, así como para contribuir al Mecanismo de Desarrollo Limpio.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL Y NACIONAL

ANTECEDENTES EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL

Rapún Jiménez, José Luis (1999), en su Tesis “Modelo matemático del comportamiento de ciclos combinados de turbinas de gas y vapor”, desarrolla una integración práctica del diseño de la caldera de recuperación de los ciclos combinados mediante la aplicación de dos herramientas diferentes, por un lado se propone el uso de unos algoritmos de prediseño novedosos basados en un sistema experto y por otro se perfecciona el diseño mediante el cálculo de coeficientes de influencia. En paralelo con la tesis se ha desarrollado una herramienta informática, dirigida al diseño y a la simulación de los ciclos combinados en la que se incorporan todos los algoritmos de cálculo y la optimización descritos en la tesis. Los modelos matemáticos descritos en la tesis son de aplicación genérica a cualquier sistema térmico, tanto en lo que se refiere a la simulación como a la optimización. La simulación y optimización del diseño en cualquier situación operativa de los elementos que integran el ciclo combinado (turbina de gas, caldera de recuperación y ciclo de vapor) hace uso de muy diversas técnicas matemáticas y computacionales. Como logro principal de la tesis se aporta la obtención de una metodología de diseño de los ciclos combinados que requiere la

aplicación de múltiples técnicas de cálculo multidisciplinarias y su implantación en un código informático.

Así mismo se plantea objetivos principales entre los cuales presenta dentro de su tesis los siguientes:

- Desarrollo de un modelo matemático de predicción del comportamiento de los ciclos combinados.
- Desarrollo de un método de optimización de los parámetros de diseño basado en el modelo anterior.
- Utilización reiterada de dicho método con el objetivo de analizar la viabilidad técnico- económica de ciertas modificaciones en los ciclos combinados en lo que respecta a la elección de los parámetros de diseño.
- Establecimiento de una metodología de diseño de ciclos combinados en base a las tendencias observadas y definición de nuevos parámetros capaces de cuantificar el efecto de las modificaciones de diseño sobre el rendimiento de los ciclos combinados.

Por otro lado En el sentido más amplio, un ciclo combinado consiste en la integración de dos o más ciclos termodinámicos de potencia para la obtención de un a mayor y/o más eficiente conversión de la energía de entrada en calor o trabajo. A pesar de existir múltiples combinaciones¹, los importantes avances en la disponibilidad y fiabilidad de las turbinas de gas hacen que, actualmente, el término ciclo combinado haga nor

1- (descritas sistemáticamente por Horlock)

malmente referencia a un sistema compuesto por una turbina de gas (o más), un sistema de recuperación de calor/generador de vapor y una turbina de vapor. Termodinámicamente, esto implica la unión de un ciclo Brayton con uno Rankine, en la que el calor de escape del ciclo Brayton se usa como calor de entrada del ciclo Rankine. El reto que se plantea en esta disposición es el de alcanzar el grado de integración necesario para maximizar el rendimiento a un coste económico.

Dicha integración pasa por el análisis de los efectos que tiene la variación de los parámetros que definen a los diferentes componentes sobre el resto de la planta, tanto en diseño como fuera de él.

Un análisis centrado en el primer principio de la termodinámica permite describir las diferencias entre las distintas combinaciones. Si el análisis se centra en el segundo principio permite comprender por qué y dónde están las diferencias. Por otra parte, la optimización tecnológica debe tender a maximizar el rendimiento de la planta mediante la selección de parámetros tales como el valor de las presiones del vapor en diseño, las temperaturas en diseño, los caudales en diseño, etc. Todos ellos parámetros que tienen un óptimo tecnológico.

Sin embargo existen ciertos parámetros, tales como la diferencia de temperaturas en el pinchpoint, cuya reducción mejor a siempre el rendimiento pero siempre a costa de aumentar el coste de la planta. Es en dichos parámetros donde aparece la necesidad de llevar a cabo un estudio técnico-económico.

Jesús María Escosa González, (2009), en su tesis “Reducción de emisiones de dióxido de carbono en centrales térmicas de carbón pulverizado. Repotenciación y ciclo de captura óxido de calcio-carbonato cálcico”, plantea que la necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) de las centrales termoeléctricas de carbón pulverizado que se encuentran operativas permitiendo mantener a dicho combustible como fuente principal de energía. De las dos opciones que existen para conseguir reducir las emisiones manteniendo el uso del carbón como combustible principal, incremento de eficiencia y captura de CO_2 , se analizan los conceptos de repotenciación con turbina de gas y captura mediante la carbonatación de CO_2 con cal viva (CaO) a partir de la calcinación de caliza (CaCO_3) operando según un ciclo regenerativo. Parte importante de esta tesis, es el análisis y desarrollo de una metodología de integración de todos los subsistemas energéticos que conforman la repotenciación y el ciclo de captura atendiendo al objetivo de reducir las emisiones de CO_2 al mínimo coste. Se plantea por ello un análisis de metodologías ya desarrolladas y se deriva una metodología propia que requiere de la ayuda de la simulación computacional a partir de la definición de los diferentes modelos termodinámicos, económicos y medioambientales que caractericen los diferentes subsistemas energéticos.

Hace hincapié en Los informes elaborados por el reconocido Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), el cual se encuentra constituido desde el año 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP), revelan la necesidad de plantear acciones urgentes frente al denominado Cambio Climático derivado de las emisiones de gases de

efecto invernadero. Según el tercer informe del IPCC citado en el cuarto informe² (Metz et al., 2005), existe una nueva e importante evidencia de que la mayor parte del calentamiento global observado durante los últimos 50 años es atribuible a la actividad humana y principalmente a la emisión de dióxido de carbono (CO₂), además de que se espera que siga siendo influyente durante todo el siglo XXI. Se estima que con la tendencia de las emisiones actuales en este siglo XXI se alcanzarán incrementos de 3° C de temperatura. La evidencia parece clara entre la relación de las emisiones de CO₂ e incremento de la temperatura media global y, en especial, su incremento en la era industrial.

Las primeras evidencias de la participación humana en el clima aparecieron en la primera

Conferencia Mundial sobre el Clima en el año 1979. Durante la década de los 80 hubo un incremento de la preocupación pública por las cuestiones ambientales y por ende los gobiernos tomaron cada vez más conciencia sobre cuestiones medioambientales. El IPCC publicó su primer informe en el año 1990, donde recogía la realidad de la amenaza del cambio climático. La segunda Cumbre sobre el Clima, celebrada en Ginebra en el año 1990, incide en la creación de un tratado mundial, la cual derivó en la creación del Comité Intergubernamental de Negociación (CIN) para resolver los problemas relacionados con las negociaciones a fin de realizar una convención sobre el cambio climático. La primera reunión del CIN tuvo lugar en el año 1991, adoptándose la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático el 9 de

2- Metz et al., 2005

Mayo de 1992. En la Cumbre de la Tierra (o Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo) celebrada en Río de Janeiro en junio de 1992 se abrió a la firma, entrando en vigor en 1994. En 2004, 188 Estados y la Comunidad Europea se habían adherido a esta convención.

Una lista completa de los países adheridos se recoge en la guía de la Convención sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 2007). Desde que entró en vigor, los países participantes se han reunido anualmente en la Conferencia de las Partes (CP) siendo la primera de ellas celebrada en el año 1995 en Berlín. No fue hasta diciembre de 1997, en la tercera CP, celebrada en Kyoto (Japón) donde se aprobaron una serie de compromisos jurídicamente vinculantes de recorte de las emisiones. Se elaboró el conocido Protocolo de Kyoto en el que se recogían las normas básicas pero no se especificaba con detalle cómo debían aplicarse. Concluía con el compromiso por parte de 39 países industrializados de reducir la emisión de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido de nitrógeno (NO₂), compuestos perfluorocarbonados (PFC), compuestos hidrocarbonados (HFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆)). El objetivo de dicho Protocolo es el reducir en un 5.2% las emisiones de gases de efecto invernadero a fecha del año 2012 en relación a las emisiones habidas en el año 1990. En las sucesivas CP se fueron negociando las diferentes acciones específicas para el cumplimiento del Protocolo de Kyoto que debía ser ratificado por al menos 55 Partes en la Convención, entre ellas un número de países industrializados incluidos en el anexo I del Protocolo (países miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) en 1992 más los países con

economías en transición (Federación de Rusia, los Estados Bálticos y varios Estados de Europa central y oriental) que representaran al menos el 55 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono de dicho grupo. Las primeras partes comenzaron su ratificación en 1998 (España lo ratificó el 29 de Abril de 1998) y la ratificación de la Federación de Rusia el 18 de Noviembre de 2004 supuso la ratificación definitiva del Protocolo de Kyoto el 16 de Febrero de 2005. La última CP se ha celebrado en Bali (Indonesia) en Diciembre de 2007.

El Protocolo de Kyoto introdujo tres mecanismos innovadores: de aplicación conjunta, para un desarrollo limpio y de comercio de emisión, a fin de conseguir unas medidas de mitigación del cambio climático efectivas para las Partes en relación a los costes. El mecanismo para un desarrollo limpio (MDL) permite a cada una de las Partes incluidas en el anexo I invertir en proyectos de reducción de emisiones o de forestación o reforestación en países de desarrollo y recibir así créditos (reducciones certificadas de las emisiones RCE) por la reducción de las emisiones alcanzada. La aplicación conjunta es un mecanismo que permite a las Partes incluidas en el anexo I ejecutar proyectos que reduzcan las emisiones o aumenten las absorciones en sumideros en otros países incluidos en el anexo I. Por ello reciben las denominadas unidades de reducción de emisiones (URE). El comercio de los derechos de emisión permite a las Partes del anexo I adquirir unidades de la cantidad atribuida (UCA) de otras partes del anexo I que pueden reducir de forma más sencilla sus emisiones.

La aplicación del Protocolo de Kyoto ha estimulado la creación de sistemas nacionales y regionales de comercios de emisión de gases de efecto invernadero así como la

aparición de numerosas organizaciones e instrumentos para promover el comercio de derechos y créditos de emisión. Incluso los países no incluidos en el Protocolo, están registrando la creación de servicios de créditos de emisión y sistemas voluntarios de intercambio. Estos sistemas de comercio así como la organización e instrumentos que lo acompañan se conocen con el nombre de mercados del carbono, y la unidad de medida estándar para todos ellos es la tonelada equivalente de CO₂. Definida con dicha unidad, los RCE expedidos al inicio del MDL a 9 de noviembre de 2007 ha sido de 91.997.346 toneladas de CO₂ equivalente y los derechos de emisión vendidos en el European Climate Change durante el periodo 2005-2006 de la Unión Europea ascendieron a 547.122 millones de toneladas equivalentes de CO₂ (UNFCCC, 2007).

Jesús Escosa hace notar que las dependencias actuales y tendencias relacionadas con:

- Mayor participación del carbón como combustible en la generación eléctrica (50% en 2004 y 57% en 2030 en términos de energía según IEA, 2006)
- Mayor participación de tecnologías de carbón pulverizado frente al resto de tecnologías de carbón (38.7% en 2002 según IEA, 2003)
- Crecimiento de la demanda de potencia eléctrica instalada a corto-medio plazo^a
- Emisiones específicas mayores de CO₂ en tecnologías de carbón pulverizado^b
- Necesidad de reducir las emisiones de CO₂ para frenar el Cambio Climático.^c

a= (4500 GWe según IEA WEO, 2002)

b= (750-1300 g/KWh según Termuehlen, 2001)

c= (IPCC, 2001)



Justifican la necesidad de hacer un importante esfuerzo en encontrar alternativas a las centrales termoeléctricas de carbón pulverizado que se encuentran operativas. Se entiende que es requisito imprescindible diseñar y construir nuevas centrales de carbón haciendo uso y mejorando las diferentes tecnologías existentes¹, pero se plantea como esencial también renovar la potencia de carbón ya instalada atendiendo a pequeñas modificaciones a fin de reducir el tiempo de acción para poder abastecer la demanda. En esta tesis se justifica cómo las centrales operativas de carbón pulverizado con tecnología subcrítica, pueden seguir formando parte del mix de generación haciendo uso de dos conceptos relacionados con el aumento de eficiencia y la captura y almacenamiento de CO₂. No obstante, como la metodología de integración presentada en esta tesis atiende a dos partes comunes en la mayoría de las centrales termoeléctricas, como son el ciclo de vapor y los gases producidos en la combustión, también es posible su estudio y uso en cada una de ellas.

Entendido el escenario de la reducción de emisiones de CO₂ y dentro de éste el papel de la generación de energía eléctrica se señala que el objetivo no debe ser reducir completamente las emisiones de CO₂ de este tipo de sistemas energéticos. El objetivo principal debe ser el reducir dichas emisiones hasta los niveles que sean requeridos, motivados por factores de índole principalmente ambiental, pero siempre atendiendo a otros factores como puedan ser económicos, sociales, tecnológicos, etc.

Dentro del mix de generación, en el que deben caber todas las tecnologías existentes, se debe encontrar el mejor compromiso entre todas ellas sin aislar actuaciones, permiti

¹= (lechos fluidos, gasificación integrada, supercríticas y ultra-supercríticas)

tiendo una flexibilidad de acción frente al comportamiento de la demanda.

Una de las posibilidades que existen de aumentar la eficiencia de las centrales termoeléctricas de carbón pulverizado operativas, atendiendo a los objetivos enmarcados por el IPCC (2005), se encuentra en la posibilidad de sustituir parte de la potencia consumida de carbón por potencia de gas natural. El concepto se denomina repotenciación (Repowering) con turbina de gas y pretende aprovechar por un lado la potencia eléctrica de la propia turbina de gas y por otro la potencia térmica excedente de los gases exhaustados por la misma en el ciclo de vapor.

La repotenciación de centrales termoeléctricas se ha utilizado desde casi la aparición de las turbinas de gas en el mercado, datándose la primera de ellas en el año 1949². No obstante, su objetivo se ha enmarcado principalmente dentro de la necesidad de incrementar la potencia, no haciendo referencia a la posibilidad de ser una herramienta útil en la reducción de las emisiones de CO₂.

En cuanto a la captura y almacenamiento de CO₂, de las diferentes tecnologías consideradas (post, pre y oxicombustión) es la de postcombustión la que ofrece una mejor alternativa para las instalaciones ya existentes. Es la única que puede ser instalada sin realizar excesivas modificaciones de la central termoeléctrica, puesto que se basa en aislar el CO₂ directamente de la corriente de gases generados. El resto de tecnologías requieren de más modificaciones:

La pre combustión necesita una modificación del sistema relacionado con la preparación del combustible antes de su combustión, y la combustión oxifuel requiere una

²= (Maslak y Tomlinson, 1996)

nueva concepción del sistema de combustión para permitir la combustión con un comburente formado principalmente por oxígeno. De los diferentes procesos de captura existentes dentro de la tecnología de postcombustión, clasificados según el IPCC (2005) como tecnologías probadas y tecnologías emergentes, no existe en la actualidad ninguno que se haya encontrado como el más apropiado. Las tecnologías probadas (absorción), únicamente existen a pequeña escala para la separación de CO₂ de gas natural, para la obtención de amoníaco, etc., pero existe todavía una gran penalización energética asociada a su uso en grandes fuentes de emisión como son las centrales termoeléctricas.

Es por ello que este tipo de tecnologías deben ser estudiadas junto a otras denominadas emergentes como son el uso de membranas, adsorción y utilización de sorbentes sólidos.

De todas ellas, debido a la característica del sorbente utilizado y propiedades termodinámicas de trabajo, se considera el proceso de adsorción de CO₂ mediante CaO, como una tecnología de postcombustión viable y competitiva³. Se caracteriza por ser un proceso a alta temperatura, al contrario que otros procesos como el de tecnología por absorción con aminas, lo que deriva en una gran posibilidad de intercambios energéticos con la central termoeléctrica. Dichas posibilidades son las que constituyen la base del problema y el reto que se plantea a fin de encontrar aquellas configuraciones definidas a partir de la integración del ciclo de captura con la central termoeléctrica que minimice la penalización energética asociada.

3.- Abanades et al., 2004

Definida la central termoeléctrica como un sistema energético, se plantea la necesidad de analizar cómo integrar la potencia de turbina de gas y el ciclo de captura para conseguir optimizar el objetivo perseguido. Diferentes metodologías de análisis y diseño, así como de integración de sistemas energéticos, han sido desarrolladas por diferentes autores. Dichas metodologías, a partir de la definición del criterio que debe cumplir el sistema energético una vez diseñado o integrado con otros sistemas energéticos, se apoyan de la computación para, mediante la simulación, poder observar diferentes operaciones de diferentes configuraciones.

Los modelos que definen un sistema energético, que dependerán del criterio perseguido, se clasifican en termodinámicos, económicos y medioambientales según se evalúen eficiencias termodinámicas, costes o emisiones. Así mismo, a fin de reducir la formulación de un análisis numérico atendiendo a la optimización de las diferentes configuraciones que se pueden plantear, se hace uso de diferentes análisis de tipo heurístico, termodinámico y económico. Dichos análisis permiten reducir en gran medida el número de configuraciones de integración o diseño de los sistemas energéticos que serán evaluados a partir de herramientas numéricas de optimización.

Como líneas generales se podría concluir lo siguiente:

- Dependiendo de las modificaciones realizadas, tipos de turbinas de gas y de cómo se realice la integración de ambos ciclos los parámetros de funcionamiento pueden variar sustancialmente.

Evidentemente, el coste de inversión también dependerá de todo lo anterior y se ha visto cómo dos referencias diferentes muestran valores cualitativos distintos respecto a la repotenciación de caja de vientos. Aún así, en líneas generales, se pueden remarcar algunos comportamientos comparativos generales.

- En cuanto a operación la opción ideal sería una repotenciación completa, ya que consigue los mayores aumentos de potencia y rendimiento de la planta a un coste moderado en comparación al resto. El problema es la dependencia exclusiva del combustible de la turbina de gas. Para solucionar este aspecto, las siguientes opciones más convenientes son la repotenciación del agua de alimentación y repotenciación paralela. Entre estas dos opciones se puede optar por conseguir una mayor eficiencia a un coste mayor con la repotenciación paralela o considerar la repotenciación del agua de alimentación a un menor coste perdiendo algo de eficiencia. La opción de la repotenciación de caja de vientos es una opción intermedia entre la repotenciación completa y el resto de repotenciaciões parciales, sin embargo, es una opción que puede suponer un coste elevado a causa de las excesivas modificaciones necesarias.

- En todas las opciones se consigue una disminución de las emisiones específicas de CO₂ puesto que la eficiencia de la planta aumenta y parte del combustible utilizado es gas natural, con menores emisiones específicas que el carbón. Es indudable que la repotenciación completa presenta la mayor reducción de emisiones, pues todo el combustible es gas natural. Las emisiones de los distintos tipos de repotenciación paralela dependerán de las relaciones de utilización de gas natural frente al carbón y de

la potencia de la turbina de gas frente a la del ciclo convencional, pero siempre reduciendo de forma bastante importante las emisiones.

Perspectivas

Es indudable que la continuidad en el uso de los combustibles fósiles y dentro de ellos el carbón en la generación de energía eléctrica debe jugar un papel fundamental con la restricción medioambiental de reducir las emisiones de CO₂. Con esta Tesis se abre un nuevo enfoque relacionado con las centrales termoeléctricas que ya se encuentran en operación y se caracterizan por tener una tecnología basada en el uso de carbón pulverizado.

Se ha aprovechado el concepto de repotenciación, no como posibilidad de incrementar la potencia instalada, si no como posibilidad de reducir las emisiones de CO₂ a un coste razonable. Es evidente, que el estudio de la integración en base a la metodología desarrollada, debe ser ampliada en base a considerar toda una serie de aspectos relacionados con la operación temporal del sistema energético. En este aspecto, se abre un camino para introducir en la resolución diferentes escenarios de operación atendiendo a la evolución de la carga y precios de combustibles y energía eléctrica con el tiempo, para así definir estrategias de operación optimizadas en función de la demanda solicitada. Con ello se deben encontrar las configuraciones y operaciones de turbina de gas y ciclo de vapor atendiendo a si es mejor la operación aislada o de forma conjunta, qué grado de participación debería tener cada una en la demanda final, plantear la opción de instalar una o varias turbinas a fin de incrementar la flexibilidad, etc.

La metodología desarrollada para la integración del ciclo de captura propuesto y su validación en el caso ejemplo ha permitido mostrar la viabilidad del proceso. Se abre por lo tanto un importante camino relacionado con la necesidad de incidir en el comportamiento experimental a gran escala referido a la captura de CO₂ en grandes instalaciones de producción de energía eléctrica. Ello abre un horizonte que incumbe a numerosas áreas de conocimiento entre las que se destacan principalmente el área química, necesaria para la evaluación del comportamiento del solvente en cada una de las reacciones y ciclos de trabajo (aunque se está haciendo, requiere de una caracterización en plantas a gran escala), y el área energética, que a partir de los resultados químicos del proceso, requiere de un diseño real del ciclo de captura atendiendo a las configuraciones según las restricciones físicas de la planta donde se quiere integrar (conexiones, espacios, tamaños de equipos, materiales, etc). En relación a la parte energética, se ha desarrollado toda una metodología de integración energética, que al igual que en el caso de la repotenciación debería incorporar un análisis temporal de la evolución de la demanda.

Con el nuevo procedimiento de análisis de integración de un ciclo de vapor con los excedentes energéticos, se ha llegado a plantear únicamente la etapa relacionada con la búsqueda de un objetivo, por lo que existe la necesidad de una posterior fase de concepción de la red física que se acerque a dicho objetivo. Ello requiere de un análisis exhaustivo de la parte relacionada con la síntesis de sistemas energéticos en cuanto a la fase de concepción.

Una opción interesante que queda abierta tras esta tesis es la posibilidad de hacer uso de forma conjunta de la integración de turbina de gas y del ciclo de captura CaO-CaCO₃ en una central termoeléctrica de carbón pulverizado. En esta tesis se han presentado las metodologías de integración de forma aislada, pero se podrían buscar sinergias entre ambas posibilidades atendiendo al mismo criterio de reducción de las emisiones de CO₂.

Así mismo, y aunque una de las premisas de esta tesis es permitir dar continuidad a las centrales ya operativas, otra posibilidad que se ofrece es la integración de forma conjunta de la repotenciación con turbina de gas y de ciclo de captura CaO/CaCO₃ a partir de la definición de un nuevo diseño de central termoeléctrica.

Un camino que queda abierto es la posibilidad de incrementar el criterio de selección de la mejor integración en base a un problema multiobjetivo, en el que la reducción de las emisiones de CO₂, o el incremento de la eficiencia del sistema energético, junto con el incremento del COE fueran las funciones objetivo del problema.

Atendiendo a la definición del problema de optimización termoeconómica se plantea la posibilidad de incidir en reducir la incertidumbre asociada a ciertas variables subjetivas como son el coste de las emisiones para así poder incorporar a la metodología desarrollada en esta tesis el coste de las emisiones asociadas a la mayor parte del ciclo de vida del sistema energético.

Otra de las posibilidades que quedan abiertas tras esta tesis es la opción de integrar el análisis exergético en la metodología desarrollada a partir de la definición de las estructuras productivas de las configuraciones encontradas para identificar y cuantificar

las pérdidas exergéticas y poder así plantear nuevas configuraciones para ser analizadas. Se podría, además, desarrollar la teoría de los residuos aplicada a este caso. Sería posible incluir dicho análisis exergético en la primera fase de una metodología que pudiera reducir el número de configuraciones para resolver el problema de optimización.

FRANCISCO XAVIER CAJAMARCA CORRAL, (2001) en su tesis “Diseño Y Construcción De Una Caldera Piro tubular Horizontal De Tres Pasos 50 BHP”, pretende ofrecer una alternativa más económica a las industrias que utilizan el vapor dentro de sus procesos de producción, mediante la fabricación local de una caldera. Por tratarse de una máquina sometida a grandes presiones y a severas condiciones de trabajo, deberá ser construida bajo estrictas normas de seguridad y deberá estar equipada con elementos que garanticen un buen funcionamiento, además del bienestar del personal que trabaja alrededor de la misma.⁴

Para el diseño se tomará en cuenta las recomendaciones más importantes de los fabricantes internacionales de calderas.

Las ventajas que nos ofrece este proyecto son las siguientes: menor tiempo en la entrega de la máquina, un precio más económico, fácil mantenimiento y la más importante que puede ser fabricada localmente.

⁴= Esta tesis comprende diseño y construcción de una caldera.

DISEÑO

Para la fabricación de la caldera se tomarán en cuenta los siguientes aspectos: un pre-diseño térmico, un diseño térmico corregido para que cumpla con los parámetros de diseño establecidos, y un diseño mecánico analizando y comparando con parámetros establecidos por fabricantes internacionales de calderas.

CARACTERISTICAS

- Las calderas pirotubulares se usan principalmente para sistemas de calefacción para la producción de vapor requerido en los procesos industriales o como calderas portátiles.
- Se construyen en tamaños de hasta unos 6.800 Kg. (15.000 lb) de vapor por hora. La caldera de baja presión está limitada a 1.05 Kg/cm² (15 lb/plg²) de presión de vapor, y la caldera de vapor para generación de fuerza, puede operar a una presión de 17.6 Kg/cm² (250 lb/plg²).
- La caldera pirotubular se usa generalmente en donde la demanda de vapor es relativamente reducida, comparada con la demanda de las grandes centrales termoeléctricas.
- No se utiliza para el accionamiento de turbinas, porque no es convenientemente adaptable a la instalación de supercalentadores.

- Su posibilidad de sobrecalentamiento es limitada y depende del tipo de la caldera; con el aumento de la demanda de vapor, la temperatura de los gases se eleva rápidamente.
- El costo de una caldera pirotubular instalada, es relativamente bajo y considerablemente menor que la correspondiente caldera acuotubular de domo.
- Y como ofrece condiciones favorables con respecto a sus costos de fabricación, es perfectamente adaptable a la producción estandarizada.
- El diseño de la caldera de tubos de humo se basa principalmente en el hogar y en los pasos de los gases a través de los tubos.
- Se han desarrollado muchos dispositivos .Los tubos han sido colocados horizontalmente, inclinados y en posición vertical, con uno o más retornos.
- La caldera recibe la denominación de caldera de tubos continuos o de tubos de retorno, de acuerdo con la dirección del flujo de los gases. Puede tener un hogar interno, o estar dotada de fogón externo.
- El hogar interno puede ser del tipo de tubo recto, localizado dentro del cuerpo cilíndrico y rodeado por paredes de agua, o puede ser del tipo de caja , con el fogón rodeado de una superficie enfriada por agua, que recibe el nombre de paredes de agua, con excepción de la parte de abajo (piso).

FRANCISCO CAJAMARCA PRESENTA SUS PARAMETROS DE DISEÑO.

Para iniciar el diseño térmico de esta caldera fueron necesarios los siguientes requerimientos industriales:

Cantidad de vapor por hora (flujo másico):

1.543 lb vapor / hora = 700 Kg vapor / hora

Presión máxima de operación:

125 Psi = 8,78 Kg/cm²

Para el diseño térmico de esta caldera se tomará el procedimiento de cálculo para intercambiadores de calor del libro de DONALD KERN.

CALCULO DE LA POTENCIA DE LA CALDERA

La potencia en HP de caldera, tal como fue establecida en 1889 por la ASME, estaba basada en una máquina de vapor que empleaba 13,62 kg de vapor por HP hora a una presión relativa de 4,9 kg/cm² y con agua de alimentación a 38,5oC. Esto corresponde a la vaporización de 15,66 kg de agua por hora a 100oC, lo cual significa la conversión de 15,66 kg de agua por hora a 100oC en vapor seco a 100oC, a la presión atmosférica normal (1,033 g/cm²).

En estas condiciones cada kg. de vapor producido requiere la entalpia de vaporización a la presión atmosférica normal, la cual vale 543,4 Kcal. Por consiguiente la capacidad de una caldera podrá expresarse de la siguiente manera:

$$\mu_o (h - h_f)$$

$$HP_{CALDERA} = \frac{\text{-----}}{543,4 \times 15,66}$$

μ_o = Flujo másico de vapor producido por la caldera (Kg./h)

h = Entalpia del vapor en condiciones de salida (Kcal/Kg.)

h_f = Entalpía del agua en condiciones de entrada (Kcal/Kg.)

Entonces:

μ_o = 700 Kg./h

h = 666,93 Kcal/Kg. (vapor saturado y seco a 8,78 Kg/cm²)

h_f = 70,49 Kcal/Kg. (líquido comprimido a 8,78 Kg/cm² y 70 °C)

Para optimizar el consumo de combustible toda caldera debería alimentarse con agua caliente, así nos indica el Ing. Angel Vargas autor del libro “Calderas Industriales y Marinas “ siendo una temperatura promedio la de 70° C, con este valor sería más fácil alcanzar una temperatura de ebullición del agua y a la presión de trabajo que estuvie- re operando la caldera.

$$700 (666,93 - 70,49)$$

$$HP_{CALDERA} = \frac{\text{-----}}{543,4 \times 15,66}$$

HP_{CALDERA} = 49,06 BHP.

Así mismo Francisco Cajamarca presentó sus conclusiones y recomendaciones como son:

CONCLUSIONES DEL AUTOR

1. Se ha comprobado en el diseño térmico que los valores y datos proporcionados por los fabricantes de calderas se acercan a los valores calculados en este capítulo, además el correcto uso de estos datos y valores nos permitirá ahorrar un tiempo considerable en los cálculos para el diseño térmico de futuras construcciones.
2. Con este capítulo se han aprendido temas que no son estudiados en la facultad, lo cual ha enriquecido en parte los conocimientos adquiridos durante el período de estudio.
3. En la construcción de esta caldera se han aplicado técnicas tanto en el área eléctrica como en el área mecánica, las cuales serán medidas posteriormente una vez que el equipo entre a funcionar, y estos resultados serán analizados y comparados con los de otros equipos similares.
4. Por la no existencia en el país de materiales recomendados por los fabricantes internacionales de calderas para la parte del casco, hogar y espejos se ha elegido el material cuyas características de composición se acercan más a las de estos materiales, además se ha sobredimensionado en el espesor de la chapa para compensar estas diferencias.

5. Por ser una máquina térmica en la cual intervienen diferentes parámetros de trabajo como la presión, nivel de agua, combustión, etc. se ha tomado especial atención en los equipos auxiliares de seguridad, para con esto garantizar la integridad de todo el personal que este alrededor de la misma.

6. Con este trabajo se han establecido conocimientos teóricos y prácticos que no pretenden desarrollar nuevas teorías sobre la construcción de calderas, sino formar una base de conocimientos, que debe convertirse en una estructura real de desarrollo, como un paso hacia la definición de una tecnología propia.

RECOMENDACIONES DEL AUTOR

1. Las planchas que formaran el casco y el hogar de la caldera deberán ser cortadas perfectamente a escuadra para evitar problemas y complicaciones en el momento del rolado de las mismas.

2. La perforación de los espejos se debe hacer con la herramienta (broca) de la medida exacta para que la colocación y lo más importante que es el ajuste de los tubos se lo realice de acuerdo a los parámetros establecidos.

3. La unión electro soldada de las partes sometidas a presión la debe realizar solamente personal preparado y calificado para este tipo de trabajo.

ALBERTO DE JESÚS RAMÍREZ ROMERO (MÉXICO, 2011), En su trabajo **“Generación De Energía Y Las Centrales Térmicas De Ciclo Combinado”** se plantea y estudia el tema de las centrales de ciclo combinado; el contenido de la in-

formación va desde la investigación teórica hasta la presentación de un caso práctico de una planta de ciclo combinado. A través de su tesis, aborda el panorama energético de las diversas fuentes de generación de energía hasta llegar a la generación eléctrica mediante el ciclo combinado, teniendo una perspectiva a nivel mundial y nacional de sus alcances; define los principios y generalidades del ciclo combinado, además de las características relevantes de la configuración de los elementos que conforman la generación de energía eléctrica mediante este proceso, como son la turbina de gas, la turbina de vapor, el recuperador de calor – generador de vapor, etc., que darán el conocimiento para sustentar el análisis termodinámico aplicable a los ciclos de gas, vapor y combinados.

Tomando en cuenta el planteamiento central de su tesis, desarrolló información respecto al rendimiento y optimización de centrales termoeléctricas de ciclo combinado, para concluir con la presentación de un caso práctico de estudio, mostrando los resultados de eficiencia y rendimiento característicos de las centrales térmicas de ciclo combinado.

Alberto Ramírez hizo un estudio y Evolución y nuevas tendencias en sistemas de generación de energía eléctrica, en el cual menciona lo siguiente:

Los últimos años del siglo pasado han sido testigos de una profunda transformación estructural, en relación a las condiciones y principios que regían la generación de energía eléctrica convencional en los países industrializados. Dos principales causas son las que permiten explicar estos cambios: primero, la creciente liberación del mer-

cado energético mundial y segundo, el cambio climático aunado a la creciente preocupación ambiental existente en las sociedades desarrolladas.⁴

Los años sesenta se caracterizaron por un crecimiento económico continuo, en donde, cualquier tipo de inversión tecnológica o energética que contribuyera al crecimiento económico se podía desarrollar, siempre y cuando se cumplieran ciertos limitantes en el costo de inversión y el precio del bien producido.

En los setenta se dio un cambio notable a esta forma de política energética, al surgir la preocupación acerca de los límites del crecimiento económico. La regularización de los precios del petróleo por parte la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) mostró la vulnerabilidad de los países en materia de recursos energéticos, y a la par se desencadenó un temor a las tecnologías de gran escala. Los mercados y los presupuestos públicos se vieron afectados por una inflación generalizada, aunadas a una recesión en las economías desarrolladas.

Los años ochenta mostraron lo limitado de las economías nacionales, además de la necesidad de mayor competencia en los mercados económicos internacionales.

Las restricciones tecnológicas fueron más visibles al darse graves accidentes, como la catástrofe en la planta nuclear de Chernóbil en la entonces Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS); la acumulación de residuos tóxicos; los derrames de petróleo y el incremento en las emisiones carbónicas comenzaron a afectar el medio ambiente. En ese momento los impactos ambientales comenzaron a verse cuestionados.

4. *Sabugal y Gómez, 2006, p. 20*; 5. *Quintanilla y Fischer, 2003, p.26*

En la década de los noventa las naciones se condujeron hacia una línea de integración económica, tal es el caso de la Unión Europea o el Tratado de Libre Comercio (TLC) entre Canadá, Estados Unidos y México. Esta integración consolidó una interdependencia tanto tecnológica como energética entre los países, donde el desarrollo sostenible «aquél que cumpla con las necesidades actuales, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades» ha sido pieza clave en esta etapa; para reducir la contaminación y lograr un consenso global se han plasmado iniciativas como la Cumbre de Rio de Janeiro en 1992 o el Protocolo de Kyoto en 1997 y subsiguientes desarrollos.⁵

Hacia este siglo se han logrado mayores esfuerzos hacia la integración de todos los sistemas infraestructurales, necesarios para empezar a soportar una economía mundial sustentable. Las inversiones en energía y tecnología están encaminadas con el mismo propósito, el cual es impulsar la sustentabilidad de la vida en el planeta. Los países en vías de desarrollo disminuirán las cantidades de emisiones de CO₂, mientras se privilegian las negociaciones para la mejora de su infraestructura existente.

El factor ambiental, explica el auge inusitado de la generación de energía eléctrica con fuentes renovables en la mayoría de los países desarrollados, al tiempo que refuerza la consolidación de mejores formas de generación con combustibles fósiles que reduzcan las emisiones de gases contaminantes y se caractericen por una creciente eficiencia energética.

Los combustibles fósiles suponen a escala mundial, y en muchos países, las cuatro quintas partes del suministro de energía primaria, el petróleo es la mitad de esta can-

tividad y le siguen en volumen el carbón y el gas natural. El quinto restante corresponde a la hidráulica, a energías renovables y a la nuclear.

El petróleo se produce en un reducido número de países, el costo del combustible fósil varía dependiendo geológicamente de la ubicación de sus yacimientos o de la facilidad de su extracción. Su posición como un recurso primario para la generación energética no se vislumbra a mantenerse estable a mediano plazo siguiendo con el ritmo actual de consumo; lo mismo sucede con el gas natural y el carbón, estos últimos estimados para un periodo mayor al del petróleo.

Por lo mencionado podemos decir que la necesidad de bajos niveles de emisión de contaminantes y de alta eficiencia energética, ha traído el desarrollo de las centrales térmicas de vapor y de gas natural. Una central termoeléctrica de tipo vapor es una instalación industrial, donde la energía química del combustible se transforma en calorífica para producir vapor, éste se conduce a la turbina, donde la fuente cinética se convierte en mecánica, transmitiéndose al generador para producir electricidad.

Características generales del ciclo combinado.

Técnicamente, un ciclo combinado está constituido por tres elementos: una turbina de gas, una caldera de recuperación de calor y una turbina de vapor. La turbina de gas genera energía eléctrica mediante la combustión de gas natural. Los gases de escape procedentes de la combustión, se introducen en un intercambiador de calor que se conoce como caldera de recuperación. En ella el agua aprovecha el calor residual de los

gases de escape de la turbina de gas para generar vapor que se aprovecha en la turbina de vapor, incrementando la producción total de energía eléctrica.

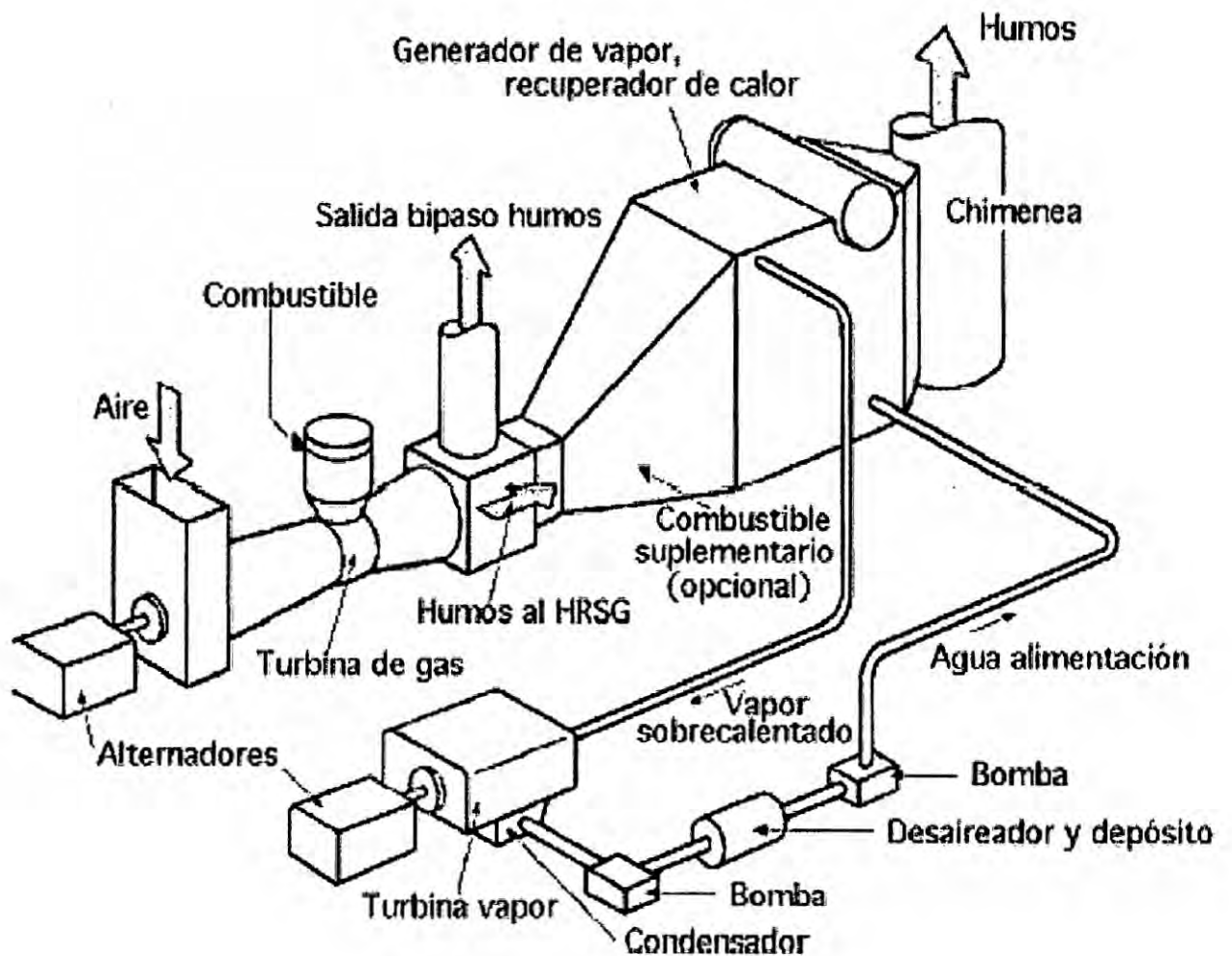


Figura 1. Esquema Simplificado De Un Sistema De Ciclo Combinado.

Fuente: Alberto De Jesús Ramírez Romero (México, 2011), Tesis "Generación De Energía Y Las Centrales Térmicas De Ciclo Combinado"



Figura 2. Central térmica de ciclo combinado.

Fuente: Alberto De Jesús Ramírez Romero (México, 2011), Tesis “Generación De Energía Y Las Centrales Térmicas De Ciclo Combinado”

Fundamentos termodinámicos.

El diseño, la explotación y el funcionamiento de las centrales de generación eléctrica dependen estrechamente de la ciencia de la termodinámica.

El principio de conservación de energía expresa que durante una interacción, la energía puede cambiar de una forma a otra pero su cantidad total permanece constante.

La primera ley de la termodinámica es una expresión del principio de conservación de la energía y sostiene que la energía es una propiedad termodinámica.

La segunda ley afirma que la energía tiene calidad así como cantidad y los procesos reales ocurren hacia donde disminuye la calidad de energía.⁶

6. Cengel, Y.A., 2009, p.2

El desarrollo de los ciclo combinados vapor-gas está ligado fundamentalmente al avance tecnológico de las turbinas de gas, siendo la teoría del perfil termodinámico un hito que permitió una mejor compresión de los fenómenos que tenían lugar en el interior de las maquinas, la construcción de alabes de menor con menores perdidas y aumento de los rendimientos de los compresores empleados. Su desarrollo tecnológico tuvo un impulso definitivo con la segunda guerra mundial y la aplicación del turboreactor al campo de la aviación, aunque casi de forma inmediata empezó a utilizarse en aplicaciones estacionarias. En la actualidad, los altos rendimientos alcanzados, junto con sus bajas emisiones contaminantes y la mejora en las redes de distribución de gas natural, han favorecido su empleo en centrales de ciclo combinado gas-vapor y el rápido desarrollo de esta tecnología.⁷.

En tal sentido Alberto Ramírez llega a las siguientes conclusiones con respecto a su tesis:

- Como respuesta a la necesidad, cada vez más urgente, de contar con material informativo preciso con el nivel académico de la Universidad, y esencial para el aprendizaje objetivo y practico de los conceptos de generación termoeléctrica de ciclo combinado, él elaboró su tesis con esta idea en la mente.
- Con el trabajo presentado ha quedado un cúmulo importante de conocimientos sumamente interesantes de la generación de energía mediante el ciclo combinado, partiendo en un principio de las diferentes formas de generar energía eléctrica hasta llegar al punto central de su tesis, las centrales térmicas de ciclo combinado;

7. (Sabugal y Gómez, 2006)

permitiendo al lector distinguir las ventajas y desventajas de cada una ellas, y dándole especial relevancia a la generación de energía mediante los ciclo combinados de gas y vapor.

- En este trabajo se dio a conocer información acerca de las partes que constituyen el ciclo combinado, su funcionamiento, sus características y principios de operación; dándole al lector una visión objetiva de la importancia de este tipo de generación en cuanto cuestiones ambientales, tecnológicas y de costo, basándose en la línea central de este trabajo, la eficiencia del ciclo combinado.
- Al final de esta investigación se presentó un caso de generación de energía por medio de un ciclo combinado, en donde el análisis y resultado, nos lleva a concluir la importancia y las ventajas en cuanto a el rendimiento y eficiencia de la generación de energía a través de ciclo combinado, con respecto a la generación individual de los ciclos de gas y vapor, respectivamente.

Blanco G., Douglas A. (2007, Venezuela), en su Trabajo de tesis denominado “Diseño Del Esquema De Conexión De Una Planta Termoeléctrica De 900 Mw En Cumaná Y La Evaluación De Su Impacto En El Sistema Eléctrico Nacional (SEN)” menciona que la empresa CVG Electrificación del Caroní (CVG EDELCA), filial de la Corporación Venezolana de Guayana, es la empresa de generación hidroeléctrica más importante del país. Esta empresa encargada de la generación, transmisión y comercialización de energía eléctrica, aporta más del 70 % a la producción nacional de electricidad a través de sus grandes centrales de generación Guri, Macagua y Carua-

chi que en conjunto con la futura central Tocoma conformarán el Desarrollo Hidroeléctrico del Bajo Caroní.

En los últimos años la demanda existente en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) ha aumentado en promedio 4,5 % interanual y se estima siga incrementándose debido a las expectativas de crecimiento poblacional y el plan de desarrollo nacional previsto. Para satisfacer tales incrementos las empresas de servicio eléctrico han elaborado sus propios planes de expansión de generación consolidados en el plan único de expansión de la Oficina de Operación de Sistemas Interconectados (OPSIS), dentro del cual CVG EDELCA plantea la entrada de una Planta Termoeléctrica de 900 MW en dos etapas de 450 MW, estimándose la entrada del primer ciclo combinado de 450 MW para el año 2008 (I Etapa) y el segundo ciclo combinado de 450 MW para el año 2011.

El Proyecto de la Planta Termoeléctrica en Cumaná sería el inicio de CVG EDELCA en la instalación de generación Termoeléctrica, teniendo en cuenta que se tiene conocimiento en la operación de plantas de ciclo simple, tales como Jusepín y Santa Bárbara en condiciones de comodato. Este tipo de generación térmica servirá de soporte para los periodos de hidrología baja, permitiendo así garantizar la energía demandada por los clientes de CVG EDELCA para mantener una calidad de servicio dentro de los niveles deseados.

La energía producida por las centrales en operación es entregada a la Red Troncal de Transmisión (RTT), siendo esta el conjunto de instalaciones de transmisión de los Sistemas Eléctricos pertenecientes al Sistema Interconectado Nacional (SIN), que in-

terconectan las principales plantas de generación y/o los centros de carga y que influyen de manera importante en la estabilidad, confiabilidad y seguridad del SIN [1].

La planta Termoeléctrica se conectará al sistema Oriental para satisfacer los incrementos de demanda, haciéndose necesaria la revisión de los nexos de interconexión con dicho sistema y con el SEN.

Dado que la capacidad de transmisión del sistema Oriental con la incorporación de la Planta Termoeléctrica de 900 MW puede presentar limitaciones térmicas, de tensión, de estabilidad transitoria y dinámica, ante las pequeñas y grandes perturbaciones a las cuales está expuesto el sistema, se determinó el esquema de conexión de la planta, además de las ampliaciones necesarias que permitirán mantener los niveles de calidad deseados. Estos son los estudios objeto del presente trabajo de grado de la especialización de Sistemas Eléctricos de Potencia.

En la generación de energía eléctrica se denomina ciclo combinado a la utilización simultánea de dos ciclos termodinámicos en un mismo sistema, uno cuya energía primaria es la fuente de gas producto de una combustión y otro que utiliza la energía calorífica de los gases producidos por el ciclo de gas para producir vapor de agua.

En una central eléctrica el ciclo de gas genera energía eléctrica mediante una turbina de gas y el ciclo de vapor de agua lo hace mediante una o varias turbinas de vapor. El principio sobre el cual se basa es utilizar los gases de escape a alta temperatura de la turbina de gas para aportar calor a la caldera o generador de vapor de la turbina de vapor. La principal ventaja de utilizar el ciclo combinado es su alta eficiencia, ya que se obtiene un rendimiento 50% superior al rendimiento de una central de ciclo único.

Aumentando la temperatura de entrada en la turbina de gas de los gases de escape, se obtienen rendimientos del ciclo combinado cercanos al 60 %. Esto implica una temperatura de salida de gases de unos 1350°C, esta temperatura de salida está limitada por la resistencia térmica que presentan los materiales cerámicos empleados en el recubrimiento interno de las cámaras de combustión de esas turbinas.

Todas las centrales termoeléctricas son contaminantes para el medio ambiente, afectándose en consecuencia a todos los seres vivos, por los gases tóxicos que expulsan al ambiente. No obstante las plantas de ciclo combinado son las que menos contaminan de todas las industrias de producción de electricidad por quema de combustible fósil. Básicamente las emisiones son de CO₂. Las emisiones de NO_x y SO₂ son insignificantes, no contribuyendo por tanto a formación de lluvia ácida.

CONCLUSIONES DEL AUTOR

- La opción N° 1 es la de menor costo para el mediano y largo plazo, la cual plantea la conexión del primero y segundo ciclo combinado de 450 MW cada uno en Cumaná II a 230 kV.
- El esquema de la subestación Cumaná II propuesto⁸ en la opción N°1, es el que presenta menor inversión para CVG EDELCA y el Sistema Eléctrico Nacional para el mediano y largo plazo.
- Con la entrada de la Planta Termoeléctrica en Cumaná el estado Sucre pasa a ser una fuente de exportación de energía para el Sistema Oriental, impactando favora

⁸= interruptor y medio en el terreno de CVG EDELCA

blemente a los estados Anzoátegui, Monagas y Nueva Esparta.

- En todas las opciones evaluadas no se visualizaron problemas en los niveles de cortocircuito en las subestaciones impactadas por la Planta Termoeléctrica en Cumaná. Las opciones N°2 y N°3 a 400 kV son las que generan menos pérdidas para el sistema, pero a su vez son las opciones más costosas en inversión además de la operación y mantenimiento, haciendo despreciable la ganancia por pérdidas contra la opción N°1 que es la que presenta más pérdidas técnicas de transmisión.

Muñoz Antón, Javier (España, 2008), en su tesis “Sistemas de generación eléctrica mediante calderas de vapor energizadas por radiación solar concentrada”, menciona que la creciente demanda de energía, el elevado coste del petróleo, y los problemas ambientales requieren de nuevas plantas de potencia de alto rendimiento, bajo coste de generación, rápida construcción y poco contaminantes. Basándose en estas ideas, la evolución del parque de generación eléctrica ha ido adaptándose con el paso de los años, adoptando tecnologías (ciclos combinados) o mejorando las existentes (nuclear, hidroeléctrica de bombeo). De forma paralela a estas formas de generación fue surgiendo la idea de aprovechar las fuentes de energía renovables, aparte de la hidroeléctrica, para la producción a gran escala de electricidad. A día de hoy el desarrollo de energías renovables se ha visto recompensado con un importante éxito en el campo de la energía eólica, donde se ha encontrado un sistema, el molino de tres palas, que se ha impuesto frente al resto de sistemas de aprovechamiento eólico gracias a un ade-

cuado compromiso entre eficiencia y fiabilidad. Sin embargo, en el ámbito de la energía solar térmica para producción de energía eléctrica aún no se ha encontrado el análogo al molino de tres palas. Prueba de ello es el abanico de configuraciones para el aprovechamiento de esta forma de energía que se baraja a día de hoy: sistemas de receptor central como la PS10 de la empresa Abengoa o los campos de colectores cilindro-parabólicos en los desiertos de Estados Unidos son los que gozan de un mayor desarrollo. Esta tesis presenta un nuevo sistema de aprovechamiento de energía solar térmica de concentración mediante un novedoso sistema bautizado como Caldera Solar. Dicho sistema presenta importantes similitudes con los sistemas de receptor central en cuanto al aspecto constructivo, pero las condiciones de operación se asemejan más a las de los colectores cilindro-parabólicos. Concretamente, la Caldera Solar puede ser fácilmente asemejada al hogar de una central térmica convencional, pero en lugar de conformar un recinto cerrado en cuyo interior se produce una combustión, su foco caliente, aprovecha la energía liberada por el Sol mediante el mismo tipo de configuración: una parrilla de tuberías distribuidas por una superficie extensa por las que circula el fluido calorífero, siendo las condiciones de funcionamiento (temperaturas y densidades de potencia) las que resultan del compromiso entre alcanzar un alto rendimiento de captación solar y un alto rendimiento del ciclo termodinámico. Con este fundamento, se puede llegar al diseño conceptual de una planta solar termo-eléctrica cuyos componentes están en su mayor parte ya desarrollados, tanto en la industria de las plantas térmicas convencionales como en la de la energía solar térmica, a falta de las parrillas que recibirán la radiación solar concentrada. Dicho diseño conceptual se

presenta en este texto que demuestra la posibilidad de alcanzar importantes rendimientos (~25%) superiores a los que el estado de la técnica de la energía solar termoeléctrica actual posibilita, a lo que se añaden unos muy interesantes niveles de robustez (en lo que a su comportamiento como máquina térmica se refiere) y fiabilidad. Adicionalmente, el diseño de Caldera Solar descrito presenta ciertos grados de libertad en el diseño que posibilitan la mejora en el rendimiento del sistema sin con ello afectar a sus principales características: fiabilidad, robustez y alto rendimiento.

La energía solar, como la eólica, se viene usando desde la antigüedad por la raza humana; desde usos tan simples como el secado de la ropa hace más de 5000 años hasta fuente de energía para la defensa militar. Posiblemente la defensa de Siracusa que planteó Arquímedes (~ 200 a.c.), utilizando espejos para orientar y concentrar adecuadamente la radiación solar sobre los barcos romanos atacantes, es uno de los usos antiguos más conocidos de la concentración de energía solar, y de los que mejor demuestra su potencialidad.

Así, con el paso de los años se encontró en el petróleo, en el gas y en el combustible nuclear concentraciones de energía elevadas que podían ser aprovechadas con la tecnología adecuada, pero presentaban todas ellas problemas en común, como son la generación de residuos o emisiones contaminantes, riesgos en su explotación y reservas limitadas.

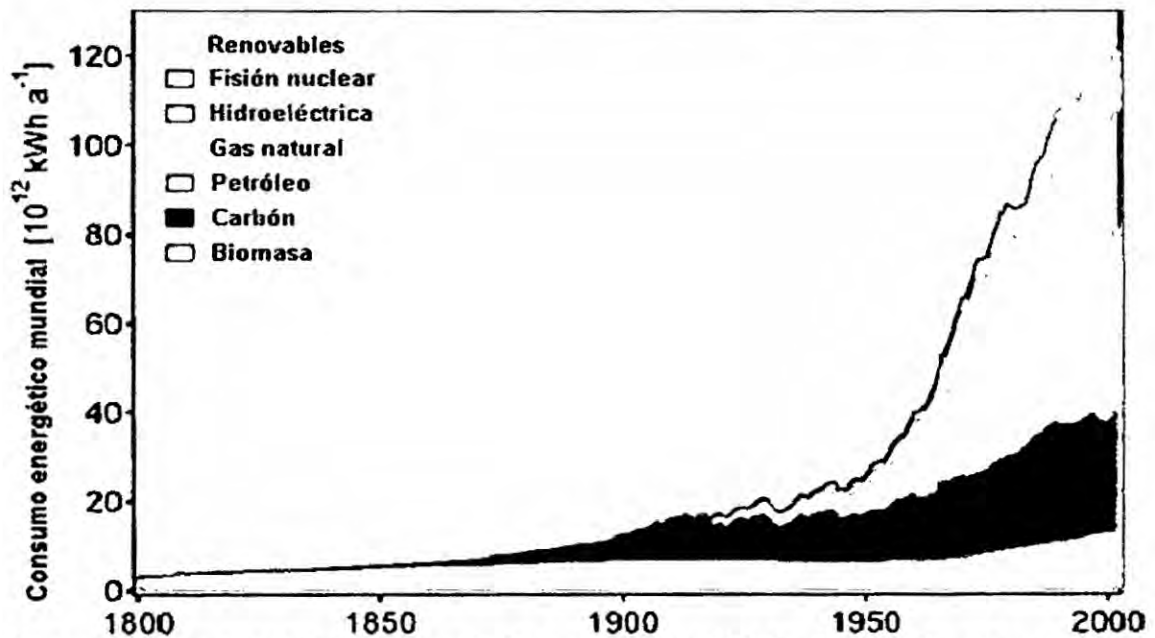


Figura 3: Incremento de la demanda de energía mundial desde 1800 hasta nuestros días.

Fuente: Tesis "Sistemas de generación eléctrica mediante calderas de vapor energizadas por radiación solar concentrada" de Muñoz Antón, Javier (España, 2008)

A pesar de estos problemas, no es hasta la década de los 70 del pasado siglo XX cuando, ante la elevada subida del precio del barril de petróleo por la guerra del Yom Kippur primero (1973) y por la revolución iraní después con la consiguiente guerra Irán-Irak (1979), algunas voces empiezan a interesarse por reducir la dependencia del oro negro. Años después, con el accidente de la central nuclear de Chernobil (1986), la industria del átomo quedó en una inevitable pausa, con lo que el panorama energético se debate entre el petróleo y la, socialmente mal afamada, energía nuclear. Actualmente, el aumento del consumo de petróleo en China e India ha vuelto a disparar el precio del crudo, y la opción nuclear vuelve a considerarse en gran número de países.

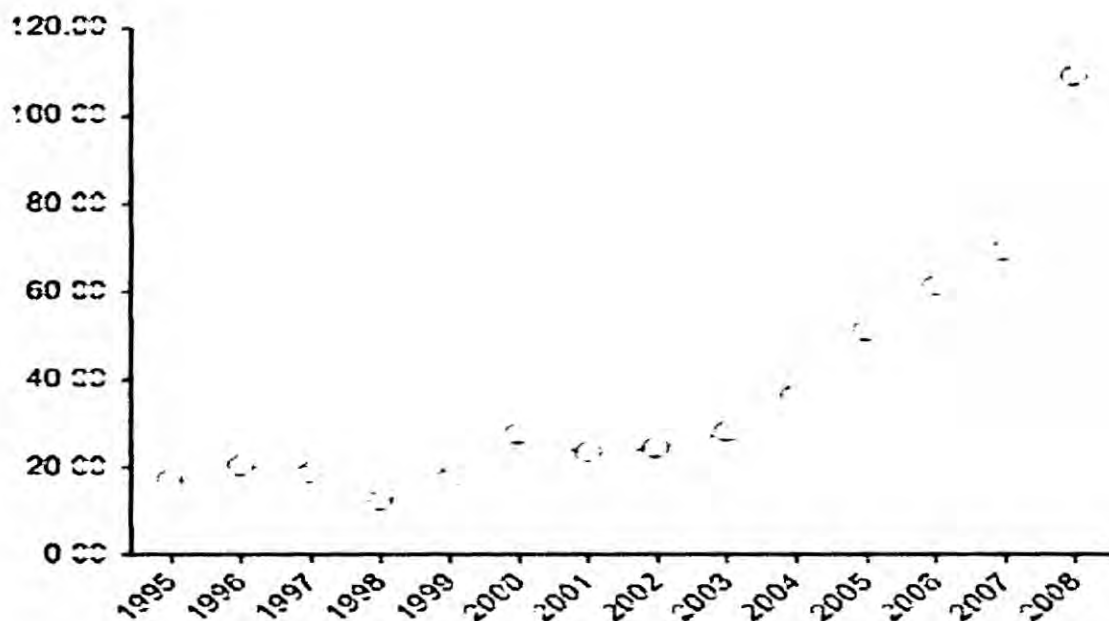


Figura 4: Evolución de precio anual medio del barril de petróleo en los últimos años.
Fuente: <http://www.opec.org>

De este modo, hacia la década de los 70 es cuando unos pocos se vuelven hacia el potencial de las energías renovables y se comienza la investigación de las posibles tecnologías de aprovechamiento de estas fuentes inagotables, que actualmente vienen adquiriendo impulsos muy importantes. Este impulso se debe, entre otras cosas, a la creciente conciencia medioambiental basada en la incertidumbre climática causada por la emisión masiva de gases de efecto invernadero, sin olvidar los compromisos de la comunidad internacional, principalmente de los países desarrollados, para frenar estos cambios tan bruscos que afectan a la habitabilidad del planeta, así como la dependencia energética de los países productores de combustibles fósiles.

El objetivo, por tanto, de la energía solar térmica para producción de energía eléctrica es actualmente encontrar ese camino que lleve a desarrollar al análogo solar del molino de tres palas.

Por la naturaleza del trabajo desarrollado, el diseño conceptual es un sistema novedoso de producción de energía solar termo-eléctrica, se buscará principalmente:

- Aproximación al diseño, desde un punto de vista macroscópico. Buscando el valor de los consumos más representativos aproximados para unas determinadas condiciones de funcionamiento, y como no, una estimación del rendimiento de la conversión energética de solar térmica a eléctrica mediante un modelo computacional.
- Determinación de la viabilidad tecnológica, mediante un análisis completo de los diferentes elementos que conforman la instalación, que concluya que elementos existen actualmente y cuales sería necesario desarrollar para esta aplicación concreta.
- Potencial comercial del concepto, atendiendo a posibles ubicaciones geográficas basadas en el estudio previo de las características óptimas necesarias para su funcionamiento y las limitaciones inherentes al diseño.
- Determinación de posibilidades de mejora y trabajos futuros. Como con cualquier central de potencia que se plantee con un ciclo Rankine de vapor de agua, surge la posibilidad, entre otras, de llevarlo a condiciones supercríticas como se está demostrando con la construcción de nuevas centrales térmicas o la posibilidad de usar otro tipo de fluidos.

No se debe olvidar que el marco de este estudio fue meramente un diseño conceptual que conllevó al desarrollo de un modelo de alcance limitado del sistema, lo que supu-

so ciertas limitaciones inherentes al planteamiento, pero que no afectaron al objetivo básico de la tesis, la explicación del planteamiento y desarrollo de una idea novedosa que mostró fue una propuesta encaminada a la búsqueda de la turbina de tres palas en el campo solar.

Tecnología solar

Existen múltiples sistemas de aprovechamiento de la energía solar, por lo que conviene realizar una clasificación. Lo primero que hay que distinguir es entre los sistemas solares que aprovechan el efecto fotoeléctrico, para generar directamente electricidad en los paneles fotovoltaicos, de los que aprovechan la energía térmica de la radiación solar para elevar la temperatura de algún fluido directa o indirectamente (a través de un sólido).

Atendiendo a los sistemas que funcionan transformando la radiación del sol en su modo térmico, se pueden distinguir dos: sistemas activos y pasivos.

Los sistemas solares pasivos se definen como el conjunto de técnicas dirigidas al aprovechamiento de la energía solar térmica de forma directa, sin transformarla en otro tipo de energía, para su utilización inmediata o para su almacenamiento sin la necesidad de sistemas mecánicos ni aporte externo de energía, aunque puede ser complementada por ellos, por ejemplo para su regulación. Este tipo de usos se da sobre todo en arquitectura, mediante orientaciones adecuadas de los edificios, conductos que por convección natural facilitan la refrigeración en verano, etc.

En los sistemas solares activos, por el contrario, para transformar la energía solar en calor útil se necesitan medios como equipamientos mecánicos o eléctricos, como

pueden ser bombas o ventiladores, que muevan los fluidos de trabajo. Es en esta rama de la clasificación de los sistemas solares donde se coloca el concepto de la tesis.

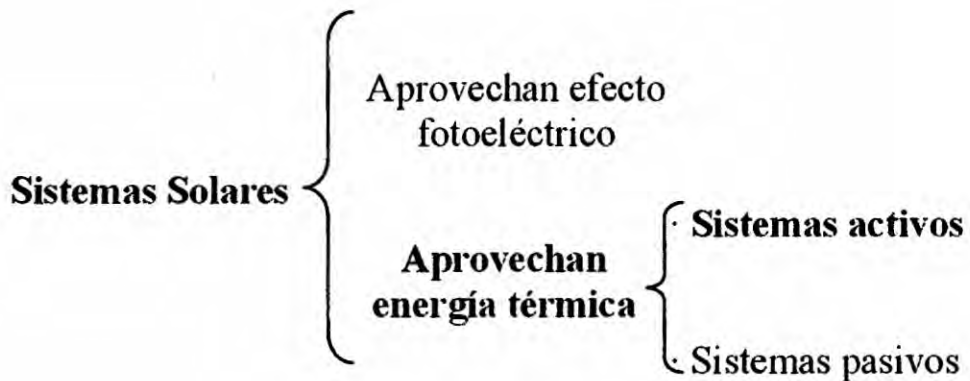


Figura 5: Sistemas solares

Fuente: Fuente: Tesis “Sistemas de generación eléctrica mediante calderas de vapor energizadas por radiación solar concentrada” de Muñoz Antón, Javier (España, 2008)

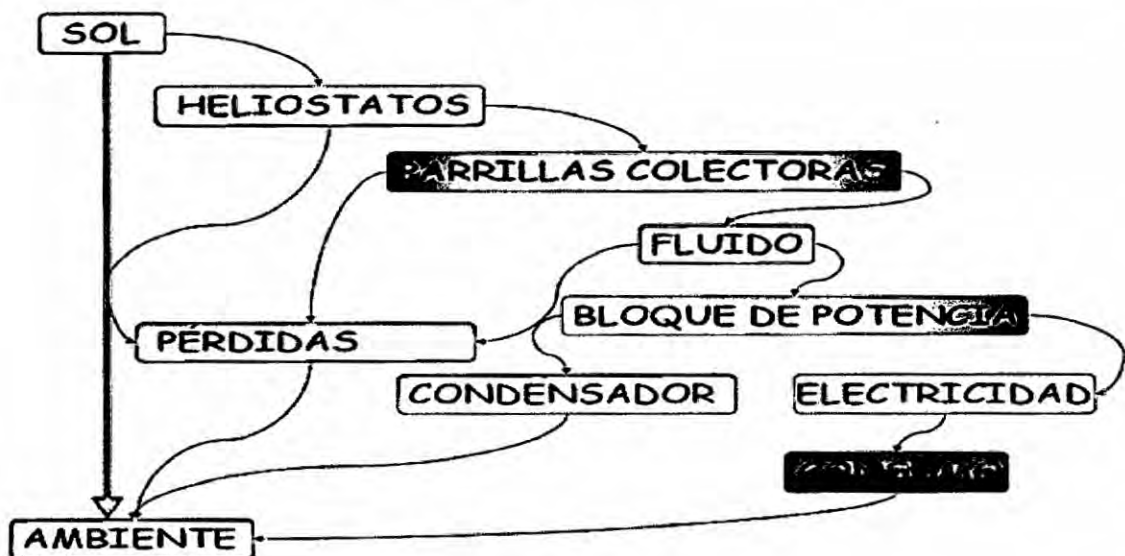


Figura 6: Ruta que sigue el flujo térmico a través del sistema Caldera Solar.

Fuente: Fuente: Tesis “Sistemas de generación eléctrica mediante calderas de vapor energizadas por radiación solar concentrada” de Muñoz Antón, Javier (España, 2008)

De la energía solar que alcanza los helióstatos, no toda es enviada a las parrillas colectoras debido a errores en el sistema de seguimiento y a que los espejos no son perfectos, siendo la principal imperfección que la reflectividad no es el 100%. La radiación que alcanza las parrillas eleva la temperatura de las mismas, de forma que por un lado existe un importante flujo térmico hacia el fluido calorífero que circula por su interior (flujo térmico que se busca favorecer con materiales de alta conductividad térmica) y por otro un flujo térmico menor que pasa al ambiente (flujo que se intenta inhibir mediante el adecuado aislamiento). El fluido una vez ha terminado su paso por las parrillas es conducido hasta el bloque de potencia, allí cede su energía en la turbina, y es donde se obtiene la energía mecánica que acciona el alternador produciendo la energía eléctrica buscada.

Puede deducirse fácilmente del esquema de la figura 4-4 que aunque el impacto ambiental que produce el sistema Caldera Solar es bajo, existe como consecuencia de las transformaciones y transferencias de energía de unos medios a otros y la inevitable entropía asociada a esos procesos. Por un lado, una fracción de la energía solar que pasa al sistema sufre un pequeño retardo antes de alcanzar el ambiente a través del condensador, aparte de que llegará al entorno de forma más concentrada, del mismo modo que las pérdidas térmicas en parrillas y demás elementos. A esta energía habría que añadir la que se pierde en las ineficiencias de los mecanismos de concentración y recepción (helióstatos y parrillas). Por otro, la fracción que se transforma en energía eléctrica se distribuye a lo largo de la red, pudiendo llegar a zonas alejadas de la ubi-

cación de la Caldera Solar, donde esta energía eléctrica se convierte de nuevo en energía térmica de un modo u otro.

POSIBILIDADES DE OPTIMIZACIÓN

Como para cualquier planta de producción eléctrica de potencia una pequeña mejora puede suponer un importante beneficio económico, la optimización del diseño se convierte en un paso esencial en el desarrollo de un proyecto de estas características.

Las condiciones de funcionamiento como la presión de saturación, la potencia de la instalación por el efecto del bloque de potencia, o las propiedades ópticas, son las variables que demostraban una importante influencia en el rendimiento global del sistema, según el análisis realizado en la Caldera Solar.

No se ha realizado una optimización completa del sistema, esto es, una optimización que atienda también a criterios técnico-económicos. Tampoco se ha evaluado explícitamente el coste de cada elemento, pues en esta etapa de estudios preliminares se considera oportuno centrar la línea de desarrollo en aspectos técnicos, con objeto dar respuesta al problema de ‘¿Qué rendimiento tiene?’, si bien, a lo largo de la disertación no se olvida en ningún momento la dimensión económica o el ‘¿Cuánto cuesta?’.

Por ello, en ciertos puntos de la explicación se ha hecho énfasis en que cierta variación de magnitudes definitorias de la configuración del sistema no incide, o apenas lo hace, en el rendimiento. Este es el caso por ejemplo de la relación de aspecto de las parrillas, la cual en el rendimiento prácticamente no influye pero si puede hacerlo forma importante en la dimensión económica de un proyecto de este tipo, en la que el

análisis de costes de construcción y fabricación entran en juego para la determinación del rendimiento técnico-económico final.

Por otro lado, cualquier proyecto novedoso se encuentra en ciertos aspectos técnicos cerca del límite del estado de la técnica, lo que sin duda influye en el coste de un posible prototipo. Debido a esto surge la necesidad de indicar qué componentes de los que conforman el sistema Caldera Solar existen en la actualidad (precio de mercado) y cuales existen pero se hace necesario cierto proceso de rediseño (precio indeterminado, pero elevado), como es el caso de los paneles colectores que conformarán la parrilla, para los que incluso en el camino de resolver su diseño ha surgido una patente que actualmente se encuentra en curso sobre colectores de captación estimulada mediante aletas interiores.

D^a. María del Carmen Rodríguez Hidalgo (2010 – España), en su tesis “Estudio En Régimen Transitorio De Plantas Solares Térmicas De Propósito Múltiple. Aplicación Al Diseño De Instalaciones Concebidas Para Agua Caliente Sanitaria”, menciona que Ante la necesidad de reducir el consumo de energía primaria en las instalaciones térmicas del sector terciario, se plantea la conveniencia de atender la demanda de agua caliente sanitaria con fuentes renovables. Los beneficios que se pueden obtener de esta medida son la reducción de la dependencia externa en términos de energía primaria fósil, además del correspondiente ahorro energético, económico y de impacto ambiental para el usuario final.

Ante la aprobación del Código Técnico de la Edificación en 2006, a partir de la cual resulta obligatorio el uso de instalaciones solares térmicas en los edificios residenciales de nueva construcción o en grandes remodelaciones de edificios antiguos, para el abastecimiento de una fracción de la demanda de agua caliente sanitaria, resulta conveniente el estudio en profundidad de este tipo de instalaciones bajo condiciones reales de funcionamiento.

En esta tesis se analiza el comportamiento de instalaciones de este tipo empleando herramientas teóricas y experimentales, para evaluar y predecir sus actuaciones en régimen transitorio. Utilizando los datos experimentales obtenidos de una instalación solar térmica ubicada en el Campus de la Universidad configurada para la aplicación de agua caliente sanitaria, entre otras.

A partir de la base de datos elaborada a partir de medidas experimentales de temperatura y caudal de los principales elementos del circuito y de las variables de una estación meteorológica tomadas en intervalos de tiempo de 10 minutos se han podido conseguir el principal objetivo planteado, consistente en la descripción detallada del comportamiento real de la instalación. Siendo de gran utilidad estos valores para validar experimentalmente los programas de simulación desarrollados, capaces de describir instantáneamente tanto las actuaciones de la instalación solar de agua caliente sanitaria completa, como de sus componentes principales. Se hace especial énfasis en la caracterización de los captadores solares en régimen transitorio bajo condiciones reales de operación.

Utilizando dicha herramienta se han estudiado diferentes configuraciones, lo que ha permitido predecir tanto las prestaciones energéticas como la viabilidad económica de dichas instalaciones.

Los resultados del estudio se aplican al diseño de instalaciones solares para ACS, en el marco del CTE. Del estudio se obtienen valores óptimos de superficie de captación y de volumen del acumulador térmico, para las condiciones climáticas de Madrid.

Ante el aumento del consumo energético de los países desarrollados y la necesidad de permitir el desarrollo de los países emergentes, se plantea la necesidad de fomentar el uso de tecnologías energéticas que permitan un desarrollo sostenible a nivel mundial⁹.

Una de las grandes preocupaciones en la actualidad es el cambio climático. De acuerdo a datos recientes parece que se está produciendo a nivel global, Cambio Climático 2007; motivo por el cual los países están potenciando el uso de tecnologías limpias que permitan reducir las emisiones de contaminantes y de efecto invernadero vertidos al planeta. De ahí la firma de los protocolos de Kioto, BOE No33 2005, Montreal y el próximo de Copenhague junto con propuestas generalizadas para promover el uso eficiente de la energía.

Dado que uno de los sectores que presenta un consumo energético elevado es el residencial, EUROSTAT 2008, muchas son las políticas que se han puesto en marcha a nivel mundial dedicadas a reducir ese consumo mediante programas de ahorro, tanto en términos de energía térmica como eléctrica. Estos programas orientan sus medidas a la concienciación para la utilización de electrodomésticos con una buena clasifica-

⁹= Libro Blanco de la Energía 1997.

ción energética, al uso de luminarias de bajo consumo y a la utilización de las energías renovables en la edificación, la utilización de la arquitectura bioclima.

En este marco se encuentra la Unión Europea. Los países europeos, en su mayoría no son grandes productores de recursos energéticos naturales, necesitando importarlos. Este hecho ha provocado que en Europa se hayan desarrollado las tecnologías más punteras en el ámbito de la utilización de las energías renovables, solar térmico, fotovoltaico, termo solar, eólica, independencia en materia de energía primaria. En España se aprobó el Plan de Energías Renovables como extensión del Plan de Fomento de Energías Renovables previamente aprobado en 1999.

El uso de estas tecnologías se ve respaldado tanto por el tejido industrial que se ha creado en su entorno, la investigación en esos campos diferentes políticas llevadas a cabo en los distintos países y que han permitido crear una conciencia social al respecto.

Sin embargo, en la actualidad en determinados sectores, como el residencial, siguen siendo las fuentes de energía fósiles las que se consumen en mayor medida, para la obtención de energía térmica, de forma tanto pasiva como activa, apoyada en el parque móvil.

Una de las tecnologías energéticas renovables más sencillas es la energía solar térmica utilizada en la aplicación de agua caliente sanitaria, desde el depósito de color negro expuesto al sol hasta el captador solar más sofisticado, su base consiste en calentar agua a través de su exposición a los rayos solares. Sin embargo la experiencia ha

demostrado que dicha sencillez se haya convertido en uno de los grandes inconvenientes para su desarrollo, DTIE8.03 Ruiz et al. 2007.

Resulta sorprendente que dada la cantidad de irradiancia que recibe el territorio español en su conjunto, el mayor de todos los países europeos, junto con Portugal, y las islas griegas, no sea uno de los países en los que la energía solar aparezca como una fuente de energía destacada en el mix energético del país.

Rodríguez Hidalgo se planteó sus principales objetivos para su trabajo los cuales aborda y son:

- Conocer y describir el comportamiento transitorio de una instalación solar térmica aplicada a la producción de agua caliente sanitaria en condiciones reales de funcionamiento, es decir, sometida a toda la variabilidad presente en este tipo de instalaciones. Dado lo importante que resulta la descripción instantánea de la instalación, se ha dedicado un gran esfuerzo en recopilar una base de datos lo suficientemente extensa y precisa que permitiese la posterior validación de los modelos desarrollados.
- Elaborar un modelo de cielo adecuado a las características geográficas de la localidad en la que se encuentra la instalación solar, teniendo en cuenta la complejidad presente a la hora de calcular la radiación sobre el plano inclinado en el que está situado el captador solar.
- Desarrollar y validar experimentalmente un modelo transitorio que describa las actuaciones del captador solar instantáneamente, basándose en la aplicación del balance de energía unidimensional, teniendo en cuenta tanto el almacenamiento como las pér-

didias de energía al exterior del conjunto de sus componentes. El estudio del captador en profundidad permitirá describir sus parámetros de actuación más importantes como el rendimiento, además de cuantificar la importancia de cada uno de los factores que inciden sobre su comportamiento. El modelo de instalación solar, así como los modelos de cielo y los datos medio ambientales empleados como entradas a los mismos corresponden a la ubicación de la instalación solar de la UC3M en Leganés (Madrid).

- Describir el intercambio de energía que se produce en el intercambiador de calor en régimen transitorio y con pérdidas de energía a través de su envolvente. Para ello se necesitara redefinir algunos parámetros típicos del análisis de intercambiadores de placas, como la temperatura media logarítmica y el calor intercambiado por los fluidos. Posteriormente se validara experimentalmente los resultados obtenidos
- Confeccionar un modelo que se ajuste al comportamiento del acumulador térmico estratificado con el que cuenta la instalación llevando a cabo para ello una descomposición en volúmenes finitos adecuado a sus dimensiones y características de funcionamiento. Dicho modelo se validara experimentalmente a lo largo del año.
- Ensamblar todos los modelos individuales de los componentes de la instalación solar en un único programa que permita el cálculo de la instalación solar completa. Tras su validación dicho programa permitirá su aplicación a la predicción del comportamiento de instalaciones solares bajo condiciones de trabajo diferentes.
- Aplicación de la herramienta de simulación generada a la optimización de los componentes de la instalación solar.

- Estudio energético, medioambiental y económico de las instalaciones solares térmicas de agua caliente sanitaria.

Así mismo planteó su Metodología llevada a cabo en la elaboración de esta tesis en los siguientes puntos:

- Revisión bibliográfica, resulta imprescindible conocer el estado del arte a la hora de estudiar un tema tan complejo como el tratado en esta tesis, por lo tanto se necesitó realizar una exhaustiva revisión bibliográfica que permitiese conocer la base experimental de los temas más importantes de la misma.
- Análisis experimental: Descripción de la instalación solar bajo estudio, dicha descripción se realiza y en ella se tienen en cuenta tanto los elementos que conforman la instalación solar como los que conforman la estación meteorológica, además de la instrumentación que permite conocer las medidas experimentales que posteriormente se utilizaran para validar los diferentes modelos. Hecho que obliga a realizar un análisis detallado del cálculo de errores en las medidas, al que se accede a través de un proceso de calibración.
- Modelado de instalaciones y análisis de instalaciones solares de agua caliente sanitaria, lo cual son el eje central de la tesis en el que se describe la elaboración y posterior validación experimental de los modelos desarrollados para la descripción en modo transitorio de cada uno de los componentes que conforman la instalación solar, desde la descomposición de la radiación solar hasta la obtención de agua caliente a la salida del acumulador térmico. Todos los modelos contemplan las pérdidas producidas al estar en contacto con el exterior y además el almacenamiento de energía en ca-

da uno de sus componentes. Una vez validados por separado se procederá al ensamblaje de todos en un único programa, al que también se le realizara una validación experimental.

- Aplicaciones, análisis de resultados y cálculo de actuaciones, el estudio a distintas aplicaciones, con diferentes perfiles de demanda y tamaños de acumulador, con lo que se pretende dar respuesta a la necesidad de optimizar el tamaño de la instalación solar de modo que resulte viable y ajustado tanto energética como económicamente. Se realiza un estudio medioambiental sobre el ciclo de vida de la energía solar térmica y la contaminación que produce.
- Se realiza el estudio de la viabilidad de las instalaciones solares en aplicaciones múltiples, resultando muy interesante el utilizar la instalación solar a lo largo de todo el año en diferentes aplicaciones, tanto para su mantenimiento como para su aprovechamiento energético. Dado que dichas aplicaciones múltiples están tanto contempladas por la normativa vigente en España como a nivel europeo IEA Task 40 2009, su puesta en funcionamiento en un futuro próximo parece lógica.
- Se recogen las conclusiones que se han extraído del presente trabajo, las aportaciones en el contenidas y desarrolladas, así como propuestas de trabajos futuros.

DESCRIPCION DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL

Además de la descripción de los componentes propios de la instalación solar, captadores solares, intercambiador, acumulador térmico, bombas y vasos de expansión, se describe la estación meteorológica donde se recogen de forma instantánea todas va-

riables ambientales necesarias para la realización del estudio. Una vez descrita la instalación se describe la instrumentación con la que se cuenta para medir los parámetros más significativos de funcionamiento de la misma. También se especifica la instrumentación adicional que se ha incorporado a la instalación, con el objetivo de validar los modelos que se desarrollan para estudiar algunos de sus componentes. Dichas medidas forman la base de datos experimentales que cubre un año completo de funcionamiento con la que posteriormente se validaran los modelos de la instalación.

Las instalaciones solares reales se ven sometidas a la gran variabilidad de las condiciones climáticas de la zona donde trabajan. Como ya se ha visto previamente, el elemento cuyo rendimiento está más comprometido, debido a dichas variaciones, es el captador solar, ya que su modo de funcionamiento obliga a que este a la intemperie todos los días del año y además imposibilita la utilización de aislamiento en gran parte de su superficie para contener las pérdidas térmicas. Por ello, según lo veo, en la tesis se ha pretendido hacer un estudio transitorio que permita describir los fenómenos de transferencia de calor existentes en una instalación solar a partir de las variables medioambientales típicas recogidas por una estación meteorológica situada en el mismo lugar donde está el campo de captadores.

Todos los datos experimentales procedentes tanto de la instalación solar como de la estación meteorológica se recogen en tres dataloggers, que envían los datos recopilados a un ordenador que tiene instalada una aplicación específica desarrollada en Labview y que permite tanto el almacenamiento de los datos en ficheros de fácil manejo como la visualización remota en tiempo real de los parámetros instantáneos de la ins-

talación a través de cualquier navegador de Internet y desde cualquier lugar de la Tierra, sus direcciones son:

- Estación meteorológica:
- Instalación ACS:

La base de datos experimentales, de la que dispone el grupo de investigación, está compuesta por datos pertenecientes a varios años, tomados cada 2 s, ofreciéndose y almacenándose un promedio cada 10 minutos, en los que se ha estado trabajando con distintas configuraciones de aprovechamiento de la energía solar térmica.

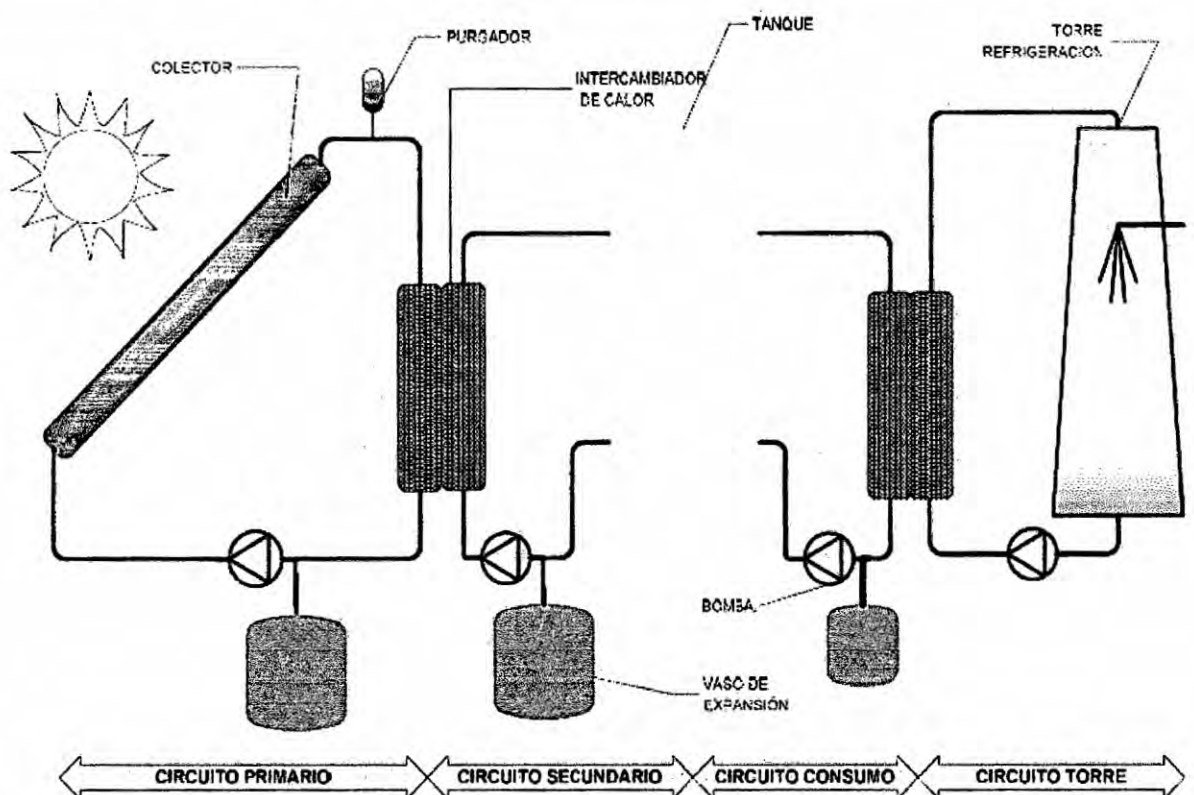


Figura 7: Esquema general de la instalación.

Fuente: D^a. María del Carmen Rodríguez Hidalgo (2010 – España), en su tesis “Estudio En Régimen Transitorio De Plantas Solares Térmicas De Propósito Múltiple

Coste de la instalación

La sostenibilidad a base de la utilización de energías renovables es un concepto obvio, pero la realidad muestra que la inversión inicial es alta, por lo que el periodo de amortización es muy largo, dado el alto coste de los componentes principales de la instalación. En una investigación anterior, se indica que resulta superior a la vida útil de algunos de los componentes, utilizando los precios actuales y sin considerar ayudas a la inversión inicial en el equipamiento para energía renovable. Esto indica la necesidad del desarrollo de una economía de escala en la fabricación, venta y distribución que haga competitiva esta tecnología frente a los combustibles fósiles.

Existe un efecto favorable para este tipo de tecnologías, dado que el precio del combustible fósil se incrementara probablemente en el futuro y adicionalmente existen incentivos y ayudas gubernamentales para reducir los costes de las energías renovables. Aunque no se contempla el ahorro de emisiones en los sectores difusos en el Protocolo de Kioto, se puede emplear para estimar económicamente el ahorro involucrado a partir del precio actual del derecho de emisión por Tm de CO₂, que según es de 13,5 €/Tm

Impacto medioambiental

Durante el verano de 2004 el consumo total de gas natural para abastecer la demanda restante se estima en 0,22 kg/kWh de CO₂ según IDAE 2005 (6), ocasionando una emisión total de 400 kg de CO₂.

Según el Balance de Energía Nacional en España, se emiten 0,52 kg de CO₂ por cada kWh de electricidad producido en el sistema eléctrico en un año representativo. Esto supone que la emisión total de CO₂ para proveer de climatización la vivienda estudiada con este tipo de tecnologías sería de 632 kg de CO₂. Resultando que el ahorro logrado por el uso de la absorción solar es del 62% en el consumo de gas natural y el 36% en emisiones de CO₂.

Finalmente Rodríguez Hidalgo llegó a las siguientes Aplicaciones y Conclusiones:

APLICACIONES DEL AUTOR:

En el pasado siglo, la comunidad científica destinó muchos esfuerzos para avanzar en la sostenibilidad en las viviendas en dos direcciones principales: reduciendo el aporte de energía externa y utilizando energías renovables para el resto. En ambos sentidos, la aplicación de energía solar goza de popularidad, dado que incrementa la independencia energética y la sostenibilidad, al mismo tiempo que ofrece un impacto ambiental casi nulo.

Las aplicaciones posibles de las instalaciones solares térmicas a los edificios de viviendas son la producción de agua caliente sanitaria, la calefacción, la climatización y la cocina solar. Dado que la mayor radiación solar se obtiene en verano, son muchos los trabajos que apuntan al uso de la tecnología solar conjuntamente con las máquinas

de absorción como sustituta parcial o total de las instalaciones de climatización por compresión mecánica, IEA Task 38, 2009. La utilización de climatización en las viviendas se está extendiendo en España, ya que las temperaturas ambiente durante el verano son superiores a los 35°C, causando un aumento en el consumo de electricidad y un impacto ambiental asociado a las pérdidas de refrigerantes en máquinas frigoríficas de compresión mecánica de vapor. Se ha realizado una investigación experimental en climatización solar por absorción en la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) para evaluar dicha alternativa con menor impacto ambiental. La instalación está basada en un campo de 50 m² de captadores solares planos alimentando una máquina de absorción de simple efecto de BrLi/H₂O a través de un acumulador térmico de agua caliente. Los parámetros experimentales de operación se han recopilado a lo largo de la temporada de verano de 2004, en intervalos de 10 minutos, permitiendo tener todos los datos relevantes. Los resultados muestran que la máquina de absorción produce una potencia de climatización de 6-10 kW, con una potencia de entrada en el generador de 10-15 kW, logrando un periodo medio de climatización de 6,5 horas, trabajando de forma autónoma con energía solar. Se calcula la demanda y la carga térmica de una vivienda unifamiliar con una superficie total de 90 m² para evaluar la aplicabilidad de dicha tecnología. El máximo de demanda está en torno a los 6-8 kW. La fracción solar de climatización que produce la instalación solar es del 56%. Este trabajo muestra resultados de rendimiento del sistema, la inversión económica necesaria, los ahorros de energía y económicos, además de un estudio de la reducción del impacto ambiental comparando dicha tecnología con las máquinas convencionales de

compresión mecánica. Se realiza también un estudio de sensibilidad al tamaño del campo de captadores, para obtener un porcentaje razonable de la demanda de climatización. Los resultados indican que el dimensionado de la instalación bajo estudio es adecuado para atender un porcentaje significativo de la demanda de climatización de una vivienda unifamiliar.

Una de las grandes ventajas que posee la absorción reside en que no utiliza refrigerantes beligerantes con el medio ambiente; sin embargo, frente a los sistemas convencionales presentan un COP bajo. Por ello, si se realiza un estudio energético y económico en profundidad se pone en evidencia que en determinadas condiciones de trabajo no se produce el esperado ahorro de energía y coste, necesitando un mayor aporte de energía renovable para ser competitiva. Por otro lado, si la instalación solar únicamente se plantea para producir climatización resulta difícil que el periodo de amortización sea menor que la vida útil de algunos de los componentes que la integran.

Esto ha dado lugar al estudio de sistemas solares multipropósito que son capaces de dar respuesta a una parte de las demandas térmicas de los edificios, como la calefacción, la climatización y el agua caliente sanitaria; trabajando de forma continuada y reduciendo así los periodos de amortización.

Siguiendo esa línea de trabajo otros investigadores han evolucionado hacia prototipos de edificios, denominados edificios autosuficientes y/o con una demanda de energía reducida, en los que conjuntamente con la aplicación de la arquitectura bioclimática, se produce mediante la combinación de las distintas energías renovables toda la energía demandada, siendo la principal la energía solar.

Toda esta investigación se inspira en políticas llevadas a cabo por los diferentes países que apoyan el desarrollo de la energía solar. Una de las ventajas de estas tecnologías es que la carga de climatización se produce casi simultáneamente con la disponibilidad de la radiación solar, por lo que el almacenamiento de energía no necesita ser muy grande. Y además, supone una solución al sobrecalentamiento de los captadores solares térmicos durante la estación de verano, cuando ni la calefacción ni la demanda de agua caliente sanitaria son elevadas, muy al contrario, la demanda de calefacción es cero y la de ACS se reduce un 14%, según DTIE 1.01 Viti 1996, respecto de la media anual.

Actualmente, los estudios de las tecnologías existentes están liderados por la absorción, en un 78% de los proyectos revisados, (75% utilizando BrLi/H₂O y un 25% utilizando NH₃/H₂O). Se utilizan en combinación con captadores solares térmicos planos, en un 63% de los casos estudiados, con una temperatura del agua de proceso por debajo de los 97°C, Balaras et al. 2004.

CONCLUSIONES DEL AUTOR:

- La instalación solar estudiada resulta ser representativa de las instalaciones de agua caliente sanitaria de calentamiento indirecto, con la salvedad de la temperatura de entrada al acumulador térmico que como se ha comprobado es un tanto más elevada.

- Se ha instrumentado de tal forma que se conocen las temperaturas y caudales de todos los componentes de la instalación, además de las variables necesarias para su funcionamiento y posterior análisis.
- Tal y como se ha visto en la mayoría de las bases de datos existentes utilizan datos meteorológicos tomados cada hora o interpolados de los obtenidos a partir de datos diarios a través de complicados ajustes, este hecho impide que el estudio se realice en modo transitorio aunque por temas de convergencia del proceso de simulación se utilicen intervalos de tiempo menores.
- En el caso de la instalación solar estudiada se poseen datos reales experimentales de funcionamiento de la propia instalación y de las variables meteorológicas asociadas a su funcionamiento con un intervalo de tiempo de 10 minutos, esta medida proviene del promediado del periodo de muestreo de medidas tomadas cada 2 segundos, lo cual permite una comparación con valores instantáneos con los datos provenientes de la simulación, mejorando el ajuste. Se ha obtenido una base de datos anual con 52.704 datos para cada variable medida de la instalación y de la estación meteorológica, con la que calcularan las actuaciones de la instalación en modo transitorio.
- Los parámetros más difíciles de medir son varios, por un lado respecto a la estación meteorológica la velocidad y dirección del viento, ya que el aparato de medida únicamente da el valor en una componente. Respecto a la propia instalación las medidas de las temperaturas en los elementos que conforman el propio captador ha

necesitado la asunción de que las temperaturas son uniformes en las tres superficies: cristal, placa y caja, dado que se ha procurado modificar lo menos posible el comportamiento del captador. Otra dificultad que se ha encontrado a lo largo de la campana de medida, ha sido conocer el estado del aislante de las tuberías que comunican los captadores con el intercambiador de calor, dado que la gran distancia que separa los componentes impide el reconocimiento ocular de las mismas y en la parte que si se puede revisar se ha encontrado que parte del aislamiento se ha desprendido en una zona inaccesible.

- Se ha necesitado instrumentar bien el patinillo para conocer el origen de los intercambios de calor puesto que además de discurrir las tuberías de esta instalación también discurren las chimeneas pertenecientes al equipo de calderas del edificio de la Universidad, lo cual provoca que en determinadas épocas del año se produzca un calentamiento de la zona superior del patinillo y por lo tanto la aparición de un flujo convectivo. Por ello se ha instrumentado también las temperaturas del patinillo en su parte superior e inferior.
- Con respecto al acumulador térmico, dadas las grandes dimensiones del mismo tanto su altura como su diámetro, conocer la distribución de temperaturas en su interior también ha resultado complicado, gracias a las dos sondas introducidas se ha podido describir su actuación de modo más preciso.
- La instrumentación utilizada para la descripción del comportamiento de la instalación ha sido calibrada y analizado el cálculo de errores de medida.

SOBRE LAS POLÍTICAS ESPECÍFICAS:

- Se ha podido comprobar que la mayoría de los países en la actualidad están desarrollando políticas que favorezcan la instalación de energías renovables para cubrir la demanda energética de las viviendas.
- Algunos estudios plantean la imposibilidad de utilizar únicamente la cubierta de los edificios para instalar los captadores solares dado que se trata de edificios altos que en poca superficie albergan un gran número de viviendas, para ello se han hecho simulaciones que ponen de manifiesto que se podrían utilizar también las fachadas con mejor orientación para el aprovechamiento de la energía solar.
- Otros estudios ponen de manifiesto la necesidad de normativas de ensayos que permita conocer la calidad de los productos que se están instalando.
- Para una mayor difusión de esta tecnología algunos apuntan a la necesidad de la obligatoriedad de su instalación, regida por un reglamento a nivel nacional, otros abogan por la concesión de subvenciones a los usuarios para paliar en parte el alto coste de su instalación.

Sin embargo, todos comentan la necesidad de una política de seguimiento de las instalaciones una vez puestas en marcha, para conocer el verdadero ahorro de energía.

Rodrigo Andrés Soto Avello (2012 - Chile), En su tesis titulada “Aumento De Eficiencia De Centrales Termoeléctricas Y Nucleares Usando Energía Océano Térmica”, afirma que Las plantas termoeléctricas y nucleares requieren remover el calor residual

de la central, utilizando un flujo refrigerante y un sumidero del calor. En las plantas costeras resulta más económica la descarga del calor al océano, con un aumento de temperatura del agua de mar que provoca cierta contaminación térmica en el ecosistema local.

En este estudio se diseñó una planta híbrida anexa a una central térmica (fósil o nuclear), para generar energía eléctrica adicional, sin aumentar emisiones, y para desalinizar agua de mar, basada en el principio de Conversión de Energía Océano Térmica. Esta usa un ciclo Rankine de amoníaco, cuya fuente de calor es la descarga de agua de enfriamiento de la central y cuyo sumidero de refrigeración es un flujo de agua fría captado desde las profundidades del mar. Esta planta híbrida sería capaz de mitigar el impacto térmico de la descarga en el océano.

La aplicación del sistema a nivel nacional resulta particularmente atractiva. Más del 60% de la matriz eléctrica chilena se basa en combustibles fósiles. Se espera que esta capacidad térmica continúe aumentando, siendo conveniente introducir tecnologías tanto para mejorar la operación de las centrales como para reducir sus impactos ambientales globales y locales.

Como caso de estudio, se simuló la incorporación del sistema OTEC a la Central Punta Alcalde, proyecto de 740 MW a carbón en la región de Atacama. El diseño óptimo contempla una captura de agua fría a 600 m de profundidad, generando entre 25 MW (agosto) y 37 MW (febrero) de potencia eléctrica adicional, incrementando la eficiencia de la central y reduciendo las emisiones de CO₂. El flujo de agua desalinizada varía mes a mes, sumando 5.8 millones de toneladas al año.

A nivel mundial, la participación de los combustibles fósiles en la energía primaria alcanza un 81%. En la generación eléctrica la dependencia es igualmente alta: 41% de la matriz es carbón, 21% gas natural y 5% petróleo. (IEA, 2011) El mayor problema de la dependencia fósil es el impacto ambiental en los procesos de transformación a otras formas de energía, siendo el más relevante la emisión de CO₂, un producto de la reacción de combustión. Este es un gas de efecto invernadero (GEI), responsable de un cambio climático en curso. Las proyecciones indican que de continuar la actual trayectoria de emisiones, se podría alcanzar una concentración entre 500 hasta más de 1000 ppm hacia fines de siglo, lo que se traduciría en un aumento de temperatura global de 3 a 6 °C ¹⁰.

Los estudios del IPCC aseguran que un aumento del promedio de la temperatura global mayor a 2 °C introduciría riesgos considerables para la sociedad y los ecosistemas. También confirman que un aumento de 1.4 °C respecto a la era preindustrial es inevitable. El informe de Copenhague (2009) establece como meta no superar una concentración de CO₂ de 450 ppm, que incluyendo el efecto inverso de los aerosoles limitaría el aumento de temperatura a 2 °C. Para ello se necesita una reducción inmediata y dramática de las emisiones de GEI.

Los productos de combustión incompleta también generan un daño ambiental. Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y material particulado (MP) son consideradas fuentes de contaminación atmosférica, y a diferencia del CO₂, su impacto es a nivel local. Las plantas termoeléctricas a carbón son las que

¹⁰= IPCC, 2007

producen los mayores impactos.

La energía nucleoelectrica aparece como una alternativa para sustituir parte de la generacion fosil, sin emisiones gaseosas locales ni de efecto invernadero.

Actualmente la energia nuclear alcanza un 13% de la generacion electrica mundial, con 436 reactores operando y otros 60 en camino, la mayoría del tipo LWR (reactor de agua liviana).

Un impacto ambiental con menor atención esta igualmente presente en plantas termoelectricas (carbón y diesel) y en plantas nucleares. Las centrales termicas requieren de un medio de refrigeración para la etapa de condensación, donde se libera el calor de desecho. Para este propósito se puede usar aire, mediante la instalacion de torres de enfriamiento, o agua de mar. En este último caso las plantas se ubican en la costa, usando un flujo de agua de 2 a 3 m³ por minuto por MW. El flujo absorbe el calor residual de la planta (casi dos tercios del calor liberado en la combustión o en la fisión nuclear), incrementando su temperatura en unos 10 °C, según el marco regulatorio. El retorno del agua al mar a una mayor temperatura que la natural, aun cuando no existan alteraciones en la composición, constituye un impacto ambiental adverso para el ecosistema local, conocido como contaminación termica. Esta se entiende como un cambio perjudicial (incremento o disminucion) en la temperatura de un cuerpo de agua como resultado de actividades humanas. Los impactos en el medio acuático dependen naturalmente del volumen de la descarga, del cambio de temperatura provocado y del medio biótico expuesto.

Las condiciones básicas para la supervivencia de organismos marinos son la temperatura y el oxígeno. Existe una relación entre ambos parámetros: los incrementos en flujos de calor horizontal y vertical producen una disminución del oxígeno disuelto. Pequeños cambios en la temperatura del agua (1 o 2 °C) son considerados impactos ambientales¹¹. Según Langford (1990) este aumento altera los sistemas biológicos, físicos (ej. salinidad) y químicos de los cuerpos de agua, factores promotores de cambios fisiológicos en los organismos marinos, dado que algunos organismos son sensibles a los gradientes de temperatura. Esto se agrava cuando los cambios son bruscos y el resultado puede ser la desaparición de ciertos organismos sensibles, posiblemente alterando la estabilidad ecológica del ecosistema cuando la temperatura sobrepasa un límite específico. Los impactos pueden ser mayores en las aguas costeras, dado que estas son el hogar de una gran cantidad de microorganismos que llevan a cabo numerosas funciones ecológicas. Muchos de ellos son fundamentales desde el punto de vista de los ciclos de nutrientes¹²

Se han llevado a cabo algunos estudios experimentales en zonas tropicales y subtropicales afectadas por efluentes térmicos descargados por plantas de energía.

Varios de ellos se han centrado en los cambios en el fitoplancton, que se encuentra en la base de la cadena alimentaria de los ecosistemas acuáticos, realizando la parte más importante de la producción primaria. La carga térmica perturba la población de microalgas, alterando la composición de comunidades de fitoplancton y la tasa de foto

11= KEPCL reporte, 1994

12= Saravanan et al., 2008.

Síntesis¹³. Poornima et al. Estudiaron estos impactos en el fitoplancton afectado en los sistemas de enfriamiento en las costas cercanas a Madras Atomic Power Station en Kalpakkam, India. El estudio reveló una reducción en la biomasa y una caída en la productividad primaria bruta respecto del estado intacto. Chuang et al. (2009) estudiaron los efectos de las descargas en el perifiton (habitual productor primario en ecosistemas costeros) en las costas subtropicales de Taiwán, encontrando que su productividad se ve también afectada por el aumento en la temperatura del mar. El estudio de laboratorio de Jiang et al. (2009) determinó los límites de temperatura letales y los potenciales impactos de las descargas en especies de copepodos¹ en costas subtropicales. Los resultados mostraron que el aumento de temperatura del mar producto de las descargas induce un aumento de mortalidad de copépodos, una reducción en la diversidad y una mayor tolerancia de estas especies a los impactos térmicos en comparación con otras presentes en medioambientes marinos estables. Este estudio mostró diferencias significativas en la composición, riqueza y diversidad de las comunidades de peces en las zonas impactadas respecto de las zonas no impactadas. Por último, el aumento de temperatura causado por el calentamiento global podría agravar los impactos de la contaminación térmica en el plancton en sistemas de enfriamiento, sobrepasando la capacidad de tolerancia de muchas especies.

Energía eléctrica en Chile

La matriz eléctrica chilena está conformada por cuatro sistemas de generación, estos son: el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), el Sistema Interconectado Central (SIC).

13. (Morgan y Stross, 1969; Hamilton et al., 1970; Sellner et al., 1984)

El Sistema Eléctrico de Aysen (SA) y el Sistema Eléctrico de Magallanes (SM). Los dos primeros son sin duda los más importantes, juntos constituyen el 99% de la capacidad instalada del país.

Nuevas tecnologías

Ante el escenario expuesto, es un desafío y una necesidad introducir tecnologías que contribuyan tanto a mejorar el uso de las plantas térmicas como a la reducción de los impactos ambientales asociados a su operación. Existen, de hecho, tecnologías que permiten que las centrales sean cada vez más eficientes y emitan menos gases contaminantes. Para lo primero, es posible trabajar con vapor a mayor temperatura y presión, utilizando aleaciones de mayor resistencia mecánica y química. Por otro lado, una nueva tecnología conocida como ciclo combinado con regasificación integrada (IGCC) opera gasificando el carbón. Esto posibilita mayor eficiencia y a la vez reduce los residuos sólidos y las emisiones gaseosas, con una posible simplificación de la captura de CO₂. Para conseguir menos emisiones contaminantes existen hoy las llamadas tecnologías de limpieza de los gases de combustión. Entre ellas se cuentan la desulfurización de gases (para SO_x), los quemadores de bajo NO_x, las técnicas de requemado y los métodos de reducción catalítica selectiva de NO_x, un proceso post combustión. Para reducir el MP existen los filtros de partículas, los filtros de mangas y los precipitadores electrostáticos.

El caso del CO₂ es diferente. Existen tecnologías de captura y secuestro de carbono (CSC) que podrían captar gran parte del dióxido de carbono posterior a la combustión, transportarlo mediante gasoductos o buques, y almacenarlo en depósitos geoló-

gicos, en el océano (a profundidades suficientes para su contención) o en carbonatos minerales, aprovechando la reacción del CO₂ con óxidos metálicos. Estas tecnologías aun se encuentran en etapa piloto y de investigación o demostración, pero se espera su introducción a gran escala en las próximas décadas.

Respecto de los descargas del calor de desecho, los impactos pueden reducirse utilizando torres de enfriamiento en vez de refrigeración por agua. Esto, sin embargo, requiere mayores costos de inversión, que se traducen en un mayor costo de la electricidad. En el caso de la refrigeración por agua, a su vez, una reducción directa de los impactos térmicos se conseguiría disminuyendo el flujo de refrigeración o bajando su temperatura. Dado que la energía residual que cada central debe disipar es fija, una eventual reducción del flujo implica un aumento de temperatura, y viceversa. Sin embargo, un uso adicional (con fines térmicos) del calor de desecho bajaría la temperatura final. Esto se podría conseguir aplicando tecnologías de cogeneración.

Dichas tecnologías son aplicables a industrias que se sustentan en procesos de calor (conocido como calor de proceso), tales como la química, de pulpa y papel, minería, producción y refinación de petróleo, fabricación de acero, procesamiento de alimentos y textil. Estas industrias también consumen una gran cantidad de energía eléctrica. Desde el punto de vista de la ingeniería es más económico utilizar un mismo potencial de trabajo para ambos efectos. El resultado es una central de cogeneración que produce electricidad mientras cubre ciertos requerimientos de calor de procesos industriales. En general, la cogeneración es “la producción de más de una forma útil de energía (como calor de proceso y energía eléctrica) a partir de la misma fuente de

energía”. En condiciones ideales ninguna cantidad de calor se libera en esta central como calor de desecho.

CONVERSION DE ENERGIA OCEANO TERMICA

Rodrigo Soto plantea la Conversión de Energía Térmica del Océano (OTEC) es una tecnología para generar energía eléctrica usando como fuente de calor la energía térmica almacenada en el mar. Para ello se utiliza un ciclo Rankine de vapor que aprovecha la diferencia de temperatura entre la superficie y las profundidades del océano. Existen dos tipos básicos de diseños OTEC: las plantas de ciclo cerrado utilizan la evaporación de un fluido de trabajo para impulsar el sistema turbina-generator, y las plantas de ciclo abierto usan agua de mar para impulsar la turbina.

Ambos sistemas se explican a continuación. Otro diseño, conocido como planta híbrida, consiste en una combinación de los anteriores.

1.- Ciclo cerrado

El ciclo cerrado, mostrado en la Figura, utiliza un fluido de trabajo, tal como amoníaco o freón (Bai et al., 2002) en un ciclo Rankine de baja temperatura.

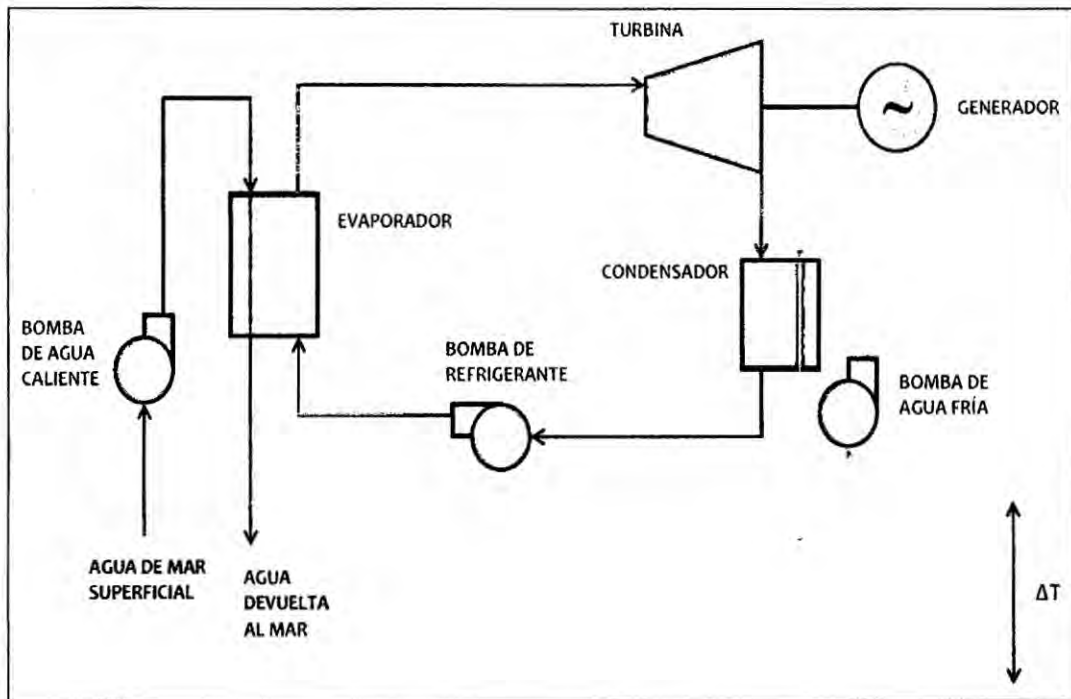


Figura 8: Ciclo Rankine de baja temperatura, ciclo cerrado.

Fuente: Rodrigo Andrés Soto Avello (2012 - Chile), En su tesis titulada "Aumento De Eficiencia De Centrales Termoeléctricas Y Nucleares Usando Energía Océano Térmica"

Un flujo de agua de mar superficial atraviesa el evaporador del ciclo, entregando energía suficiente al fluido refrigerante para que este se evapore. Todo el flujo de agua de mar superficial es devuelto al océano a una temperatura menor a la de captación. El fluido refrigerante en forma de vapor impulsa el sistema turbina generador para generar electricidad. Al salir de la turbina, el fluido es enfriado y condensado en un condensador, luego pasa por una bomba que recupera la presión y el ciclo se repite. Un flujo de agua de mar captado desde una profundidad suficiente (usualmente no más de 1000 metros) actúa como sumidero de refrigeración para el condensador. Este

flujo frío incrementa su temperatura y es devuelto al mar a nivel superficial o a una profundidad intermedia.

2.- Ciclo abierto

En el ciclo abierto el fluido de trabajo es vapor de agua, que puede ser vertido después de su uso. El flujo de agua de mar superficial es bombeado a una cámara en la cual la presión se reduce mediante una bomba de vacío hasta un valor suficientemente bajo para causar evaporación.

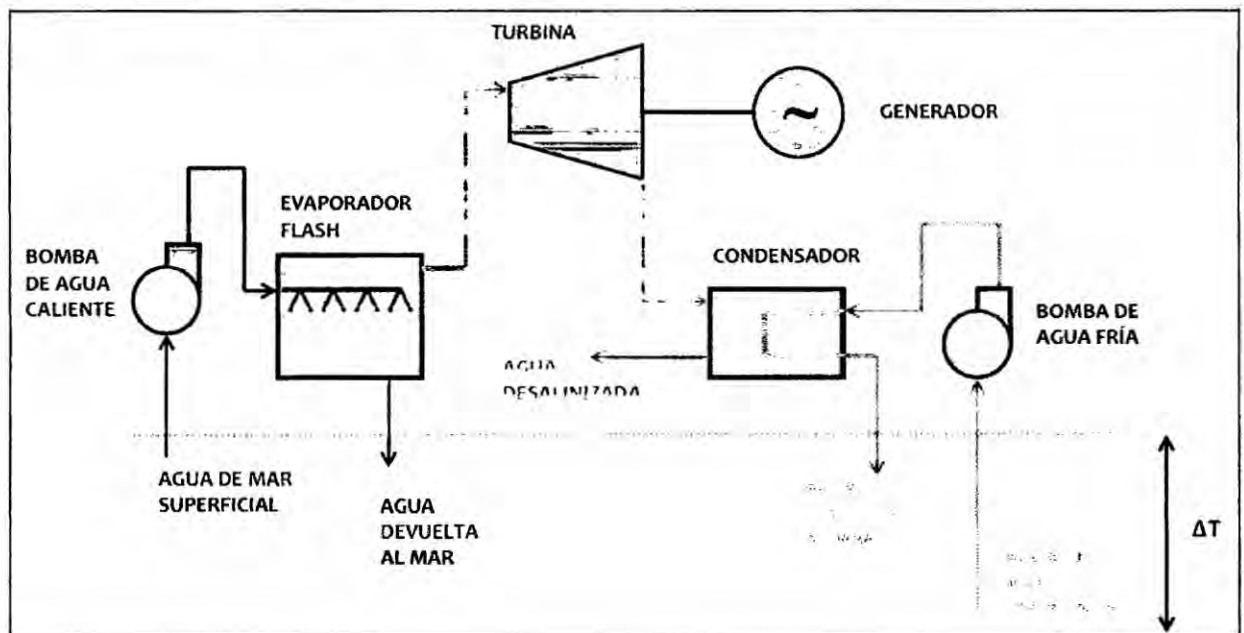


Figura 9: Ciclo Rankine de baja temperatura, ciclo abierto.

Fuente: Rodrigo Andrés Soto Avello (2012 - Chile), En su tesis titulada "Aumento De Eficiencia De Centrales Termoeléctricas Y Nucleares Usando Energía Océano Térmica"

El vapor a baja presión, después de pasar por la turbina, puede en principio ser descargado directamente en el océano. Pero en vez de ello, es posible también conducir el vapor a un condensador enfriado por un flujo de agua de mar, como en el sistema

mostrado en la Figura. En este caso el vapor condensado puede constituir una fuente de agua desalinizada.

Otros Ciclos

En 1985 A. Kalina propuso un nuevo ciclo, el que se conoce como ciclo Kalina (Figura 10), y que utiliza como fluido de trabajo una mezcla de agua y amoníaco. Requiere la incorporación de un separador y de un regenerador. Este ciclo es útil en un amplio rango de aplicaciones para sistemas de energía de bajas temperaturas. Para sistemas OTEC este incrementa la eficiencia térmica teórica, sin embargo al usar un fluido binario se reduce el desempeño del evaporador y del condensador respecto el ciclo Rankine, además de ser más complejo en su arreglo.

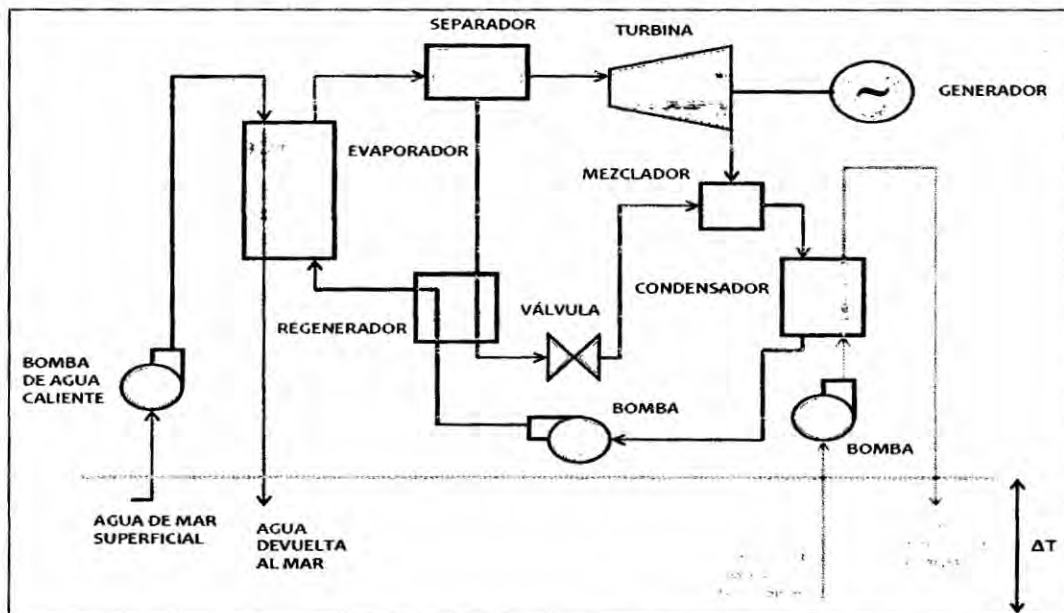


Figura 10: Ciclo Kalina.

Fuente: Rodrigo Andrés Soto Avello (2012 - Chile), En su tesis titulada "Aumento De Eficiencia De Centrales Termoeléctricas Y Nucleares Usando Energía Océano Térmica"

Un ciclo más avanzado y complejo, mostrado en la Figura 11, fue inventado en 1994 por H. Uehara. Se conoce como ciclo Uehara y también asegura eficiencias teóricas mayores a las del ciclo Rankine, utilizando una mezcla de agua y amoníaco como fluido de trabajo, y extrayendo parte del vapor de la turbina para reducir la carga del condensador.

Yamada et al. (2006) propuso un sistema OTEC que utiliza no solo la energía térmica del océano como fuente de calor, sino también la energía solar térmica, a través de la incorporación de colectores solares, en un ciclo llamado SOTEC (Figura 12). La eficiencia térmica podría ser 1.5 veces mayor que la del ciclo OTEC cerrado (según simulaciones para las condiciones de Japón), pero sujeta a variaciones climáticas.

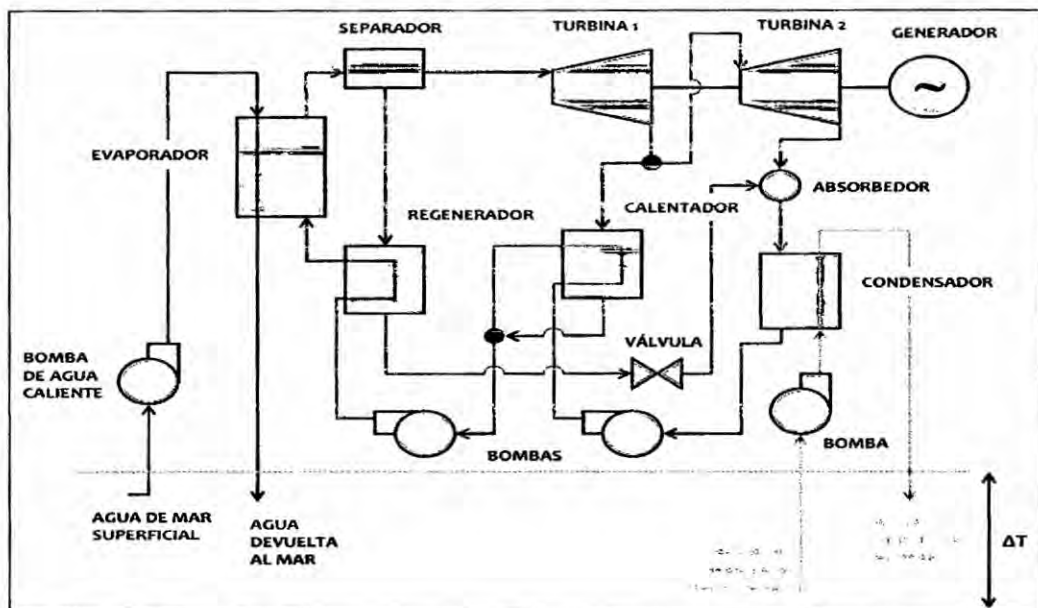


Figura 11: Ciclo Uehara.

Fuente: Rodrigo Andrés Soto Avello (2012 - Chile), En su tesis titulada “Aumento De Eficiencia De Centrales Termoeléctricas Y Nucleares Usando Energía Océano Térmica”

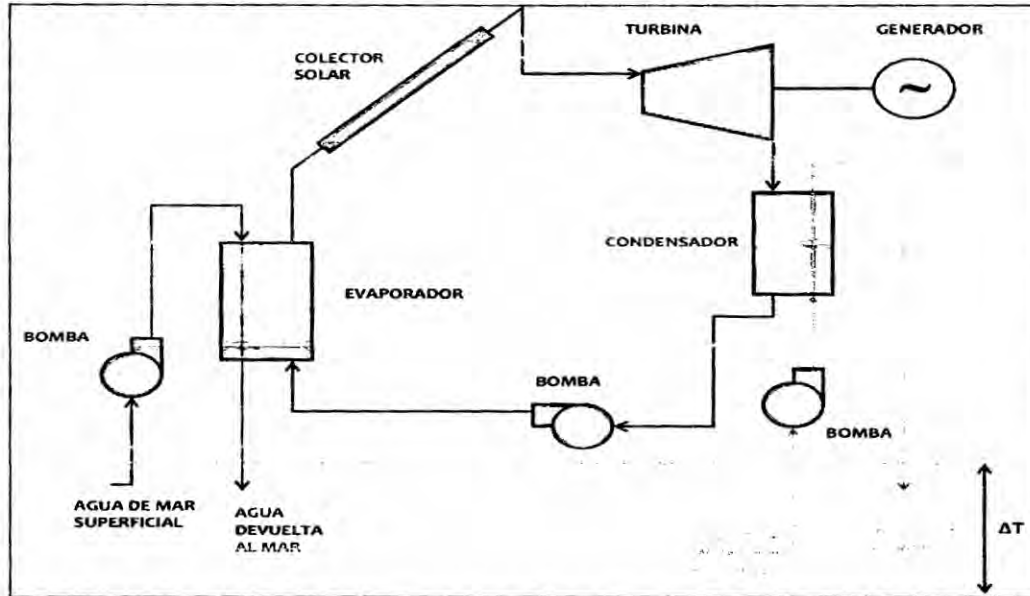


Figura 12: Ciclo Sotec.

Fuente: Rodrigo Andrés Soto Avello (2012 - Chile), En su tesis titulada “Aumento De Eficiencia De Centrales Termoeléctricas Y Nucleares Usando Energía Océano Térmica”

Ciclo Híbrido Y Desalinización

En el ciclo híbrido, propuesto por Uehara^a, además de generar electricidad se aprovechan los mismos flujos para desalinizar una parte del agua de mar del flujo caliente, por medio de la introducción al ciclo de un evaporador flash y un condensador adicional.

Este ciclo, esquematizado en la Figura 13, combina atributos del ciclo cerrado y del ciclo abierto. Luego de atravesar el evaporador, el flujo de agua superficial ingresa a una cámara flash, donde la presión es suficientemente baja para que una parte de él se evapore. Al condensar este vapor se obtiene agua desalinizada. El flujo frío extraído

^a= et al. (1990)

de las profundidades es usado tanto para la condensación del fluido del ciclo cerrado como para la condensación del flujo desalinizado.

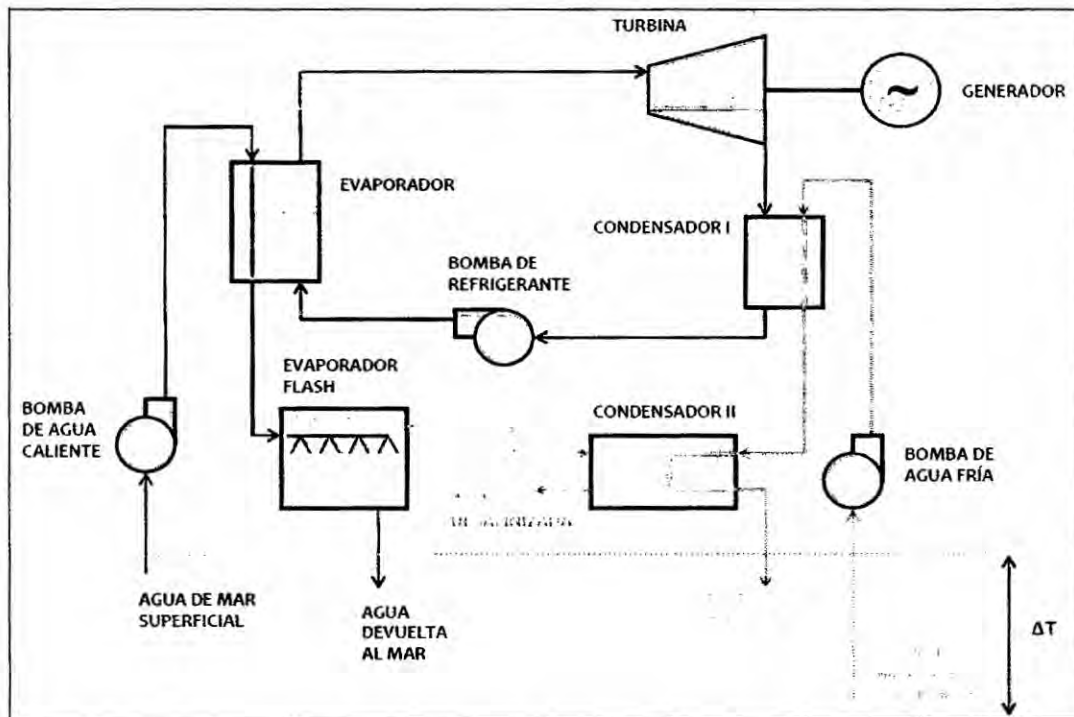


Figura 13: Ciclo Híbrido Y Desalinización

Fuente: Rodrigo Andrés Soto Avello (2012 - Chile), En su tesis titulada "Aumento De Eficiencia De Centrales Termoeléctricas Y Nucleares Usando Energía Océano Térmica"

Cabe mencionar que la desalinización por evaporación flash puede también ser aplicada por sí sola, es decir, sin el ciclo Rankine de generación de energía eléctrica, tal como se muestra en la Figura 14. Una planta de desalinización que está basada en este concepto opera desde 2005 en la isla de Kavaratti en India. La planta fue desarrollada por el National Institute of Ocean Technology (NIOT) y produce agua dulce a

una tasa de 100 toneladas por día. El flujo de agua caliente es de 145 kg/s y se obtiene de las capas superficiales del océano a una temperatura promedio de 28 oC. El flujo de agua fría es de 186 kg/s y es captado desde una profundidad de 350 m a una temperatura promedio de 13 oC. La cámara flash se mantiene a una presión de 2.5 kPa.

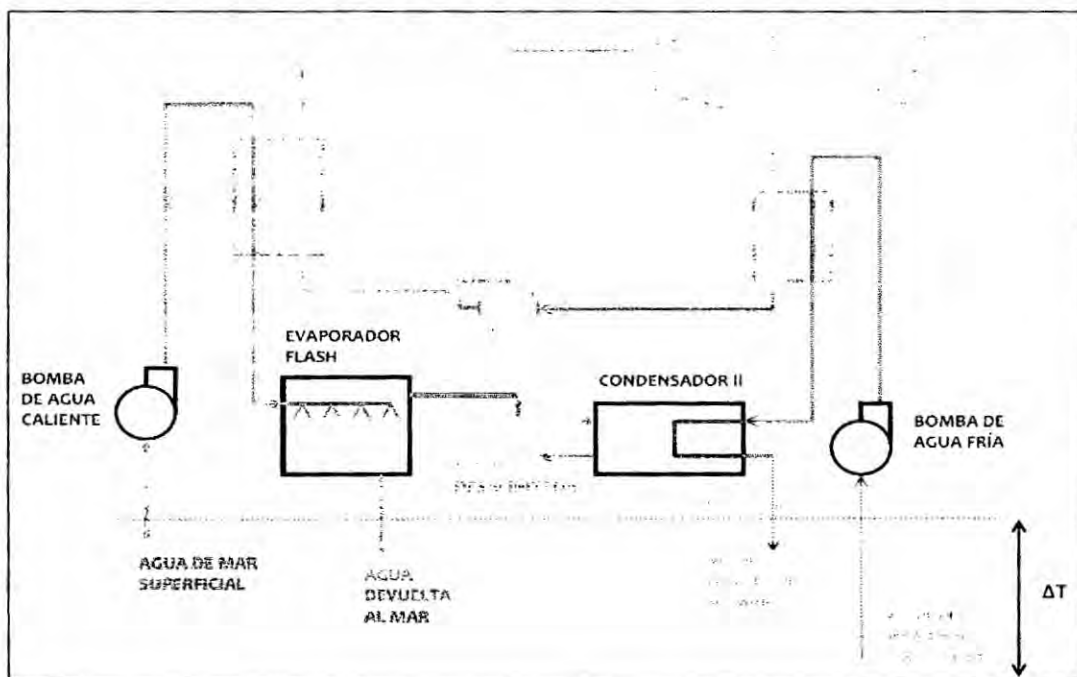


Figura 14: Ciclo Otec para evaporación Flash

Fuente: Rodrigo Andrés Soto Avello (2012 - Chile), En su tesis titulada "Aumento De Eficiencia De Centrales Termoeléctricas Y Nucleares Usando Energía Océano Térmica"

CONCLUSIONES DEL AUTOR

Las evidencias cada vez más convincentes de un cambio climático en curso y las señales de una eventual escasez de petróleo y gas natural en las próximas décadas, han llevado a casi todos los sectores de la sociedad a reflexionar sobre la incapacidad de

continuar con el actual modelo de desarrollo, altamente dependiente de los combustibles fósiles.

En el sector eléctrico, las tecnologías conocidas como no convencionales aparecen como una solución atractiva. Sin embargo, aspectos como capacidad, seguridad y disponibilidad de la energía hacen imposible llevar a cabo una transición rápida y completa hacia tecnologías emergentes. La evolución hacia un modelo menos dependiente de la generación fósil y con una matriz más diversificada, debe considerar la convivencia sustentable con las plantas térmicas, entendiendo esta convivencia como la introducción de tecnologías que contribuyan a aprovechar mejor el recurso fósil (mejora de eficiencia) y a reducir los impactos ambientales de la operación. El sistema propuesto en este estudio responde simultáneamente a estas dos necesidades.

La conversión de energía océano térmica constituye un modo de generar electricidad a través de un proceso libre de emisiones, utilizando una fuente de energía renovable. El estado del arte de la tecnología, no obstante, señala que su factibilidad está limitada a regiones cercanas al Ecuador, donde las temperaturas superficiales del mar son suficientemente altas para la operación del ciclo. La planta OTEC acoplada a una central térmica que aquí se propuso, extiende la aplicabilidad de esta tecnología a casi cualquier región en donde existan descargas térmicas. La aplicación en Chile, tal como se mostró, confirma cierta factibilidad en zonas de agua fría, un potencial que no había sido considerado antes.

La planta OTEC diseñada para la Central Punta Alcalde permite aumentar la potencia neta en un promedio de 27.5 MW, incrementando la eficiencia de la central en 1.27%,

sin alterar el consumo de combustible. Al mismo tiempo, la descarga final del efluente al mar a una temperatura aproximada de 13 oC reduce de manera sustantiva el impacto térmico sobre el ecosistema costero.

Si el sistema propuesto se aplicara a efluentes de centrales térmicas en regiones caribeñas, donde las temperaturas del océano son por si solas aptas para OTEC, se conseguirían mayores eficiencias de la planta híbrida y, por consiguiente, mayores incrementos de eficiencia en la central térmica. De hecho, el modelo desarrollado para la simulación de la planta admite su aplicación a cualquier central térmica costera, y ante cualquier escenario de temperaturas.

En las centrales nucleares, por su parte, los flujos de agua de refrigeración por unidad de energía producida superan en promedio a los de las plantas de carbón. La aplicación del sistema OTEC entregaría, por lo tanto, mayores incrementos de eficiencia en las centrales nucleares que en las plantas a carbón. Cuanto mayor es la capacidad de la central, mayor es la energía residual, y por lo tanto, mayor el potencial de aprovechamiento mediante el ciclo híbrido.

Para la implementación del sistema se deben tomar en cuenta ciertos elementos de seguridad. Esta no debe afectar o gatillar problemas en el funcionamiento de la central térmica. Es por eso que el diseño debe contemplar la posibilidad de dirigir el efluente térmico original directamente al mar en caso de problemas en el sistema OTEC, de modo que una eventual falla en este último no perturbe la operación normal de la central térmica. Esto es particularmente relevante en el caso nuclear.

El diseño para la Central Punta Alcalde supuso la implementación conjunta de la planta OTEC y la planta de carbón, pero sin alterar la operación de esta última, según su diseño original. Por eso, en la evaluación económica se agregó al costo de inversión de la planta original el del ciclo OTEC^b, constituyendo un nuevo costo de inversión. No obstante, y dada la naturaleza independiente del ciclo OTEC, es razonable plantear su implementación en plantas termo o nucleoelectricas existentes, sin alteraciones en la operación básica de la central. En este caso el análisis económico es diferente.

La flexibilidad de aplicación, atribuible principalmente a su condición de sistema semiindependiente, es uno de las características destacables de la planta. Su operación se podría complementar con otras tecnologías emergentes para centrales termoeléctricas, como es el caso de la captura y secuestro de carbono. Así, en el futuro se podrían aplicar en conjunto tecnologías de limpieza de gases de combustión, sistemas de captura de CO₂, y aumentos de eficiencia y reducción de impactos térmicos mediante OTEC^c, acercando las tecnologías de generación a carbón a un camino sustentable.

Aun cuando la estimación de costos del caso de estudio señaló que la justificación económica del proyecto está sujeta a ciertas fluctuaciones impredecibles, la decisión de implementación podría no necesariamente responder al comportamiento del costo de generación. La señal positiva hacia distintas instituciones y sectores sociales, en relación a una preocupación por los impactos ambientales, así como su afinidad con ciertos incentivos y exigencias legales, podrían ser suficiente argumento para tomar en cuenta un proyecto como este.

b= Rodrigo Andrés Soto Avello (2012 - Chile)

c= Tesis de Rodrigo Andrés Soto Avello (2012 - Chile)

Rodrigo Herald Sepúlveda Sepúlveda (2011 - Chile), En su tesis Titulada “Modelación De Centrales Térmicas De Ciclo Combinado Y Su Aplicación En El Problema De Pre despacho De Unidades” menciona que El problema del Predespacho de Unidades, también conocido como Asignación de Unidades o Unit Commitment en inglés, consiste en decidir el estado operativo de cada unidad generadora en un sistema eléctrico, en los distintos periodos de modelación, con el fin de asegurar el abastecimiento de la demanda, de los requerimientos de reserva, ciertos requerimientos de seguridad, y respetando las restricciones en la operación de las unidades, tales como límites de potencia, tiempos mínimos de operación, toma y desprendimiento de carga. Matemáticamente el Predespacho corresponde a un problema de optimización entero mixto (MIP), no convexo, no lineal y de gran escala. Esto dado que involucra una gran cantidad de variables de decisión binarias -asociadas al estado operativo de las centrales- y variables continuas -principalmente potencia generada y reserva- que se resuelve para un horizonte de evaluación de corto plazo, es decir, una o dos semanas. Según la normativa vigente la operación económica y el despacho de carga de los sistemas eléctricos chilenos está a cargo de los Centros de Despacho Económico de Carga (CDEC), existiendo en Chile un CDEC para el Sistema Interconectado del Norte Grande (CDEC-SING) y uno para el Sistema Interconectado Central (CDEC-SIC). Estos organismos se encargan de resolver el Predespacho semanal del sistema en forma centralizada minimizando el costo de operación de acuerdo a los costos au-

ditados por cada una de las unidades que lo conforman. En sistemas eléctricos descentralizados, por ejemplo en mercados tipo bolsas de energía, el Predespacho es resuelto por cada empresa para sus respectivas centrales generadoras, buscando maximizar las utilidades obtenidas debido a la venta de energía según el precio spot horario de la energía y reserva, venido a priori por la entidad Operadora del Sistema o Independent System Operator (ISO) en inglés.

Los costos considerados en el problema de Predespacho de unidades corresponden principalmente a las unidades de generación térmica que producen energía eléctrica mediante la combustión de un energético primario. Dentro de ellas se encuentran las centrales térmicas de ciclo combinado, las cuales aprovechan el calor de los gases de escape de la combustión de una o más turbinas a gas para generar vapor utilizable por una turbina a vapor. En el mercado eléctrico chileno existe una presencia importante de estas unidades: en el año 2009 la generación de energía en el SIC de estas centrales fue de 7.344GWh, lo que representa un 42,75% de la generación térmica total anual, mientras que en el SING se generaron 5.917GWh, lo que equivale al 39,7% de la generación térmica total.

Como se mencionó anteriormente, las unidades de ciclo combinado cuentan con más de una turbina capaz de generar energía eléctrica, este hecho, sumado a la existencia de bypass de gases y fuegos o quemadores adicionales, provoca que estas centrales posean una importante flexibilidad de operación debido a que pueden funcionar en distintas configuraciones o modos de operación. En el caso más simple, donde el ciclo combinado posee una turbina a gas y una turbina a vapor, se puede dar una opera-

ción en ciclo abierto o en ciclo completo dependiendo del estado del bypass de gases: si el bypass está abierto no se produce intercambio de calor entre los ciclos y solo opera la turbina a gas (modo TG); pero si el bypass se cierra, entonces la turbina a vapor está en condiciones de operar junto a la turbina a gas (modo TG+TV). Al existir un mayor número de turbinas a gas, la cantidad de modos posibles de operación crece, por ejemplo un ciclo combinado que posee dos turbinas a gas y una turbina a vapor permite al menos 6 configuraciones: TG1, TG2, TG1+TG2, TG1+TV, TG2+TV, TG1+TG2+TV, dependiendo de cuáles turbinas a gas se encienden y del estado de los bypass de gases. De lo mencionado se desprende que no es posible que la turbina a vapor opere sin una turbina a gas, es decir el modo TV no es factible. Esto introduce restricciones en la operación de la central y en los procesos de partida y parada de ellas.

Si bien el combustible primario de estas unidades es el gas natural, en los sistemas eléctricos chilenos estas unidades han sido reacondicionadas para funcionar con diésel como combustible alternativo con el fin de mejorar la suficiencia del sistema ante escenarios de desabastecimiento. Si a esto se suma la existencia de fuegos adicionales, que tienen como fin aumentar la potencia de la turbina a vapor, se tiene que la cantidad de modos en que un ciclo combinado puede operar aumenta.

En los CDEC se utiliza ampliamente el modelo de ciclos combinados denominado modelo por modos, consistente en determinar el estado (ON/OFF) de cada modo de operación posible, considerando que solo uno puede estar en servicio en cada periodo de evaluación, este ha sido ampliamente tratado en diversos trabajos en donde se han

probado distintas formulaciones y metodología de resolución. Otro modelo existente en la literatura especializada es el modelo por componentes, que tiene como el determinar el estado de operación de cada elemento del ciclo combinado por separado, respetando los acoples termodinámicos existentes. El término componente hace mención a cada turbina a gas, a vapor y fuegos adicionales que posea la unidad.

En cuanto a los vacíos en la modelación, se puede mencionar que los actuales modelos de centrales de ciclo combinado aplicados al Predespacho no consideran transiciones de combustible ni suelen modelar las partidas de estas centrales, en donde ocurren fenómenos de retardo y de limitación de potencia en las componentes del ciclo combinado. Para un ciclo combinado operando con gas, posiblemente estas características sean innecesarias de modelar debido a que por su costo estas suelen operar en base. Sin embargo, en un escenario de baja disponibilidad de gas estas unidades deberían operar con diésel, aumentaría su costo variable y dejarían de ser unidades que operen en base, es aquí en donde cobraría importancia una correcta modelación de las partidas, paradas y transiciones de combustible de los ciclos combinados.

Existen también ciertos fenómenos que agregan restricciones de operación a las unidades térmicas de ciclo combinado, dentro de los que destacan los efectos que provocan las actuaciones de condiciones ambientales en el rendimiento y potencia de salida, principalmente debidos a la humedad y la temperatura ambiente. Existen diversas referencias que modelan y simulan estos efectos, cuyos resultados muestran que las variaciones de potencia que se producen en las turbinas a gas de un ciclo combinado pueden llegar a ser importantes bajo ciertas condiciones ambientales.

En cuanto a la formulación de los modelos, el desarrollo computacional de los últimos años ha permitido resolver problemas que involucran una gran cantidad de variables binarias mediante optimizadores tales como CPLEX o XPRESS, lo cual ha impulsado que la programación entera mixta (MIP) sea utilizada como método de resolución en problemas de mediana y gran escala. Se espera que un modelo de unidades térmicas basado en MIP junto con una eficiente formulación en las restricciones del problema permita una resolución rápida del Predespacho de unidades. Con el fin de lograr mejores y más rápidas soluciones, se utiliza un enfoque de optimización de flujo en redes (network flow optimization), lo que permite formular las restricciones de evolución temporal de las unidades de forma más eficiente que las formulaciones tradicionales.

La motivación es entonces proponer un modelo de centrales de ciclo combinado más cercano a la realidad, que represente de la forma más certera posible las características de operación de estas unidades y que sea adecuado para resolver el Predespacho de unidades.

Por otro lado mencionó que su tesis se centra en la modelación de centrales térmicas de ciclo combinado, en particular en la implementación de un modelo por componentes de tipo lineal entero mixto (MILP), con restricciones temporales basadas en optimización de flujo en redes, estudiándose también la relevancia de incorporar los efectos de condiciones ambientales en la modelación.

Se estudia el impacto de esta modelación de centrales de ciclo combinado en el Predespacho de sistemas eléctricos de carácter térmico. No se considera incluir otro tipo de unidades, tales como hidroeléctricas, eólicas, solares, etc.

Los modelos serán aplicados a un Predespacho uninodal, por lo que no se considera la topología del sistema de transmisión, las congestiones y las pérdidas óhmicas del sistema eléctrico.

El modelo de ciclo combinado se enfoca en configuraciones de n turbinas a gas, n calderas y una turbina a vapor, considerándose que cada turbina está acoplada a su respectivo generador. Esto se debe a que estas configuraciones son las más ampliamente utilizadas en los sistemas eléctricos. El modelo no sería extensible a configuraciones tales como aquellas en las que se encuentra la turbina a gas y turbina a vapor compartiendo un mismo eje, o aquellas en que dos turbinas a gas comparten una única caldera.

OBJETIVOS DEL AUTOR

Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es modelar, implementar y analizar modelos de centrales generadoras térmicas de ciclo combinado que sean aplicables a una herramienta computacional capaz de resolver el Predespacho de unidades.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo son:

_ Reconocer y entender características de operación y de funcionamiento de centrales térmicas de ciclo combinado que sean relevantes al Predespacho de unidades.

- _ Proponer un modelo matemático lineal entero mixto que permita representar fielmente las restricciones de operación de las unidades térmicas de ciclo combinado.
- _ Incorporar a dicho modelo una formulación de restricciones temporales basadas en una red de flujo y determinar empíricamente las ventajas de está por sobre una formulación tradicional.
- _ Cuantificar el impacto de condiciones ambientales en la operación de centrales térmicas de ciclo combinado.
- _ Programar una herramienta computacional que integre el modelo de unidades térmicas de ciclo combinado y que sea capaz de resolver el Predespacho de unidades.
- _ Validar el modelo y la herramienta computacional mediante estudios de casos basados en datos reales del SING.
- _ Comparar modelos tipo MILP de unidades térmicas de ciclo combinado utilizados en el problema del Predespacho de unidades.

PLANTAS TERMOELÉCTRICAS DE CICLO COMBINADO

Las plantas termoeléctricas de ciclo combinado son centrales que operan con turbinas a gas (TG) y a vapor (TV) acopladas en un ciclo termodinámico, en el cual se reutilizan los gases de escape producidos en el proceso de combustión de la turbina a gas. Esta recuperación de calor implica que este tipo de centrales posean una alta eficiencia del orden de un 60 %, lo que constituye la principal ventaja por sobre las plantas térmicas convencionales, de eficiencias del orden de 30% a 40%. Las centrales convencionales desechan los gases residuales producidos por la turbina a gas al ambiente, estando estos a elevadas temperaturas. La idea de un ciclo combinado es precisamen-

te utilizar la temperatura de estos gases, para lo cual se utiliza un intercambiador de calor, capaz de calentar agua y producir vapor utilizable por una turbina a vapor. De esta forma se genera energía eléctrica por la(s) turbina(s) a gas y una cantidad extra por la(s) turbina(s) a vapor, estando comúnmente cada turbina acoplada en un eje con su respectivo generador, aunque existen centrales en la cuales se encuentran ambas componentes acopladas al mismo eje de un generador común.

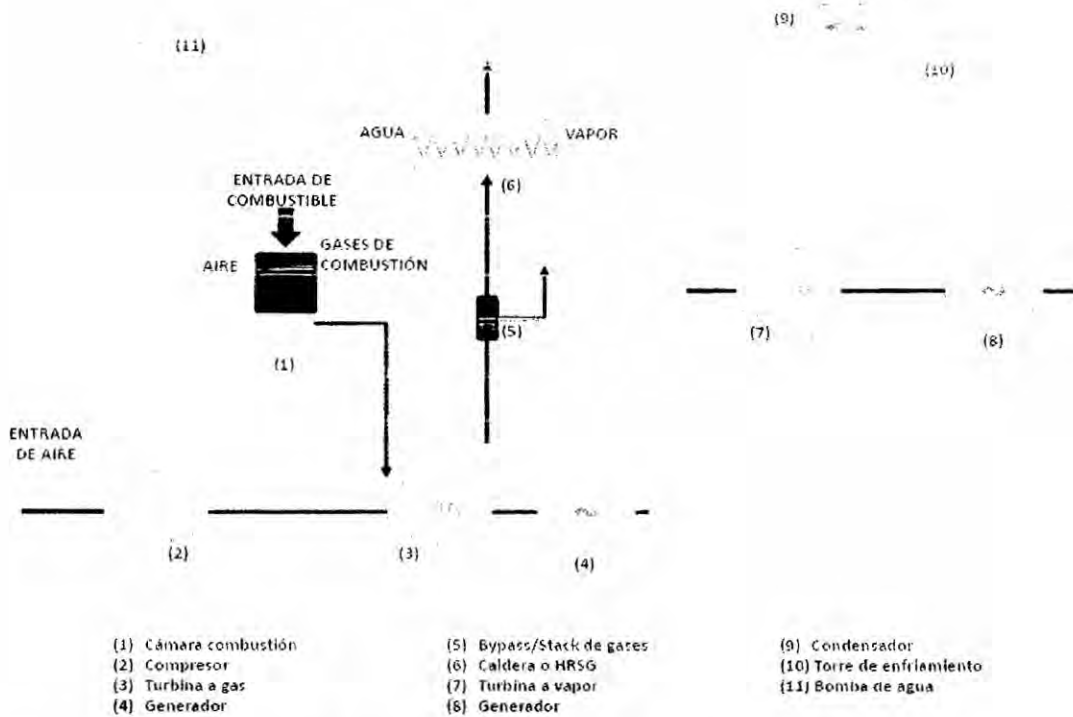


Figura 15: Diagrama de funcionamiento de un ciclo combinado

Fuente: Tesis "Modelación De Centrales Térmicas De Ciclo Combinado de Rodrigo Heraldo Sepúlveda Sepúlveda"

MODELO DE PREDESPACHO CON CENTRALES TÉRMICAS DE CICLO COMBINADO

Se propone un modelo de Predespacho uninodal aplicado a un sistema eléctrico de operación centralizada, es decir, cuyo objetivo es minimizar los costos operativos. El modelo propuesto incorpora centrales térmicas convencionales y de ciclo combinado cuya operación es modelada como un problema entero lineal mixto (MILP). En esta sección se presenta el modelo implementado junto con las características de operación más relevantes de estas unidades.

El modelo propuesto de plantas térmicas de ciclo combinado está enfocado en unidades que se compongan de N turbinas a gas, cada una con su respectiva caldera y una única turbina a vapor que opera con el aporte calórico de las N calderas presentes. Se asume que cada turbina, ya sea a gas o a vapor, está acoplada a su propio generador eléctrico. El modelo de estas unidades se enfocará en una modelación por componentes, es decir, se representa un ciclo combinado por cada una de sus turbinas por separado, utilizando restricciones de acoplamiento y de balance energético entre las turbinas a gas y a vapor. Se implementarán también restricciones temporales mediante un enfoque de red dinámica de tiempo discreto como la indicada, la cual modelará la evolución temporal de las unidades.

Para incluir las centrales térmicas convencionales y de ciclo combinado se utilizan los índices i, j . El índice i indica la unidad y j las componentes que conforman la unidad. En el caso de una planta convencional, la componente es la misma unidad, y en caso de un ciclo combinado las componentes corresponden a las turbinas y fuegos adicionales.

Para indicar el combustible de operación se utiliza el índice m . Cabe aclarar que se considerará que las unidades térmicas convencionales operan con un único combustible, al igual que las turbinas a vapor, y sólo las turbinas a gas pueden operar con uno o dos combustibles dependiendo de las restricciones de abastecimiento.

CONCLUSIONES DEL AUTOR

Conclusiones generales

Se desarrolla un modelo matemático lineal entero-mixto de unidades térmicas de ciclo combinado aplicable al problema del Predespacho que incorpora diversas características de operación que no suelen ser consideradas: rampas de arranque/parada, tiempo de hold-point, transiciones entre combustible primario y alternativo en las turbinas a gas e incorporación de fuegos adicionales.

Además, permite la inclusión de efectos externos como la temperatura ambiente al modelar curvas de costos y límites de potencia variables en el tiempo.

Por otro lado, el modelo propuesto incorpora una formulación novedosa de las restricciones temporales basada en una red de flujo dinámica de tiempo discreto, la cual se compara con una formulación tradicional implementada en dos modelos de unidades de ciclo combinado: uno por componentes y otro por modos. La formulación propuesta es validada empíricamente mediante un análisis de desempeño aplicado a un conjunto de casos basados en las unidades generadoras del SING.

Conclusiones específicas

Se reconocen las características relevantes de operación de una unidad de ciclo combinado, mediante la elaboración de ejemplos simples que muestran la aplicabilidad de las formulaciones tipo

MILP implementadas. Estas permiten mejorar la modelación permitiendo agregar nuevos aspectos de la operación.

Se cuantifica el impacto de considerar el efecto de temperatura ambiente en las unidades térmicas de ciclo combinado y sobre la operación del sistema mediante tres propuestas metodológicas de Predespacho y despacho económico. Se implementa un caso basado en la totalidad de las unidades generadoras del SING, obteniéndose que este efecto sea más bien despreciable en el sistema, debido a la baja variación de temperatura ambiente en las zonas geográficas en donde se ubican la mayoría de las plantas de ciclo combinado.

Se valida empíricamente el modelo por componentes propuesto comparándolo con un modelo por componentes de formulación tradicional y un modelo por modos basado en el CDEC-SING, obteniéndose que el modelo desarrollado entrega mejores valores de la función objetivo del problema relajado y menores tiempos de resolución para el 50% de los casos implementados, lográndose mejoras entre 1% y un 4% en el valor del rootnode para aprox. el 10% de ellos. Esto muestra las ventajas de incorporar una formulación basada en una red dinámica de flujo para modelar la evolución temporal de las unidades térmicas convencionales y de ciclo combinado, la cual permite mejores soluciones en menores tiempos.

Se reconocen condiciones para establecer la equivalencia entre los modelos implementados y definir reglas para su comparación, lo cual permite identificar las ventajas y desventajas entre un modelo de central de ciclo combinado por componentes y uno por modos. El modelo por componentes permite una modelación más certera dado que no requiere de aproximaciones en las curvas de costos y asigna correctamente los parámetros a cada turbina. Sin embargo, posee las desventajas de requerir una restricción de balance energético o de potencia entre sus componentes y de requerir información por cada componente que suele no estar disponible.

La herramienta computacional implementada es capaz de resolver el Predespacho de un sistema térmico compuesto por unidades convencionales y de ciclo combinado, solucionando el problema tipo MIP mediante el algoritmo Branch & Bound utilizando CPLEX.

APORTE PROPIO TRAS EL ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE LOS ANTECEDENTES DEL AMBITO INTERNACIONAL

Después de realizar un análisis amplio de la literatura y trabajos existentes en el mundo, es decir en el ámbito internacional, en lo que respecta a Calderas Pirotubulares y Plantas Térmicas, puedo mencionar lo siguiente:

- En la Tesis “Modelo matemático del comportamiento de ciclos combinados de turbinas de gas y vapor”, de Rapún Jiménez, José Luis (1999), Se puede notar a través de toda su tesis el esfuerzo realizado para poder realizar el modelamiento de los tipos de ciclos combinados, las formulas y conceptos planteados, así como desarrollados, pero lo que he podido notar es que no toma o no le da la debida importancia a las pérdidas de energía a través de todos los componentes del ciclo combinado, es especial por las calderas, ya sea por el cuerpo o por las tapas.

Estoy convencido de que si se toma en cuenta los parámetros de las pérdidas de energía a través de los diferentes componentes del ciclo combinado, el modelamiento resultará ser mejor o tener una mayor eficacia en los resultados y cálculos realizados, aunque ya el autor en una de sus conclusiones reconoce que su modelo es susceptible a ser mejorado tomando en cuenta otros parámetros que él no ha considerado.

- En la tesis “Reducción de emisiones de dióxido de carbono en centrales térmicas de carbón pulverizado. Repotenciación y ciclo de captura óxido de calcio-carbonato cálcico”, de Jesús María Escosa González, (2009), plantea que la necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) de las centrales termoeléctricas de carbón pulverizado que se encuentran operativas permitiendo mantener a dicho combustible como fuente principal de energía.

De la lectura de todos los sistemas de captura por postcombustión que he tenido la oportunidad de investigar, hasta el momento he podido notar que el proceso de captura presentado en este trabajo de investigación, ofrece una serie de ventajas respecto a

otro tipo de sistemas de captura, ya que mediante el concepto actual de postcombustión que trata de poner en práctica el autor, al hacer uso de un sorbente como es la caliza, el cual es abundante y barato, lo que permite subsanar la desventaja con la que cuenta. Es por ello que el autor en este aspecto, permite incorporar al ciclo de captura un elevado flujo másico del sorbente sin incurrir en un alto costo. En este caso específico donde el proceso de regeneración, en el que el CaCO_3 formado debe descomponerse de nuevo en CaO y CO_2 , requiere de una buena cantidad de calor, pero que se equilibra en una buena parte por el elevado potencial de flujos energéticos que se derivan del propio proceso de captura. Los flujos energéticos generados son los que deben ser integrados en el ciclo de vapor de la central termoeléctrica para reducir los altos costos que supone su instalación.

Al analizar este método, podemos notar cómo es posible obtener energía de la propia reacción de carbonatación, ya que mediante el proceso propuesto se menciona que se puede obtener energía de los gases que han sido carbonatados, del CO_2 regenerado y de la purga de sólidos realizada para mantener la actividad del ciclo. Al mismo tiempo se propone en el presente trabajo una nueva potencia de ciclo el cual permite reducir de forma considerable la penalización en la eficiencia del sistema energético global y obtener un coste de la tonelada de CO_2 evitada realmente competitivo.

Por otro lado el hecho de que el autor haya evaluado la posibilidad de un comportamiento diferente de la relación entre sorbente y caliza así como una reducción del número de ciclos que puede permanecer el sorbente en el ciclo, es una buena técnica que no he podido encontrar en otras publicaciones relacionadas con el tema, y en mi

condición de ingeniero químico, representa un buen aporte para mis conocimientos relacionados con el tema y con mi crecimiento profesional, pues cuando el autor incrementa la relación de sólidos esto hace que se produzca un incremento de las necesidades energéticas del ciclo de captura pero una mayor energía excedente aprovechable, lo mismo ocurre al reducirse el número de ciclos de trabajo. Lo que el autor logra observar, y es lo que me parece interesante y provechoso en el tema es que se debe operar siempre en las condiciones de menor relación sorbente/CO₂ posible y con el mayor número de ciclos de trabajo que se permita. Ello se deriva de que es mayor el efecto negativo del incremento del consumo energético del ciclo de captura al incrementar los sólidos que el efecto positivo de disponer de mayor energía a integrar con el ciclo de vapor.

- En la tesis “Diseño Y Construcción De Una Caldera Piro tubular Horizontal De Tres Pasos 50 BHP”, Francisco Xavier Cajamarca Corral, (2001), pretende ofrecer una alternativa más económica a las industrias que utilizan el vapor dentro de sus procesos de producción, mediante la fabricación local de una caldera.

En cuanto al trabajo de investigación, a las conclusiones y a las recomendaciones que da el autor, me parecen apropiadas en cuanto al tema, y estoy en total acuerdo con él, pero lo que considero que hace falta, es que debe de considerar las pérdidas de energía en forma de calor que ocurren en el mismo, ya sea por la carcasa, las tapas y todas

las partes en contacto con el ambiente, y que en realidad es algo muy importante en el diseño de este tipos de equipos.

- En el trabajo “Generación De Energía Y Las Centrales Térmicas De Ciclo Combinado” de Alberto De Jesús Ramírez Romero (México, 2011), se plantea y estudia el tema de las centrales de ciclo combinado. En este trabajo el autor plantea el estudio de las centrales de ciclo combinado; lo más rescatable del mismo es que el estudio realizado va desde la investigación teórica hasta la presentación de un caso práctico de una planta de ciclo combinado. A través de esta tesis, el autor analizó el panorama energético de las diversas fuentes de generación de energía hasta llegar a la generación eléctrica mediante el ciclo combinado, así mismo permitió definir los principios y generalidades del ciclo combinado, así como las características relevantes de la configuración de los elementos que conforman la generación de energía eléctrica mediante este proceso, como son la turbina de gas, la turbina de vapor, el recuperador de calor – generador de vapor, etc., que dieron al autor el conocimiento para sustentar el análisis termodinámico aplicable a los ciclos de gas, vapor y ciclos combinados.

Tomando en cuenta el planteamiento central de la tesis, el autor desarrolló información respecto al rendimiento y optimización de centrales termoeléctricas de ciclo combinado, para concluir con la presentación de un caso práctico de estudio, mostrando los resultados de eficiencia y rendimiento característicos de las centrales térmicas de ciclo combinado.

Por otro lado como respuesta a la creciente necesidad, cada vez más urgente, de contar con material informativo preciso y esencial para la generación de energía, en este

caso la generación termoeléctrica de ciclo combinado, el autor elaboró esta tesis con esta idea en la mente.

Con este trabajo que presentó el autor ha quedado un cúmulo importante de conocimientos sumamente interesantes de la generación de energía mediante el ciclo combinado, partiendo al inicio de las diferentes formas de generar energía eléctrica hasta llegar al punto central de la tesis, las centrales térmicas de ciclo combinado; así mismo el presente trabajo permite distinguir las ventajas y desventajas de cada una ellas, y en especial a la generación de energía mediante los ciclo combinados de gas y vapor.

En este trabajo se dan a conocer datos acerca de las partes que constituyen el ciclo combinado, su funcionamiento, sus características y los principios de operación; dándole a cualquier persona una visión objetiva de la importancia de este tipo de generación en cuanto cuestiones ambientales, tecnológicas y de costo, basándose en la eficiencia del ciclo combinado.

Al final de esta investigación se presentó un caso de generación de energía por medio de un ciclo combinado, en donde el análisis y resultado, llevó a concluir la importancia y las ventajas en cuanto a el rendimiento y eficiencia de la generación de energía a través de ciclo combinado, con respecto a la generación individual de los ciclos de gas y vapor, respectivamente.

- En su Trabajo de tesis denominado “Diseño Del Esquema De Conexión De Una Planta Termoeléctrica De 900 Mw En Cumaná Y La Evaluación De Su Impacto

En El Sistema Eléctrico Nacional (SEN)” Blanco G., Douglas A. (2007, Venezuela), menciona que la empresa CVG Electrificación del Caroní (CVG EDELCA), filial de la Corporación Venezolana de Guayana, es la empresa de generación hidroeléctrica más importante del país. Este trabajo de investigación me pareció sumamente interesante ya que su desarrollo se basó íntegramente en la aplicación directa de un ciclo combinado en el desarrollo de la generación de energía termoeléctrica para el consumo humano, en una ciudad.

- En su tesis “Sistemas de generación eléctrica mediante calderas de vapor energizadas por radiación solar concentrada”, Muñoz Antón, Javier (España, 2008), menciona que la creciente demanda de energía, el elevado coste del petróleo, y los problemas ambientales requieren de nuevas plantas de potencia de alto rendimiento, bajo coste de generación, rápida construcción y poco contaminantes. Así mismo el autor al realizar el análisis de la demanda de energía, ve la necesidad de resolver el problema mediante la generación de la misma, pero de una manera que involucre no solo el tipo de generación sino también como proteger el medio ambiente.

Como es sabido, a nivel mundial, la creciente demanda de energía, el elevado costo del petróleo y los problemas ambientales requieren de nuevas plantas de potencia de alto rendimiento, bajo costo de generación, rápida construcción y poco contaminantes. Basándose en estas ideas, la evolución del parque de generación eléctrica ha ido adaptándose con el paso de los años, adoptando tecnologías (ciclos combinados) o mejorando las existentes (nuclear, hidroeléctrica de bombeo, Joule Bryton, etc). De

forma paralela a estas formas de generación ha ido surgiendo la idea de aprovechar las fuentes de energía renovables, sin contar la hidroeléctrica, para la producción de electricidad a gran escala.

Este trabajo de investigación es singular e innovador porque presenta un nuevo sistema de aprovechamiento de energía solar térmica de concentración mediante un novedoso sistema bautizado como caldera solar, la cual presenta importantes similitudes con los sistemas de receptor central en cuanto al aspecto constructivo aunque las condiciones de operación se asemejan más a las de los colectores cilindro-parabólicos. En términos precisos, la caldera solar puede asemejarse fácilmente al hogar de una central térmica convencional; no obstante, en lugar de conformar un recinto cerrado en cuyo interior se produce una combustión, su foco caliente aprovecha la energía liberada por el Sol mediante el mismo tipo de configuración: una parrilla de tuberías distribuidas por una superficie extensa por las que circula el fluido calorífero, siendo las condiciones de funcionamiento las que resultan del compromiso entre alcanzar un alto rendimiento de captación solar y un alto rendimiento del ciclo termodinámico.

- En su tesis “Estudio En Régimen Transitorio De Plantas Solares Térmicas De Propósito Múltiple. Aplicación Al Diseño De Instalaciones Concebidas Para Agua Caliente Sanitaria”, la D^a. María del Carmen Rodríguez Hidalgo (2010 – España), menciona que ante la necesidad de reducir el consumo de energía primaria en las ins-

instalaciones térmicas del sector terciario, se plantea la conveniencia de atender la demanda de agua caliente sanitaria con fuentes renovables.

La autora presenta su trabajo como ella misma lo manifiesta, ante la necesidad de reducir el consumo de energía primaria en las instalaciones térmicas del sector terciario, es por ello que planteó la conveniencia de atender la demanda de agua caliente sanitaria con fuentes renovables. Con lo que concuerdo ampliamente es que los beneficios que se pueden obtener de esta medida son la reducción de la dependencia externa en términos de energía primaria fósil, además del correspondiente ahorro energético y del impacto ambiental.

En esta tesis la autora analizó el comportamiento de instalaciones de este tipo empleando herramientas teóricas y experimentales, en el presente trabajo pudo evaluar y predecir sus actuaciones en régimen transitorio.

Por ello, la autora utilizando los datos experimentales obtenidos de una instalación solar térmica ubicada en el Campus de la Universidad, configuró la aplicación de agua caliente sanitaria.

Y a partir de la base de datos elaborados a partir de medidas experimentales de temperatura y caudal de los principales elementos del circuito y de las variables de una estación meteorológica tomadas en intervalos de tiempo de 10 minutos, pudo conseguir el principal objetivo planteado, consistente en la descripción detallada del comportamiento real de la instalación. Siendo de gran utilidad estos valores, ya con ellos pudo validar experimentalmente los programas de simulación desarrollados, capaces de describir instantáneamente tanto las actuaciones de la instalación solar de agua ca-

liente sanitaria completa, como de sus componentes principales. Así mismo en el presente trabajo se hizo especial énfasis en la caracterización de los captadores solares en régimen transitorio bajo condiciones reales de operación.

La autora, utilizando dicha herramienta pudo estudiar diferentes configuraciones, lo que le permitió predecir tanto las prestaciones energéticas como la viabilidad económica de dichas instalaciones.

Los resultados del estudio se pueden aplicar al diseño de instalaciones solares para ACS, en el marco del CTE. Del estudio se obtuvieron valores óptimos de superficie de captación y de volumen del acumulador térmico, para las condiciones climáticas de Madrid.

- En su tesis titulada “Aumento De Eficiencia De Centrales Termoeléctricas Y Nucleares Usando Energía Océano Térmica”, Rodrigo Andrés Soto Avello (2012 - Chile), afirma que Las plantas termoeléctricas y nucleares requieren remover el calor residual de la central, utilizando un flujo refrigerante y un sumidero del calor. De la teoría concuerdo totalmente con el autor en que las plantas termoeléctricas y nucleares requieren remover el calor residual de la central, para ello es necesario utilizar un flujo refrigerante y un sumidero del calor. En las plantas costeras como la que plantea el autor resulta más económica la descarga del calor al océano, pero con un aumento de temperatura del agua de mar que provoca cierta contaminación térmica en el ecosistema local.

En esta tesis se diseñó una planta híbrida anexa a una central térmica (fósil o nuclear), con la finalidad de poder generar energía eléctrica adicional, sin aumentar emisiones, y para desalinizar agua de mar, basada en el principio de Conversión de Energía Océano Térmica. Se sabe que esta planta usa un ciclo Rankine de amoníaco, cuya fuente de calor es la descarga de agua de enfriamiento de la central y cuyo sumidero de refrigeración es un flujo de agua fría captado desde las profundidades del mar. Esta planta híbrida sería capaz de mitigar el impacto térmico de la descarga en el océano.

El autor hizo mención que la aplicación del sistema a nivel nacional en su país resulta particularmente atractiva. Ya que más del 60% de la matriz eléctrica chilena se basa en combustibles fósiles.

Él esperaba que esta capacidad térmica continúe aumentando, siendo conveniente introducir tecnologías tanto para mejorar la operación de las centrales como para reducir sus impactos ambientales globales y locales. Para el caso contemplado en la presente tesis, como caso de estudio, se simuló la incorporación del sistema OTEC a la Central Punta Alcalde, proyecto de 740 MW a carbón en la región de Atacama. El diseño óptimo contempla una captura de agua fría a 600 m de profundidad, generando entre 25 MW (agosto) y 37 MW (febrero) de potencia eléctrica adicional, incrementando la eficiencia de la central y reduciendo las emisiones de CO₂. El flujo de agua desalinizada varía mes a mes, sumando 5.8 millones de toneladas al año.

Y como el propio autor lo manifiesta, la flexibilidad de aplicación, atribuible principalmente a su condición de sistema semiindependiente, es uno de las características

destacables de la planta. Su operación se podría complementar con otras tecnologías emergentes para centrales termoeléctricas, como es el caso de la captura y secuestro de carbono.

Por otro lado, tanto para el autor como para cualquier investigador o inversionista en la parte energética en este caso, la parte económica es importante en estos temas, ya que aun cuando la estimación de costos del caso de estudio señaló que la justificación económica del proyecto está sujeta a ciertas fluctuaciones impredecibles, la decisión de implementación podría no necesariamente responder al comportamiento del costo de generación. La indicación positiva hacia distintas instituciones y sectores sociales, en relación a una preocupación por los impactos ambientales, así como su afinidad con ciertos incentivos y exigencias legales, podrían ser suficiente argumento para tomar en cuenta en un proyecto como este.

- En su tesis Titulada “Modelación De Centrales Térmicas De Ciclo Combinado Y Su Aplicación En El Problema De Pre despacho De Unidades” Rodrigo Heraldo Sepúlveda Sepúlveda (2011 - Chile), menciona que El problema del Predespacho de Unidades, también conocido como Asignación de Unidades o Unit Commitment en inglés, consiste en decidir el estado operativo de cada unidad generadora en un sistema eléctrico, en los distintos periodos de modelación, con el fin de asegurar el abastecimiento de la demanda, por ello, en el presente trabajo de tesis, me pareció importante el tema ya que el autor define el predespacho de unidades como un problema de optimización en que se decide el estado de operación de cada unidad generadora pre-

sente en un sistema eléctrico, con el fin de asegurar el abastecimiento de la demanda, respetando los requerimientos de reserva, restricciones de operación de las centrales y minimizando los costos operativos de las unidades térmicas.

Pero lo importante e interesante de todo esto, es que se menciona que dentro de las centrales de generación, las unidades de ciclo combinado se caracterizan por acoplar dos ciclos termodinámicos: un ciclo a gas y otro a vapor. Y que estas unidades de ciclo combinado presentan una gran flexibilidad de operación debido a las distintas combinaciones en que pueden operar (no solo de una manera tradicional como siempre se ve). Sin embargo el autor, para hacer relevante e interesante su trabajo de investigación y hacer las cosas fuera de lo común, introduce complicaciones en su modelación, lo que ha sido abordado, según él, en la literatura especializada mediante los modelos por modos de operación y por componentes.

En este trabajo el autor, desarrolla e implementa un modelo matemático lineal entero-mixto de predespacho, con unidades térmicas de ciclo combinado representadas mediante sus componentes, incorporando diversas características que describen su operación. Incluso en su investigación de modelamiento, se permite también la posibilidad de corregir parámetros que se vean afectados por la temperatura ambiente.

Por otro lado, dentro de las restricciones de mayor relevancia para las unidades de ciclo combinado que él puede encontrar y describir, son aquellas que describen su evolución temporal. Y que para modelar esta característica se propone una modelación basada en la teoría de redes de flujo. Tomando las mismas palabras del autor en cuanto a la definición de esta técnica, podemos mencionar que consiste en plantear un gra-

fo dirigido no estático, conocido también como una red de flujo a tiempo discreto, la cual se compone por arcos y nodos dependientes del tiempo. Esta formulación permite relacionar los parámetros de tiempos mínimos de operación; partidas en caliente, en tibio y en frío, y las transiciones entre combustibles.

El autor en su trabajo, se propone y logra la verificación y la ventaja de este modelo a través de ejemplos simulados, construidos en base a datos reales del Sistema Interconectado del Norte Grande. Así mismo el análisis de desempeño se efectúa a través de dos pruebas:

1. Valor de la función objetivo del problema relajado.
2. Tiempo de resolución del problema entero.

Lo que me pareció muy relevante es que el autor realiza una comparación del modelo propuesto con otros dos modelos de la literatura. Y los resultados indican que la formulación basada en una red de flujo a tiempo discreto logra mejores soluciones del problema relajado para el 60% de los casos implementados, obteniéndose mejoras de aproximadamente 1% a 4% en el valor de la función objetivo. También se logran reducir los tiempos de resolución del problema entero en un 30% o más para el 50% de los casos estudiados.

Pero el autor no se queda solo en este tema, sino que incluso como trabajo futuro se propone extender la modelación basada en red de flujo y desarrollar una herramienta computacional adecuada a esta técnica de optimización. También se propone ampliar el modelo de predespacho a sistemas hidrotérmicos, incorporando además las congestiones y las pérdidas óhmicas de la red de transmisión.

ANTECEDENTES EN EL ÁMBITO NACIONAL

Jaime Mendoza Nalvarte (Perú, 2002) en su tesis “Análisis Del Diseño Termodinámico De Centrales Eléctricas De Ciclo Combinado” menciona que En vista del creciente costo y cada vez menor disponibilidad de recursos de combustibles fósiles convencionales en el futuro, es muy importante que los ingenieros estudien cuidadosamente la manera en que podrían aumentar la eficiencia en la utilización de la energía.

Esto ha motivado la continua búsqueda de eficiencias térmicas más altas, lo que ha originado algunas innovaciones en los ciclos térmicos básicos de generación de potencia. Entre ellos, se encuentra de manera predominante los ciclos de potencia que se componen de dos ciclos independientes conocidos como ciclos combinados donde el calor rechazado por un fluido se emplea como la entrada de calor para el otro fluido que opera a una temperatura inferior.

Es conveniente desde el punto de vista de la ingeniería, aprovechar las características deseables del ciclo de turbina de gas a altas temperaturas y usar los gases de escape de alta temperatura como la fuente de energía en un ciclo inferior, como el ciclo de potencia de vapor.

Los recientes desarrollos en la tecnología de las turbinas de gas han hecho al ciclo combinado de gas-vapor de una economía muy atractiva. El ciclo combinado aumenta la eficiencia sin incrementar de modo apreciable el costo inicial. En consecuencia,

muchas plantas de potencia nuevas operan con ciclos combinados, de tal forma que muchas plantas de vapor o de turbinas de gas se están convirtiendo en plantas de potencia de ciclo combinado. Se tiene conocimiento en la actualidad de eficiencias térmicas por encima de 50 por ciento como resultado de esta aplicación.

En la actualidad, el Perú viene atravesando por un proceso de cambios importantes en los diferentes sectores referentes al desarrollo en general. El sector eléctrico no ha sido la excepción de este desarrollo. La demanda de energía irá en aumento, por lo cual será necesario incrementar el potencial con la finalidad de poder atender el nuevo mercado eléctrico.

Con costos de combustibles en aumento y escasez de fuentes de energía, es prudente maximizar la energía obtenida de los combustibles. Las centrales eléctricas de ciclo combinado cumplen con este objetivo, siendo las más importantes desde el punto de vista industrial, las más difundidas y además con mayor eficiencia termodinámica. Las centrales de ciclo combinado representan hoy indiscutiblemente la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica con gas natural como combustible en términos de eficiencia, de emisiones y de costos (tanto de inversión como operativos) y ha sido en el último decenio protagonista de una real y propia revolución en la industria termoeléctrica, razón por la cual muchas plantas con turbinas de gas o de vapor se están transformando en plantas de potencia de ciclo combinado.

En nuestro país no viene siendo aplicada esta tecnología. La generación térmica de energía eléctrica, viene siendo atendida con turbinas de gas, las cuales podrían ser repotenciadas a centrales de ciclo combinado, aprovechando de esta forma la gran can-

tividad de energía contenida en los gases de escape que hasta hoy viene siendo desechada al medio ambiente. Asimismo dentro de algunos años, el gas natural será el más usado debido a las grandes reservas existentes en Camisea, y como es sabido es el combustible ideal de las centrales eléctricas de ciclo combinado.

El presente trabajo pretende mostrar un estudio, desde un punto de vista termodinámico, del diseño de centrales eléctricas de ciclo combinado, poniendo especial énfasis en el generador de vapor por recuperación de calor en el cual se recupera la energía de los gases de escape de la turbina de gas. Asimismo se elabora un programa, como herramienta de sustento para el presente trabajo.

Las centrales eléctricas de ciclo combinado se diseñan con el propósito de aprovechar al máximo el calor sobrante contenido en los gases de escape de las turbinas de combustión, logrando así eficiencias nunca antes obtenidas en algún otro proceso térmico. Estas plantas se conciben en forma de instalaciones destinadas exclusivamente a la producción de corriente eléctrica o como instalaciones que suministran electricidad y calor de proceso para el consumo industrial o público.

En el curso de los últimos años las centrales eléctricas de ciclo combinado con turbinas de vapor y de gas han conseguido una gran aceptación a nivel mundial. Hoy en día la potencia total de pedidos anuales de centrales de ciclo combinado en todo el mundo viene adquiriendo un gran crecimiento en el mercado eléctrico.

El gran éxito alcanzado por estas se debe a los considerables progresos en los distintos campos tecnológicos. A ello ha contribuido principalmente de manera decisiva el desarrollo de las turbinas de gas. Gracias a las mejoras en los materiales y tecnologías

de refrigeración, fue posible aumentar fuertemente la temperatura de entrada a la turbina de gas, lo que explica su alto rendimiento. En el campo de la combustión, las últimas tecnologías de quemadores han permitido reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) a niveles muy bajos. Asimismo el lado vapor con circuitos mejorados, como evaporación de tres niveles de presión y turbinas de vapor más compactas con rendimiento elevado, ha prestado su contribución a una utilización mejor del combustible.

CICLO COMBINADO

Definición

Un ciclo combinado es un sistema termodinámico que comprende dos o más ciclos de potencia, cada uno usando un fluido de trabajo diferente. Combinando dos ciclos de potencia independientes puede resultar en mayor eficiencia que operando cada ciclo independientemente. Para alcanzar mayor eficiencia que cualquiera de los ciclos operando independientemente, los dos ciclos deben intercambiar energía. El ciclo Brayton para turbinas de gas y el ciclo Rankine³ para turbinas de vapor son dos ciclos que se complementan uno al otro para formar ciclos combinados eficientes. El ciclo Brayton tiene una fuente a alta temperatura y desecha calor a una temperatura tal que puede ser fuente de energía o suplemento de la fuente de energía para el ciclo Rankine en un ciclo combinado.

Los fluidos de trabajo más usados para ciclos combinados son aire y vapor. Otros fluidos de trabajo (fluidos orgánicos, vapor de potasio, vapor de mercurio y otros)

han sido aplicados en una escala limitada. Los ciclos combinados de vapor y aire han alcanzado aplicación comercial muy amplia debido a que:

- alta eficiencia térmica es alcanzada porque los dos ciclos son termodinámicamente complementarios, puesto que calor es desechado por el ciclo Brayton (turbina de gas) a un nivel de temperatura que puede ser luego usado en el sistema de vapor con el ciclo Rankine.
- Los dos fluidos de trabajo son aire y agua los cuales son disponibles en abundancia, son baratos y no son tóxicos y
- el equipo para estos dos ciclos viene siendo producido por muchos fabricantes.

Propiedades y ventajas del ciclo combinado

Entre las propiedades y ventajas de esta moderna técnica de instalaciones de centrales térmicas tenemos a continuación:

Gran flexibilidad en el uso de combustibles

Las centrales de ciclo combinado presentan una gran flexibilidad respecto al combustible debido a que pueden utilizar prácticamente todos los combustibles líquidos y gaseosos, es decir tienen la capacidad de utilizar una variedad de combustibles que van desde el gas natural, diesel N°2, hasta el gas de carbón.

Gas natural: combustible ideal en grandes cantidades

Una razón importante del éxito de las instalaciones de ciclo combinado se debe al gas natural, combustible disponible en grandes cantidades en muchos lugares del mundo.

El gas natural es el término genérico aplicado a la mezcla de hidrocarburos en fase gaseosa que ocurre en acumulaciones subterráneas naturales, denominadas reservorios. El metano (CH_4) es su principal componente, aunque su composición puede incluir cantidades variables de otros hidrocarburos y de sustancias que no son hidrocarburos. El gas natural es tratado en plantas donde se separan el gas seco y los líquidos del gas natural, mediante procesos de refrigeración y de presión.

Desde el punto de vista técnico el gas seco es el combustible ideal para las turbinas a gas, ya que por carecer de contaminantes (azufre, sodio y/o vanadio), es el único combustible hidrocarburo capaz de impactar los álabes de las turbinas de gas sin crear problemas metalúrgicos. Similarmente desde el punto de vista ecológico, el gas se constituye en el combustible ideal ya que conlleva las más reducidas emisiones contaminantes; de hecho no hay SO_2 y la emisión de CO_2 es la mitad de la que sería emitida al medio ambiente si se empleara petróleo residual y tres veces menor cuando se le compara con la cantidad emitida si se empleara carbón mineral. Otro atractivo desde el punto de vista de la ingeniería es que una termoeléctrica de ciclo combinado de gran capacidad alcanza las más alta eficiencia térmica en el uso del combustible y tiene mucha menor dimensión que una carboeléctrica. En la tabla 1 se resumen las ventajas del gas seco respecto a otros combustibles.

Tabla 1.1: Ventajas del gas seco sobre otros combustibles¹⁰.

Condiciones	Combustibles a sustituir			
	Gas seco	Carbón	Residual	Diesel
Limpieza	*****	*	**	***
Contaminación	****	*	*	***
Equipo silencioso	****	***	***	*
Simplicidad de equipo	****	*	***	**
Facilidad de control	*****	*	***	**
Control derrames / mermas	*****	*	**	**
Seguridad de suministro	****	*	**	**

*: Indica porcentaje de ventaja.

Fuente: Tesis “Análisis Del Diseño Termodinámico De Centrales Eléctricas De Ciclo Combinado” de Jaime Mendoza Nalvarte (Perú, 2002)

Las centrales de ciclo combinado explotadas con gas natural son sistemas de producción de energía "limpios". El gas natural asegura una combustión muy limpia si se compara con los demás combustibles fósiles. Dicha combustión no produce prácticamente SO₂, y al mismo tiempo mucho menos CO₂ que con los demás combustibles fósiles. Con ello las instalaciones de ciclo combinado solicitan menos fuertemente el medio ambiente.

Además, una central de ciclo combinado utiliza solamente dos tercios del caudal de agua necesario para una instalación convencional de la misma potencia. Economías de gastos de explotación por menor consumo de agua de refrigeración y caudales inferiores de agua usada, la cual debe retornarse al ambiente tras su tratamiento, constituyen aspectos positivos. Finalmente, por su construcción compacta, la demanda de

espacio de las centrales de ciclo combinado se reduce considerablemente. Todo esto conduce igualmente a una disminución de la contaminación del medio ambiente.

Rendimiento elevado

Las instalaciones de ciclo combinado se basan en procesos que utilizan de manera óptima la energía del combustible: los gases de escape de la turbina de gas no se expulsan simplemente al exterior, sino que se utilizan para la producción complementaria de energía con la ayuda de una caldera de recuperación y de un turbo grupo de vapor. Esta es la razón del rendimiento sumamente elevado de centrales de ciclo combinado, que hoy en día se sitúa en un promedio de 55% para la producción de potencia eléctrica. En una época en la que los recursos del medio ambiente resultan cada vez más escasos y en la que la energía debería utilizarse parsimoniosamente, la producción óptima de energía desde los puntos de vista económico y de protección del medio ambiente constituye un imperativo muy serio.

Confiabilidad, disponibilidad y seguridad muy altas

El ciclo combinado se ha simplificado y al mismo tiempo se ha mejorado el diseño de los equipos que conforman la unidad, dando como resultado un aumento de la confiabilidad de la planta por encima del 97%. Los nuevos diseños incorporan componentes activos redundantes, los cuales proveen una cobertura importante contra problemas comunes de operación, logrando una sustancial tolerancia de fallas en la planta.

El diseño de la central permite asimismo realizar mantenimientos rápidos debido a su sencillez y accesibilidad, lo que permitirá a la central estar disponible para generar más horas al año. Asimismo gracias a los adelantos en la electrónica y a los modernos

sistemas de control permiten que la central trabaje en condiciones óptimas y seguras la mayor parte del tiempo.

Aprovechamiento del combustible es óptimo

El calor de los gases de escape de las turbinas de combustión es aprovechado de una manera óptima para la producción de vapor en las calderas de recuperación de calor.

Este es enviado a la turbina de vapor donde se expande generando trabajo. Generalmente no necesita quemadores adicionales debido a las altas temperaturas con que salen los gases de escape de las turbinas de combustión.

Con precalentamiento del agua de alimentación

Se utiliza el calor recuperado de los gases para el precalentamiento de la línea de alimentación de la caldera, siendo tal operación normalmente efectuada a través del sangrado regenerativo⁹. La recuperación térmica del turbogas permite eliminar este inconveniente en la turbina de vapor. El resultado es un aumento notable del caudal en la turbina, en el caso de baja presión, y por tanto un incremento en la potencia a igual producción de vapor de alta presión y de consumo de combustible en el generador de vapor. La posibilidad práctica de operar en este modo está, en una instalación existente, condicionada por los márgenes de proyecto existentes en la turbina de baja presión, en el alternador y en el condensador.

En la figura 1.14 se muestra el esquema de esta operación. Esta intervención requiere modificaciones mínimas en la instalación existente: se trata de interceptar la línea de alimentación de la caldera, a fin de poder desviar el flujo de agua hacia la caldera de recuperación. En caso de falla en el funcionamiento del turbogas, no compromete la

posibilidad de mantener en ejercicio el grupo a vapor, es suficiente reactivar la línea de alimentación tradicional. El incremento de potencia de la central es estimable en alrededor de 20-35%, mientras el rendimiento total puede aumentar algunos puntos.

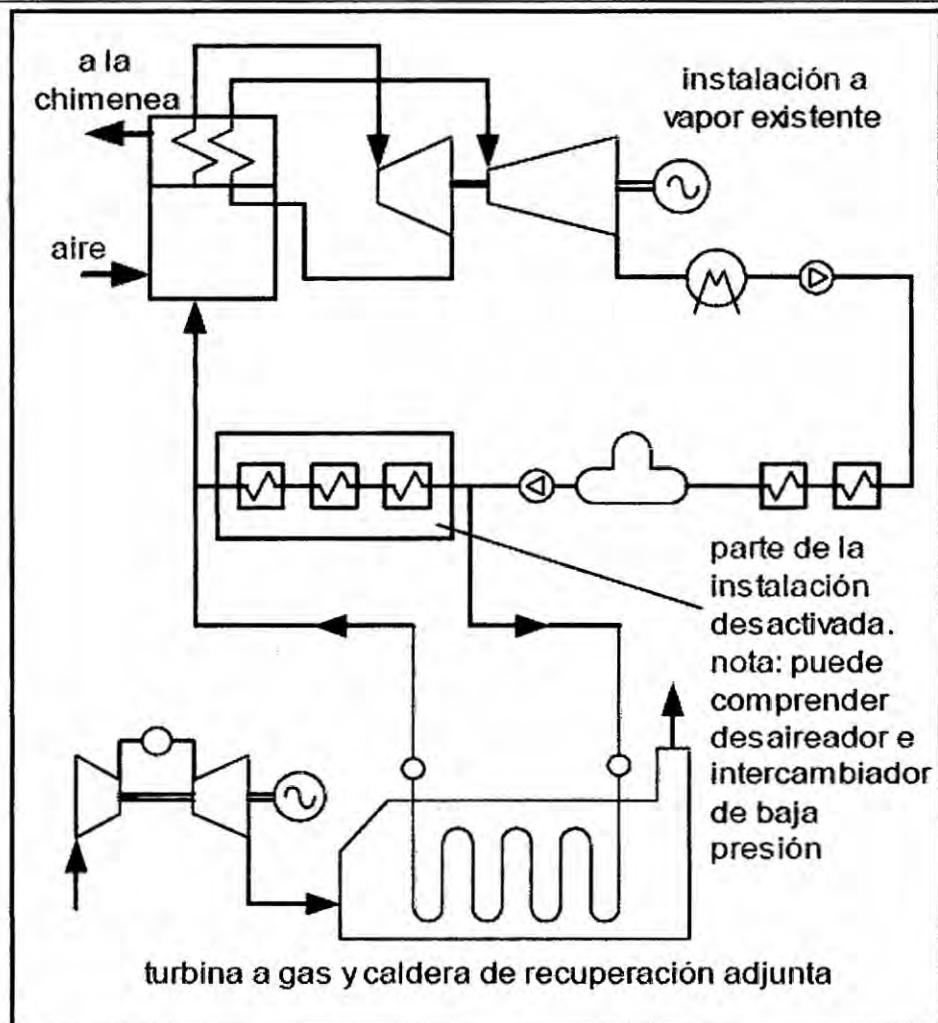


Figura 16: Repotenciación de central a vapor con turbina a gas. Esquema con precalentamiento del agua de alimentación a la caldera.

Fuente: Tesis “Análisis Del Diseño Termodinámico De Centrales Eléctricas De Ciclo Combinado” de Jaime Mendoza Nalvarte (Perú, 2002)

Los Combustibles

Es otro parámetro importante que se debe tener en cuenta al momento de diseñar centrales eléctricas de ciclo combinado. El tipo de combustible y su composición influyen directamente sobre la potencia de las turbinas de gas y sobre sus emisiones. Estos determinan la temperatura con que deben salir los productos de combustión del generador de vapor por recuperación de calor, para evitar la precipitación de vapores ácidos que provocarían corrosión en los tubos del economizador de la caldera de recuperación.

Las plantas de ciclo combinado pueden quemar combustibles que usan las turbinas de gas y los calderos convencionales, y algunos con menor grado que aquellos adecuados para turbinas de gas como el carbón o coque. Combustibles para turbinas de gas incluyen combustibles gaseosos como el gas natural, gas de refinería y gas licuado de petróleo, y combustibles líquidos incluyendo destilados, nafta, petróleo crudo y petróleo residual.

Por lo general no hay restricciones de operación o problemas con combustibles gaseosos o petróleos ligeros. El petróleo crudo o residual a menudo requerirá algún tratamiento para satisfacer la operación de las turbinas de gas. El sodio, potasio o vanadio son algunos elementos que se hallan en el petróleo crudo o residual. Si no son separados o inhibidos, estos producen corrosión en los componentes que se encuentran

en la trayectoria de los gases calientes como cubiertas de combustión, piezas de transición y en los cubos y toberas de la turbina. El sodio y potasio pueden ser separados por limpieza con agua y separando luego el agua luego con un precipitador centrífugo o electrostático. El vanadio no puede ser separado tan fácilmente, pero es inhibido inyectando componentes de magnesio, $MgSO_4$ u otros, en una relación tal que la concentración de magnesio sea tres veces la concentración de vanadio.

La ceniza formada por el petróleo crudo o residual, se deposita en el cubo y toberas de la turbina y en los tubos del generador de vapor por recuperación. Los depósitos acumulados en los tubos del generador de vapor pueden ser parcialmente separados por limpieza regular del hollín. Los depósitos acumulados en la turbina pueden ser separados inyectando componentes abrasivos, dentro del sistema de combustión de la turbina.

La performance de las turbinas de gas y de sistemas de ciclo combinado se degradan con el tiempo cuando es quemado petróleo crudo o residual, por los depósitos de ceniza acumulados en las turbinas. Variaciones frecuentes de la performance de ciclos combinados con el tiempo se muestran en la figura 3.6 cuando se quema petróleo residual y en la figura 3.7 cuando se quema petróleo crudo respectivamente. Las variaciones mostradas en estas curvas son el resultado de los depósitos de ceniza acumulados en las turbinas de gas, no incluye el fouling³ del caldero ya que la performance del caldero puede ser prevenida degradándola con limpieza regular del hollín. Aunque la ceniza formada por el petróleo crudo o residual degradan la performance promedio de sistemas de ciclo combinado, ellos son económicamente utilizados en el di-

seño de centrales de ciclo combinado porque su costo es menor que aquel de otros combustibles líquidos y gaseosos.

Consideraciones ambientales

El diseño de centrales de ciclo combinado generalmente requiere un estudio de las condiciones ambientales. Aun cuando varias plantas de ciclo combinado pueden satisfacer los requerimientos de muchos países desarrollados, sistemas especiales para control de emisiones o control de ruido muchas veces pueden ser requeridos.

Emisiones

Estas son consecuencia del tipo de combustible quemado por las centrales de ciclo combinado. Es otra consideración a tener muy en cuenta al momento de diseñar una central eléctrica de ciclo combinado.

Las emisiones que comúnmente son controladas son óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), hidrocarburos no quemados (UHC), monóxido de carbono y material particulado (PM). Las turbinas de gas y centrales de ciclo combinado por lo general satisfacen los límites impuestos a las emisiones, pero algunos combustibles pueden requerir ciertas limitaciones o sistemas especiales para el control de estas.

Las emisiones NO_x de turbinas de gas son principalmente una función de la temperatura de llama. Poco NO_x es formado si la temperatura de llama está por debajo de 1650 °C, pero los NO_x incrementan exponencialmente cuando la temperatura de llama excede este valor. Por tanto, los métodos de control de emisión de NO_x son principalmente aquellos que reducen o limitan la temperatura de llama. Los métodos que limitan la emisión de NO_x en combustores convencionales son:

- Disminuir la relación combustible aire.
- Inyección de agua.
- Inyección de vapor.

Bajas relaciones de combustible aire limitan la temperatura de llama por incremento del flujo de masa de aire a través de la zona de llama. La inyección de agua y de vapor reduce la temperatura de llama por la inyección de sustancias inertes que tienen alta capacidad térmica en la zona de llama. El límite en la reducción de la temperatura de llama es la estabilidad de la llama. Las emisiones de NO_x por estos métodos pueden ser controladas de 40 a 100 ppm, muestra seca, referida a 15% en volumen de oxígeno. El gas natural tiene las menores temperaturas de llama y emisiones. Los gases propano y butano, y combustibles líquidos presentan mayores temperatura de llama y emisiones de NO_x.

Compuestos de nitrógeno ligados a combustibles líquidos también producen NO_x.

El porcentaje de nitrógeno convertido a NO_x depende sobre todo del diseño del combustor.

El rango frecuente es de 50 a 70%. Los quemadores de calderos con encendido pueden ser configurados de forma que puedan reducir algo de NO_x formado por el combustor de las turbinas de gas. Los calderos con encendido suplementario con quemadores de parrilla producen usualmente NO₂ que es a veces visible en la chimenea como una neblina marrón.

Los quemadores de turbinas de gas y calderos con encendido convierten todo el azufre del combustible a SOx. Por lo tanto, las emisiones de SOx son controladas limitando el contenido de azufre en el combustible. Los hidrocarburos no quemados y las emisiones de CO en los gases de escape frecuentemente son bajos, variando de 5 a 20 ppm. Por lo cual, en muchos países no hay control para este tipo de emisiones.

Las emisiones de material particulado de las turbinas de gas son frecuentemente bajas, por lo que muchas veces no son reguladas. Los combustibles influyen la emisión de PM. Estas se forman de los rasgos de metal del combustible cuando se combinan con el oxígeno, azufre u otros elementos activos presentes en el combustor.

La descarga térmica

La descarga térmica es una consideración técnica y establece el dimensionamiento del sistema de refrigeración por entrega máxima admisible de calor al ambiente.

La descarga térmica por refrigeración media (río, mar, torre de enfriamiento, aire, etc.) es baja en los ciclos combinados por recuperación de calor. La descarga térmica de un sistema de potencia de ciclo combinado frecuentemente es de 2100 a 2637 kJ/kwh si se comparan con los 4200 a 4747 kJ/kwh de una planta de vapor convencional. Sistemas de ciclo combinado con encendido suplementario desechan hasta 3165 kJ/kwh con sistemas de refrigeración media y ciclos combinados con encendido total alcanzan hasta 5275 kJ/kwh.

Rendimiento del ciclo combinado

Es la prestación más importante a tomar en cuenta al momento de diseñar las centrales eléctricas de ciclo combinado. Un examen más generalizado de las prestaciones de

plantas de ciclo combinado es sintetizado en el acostumbrado plano trabajo útil rendimiento, al variar la relación de compresión del ciclo de las turbinas de gas tal como se muestra en la figura 3.8. En tal figura son representados:

(i) los puntos a varios del ciclo simple, para la tecnología actual y para aquella de la futura generación (tecnología B y A definidas en la figura 3.8 con TIT de 1280 y 1400°C respectivamente),

(ii) los puntos del ciclo combinado para la tecnología B, con ciclos de recuperación con presiones de un nivel, dos niveles y tres niveles con recalentamiento, y (iii) los puntos del ciclo combinado para la tecnología A, con ciclo de recuperación de tres niveles de presión con recalentamiento. Se puede observar lo siguiente:

- El rendimiento del ciclo combinado con turbinas a gas modernas y de gran tamaño son siempre superiores al 50%, el gráfico evidencia el enorme salto respecto al ciclo simple.
- El argumento del rendimiento es escasamente influenciado por la relación de compresión de las turbinas a gas: la energía térmica a alta temperatura dispersa a la descarga de un ciclo a bajo viene de todos modos eficazmente recuperada en el ciclo de vapor elevando la calidad. El trabajo específico crece al disminuir en relación a la mayor potencia desarrollada por un ciclo de vapor.
- Es importante notar que el óptimo en un ciclo combinado está alrededor de 12-18.

Esto explica uno de los motivos más importantes de porque las unidades heavy-duty son proyectadas a notablemente inferior de aquel optimal para el rendimiento del ciclo

clo simple. Este es en realidad optimizado por el rendimiento de un ciclo combinado, además que por el obtenimiento del máximo trabajo específico y del mínimo costo por unidad de potencia.

- El aumento de las prestaciones de las turbinas a gas, pasando de la tecnología B a la A y en particular aumentando TIT, implica un aumento todavía más sensible de las prestaciones del ciclo combinado. La ventaja de un aumento de TIT no es mas amortiguado por un aumento de la temperatura de descarga de los gases, porque este es recuperado en modo termodinámicamente eficiente. Con máquinas de próxima generación y con un ciclo de vapor adecuado, la figura señala rendimientos netos en torno al 58%, un valor confirmado por el estudio de los principales constructores del sector, obtenidos además sin recurrir particularmente elevados (el campo optimal está en torno a 20). El umbral del 60%, impensable con cualquier otra técnica de conversión termodinámica, aparecerá en la puerta de las centrales de ciclo combinado del próximo decenio.

El “rendimiento térmico” conocido también como “rendimiento de primera ley”. Se define para un ciclo de potencia como:

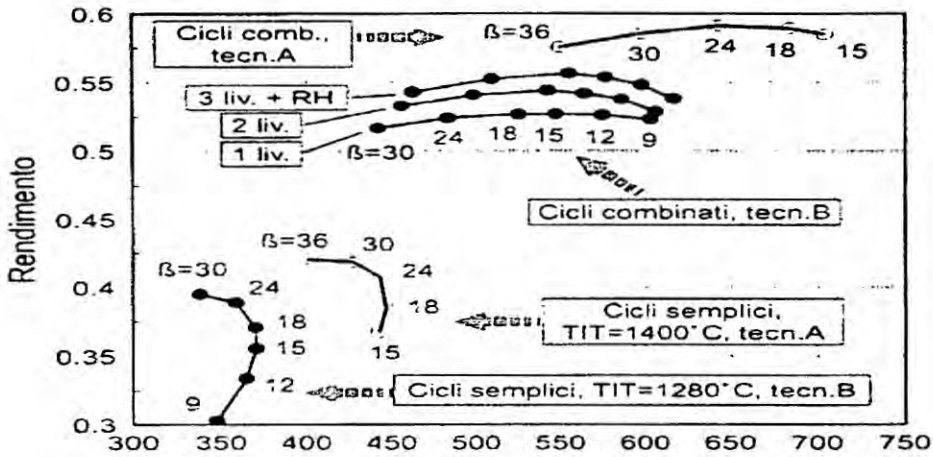


Figura 17: Trabajo Específico Kj/Kg.

Fuente: Tesis "Análisis Del Diseño Termodinámico De Centrales Eléctricas De Ciclo Combinado" de Jaime Mendoza Nalvarte (Perú, 2002)

$$\eta I = W_{neto} / Q_a$$

Donde W_{neto} es la producción de trabajo o potencia útil desarrollada por el ciclo de potencia y Q_a la entrada de calor suministrado al sistema desde una fuente externa (combustible).

Resultados del diseño termodinámico de la central eléctrica de ciclo combinado

El cálculo completo del diseño termodinámico consiste en encontrar la potencia útil desarrollada, el consumo de combustible, el rendimiento y las características termodinámicas de los diferentes puntos del ciclo. Algunas veces, parámetros como las presiones y las temperaturas principales en el ciclo de vapor pueden estar previamente definidos, como en el caso de elección de un ciclo estandarizado cuando se necesite vapor con presión y temperatura determinadas para un proceso industrial, como sucede en determinadas industrias. Los demás parámetros se determinan procediendo a una serie de cálculos del ciclo con diferentes condiciones. Así, se pueden comprobar

las influencias que tienen ciertas modificaciones de los parámetros de diseño sobre la potencia, el rendimiento y los gastos en las centrales de ciclo combinado.

Las turbinas de gas

La característica de la performance de las turbinas de gas que influye en la performance del ciclo combinado es su potencia específica. La potencia específica es la potencia producida por la turbina por cada unidad de flujo de aire. La eficiencia del ciclo combinado aumenta con el aumento de la potencia específica de las turbinas de gas. La potencia específica es calculada dividiendo la potencia de la turbina de gas por el flujo de aire y son dimensiones frecuentes kw/(kg/s). Esto puede ser reordenado a kw.s/kg y en esta forma se refiere al trabajo específico.

Rendimiento termodinámico del ciclo vapor

El rendimiento termodinámico o de primera ley del ciclo con turbina de vapor referido a la potencia térmica de entrada contenida en los productos de combustión, se define como:

$$\eta_{I.vapor} = \frac{\text{Potencia eléctrica útil del ciclo vapor}}{\text{Potencia térmica de los productos de combustión}}$$

$$\text{ó} \quad \eta_{I.vapor} = 100 \frac{Pot_{vap}}{Pot_{gas}}$$

Rendimiento termodinámico del ciclo combinado

El rendimiento termodinámico o de primera ley de una central de ciclo combinado con turbina de gas y de vapor, se define como:

$$\eta_{I,vapor} = \frac{\text{Potencia eléctrica útil del ciclo combinado}}{\text{Potencia térmica del combustible}}$$

$$\circ \quad \eta_{I,CC} = 100 \frac{Pot_{gas} + Pot_{vap}}{LHV * G_{fuel}}$$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL AUTOR

- El uso de las computadoras hace más eficaz y eficiente el diseño de las centrales eléctricas de ciclo combinado, pero es imprescindible el conocimiento y manejo de las principales variables de diseño del ciclo combinado para percibir que es influyente.
- El programa de computadora significa un ahorro de tiempo y una solución al problema de cálculo reiterado de funciones iterativas como son el compresor, la turbina de gas, la caldera de recuperación, turbina de vapor, etc. Tal vez el cálculo y procedimiento más complicado es la presencia de refrigeración de los álabes de la turbina de gas.
- En la actualidad el término optimización viene siendo aplicado a muchos sistemas. El programa hecho ha sido elaborado de tal forma que puede ser también optimizado. Este se haría en principio teniendo como función objetivo el rendimiento de primera ley y como variables principales de diseño la temperatura de salida de los gases.
- Gran parte de la información referida al diseño global de centrales eléctricas de ciclo combinado es restringido y confidencial, manejado por un grupo de empre-

sas que tienen muchos años de experiencia en el campo del diseño, fabricación e instalación de estas centrales de generación.

- Este trabajo es un aporte a la línea de investigación sobre generación térmica de energía eléctrica, dada la situación energética del país y mundial. Sería interesante por ejemplo repotenciar a ciclo combinado la central térmica de Ventanilla y más aún con la futura producción del gas de Camisea, combustible ideal para las centrales eléctricas de ciclo combinado.

Exebio T., Vania B. y Prieto R., Marco V., en su tesis “Impacto económico de las emisiones de gases Efecto invernadero de las centrales térmicas En el Perú”, mencionan que la contaminación del aire ha venido tratándose en nuestro país en los últimos años con mayor responsabilidad, debido en gran parte a que dicho problema es hoy en día reconocido por parte de las autoridades de gobierno a nivel central, regional y local, por el abastecimiento insuficiente e inestable de energía a precios asequibles, pero también por el daño ambiental causado.

Esta investigación busca principalmente, cuantificar los beneficios y costos económicos de la producción de las centrales térmicas y el impacto de las emisiones de gases efecto invernadero sobre la salud, biodiversidad, cultivos, materiales de construcción y cambio climático utilizando el método de Análisis Costo-Beneficio (ACB). Los resultados que se obtienen demuestran que los beneficios económicos son mayores a la suma de los costos privados y sociales de la generación eléctrica en nuestro país.

Por otro lado afirman que la energía eléctrica constituye uno de los principales motores del crecimiento y desarrollo económico y social de un país, debido a que casi to-

das las actividades indispensables se realizan gracias a ella. Es muy difícil, hoy en día, encontrar una sociedad que haya alcanzado un nivel de desarrollo dejando de lado este bien de primera necesidad. Por ello, la industria eléctrica es considerada un sector clave para las economías de los países.

Por otra parte, gracias a los cambios tecnológicos, el sector eléctrico tanto en el ámbito internacional como en nuestro país ha sufrido cambios en su organización, tendiendo a la liberalización del mercado eléctrico, caracterizada por la desintegración vertical de las actividades económicas (generación, transmisión, distribución y comercialización) y la creación de organismos supervisores que vienen regulando toda la actividad en nuestro país.

Debido a esto las energías “limpias” constituyen un factor muy importante dentro de las actividades del mercado eléctrico, sobre todo en la generación.

En nuestro país, de acuerdo al recurso utilizado por las centrales pertenecientes al Sistema Interconectado Nacional (COES-SINAC), se identifican dos tipos de centrales generadoras, las cuales produjeron en total 35,218.60 GW de energía eléctrica en el 2011, de la cual 58% fue producido por centrales hidroeléctricas que utilizan la potencia del agua y el porcentaje restante fue generada por centrales térmicas que utilizan fuentes de calor que se produce fundamentalmente en la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural.

Las centrales térmicas, si bien representan un porcentaje importante dentro de la generación eléctrica, también constituyen una gran fuente de emisión de diversos contaminantes, que pueden ser producidos por la emisión de gases (dióxido de carbono,

dióxido de azufre, óxido de nitrógenos y partículas), vertimientos de agua y desechos sólidos.

Debido a esto, contribuye al desarrollo de un problema que se está tratando actualmente, como lo es el cambio climático, fenómeno que se manifiesta por un aumento de la temperatura media del planeta, que tiene como consecuencia directa el aumento de la capacidad de retención de calor de la atmósfera. Un estudio reciente de Amestoy (2010) corrobora que en los últimos años se está produciendo, de hecho, un aumento de la temperatura media de la tierra de algunas décimas de grado que podría llegar a estar entre 1,0 y 3,5 °C en el año 2100.

En este sentido, el mundo se enfrenta a un dilema, el abastecimiento insuficiente e inestable de energía a precios asequibles, y al daño ambiental causado por las emisiones. Pues, la demanda de energía no deja de aumentar, lo que representa una carga cada vez mayor para el medio ambiente. Esto llevó a plantearnos que las emisiones de gases efecto invernadero liberados por las centrales térmicas en el Perú generan un beneficio social menor al beneficio privado de las empresas.

Tradicionalmente, la planificación y operación de sistemas eléctricos se realiza de tal manera que se busca minimizar los costos de generación, sin considerar los niveles de emisiones producidos y sin tomar en cuenta los costos de la contaminación. Cabe resaltar que la inversión requerida por MW de potencia en una central hidroeléctrica es 30% mayor que una central térmica, por lo que el Estado Peruano acordó bajo el decreto legislativo N° 1058 el régimen de la depreciación acelerada para efectos del im-

puesto a la renta con el objeto de incentivar la generación de energía eléctrica a base de recursos renovables.

Desde el punto de vista social, estos efectos deben considerarse como costos ya que dañan la vida de una forma u otra. Así, la mayor parte de las emisiones de contaminantes atmosféricos del sector proceden de las centrales que utilizan combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas natural y cuyo problema se ha convertido no sólo en una preocupación nacional sino también internacional.

El crecimiento económico que en los últimos años ha experimentado nuestro país viene acompañado por un incremento muy considerable en el consumo de energía eléctrica y por el aumento de las emisiones de gases efecto invernadero. Principalmente la contaminación del aire es un tema que ha venido tratándose en nuestro país en los últimos años con mayor responsabilidad por parte de las autoridades de gobierno a nivel central, regional y local, debido en gran parte a que dichos problemas son actualmente reconocidos por nuestra población, la cual ha manifestado su preocupación por los problemas de salud que podría causarle, al estar expuesta continuamente a altas concentraciones de contaminantes.

Las empresas de generación y transmisión de energía eléctrica son responsables en la construcción y operación de sus instalaciones, que ocasionan impactos sobre el ambiente. Las empresas de generación de energía eléctrica desarrollan y ejecutan planes con la finalidad de cumplir la normativa vigente y futura. Estas acciones implican costos de inversión y operación adicionales.

El objetivo de esta tesis es determinar el impacto económico de las emisiones de gases efecto invernadero de las centrales térmicas en el Perú. Esto es de suma importancia para nuestro país ya que nos permitirá estimar el beneficio neto, medido desde el punto de vista de las pérdidas y ganancias generadas sobre el bienestar social, utilizando el método Análisis Costo-Beneficio (ACB), y nos permitirá conocer cuánto afectan económicamente las emisiones de gases efecto invernadero liberadas por las centrales térmicas en el Perú. Los resultados de nuestra investigación servirán como insumo a los funcionarios de gobierno, para que desarrollen estrategias con el fin de mejorar la calidad del aire en nuestro país, para que utilicen los recursos eficientemente e identifiquen las medidas político-administrativas y técnicas que se deban desarrollar para mitigar la contaminación del aire.

Bases teórico- conceptuales

La energía eléctrica se ha convertido en parte de nuestra vida diaria, y está íntimamente relacionada con los requerimientos actuales del hombre; sin ella, difícilmente podríamos imaginarnos los niveles de progreso que el mundo ha alcanzado.

Sin embargo, según la Comisión de Servicios Públicos de Wisconsin (PSC) una planta de energía puede afectar el medio ambiente por su construcción y su funcionamiento. Estos efectos, o impactos, pueden ser temporales o permanentes.

Según el Centro de estudios para el desarrollo económico de la Universidad de los Andes (2010) los impactos principales de las centrales eléctricas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2: Tipos de impactos ambientales

DIRECTO SOBRE LAS PERSONAS	ECOSISTEMAS Y PROCESOS BIOLÓGICOS	IMPACTOS SOBRE SISTEMAS NO VIVIENTES	AFECTACIÓN DE COMPONENTES Y CUASI EXISTENCIAS
<ul style="list-style-type: none"> - Salud. medidos en términos de mortalidad y morbilidad. generados por impactos en agua y aire. - Pérdidas de visibilidad. pérdidas de vistas escénicas y presencia de olores. 	<ul style="list-style-type: none"> - Productividad de los ecosistemas (agropecuarios, forestal, pesca comercial). - Estabilidad y diversidad de los ecosistemas (recreación, otros). 	<ul style="list-style-type: none"> - Afectaciones a materiales, infraestructuras públicas y privadas. suelo. incrementos en costos de producción. - Afectaciones del macro y micro clima. 	<ul style="list-style-type: none"> - Afectación total y parcial del patrimonio cultural. relaciones sociales. desaparición de especies de flora y fauna y ecosistemas.

FUENTE: Centro de Estudios para el Desarrollo Económico (CEDE). Universidad de los Andes (2010)

Una planta de energía y sus componentes auxiliares (por ejemplo, ductos de gas natural, tomas de agua y de descarga, entrega de carbón y sistemas de almacenamiento, la transmisión de nuevas líneas, y los sitios de disposición de residuos) ocupan un espacio en el suelo y en el aire, y en la mayoría de los casos emiten contaminantes al aire. Los combustibles fósiles son la principal fuente de energía y también, por desgracia, de contaminantes.

TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo evaluativa porque se busca evaluar a través del análisis Costo-Beneficio el impacto económico de las emisiones de gases efecto invernadero de las centrales térmicas en el Perú. Asimismo, este es un estudio de carácter cuantitativo, pues a pesar de que no implica el uso de herramientas como la encuesta se utilizarán bases de datos cuantitativas.

ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO (ACB)

La esencia de un análisis económico, es comparar todos los beneficios y costos de emprender determinada acción, esta acción es la mejor opción sólo si la suma de todos los beneficios por emprenderla es mayor que la suma de todos sus costos (Just et al., 1982). Por ejemplo, tenemos el caso de los proyectos en sectores claves para el desarrollo económico de un país como el sector energético, los cuales generan impactos positivos o negativos en el medio ambiente con implicancias en el bienestar social. En este contexto, para efectos de la evaluación de los impactos económicos y sociales se han desarrollado diversos métodos por la economía pública, uno de estos métodos es el ACB.

El ACB es una herramienta de evaluación de proyectos, que permite estimar el beneficio neto de un proyecto, medido desde el punto de vista de las pérdidas y ganancias generadas sobre el bienestar social. Es decir, nos permite cuantificar los costos y beneficios de las decisiones a tomar por parte de un agente, y determinar si todos los beneficios originados pueden compensar los costos totales.

CONSIDERACIONES FINALES DEL AUTOR

El método de Análisis Costo-Beneficio (ACB) nos permite estimar el beneficio neto de un proyecto, medido desde el punto de vista de las pérdidas y ganancias generadas sobre el bienestar social. En esta investigación se concluye que el beneficio neto económico de las emisiones de gases efecto invernadero de las centrales térmicas en el Perú es un poco más de dos mil millones US\$. En la aplicación del método ACB, herramienta indispensable para saber el impacto económico- ambiental, se utilizaron información y datos relativos a cada una de las centrales térmicas que pertenecen a las

empresas que forman parte del COES-SINAC con la finalidad de poder estimar si el impacto por los costos ambientales, producto de la generación eléctrica, no representaba una pérdida económica para nuestro país.

Los beneficios económicos generados por los aumentos en la producción de energía eléctrica, calculados utilizando como precio el costo marginal de corto plazo (precio spot), son cercanos a los 6 mil millones de dólares, mientras que los costos privados, que incluyen los costos fijos y variables (no combustible y combustible), son cercanos a los 3 mil millones de dólares y para el caso de los costos ambientales, éstos fueron estimados en 690 millones de dólares. De acuerdo a esto, tenemos que los beneficios económicos son superiores a los costos económicos tanto privados como sociales. De hecho, cuando los beneficios y costos económicos se calculan, las centrales térmicas están generando beneficios que son 1,65 veces más que la suma de los costos, lo que contradice nuestra hipótesis inicial.

Debido a que los beneficios económicos son mayores a los costos económicos relacionados, las empresas de generación eléctrica pueden permitirse la condición de pagar por sus costos reales, ya que la utilización de tecnologías como el carbón, el petróleo y el gas natural CS, abaratan los costos de las empresas generadoras de energía eléctrica, cargándolos al ambiente. Por lo tanto, las empresas del sector eléctrico siguen operando minimizando los costos de generación, sin considerar los niveles de emisiones producidos y sin tomar en cuenta los costos de la contaminación. Desde el punto de vista social, estos efectos deben considerarse como costos ya que dañan la vida de una forma u otra.

Finalmente, a pesar del hecho que la contaminación ambiental no es de la magnitud que se esperaba, el estado no puede dejar de aplicar mecanismos de control para poder realizar una adecuada distribución de las responsabilidades de cada empresa.

RECOMENDACIONES DEL AUTOR

Nuestro país, se encuentra en una situación, tal que casi la totalidad de la generación eléctrica está en función de centrales hidroeléctricas y térmicas, siendo éstas últimas las que más costos de contaminación ambiental producen, por lo que se deben adoptar ciertas medidas necesarias para poder hacer frente a este contexto en que se desenvuelven en el presente las actividades económicas y sociales. Para lograr esto, es necesaria la presencia y reglamentación del Estado que permita influir sobre las modificaciones de la conducta en la participación de los diversos actores en materia energética y ambiental, que ha cobrado una mayor relevancia dentro del proceso de deterioro que se produce a nivel mundial.

En primera instancia, se plantea la necesidad que las empresas generadoras de energía eléctrica internalicen los costos externos, pero para poder lograr esto es necesario y fundamental que en nuestro país se comience a tener un registro detallado sobre la cantidad de los gases de efecto invernadero que son producidos durante la fase de generación de la energía eléctrica, ya que no se cuenta con un inventario detallado de cada una de las centrales térmicas o de manera total, solo existen pequeños registros, por parte de la Oficina de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) pero principalmente para los sistemas aislados, que no permiten tener una visión global por el mínimo porcentaje que representan estos sistemas. Un claro ejemplo del gran avance

en materia de recolección de información es la Unión Europea que para poder realizar su estudio Cost Assessment of Sustainable Energy Systems contaba con una base de datos muy completa para cada país que la conforma.

Otros factores que deben ser revisados y modificados son los estándares ambientales, pues no se encuentran estipulados dentro de la legislación peruana los límites máximos permisibles de contaminación de las centrales térmicas para gases de efecto invernadero, sólo existen para efluentes líquidos.

Por esta razón, no se puede determinar cuándo es que una empresa contamina más allá de lo que pueden soportar los diferentes agentes, sobre los cuales tienen influencia directa. Desde el 2008 el estado viene promoviendo el uso de energías renovables para la generación de electricidad a través de la aplicación de mecanismos de incentivos estipulados en el decreto Supremo N° 009-93-EM, para las empresas responsables de las centrales que comenzaron sus operaciones después de su promulgación; sin embargo, no existen instrumentos bonificadores y penalizadoras para las centrales que ya venían operando, lo que permitiría una mayor internalización de los costos externos.

Cuando se haya podido alcanzar un mayor control sobre esto, existe la necesidad de poder aplicar instrumentos técnicos y económicos para mejorar la gestión ambiental. Por ejemplo, con el propósito de controlar la contaminación del aire, sería necesario implementar precipitadores electrostáticos, para la captura de emisiones. Su diseño e implementación deben establecerse como una prioridad dentro del marco regulatorio del Estado.

Otra instancia donde se pueden adoptar medidas para mitigar este impacto ambiental es la composición de la matriz energética peruana, que como se mencionó, se encuentra sobre la base de dos tecnologías. Si bien el Estado fomenta el uso de tecnologías limpias o renovables, en la actividad energética no existe un plan de energías renovables que nos permita seguir una línea de trabajo a largo plazo y buscar el mejor equilibrio tanto para generadores como para consumidores, ya que surgirían cambios en las tarifas eléctricas por la construcción de estas instalaciones de plantas de energía renovable. No obstante, se pueden ir formando bases sólidas para que el impacto no sea tan abrupto y significativo en años posteriores.

Por otra parte, en el mediano plazo, como existen proyectos de construcción de centrales eléctricas, los titulares deberían construir de preferencia centrales eléctricas de gas natural que utilicen tecnología de ciclos combinados (GN CC) porque que es la tecnología que contamina menos. Por lo tanto, se estaría contribuyendo a una mejora de la calidad del aire y a las posibilidades de mejora de la eficiencia energética mediante la modernización de los equipos.

Además, se deben aprovechar los incentivos otorgados por el estado para la construcción de centrales con energía renovables porque a pesar de que el monto de inversión es mucho mayor en comparación a las centrales térmicas, los externalidades a largo plazo son mínimos.

La adopción de estas medidas de mitigación, necesariamente han de tener en cuenta su alineación con las prioridades nacionales, en términos del mejoramiento de la cali-

dad de vida y de las infraestructuras de servicios, con el propósito de orientar los esfuerzos hacia el desarrollo sustentable.

APORTE PROPIO TRAS EL ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE LOS ANTECEDENTES DEL AMBITO NACIONAL

Después de realizar un análisis amplio de la literatura y trabajos existentes en el Perú, es decir en el ámbito nacional, en lo que respecta a Calderas Piro-tubulares y Plantas Térmicas, puedo mencionar lo siguiente:

- Me gustaría empezar por mencionar que la tesis, “Análisis Del Diseño Termodinámico De Centrales Eléctricas De Ciclo Combinado” menciona que en vista del creciente costo y cada vez menor disponibilidad de recursos de combustibles fósiles convencionales en el futuro, es muy importante que los ingenieros estudien cuidado-

samente la manera en que podrían aumentar la eficiencia en la utilización de la energía.

Cuando la leí, desde un inicio me pareció que entre el autor y yo había una cierta similitud, entre lo que cada uno de nosotros desea alcanzar en el ámbito personal y profesional como lo que cada uno pretende conseguir en el ámbito de la educación y la industria, es por ello que el objetivo es que tenemos es ofrecer sobre todo a los alumnos de las diversas universidades y centros de educación superior de nuestro país, así como a personas interesadas, un estudio y evaluación, desde el punto de vista termodinámico, del diseño de centrales eléctricas de ciclo combinado, concepto que en la actualidad viene predominando en las modernas centrales de generación térmica de energía eléctrica.

La diferencia con el autor es que él se permite elaborar un programa, como herramienta de sustento, para el desarrollo de su tesis. Dicho programa le permitió encontrar las prestaciones de diseño de centrales de ciclo combinado desde las más simples (un nivel de presión) hasta las más sofisticadas (tres niveles de presión con recalentamiento intermedio). En su programa puede visualizar los parámetros termodinámicos así como los perfiles de temperatura de diseño de la central de ciclo combinado, en cambio mi trabajo de investigación se plantea un nuevo diseño, una innovación en el diseño de calderas, como es el modelo "Medusa" como lo he bautizado, por la disposición de los tubos de fuego dentro de la caldera pirotubular.

El trabajo de investigación del autor en su constituyó en su momento un primer avance en el estudio de centrales térmicas de ciclo combinado para generación eléctrica,

fundamentada en el análisis termodinámico. Así como un material de consulta que me permitió contar con una mayor comprensión del análisis de este tipo de centrales de generación termoeléctrica, ya que mi tesis enfoca algo similar.

El trabajo de tesis del autor según mi parecer y también como él mismo lo manifiesta, proyecta demostrar con su estudio termodinámico, el diseño de centrales eléctricas de ciclo combinado, poniendo especial énfasis en el generador de vapor por recuperación de calor en el cual se recupera la energía de los gases de escape de la turbina de gas. Por otro lado el autor elaboró un programa, como herramienta de sustento para el presente trabajo.

Tanto el trabajo de investigación del autor como también el mío, nacen a raíz de que en la actualidad, el Perú viene atravesando por un proceso de cambios importantes en los diferentes sectores referentes al desarrollo en general. El sector eléctrico no ha sido la excepción de este desarrollo. La demanda de energía sigue e irá en aumento, por lo cual será necesario incrementar el potencial con la finalidad de poder atender el nuevo mercado eléctrico. Y si esto lo aunamos a los costos de combustibles en aumento y escasez de fuentes de energía, es entonces prudente maximizar la energía obtenida de los combustibles.

Por lo tanto, si tomamos en seria consideración estos parámetros de estudio, las centrales eléctricas de ciclo combinado cumplen con este objetivo, siendo las más importantes desde el punto de vista industrial, las más difundidas y además con mayor eficiencia termodinámica. Las centrales de ciclo combinado representan hoy indiscutiblemente la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica con gas natural

como combustible en términos de eficiencia, de emisiones y de costos (tanto de inversión como operativos) y ha sido en el último decenio protagonista de una real y propia revolución en la industria termoeléctrica, razón por la cual muchas plantas con turbinas de gas o de vapor se están transformando en plantas de potencia de ciclo combinado.

En nuestro país no viene siendo aplicada esta tecnología de la mejor manera, por no decir que estamos casi en nada. Ya que la generación térmica de energía eléctrica, viene siendo atendida en su gran mayoría, por no decir lo menos, con turbinas de gas, pero las cuales podrían ser repotenciadas a centrales de ciclo combinado, aprovechando de esta forma la gran cantidad de energía contenida en los gases de escape que hasta hoy viene siendo desechada al medio ambiente, y eso que el gas natural en nuestro país es el más usado en el sector comercial e industrial debido a las grandes reservas existentes en Camisea, y como es sabido por los diversos estudios que se han realizado a nivel mundial, es el combustible ideal de las centrales eléctricas de ciclo combinado.

- La tesis “Impacto económico de las emisiones de gases Efecto invernadero de las centrales térmicas En el Perú”, mencionan que la contaminación del aire ha venido tratándose en nuestro país en los últimos años con mayor responsabilidad, debido en gran parte a que dicho problema es hoy en día reconocido por parte de las autoridades de gobierno a nivel central, regional y local. Por ello Exebio T., Vania B. y

Prieto R., Marco V., también menciona que la contaminación atmosférica, el calentamiento global, los diferentes tipos de contaminación del suelo, así como la contaminación del aire ha venido tratándose en nuestro país en los últimos años con mayor responsabilidad, debido en gran parte estos problemas son hoy en día reconocidos por parte de las autoridades de gobierno a nivel central, regional y local, y todo esto por el abastecimiento insuficiente e inestable de energía a precios asequibles, pero también por el daño ambiental causado.

Con el presente estudio el autor pretende principalmente, cuantificar los beneficios y costos económicos de la producción de las centrales térmicas y el impacto de las emisiones de gases efecto invernadero sobre la salud, biodiversidad, cultivos, materiales de construcción y cambio climático utilizando el método de Análisis Costo-Beneficio (ACB). Los resultados que se obtuvieron demostraron que los beneficios económicos son mayores a la suma de los casos privados y sociales de la generación eléctrica en nuestro país.

Para todos es sabido de que la energía eléctrica constituye uno de los principales motores del crecimiento y desarrollo económico y social de un país, debido a que casi todas las actividades industriales, de servicios y las indispensables o sociales que abarcan las domésticas, se realizan gracias a ella. Es muy difícil, hoy en día, encontrar una sociedad que haya alcanzado un nivel de desarrollo dejando de lado este bien de primera necesidad. Por ello, el sector eléctrico es considerado un sector clave para las economías de los países.

Por otra parte, el autor y mi persona al leer el presente trabajo de investigación, concordamos que gracias a los cambios tecnológicos, el sector eléctrico tanto en el ámbito internacional como en nuestro país ha sufrido cambios en su organización, tendiendo a la liberalización del mercado eléctrico, caracterizada por la desintegración vertical de las actividades económicas (generación, transmisión, distribución y comercialización) y la creación de organismos supervisores que vienen regulando toda la actividad en nuestro país, especialmente la que tiene relación con las energías “limpias” las cuales constituyen un factor muy importante dentro de las actividades del mercado eléctrico, sobre todo en la generación.

En el presente trabajo se toma muy en cuenta que las centrales térmicas, si bien representan un porcentaje importante dentro de la generación eléctrica, también constituyen una gran fuente de emisión de diversos contaminantes, que pueden ser producidos por la emisión de gases (dióxido de carbono, dióxido de azufre, óxido de nitrógenos y partículas), vertimientos de agua y desechos sólidos, es por ello que esta característica contribuye al desarrollo de un problema que se está tratando actualmente, como lo es el cambio climático, fenómeno que se manifiesta por un aumento de la temperatura media del planeta, que tiene como consecuencia directa el aumento de la capacidad de retención de calor de la atmósfera.

Tomando las palabras del autor, podemos mencionar que en este sentido, el mundo se enfrenta a un dilema, el abastecimiento insuficiente e inestable de energía a precios asequibles, y al daño ambiental causado por las emisiones. Pues, la demanda de energía no deja de aumentar, y tampoco dejará de hacerlo, por el contrario cada día se

puede ver el aumento de la necesidad de la energía, lo que representa una carga cada vez mayor para el medio ambiente. Todo esto llevó al autor a plantearse que las emisiones de gases efecto invernadero liberados por las centrales térmicas en el Perú generan un beneficio social menor al beneficio privado de las empresas, con lo cual estoy en completo acuerdo.

Es bueno recordar que tradicionalmente, la planificación y operación de sistemas eléctricos se realiza de tal manera que se busca minimizar los costos de generación, sin considerar los niveles de emisiones producidos y sin tomar en cuenta los costos de la contaminación. Esto conlleva a que si lo analizamos desde el punto de vista social, estos efectos deben considerarse como costos ya que dañan la vida de una forma u otra. Así, la mayor parte de las emisiones de contaminantes atmosféricos del sector proceden de las centrales que utilizan combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas natural y cuyo problema se ha convertido no sólo en una preocupación nacional sino también internacional, y en eso sí estoy completamente de acuerdo con el autor.

Actualmente las empresas de generación y transmisión de energía eléctrica son responsables en la construcción y operación de sus instalaciones, que ocasionan impactos sobre el ambiente. Las empresas de generación de energía eléctrica desarrollan y ejecutan planes con la finalidad de cumplir la normativa vigente y futura. Estas acciones implican costos de inversión y operación adicionales.

Por ello se pudo evidenciar que el objetivo del autor con esta tesis era determinar el impacto económico de las emisiones de gases efecto invernadero de las centrales tér-

micas en el Perú. Y esto es de suma importancia para nuestro país ya que nos permitirá estimar el beneficio neto, medido desde el punto de vista de las pérdidas y ganancias y nos permitirá conocer cuánto afectan económicamente las emisiones de gases efecto invernadero liberadas por las centrales térmicas en el Perú. Los resultados de la investigación del autor sirven y servirán como insumo a los funcionarios de gobierno, para que desarrollen estrategias con el fin de mejorar la calidad del aire en nuestro país, para que utilicen los recursos eficientemente e identifiquen las medidas político-administrativas y técnicas que se deban desarrollar para mitigar la contaminación del aire.

MARCO TEÓRICO

2.2 CALDERAS

El término caldera es aplicable para cualquier dispositivo o mecanismo que sirva para la generación de:

1. Vapor para generación de potencia, procesos o propósitos de calentamiento
2. Agua caliente para procesos de calentamiento o como suplemento.

Las calderas son diseñadas para transmitir calor desde una fuente externa de combustión (quema de algún combustible) a un fluido que este contenido en la caldera, siendo este fluido agua o vapor, siendo calificada como calentador o intercambiador.

Cualquiera que sea el “líquido” que contenga, agua o vapor, debe ser entregado en las condiciones deseadas (presión, temperatura, flujo másico y calidad).

CONCEPTOS BÁSICOS DE CALDERAS

En la conversión de agua en fase líquida a fase vapor, se añade calor para inicialmente incrementar la temperatura del agua hasta la temperatura del punto de ebullición. El punto de ebullición del agua es 100 °C a la presión atmosférica y se incrementa cuando la presión en el sistema aumenta. La temperatura del punto de ebullición se conoce como la temperatura de saturación del vapor que se produce. Las relaciones entre la temperatura de saturación y la presión del vapor son propiedades termodinámicas fijas del vapor de agua ^a.

a = Lindsley, 1991

Durante la conversión del agua de su fase líquida a la fase de vapor, la temperatura no varía con la adición de calor. El fluido existe en una relación de saturación temperatura-presión durante la entera conversión del agua líquida a vapor. El calor que se añade durante la conversión a temperatura constante se denomina calor latente de vaporización. El vapor que se obtiene de esta forma y que no ha sido calentado a una temperatura superior a la temperatura de ebullición, se denomina vapor saturado. Si el vapor contiene partículas de agua líquida, se denomina vapor “húmedo”. El porcentaje en peso de las gotas de agua en el vapor húmedo se denomina “porcentaje de humedad”. El porcentaje de calidad del vapor húmedo se obtiene restando el porcentaje de humedad de 100 %. La cantidad total de calor que se requiere para producir una cantidad dada de vapor seco saturado incluye la cantidad de calor sensible utilizado para llevar el líquido al punto de ebullición y el calor latente de vaporización. Generalmente, cuando la presión del vapor saturado seco se incrementa, la cantidad de calor sensible necesario se incrementa y la cantidad de calor latente decrece.

La adición de calor sensible adicional al vapor seco saturado ocasiona que la temperatura pueda ser incrementada por encima de la temperatura de saturación. El vapor que es calentado por encima de la temperatura de saturación se denomina vapor sobrecalentado.

2.3 Clasificación de las Calderas

Las calderas pueden ser clasificadas de diversas maneras, pero en este caso se las ha clasificado en base a las siguientes características:

1. El uso
2. Presión
3. Material de fabricación
4. Contenido en tubos
5. Forma del tubo y su posición
6. Tipo de funcionamiento
7. Forma de circulación del fluido
8. Posición del hogar
9. Fuente de calor
10. Combustible que usa
11. Forma general
12. Características especiales

Tipos de Calderas Según su Uso

De la caldera de coraza simple cilíndrica, han sido obtenidas gran variedad de tipo de unidades de generación de vapor. Algunas han sido diseñadas para propósitos de calentamiento o generación de potencia en general, y se puede clasificar en:

- **Calderas portátiles:** incluía un tipo de locomotora usada en campos de petróleo y aserraderos, generadores de vapor miniatura; la mayoría de calderas tipo “firebox” son clasificadas como portátiles
- **Comerciales o residenciales**
Generalmente utilizadas para sistemas de calefacción en países de climas fríos

Tipos de Calderas Según su Presión

- **Calderas estacionarias:** Con el propósito de tener toda la seguridad en construcción de este tipo de calderas deben ser construidas de acuerdo a la sociedad americana de ingenieros mecánicos (ASME) “código de calderas y tanques a presión” (Boiler and Pressure Vessel Code). Este código diferencia las calderas de la siguiente manera:
 - Calderas de calentamiento de baja presión
 - Calderas de potencia (poder)
 - Calderas miniaturas
- **Calderas marinas:** este tipo de calderas son construidas de acuerdo a las regulaciones de la guardia costera, para que los navíos puedan navegar

Tipos de Calderas Según su Material

- **Calderas de hierro fundido:** está compuesta de un número de secciones, las cuales pueden ser conectadas entre sí por medio de conexiones o individualmente a cabecezas externas
- **Calderas de acero:** son fabricados con tubos y planchas de acero, las planchas son unidas por soldadura y los tubos son rolados o soldados para hacer una unión resistente.

Tipos de Calderas Según Contenido en Tubos

- **Calderas Piro-tubulares:** son calderas con tubos rectos que están rodeados de agua y a través de ellos pasan los gases productos de la combustión
- **Calderas Acuotubulares:** son calderas en las cuales contienen o pasa a través de ellas vapor o agua, y el calor es aplicado en la superficie exterior, los tubos son generalmente conectados con dos o más tambores en paralelo y son usualmente horizontales

Tipos de Calderas Según la Forma y Posición de los Tubos

La superficie de calentamiento puede ser clasificada:

- Por la forma del tubo: rectos, inclinados o sinuosa
- Por la posición de los tubos: horizontal, inclinadas o vertical

Tipos de Calderas Según su Funcionamiento

En esta clasificación se encuentran las calderas que funcionan con un quemador (fired) en las que el calor aplicado es proveniente de la combustión de algún combus-

tible y las calderas sin quemador (unfired) en la que el calor es proveniente una fuente externa.

Tipos de Calderas Según la Circulación de los Fluidos

La mayoría de las calderas operan con circulación natural o convectiva. Unas cuantas utilizan circulación positiva, en las que el fluido operativo puede ser forzado o controlado con recirculación parcial.

Tipos de Calderas Según la Posición del Hogar

- **Internos:** se considera que la caldera tiene hogar interno cuando la región de encendido está rodeada completamente por superficies de agua y la transferencia de calor es por radiación tipo firebox.
- **Externos:** se considera que la caldera tiene hogar si este es parte auxiliar o está construida bajo la caldera.

La mayoría de las calderas en la actualidad son construidas con hogares internos

Tipos de Calderas Según la Fuente de Calor

El calor puede ser proveniente de las siguientes fuentes:

- Combustión de combustibles sólidos, líquidos, o gaseosos
- Gases calientes de desechos provenientes de reacciones químicas u otras
- Calor proveniente de aplicaciones de energía eléctrica
- Utilización de energía nuclear

Tipos de Calderas Según el Combustible

Las calderas son designadas usualmente con respecto al combustible que se quema los cuales pueden ser:

Carbón, gas, fuel oil, madera, bagazo, o gases producto de otras fuentes

Tipos de Calderas Según su Forma General

Con el pasar del tiempo han aparecido una gran variedad de formas o tipos de caldera, de las cuales hay un grupo que ha sido reconocido ampliamente, en esta clasificación entran el tipo de calderas antes mencionadas: calderas Acuotubulares y Piro-tubulares.

Calderas de Recuperación de Calor

Tal como fue descrito con anterioridad, podemos darnos cuenta de la existencia de una gran cantidad de calderas, pero para el desarrollo de este proyecto nos vamos a centrar en calderas de recuperación de calor, de las cuales existen dos formas de aprovechamiento del nivel térmico de los gases de escape, en nuestro caso de una turbina a gas:

- El uso de los gases de escape para proceso de secado
- La otra consiste en la generación de vapor para transportar y distribuir energía térmica, a este método de aprovechamiento de gases las calderas toman el nombre de “Calderas de Recuperación de Calor”^b.

Estas calderas tienen como principal ventaja:

- Un costo relativamente bajo
- Una gran fiabilidad de operación

- Presentan un elevado rendimiento energético

Dentro de este grupo de calderas de recuperación se puede citar dos tipos de calderas, como son:

- Calderas Acuotubulares
- Calderas Piro-tubulares

b = Heat Recovery Steam Generator, HRSG

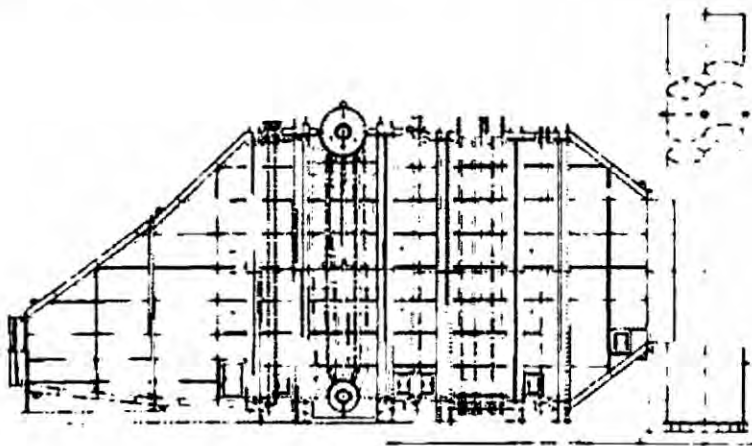


Figura 18: Caldera de recuperación de calor sin quemador, flujo de gas horizontal.
Fuente: Estudio Descriptivo Y Analítico De Una Planta De Ciclo Combinado



Figura 19: Caldera de recuperación de calor de circulación positiva.

Fuente: Estudio Descriptivo Y Analítico De Una Planta De Ciclo Combinado

Calderas Acuotubulares vs Piro tubulares

Generalmente las calderas Acuotubulares son convenientes para flujos de gas grandes que exceden millones de libras por hora y puede manejar presiones de vapor y temperaturas altas. Mientras que las calderas Piro tubulares son convenientes para presiones de vapor bajas, generalmente debajo de 500 psig.

Las calderas Acuotubulares pueden ser más pequeñas y pesar menos, particularmente si el flujo del gas excede 100,000 lb/h.

En ambos tipos de caldera se puede hacer uso de supercalentadores (Superheaters).

En las caldera Acuotubulares, pueden usarse superficies extendidas (tubos con aletas) para hacerlas más ajustadas, si el flujo de gas es limpio, también se requiere que la caída de presión del gas sea más bajo que para una caldera pirotubular.

MATERIAL DE LA CUAL ESTÁN CONSTRUIDAS.

La selección de materiales para la construcción de calderas está controlada por el Código de Calderas ASME.

- Las calderas para la generación de fuerza se construyen generalmente con aceros especiales.
- Las calderas de miniatura se fabrican de metales como: cobre, acero inoxidable, etc.
- Las calderas de calefacción de baja presión, se fabrican generalmente de hierro colado o de acero.
- Las calderas de acero son fabricadas con láminas de acero, procedentes de los trenes de laminación y con tubos de acero. Las planchas de acero son unidas por costuras de remaches o por costuras de soldadura. Los tubos se insertan dentro del tambor, en los cabezales o placas de soporte, siendo expandidos o soldados.

TAMAÑO.

La industria calderera ha reconocido las normas del Instituto de Calderas de Acero y las del Instituto de Manufactureros de Calderas y Radiadores.

- Calderas de acero: el Instituto de Calderas de Acero, en sus “Normas para Calderas de Acero”, estandariza el tamaño y clasificación de las calderas de fogón de acero, calderas escocesas, quemadores para calderas y calderas de acero para calefacción (a excepción de las calderas verticales que operan a más de 1 Kg./cm²), de la siguiente manera:
 - La determinación de la capacidad de las calderas (anteriormente colocadas en la categoría de “comerciales”), se basa únicamente en la superficie de calefacción. Las llamadas “tamaño veintidós” alcanzan superficies de calefacción de 12 hasta 332 m² (129 a 571 pies²), con rendimientos máximos de 163.296 a 4.536.000 Kcal. /h (648 a 18.000 MB/h)³.
 - Las capacidades de las calderas (anteriormente colocadas en la categoría de “residenciales”), se basan en la superficie de calefacción, verificadas mediante pruebas de rendimiento. Con 1.49 a 27.3 m² de superficie de calefacción, con rendimiento nominal hasta de 453.600 Kcal. /h °.
 - Las calderas para petróleo combustible y unidades formadas por calderas y quemadores, cuya capacidad se basa sólo en las pruebas de rendimiento. Con un rendimiento nominal hasta de 453.600 Kcal. /h (1.800 MB/h).
- Calderas de hierro colado: el “Código de Pruebas y Estimaciones para Calderas de Calefacción de baja Presión” establece las normas de las calderas de hierro

para calefacción, hasta una presión de 1.05 Kg. /cm² ^d, para un rendimiento hasta de 3.143 Kg. De vapor por hora.

CONTENIDOS DE LOS TUBOS.

A parte del tipo cotidiano de caldera de cuerpo de acero, hay dos tipos generalizados de calderas de acero:

- Calderas de tubo de humo: dotadas de tubos rectos instalados en la parte inferior de un tambor o un casco (bajo del nivel de agua), rodeados de agua y en cuyo interior circulan los gases de la combustión.
- Calderas acuotubulares: aquí los tubos contienen en su interior vapor o agua, mientras que el fuego es aplicado en la superficie exterior de los mismos. Los tubos generalmente unidos a uno o más domos (colocados horizontalmente por lo regular), se instalan paralelos al eje de la caldera o en ángulo recto al eje.

c = 1.800 MB/h

d = 15 lb. /plg²

FORMA Y POSICIÓN DE LOS TUBOS.

En la superficie de calefacción de los tubos se pueden clasificar en:

- Forma de los tubos (rectos, curvos o sinuosos).
- Disposición (horizontal, inclinada o vertical).

COMBUSTIÓN (SISTEMA DEL FOGÓN O FUENTES DE CALOR).

La caldera puede ser operada por fuego o por otro sistema de suministro de calor.

- Las calderas operadas por fuego, reciben el calor aplicado de la combustión de algún producto combustible.
- Las calderas no operadas por fuego, reciben el calor necesario de cualquiera otra fuente que no sea la combustión.

FUENTE DE CALOR.

El calor puede ser derivado de:

- La combustión de combustibles (sólidos, líquidos o gaseosos).
- Los gases calientes de desperdicio de otras reacciones químicas.
- La aplicación de energía eléctrica.
- El empleo de energía nuclear.

TIPO DE COMBUSTIBLE.

Generalmente se diseñan las calderas de acuerdo al combustible a usar, por ejemplo: carbón bituminoso, antracita (carbón fósil seco y poco bituminoso), carbón pulverizado, gas, petróleo, leña, cortezas y otros productos de desperdicio.

FLUIDO UTILIZADO.

La idea general de una caldera es producir vapor de agua. Sin embargo, en una gran mayoría de calderas residenciales y muchas de mayor tamaño, tienen como finalidad el calentamiento de agua.

Algunas calderas para procesos industriales se destinan al calentamiento de productos químicos especiales. En varias plantas de centrales termoeléctricas se han instalado calderas a base de mercurio.

SISTEMA DE CIRCULACIÓN.

La mayoría de las calderas trabaja con circulación natural. En algunas se usa la circulación forzada (o circulación positiva), donde el fluido de operación es forzado “totalmente” a través de la caldera, o se aplica una recirculación parcial controlada.

FORMA GENERAL.

Durante la evolución de la caldera, como un productor de calor, han aparecido varias formas y diseños que son ampliamente conocidas en el comercio, incluyendo las siguientes:

- Calderas de tubos de humo, tubulares, horizontales, de retorno, de fogón, de caja corta, compactas, de locomotora, de tubos verticales del tipo portátil, de tipo escocés^e, así como las residenciales.

e = calderas marinas o de tierra

- Calderas de tubo de agua (acuotubulares), en sus dos formas de tubos: rectos y de tubos curvados.
 - La caldera horizontal de tubos rectos, suele tener un cabezal de tipo de caja, hecho de placas de acero, o un cabezal en secciones, que conecta los tubos de una hilera vertical.
 - La caldera de tubos curvados va dotada de uno a cuatro domos:

Si estos se colocan paralelos a los tubos, la caldera es de domo longitudinal, si se colocan transversales a los tubos, la caldera es de domo transversal o cruzada y si el fogón está encerrado entre superficies enfriadas por agua, se llama fogón de paredes de agua (o enfriado por agua).

PROPIEDADES ESPECIALES.

- La caldera de magazín tiene un depósito de almacenamiento, que alimenta el carbón a las parrillas del fogón por gravedad.
 - La caldera de tubo antracítico, es una unidad adaptada especialmente para quemar antracita ^f.
 - Calderas tubulares de cobre, con conductos de tubos de cobre de forma sinuosa o a manera de horquillas, se fabrican para quemar aceites combustibles o gas.
- Fuego diferencial y tangencial, son términos descriptivos relacionados con la posición y operación de los quemadores.

f = carbón fósil seco

Fogones gemelos, derivación del gas (puente), a temperación y recirculación del gas, son términos relacionados con los métodos de construcción que permiten controlar la temperatura y la presión de la caldera.

Calderas de Vaporización Instantánea.

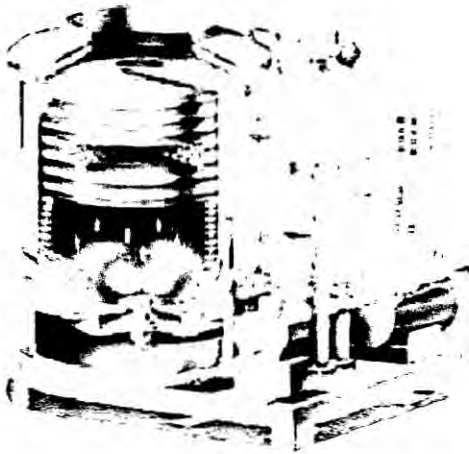
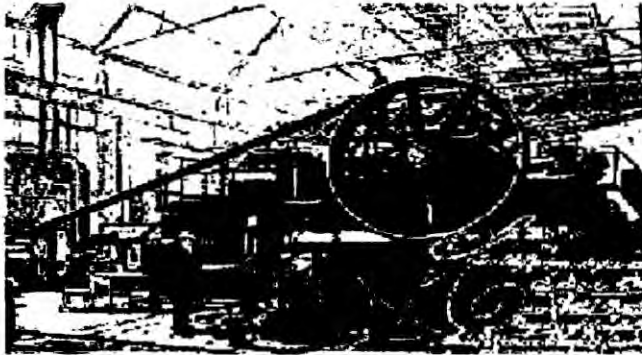


Fig.20- Caldera de Vaporización Instantánea.

Fuente: Estudio Descriptivo Y Analítico De Una Planta De Ciclo Combinado

Se halla una variedad de la caldera anterior y esta se llama vaporización instantánea, que consiste de un tubo calentado por una llama en donde el agua entra por un extremo y sale en forma de vapor por otro lado. Puesto que, el volumen posible del agua es respectivamente pequeño en proporción a la cantidad de calor que se inyecta, en un pequeño tiempo la caldera está en condiciones de dar vapor, de ahí viene la designación de calderas de vaporización instantánea.

Cabe destacar, que en este tipo de calderas el caudal de agua inyectado es usualmente igual al caudal de vapor producido, por lo cual un desajuste entre el calor aportado y el caudal de agua, daría lugar a conseguir agua caliente o vapor sobrecalentado.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE ESTE TIPO DE CALDERAS.

Las calderas de vapor están constituidas básicamente por : una cámara de vapor y una cámara de agua; en la cual la primera se puede definir como el espacio en donde va a ser ocupador por el vapor en el interior del dispositivo, es ahí donde se separa el vapor de agua para poder lograr posteriormente la suspensión. Cuanto más variable es el consumo del vapor mayor va a ser el volumen de la cámara. La cámara de agua es donde se coloca el agua, la cual hace funcionar la caldera, el nivel de esta es fijado en la fabricación de la caldera y de esta forma puede sobrepasar unos 15 cm a los tubos o conductos. El contenido de la cámara de agua es la que va a dividir este artefacto en caldera de gran, mediano o pequeño volumen, la primera mantiene estable la presión del vapor y el nivel del agua, pero tiene un defecto y es que a la hora de prenderse son muy lentas, también debido a su reducida superficie hace que produzcan poco vapor. Las calderas de mediano volumen son las que poseen varios tubos de humo y de agua y por eso la superficie de climatización aumenta, por esa la razón, aumenta la totalidad del volumen de agua; y por último, las de pequeño volumen de agua son más rápidas para generar vapor pero el detalle es que requieren de un especial cuidado en su alimentación y regulación del fuego.

Tipos de calderas de vapor: Piro tubulares, Stirling y otras.*

Dentro de la variedad de calderas nos fijamos en una de las más populares las cuales son las pirotubulares horizontales; algunos detalles de ellas son que se fabrican en un mínimo de 200 kg/h y un máximo de 17.000 kg/h y la presión oscila entre los 8 kg/h y 24 kg/h, este diseño de caldera dispone en su parte trasera abisagrada y de apertura en la cual deja al descubierto su interior y gracias a estos es fácil su manipulación y accesibilidad permitiendo al operador llevar tranquilamente las tareas de limpieza y mantenimiento desde el exterior sin correr riesgo de accidentes.

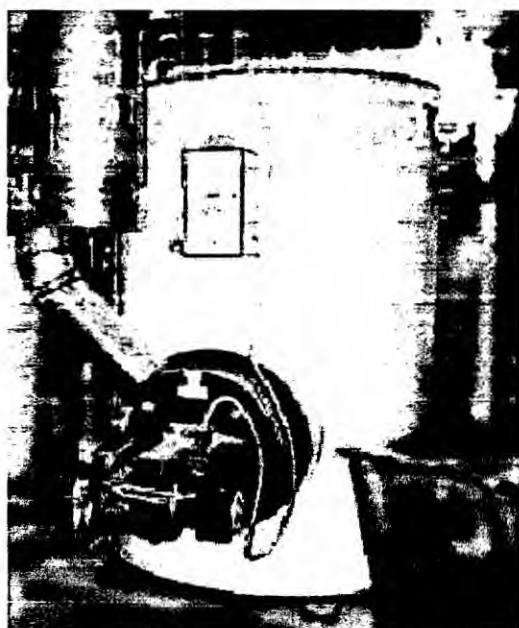


Fig.21- Caldera.

Fuente: Manual de calderas. (Kohan, Anthony Lawrence, (aut.) McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A.)

Las calderas de vapor con tubos y agua están hechas de un cilindro mayor y tubos de agua, humo o de ambos al mismo tiempo; el problema son sus defectos que generan peligros, ya que poseen riesgo de explosión, un bajo rendimiento por combustión deficiente y una destrucción rápida de los tubos cuando se produce un recalentamiento,

pero también tiene sus beneficios los cuales ya son conocidos, como por ejemplo, son de fácil construcción y pueden operar en espacios reducidos volviéndolas accesibles. También contamos con las calderas Stirling, las que cuentan con tres colectores superiores y sus respectivas cámaras de vapor están interconectadas por tubos de acero, el vapor que se obtiene del colector central superior puede llegar a obtener más de 80.000 kg.

RECUPERACIÓN DE CALOR DE GASES DE COMBUSTIÓN

Si las pérdidas de calor de los gases de combustión se requiere reducirlas, se deben añadir intercambiadores de calor separados de la caldera para recuperar el calor y enfriar los gases de combustión (Basu, 1999). El precalentador de aire de combustión es una forma de estos intercambiadores de calor adicionales. La aplicación de un precalentador de aire se muestra en la Fig. 2.2. Los gases de combustión salen de la caldera y pasan a través de un precalentador de aire. El aire de combustión también pasa a través del precalentador de aire antes de ser mezclado con el combustible. Debido a que la temperatura de los gases de combustión es mucho mayor que la temperatura del aire, el calor se transfiere desde los gases de combustión al aire de combustión vía la superficie convectiva de transferencia de calor del precalentador de aire de combustión.

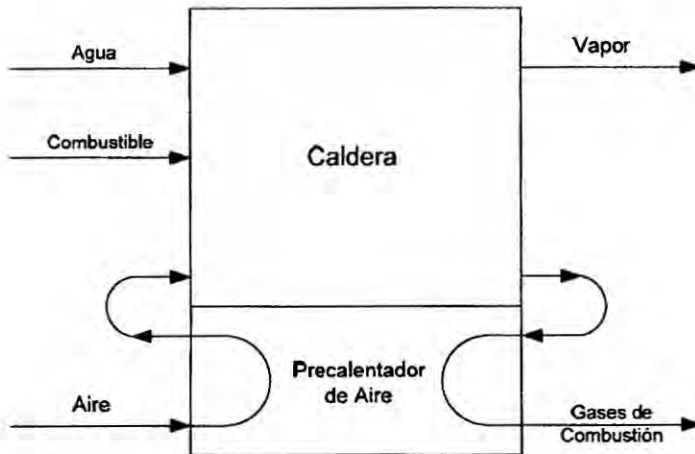


Fig. 22. Una caldera simple más un precalentador de aire de combustión

Fuente: Manual de calderas. (Kohan, Anthony Lawrence, (aut.) McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A.)

Esta transferencia de calor enfría los gases de combustión y por lo tanto disminuyen las pérdidas de calor. El calor añadido en el aire de combustión entra al horno, mejora el proceso de combustión, y reduce el requerimiento de combustible en una cantidad equivalente al calor que ha sido transferido en el precalentador de aire. Usando el precalentador de aire, aproximadamente 1% de combustible se ahorra por cada 20°F de incremento en la temperatura del aire de combustión.

El uso de un economizador es otra forma de recuperar el calor de los gases de combustión. En este arreglo, los gases de combustión salen de la caldera y entran al economizador, el cual está en contacto con la superficie de transferencia de calor de los tubos de alimentación de agua de la caldera.

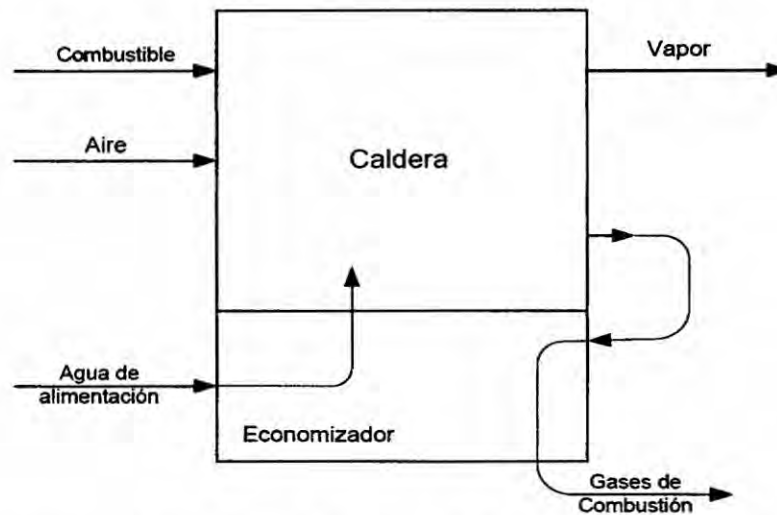


Fig. 23. Una Caldera Simple Más Economizador

Fuente: <https://www.google.com.pe/search?q=calderas>

El arreglo de este tipo de intercambiador de calor adicional se muestra en la Fig. 2.3. Debido a que los gases de combustión se encuentran a una temperatura mayor que el agua, los gases de combustión son enfriados y la temperatura del agua de alimentación se incrementa. Enfriar los gases de combustión reduce las pérdidas energéticas en una cantidad igual al calor transferido al agua de alimentación de la caldera.

El incremento de calor en el agua de alimentación reduce los requerimientos de combustible de la caldera. Aproximadamente 1% de la entrada de combustible se ahorra por cada 5°C de incremento en el agua de alimentación cuando pasa a través del economizador.

Ambos tipos de intercambiadores de calor son usualmente utilizados en calderas grandes. Cuando ambos, el precalentador de aire y el economizador son utilizados, la

práctica normal consiste en pasar los gases de combustión primero a través del economizador y luego a través del precalentador de aire.

2.4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CALDERAS DE TUBOS DE FUEGO

La función principal de la caldera propiamente dicha, es proporcionar un medio por el cual el calor procedente de la combustión se transmita al agua o al vapor para ser calentado. La superficie de calefacción requerida depende de su clase, si es primaria, secundaria, supercalentamiento, recalentamiento, economizador o calentador de aire.

La transmisión de calor no solamente tiene que ser económica, sino también libre de defectos. Es una condición indispensable que una caldera sea fácilmente accesible para su mantenimiento, manejo y reparación por parte de su personal normal de operación. Es necesario tomar providencias para la fácil limpieza de los tubos, química o mecánicamente; El sopleteo del hollín, el lavado de las superficies del economizador y del calentador del aire. El espaciamiento de los fluses debe permitir su reposición individual en caso de fallas.

Por otra parte, los conocimientos técnicos sobre como operar y mantener calderas es deficiente en muchas empresas.

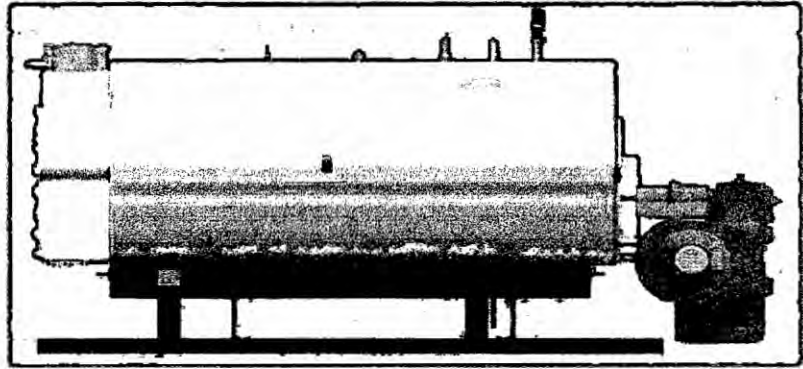


Fig. 24. Caldera Automática Pirotubular

Fuente: <https://www.google.com.pe/search?q=calderas>

Bomba Hidráulica

Una bomba hidráulica es una máquina generadora que transforma la energía (generalmente energía mecánica) con la que es accionada en energía hidráulica del fluido incompresible que mueve. El fluido incompresible puede ser líquido o una mezcla de líquidos y sólidos como puede ser el hormigón antes de fraguar o la pasta de papel. Al incrementar la energía del fluido, se aumenta su presión, su velocidad o su altura, todas ellas relacionadas según el principio de Bernoulli. En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud.

Existe una ambigüedad en la utilización del término bomba, ya que generalmente es utilizado para referirse a las máquinas de fluido que transfieren energía, o *bombean* fluidos incompresibles, y por lo tanto no alteran la densidad de su fluido de trabajo, a diferencia de otras máquinas como lo son los compresores, cuyo campo de aplicación es la neumática y no la hidráulica. Pero también es común encontrar el término bomba para referirse a máquinas que *bombean* otro tipo de fluidos, así como lo son las bombas de vacío o las bombas de aire.

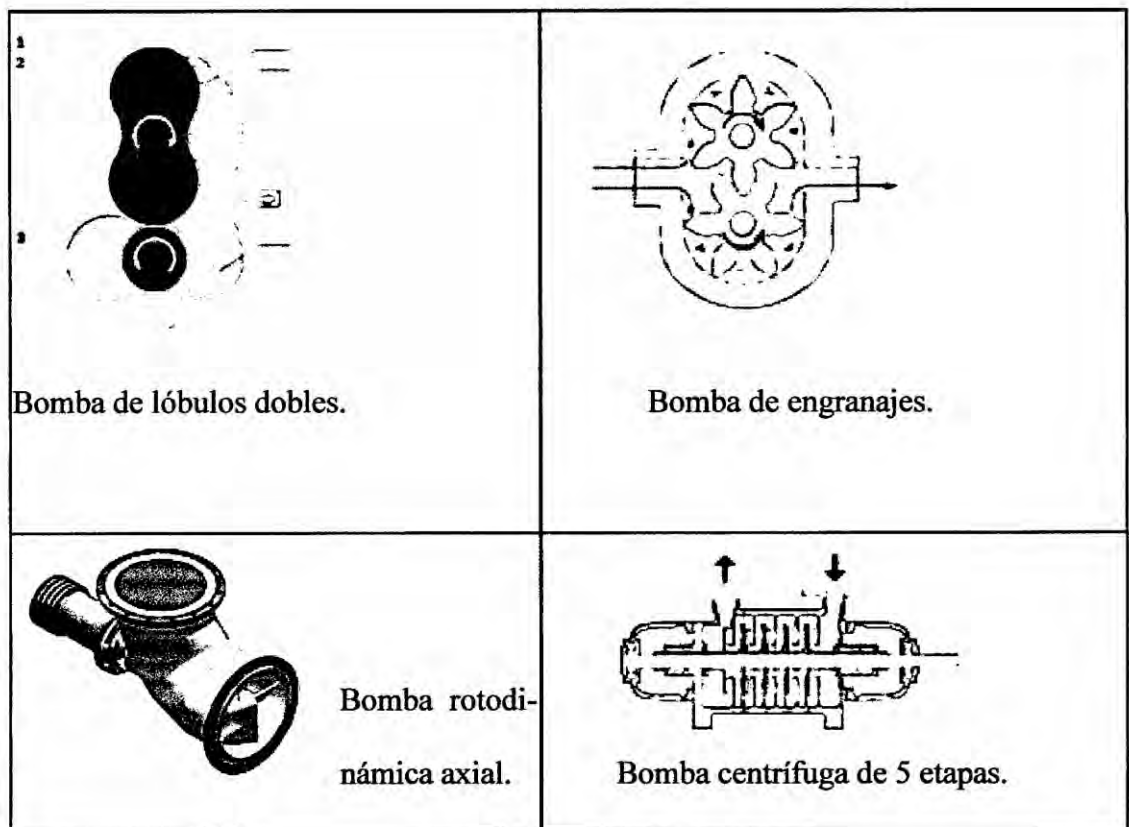


Fig. 25. Tipos De Bombas Hidráulicas

Fuente: [https://www.google.com.pe/search?q=bombas hidráulicas](https://www.google.com.pe/search?q=bombas+hidráulicas)

Turbina de Vapor

La turbina de vapor es una máquina de fluido en la que la energía de éste pasa al eje de la máquina saliendo el fluido de ésta con menor cantidad de energía. La energía mecánica del eje procede en la parte de la energía mecánica que tenía la corriente y por otra de la energía térmica disponible transformada en parte en mecánica por expansión. Esta expansión es posible por la variación del volumen específico del fluido que evoluciona en la máquina.

El trabajo disponible en la turbina es igual a la diferencia de entalpía entre el vapor de entrada a la turbina y el de salida.

TURBINA DE VAPOR

En la turbina, el vapor transforma primero su *entalpía* en *energía cinética* y, luego, ésta es cedida al rodete obteniéndose el *trabajo técnico* correspondiente.

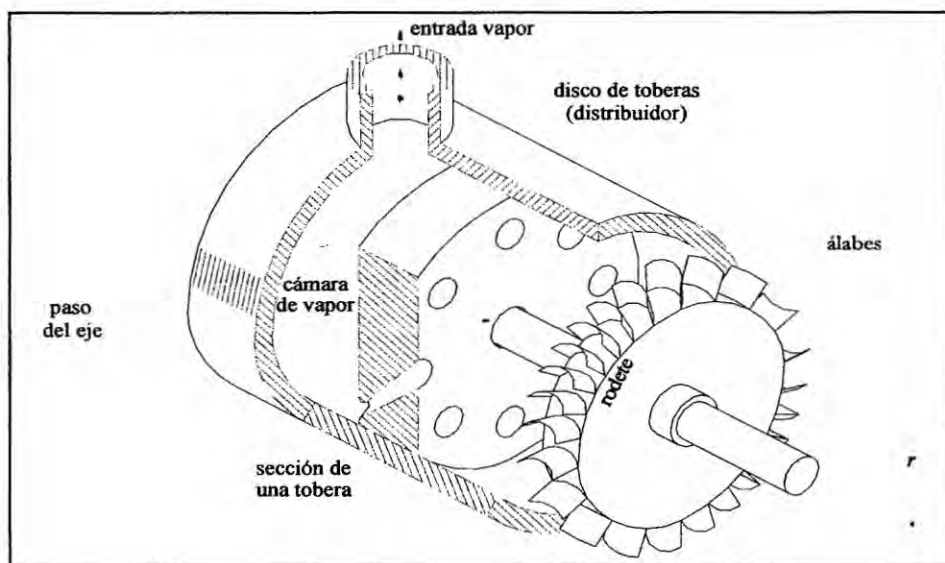


FIG. 26. TURBINA DE VAPOR

Fuente: <https://www.google.com.pe/search?q=turbinasdevapor>

RELACIONES DE ENTRADA – SALIDA Y RENDIMIENTO

El rendimiento de una caldera relaciona su habilidad para transferir calor del combustible al agua satisfaciendo ciertas especificaciones de operación. El rendimiento de la caldera incluye todos los aspectos de la operación.

Las especificaciones de rendimiento incluyen la capacidad operativa y los factores para ajustar esa capacidad, la presión del vapor, la calidad del agua de la caldera, las temperaturas de la caldera, el análisis de los gases de combustión, el análisis del combustible y de los residuos de combustión.

Especificaciones adicionales de rendimiento indican incluir los requerimientos energéticos de los ventiladores (Lindsley, 1991).

El resultado de un cálculo que involucra la especificación de rendimiento es una eficiencia calculada. La eficiencia de la caldera se presenta como un porcentaje entre del calor suministrado a la caldera y el calor absorbido por el agua de la caldera.

CAPACIDAD Y RENDIMIENTO

Las calderas pirotubulares generalmente se describen en términos de BoHP (caballos de fuerza de caldera. $1 \text{ BoHP} = 34\,475 \text{ Btu}$) (Basu, 1999).

La capacidad en BoHP de una caldera pirotubular moderna es aproximadamente un quinto del área total de transferencia de calor. Por ejemplo, una caldera de 500 BoHP tiene aproximadamente 2 500 pies cuadrados de superficie de calentamiento. Aunque estas calderas se describen en términos de BoHP, la energía liberada puede ser convertida fácilmente a unidades de presión o de flujo de vapor. Debido a que el conteni-

do calórico de una libra de vapor se incrementa cuando la presión se incrementa en las calderas de tubos de fuego, las libras de vapor por BoHP decrecen con la presión.

RELACIÓN ENTRADA - SALIDA

La energía que entra en una caldera normalmente se piensa como el contenido de calor del combustible utilizado (Sintas, 1994). El flujo de este combustible medido durante un periodo de tiempo multiplicado por el contenido de calor de este combustible devuelve la entrada de energía total durante un período de tiempo. Medir la salida de energía de una caldera involucra medir el flujo de vapor en un periodo de tiempo y multiplicarlo por el contenido calórico de una libra de vapor para obtener la energía a la salida. Simples y útiles relaciones entre la entrada y la salida tales como las libras de vapor/galón de combustible pueden utilizarse efectivamente para seguir la eficiencia relativa. Estas relaciones, sin embargo, no son precisas debido a que factores como el contenido energético del Combustible, el contenido energético del vapor, la temperatura del agua de alimentación, etc., no se consideran.

La mayor pérdida energética de diversas calderas depende de la masa de los gases de combustión y su temperatura cuando salen de la caldera (Dukelow, 1999). Para obtener la pérdida neta de energía de los gases de combustión, la temperatura del aire de entrada al quemador y del combustible debe considerarse. Cuando el hidrógeno de los combustibles reacciona con el oxígeno del aire, forma agua, la cual sale de la caldera en forma de vapor sobrecalentado. El calor latente de este vapor es una pérdida energética, la cual es aproximadamente del 5 al 6 % para combustibles líquidos como el diesel. El porcentaje de hidrógeno y humedad en el combustible afecta esta pérdida.

La energía útil a la salida de las calderas es el calor transportado por el vapor, esto se mide usualmente como un flujo de vapor en la caldera y se ajusta para obtener el contenido energético utilizando mediciones adicionales de presión o de temperatura, o ambas.

Aunque estos procedimientos proveen información acerca de la salida de energía útil, no proveen información acerca de la contribución de la caldera a esta energía útil. Para determinar la contribución de la caldera, el calor del agua entrante debe sustraerse del calor transportado a la salida de la caldera.

2.5 GENERACIÓN DE VAPOR – CICLO COMBINADO

El vapor es usado en la mayoría de los procesos industriales, y además se conoce que los generadores de vapor y las calderas recuperadoras de calor son vitales para los procesos de las plantas industriales.

Las fuentes de calor en procesos industriales pueden llegar a niveles altos de temperaturas, 1000-2500°F, o muy bajas, en el orden de 250-500°F y las aplicaciones han sido desarrolladas para recuperar la mayor cantidad de energía de estos afluentes como sea posible a fin de mejorar el uso total de la energía. Los generadores de vapor con recuperación de calor forman una parte importante de este sistema. (Nota: los términos Caldera de residuos de calor, Calderas de recuperación de calor y generadores de vapor por recuperación de calor son usados como sinónimos).

En la mayoría de aplicaciones industriales los flujos de gas residual son aprovechados para la generación de vapor, el cual cerca del 90% de vapor generado son utilizados para cualquier proceso o generación de energía a través de turbinas de vapor.

CICLO COMBINADO

Definición

Un ciclo combinado es un sistema termodinámico que comprende dos o más ciclos de potencia, cada uno usando un fluido de trabajo diferente. Combinando dos ciclos de potencia independientes puede resultar en mayor eficiencia que operando cada ciclo independientemente. Para alcanzar mayor eficiencia que cualquiera de los ciclos operando independientemente, los dos ciclos deben intercambiar energía. El ciclo Brayton para turbinas de gas y el ciclo Rankine para turbinas de vapor son dos ciclos que se complementan uno al otro para formar ciclos combinados eficientes. El ciclo Brayton tiene una fuente a alta temperatura y desecha calor a una temperatura tal que puede ser fuente de energía o suplemento de la fuente de energía para el ciclo Rankine en un ciclo combinado.

Los fluidos de trabajo más usados para ciclos combinados son aire y vapor. Otros fluidos de trabajo (fluidos orgánicos, vapor de potasio, vapor de mercurio y otros) han sido aplicados en una escala limitada. Los ciclos combinados de vapor y aire han alcanzado aplicación comercial muy amplia debido a que:

- Alta eficiencia térmica es alcanzada porque los dos ciclos son termodinámicamente complementarios, puesto que calor es desechado por el ciclo Brayton (turbina de gas)

a un nivel de temperatura que puede ser luego usado en el sistema de vapor con el ciclo Rankine.

- Los dos fluidos de trabajo son aire y agua los cuales son disponibles en abundancia, son baratos y no son tóxicos.

Reseña histórica de Ciclo Combinado

El desarrollo comercial de ciclos combinados con turbinas de gas y de vapor ha avanzado en paralelo con el desarrollo de las turbinas de gas. La primera turbina de gas instalada en los Estados Unidos para generación eléctrica en un ciclo combinado fue una turbina de 3.5 MW, de la cual se empleó la energía de los gases de escape para calentar el agua de alimentación de una unidad de vapor convencional de 35 MW. La turbina de gas es mostrada en la figura 1.1 y el economizador por recuperación de calor es mostrado en la figura 1.2. Este Sistema entró en servicio en junio de 1949, y un sistema similar fue añadido a esta estación en 1952, tal como se muestra en el diagrama esquemático de la figura 1.3.

Muchos sistemas de generación de potencia con ciclo combinado instalados en los años 1950 y 1960 incluyeron calderos convencionales. Estos sistemas fueron básicamente adaptaciones de plantas de vapor convencional es utilizando los gases de escape de turbinas a gas como aire de combustión para el caldero. La eficiencia de este tipo de ciclos de vapor combinados era aproximadamente 5 a 6% mayor que aquel de una planta de vapor convencional similar.

Durante el año 1960 el ciclo combinado tipo recuperación de calor se volvió el tipo dominante. Su aplicación inicial fue en ciclos de potencia y calor en donde la razón de potencia a calor fue favorable a muchos procesos químicos y petroquímicos. Un pequeño número de ciclos combinados tipo recuperación de calor fueron instalados en el año 1960. Cuando turbinas de gas por encima de 50 MW de capacidad fueron introducidas en el año 1970, el ciclo combinado por recuperación de calor experimentó un rápido crecimiento en aplicaciones de utilización eléctrica. Estos han desarrollado en los más eficientes sistemas de generación de potencia encendidos por combustibles fósiles.

El ciclo combinado por recuperación de calor es el más ampliamente usado hoy para generación de potencia y cogeneración. Para aplicaciones de generación de potencia los ciclos combinados por recuperación de calor “sin encendido” son los más eficientes debido a sus componentes modulares que proporcionan un bajo costo instalado, haciendo que estas plantas de potencia sean muy económicas. Ciclos combinados por recuperación de calor sin encendido son también extensivamente usados para aplicaciones de potencia y calor, pero la eficiencia de estos sistemas puede ser mejorada por combustión adicional de combustible en el caldero por recuperación de calor.

Ciclos de potencia del ciclo combinado

Está conformado como hemos visto anteriormente por dos ciclos: el ciclo de potencia de la turbinas de gas y el ciclo de potencia de la turbinas de vapor. Procedemos a continuación a examinar con más detalle cada uno de estos.

El Ciclo De Potencia De Turbinas De Gas

El Ciclo Brayton

Las turbinas a gas operan en un ciclo abierto. El aire que entra al compresor aumenta de presión, luego pasa al combustor donde se efectúa la ignición o de la combustión, los cuales entran luego a la turbina en donde se expanden realizando trabajo. Por último tales gases salen de la máquina y escapan a la atmósfera.

El ciclo Brayton estándar de aire es el ciclo ideal para una turbina de gas como sistema cerrado. En este caso los procesos de compresión y expansión permanecen iguales, pero el proceso de combustión se sustituye por un proceso de adición de calor a presión constante de una fuente externa y el proceso de escape se reemplaza por uno de rechazo de calor a presión constante hacia el aire ambiente. Está integrado por cuatro procesos internamente reversibles:

- ♣1 - 2 Compresión isentrópica (en un compresor).
- ♣2 - 3 Adición de calor a presión constante.
- ♣3 - 4 Expansión isentrópica (en una turbina).
- ♣4 - 1 Rechazo de calor a presión constante.

Los diagramas T-s y P-v de un ciclo Brayton ideal se muestran en la figura 27.

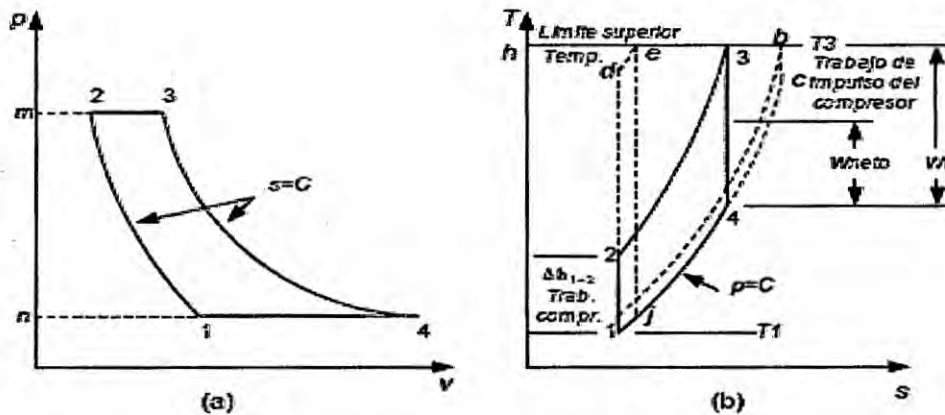


Fig.1.6: Diagramas T-s y P-v de un ciclo Brayton ideal.

La eficiencia de un ciclo Brayton ideal depende de la relación de presiones de la turbina de gas " r_p " según la siguiente expresión:

$$\eta_{t.Bradyton} = 1 - \frac{1}{(r_p)^{\frac{k-1}{k}}}$$

se observa que la eficiencia aumenta con este parámetro, lo que es válido también en el caso para las turbinas de gas reales. En la figura 1.7 se muestra el comportamiento de este parámetro.

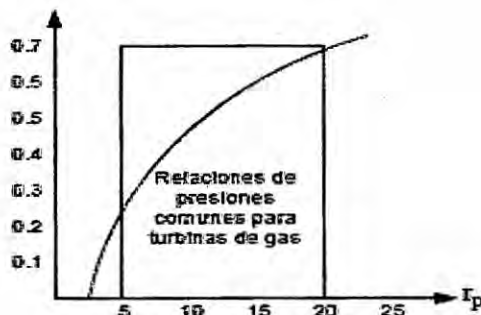


Fig.1.7: Eficiencia térmica de un ciclo Brayton ideal como una función de la relación de presiones.

Figura 27: Diagrama T-s, P-v y Eficiencia del ciclo Bryton

Fuente:

https://www.google.com.pe/search?q=calderas&biw=1366&bih=677&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=MAGZVdr-loqbyATj8YQgCQ&ved=0CAYQ_AUoAQ#tbn=isch&q=eficiencia+de+ciclo+bryton

Por otro lado, la temperatura más alta en el ciclo se presenta al final del proceso de combustión (estado 3) y está limitada por la temperatura máxima que los álabes de la turbina pueden soportar. Esto limita también la relación de presiones del ciclo. Para una temperatura de entrada fija de la turbina, la salida de trabajo neto del ciclo aumenta con la relación de presiones, alcanza un máximo y después empieza a disminuir como se muestra en la figura 1.6(b). En consecuencia debe haber un compromiso entre la relación de presión y la salida de trabajo neto. En muchos diseños comunes la relación de presiones varía de 11 a 16.

CICLO DE POTENCIA DE TURBINAS DE VAPOR

El ciclo Rankine

El ciclo Rankine se ilustra en la figura 1.8 en los planos p - v y T - s . El vapor sale de la caldera, por ejemplo, en el estado 1, es conducido a la máquina sin pérdidas (ciclo ideal), se expande isentrópicamente en la turbina de vapor ideal hasta el estado 2, y pasa luego al condensador. El agua de circulación condensa el vapor a líquido saturado en 3, desde donde se bombea isentrópicamente al generador de vapor en el estado de líquido comprimido a subenfriado. Por lo general entra al economizador del generador de vapor antes de ingresar al tambor de la caldera. Observe el proceso irreversible de mezcla de agua fría a la temperatura t_B con el agua caliente de la caldera a la temperatura $t_4=t_1$. El líquido comprimido en B se calienta hasta la saturación en 4, después de lo cual se convierte en vapor saturado al llegar a 1, y se repite el ciclo. Si

el vapor se sobrecalienta antes de que salga del generador, el ciclo Rankine correspondiente sería e-f-3-B-4-e.

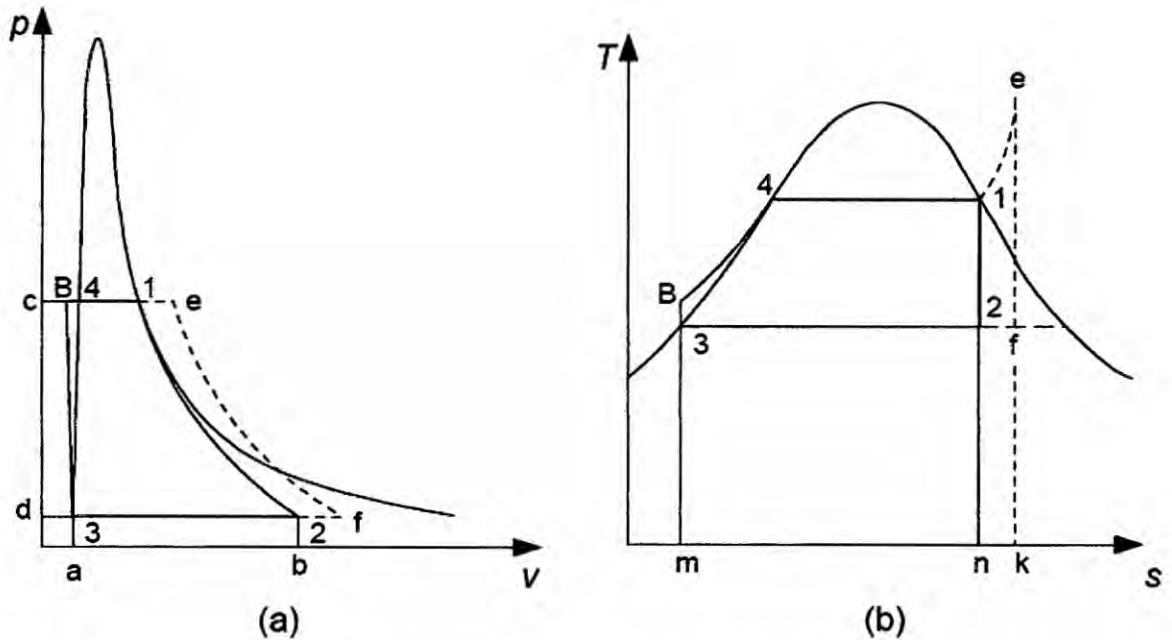


Figura 28: Diagrama T-s, P-v y Eficiencia del ciclo Rankine

Fuente: https://www.google.com.pe/search?q=calderas&biw=1366&bih=677&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=MAGZVdroqbyATj8YOgCQ&ved=0CAYQ_AUoAQ#tbm=isch&q=ciclo+Rankine

El ciclo ideal Rankine no incluye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto por los siguientes cuatro procesos:

- ♣ 1 - 2 Compresión isentrópica en una bomba.
- ♣ 2 - 3 Adición de calor a presión constante en una caldera.
- ♣ 3 - 4 Expansión isentrópica en una turbina.
- ♣ 4 - 1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.

Se debe tener en cuenta que los cuatro procesos del ciclo Brayton se ejecutan en dispositivos de flujo permanente. Una poderosa ventaja de los sistemas cíclicos de dos fases es que el fluido que se impulsa desde baja presión hasta alta presión está en la fase líquida, y el costo de bombear un líquido es considerablemente menor que el de comprimir y manejar una sustancia gaseosa.

El Ciclo ideal Rankine de Recalentamiento

La mejora en la eficiencia térmica de un ciclo Rankine por el uso de expansión de vapor sobrecalentado se observa en el apartado anterior. Desafortunadamente, la expansión completa en un ciclo Rankine desde la entrada hasta la salida (figura 1.30) normalmente no ocurre y el vapor no permanece siempre seco; tarde o temprano el punto de estado debe cruzar a la región bifásica (húmeda) para aprovechar la baja presión de salida.



FIG. 29 GRAFICO T vs S Rankine de Recalentamiento

Fuente: http://www.fsalazar.bizland.com/html/RANKINE_REC.htm

Si en el punto 2, de la figura 30, se recalienta el vapor saturado (con frecuencia se dice más concretamente que se re sobrecalienta) a su temperatura inicial de entrada, en vez de la región húmeda, la expansión subsiguiente cruzará hasta la región húmeda. Una regla empírica para un buen diseño, indica que debe mantenerse el límite de humedad del vapor en la descarga de la máquina en nomás del 15% (de líquido).

La temperatura de recalentamiento es muy cercana o igual a la temperatura de entrada a la turbina. Recuerde que el único propósito del ciclo de recalentamiento es reducir el contenido de humedad del vapor en las etapas finales del proceso de expansión.

Si hubiera materiales que soportaran temperaturas tan altas, no habría necesidad del ciclo.

Características del Combustible

Las bases para el diseño de los mecanismos destinados a quemar, son determinadas por las cualidades del combustible que ha de emplearse teniendo en cuenta su valor calórico y sus propiedades. Además debe investigar las propiedades de las cenizas, incluyendo: Punto de fusión de la ceniza, pérdidas por combustible no quemado y presencia de azufre, vanadio y otros elementos extraños.

La cámara de combustión debe tener el espacio suficiente para contener la flama. La forma del fogón se guía por el tipo de combustible a emplear y por el método seguido para quemarlo. Es necesario tomarlas debidas providencias para mantener la ignición y la combustión de los gases volátiles.

PLANTA DE CICLO COMBINADO

Así mismo también se denomina Ciclo Combinado (Figura 31) a la coexistencia de dos Ciclos Termodinámicos en un mismo sistema, en el que un fluido de trabajo es vapor de agua y el otro fluido de trabajo es un gas producto de una combustión.

El ciclo combinado casi siempre implica la existencia de:

- Una Turbina de gas
- Una caldera de recuperación de calor
- Una turbina de vapor

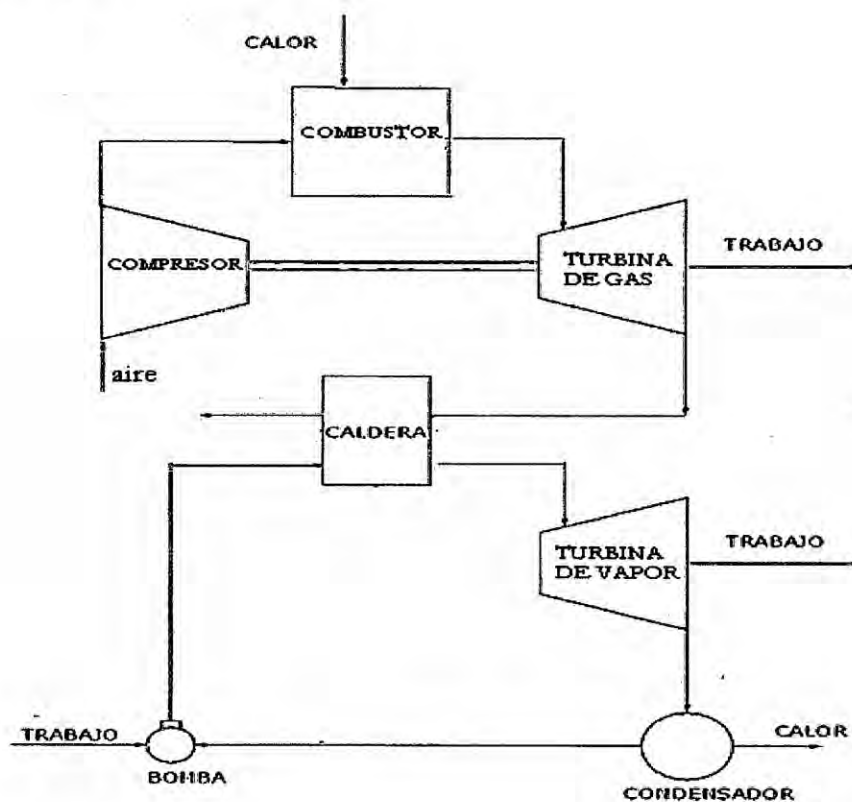


Figura 30- Esquema de una planta de ciclo combinado

Fuente: <http://www.cicloscombinados.com/cicloscombinados.html>

En una planta de ciclo combinado básicamente se trata de generar trabajo a partir de la combustión, mediante un combustible líquido, gaseoso o sólido. Los gases de la combustión pasan a una turbina de gas que hace que la turbina funcione. A la salida de la turbina los gases han perdido temperatura y presión, pero aún contienen la suficiente energía como para que valga la pena aprovecharla mediante el uso o instalación de una caldera de recuperación de calor. En la Caldera se extrae la mayor parte del calor aún disponible en los gases de escape provenientes de una turbina a gas, produciendo de ésta manera, vapor a presión para la turbina de vapor.

La turbina de vapor es operada con el vapor que se produce en el recuperador de calor. El agua condensada es colectada en el condensador para su posterior envío a la caldera de recuperación y de esta manera cerrar el ciclo. Finalmente los gases se devuelven a la atmósfera después de haber pasado por la chimenea.

Las plantas termoeléctricas de ciclo combinado son centrales que operan con turbinas a gas (TG) y a vapor (TV) acopladas en un ciclo termodinámico, en el cual se reutilizan los gases de escape producidos en el proceso de combustión de la turbina a gas. Esta recuperación de calor implica que este tipo de centrales posean una alta eficiencia del orden de un 60 %, lo que constituye la principal ventaja por sobre las plantas térmicas convencionales, de eficiencias del orden de 30% a 40% [5]. Las centrales convencionales desechan los gases residuales producidos por la turbina a gas al ambiente, estando estos a elevadas temperaturas. La idea de un ciclo combinado es precisamente utilizar la temperatura de estos gases, para lo cual se utiliza un intercambiador de calor, capaz de calentar agua y producir vapor utilizable por una turbina a

vapor. De esta forma se genera energía eléctrica por la(s) turbina(s) a gas y una cantidad extra por la(s) turbina(s) a vapor, estando comúnmente cada turbina acoplada en un eje con su respectivo generador, aunque existen centrales en la cuales se encuentran ambas componentes acopladas al mismo eje de un generador común.

En la figura 31 se detalla un diagrama del funcionamiento de un ciclo combinado, indicándose cada elemento que compone la planta. El combustible es ingresado en la cámara de combustión (1) en donde se mezcla con aire a alta presión proveniente desde el compresor (2). Desde (1) salen los gases que se expanden en la turbina a gas (3) produciéndose así el giro del eje del generador (4) y consecuentemente generación eléctrica gracias a este primer ciclo termodinámico tipo Brayton.

A continuación los gases de escape de la turbina a gas son llevados al intercambiador de calor o caldera recuperadora de calor (6)(en inglés: Waste Heat Recovery Boiler WHRB o Heat Recovery Steam Generator HRSG), por donde se hace circular agua a baja temperatura que al ser calentada por los gases de escape genera vapor de agua capaz de mover una turbina a vapor (7) acoplada a un segundo generador (8), produciéndose de esta forma una generación eléctrica extra, y mejorando la eficiencia global del ciclo. Posteriormente, el vapor de salida de la turbina a vapor es conducido hacia un condensador (9) que opera en vacío, el cual se encarga de disminuir la temperatura del agua realizando la condensación del vapor saturado a líquido saturado gracias la condición de vacío y al agua de refrigeración [15] que circula por las torres de enfriamiento (10), cerrándose de esta forma el ciclo termodinámico del tipo Rankine.

Una central de este tipo también puede funcionar solo con las turbinas a gas, sin operar la turbina a vapor, en cuyo caso se habla de operación en ciclo abierto. Esto se logra mediante un bypass de gases (5) capaz de desviar los gases de escape antes de que lleguen a la caldera recuperadora de calor, siendo estos expulsados a la atmósfera a través de un stack de gases sin ser reutilizados.

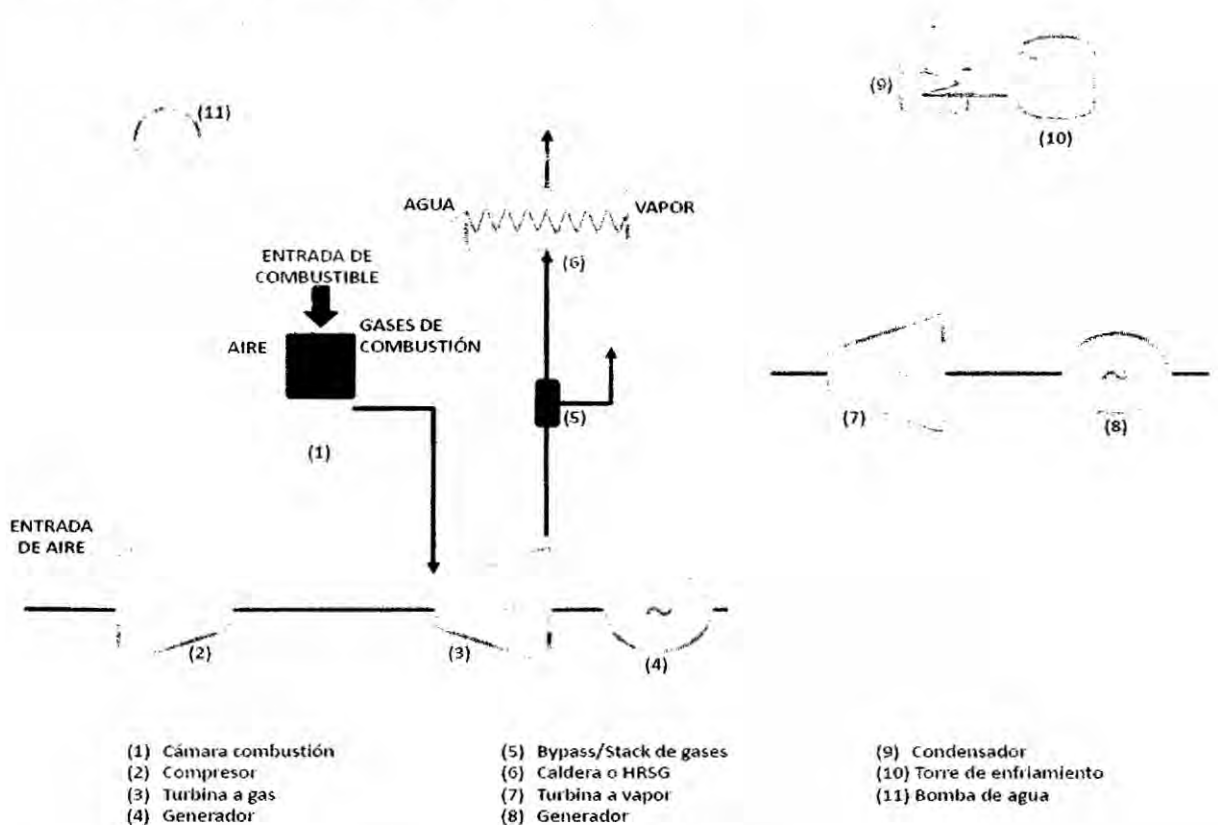


Figura 31.- Diagrama de funcionamiento de Ciclo Combinado

Fuente: <http://www.cicloscombinados.com/cicloscombinados.html>

En la figura 33 se ilustran los ciclos termodinámicos Brayton y Rankine. Los ciclos termodinámicos operan con un ruido de trabajo, en el caso del ciclo Brayton este co-

responde a aire-gas. Por otro lado, el ruido de trabajo del ciclo Rankine corresponde a agua-vapor.

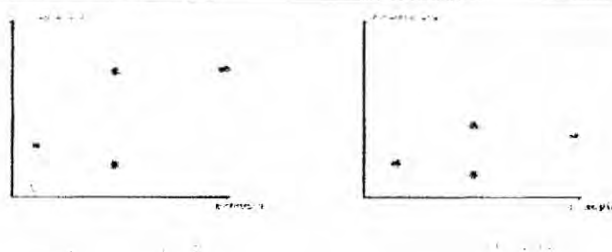


Figura 32.- Diagrama T-S De Funcionamiento De Ciclo Combinado

Tabla 2.1.1. Descripción de los procesos

Proceso	Características	Descripción
1-2	Isocórico	Calentamiento del aire a presión constante en el quemador.
2-3	Isobárico	Expansión del aire a presión constante en la turbina de gas.
3-4	Isocórico	Resfriamiento del aire a presión constante en el intercambiador de calor.
4-1	Isobárico	Compresión del aire a presión constante en el compresor de gas.
5-6	Isocórico	Calentamiento del agua a presión constante en el quemador.
6-7	Isobárico	Expansión del vapor a presión constante en la turbina de vapor.
7-8	Isocórico	Resfriamiento del vapor a presión constante en el intercambiador de calor.
8-5	Isobárico	Compresión del agua a presión constante en el compresor de agua.

Tabla 2.1.2. Descripción de los procesos

Proceso	Características	Descripción
1-2	Isocórico	Calentamiento del aire a presión constante en el quemador.
2-3	Isobárico	Expansión del aire a presión constante en la turbina de gas.
3-4	Isocórico	Resfriamiento del aire a presión constante en el intercambiador de calor.
4-1	Isobárico	Compresión del aire a presión constante en el compresor de gas.
5-6	Isocórico	Calentamiento del agua a presión constante en el quemador.
6-7	Isobárico	Expansión del vapor a presión constante en la turbina de vapor.
7-8	Isocórico	Resfriamiento del vapor a presión constante en el intercambiador de calor.
8-5	Isobárico	Compresión del agua a presión constante en el compresor de agua.

Figura 32.- Diagrama T-S De Funcionamiento De Ciclo Combinado

Fuente: <http://www.cicloscombinados.com/cicloscombinados.html>

FUNCIONAMIENTO EN OPERACION NORMAL

Se considera operación normal cuando la central opera con sus turbinas a gas con los bypass de gases cerrados y con las turbinas a vapor, estando todas las turbinas por so-

bre su mínimo técnico. En la figura 2.3 se ilustra una curva de arranque genérica de un ciclo combinado que posee una turbina a gas y una turbina a vapor. En esta se logra apreciar la curva que describe el funcionamiento en operación normal, correspondiente a la curva TG + TV a partir del tiempo T_{syncTV} .

Funcionamiento en ciclo abierto

Se dice que la central opera en ciclo abierto cuando los bypass de gases se encuentran abiertos, y opera únicamente la(s) turbina(s) a gas por sobre su mínimo técnico. En la figura 2.3 se aprecia la curva de funcionamiento de la turbina a gas, correspondiente a la curva TG, la cual describe el funcionamiento de la central en ciclo abierto. Cabe mencionar que esta operación provoca que la eficiencia de la central disminuya, por lo que se opera de esta forma principalmente por razones de mantenimiento o restricciones operativas. Sin embargo, un ciclo combinado no puede funcionar en ciclo abierto con la turbina a vapor, _esta necesita del calor producido por los gases de escape de la turbina a gas, esto implica que el funcionamiento de la TV está restringido a la operación de la TG.

En la figura 34 se ilustra una curva aproximada del proceso de arranque de un ciclo combinado con una turbina a gas y una turbina a vapor, cuyas etapas se detallan a continuación.

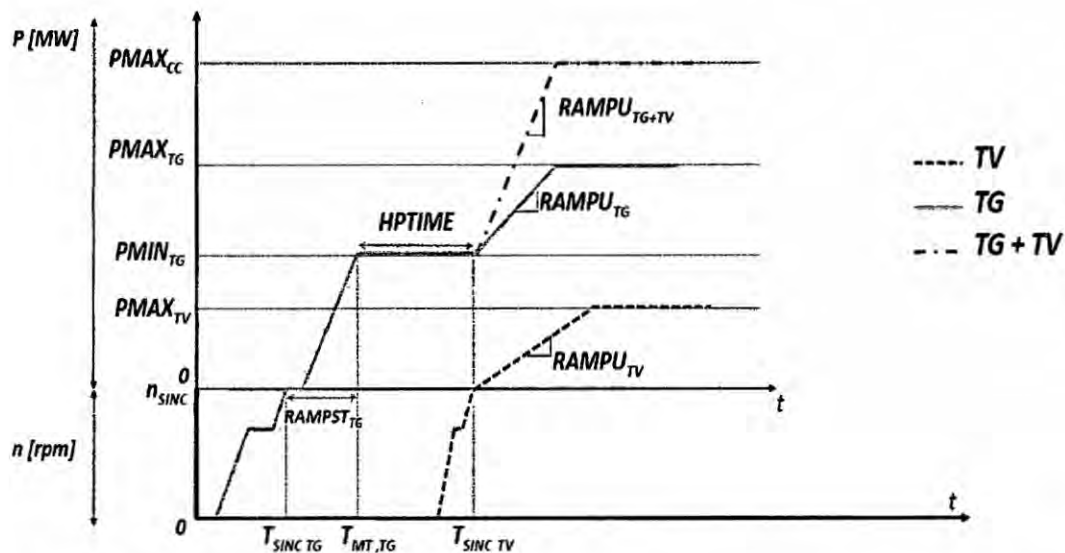


Figura 33: Curva Aproximada Del Proceso De Arranque De Un Ciclo Combinado.

Fuente: https://www.google.com.pe/search?q=calderas&biw=1366&bih=677&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ei=MAGZVdr-IoqbyATj8YOgCQ&ved=0CAYQ_AUoAQ#tbn=isch&q=ciclo+combinado+diagrama

Partida de un ciclo combinado

Un ciclo combinado debe pasar por una sucesión de etapas antes de llegar a operación normal. Cada unidad describe una curva de arranque que representa su comportamiento al partir.

Un ejemplo de esta curva se ilustra en la figura 2.3, en donde se aprecia una curva idealizada en la que no se detallan los fenómenos no lineales referentes a la estabilización de parámetros térmicos que ocurren en la central.

_ Operativos previos: Los servicios auxiliares y los componentes secundarios de la central, tales como compresores, condensadores, bombas, válvulas, etc. deben estar operativos al momento de comenzar la inyección de combustible.

_ Partida turbina a gas: El aire a alta presión del compresor se mezcla con el combustible y se inicia la ignición en la cámara de combustión. Se controla la temperatura y la presión de los gases del proceso, llevando la turbina a gas desde velocidad $n = 0$ hasta la velocidad de sincronización del generador acoplado a su eje, $n = n_{SINC}$. Este proceso está caracterizado por el tiempo de sincronización $TSINC;TG$.

_ Sincronización: Una vez que se llega a velocidad nominal se inicia el proceso de sincronización a la red de la máquina generadora, realizado de forma automática por los controladores de la central.

_ Rampa de arranque: Una vez se ha sincronizado el generador a la red, se comienza el proceso de arranque que lleva a la unidad desde la potencia nula a la potencia de mínimo técnico.

Esta rampa, indicada como $RAMPSTTG$, se mide en unidades de tiempo, definiéndose entre el tiempo de sincronización $TSINC;TG$ y el tiempo que demora llegar a mínimo técnico $TMT;TG$, siendo del orden de minutos en las turbinas a gas de una planta de ciclo combinado. Si bien la unidad ya está sincronizada y aportando energía a la red, esta no suele ser considerada en la optimización y simulación de la operación por los operadores del sistema.

_ Mínimo técnico: Una vez que la unidad ha llegado al mínimo técnico se está en condiciones de funcionar en ciclo abierto o de prepararse para el funcionamiento en

operación normal del ciclo combinado. En el primer caso, que corresponde a la curva TG de la figura 2.3, se comienza con el proceso de toma de carga de acuerdo con el valor del gradiente de subida RAMPUTG (en unidades de MW/min) dado por el fabricante. En el segundo caso, antes de entrar en funcionamiento en operación normal, se debe arrancar la turbina a vapor, proceso que se describe en el siguiente punto.

_ Partida turbina a vapor: La turbina a vapor requiere un cierto tiempo previo a su arranque debido a que se requiere una estabilización de las variables termodinámicas que intervienen en el ciclo de vapor: temperatura, presión y título del vapor (nivel de saturación del vapor). La secuencia necesaria para partir esta turbina se detalla a continuación.

_ Cerrar el bypass de gases de una turbina a gas, de modo que los gases de combustión de esta turbina lleguen al intercambiador de calor, generándose de esta forma vapor útil.

_ Mantener esta turbina a gas en mínimo técnico por un tiempo determinado durante el cual las variables termodinámicas del ciclo de vapor se estabilizan evitando el stress térmico en la caldera. Este tiempo se denominará tiempo de hold-point. Se representa en la figura 2.3 por el parámetro HPTIME.

_ Durante el tiempo de hold-point se comienza el proceso de arranque de la turbina a vapor, llevándola desde el reposo a velocidad de sincronización.

_ Una vez sincronizada a la red, la turbina a vapor está en condiciones de tomar carga según su gradiente de subida RAMPUTV.

_ De existir más turbinas a gas en la planta, cerrar sus bypass de gases si se desea aumentar la potencia de salida de la turbina a vapor.

Como se mencionó anteriormente, el tiempo de hold-point se requiere para evitar el stress térmico al que se someten los materiales de la caldera al cerrar los bypass de gas y para lograr las temperaturas y presiones adecuadas del vapor. Este tiempo depende de cuán fría está la caldera al momento de arrancar la turbina a vapor, lo que implica que el tiempo de hold-point es función del tipo de partida de la central, la que puede ser en caliente, en tibio o en frío de acuerdo al tiempo que lleve fuera de servicio. En la tabla 2.3 se presentan tiempos típicos para el tipo de partida y el tiempo de hold-point.

_ Operación normal: Una vez sincronizada la turbina a vapor a la red, se está en condiciones de operar normalmente, entre el mínimo técnico y la potencia máxima instalada, tomando carga según RAMP+TV, el cual no es necesariamente igual a la tasa de toma de carga en ciclo abierto.

Funcionamiento con fuegos adicionales

A modo de obtener una mayor potencia de salida del ciclo combinado, ciertas plantas han implementado fuegos adicionales o ductos quemadores (duct burner o supplementary _ring en inglés), los cuales permiten generar más calor en la caldera mediante la combustión de combustible extra, aumentando la producción de vapor y por ende incrementando la potencia de salida de la turbina a vapor. La operación de los fuegos adicionales provoca que el heat-rate de la planta aumente entre un 5% a un 20 %,

disminuyendo su eficiencia, por lo que esta operación solo tiene sentido económico una vez que la central opera con todas sus turbinas encendidas y a plena carga.

Combustible alternativo

En Chile se ha ido implementando en los últimos años la operación con combustible alternativo en las centrales de ciclo combinado, adaptándose para esto las cámaras de ignición para funcionar tanto con gas natural como con diesel, esto con el fin de proveer una segunda opción en caso de desabastecimiento del combustible primario. La operación con el combustible alternativo implica que no solo los costos del ciclo combinado varían en al cambiar de combustible, sino que también algunos de sus parámetros lo hagan, tales como límites de potencia, rampas de toma/baja de carga, tiempos mínimos de operación, etc. En la tabla 3 se presentan parámetros técnicos de la turbina TG2, perteneciente a la unidad CC2 de la central Gas Atacama del SING, para el combustible primario y alternativo.

Tabla 3: Parámetros técnicos según combustible

Combustible	P_{max} [MW]	P_{min} [MW]	C.P [MW]	T_{minOff}	T_{minOn}	C.E [m ³ /kWh]
Gas Natural	123.71	95	0.95	00:20	01:00	0.315700
Diesel	129.5	95	0.96	00:20	30:00	0.000306

Fuente: Central Gas Atacama. Unidad CC2, turbina TG2

Rendimiento de un ciclo combinado

El rendimiento de un ciclo termodinámico ideal, o de Carnot, depende de la diferencia de temperatura entre un foco frío (T_{cold}) y un foco caliente (T_{hot}), según la expresión :

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_{hot} - T_{cold}}{T_{hot}}$$

Una turbina a gas posee una eficiencia de alrededor de un 40 %, en cambio un ciclo combinado tiene un rendimiento de alrededor de un 60 %, lo cual lo convierte en un proceso térmico de alta eficiencia. Esto se debe al aprovechamiento que se realiza de los gases de escape de la turbina a gas y al hecho que coexisten dos ciclos termodinámicos. Matemáticamente, la eficiencia de un ciclo combinado sin fuegos adicionales queda expresada por la expresión (2.2), y si se considera la existencia de estos, el rendimiento queda entonces expresado por la ecuación (2.3)

$$\eta = \frac{P_{TG} + P_{TV}}{\dot{Q}_{TG}}$$

$$\eta = \frac{P_{TG} + P_{TV}}{\dot{Q}_{TG} + \dot{Q}_{FA}}$$

En donde:

P_{TG}, P_{TV} :Potencia de salida de la turbina a gas y a vapor respectivamente.

\dot{Q}_{TG} :Calor de entrada a la turbina a gas.

\dot{Q}_{FA} :Calor de entrada a los fuegos adicionales.

En la figura 2.4 se aprecia el ciclo Brayton para una turbina a gas y el ciclo Rankine para una turbina a vapor junto a sus ciclos de Carnot correspondientes, los cuales se ilustran mediante la línea punteada. Se indican también las temperaturas de

trabajo características de cada ciclo. En la figura 35 se aprecia la operación conjunta de ambos ciclos de la planta de ciclo combinado, notándose la mejora en eficiencia y acercándose al ciclo ideal de Carnot.

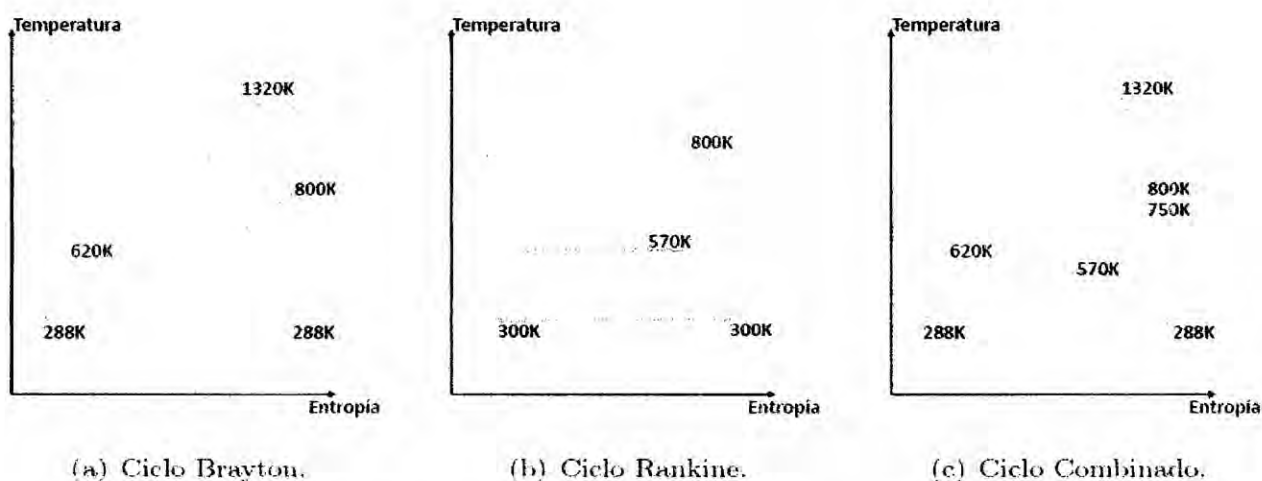


Figura 34: Operación Conjunta De Ambos Ciclos De La Planta De Ciclo Combinado

Fuente: <https://faeitch2012.wordpress.com/2012/02/16/ciclo-combinado/>

Condiciones ambientales

Los ciclos combinados son sensibles a los cambios en la densidad del aire, en la humedad y en la temperatura ambiente, afectando en distintas medidas a la potencia que es capaz de entregar la central. Esto se debe a que estas condiciones cambian el punto de diseño de la central, el que es especificado para condiciones estándar de 15_C, 60% humedad, 1.013bar de presión ambiente.

Los cambios ambientales afectan principalmente el rendimiento y/o la potencia de salida de la turbina a gas, lo que tendrá un efecto también en el ciclo de vapor.

_ Presión (altura): Las turbinas a gas están diseñadas para una presión ambiente de 1.013bar, lo que es aproximadamente equivalente a la altura a nivel del mar. La presión ambiente no tiene efecto en la eficiencia, pero si afecta el flujo másico de aire, provocando que la potencia de salida del ciclo combinado varíe en proporción a la presión ambiental. El efecto se puede apreciar en la figura 2.5(a), y si bien es considerable, este efecto es corregido en la etapa de diseño de la central.

_ Humedad: Tiene un efecto menor en el rendimiento del ciclo combinado, afectando al ciclo de vapor principalmente en plantas que poseen torres de enfriamiento. Esto es debido a que la humedad relativa está ligada al vacío del condensador, el cual afecta la temperatura de salida del vapor de la TV (foco frío del ciclo Rankine), cumpliéndose que a menor humedad aumenta el vacío del condensador. El rango de variación en eficiencia y potencia de salida del ciclo combinado es menor al _1% (figura 36).

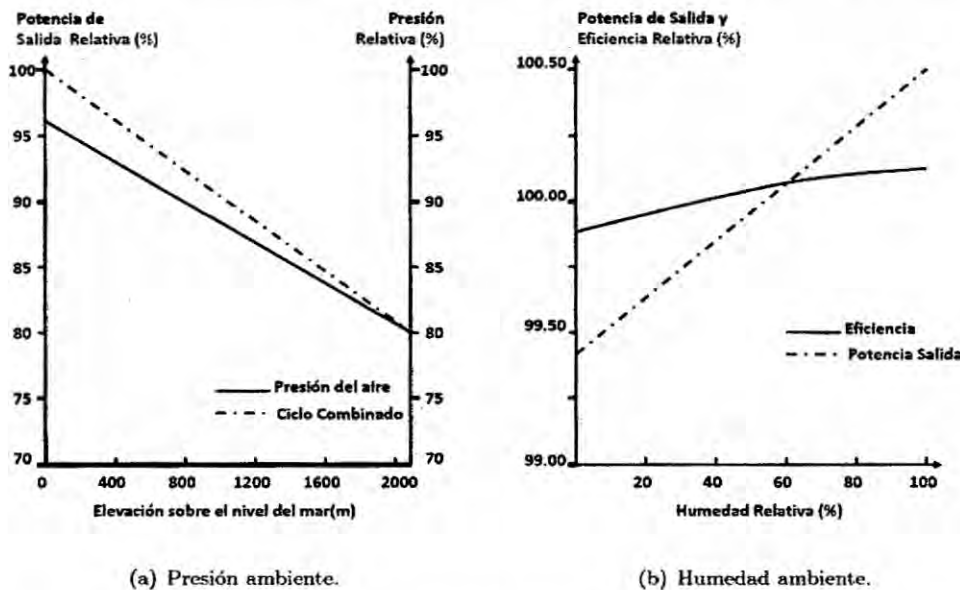


Figura 35: Rango de variación en eficiencia y potencia de salida del ciclo combinado
Fuente: http://www.ingenieria/variados/Expo%20Industria/Industria/nuev_concp_termic.htm

_ Temperatura: La temperatura ambiente afecta el rendimiento y potencia de salida del ciclo combinado, afectando en mayor medida a la turbina a gas y en menor forma a la turbina de vapor. Al aumentar la temperatura ambiente disminuye la densidad de aire, es decir hay menos oxígeno disponible por unidad de volumen de aire, afectando la combustión. Esto se resuelve aumentando el consumo de combustible y el flujo de aire para obtener un mismo nivel de potencia, incidiendo directamente al rendimiento de la turbina a gas: la eficiencia disminuye al aumentar la temperatura (o equivalentemente el heat-rate aumenta). Por otro lado, un aumento en la temperatura ambiente implica una disminución de la densidad de aire, lo que se traduce en un aumento del volumen específico de aire. Esto impacta fuertemente en el compresor, el cual para mantener una cantidad de masa constante debe captar un mayor flujo de aire, consumiendo una mayor potencia mecánica. Dado que se tiene una menor potencia mecánica disponible en el eje compresor-turbina a gas, esta _ultima disminuye su potencia de salida.

Otro efecto es sobre los gases de escape de la turbina a gas, los que suben su temperatura al aumentar la temperatura ambiente, mejorando la eficiencia de la turbina a vapor. Ahora bien, debido a que los gases de escape son una variable controlada que se busca mantener constante, este efecto es más bien leve.

En la figura se ilustra la variación de la eficiencia relativa (eficiencia con respecto al valor nominal) según la temperatura ambiente. Se aprecia que la turbina a gas tiene un rango de variación de la eficiencia relativa de _4% y la turbina a vapor un rango de _1%, cuando la temperatura se encuentra entre -10 °C y 30 °C. En la figura se

muestra la variación de la potencia relativa (potencia con respecto a la potencia máxima nominal) según la temperatura ambiente. Se puede observar que esta posee un rango de variación de 15% cuando la temperatura fluctúa entre -10°C y 30°C .

Plantas de Ciclo Combinado

Las plantas de ciclo combinado en la actualidad generan miles de megavatios, a diferencia de décadas atrás cuando plantas similares generaban alrededor de 100KW y dicha potencia era considerada como alta. Las presiones de vapor y de temperatura para los generadores de recuperación de calor en las plantas de ciclo combinado han sido incrementadas a rangos de 1000 psig a 2400 psig.

La principal ventaja de utilizar el ciclo combinado es su eficiencia, ya que se obtienen un rendimiento aproximadamente del 30% al 50% superior al rendimiento de una central de ciclo simple y mucho mayor que los de una de turbina de vapor. Éstas presentan menor costo de capital que las plantas de energía fósil en comparación con el aprovechamiento de energía (entregada como calor) para la generación de vapor.

En una planta de ciclo combinado se absorbe una parte del calor de los gases de descarga, generados en una planta de ciclo simple, y con ello, mejorar la recuperación térmica.

La combinación de dos procesos, representados por medio de los ciclos Brayton y Rankine, da como resultado un ciclo combinado el cual posee una eficiencia del 55 - 60%. En los sistemas más grandes, las calderas de recuperación poseen tres niveles de

presión y un recalentador, el cual es usado para incrementar la eficiencia de la planta al 55%.

Cabe señalar que la presión de salida de una turbina de gas se reduce significativamente a medida que aumenta la temperatura ambiente. La baja densidad del aire caliente reduce el flujo de masa a través de la turbina y el flujo de los gases de escape a través de la caldera de recuperación, que a su vez reduce la generación de vapor y por lo tanto la potencia de salida de la turbina de vapor. En la tabla 1¹ se muestran plantas de ciclo combinado y algunas de sus características

Aplicaciones

Las plantas de ciclo combinado usan típicamente calderas de recuperación de calor sin quemadores, y generan niveles de vapor a multi - presión con una compleja distribución de la superficie de calor para maximizar la recuperación de energía.

En las plantas de ciclo combinado, las calderas de recuperación de calor a menudo operan con cargas constantes.

2.6 Turbina de Gas

Las turbinas de gas son motores que convierten la energía química procedente del combustible, el cual entra en las cámaras de combustión a las cuales se inyecta aire proveniente de un compresor, y con ello disponer de un flujo que al tener contacto con los álabes de la turbina provoque un salto térmico que convertido en energía me-

¹ Para ver datos de la tabla 1 , ir a anexos

cánica produzca la rotación del eje para que éste a su vez se convierte en energía cinética en el compresor y energía eléctrica en el generador.

Tabla 4.- Precios de las Turbinas de Gas

Potencia (MW)	Costo (\$/Kw)
1-2	650-700
5	420-450
50	270-300
150	180-190
250	170-185
260-340	172-182

Una turbina de gas simple está compuesta de tres secciones principales:

- Un compresor,
- Un quemador y
- Una turbina de potencia.

Las turbinas de gas operan en base al principio del ciclo Bryton, en donde aire comprimido es mezclado con combustible bajo condiciones de presión constante.

Una variación del sistema de Turbinas de gas es añadir un regenerador, cuando se trabaja con bajas presiones y un interenfriador cuando se trabajan con presiones altas.

- El **regenerador** es un intercambiador de calor que aprovecha la energía de los gases calientes de escape al precalentar el aire que entra a la cámara de combustión.
- El **interenfriador** sirve para enfriar el aire entre las etapas de compresión, permitiendo quemar más combustible y generar más potencia. El factor limitante para la cantidad de combustible utilizado es la temperatura de los gases calientes creados por la combustión, debido a que existen restricciones a las temperaturas que pueden soportar los álabes de la turbina y otras partes de la zona caliente.

El rendimiento de las turbinas de gas, está muy lejos de igualar el rendimiento de los motores alternativos, y algunas veces, el de las turbinas de vapor; esto es debido a:

- Existe una cierta dificultad para construir compresores rotativos que permitan alcanzar elevadas relaciones de compresión.
- La dificultad de conseguir materiales que soporten temperaturas elevadas, al tiempo que mantienen unas determinadas características técnicas.

La temperatura de ingreso de los gases a la turbina es de aproximadamente unos 1832°F (1000°C), para las de uso industrial y hasta unos 2372°F (1300°C) para turbinas a gas de uso aeronáutico y alta eficiencia. Las presiones máximas están entre 2 y 4 MPa (290.8 y 580.15 psi) para las turbinas de gas.

Ciclo de Brayton

Se denomina ciclo Brayton a un ciclo termodinámico de compresión, calentamiento y expansión de un fluido compresible, generalmente aire, que se emplea para producir trabajo neto por medio de una turbina.

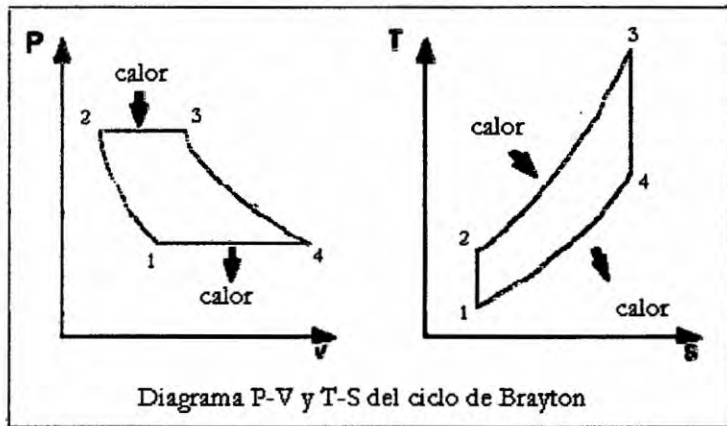
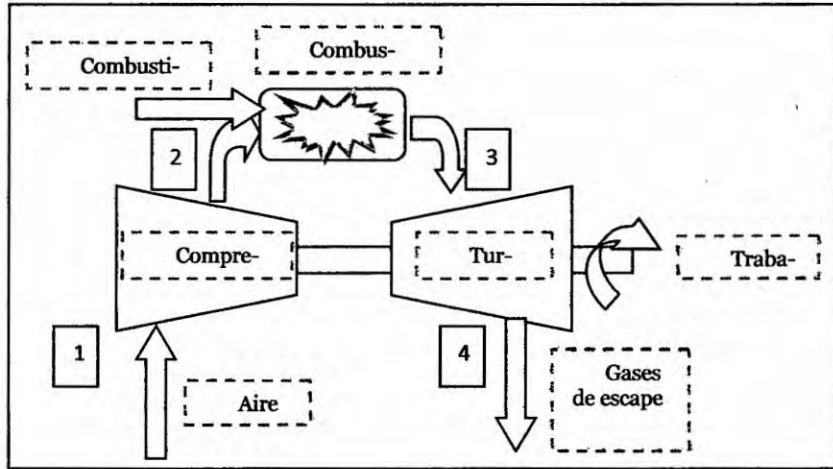


Figura 36- Ciclo de Brayton - Diagrama P-V y T-S del ciclo de Brayton

Fuente.- http://eribera_bo.tripod.com/ciclo_brayton.html

En la mayoría de los casos el compresor, el cual forma parte del ciclo Brayton, opera con fluido atmosférico o aire, en ciclo abierto, lo que significa que toma el fluido directamente de la atmósfera para someterlo a compresión, y posteriormente ingresa a un ciclo de calentamiento en un combustor, y por último, a una expansión por medio de una turbina.

Ese ciclo representa, en la turbina de expansión, más trabajo del que se consume en el compresor, este ciclo representa la mayoría de turbinas de gas utilizadas en aviones comerciales y centrales termoeléctricas.

Al emplear como fluido termodinámico el aire, el sistema puede operar a temperaturas elevadas, por lo que es idóneo para aprovechar fuentes térmicas de alta temperatura y obtener un alto rendimiento termodinámico.

Sobre el ciclo básico existen variantes que son utilizadas para mejorar alguna de sus prestaciones, como la potencia o el rendimiento. Ejemplos de estas variantes son el ciclo Brayton con regenerador, el ciclo Brayton de múltiples etapas (de compresión u expansión), o un ciclo combinado.

Incremento de la Producción en la Turbina de Gas

Los tres métodos más comunes de incrementar la producción de la turbina a gas son:

- Inyección de vapor
- Pre-enfriamiento del aire de admisión
- Múltiples etapas de compresión y expansión

Inyección de vapor

La inyección de vapor en la turbina de gas ha sido una estrategia adoptada por usuarios de la turbina por un largo tiempo para incrementar la potencia de salida. El aumento del flujo másico junto con la alta conductividad térmica y el calor específico de los gases de escape (debido al alto porcentaje por volumen de vapor de agua) ge-

neran más energía en la turbina de gas y mayor producción de vapor en la caldera de recuperación.

Pre-enfriamiento del aire de admisión

El enfriamiento evaporativo eleva la producción de la turbina de gas por el aumento de la densidad y el flujo másico del aire. La eficacia del sistema de enfriamiento evaporativo es limitado por la humedad relativa del aire. A 95°F de temperatura del bulbo seco y 60% de humedad relativa, un 85% el enfriador evaporativo puede alterar la temperatura de entrada del aire y la humedad contenida a 85°F bulbo seco y 92% humedad, respectivamente.,

El costo del agua tratada, la cual se pierde en la atmósfera, también debe considerarse en la evaluación de este sistema. La eficacia del mismo sistema en menores condiciones de humedad, por ejemplo 95°F y 40% de humedad relativa, es mucho mayor. El mismo enfriador evaporativo puede reducir la temperatura de entrada del aire a 75°F bulbo seco y 88% de humedad. La producción de la planta de ciclo combinado incrementa a 30%, y la transferencia de calor por alrededor de 1.9%. Sin el enfriador evaporativo, el aire no puede ser enfriado por debajo de la temperatura del bulbo húmedo, por lo que los enfriadores son usados con éste propósito.

Algunas veces las calderas de recuperación de calor generan vapor a baja presión necesaria para el enfriamiento, o puede ser tomada de algún cabezal de baja presión de vapor. A diferencia de los enfriadores mecánicos, la eficiencia de un absorbente no cambia con la disminución de la carga. La salida del agua enfriada está limitada a unos 44°F produciendo aire a la entrada a unos 52°F.

Un enfriador mecánico puede fácilmente reducir la temperatura de entrada de aire de la turbina de gas de 95°F a 60°F en Bulbo seco y lograr el 100% humedad. Esto incrementa la producción de la planta a 8.9% pero también deteriora la transferencia de calor neta en el ciclo combinado en un 0.8% y producir una caída de presión de 1.5 pulg. de agua a la entrada de aire, debido al intercambiador de calor localizado en la sección de enfriamiento.

Efectos de la Temperatura Ambiente en el Rendimiento de la Turbina de Gas

La energía de salida de la turbina de gas sin el enfriamiento de la temperatura del aire de entrada, o las condiciones sufridas en la alta temperatura ambiente debido al efecto de baja densidad de aire provoca la reducción del flujo de masa de aire y a su vez la potencia de salida podría caer de un 15-25% entre las temperaturas más frías y calientes. El flujo de gas de escape, la temperatura y el análisis de gas también varían con la temperatura ambiente, las cuales afectan el rendimiento de la caldera de recuperación de calor.

Efecto de la Carga de la Turbina de Gas

En general si las turbinas de gas trabajaran a bajas cargas, se vería afectado no solo su rendimiento, sino también el de la caldera de recuperación de calor, que se encuentra localizada detrás de ella. Debido a la baja temperatura de los gases de salida, provocada por trabajar a una menor carga, la caldera de recuperación de calor genera menos vapor y también pierde el potencial para producir el vapor en el evaporador.

Al trabajar las turbinas de gas a una baja carga² provoca una baja temperatura de salida de los gases de escape de la caldera de recuperación de calor, el cual comparada con una turbina de gas que funciona a cargas normales, estos valores de temperaturas son demasiados bajos, y esto se debe al hecho que menos vapor es generado en el evaporador, y por lo tanto, el flujo a través del economizador también es pequeño, produciendo solo una pequeña caída de la temperatura de gas.

2.7 Turbinas de Vapor

Una turbina de vapor es una turbo máquina motora, que transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo (entiéndase el vapor) y los álabes, órgano principal de la turbina. En la turbina se transforma la energía interna del vapor en energía mecánica, que típicamente es aprovechada por un generador para producir electricidad.

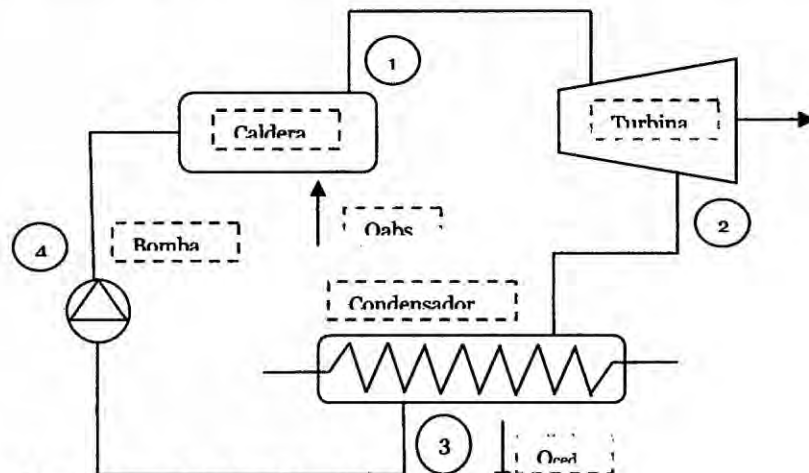


Figura 37.- Proceso De La Turbina De Vapor

Fuente: <http://www.energiaadebate.com>

El trabajo disponible en la turbina es igual a la diferencia de entalpía entre el vapor de entrada a la turbina y el de salida. El hecho de la utilización del vapor como fluido de trabajo se debe a la elevada energía disponible por unidad de kg de fluido de trabajo.

Dada la gran diferencia que se debe obtener entre la presión de entrada y de salida de la turbina es necesario producir esta expansión en distintas etapas o escalonamientos, con el fin de obtener un mejor rendimiento de la operación.

Si sólo se realizase la expansión en una etapa las grandes deflexiones a que tendría que estar sometido el fluido provocarían velocidad de rotación muy alta y también pérdidas inaceptables.

En las turbinas de vapor, la temperatura máxima está hoy limitada a unos 1004°F a 1112°F. Las presiones máximas son de unos 35 MPa para turbinas a vapor (350 bares). El tener altas presiones de admisión requiere una construcción robusta para las turbinas de vapor y equipos muy grandes.

CICLO DE RANKINE

El ciclo Rankine es un ciclo de planta de potencia que opera con vapor. Este es producido en una caldera a alta presión para luego ser llevado a una turbina donde produce energía cinética y donde perderá presión. Su camino continúa al seguir hacia un condensador donde lo que queda de vapor pasa a estado líquido para poder entrar a una bomba que le subirá la presión para nuevamente poderlo ingresar a la caldera.

Existen algunas mejoras al ciclo, como por ejemplo agregar súper calentadores a la salida de la caldera que permitan obtener vapor sobrecalentado para que entre a la turbina, y aumentar así el rendimiento del ciclo.

La idea para mejorar un ciclo Rankine es aumentar el salto entálpico, es decir, el trabajo entregado a la turbina. Las mejoras que se realizan de forma habitual en centrales térmicas (tanto de carbón, como ciclos combinados o nucleares) son:

- Reducción de la presión del condensador: En este procedimiento se disminuye automáticamente la temperatura del condensador otorgando un mayor trabajo a la turbina, obteniendo una disminución del calor rechazado. La desventaja es que la humedad del vapor empieza a aumentar ocasionando erosión en los álabes de la turbina.
- Aumentar la presión de la caldera: Al aumentar la presión aumenta la temperatura a la cual se añade calor aumentando el rendimiento de la turbina por ende la del ciclo. La desventaja es la humedad excesiva que aparece.
- Sobrecalentar la temperatura de entrada de la turbina: se procede a recalentar el vapor a altas temperaturas para obtener un mayor trabajo de la turbina, tiene como ventaja que la humedad disminuye. Este aumento de la temperatura está limitada por los materiales a soportar altas temperaturas.
- Recalentamientos intermedios del vapor, escalonando su expansión: Esto es, tener varias etapas de extracciones en la turbina, llevando a condiciones de sobrecalentamiento mediante recalentadores (Moisture Steam Reheaters) y de economizador. Este escalonamiento de la expansión da lugar a las secciones de alta, media y baja presión de turbina.

- Realizar extracciones de vapor en la turbina, calentando el agua de alimentación a la caldera, aumentando su entalpía. El número de extracciones no suele superar las 7, ya que no implicaría una mejora de rendimiento considerable frente a la complicación técnica que conllevan.

Una de las preocupaciones en una máquina de vapor basada en el Ciclo de Rankine es que una alta temperatura de vapor es requerida con una alta presión de vapor para minimizar la humedad en el vapor después de la expansión.

Los impactos de la humedad afectan negativamente el rendimiento de la turbina a través del desgaste, la formación de depósitos y con ello provocar la obstrucción en el paso del vapor.

Como se puede ver en la figura, una alta presión de vapor para una misma temperatura da resultados más altos de humedad después de la expansión.

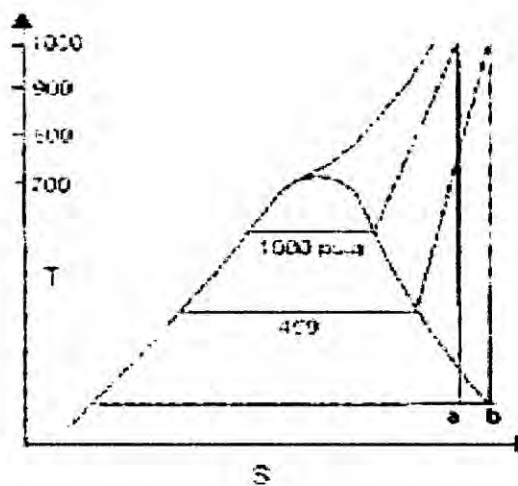


Figura 38: .- Diagrama T-S Con Expansión De Vapor

Fuente: http://www.unet.edu/~fenomeno/Rankine_R-77.htm

MARCO FILOSÓFICO

1.- En el desarrollo de mi investigación sobre el tema del impacto de las calderas en el medio ambiente, y sobre todo en el marco filosófico en el que está inmerso mi tema con relación al impacto medio ambiental que estas acarrearán al planeta, es que mi diseño, al que he llamado Sistema Medusa, por la disposición de los tubos dentro de la caldera, los cuales evitan pérdidas de calor y por ende un ahorro de combustible y menos emisiones al medio ambiente de productos de combustión (lo cual se va a comprobar en un capítulo posterior), me han permitido pensar y compartir las ideas y palabras que la Msc. Bertha Nudis Ferrer Hechavarria escribe en su tema “Miremos Los Problemas Del Medio Ambiente Desde La Filosofía” en la cual menciona cómo al abordar el problema del medio ambiente debe tenerse presente la dinámica de la relación del hombre con su entorno así como su especificidad, y éste no es un problema simple sino que encierra aspectos económicos, políticos, éticos, educativos, cuestiones de identidad, etc., lo que pone de manifiesto la urgencia de estudios filosóficos que rebasen el marco particular presente en la mayoría de las investigaciones realizadas, pues la Filosofía siempre ha estado vinculada al conocimiento y ha sido expresión de diferentes concepciones del mundo que han caracterizado las comunidades humanas, en tanto su reflexión gira en torno a los problemas de la relación hombre-mundo.

Por si fuera poco al seguir investigando otros autores, tesis, trabajos de investigación, papers, etc., sobre el marco filosófico relacionado con mi tesis, he podido coincidir

mi forma de pensar, de ver las cosas que suceden en el mundo con relación al tema del medio ambiente, incluso desde una óptica seglar y religiosa, como este tema en la actualidad mueve al mundo y trata de salvarlo de una muerte inminente y segura si no se toman las medidas necesarias para detener al peor depredador que existe sobre nuestro planeta, el cual solo piensa en su corta comodidad sin tener en cuenta a los demás, nos referimos al mismo ser humano, que con su idea equivocada, extraída de los pensamientos de algunos egocentristas, egoístas y hasta suicidas, que dicen “Disfrutemos ahora que mañana hemos de morir” o “De algo hemos de morir” y no hacen más que contaminar y destruir nuestro hermoso planeta del cuál muchos queremos disfrutar incluso con nuestras familias, recordemos cuán hermoso y saludable era ir los fines de semana de verano a la playa con toda la familia, desde el más grande y viejo hasta el más chico y joven y disfrutar todo el día de mar y sol, pero ahora esto ya no es posible a ese nivel, pues hay que agregarse muchas capas de productos químicos para evitar repercusiones del sol y de la contaminación del agua del mar, sin contar claro está con toda la suciedad que la acompaña. Solo para poner un ejemplo. Es por ello que al leer el ensayo de la Msc. Bertha Nudis Ferrer Hechavarria¹ que escribe en su tema “Miremos Los Problemas Del Medio Ambiente Desde La Filosofía” me identifico con todo lo que ella menciona y el cual quiero compartir un resumen con ustedes, allí ella menciona lo siguiente:

“La problemática ambientalista ha venido a ocupar uno de los espacios significativos hoy en los más diversos círculos de intelectuales, políticos, economistas, científicos de

¹ “Miremos los problemas del medio ambiente desde la filosofía” Enviado por Bertha N Ferrer Hechavarria.

las más variadas ramas, tecnólogos, organizaciones, personalidades, hombres, mujeres y niños de diferentes naciones, credos, culturas, etc. Las relaciones del hombre con su entorno y del hombre con el hombre se hacen cada vez más controvertidas, pues éste históricamente ha tratado de satisfacer sus necesidades a costa de la naturaleza y no pocas veces en detrimento de las de sus semejantes, lo que ocasiona el deterioro del planeta, que en los últimos tiempos ha alcanzado un ritmo acelerado. Para superar la desfavorable situación se toman numerosas medidas de carácter sociopolítico, económico, jurídico, científico y técnico, que no siempre constituyen la solución a los **problemas**.

Compartimos este mundo con muchas otras especies; la diversidad biológica está cerca de alcanzar el **punto más alto** en la historia de la evolución del planeta y somos la especie superior. Pero como nos enseña la Biología Evolucionista, la superioridad no representa un papel decisivo en la determinación de los organismos que sobreviven, sobre todo en los períodos de extinción en masas; tenemos que admitir, por tanto, que "somos una parte del batallón de los afortunados supervivientes de las convulsiones catastróficas del pasado y no las expresiones de una antigua superioridad". (Leakey y Legwin, 1992).

Nuestro planeta vive hoy una situación de precariedad que permite constatar con claridad, que la crisis ambiental encierra, de hecho, una **crisis** que como bien observara Guimaraes "sus causas y sus implicaciones revelan dimensiones económicas, políticas, institucionales, sociales y culturales, y sus efectos trascienden las fronteras nacionales. Sus manifestaciones se proyectan, por una parte, en el ámbito ecológico

(empobrecimiento progresivo del patrimonio nacional del planeta) y ambiental (debi-
litamiento de la capacidad de recuperación de los ecosistemas), pero revelan además
el carácter eco político de la crisis (político-institucional), directamente relacionado
con los sistemas institucionales de **poder** que regulan las prioridades, distribución y
uso de los recursos naturales. Las propuestas de superación de la crisis, en especial,
las que privilegian la sustentabilidad de un nuevo estilo de desarrollo, ponen al des-
cubierto, por ultimo, su dimensión cultural, al advertir la necesidad del cambio en el
propio modelo de civilización hoy dominante, particularmente en lo que se refiere al
patrón de articulación sociedad- naturaleza " (Guimaraes 1998).

Al abordar los problemas del medio debe tenerse presente la dinámica de la relación
del hombre con su entorno así como su especificidad; éste no es un problema simple
sino complejo y encierra aspectos económicos, políticos, éticos, educativos, cuestio-
nes de identidad, etc.; esto pone de manifiesto la urgencia de estudios filosóficos que
rebasen el marco particular presente en la mayoría de las investigaciones realizadas,
pues la Filosofía siempre ha estado vinculada al conocimiento y ha sido expresión de
diferentes concepciones del mundo que han caracterizado las comunidades humanas,
en tanto su reflexión gira entorno a los problemas de la relación hombre- mundo. La
problemática ambiental enfatiza en esta relación lo que permite a partir del instru-
mental teórico –metodológico de la Filosofía, derivar un análisis más específico y a la
vez general acerca de la complejidad de los problemas del medio ambiente.

"Lo ambiental trasciende los límites de lo espacial (local) de lo temporal (de un de-
terminado contexto histórico) por tanto adquiere una connotación general por lo que

el análisis de su esencia no puede limitarse a un enfoque fragmentado de la ciencia, aún cuando éste es necesario para el análisis que ocupa el problema. Integrado en un todo que abarca esa complejidad de su totalidad requiere de un análisis generalizado en el cual tenemos todavía mucho que hacer" (Rodríguez, 1998).

El hombre históricamente ha pensado y teorizado acerca de los problemas ambientales y sus vínculos con la naturaleza, cuestión esta que forma parte del pensamiento filosófico.

Así, los antecedentes más remotos de esta problemática se encuentran en el devenir histórico del vínculo **sociedad** – naturaleza. Esta relación está íntimamente vinculada a la cuestión fundamental de la filosofía, la de la actividad del sujeto que conoce y actúa ante el objeto que existe fuera de su conciencia. El objeto natural que en la conceptualización metafísica se contrapone al hombre como fuerza ajena y hostil, en la visión materialista del mundo surge como componente del sistema del ser en todas las etapas de su desarrollo. El hombre moderno, que posee un gigantesco poderío, no puede existir sin las condiciones naturales que le son necesarias en la misma medida en que no podía existir sin ellas el hombre primitivo que dependía de la naturaleza.

En nuestra visión los problemas ambientales constituyen una consecuencia negativa de la actividad práctica del sujeto que conoce y transforma al objeto y esta puede estar dada tanto por la sobreexplotación desmedida de la naturaleza para lucrar con ella, por el desarrollo y la pobreza, por la falta de conciencia y conocimiento, etc. por eso vale decir que es importante el conocimiento de los factores que posibilitan esa relación dialéctica del hombre con la naturaleza. Cabe aquí recordar las palabras de Martí

en sus "Escritos sobre Educación", quien con visión filosófica que trascendió a su época expresó. "Divorciar al hombre de la tierra es un atentado monstruoso y es meramente escolástico ese divorcio. A las aves alas, a los peces aletas, a los hombres que viven en la naturaleza, el conocimiento de la naturaleza, esas son sus alas".

En ese proceso de interacción del hombre con su medio, el primero ha estado históricamente en el centro de dicha relación y en orden prioritario donde lo que cuenta es, por sobre todas las cosas, la consecución de sus aspiraciones, incluso en detrimento de las de otros hombres y del mantenimiento del equilibrio natural si fuera necesario.

En la medida en que el hombre ha ido aumentando su "poder sobre la naturaleza" y sobre los demás hombres, preocupado por sí mismo, ha ido venciendo sus temores a la naturaleza y con ello el temor a destruir el entorno, actuando siempre movido por las primera necesidades, sin prestar la debida atención a la existencia de leyes del desarrollo tanto natural como social, o en ocasiones tratando de "someterlas" a sus antojos para actuar "libremente", cuando en verdad la libertad es actuar con conocimiento de causa y en correspondencia con las leyes objetivas del desarrollo, tal como nos enseñaron los clásicos de la filosofía del marxismo.

Los economistas políticos del siglo XIX, incluyendo a Marx y a Engels, ponen al descubierto por primera vez, la polémica entre el crecimiento económico y las limitantes de los recursos naturales; esta polémica que va a estar presente en el desarrollo del pensamiento ambientalista hasta nuestros días, es expresión del dilema economía - ecología y en un sentido más amplio, expresión de la relación contradictoria sociedad - naturaleza.

Como se ve, la Filosofía aporta elementos de gran importancia para la reflexión teórica y las acciones prácticas sobre las cuestiones ambientales que están expresando problemas de la relación hombre – mundo, pues es una ciencia que no obstante reflejar la realidad con cierto grado de universalidad es también el sustento de las ciencias particulares. Es por todo lo antes dicho que el tratamiento de los problemas ambientales debe ser enfocado, a partir de las concepciones de la Filosofía Dialéctico – Materialista.

A pesar de que en el siglo XX tuvieron lugar importantes reuniones, cumbres y otros encuentros que involucraron a jefes de Estado, movimientos ambientalistas, investigadores, etc., que indican que en alguna medida se ha ido produciendo un consenso a nivel internacional en torno a la necesidad de tomar medidas urgentes para salvar a nuestra casa común, el inicio del siglo XXI ha estado marcado por acontecimientos genocidas, terroristas y guerreristas que lejos de minimizar la desfavorable situación del medio ambiente lo que hacen es agudizarla aún más poniendo cada vez más en peligro la vida en el planeta Tierra no solo para las actuales generaciones de seres humanos sino también para las futuras.

En resumen, en el desarrollo histórico de la relación sociedad – naturaleza se distinguen tres formas: en la primera existe una dependencia del hombre con relación a la naturaleza. El reflejo ideal de esa dependencia son los mitos y la religión. Los hombres, "pequeños" se pierden ante la gran y temible naturaleza, el hombre no puede obtener de aquella sus medios necesarios para subsistir. La segunda forma de esta relación se realiza en la práctica de la producción y crece incesantemente apoyándose en

la técnica y las ciencias, a partir de este momento y en forma progresiva esta relación resulta ser la del dominante y lo dominado. En esta etapa la naturaleza interesa al hombre principalmente por sus recursos alimenticios, energéticos y materias primas. El hombre considera a la naturaleza como un gran recipiente del que puede extraerse de manera interrumpida todo lo que se necesite, sin llegar a considerar los daños que con su actividad ocasionaría a éste, su objeto, sin considerar que dichos daños, también le ocasionarían trastornos al propio hombre. La naturaleza no es algo ajeno al hombre, no es su ser otro, sino que el hombre es parte indisoluble de ella, por tanto, no puede ser dominada, como señaló Engels, como un conquistador domina a un pueblo extranjero. En la tercera forma se ponen de manifiesto las alteraciones esenciales del equilibrio dinámico de la relación producción – naturaleza; es particularmente complicado el problema de los llamados recursos renovables de la Biosfera; se complica sobremanera el proceso de eliminación de los residuos industriales y resulta cada vez más difícil asegurar al hombre el aire relativamente puro y el agua dulce. Es por esto que se insiste en la toma de conciencia desde la posición de un ciudadano promedio, cuyo accionar se enlaza de forma concatenada con el de otros muchos, para dar un resultado con carácter social a partir de una manera distinta de concebir el mundo y las complejas relaciones que en él tienen lugar. Para estos fines es menester dar una mirada crítica a las concepciones de racionalidad que han llegado hasta nuestros días.

2.- Por otro lado dentro del mismo marco filosófico, también he podido leer y compartir en parte las ideas y comentarios del autor Francisco Piñón² en su ensayo ti-

tulado “Filosofía, Eticidad y Medio Ambiente” algunos conceptos desde el punto de vista religioso, como es que él también enfoca el tema, donde él menciona lo siguiente:

“Hablar del medio ambiente es hablar del sentido de totalidad. Una totalidad que, en términos religiosos, en nuestro mundo occidental podría empezar con el relato bíblico de la Creación, o en términos científicos, con el modelo de la Gran Explosión, según la radiación cósmica, la más antigua que se conoce, descubierta por Penzias y Wilson, y que tiene una fecha de 300 mil años de antigüedad. Todo esto es, obviamente, el “medio ambiente” fundamental”. Por tal motivo, el medio ambiente del que hablamos es nuestra propia obra humana. Hace mucho que, como dice Heidegger, “los dioses huyeron del mundo” y hace mucho que se conquistó, con la modernidad, la conciencia de la autonomía del hombre; de que este mundo es la casa del hombre.

Desde el Génesis, cuando el hombre-Adán, representante de la humanidad, al ser expulsado del Paraíso fue condenado a ganar el pan “con el sudor de su frente” y, como primera señal de autonomía, fue conminado a dominar la naturaleza.

Dominar la naturaleza llamando a las cosas por su nombre; dominar, que significa recrear un mundo para que el salmista prosiguiera cantando las glorias del Creador, al ver la magnificencia de la naturaleza.

2 Francisco Piñón estudió las licenciaturas en filosofía en la Universidad Gregoriana, en Roma, y en filosofía y letras en Montezuma College, USA. Es doctor en ciencias sociales, con especialidad en filosofía política, por la Universidad Internacional de Santo Tomás, de Roma. Es presidente del Centro de Estudios Sociales Antonio Gramsci de México.

Ya hace tiempo que no vivimos con los dioses, con esos dioses griegos que se mezclaban con los hombres, como nos lo escribía Jenófanes. El hábitat humano era, al mismo tiempo, el lugar donde los dioses del Olimpo transitaban por el mundo. Hábitat que ya desde el siglo VI a.C. se detectaba en decadencia, tal y como Teognis lo describía a Cirno presagiano el *homo homini lupus*. Por eso la racionalidad griega tuvo que inventar su ética para poder vencer la influencia maléfica de Iris y erigir la *phronesis* de las virtudes morales, especialmente la justicia para una *paideia*, en donde se pusiera por norma la más antigua formulación ético-ecológica que conoce la tradición occidental: que lo que es bueno por ley, sea también bueno por naturaleza. Por supuesto, la ecología y el medio ambiente deben tener un diagnóstico tecnocrático. Pero no basta si el conductor o el creador o el actor (que es el hombre) tienen contaminada su mente con “malas yerbas”. Se necesita, por consiguiente, una nueva ética de nuestra posmodernidad. Después del horror de los campos nazis de exterminio, después de las continuas guerras de conquista y expansión, después de Chernobil, del sida, del problema de racismos, de migraciones forzadas y de inmigraciones combatidas, es necesario preocuparnos por una nueva idea humanista. La sola ciencia-técnica, sola ella, como lo pensara Heidegger, se queda mirándose a sí misma. Pero dentro del mismo marco filosófico de Piñón que toca la parte religiosa, como ya mencioné, concuerdo con algunos puntos pero difiero en otros, pues desde mi punto de vista seglar y religioso con respecto al tema del medio ambiente, concuerdo en su totalidad con un artículo publicado por la Revista Atalaya de setiembre del 2014 titulado “¿Acabará el hombre con la Tierra?” el cual me permito recomendar.

MARCO EPISTEMOLÓGICO

Dentro del marco epistemológico planteado en la presente tesis, he podido investigar sobre muchos puntos de vista, verdades y conclusiones que plantean diversas teorías, pero con la cual concuerdo y creo que es la más acertada y la que más se acerca con lo que planteo y pienso es lo que pude leer de las Memorias del VII Congreso Nacional de Investigación Educativa Guadalajara, México, Noviembre Del 2003. El cual es presentado y resumido por María Luisa Eschenhagen ¹ bajo el título “Reflexiones epistemológicas para fundamentar una educación superior ambiental alternativa”. El mismo que deseo compartir con todos.

Nombre de la autora: María Luisa Eschenhagen ¹

Resumen

La problemática ambiental es vista como un problema de conocimiento, por lo cual es necesario proponer una estrategia epistemológica para una educación ambiental efectiva. Al ser la cosmovisión la que justifica y legitima las actuaciones del hombre, es necesario revisar la cosmovisión dominante, es decir el conocimiento científico. Para tal fin se revisan brevemente las críticas hechas por Kuhn y Foucault al conocimiento convencional para luego justificar y presentar el pensamiento de la complejidad como una visión diferente. Ahora, aproximarse al entendimiento de la complejidad involucra revisar dos instrumentos que son la Teoría de Sistemas y la Interdisciplinariedad, pero los cuales también se tienen que examinarse críticamente en sus potencialidades y limitaciones para reconocer, si ayudan o no a un conocimiento alternativo para

comprender mejor la problemática ambiental y por ende para poder iniciar una educación ambiental, con una base epistemológica diferente.

Reflexiones epistemológicas para fundamentar una educación superior ambiental alternativa ²

El problema ambiental como un problema de conocimiento El conocimiento de una sociedad estructura su cosmovisión. Esta cosmovisión determina la posición del hombre en el mundo, justifica su relación con el medio, explica los fenómenos circundantes, regula las interrelaciones, como también un cierto tipo de valores y normas.

Todo esto legitima las formas de poder que surgen de ese conocimiento y los actos resultantes, ofreciendo distintos esquemas de solución a los problemas. Se crea pues una realidad muy concreta. Generalmente las cosmovisiones dan lugar al sistema de creencias, más o menos, elaboradas en todas las sociedades. La gran variedad se debe tanto a la gran creatividad del hombre como a la gran variedad de ecosistemas que exigen diferentes tipos de adaptación. Lo anterior permite afirmar que la proble

1 Pregrado en Educación (Alemania), Maestría en Análisis de Problemas Políticos, Económicos e Internacionales contemporáneos (Colombia), actualmente adelantando el doctorado en Estudios Latinoamericanos en la UNAM con la tesis "La educación ambiental superior en América Latina: cómo se refleja la interdisciplinariedad en los planes curriculares de maestría?" (con el apoyo de la Universidad Externado de Colombia) mariesche22@yahoo.com.mx.

2 Autora: María Luisa Eschenhagen, doctorante en Estudios Latinoamericanos de la UNAM, mariesche22@yahoo.com.mx

mática ambiental es un problema de conocimiento y termina cuestionando a éste de fondo. La comprensión de lo anterior hace necesario revisar las críticas y los aportes al conocimiento de Kuhn³ y Foucault⁴. Kuhn intuye que el objeto propuesto para la teoría científica por el ‘Círculo de Viena’ resulta corto e insuficiente para entender y explicar los avances y cambios en la ciencia, por ello propone incluir el ‘quehacer’ científico mismo en su dimensión histórica. Pero Kuhn no rebasa el contexto científico tradicional, es decir su crítica se da dentro del mismo discurso. Foucault va mucho más allá con su análisis crítico sobre el conocimiento, al liberarse primero de las preguntas tradicionales⁵ se pregunta más bien qué relaciones existen entre el conocimiento y el poder con lo cual permite otra aproximación al fenómeno de la ciencia. Por un lado la crítica de Kuhn, quien ve las restricciones en la racionalidad científica⁶

3 Kuhn, Thomas, *La estructura de las revoluciones científicas*, FCE, Bogotá, 2000 [1962] y ver también Bayertz, Kurz, *Wissenschaftstheorie und Paradigmbegriff*, Metzler Verlag, Stuttgart, 1981

4 Foucault, Michel, *Archäologie des Wissens*, Suhrkamp taschenbuch, Frankfurt, 1997 [1973] y ver también Fink-Eitel, Michel *Foucault zur Einführung*, Junius Verlag, Hamburg, 1997 [1990]

5 condiciones de posibilidad, verdad, coherencia, etc.

6 en una entrevista expresa claramente que no cree que el programa de la ciencia pueda durar infinitamente, aún bajo condiciones óptimas... podría llegar a estancarse, ver Horgan, John, *An den Grenzen des Wissens*, Fischer Verlag, Frankfurt, 2000 p. 82

7 Ver solamente la gran mayoría de los planes curriculares que se aferran a esos esquemas tradicionales y ver lo difícil que resulta lograr innovaciones curriculares

8 muy ilustrativo para mostrar este aspecto, resulta ser todo el Nr. 60-61 de la Revista Ciencia, revista de difusión de la facultad de ciencias, oct. 2000-marzo 2001, UNAM, que tiene como tema “La imagen de los

de donde se desprende 'la incapacidad de la ciencia' para solucionar (ad infinitum) p.ej. los problemas ambientales, es decir, mientras se mantienen los viejos paradigmas se crean realidades concretas que mantienen los mismos problemas⁷. Por otro Foucault, quien muestra claramente cómo se van creando realidades concretas específicas a partir de un cierto conocimiento y el poder que se ejerce a través de éste⁸. Muestra que este aspecto resulta importante para ver cómo el problema ambiental es un problema de conocimiento con el cual se justifican medidas políticas y se siguen intereses de poder⁹, por lo anterior resulta indispensable revisar los planes curriculares, a través de los cuales se reproduce el conocimiento que ha deteriorado el medio ambiente.

Si el conocimiento crea un cierto tipo de realidad, la problemática ambiental será un ejemplo, ya que a partir de ella se cuestiona p.ej. la racionalidad de la economía dominante, la tecnología, etc. que hicieron posible semejante destrucción, es decir, la problemática ambiental exige entender como dice Leff "la producción teórica en tanto que genera un efecto de conocimiento de lo real, al mismo tiempo que induce una transformación de lo real"¹⁰, es decir existe una interdeterminación entre el proceso

9 Ver p.ej. las discusiones al rededor del cambio climático o de la biotecnología, donde se pueden observar claramente las posiciones a favor y en contra utilizando resultados científicos respectivamente.

10 Leff, Enrique, *Ecología y Capital*, Ed. Siglo XXI, México 1986 [1996] p. 32

11 Leff, Enrique, *Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo*, Ed. Siglo XXI, México, 1986 [2000], p. 36 y *Ecología y Capital*, p. 78

12 *Ibid* p. 31

real y el proceso de conocimiento, Leff propone la epistemología como una estrategia de gestión ambiental, considerando que el conocimiento no se constituye independientemente ni se da en un vacío ideológico. Se trata de un marco de lucha donde se producen y se aplican los conocimientos con el fin de obtener en una comunidad o población, una cierta autonomía cultural, una autogestión tecnológica, la propiedad de las tierras y los recursos respectivos, una producción y aplicación de ciertos conocimientos para indígenas en la ciencia” la cual justifica en cierto momento histórico p.ej. la eugenesia. En este número se muestra claramente cómo a partir de un conocimiento se crean realidades concretas para los indígenas, p.ej. discriminación racial, de manera totalmente ‘legítima’. Una vida sustentable, una innovación de las formas de organización productiva¹¹. Así, la estrategia se entiende como “una lucha en el campo del conocimiento contra el reduccionismo de las ideologías teóricas generados por una ecología generalizada y un pragmatismo funcionalista”¹².

Esto, en combinación con su propuesta “una mirada situada desde la complejidad ambiental -entendida como expresión de la crisis de civilización-, desde donde se desentrañan los orígenes y las causas de esa crisis, y desde donde se proyecta un pensamiento (de la complejidad) para la reconstrucción del mundo. La hermenéutica abre los sentidos bloqueados por el hermetismo de la razón”¹³ que implica finalmente un refundamiento del saber sobre el mundo. En este trabajo se abordan la interdisciplinariedad y la Teoría de Sistemas para acercarse a la complejidad como una crítica y una alternativa a la epistemología tradicional que son transmitidas en las universidades, p.ej. en las maestrías ambientales, sustentadas generalmente en los paradigmas tradi-

cionales positivistas y mecanicistas. Para tal fin se quiere revisar cómo se refleja la interdisciplinariedad en los planes curriculares ambientales de maestría en América Latina, ya que es ahí, el lugar donde se reproduce el conocimiento. Se hace énfasis en la interdisciplinariedad, ya que es un instrumento para acercarse a la complejidad, siendo en últimas la complejidad, la necesaria para comprender mejor el problema ambiental, y por ser un método más accesible para una investigación de tiempo limitado. Con esta estrategia se quiere abrir la posibilidad de un camino a la capacitación de los futuros profesionales para que obtengan la habilidad de construir la complejidad ambiental que implica, como dice Leff, “un proceso de desconstrucción y reconstrucción del pensamiento y que lleva a una nueva comprensión del mundo, incorporando el límite del conocimiento y la incompletud del ser”¹⁴. Siendo la complejidad una posibilidad constructiva para pensar soluciones alternativas a la problemática ambiental y una posibilidad hacia un estilo de vida, sustentable; queda como trasfondo, la consideración del poder en el saber.

2. La complejidad como una alternativa posible, algunas reflexiones

Si la problemática ambiental es vista como una consecuencia del tipo de pensamiento dominante, fundado sobre la ciencia mecanicista, la complejidad resulta ser una visión valiosa para cuestionarlo y proponer otras perspectivas. Sus principales aportes serían por un lado reconocer la existencia de propiedades emergentes y por el otro lado la toma de con

13 Leff, Enrique, *La complejidad ambiental*, Ed. Siglo XXI, México, 2000 p. 8

14 Leff, Enrique, *La complejidad ambiental*, Ed. Siglo XXI, México, 2000 p. 18

ciencia de las inter-retro relaciones de los sistemas abiertos. Estas dos perspectivas enriquecen sustancialmente la forma de percibir y analizar el mundo, diametralmente opuestas a la visión simplista, reduccionista, ya que “una cosa es descubrir teorías en las ciencias, como propias de la física y la biología, y muy otra descubrir cómo se relacionan entre sí y, tomadas en su conjunto, cómo configuran un cuadro de la realidad”¹⁵. Un aspecto olvidado en la mayoría de los casos. El medio natural y la problemática ambiental han demostrado claramente que son sistemas abiertos, que tienen una infinitud de interrelaciones y grandes capacidades para generar propiedades emergentes (como lo demuestra la ciencia de la complejidad y la hipótesis Gaia).

Por esta razón, las soluciones instrumentalistas y aisladas, como las que plantea la ciencia mecanicista, resultan completamente insuficientes e insostenibles. Pero aún más, no es suficiente reconocer la complejidad en los términos planteados hasta aquí, ya que estos dos enfoques pecan por no tener en cuenta, dentro de sus reflexiones las dimensiones históricas, políticas, económicas y socioculturales, en últimas el poder, subestimando con ello éstas influencias en su construcción teórica, se olvida que existe un poder en el saber, por lo cual el conocimiento no es neutral. Y si no se es consciente de este aspecto, se puede incurrir en incomprensiones como por ejemplo la de R. Lewin, al constatar que “las explicaciones darwinistas - competencia, depredación, etc. - subsistieron y dominaron el escaso debate que se

15 Pagels, Heinz, Los sueños de la razón, el ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad, Gedisa, Conacyt, México, 1991 [1988], p. 41

16 Lewin, Roger, Complejidad, el caos como generador del orden, Ed. Tusquets, Barcelona, 1995 [1992], p. 96

produjo... el debate en torno a los mecanismos de extinción siguió estando llamativamente ausente de la comunidad biológica”¹⁶, sin la más mínima consideración que el contexto político, económico liberal del momento favorecía y apoyaba completamente semejante posición. Para el fin de este trabajo, que es mostrar la complejidad como una estrategia epistemológica para adquirir una visión ambiental, hay cuatro enfoques ‘complejos’ que resultan enriquecedores, siempre y cuando se tengan en cuenta los respectivos problemas que tienen: 1) Leff da las bases indispensables para una reflexión profunda acerca de las verdaderas causas del problema ambiental, proporcionando herramientas concretas. 2) Carrizosa¹⁷ rescata elementos que generalmente la ciencia deja por fuera, pero que son indispensables, si se quiere obtener un conocimiento, y por lo tanto una realidad, más justa y humana. 3) Morin¹⁸ invita a pensar extravagantemente en bucles, esto es buscar relaciones antes olvidadas, ocultas o silenciadas. 4) La ciencia de la complejidad¹⁹ muestra que efectivamente el mundo mecanicista forma parte del pasado, revelando descubrimientos de comportamientos emergentes que invitan a pensar en nuevos contextos y en general a percibir el entorno de manera integral (p.ej. la hipótesis Gaia). - Estas reflexiones harán difícil seguir creyendo que los mecanismos Instrumentalistas /mecanicistas para enfrentar la

17 Carrizosa Umaña, Julio, Qué es ambientalismo? La visión ambiental compleja, Ed. PNUMA, IDEA, CEREC, Bogotá, 2001

18 Morin, Edgar, De la complexité: complexus, En: Françoise Fogelman Soulié (coord.), Les théories de la complexité, autour de l’œuvre d’Henri Atlan, Ed. du Seuil, Paris, 1991

19 Ver Roger Lewin

problemática ambiental son suficientes. Para poderse acercarse un poco mejor a la complejidad es necesario encontrar caminos que la hagan inteligible.

Dos instrumentos posibles para tal fin, son la Teoría de Sistemas y la Interdisciplinariedad.

3. Reflexiones críticas acerca de la Teoría de Sistemas

Al hacer una reflexión crítica de la Teoría de Sistemas resaltan tanto aspectos negativos como positivos que son necesarios tener presentes para utilizarla en el análisis o las reflexiones ambientales y comprender por esta vía la complejidad. Por un lado se dice que la Teoría de Sistemas representa el resurgimiento del organicismo, disfrazado con la terminología cibernética, Lilienfeld²⁰ ve la razón de este resurgimiento por la “bancarrota y la declinación de imágenes y filosofías de la sociedad que hasta ahora habían servido para unificar ideas”, como lo eran el contrato social, el reino divinamente consagrado en una alianza y el derecho de una élite revolucionaria²¹. Efectivamente, sus raíces se pueden encontrar en la tendencia organicista, como oposición al mecanicismo. Tanto el organicismo como la corriente sistémica, pretenden verse como oposición y como fuentes de rompimiento del paradigma mecanicista, pero la pregunta es, si realmente lo son, ya que el sistemismo sigue considerando la necesidad de leyes (fundamentalmente matemáticas) y tiene una aspiración de universalidad

20 Lilienfeld, Robert, Teoría de sistemas, orígenes y aplicaciones en Ciencias Sociales, Ed. Trillas, México, 1994

21 Ibid., p. 311

dad, convirtiéndose en un positivismo mucho más refinado, con el agravante de asumir un cierto determinismo.

Una crítica fuerte a la Teoría de Sistemas es el hecho que por un lado resulta ser ahistórica²², tanto para su construcción y justificación misma, como para su desenvolvimiento.

Por el otro lado no contempla el poder, que se encuentra también en el saber mismo, sin lo cual es imposible analizar y entender las sociedades humanas y sus relaciones con el medio.

Los teóricos sistémicos no prestan suficiente atención, al potencial autoritario que tiene su propuesta, que termina justificando por ejemplo el poder institucionalizado. El hombre es más bien visto como víctima del sistema²³. Este tipo de argumentación, esta forma sistémica (hasta cierto punto determinista) de ver el mundo, empleado en el análisis social, anula por un lado casi cualquier tipo de crítica, o mejor dicho, la suaviza considerablemente y por el otro lado supone que integrando todo al 'sistema', se pueden resolver los problemas (sin tener en cuenta p.ej. las fuerzas poder).

22 Ver también García Cotarelo, Ramón, *Crítica de la teoría de sistemas*, Centro de investigaciones sociales, Madrid, 1979p.

22 - pero con excepción de la propuesta de Rolando García que si reconoce explícitamente la necesidad de contemplar el factor histórico.

23 Ver p.ej. von Bertalanffy, Ludwig von, *Teoría General de Sistemas*, Fondo de cultura económico, México, 1993 [1968] y Gandolfi, Alberto, *Von Menschen und Ameisen, Denken in komplexen Zusammenhängen*, Ed. Orell Füssli Verlag, Zürich, 2001 [1999]

Además, esto también lleva a despersonificar y objetivizar / naturalizar los problemas, aún más que la visión mecanicista. Pero también hay algunos aspectos necesarios de rescatar, considerando que no puede ser una teoría omni explicativa ni universalista o unificadora, ni libre de valores y poder, sino que es un instrumento que tiene que considerar factores sociales, históricos, políticos, económicos, etc., factores de poder, entre varios, es decir un instrumento para poderse acercar a entender la complejidad, para adquirir una aproximación a una interpretación de lo que está sucediendo en los más diversos ámbitos. En este sentido efectivamente rompe con muchas formas del análisis mecanicista, introduciendo p.ej. la equifinalidad, la retroalimentación, la imprevisibilidad y por lo tanto la consideración de la impredecibilidad. Estos aspectos resultan ser de vital importancia para entender la problemática ambiental, abre horizontes nuevos, al pensar de manera interrelacionada.

4. Aproximaciones a la interdisciplinariedad

Existen dos puntos de partida diferentes, en cómo se puede entender la interdisciplinariedad. Por un lado estaría la visión de la interdisciplina como una síntesis filosófica que tiende hacia un énfasis de coherencia interna, de una unificación metodológica y de una exploración a largo plazo. Por el otro lado estaría la visión instrumentalista, práctica de la interdisciplina que tiende a acentuar las interacciones externas de las disciplinas²⁴. Pero también es importante reconocer las diferentes posiciones dentro del conocimiento actual en que se puede ubicar la interdisciplina:

24 Thompson Klein, Julie, *Interdisciplinarity, history, theory and practice*, Wayne State University Press, Detroit, 1990, p. 43 25 *Ibid.*, p. 52

1. en la periferia del conocimiento moderno, siendo demasiado productivo como para negarlo y demasiado desviante para ser incorporado totalmente en el 'mainstream'
2. como un fenómeno más significativo, que crea cambios en los patrones, genera nuevos lineamientos y trata problemas compartidos
3. como un factor que tiene consecuencias profundas al darse una integración gradual de conceptos y teoría particulares de las diferentes disciplinas
4. como el campo del paso próximo en el desarrollo de las Ciencias Sociales que marca un cambio de paradigma.²⁵ Finalmente, resulta útil ver cuáles son las diferentes maneras en que se puede definir la interdisciplinariedad, según Thompson:

1. por ejemplo, para designar qué forma se asume
2. por motivación, para explicar por qué se da
3. por principios de interacción, para demostrar el proceso de cómo interactúan las disciplinas
4. por jerarquía terminológica, para distinguir niveles de integración al utilizar calificativos específicos.

Con este panorama es más fácil analizar la interdisciplina y sus diferentes definiciones y usos. Resulta enriquecedor el aporte de E. Leff, quien define la interdisciplinariedad como "la articulación de los paradigmas científicos establecidos y las formas de complementariedad del conocimiento objetivo"²⁶ y la interdisciplinariedad teórica como "la construcción de un 'nuevo objeto científico' a partir de la colaboración de diversas disciplinas, y no sólo como el tratamiento común de una temática".²⁷ La propuesta de E. Jantsch²⁸, está orientada principalmente hacia la educación superior.

Para él la interdisciplinariedad constituye un principio de organización, con el fin de coordinar sobre todo dos niveles, el de los términos y conceptos y el de las configuraciones disciplinarias. Pero para coordinar estos dos niveles es necesario tener una axiomática común, es decir un objetivo común, para poder investigar y solucionar un problema, resulta fundamental.

Los obstáculos son por un lado la rigidez, los conceptos y la axiomática disciplinaria desarrollada en niveles inferiores y por el otro lado la aplicación de los conceptos y la axiomática de los niveles inferiores, a los niveles superiores.²⁹ Si bien el trabajo disciplinario (en gran parte mecanicista), ha proporcionado sin duda conocimientos y posibilidades de transformación absolutamente insospechadas (p.ej. la tecnología genética, la computación, la medicina, etc.), no se puede negar que al mismo tiempo estas mismas transformaciones han generado cambios sin precedentes en el medio, que desembocan en crisis ambientales cada vez más severas ³⁰. Son estos problemas los que exigen visiones diferentes, al reconocer que las soluciones disciplinarias son insuficientes. Es necesario llamar la atención sobre la diferencia, si la interdisciplinariedad es con

26 Leff, Enrique, Complejidad ambiental, p. 2

27 Leff, Enrique, Ecología y capital, p. 82

28 Jantsch, Erich, Hacia la interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad en la enseñanza y la innovación, En: Apostel, Leo (coord.), Interdisciplinariedad, problemas de la enseñanza y de la investigación en las universidades, OECD, ANUIES, 1979 [1972]

29 Ibid, p. 120-123

30 Hay conocimiento pero no sabiduría.

cebida como una síntesis filosófica o si es percibida simplemente como un instrumento más sofisticado. Si es el último el caso no cambiarán mucho los problemas fundamentales, ya que queda dentro de la misma lógica y no será un instrumento para acercarse a la complejidad y por ende a un conocimiento alternativo para resolver los problemas creativamente.

Breves Conclusiones

Por la densidad del tema y el espacio limitado en este contexto, sólo es posible enunciar las principales inquietudes y señalar los ejes principales de reflexión que se están trabajando en la investigación del doctorado. Al reconocer el problema ambiental como un problema del conocimiento, la meta principal de la investigación resulta ser demostrar las bases epistemológicas tradicionales, utilizadas generalmente en la formación, señalando algunas críticas centrales a ellas, para ver así el potencial que tiene la complejidad que ofrece una cosmovisión diferente y con ello soluciones diferentes, alternativas a los problemas. En esta línea de argumentación se hace necesario revisar las propuestas curriculares existentes, en este caso las ofertas ambientales a nivel de maestrías, para así poder evaluar más claramente si tal formación aporta realmente a un mejoramiento de la situación ambiental o no.

MARCO METODOLÓGICO

En el presente estudio se aborda sobre todo el instrumental metodológico que sustenta la investigación científica de la tesis, lo que permitió por medio de su aplicación obtener los datos necesarios para lograr los resultados esperados. El empleo de la complementariedad metodológica, perspectivas, enfoques, paradigmas, métodos y técnicas facilitó la recogida de la información para complementar la búsqueda y cálculos de la tesis.

Al utilizarse distintos procedimientos en la fase exploratoria permitió obtener resultados de mayor fiabilidad, en algunos casos convino realizar un control cruzado de los datos e información obtenida a través de diferentes procedimientos de recopilación de la información, precisamente estas características son las que fueron puestas en práctica en el trabajo realizado, lo que posibilitó obtener un mejor resultado.

Mediante la complementariedad metodológica se utilizaron métodos y técnicas de las metodologías cualitativa y cuantitativa en su conjunto, para la obtención de una mayor cantidad de elementos fiables.

La metodología cuantitativa facilitó el empleo de técnicas y métodos orientados al estudio de la caldera pirotubular vertical, como por ejemplo el momento en que se analizaron los variados datos obtenidos.

Este procedimiento proporcionó el camino para el buen desarrollo de la investigación sobre el estudio de la caldera pirotubular vertical.

MARCO ONTOLÓGICO

Habermas (1984) señala que la ciencia como actividad social está impregnada de los valores e intereses de quienes la desarrollan. Por tanto, se debe abordar la problemática sin prejuicios y con resoluta disposición a la reflexión dialógica para generar los cambios que se requieren.

Desde el punto de vista ontológico, esta investigación se fundamentará en la concepción de que habrá un ahorro de combustible y como sujeto que construye su realidad social y la protege. Razón por la cual, la identificación de un determinado paradigma se origina al conocer cuál es la creencia que mantiene el investigador con respecto a la naturaleza de la realidad que se investiga.

La importancia de la ontología radica que se la podría considerar la disciplina filosófica más importante, ya que las demás disciplinas dependen de alguna manera de ella, en tanto que radica en el estudio del Ente y del ser. La ontología ha trascendido desde los primeros pasos del hombre pensante hasta hoy, por lo cual es importante entender este modelo filosófico en todos sus postulados, puesto que nos da respuestas sobre todo lo que fundamenta a la realidad.

III.- VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES

El término variable se puede definir como toda aquella característica o cualidad que identifica a una realidad y que se puede medir, controlar y estudiar mediante un proceso de investigación.

La posibilidad de poder medir, controlar o estudiar una variable, es decir una característica de la realidad es por el hecho que esta característica varía, y esa variación se puede observar, medir y estudiar. Por lo tanto, es importante, antes de iniciar una investigación, saber cuáles son las variables que se desean medir y la manera en que se hará.

Una variable puede tomar diferentes valores dependiendo del enfoque, que le dé, el investigador. Estos valores pueden ser desde el enfoque cuantitativo o desde el enfoque cualitativo.

Desde el inicio de la investigación es necesario saber cuáles son los tipos, de variables o clases de variables que existen. En la práctica existen tres tipos de variables. Existen las variables independientes, las variables dependientes y las variables intervinientes.

Pero las variables más usadas en la elaboración de Tesis son: la variable dependiente y la variable independiente.

La variable independiente es aquella propiedad, cualidad o característica de una realidad, evento o fenómeno, que tiene la capacidad para influir, incidir o afectar a otras variables. Se llama independiente, porque esta variable no depende de otros factores para estar presente en esa realidad en estudio.

Algunos ejemplos de variables independientes son; el sexo, la raza, la edad, entre otros. Veamos un ejemplo de hipótesis donde está presente la variable independiente: “Los niños que hacen tres años de educación preescolar, aprenden a leer más rápido en primer grado.” En este caso la variable independiente es “hacen tres años de educación preescolar.” Porque para que los niños de primer grado aprendan a leer más rápido, depende de que hagan tres años de educación preescolar.

La variable dependiente; es aquella característica, propiedad o cualidad de una realidad o evento que estamos investigando. Es el objeto de estudio, sobre la cual se centra la investigación en general. También la variable independiente es manipulada por el investigador, porque el investigador puede variar los factores para determinar el comportamiento de la variable.

Por ejemplo: “Los niños que hacen tres años de educación preescolar, aprenden a leer más rápido en primer grado.”

En este caso la variable dependiente sería “aprenden a leer más rápido”, pero aprenden a leer más rápido como consecuencia de que “hacen tres años de educación preescolar”. Por esta razón se recomienda que en el título de un trabajo siempre debe aparecer la variable dependiente, pues está es el objeto de estudio.

También existen variables independientes en algunos estudios que hasta cierto punto dependerán de “algo”, como en el ejemplo siguiente: “Los ingresos económicos de un hospital público puede depender de la asignación en el presupuesto nacional del país.” Como podemos observar el objeto de estudio no está influyendo en la variable independiente. De este modo, la variable independiente en un estudio se cree que está influyendo en la variable dependiente, el estudio Correlacional se centra precisamente en esa relación.

La variable independiente: Caldera Piro-tubular Vertical.

La variable dependiente: Planta Térmica Para Uso Industrial Y Docente.

3.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 5._ VARIABLE 1 = CALDERA PIROTUBULAR VERTICAL

VARIABLE 1 = CALDERA PIROTUBULAR VERTICAL	
DIMENSIÓN	INDICADORES
Tipo	- Piro Tubulares - Acuotubulares
Tamaño	- 30 BHP - 100 BHP - 300 BHP - 1000 BHP - ETC.
Elementos, términos y componentes	<ul style="list-style-type: none"> • Agua de alimentación • Agua de condensado • Vapor seco • Vapor húmedo • Condensador • Desaireador • Purga de fondo • Purga de superficie • Fogón u hogar

	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión • Combustible • Agua de calderas • Ciclos de concentración • Alcalinidad • Desoxigenación • Incrustación • Dispersante • Anti incrustante • Anticorrosivo
--	---

Fuente: Propia

DEFINICIÓN OPERACIONAL

• Agua de alimentación: es el agua de entrada que alimenta el sistema, generalmente agua de pozo o agua de red con algún tratamiento químico como la desmineralización.

• Agua de condensado: es el agua que proviene del estanque condensador y que representa la calidad del vapor.

- Vapor seco o sobresaturado: Vapor de óptimas condiciones.
- Vapor húmedo o saturado: Vapor con arrastre de espuma proveniente de un agua de alcalinidad elevada.
- Condensador: sistema que permite condensar el vapor.
- Estanque de acumulación: es el estanque de acumulación y distribución de vapor.
- Desaireador: es el sistema que expulsa los gases a la atmósfera.
- Purga de fondo: evacuación de lodos y concentrado del fondo de la caldera.
- Purga de superficie: evacuación de sólidos disueltos desde el nivel de agua de la caldera.
- Fogón u hogar: alma de combustión del sistema, para buscar una mejora continua de los recipientes y circuitos establecidos por la caldera.
- Combustible: material que produce energía calórica al quemarse.
- Agua de calderas: agua de circuito interior de la caldera, cuyas características dependen de los ciclos y del agua de entrada.
- Ciclos de concentración: número de veces que se concentra el agua de caldera respecto del agua de alimentación.
- Alcalinidad: nivel de salinidad expresada en ppm de CaCO_3 que confiere una concentración de iones carbonatos e hidroxilos que determina el valor de pH de funcionamiento de una caldera, generalmente desde 10,5 a 11,5.
- Desoxigenación: tratamiento químico que elimina el oxígeno del agua de calderas.

- **Incrustación:** sedimentación de sólidos con formación de núcleos cristalinos o amorfos de sulfatos, carbonatos o silicatos de magnesio que merman la eficiencia de funcionamiento de la caldera.
- **Dispersante:** sistema químico que mantiene los sólidos descohesionados ante un evento de incrustación.
- **anti incrustante:** sistema químico que les permite a los sólidos permanecer incrustantes en solución.
- **Anticorrosivo:** sistema químico que brinda protección por formación de filmes protectivos ante iones corrosivos presentes en el agua.

Tabla 6._ VARIABLE 2 = PLANTA TERMICA

VARIABLE 2 = PLANTA TERMICA	
DIMENSIÓN	INDICADORES
Tipo	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Centrales termoeléctricas</i> - Circuito Cerrado - Circuito Abierto - Ciclo Rankine - Ciclo Joule Bryton - Ciclo Combinado
Materiales De Cons-	<ul style="list-style-type: none"> • Para paredes, pisos y cubierta o techo de los tanques, se emplean los aceros A283 grado C

<p>trucción</p>	<p>y D y A285 grado C.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Acero al carbón • Acero inoxidable • Teflón en los compresores de aire • Aleaciones de acero • Aleaciones de latón • Vidrio • Hule • Plásticos • Concreto • Ladrillo Refractario 			
<p>Elementos, términos y componentes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Agua de alimentación • Agua de condensado • Condensador • Combustión • Combustible • Agua de calderas • Ciclos de concentración <table border="1" data-bbox="666 1653 1293 1805"> <tr> <td data-bbox="666 1653 870 1805">1. Torre de re- frigeración</td> <td data-bbox="870 1653 1074 1805">10. Válvula de control de ga-</td> <td data-bbox="1074 1653 1293 1805">19. Supercalen- tador</td> </tr> </table>	1. Torre de re- frigeración	10. Válvula de control de ga-	19. Supercalen- tador
1. Torre de re- frigeración	10. Válvula de control de ga-	19. Supercalen- tador		

	ses	
2. Bomba hidráulica	11. Turbina de vapor de alta presión	20. Ventilador de tiro forzado
3. Línea de transmisión (trifásica)	12. Desgasificador	21. Recalentador
4. Transformador (trifásico)	13. Calentador	22. Toma de aire de combustión
5. Generador eléctrico (trifásico)	14. Cinta transportadora de carbón	23. Economizador
6. Turbina de vapor de baja presión	15. Tolva de carbón	24. Precalentador de aire
7. Bomba de condensación	16. Pulverizador de carbón	25. Precipitador electrostático
8. Condensador de superficie	17. Tambor de vapor	26. Ventilador de tiro inducido

	cie		
	9. Turbina de media presión	18. Tolva de cenizas	27. Chimenea de emisiones

Fuente: Propia

DEFINICIÓN OPERACIONAL

- Agua de alimentación: es el agua de entrada que alimenta el sistema, generalmente agua de pozo o agua de red con algún tratamiento químico como la desmineralización.
- Agua de condensado: es el agua que proviene del estanque condensador y que representa la calidad del vapor.
- Condensador: sistema que permite condensar el vapor.
- Combustible: material que produce energía calórica al quemarse.
- Agua de calderas: agua de circuito interior de la caldera, cuyas características dependen de los ciclos y del agua de entrada.
- Ciclos de concentración: número de veces que se concentra el agua de caldera respecto del agua de alimentación.

3.3.- FORMULACIÓN DE LA(S) HIPÓTESIS.

Hipótesis General

Mediante La implementación de Caldera Piro-tubular Vertical para uso Industrial nos permitirá mejorar el medio ambiente y coadyugar con el incremento de la gestión económica de las Empresas.

Hipótesis Específicas

- 1.- Determinaremos que la aplicación del Mejoramiento de la Planta Térmica Planteada permitirá el ahorro energético y mejorará la eficiencia energética en la industria.
- 2.- Mediante el uso de la guía de experiencia de laboratorio se mejorará los conocimientos de la Planta Térmica.

IV. METODOLOGÍA

4.1. Tipo de investigación (Aplicada, tecnológica y adaptativa)

La presente Investigación será de carácter Aplicativo y tecnológico ya que buscará la aplicación de conocimientos teóricos bien establecidos en el área de la energía, especialmente dentro del campo de la termodinámica, al desarrollo de un procedimiento estándar en el diseño, la medición y toma de datos en la construcción de este tipo de planta térmica ya que constará de una caldera que tendrá un diseño novedoso en el estudio de las calderas Piro-tubulares con fines Industriales y Docentes.

4.2. Diseño de la investigación

La investigación que estoy llevando a cabo es de un diseño Experimental y Prospectivo

Experimental

- El investigador tiene el manejo de la variable independiente, ya que puede manipularla de manera intencional.
- En el laboratorio, se realizaron pruebas con la presencia o ausencia de la variable independiente; en un ensayo se dispuso de un tipo de pruebas mientras que en otros no; se administraron en distintos grados, o administraron más de una variable independiente, y luego se midieron su efecto en la variable dependiente.
- Este tipo de diseño se utilizó cuando se tuvo que probar la efectividad y los efectos adversos del nuevo modelo.

Prospectivos

- En el diseño prospectivo la recolección se realiza luego de planificar el estudio.
- Ventajas: control de las variables de confusión, así como de las variables independientes, la inspección y revisión de los aparatos con los que se efectuarán las mediciones, la capacitación de los sujetos que obtendrán las mediciones (que tiende a minimizar las diferencias entre observadores), etc. En resumen, tienden a disminuir el sesgo de selección y medición.
- Desventajas: los costos
- Los diseños experimentales son siempre prospectivos.

4.3. POBLACION Y MUESTRA

La muestra es un prototipo de Planta Térmica con Caldera Piro-tubular Vertical, mejorado, diseñado y construido para poder comprobar lo que se está planteando en la presente tesis.

4.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

Definición de instrumento de recolección de datos

Un instrumento de recolección de datos es en principio cualquier recurso de que pueda valerse el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información. De este modo el instrumento sintetiza en sí toda la labor previa de la investiga-

ción, resume los aportes del marco teórico al seleccionar datos que corresponden a los indicadores y, por lo tanto a las variables o conceptos utilizados.

Resumiendo tenemos que los instrumentos son:

/*.- Cualquier recurso que recopile información referente a la investigación.

/*.- Es un mecanismo recopilador de datos.

/.- Son elementos básicos que extraen la información de las fuentes consultadas.

/,- Son los soportes que justifican y de alguna manera le dan validez a la investigación.

/.- Como instrumentos de investigación son amplios y variados y van desde una simple ficha hasta un compleja y sofisticada encuesta.

¿QUÉ ES LO QUE SE RECOPILA?

Cualquiera información o dato referente al contenido de la tesis que elaboramos en consonancia directa con el problema planteado, la verificación de las variables y de la hipótesis formulada. Es importante recalcar que cualquier instrumento debe estar en relación estrecha e íntima con la variable(s) formulada, ella la vamos a tratar de descomponer, analizar y estudiar a partir de este instrumento.

CÓMO DEBEN SER LAS TÉCNICAS:

Válidas y confiables:

Válidas cuando mide lo que realmente deseamos medir, como su eficacia para predecir el comportamiento de los fenómenos que estudiamos y deben ser confiables cuando estén en relación con factores tales como a la consistencia y exactitud de los resultados, si esta se volviese a aplicar el resultado debería ser muy parecido o similar.

Técnicas de Procesamiento y Análisis de los Datos

Una vez obtenida y recopilada la información nos abocamos de inmediato a su procesamiento, esto implicó el ordenar y presentar de la forma más lógica e inteligible los resultados obtenidos con los instrumentos aplicados, de tal forma que la variable reflejó el resultado de su magnitud, por cuanto el objetivo final fue construir con ellos promedios generales y gráficos ilustrativos de tal modo que se sintetizaron sus valores y a partir de ellos, también se extrajeron diversos enunciados teóricos.

En el procesamiento de los datos obtenidos por los instrumentos empleados, mediante una técnica analítica se logró comprobar la hipótesis y se obtuvieron las conclusiones.

El procedimiento general que apliqué comprendió dos etapas.

Previa a la aplicación de la técnica diseñada.

A).- Revisión de los objetivos propuestos

B).- Revisión de las variables y sus dimensiones

V. CÁLCULOS Y RESULTADOS

5.1 DISEÑO Y CALCULOS DE LA CALDERA

DIAMETRO DEL ESPEJO

Las casas constructoras que construyen calderos recomiendan diámetros de espejo de 1,06 m hasta una potencia de hasta 100 BHP. Para este caso se recomienda elaborar un cilindro a partir del perímetro de una plancha de acero comercial, la cual tiene las siguientes dimensiones 1,22m x 2,44m x 8mm.

En nuestro caso que es un caldero que también se utilizará para el ámbito educativo aparte del ámbito industrial, el diámetro del espejo sería:

$$\text{Despejo} = \frac{\text{Perímetro}}{\pi} = \frac{1.6 \text{ m}}{\pi} = 0.509 \text{ m}$$

POTENCIA DEL CALDERO

De la presión de trabajo (70 psi), se obtiene las entalpías de salida y de entrada; siendo:

$h_{\text{salida}} = 655.39 \text{ kcal/kg}$ (Vapor a 70 psi.) y la temperatura de vapor saturado de $148.9 \text{ }^\circ\text{C}$ y la de alimentación de 20°C , siendo un líquido comprimido.

$$h_{\text{ent}} = h_{f@20\text{C}} + v_{f@20} (P - P_{\text{sat}@20})$$

$$h_{\text{ent}} = 20.03 + 0.001002 \text{ kJ/kg} (4.72 - 0.02382)$$

$$h_{ent} = 20.03 \text{ kcal/kg}$$

$$h_{fg0^{\circ}\text{C}} = 597.27 \text{ kcal/kg} \quad 15.44 = \text{Factor de conversion.}$$

W_s = Flujo másico de vapor para la caldera 100 Kg/h

$$\text{Pot}_{\text{caldera}} = \frac{W_s * (h_{\text{salida}} - h_{\text{entrada}})}{15.44 * h_{fg}}$$

$$\text{Pot}_{\text{caldera}} = \frac{100 \text{ Kg/h} * (655.39 \text{ kcal/kg} - 20.03 \text{ kcal/kg})}{15.44 * 597.27 \text{ kcal/kg}}$$

$$\text{Pot}_{\text{caldera}} = 6.9 \text{ BHP}$$

Para calderos de vapor siempre es recomendado por las casas constructoras aplicar un factor de seguridad de 1.2, la potencia de caldero seria:

$$\text{Pot}_{\text{caldera}} = 6.9 * 1.2 = 8.3 \text{ BHP}$$

PRESIÓN DE TRABAJO DEL CALDERO

$$P = 70 \text{ psi} = 482.6 \text{ KPa.} = 4.826 \text{ bar} = 4.921 \text{ Kg/cm}^2$$

LONGITUD DE LOS TUBOS

La longitud de los tubos está en función de fórmulas experimentales en las que cada una de ellas es una función de la potencia; así recomendamos la siguiente ecuación.

$$L = 0,048 * Pot_{Caldero} + 0,3$$

$$L = 0,048 * (8.3) + 0,3$$

$$L = 0.65 \text{ m}$$

CALCULO DEL ÁREA DE CADA TUBO

$$A_{c/tubo} = \pi * D_{exterior} * L_{transferencia}$$

$$A_{c/tubo} = \pi * 0.0603 * 0.65 = 0.1232 \text{ m}^2$$

Tubos de 2" IPS 40

$$D_{exterior} = 60.3 \text{ mm}$$

$$D_{interior} = 52.48 \text{ mm}$$

ESTUDIO DEL ÁREA DE CALEFACCIÓN.

Esta área tiene parámetros diferentes a los elementos sólidos, este valor es una función de la potencia del caldero, y se encuentra en muchas fórmulas experimentales dadas por las casas constructoras.

La ecuación que se recomienda es:

$$A_{calefacción} = 0,465 * P_{Caldero} - 0,004$$

$$A_{calefacción} = 0,465 * 8.3 - 0,004 = 3.856 \text{ m}^2$$

CALCULO DEL NÚMERO DE TUBOS

$$\#_{\text{tubos}} = \frac{A_{\text{calefacción}}}{A_{\text{c/tubo}}}$$
$$\#_{\text{tubos}} = \frac{3.856 \text{ m}^2}{0.1232 \text{ m}^2} = 31 \text{ tubos}$$

Pero el número de tubos puede ser aumentado o disminuido, dependiendo del diseño de la caldera sobre la cual se está trabajando.

Como se dejará un espacio de separación de casi 2 cm entre las paredes del espejo y la medusa de los tubos de fuego, y además se insertará el hogar en la medusa, entonces el N° de tubos se reduce a 25 tubos, según mi criterio de diseño.

DIÁMETRO DEL HOGAR PARA EL DISEÑO

Para este diseño el diámetro del hogar debe ser el 20% del diámetro del espejo.

$$D_{\text{hogar}} = 0.2 * D_{\text{espejo}}$$

$$D_{\text{hogar}} = 0.2 * 0.509 = 0.1018 \text{ m.}$$

DIÁMETRO DE LOS TUBOS

Tubos de 2 pulgadas IPS 40 o SCH 80, para una presión de trabajo de 70 psi.

Tubo de 4 pulgadas IPS 40 o SCH 80, para una presión de trabajo de 70 psi.

ESFUERZO SOBRE LAS PAREDES DE LOS TUBOS

Del libro de Ferdinand P. Beer Johnston (página 375) utilizamos la ecuación para recipientes a presión ($P * r / t$)

$$\sigma_{\text{Radial}} = \frac{P * r}{t} =$$

Por lo que:

p = Presión ejercida en la pared exterior del tubo.

r = Radio del tubo (diámetro exterior)

t = espesor de la pared

$P = -482633,010522\text{Pa}$ (70 psi) (el signo menos indica que el elemento se encuentra en compresión)

$r = (60.3/2) \text{ mm} = 0,03015\text{m}$

$t = 0,00391\text{m}$

$$\sigma_{\text{Radial}} = \frac{-482633.01 \text{ Pa} * 0.03015 \text{ m}}{0.00391 \text{ m}} = -3.72 \text{ Mpa.}$$

El signo negativo hace referencia a que el tubo está sometido a un esfuerzo de compresión y que para la presión mostrada este si soporta; debido a la facilidad de adquisición del material en el mercado se lo puede utilizar.

ESFUERZO EJERCIDO SOBRE LAS PAREDES DEL CALDERO

$$\sigma_{\text{Radial}} = \frac{482633.01 \text{ Pa} * 0.2545 \text{ m}}{0.008 \text{ m}} = 15.353762 \text{ MPa.}$$

Representa el 6.14% del esfuerzo admisible.

$$15.35 \text{ MPa.} / 250 \text{ MPa.} = 6.14 \%$$

CALCULO DE ESFUERZOS EJERCIDAS SOBRE LAS PAREDES DEL HOGAR

La ecuación utilizada anteriormente para recipientes a presión y con un esfuerzo admisible del material (acero construcción) de 250 MPa para tensión y compresión tenemos:

$$\sigma_{\text{Radial}} = \frac{P * r}{t} =$$

Por lo que:

p = Presión ejercida en la pared exterior del hogar.

r = Radio del tubo (diámetro exterior)

t = espesor de la pared

$P = -482633,010522\text{Pa}$ (70 psi) (el signo menos indica que el elemento se encuentra en compresión)

$r = (0.1092/2) \text{ m} = 0,0546 \text{ m}$

$t = 0,008 \text{ m}$

$$\sigma_{\text{Radial}} = \frac{-482633.01 \text{ Pa} * 0.0546 \text{ m}}{0.008 \text{ m}} = -3293970.293 \text{ Pa.} = 3.29397 \text{ MPa.}$$

CALCULO DE LA ALTURA PARA ACUMULACIÓN DE VAPOR

La altura para acumulación de vapor dentro de la caldera es el segmento que se encuentra en la parte superior de la caldera, y corresponde al 20% de la altura total del espejo.

$h_{\text{espejo}} = \text{Altura del espejo} = 1.5 \text{ m}$

$h_{\text{acum.vapor}} = 20\% * h_{\text{espejo}} = 0.2 * 1.5 = 0.3 \text{ m}$

CALCULO DEL VOLUMEN LIBRE DE LA CALDERA

$V_{\text{libre}} = V_{\text{total}} - V_{\text{hogar}} - V_{\text{tubos}} - V_{\text{medusa}}$

$$- V_{\text{total}} = \pi * r^2 * L$$

$$V_{\text{total}} = 3.1416 * (0.275)^2 * 1.5 = 0.3564 \text{ m}^3$$

$$- V_{\text{hogar}} = \pi * r^2 * L$$

$$V_{\text{hogar}} = 3.1416 * (0.0509)^2 * 0.65 = 0.0053 \text{ m}^3$$

$$- V_{\text{tubos}} = \pi * r^2 * L * N^{\circ}_{\text{tubos}}$$

$$V_{\text{tubos}} = 3.1416 * (0.03015)^2 * 0.65 * 25 = 0.0464 \text{ m}^3$$

$$- V_{\text{medusa}} = (\pi * r^3 * 4/3) / 2$$

$$V_{\text{total}} = (3.1416 * (0.2)^3 * 4/3) / 2 = 0.016755 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{libre}} = 0.3564 - 0.0053 - 0.0464 - 0.016755$$

$$V_{\text{libre}} = 0.287945 \text{ m}^3$$

CALCULO DEL VOLUMEN DE ACUMULACIÓN DE VAPOR DE LA CALDERA

$$- V_{\text{AcumVapor}} = \pi * r^2 * L$$

$$- V_{\text{AcumVapor}} = 3.1416 * (0.275)^2 * 0.3 = 0.07127 \text{ m}^3$$

CALCULO DEL VOLUMEN DE AGUA ALIMENTADA

$$V_{\text{AguaAlim}} = V_{\text{libre}} - V_{\text{AcumVapor}}$$

$$V_{\text{AguaAlim}} = 0.287945 - 0.07127 = 0.216675 \text{ m}^3$$

CALCULO DEL TANQUE DIARIO DE AGUA

El volumen de este tanque debe ser suficiente para 20 minutos de trabajo del caldero.

Este tanque garantiza el abastecimiento de agua al interior del caldero. Existen muchos riesgos con los calderos, y uno de estos es que el caldero se quede sin agua en su interior, por eso es indispensable contar con este tanque y que el mismo tenga suficiente agua para el tiempo requerido.

El volumen de líquido del agua alimentada debe ser 70% del volumen del tanque.

$$V_{\text{AguaAlim}} = 0.287945 - 0.07127 = 0.216675 \text{ m}^3 = 216.7 \text{ litros}$$

$$216.7 \text{ litros} \text{ ----- } 70\%$$

$$X \text{ litros} \text{ ----- } 100\%$$

$$X = 310 \text{ litros} = 0.31 \text{ m}^3$$

Para este tanque se recomienda la relación: $L = 3D$

$$V = L_{\text{tanque}} * \pi * D_{\text{tanque}}^2 / 4 = 3 * D_{\text{tanque}} * \pi * D_{\text{tanque}}^2 / 4$$

$$D_{\text{tanque}}^3 = (V * 4) / (3 * \pi) = (0.310 \text{ m}^3 * 4) / (3 * 3.1416)$$

$$D_{\text{tanque}}^3 = 0.10671 \text{ m}^3$$

$$D_{\text{tanque}} = 0.510 \text{ m}$$

$$L = 3 * D_{\text{tanque}} = 3 * 0.510 \text{ m} = 1.53 \text{ m}$$

POTENCIA DE LA BOMBA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA

En esta ecuación nos dará la potencia en caballos de vapor (CV):

$$P_{\text{bomba}} = \frac{Q * \rho * h_w}{\eta * 75} = \text{CV.}$$

Q = caudal de la bomba en m³/seg.

ρ = densidad del agua en kg/m³

η = rendimiento de la bomba (aprox. 75%)

h_w = trabajo de la bomba (puntos 1-2)[m]

Para obtener el trabajo de la bomba utilizamos la ecuación de Bernoulli:

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + h_w = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_f$$

De la cual podemos decir que:

- La velocidad se aproxima a cero.
- En muchos casos el tanque de diario está casi a la misma altura que el nivel de agua del caldero: $Z_1 = Z_2$

De esta forma se tiene:

$$h_w = \frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} + h_f$$

CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN h_f :

Partiendo de la ecuación de Darcy:

$$h_f = f * \frac{V^2}{2g} * \frac{L + \sum L \Delta_f}{D} =$$

L = Tubería de ingreso al caldero (2,5m).

D = Diámetro interno de la tubería (1,5pulg).

$\sum L \Delta_f$ = Sumatoria de las pérdidas de presión provocadas por las válvulas.

Q_{caldero} = Flujo o caudal.

Calculo de la velocidad V de flujo V_f :

$$V_f = \frac{4 * Q_{\text{caldero}}}{\pi * D_{\text{tubería}}^2} =$$

$$V_f = \frac{4 * 0.00003477 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * (8.1 * 10^{-3})^2} = 0.030 \text{ m/s}$$

CÁLCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN f:

Está en función del número de Reynolds y el factor de rugosidad (e/d). Para tubería galvanizada se tiene un factor de fricción de 0.0018 in.

$$e / D = 0.0018 / 1.5 = 0.0012$$

El número de Reynolds se encuentra utilizando la ecuación:

$$Re = \frac{4 * Q_{caldero} * \rho_{agua}}{\pi * D_{tubería} * \mu} =$$

Siendo:

$$Q_{caldero} = \text{Flujo o caudal.} = 0.0000347 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\mu = \text{Viscosidad cinemática del flujo} = 0.001 \text{ N} * \text{s} / \text{m}^2$$

$$Re = \frac{4 * 0.0000347 \text{ m}^3 / \text{s} * 1000}{\pi * (8.1 * 10^{-3}) * (10^{-3})} = 1159.61$$

Ya que se trata de un flujo laminar, es decir siendo el número de Reynolds menor a 2000 utilizaremos la fórmula:

$$f = 64 / Re = 64 / 1159.61 = 0.0551$$

Las pérdidas en los accesorios son:

$$\sum L \Delta_f = \sum K_i * D / f =$$

Siendo: K_i = Factor de pérdida en cada accesorio.

⋮

Obteniendo en nuestra instalación de tubería dos válvula de globo ($K=10$), una válvula de flujo unidireccional ($K=2.5$), y tres codos de 90° ($K=0.9$).

⋮

$$\sum L \Delta_f = (10+2.5+3*0.9) * 0.0381 / 0.0551 = 10.51 \text{ m}$$

⋮

$$h_f = f * \frac{V^2}{2g} * \frac{L + \sum L \Delta_f}{D} =$$

$$h_f = 0.0551 * \frac{(0.030)^2}{2(9.806)} * \frac{2 + 10.51}{0.0381} = 0.000829 \text{ m}$$

Con lo cual:

$$h_w = P_2 / \gamma - P_1 / \gamma + h_f$$

El trabajo de la bomba se simplifica a la diferencia de presiones [m] más las pérdidas por fricción obtenida:

$$(P_2 - P_1) / \gamma = 70 \text{ psi} / 9800 \text{ N/m}^3 = (482633.010 \text{ N/m}^2) / 9800 \text{ N/m}^3 = 49.24 \text{ m}$$

$$h_w = P_2 / \gamma - P_1 / \gamma + h_f = 49.24 \text{ m} + 0.000829 \text{ m}$$

$$h_w = 49.2408 \text{ m}$$

Así para la bomba de alimentación sería:

$$P_{\text{bomba}} = \frac{Q * \rho * h_w}{\eta * 75} = \text{CV.}$$

$$P_{\text{bomba}} = \frac{0.0000347 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ Kg/m}^3 * 49.2408 \text{ m}}{0.75 * 75} = 0.03 \text{ CV.}$$

Para asegurar un flujo constante de combustible al quemador. Se aumentará un porcentaje de seguridad multiplicando por tres el valor al valor obtenido. El factor de seguridad es recomendado por la experiencia de las casas constructoras.

$$P_{\text{real/bomba}} = P_{\text{bomba}} * 3 = 0.03 * 3 = 0.09 \text{ CV}$$

$$P_{\text{real/bomba}} = 0.09 \text{ CV} * 735.49 \text{ W} / 1 \text{ CV} = 69.19 \text{ W}$$

Es difícil encontrar bombas de potencias como esta por eso se ha de buscar la de menor potencia; siendo la más cercana 1/2 HP. Este tipo de bombas no brindan un caudal de 0,66 l/s a la presión de 42 metros de columna de agua.

Sin embargo los constantes encendidos de la bomba, pueden causarle daños. Por tal motivo se decidió colocar un acumulador para evitar que la bomba se encienda a cada momento. Con el uso del acumulador, podemos evitar estos inconvenientes ya que este dispositivo almacena agua en su interior para luego drenarla de manera paulatina. Esto nos brinda un beneficio, ya que se controla la temperatura interna del caldero; y a su vez evitamos perdidas de calor por el sobrecalentamiento del interior.

CALCULO DEL COMBUSTIBLE.

En este caso utilizamos GLP, el cual tiene un poder calorífico de 10830 kcal/kg y una densidad de 560 kg/m³.

BALANCE DE PODER CALÓRICO:

$$q_{\text{comb}} = \hat{W}_{\text{vapor}} * (h_{\text{sal}} - h_{\text{ent}})$$

$$q_{\text{comb}} = 100 \text{ Kg/h} * (655.39 - 70)$$

$$q_{\text{comb}} = 58539 \text{ Kcal/h}$$

CALOR DEL COMBUSTIBLE

$$q_{\text{comb}} = \hat{W}_{\text{comb}} * C_p$$

$$58539 \text{ Kcal/h} = \hat{W}_{\text{comb}} * 10830 \text{ kcal/kg}$$

$$\hat{W}_{\text{comb}} = 58539 \text{ Kcal/h} / 10830 \text{ kcal/kg}$$

$$\hat{W}_{\text{comb}} = 5.41 \text{ Kg/h}$$

$$\bar{Q}_{\text{comb}} = \hat{W}_{\text{comb}} / Y_{\text{comb}}$$

$$\bar{Q}_{\text{comb}} = 5.41 \text{ Kg/h} / 560 \text{ kg/m}^3.$$

$$\bar{Q}_{\text{comb}} = 0.010 \text{ m}^3/\text{h} = 10 \text{ lt/h} = 2.65 \text{ gl/h}$$

Las casas constructoras recomiendan del 200 al 300% como un margen de seguridad.

Siendo este factor de compensación para la eficiencia del caldero y asegurar el flujo requerido de combustible.

Por lo que utilizando un Factor de seguridad del 300%, se tiene:

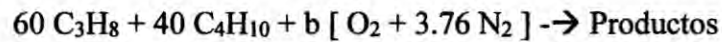
$$\bar{Q}_{\text{comb}} = 0.010 \text{ m}^3/\text{h} * 3 = 0.030 \text{ m}^3/\text{h}$$

CALCULO DEL AIRE TEÓRICO.

Composición química del combustible GLP.

Propano = 60%

Butano = 40%



El caudal encontrado para el combustible se calculó considerando una eficiencia del 100%, pero que al momento que se aplica una potencia real del 70%, el caudal varía a:

$$\bar{Q}_{\text{comb}} = 0.010 \text{ m}^3/\text{h} * 100 / 70 = 0.0143 \text{ m}^3/\text{h}$$

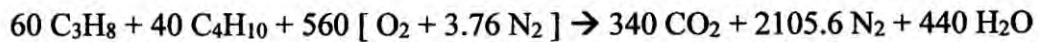
$$\bar{Q}_{\text{comb}} = 0.0143 \text{ m}^3/\text{h} * 560 \text{ Kg/m}^3$$

$$\bar{Q}_{\text{comb}} = 8.008 \text{ Kg/h}$$

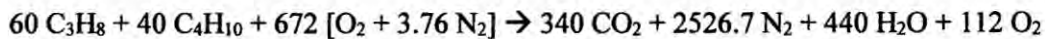
Entonces nuestro caudal másico de combustible será $8.008 \text{ Kg}_{\text{comb}} / \text{h}$

BALANCE EN LA COMBUSTIÓN = COMBUSTIÓN IDEAL

Asumiendo 100 Kmol de combustible y realizando el balance.



Pero tomando un 20% de exceso de aire.



RELACIÓN AIRE / COMBUSTIBLE (Ra/c) = Kg de aire por Kg de combustible.

$$\text{Ra/c} = M_{\text{aire}} / M_{\text{comb}} = \{672 * [32 + 3.76 * (28)]\} / \{60 * (44) + 40 * (58)\}$$

$$\text{Ra/c} = \{672 * [137.28]\} / \{2640 + 2320\}$$

$$\text{Ra/c} = \{92252.16\} / \{4960\}$$

$$\text{Ra/c} = 18.6 \text{ Kg}_{\text{aire}} / \text{Kg}_{\text{comb}}$$

Como se necesita $8.008 \text{ Kg}_{\text{comb}} / \text{h}$ de combustible, el aire que se necesita es:

$$\hat{W}_{\text{aire}} = 18.6 \text{ Kg}_{\text{aire}} / \text{Kg}_{\text{comb}} * 8.008 \text{ Kg}_{\text{comb}} / \text{h}$$

$$\hat{W}_{\text{aire}} = 149 \text{ Kg}_{\text{aire}} / \text{h}$$

$$\bar{Q}_{\text{aire}} = \hat{W}_{\text{aire}} / \rho_{\text{aire}} = \{149 \text{ Kg}_{\text{aire}} / \text{h}\} / \{1.27 \text{ Kg}_{\text{aire}} / \text{m}^3\}$$

$$\bar{Q}_{\text{aire}} = 117.32 \text{ m}^3/\text{h}$$

FLUJO DE GASES DE COMBUSTIÓN EN LAS TUBERÍAS DEL CALDERO

En base a la experiencia de las casas constructoras se había recomendado tubería de 2" de diámetro. El cual ha de ser analizado con las ecuaciones de flujo en tuberías para asegurar el correcto funcionamiento del caldero.

$$\bar{Q}_{\text{comb}} = 0.01 \text{ m}^3/\text{h} / 3600 \text{ s} = 0.0000027 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\bar{Q}_{\text{aire}} = 117.32 \text{ m}^3/\text{h} / 3600 \text{ s} \rightarrow \bar{Q}_{\text{aire}} = 0.0326 \text{ m}^3/\text{s}$$

La suma de ambos ingresa a la cámara de combustión

El flujo de aire es mayor que el de combustible; siendo este último la milésima parte del flujo de aire, se puede despreciar y se realizara el análisis con el flujo de aire mencionado a las temperaturas que se pueden alcanzar en cada paso.

Para el cálculo de los volúmenes se partirá de la ecuación de flujos de gases:

$$Q_a = Q_s * \frac{P_{\text{atm-s}}}{P_{\text{atm}} + P_a} * \frac{T_a}{T_s} =$$

Donde:

Q_a = velocidad de flujo en condiciones reales

Q_s = velocidad de flujo en condiciones estándar = $0.0326 \text{ m}^3/\text{s}$

$P_{\text{atm-s}}$ = presión atmosférica absoluta estándar (101,3 kPa)

P_{atm} = presión atmosférica absoluta real = 99.97 KPa

P_a = presión real de medición = $7.094 + 99.97 = 107.06 \text{ KPa}$

T_a = temperatura absoluta real = $1047 + 273 = 1320 \text{ }^\circ\text{K}$

T_s = temperatura absoluta estándar (285°K)

Calculando:

$$Q_a = 0.0326 \text{ m}^3/\text{s} * \{101.3 / (99.97+107.06)\} * 1320 / 285$$

$$Q_a = 0.074 \text{ m}^3/\text{s}$$

VELOCIDAD EN EL 1ER PASO:

Diámetro del hogar 10.18 cm (0.1018 m), el área transversal será:

$$A_{\text{transvHogar}} = \frac{\pi * D_{\text{hogar}}^2}{4} =$$

$$A_{\text{transvHogar}} = \frac{\pi * 0.1018^2}{4} =$$

$$A_{\text{transvHogar}} = 0.0082 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad} = \text{Caudal} / \text{Área}$$

$$\text{Velocidad} = \{0.074 \text{ m}^3/\text{s}\} / \{0.0082 \text{ m}^2\}$$

$$\text{Velocidad} = 9.024 \text{ m/s}$$

Considerada una velocidad normal. Pero en el hogar siempre se nota que la velocidad es mayor, esto se debe a que la flama no ocupa toda el área; por ende esta es proporcional al área ocupada.

CALCULO DE LA CHIMENEA

La temperatura media de los humos en la chimenea oscila alrededor de los 300 °C; por lo tanto se ha de diseñar un ducto por el cual puedan salir con facilidad los gases que circulan por el interior del caldero y su vez se produzca un efecto de succión para los mismos.

DENSIDAD MEDIA DE LOS HUMERALES

La densidad media de los gases se obtiene con la ecuación de los gases, considerando la mezcla de gases como un gas ideal:

$$\rho_{\text{hum}} = \frac{P_h * v_h}{R_h * T_h}$$

Donde:

$P_h = 76.99$ kPa (presión atmosférica)

$v_h = 1 / \rho$ (volumen específico de los humos)

$R_h = 290$ N.m/kg.K (relación entre la constante universal de los gases y el peso medio ponderal molecular del gas)

$T_h = 200 + 273 = 473$ ° K (temperatura media de los humos)

Reemplazando la fórmula del volumen específico de los humerales y los valores mencionados, tenemos:

$$\rho_{\text{hum}}^2 = P_h / R_h * T_h$$

$$\rho_{\text{hum}}^2 = (99970 \text{ Pa}) / (290 \text{ N.m/kg.K}) * (473 \text{ °K})$$

$$\rho_{\text{hum}} = 0,85 \text{ kg/m}^3$$

El caudal volumétrico de los productos de la combustión podrá calcularse, con muy buena aproximación:

$$Q_{\text{ghumos}} = 0.0326 \text{ m}^3/\text{s} * (101.3 / 207.03) * 473 / 285$$

$$Q_{\text{ghumos}} = 0.027 \text{ m}^3/\text{s}$$

Si estimamos un diámetro de chimenea de 10 cm; la velocidad en la chimenea sería:

$$V_{\text{humos_chimenea}} = 0.32 \text{ m/s}$$

AISLANTE DEL CALDERO

Con el objeto de reducir notablemente las pérdidas por transferencia de calor en las superficies del caldero, se recubrirá de una capa aislante a la superficie externa del equipo.

La elección del tipo de aislante así como del espesor efectivo se limitará a las características de los materiales que se encuentran en el mercado. Un aislante muy conocido y de fácil adquisición es la lana de vidrio, que se lo encuentra en rollos de 15 metros con un espesor de 25 mm y un ancho de 1.2 metros.

El aislante mencionado resulta ideal para nuestra aplicación ya que, su montaje es sencillo, no representa elevados costos de inversión y posee una excelente resistencia térmica. Debido a que éste material se lo encuentra por rollos, utilizaremos dos capas

de aislante sobre la superficie del caldero, logrando así un espesor de pared de 50 mm. Éste a su vez, estará protegido por una chapa metálica que evitará su deterioro.

5.2 EFICIENCIA DE LA CALDERA

Eficiencia de la caldera

La eficiencia térmica es el indicador de trabajo de una caldera, Piro-tubular vertical en este caso, que caracteriza el grado de aprovechamiento de la energía suministrada por el combustible, ya sea líquido, sólido o gaseoso, es decir, la parte de esa energía que ha sido transferida al agente de trabajo.

Para determinar la eficiencia de la caldera existen dos métodos: el “método directo ó de entradas y salidas” y el “método indirecto o de pérdidas”

Método directo.

En el método directo, determina la relación entre la energía aprovechada en la transformación del agua en vapor, y la energía suministrada por el combustible. Se expresa en forma de porcentaje:

$$\eta_{\text{caldera}} = \frac{Q_{\text{vapor}}}{Q_{\text{combustible}}} \times 100\%$$

Donde:

η_{caldera} : Eficiencia de la caldera [%].

Q_{vapor} : Calor transmitido al vapor.

$Q_{\text{combustible}}$: Calor transmitido por el combustible.

Para realizar los cálculos del calor transmitido al agua se debe conocer los siguientes datos:

Temperatura del agua alimentación "**T_{a.a}**"

La presión a la cual se produce vapor "**P_{trabajo}**"

El flujo de vapor "**m_{vapor}**"

Para el calor suministrado por el combustible al agua se necesita:

El flujo de combustible "**m_r**"

El poder calorífico superior del combustible "**GCV**"

Una vez realizada la toma de datos se procede a determinar la eficiencia de la caldera mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_{\text{caldera}} = \frac{M_{\text{vapor}} \times (h_g - h_f)}{M_f \times \text{GCV}} \times 100\%$$

Donde:

η_{caldera} : Eficiencia de la caldera [%].

M_{vapor} : Flujo de vapor [Kg/h].

M_f : Flujo de combustible [Kg/h].

h_g : Entalpía de vapor saturado [Kcal/Kg]

h_f : Entalpía de líquido subenfriado [Kcal/Kg]

GCV: Poder calorífico superior [Kcal/Kg]

El GCV queda determinado en función de la densidad mediante la siguiente ecuación:

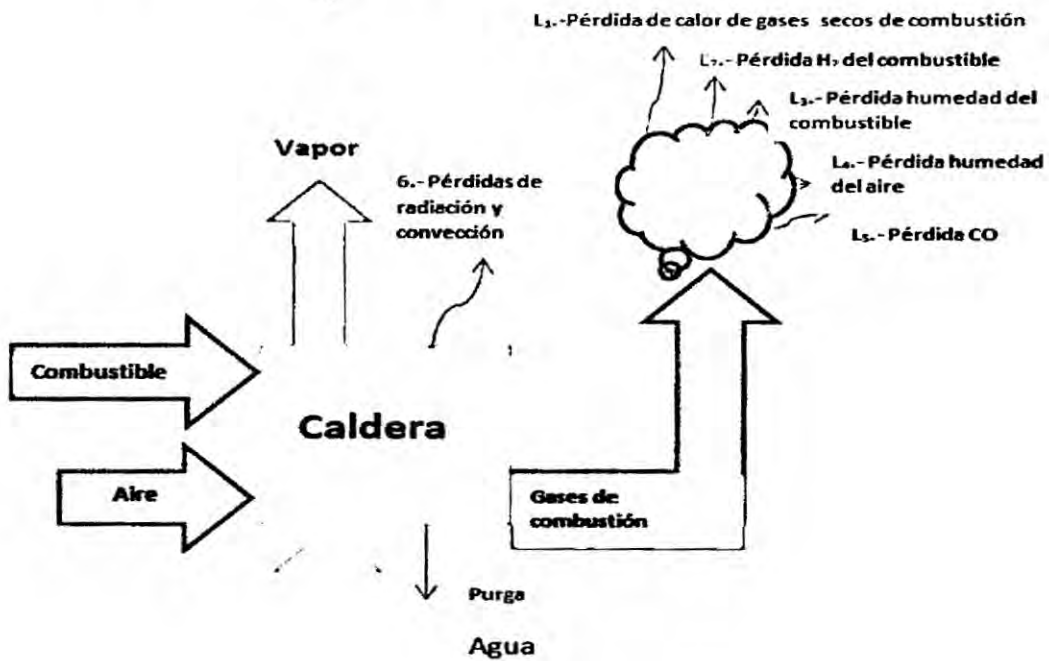
$$\text{GCV} = \frac{\text{Poder calorífico Superior [btu/gal]}}{\text{Densidad [lb/gal]}} \times 100\%$$

Método indirecto.

En el método indirecto, la eficiencia se calcula restándole a 100 el valor de las pérdidas de calor medidas en la caldera, también se expresa en porcentaje:

$$\eta_{\text{caldera}} = 100 - \sum \text{Pérdidas}$$

En la caldera tenemos las siguientes pérdidas:



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/16907865/Boiler-energy-Audit-Manual>.

Figura 39: Pérdidas En La Caldera

Sustituyendo las pérdidas en la ecuación 5 tenemos:

$$\eta_{\text{caldera}} = 100 - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6)$$

Donde:

L1: Pérdidas debido a los gases secos de combustión [%]

L2: Pérdidas debido al hidrógeno en el combustible H₂ [%]

L3: Pérdidas debido a la humedad en el combustible H₂O [%]

L4: Pérdidas debido a la humedad en el aire H₂O [%]

L5: Pérdidas debido al monóxido de carbono CO [%]

L6: Pérdidas debido a radiación y convección [%]

Los parámetros que deben ser medidos para evaluar el rendimiento de la caldera por el método indirecto son:

a) Análisis de los gases de combustión:

- % de CO₂ ó O en los gases de combustión
- Porcentaje de CO en los gases de combustión

b) Mediciones de flujo:

- De combustible
- De vapor

c) Mediciones de temperatura para:

- Los gases de combustión
- Del agua de alimentación

d) Medidas de presión para:

- El vapor
- De los gases de combustión

Antes de proceder a determinar las pérdidas debemos calcular:

Aire teórico requerido para la combustión:

$$At = \frac{11.6 C + 34.8 \times (H_2 - O_2 / 8) + 4.35 S}{100}$$

Donde:

At: Aire teórico [Kg / Kg comb]

C: Carbono presente en el combustible [%].

H₂: Hidrogeno presente en el combustible [%].

O₂: Oxígeno presente en el combustible [%].

S: Azufre presente en el combustible [%].

% Exceso de aire suministrado (EA)

$$EA = \frac{O_2\%}{21 O_2\%} \times 100$$

Donde:

EA: Exceso de aire [%].

O₂: Oxígeno presente en el análisis de los gases de combustión

Normalmente se recomienda la medición de O₂. Si la medición de O₂ no está disponible, utilice la medición de CO₂.

Masa real de suministro de aire / kg de combustible ()

$$AAS = \{1 + EA / 100\} \times At$$

Donde:

AAS: Masa real de suministro de aire [Kg / Kg comb]

EA: Exceso de aire suministrado [%]

At: Aire teórico requerido para la combustión [Kg / Kg comb]

MASA DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN (M_{GC})

En el proceso de combustión se obtiene como resultado los gases de chimenea, estos se pueden encontrar en base húmeda o seca, en este caso para fines de este cálculo se los requiere en base seca es decir los gases producto de la combustión sin incluir el vapor de agua.

Por lo tanto la masa de gases seco de la chimenea viene dado en forma general por:

$$m_{gc} = mCO_2 + mSO_2 + mN_2 + mO_2 + mN_2' + mO_2'$$

DONDE:

m_{gc}: Masa de gases secos de la chimenea [Kg / Kg comb].

m_{CO2}: Masa de **CO₂** producto de la combustión del combustible [Kg / Kg comb].

m_{SO2}: Masa de **SO₂** producto de la combustión del combustible [Kg / Kg comb].

m_{N2}: Masa de **N₂** producto de la combustión del combustible [Kg / Kg comb].

m_{O2}: Masa de **O₂** producto de la combustión del combustible [Kg / Kg comb].

m_{N2'}: Masa de **N₂** suministrado en el aire [Kg / Kg comb].

m_{O2'}: Masa de **O₂** presente en los gases de chimenea [Kg / Kg comb].

MASA DE DIÓXIDO DE CARBONO PRESENTE EN EL COMBUSTIBLE.

Si la siguiente ecuación se la representa en función de la masa molar de los compuestos se obtiene lo siguiente:

$$m_{CO2} = \frac{C \times M_{CO2}}{M_C}$$

Donde:

m_{CO2}: Masa de **CO₂** producto de la combustión del combustible [Kg / Kg comb].

C: Carbono contenido en 1kg de combustible [Kg / Kg comb].

M_{CO2}: Masa molar del **CO₂** [Kg / Kmol].

M_C: Masa molar del **C** [Kg / Kmol].

MASA DE DIÓXIDO DE AZUFRE PRESENTE EN EL COMBUSTIBLE.

$$m_{SO_2} = \frac{C \times M_{SO_2}}{M_S}$$

DONDE:

M_{SO₂}: Masa de SO₂ producto de la combustión del combustible [Kg / Kg comb].

C: Carbono contenido en 1kg de combustible [Kg / Kg comb].

M_{SO₂}: Masa molar del SO₂ [Kg / Kmol].

M_S: Masa molar del S [Kg / Kmol].

MASA DE NITRÓGENO PRESENTE EN EL COMBUSTIBLE.

$$m_{N_2} = \frac{N_2}{100}$$

DONDE:

m_{N₂}: Masa de N₂ producto de la combustión del combustible [Kg / Kg comb].

N₂: Nitrógeno contenido en 1kg de combustible [Kg / Kg comb].

MASA DE OXÍGENO PRESENTE EN EL COMBUSTIBLE.

$$m_{O_2} = \frac{O_2}{100}$$

DONDE:

m_{O2}: Masa de producto de la combustión del combustible [Kg / Kg comb].

O₂: Oxígeno contenido en 1kg de combustible [Kg / Kg comb].

MASA DEL NITRÓGENO SUMINISTRADO EN EL AIRE:

Para éste cálculo se utiliza el análisis gravimétrico del aire, es decir que si se toma 100 Kg de aire, 23 kg son de oxígeno y 77 kg de nitrógeno.

$$m_{N_2} = \frac{AAS \times \%N_2}{100}$$

DONDE:

m_{N2}: Masa de N₂ suministrado en el aire [Kg / Kg comb].

AAS: Masa de aire suministrado [Kg / Kg comb].

%N₂: Nitrógeno presente en el aire [77%]

MASA DE OXÍGENO PRESENTE EN LOS GASES DE COMBUSTIÓN.

$$m_{O_2} = \frac{O_2\% \times O_2}{100}$$

Donde:

m_{O2}: Masa de presente en los gases de chimenea [Kg / Kg comb].

O_2' %: Oxígeno presente en el análisis de los gases de combustión [%]

O_2 : Oxígeno presente en el aire [23%]

DETERMINACIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN (C_P GC)

Con la temperatura de los gases de combustión y las siguientes ecuaciones se determina el C_P gc promedio de los gases de combustión.

Para el O_2 mediante la siguiente ecuación:

$$C_{PO_2} = 0.36 - \frac{5.375}{T_{gc} \frac{1}{2}} + \frac{47.8}{T_{gc}}$$

Donde:

C_{PO_2} : Calor específico del oxígeno.

T_{gc} : Temperatura de los gases de combustión [°K]

Para el SO_2 mediante la siguiente ecuación:

$$C_{PSO_2} = 0.1875 + \frac{0.0944 T_{gc}}{10^4} - \frac{1.336 \times 10^4}{T_{gc}^2}$$

Para el N_2 mediante la siguiente ecuación:

$$C_{PN_2} = 0.338 - \frac{123.8}{T_{gc}} + \frac{4.14 \times 10^4}{T_{gc}^2}$$

Para el SO₂ mediante la siguiente ecuación:

$$C_{pCO_2} = 0.368 - \frac{148.4}{T \text{ gc}} + \frac{3.2 \times 10^4}{T \text{ gc}^2}$$

Con un promedio de estos valores se obtiene el valor del calor específico de los gases de combustión $C_p \text{ gc}$.

DETERMINACIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO DEL VAPOR DE AGUA C_{pV}

Para determinar el calor específico del vapor de agua C_{pV} se debe determinar la temperatura de saturación a la presión de trabajo absoluta si la presión manométrica es decir la presión medida en el caldero es de $P_{\text{trabajo}} = 72.5 \text{ psia}$, y de acuerdo a las siguientes ecuaciones se obtiene lo siguiente:

$$P_v = P_{\text{trabajo}} + P_{\text{Lima teo}}$$

Donde:

P_v : Presión vapor absoluta [psia]

P_{trabajo} : Presión de trabajo de vapor [psig]

$P_{\text{Lima teo}}$: Presión atmosférica local teórica [psi]

$$P_{\text{Lima teo}} = P_{cn} \times (1 - (6.8753 \times 10^{-6}) \times Z_{\text{lugar}})^{5.2559}$$

Donde:

$P_{\text{Lima teo}}$ = Presión atmosférica local teórica [in Hg].

P_{cn} : Presión a condiciones normales 29.92126[in Hg].

Z_{lugar} : Altura local del lugar 2754 [msnm]; 9035.433 [ftsnm].

Por lo tanto mediante el cálculo de la presión de trabajo absoluta se halla en las tablas de vapor la presión de saturación con la cual se determina luego se determina el calor específico para el vapor a dicha temperatura.

Se debe tener en cuenta el porcentaje de error con el que se calcula la presión absoluta en Riobamba, por lo tanto mediante la siguiente expresión se tiene:

Donde:

$$\%error = \frac{P_{Lima\ teo} - P_{Lima\ exp}}{P_{Lima\ teo}} \times 100$$

%error: Error [%].

$P_{Lima\ teo}$: Presión atmosférica local teórica.

$P_{Lima\ exp}$: Presión en Lima experimental medida en manómetro de ES-POCH

DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN PARCIAL DE VAPOR DE AGUA.

La presión parcial del vapor en una mezcla se define como el producto entre la humedad relativa y la presión de saturación del vapor.

La humedad relativa se mide mediante un higrómetro en el cuarto de calderos, mientras que la presión de saturación de vapor se determina a la temperatura de bulbo seco de esa mezcla, con lo que se tiene:

$$P_{V \text{ parcial}} = \phi \times P_g$$

Donde:

$P_{V \text{ parcial}}$: Presión parcial del vapor a las condiciones locales

ϕ : Humedad relativa medida en Lima [85%]

P_g : Presión de saturación del vapor a la temperatura de bulbo seco [psia]

Por lo tanto la mediante la siguiente relación se tiene un dato de suma importancia en el cálculo de las pérdidas de calor por lo que se obtiene lo siguiente:

$$P_{V \text{ parcial}} \rightarrow h_{fg}$$

PÉRDIDA DE CALOR DEBIDO A LOS GASES SECOS DE LA COMBUSTIÓN.

$$L_1 = \frac{m_{gc} \times C_{p \text{ gc}} \times (T_{gc} - T_a)}{GCV} \times 100\%$$

Donde:

L_1 : Pérdidas de calor en los gases secos [%]

m_{gc} : Masa de los gases secos en [Kg / Kg comb].

$C_{p \text{ gc}}$: Calor específico promedio de los gases de combustión en [Kcal / Kg °C].

T_{gc}: Temperatura de los gases de combustión en [°C]

T_a: Temperatura ambiente en [°C]

GCV: Poder calorífico superior del combustible en Pérdida debido al hidrógeno en el combustible [Kcal / Kg].

PÉRDIDA DEBIDO AL HIDRÓGENO EN EL COMBUSTIBLE.

$$L_2 = \frac{9 \times H_2 \times [h_{fg} + C_{pv} \times (T_{gc} - T_a)]}{GCV} \times 100\%$$

Donde:

L₂: Pérdidas debido al hidrógeno en el combustible [%]

H₂: Hidrógeno presente en el combustible en base a un 1kg [Kg]

C_{pv}: Calor específico del vapor sobrecalentado [Kcal / Kg °C].

T_{gc}: Temperatura de los gases de combustión [°C]

T_a: Temperatura ambiente en [°C]

h_{fg}: Calor latente a la presión parcial del vapor de agua [Kcal / Kg].

GCV: Poder calorífico superior del combustible [Kcal / Kg].

PÉRDIDAS DEBIDO A LA HUMEDAD EN EL COMBUSTIBLE.

$$L_3 = \frac{M \times [h_{fg} + C_{pv} \times (T_{gc} - T_a)]}{GCV} \times 100\%$$

Donde:

L₃: Pérdidas debido a la humedad en el combustible [%]

M: Humedad en el combustible en base a 1 kg

C_{PV}: Calor específico del vapor sobrecalentado en [Kcal / Kg °C].

T_{gc}: Temperatura de los gases de combustión en [°C]

T_a: Temperatura ambiente en [°C]

h_{fg}: Calor latente a la presión parcial del vapor de agua en [Kcal / Kg].

GCV: Poder calorífico superior del combustible en [Kcal / Kg].

PÉRDIDAS DEBIDO A LA HUMEDAD EN EL AIRE.

$$L_4 = \frac{\text{AAS} \times h_f \times C_{PV} \times (T_{gc} - T_a)}{\text{GCV}} \times 100\%$$

Donde:

L₄: Pérdidas debido a la humedad en el aire.

AAS: Masa real de suministro de aire por kg de combustible.

h_f: Factor de humedad ó relación de humedad en [Kg agua / Kg aire seco].

C_{PV}: Calor específico del vapor sobrecalentado en [Kcal / Kg °C].

T_{gc}: Temperatura de los gases de combustión en [°C]

T_a: Temperatura ambiente (temperatura de bulbo seco) [°C]

GCV: Poder calorífico superior del combustible en [Kcal / Kg].

PÉRDIDA DEBIDO A LA COMBUSTIÓN INCOMPLETA

$$L_5 = \frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \times \frac{5744}{GCV} \times 100\%$$

Donde:

L₅: % pérdida de calor debido a la transformación parcial de C a CO

CO₂: Volumen real de CO₂: en los gases de combustión [%].

C: Contenido de carbono [Kg / Kgcomb].

GCV: Poder calorífico superior del combustible en [Kcal / Kg].

CO: Volumen de en los gases de combustión provenientes del economizador [%].

Cuando el CO se obtiene en ppm durante el análisis de gases de combustión.

$$CO (M_{CO}) = CO_{(en\ ppm)} \times (10^{-6}) \times m_f \times 28$$

Donde:

m_f: consumo de combustible en [Kg / h].

PÉRDIDAS POR RADIACIÓN Y CONVECCIÓN.

$$L_6 = 0.584 \times \left[\left(\frac{T_s}{55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right] + 1.957 \times (T_s - T_a)^{1.25} \times \sqrt{\frac{196.85V_m + 68.9}{68.9}}$$

Donde:

L₆: Calor perdido por radiación y convección [w/m²]

V_m: Velocidad del viento en [m/s]

T_s: Temperatura de superficie [°K]

T_a: Temperatura ambiente [°K]

Como **L₆** debe ser expresado en % y las pérdidas deben ser determinadas para: la carcasa y las tapas laterales, por estar a diferentes temperaturas se utiliza la siguiente ecuación:

Carcasa:

$$L_{6\text{carcasa}} = \frac{L_6 \times A_c}{GCV \times m_f} \times 100\%$$

Donde:

L_{6carcasa}: Pérdidas de calor por radiación y convección en la carcasa [%].

L₆: Calor perdido por radiación y radiación [Kcal / m² h].

A_c: Área de la carcasa [m²]

GCV: Poder calorífico superior del combustible [Kcal / Kg].

m_f : Flujo de combustible [Kg/h]

El área de las tapas laterales es determinada por la ecuación:

$$A_{\text{tapa}} = 2 \pi E^2$$

Donde:

A_{tapa}: Área de las tapas laterales [m²]

E: Radio de la caldera en [m]

PÉRDIDAS POR PURGAS

Cuando el agua se evapora en la caldera, se separan los sólidos disueltos presentes en el agua de alimentación. Los sólidos en suspensión forman lodos o sedimentos en la caldera, que degradan la transferencia de calor, mientras que los sólidos disueltos provocan espuma y acarreo de agua con el vapor. Para reducir el nivel total de sólidos disueltos y suspendidos (SDT) y llevarlos a límites aceptables, periódicamente se tiene que purgar agua de la caldera.

Para determinar las pérdidas por purga primero se debe determinar la tasa de purga, la cual queda expresada por la siguiente ecuación:

$$\frac{X_{\text{purga}}}{X_{\text{vapor}}} = \frac{\text{SDT}_{\text{aa}}}{\text{SDT}_{\text{caldera}} - \text{SDT}_{\text{aa}}}$$

Donde:

X_{purga} : Masa de agua de alimentación que ingresa a la caldera.

X_{vapor} : Masa de vapor producida por la caldera.

SDT_{aa} : Sólidos disueltos totales en el agua de alimentación

$\text{SDT}_{\text{caldera}}$: Sólidos disueltos en el agua de la caldera ()

El porcentaje de pérdidas, al que designamos como L_7 , se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$L_7 = \frac{(X_{\text{purga}} / X_{\text{vapor}}) \times (h_f - h_{aa}) \times \eta_{\text{caldera}}}{(h_g - h_{aa})} \times 100\%$$

Donde:

L_7 : Pérdidas por purgas [%].

$(X_{\text{purga}} / X_{\text{vapor}})$: Tasa de purga

h_f : Entalpía de líquido saturado a la presión de vapor absoluta [Kcal / Kg].

h_g : Entalpía de vapor saturado a la presión absoluta [Kcal / Kg].

η_{caldera} : Eficiencia del caldero [%].

h_{aa} : Entalpía de agua de alimentación [Kcal / Kg].

La entalpía del agua de alimentación se obtiene en base a la presión absoluta de la bomba la cual queda determinada mediante la siguiente ecuación:

$$P_{\text{bomba_man}} = P_{\text{trabajo}} + \Delta P$$

Donde:

$P_{\text{bomba_man}}$: Presión manométrica de la bomba [Psig].

P_{trabajo} : Presión de trabajo de vapor [Psig].

ΔP : Caída de presión [Psig].

Si $\Delta P = 0.1 \times P_{\text{trabajo}}$ reemplazando éste valor en la ecuación anterior se determina la presión en la bomba.

CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA CALDERA.

Pérdida de calor debido a los gases secos de la combustión.

$$L_1 = \frac{m_{gc} \times C_p \times (T_{gc} - T_a)}{GCV} \times 100\%$$

GCV = PODER CALORÍFICO SUPERIOR / DENSIDAD

GCV = (12052 Kcal/kg)

Antes de proceder a determinar las pérdidas se debe calcular:

Aire Teórico Requerido Para La Combustión (At):

$$At = \frac{11.6 C + 34.8 \times (H_2 - O_2 / 8) + 4.35 S}{100} =$$

$$At = \frac{11.6 (70.7) + 34.8 \times (29) + 4.35 \times (0.3)}{100} = 18.31 \text{ Kg/Kg comb}$$

% Exceso De Aire Suministrado (EA)

$$EA = \frac{O_2\%}{21 O_2\%} \times 100$$

Desde Al Análisis De Los Gases De Combustión O`2%: 10.795%

$$EA = \frac{10.795\%}{21\% - 10.795\%} \times 100 = 105.8 \%$$

Masa Real De Suministro De Aire / Kg De Combustible (AAS)

$$AAS = \{1 + EA / 100\} \times At$$

$$AAS = \{1 + 105.8 / 100\} \times 18.31 \text{ (Kg/Kg comb)}$$

$$AAS = 37.68 \text{ Kg/Kg comb}$$

Por lo tanto la masa de gases seco de la chimenea viene dado en forma general por:

$$m_{gc} = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} + m_{N_2'} + m_{O_2'}$$

De acuerdo al procedimiento anterior se obtiene cada elemento por separado de la ecuación anterior.

Masa De Dióxido De Carbono Presente En El Combustible.

$$m_{CO_2} = \frac{C \times M_{CO_2}}{M_C}$$

$$m_{CO_2} = \frac{0.707 \text{ KgC/KgComb} \times 44 \text{ KgCO}_2/\text{Kmol}}{12 \text{ KgC/ Kmol}} = 2.6 \text{ KgCO}_2/\text{KgComb}$$

Masa De Nitrógeno Suministrado En El Aire:

$$m_{N_2} = \frac{AAS \times \%N_2}{100}$$

$$m_{N_2} = \frac{37.68 \times 77}{100} = 29.01 \text{ Kg } N_2/\text{KgComb}$$

Masa De Oxígeno Presente En Los Gases De Combustión.

$$m_{O_2} = \frac{O_2\% \times O_2}{100}$$

$$m_{O_2} = \frac{10.795 \text{ Kg } O_2/\text{KgComb} \times 23}{100} = 2.48 \text{ Kg } O_2/\text{KgComb}$$

Por lo tanto la masa de los gases de chimenea o combustión se obtiene reemplazando los valores obtenidos en las ecuaciones anteriores, obteniéndose como resultado el siguiente:

$$m_{gc} = 34.09 \text{ Kg } /\text{KgComb}$$

PÉRDIDA DE CALOR DEBIDO A LOS GASES SECOS DE LA COMBUSTIÓN.

$$L_1 = \frac{28.641 \text{ (kg/kgcomb)} \times 0.233 \text{ (kcal/kg}^\circ\text{C)} \times (300 - 20)^\circ\text{C}}{12052 \text{ Kcal/kg}} \times 100\%$$

$$L_1 = 15.5 \%$$

Pérdida Debido Al Hidrógeno En El Combustible.

$$L_2 = \frac{9 \times H_2 \times [h_{fg} + C_{pv} \times (T_{gc} - T_a)]}{GCV} \times 100\%$$

$$L_2 = \frac{9 \times 0.125 \times [590.45 \text{ Kcal/kg} + 0.571 \text{ Kcal/kg }^\circ\text{C} \times (300 - 20)^\circ\text{C}]}{12052 \text{ Kcal/kg}} \times 100\%$$

$$L_2 = 7.004 \%$$

Pérdidas Debido A La Humedad En El Aire.

$$L_4 = \frac{AAS \times h_f \times C_{pv} \times (T_{gc} - T_a)]}{GCV} \times 100\%$$

El factor de humedad se determinó mediante el programa Psychometric calculations anexo G, teniendo como datos conocidos la temperatura ambiente o de bulbo seco y la humedad relativa, dando el siguiente resultado:

$$L_4 = \frac{37.68 \times 0.0128 \times 0.571 \times (300 - 20)}{12052 \text{ Kcal/kg}} \times 100\% = 0.6398\%$$

Pérdidas Por Radiación Y Convección En La Caldera.

$$L_6 = 0.584 \times \left[\left(\frac{T_s}{55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right] + 1.957 \times (T_s - T_a)^{1.25} \times \sqrt{\frac{196.85V_m + 68.9}{68.9}}$$

Carcasa:

Ts: Temperatura de superficie: 40.3 °C = 313.3 °K

Ta: Temperatura ambiente: 23 °C = 296 °K

$$L_6 = 0.584 * [(313.3/55)^4 - (296/55)^4] + 1.957 * (313.3 - 296)^{1.25} * \text{raíz}[(196.85*0+68.9)/68.9]$$

$$\text{raíz}[(196.85*0+68.9)/68.9]$$

$$L_6 = 0.584 * [1052.9 - 838.9] + 1.957 * 35.3 * 1$$

$$L_6 = 194.06 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$L_6 = 194.06 * 0.86$$

$$L_6 = 166.9 \text{ [Kcal/m}^2\text{h]}$$

El Área De La Carcasa Queda Determinada Por:

$$A_c = 2 * \pi * r * L$$

$$A_c = 2 * \pi * 0.305 \text{ m} * 1.5 \text{ m}$$

$$A_c = 2.88 \text{ m}^2$$

Con lo que se tiene las pérdidas por convección y radiación en la carcasa del caldero mediante la siguiente ecuación.

$$L_{6\text{carcasa}} = (L_6 * A_c) / (GCV * M_f) * 100\% =$$

$$M_f = \text{Flujo requerido de combustible} \rightarrow M_f = 5.41 \text{ Kg/h}$$

$$L_{6\text{carcasa}} = (166.9 [\text{Kcal/m}^2\text{h}] * 2.88 \text{ m}^2) / (12052 \text{ Kcal/kg} * 5.41 \text{ Kg/h}) * 100\%$$

$$L_{6\text{carcasa}} = 0.74 \%$$

PÉRDIDAS POR LAS TAPAS

Tapa #1:

$$T_s: \text{Temperatura de superficie: } 94.3 \text{ } ^\circ\text{C} = 367.3 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_a: \text{Temperatura ambiente: } 23 \text{ } ^\circ\text{C} = 296 \text{ } ^\circ\text{K}$$

El Área De La Tapa #1 Queda Determinando Por:

$$A_{\text{tapa1}} = 2 * \pi * r^2$$

$$A_{\text{tapa1}} = 2 * \pi * (0.305 \text{ m})^2$$

$$A_{\text{tapa1}} = 0.585 \text{ m}^2$$

El Calor Perdido En La Tapa #1 Queda Definido Por La Ecuación

$$L_6 = 0.584 * [(367.3/55)^4 - (296/55)^4] + 1.957 * (367.3 - 296)^{1.25} * \text{raíz}[(196.85 * 0 + 68.9) / 68.9]$$

$$L_6 = 0.584 * [1989 - 839] + 1.957 * 207.19 * 1 = 671.6 + 405.47083$$

$$L_6 = 1077.07 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$L_6 = 1077.07 * 0.86$$

$$L_6 = 926.3 \text{ [Kcal/m}^2\text{h]}$$

De tal manera que las pérdidas de calor en la tapa #1 se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$L_{6\text{tapa1}} = (L_6 * A_{\text{tapa}}) / (\text{GCV} * M_f) * 100\% =$$

M_f = Flujo requerido de combustible

$$M_f = 5.41 \text{ Kg/h}$$

$$L_{6\text{tapa1}} = (926.3 \text{ [Kcal/m}^2\text{h]} * 0.585 \text{ m}^2) / (12052 \text{ Kcal/kg} * 5.41 \text{ Kg/h}) * 100\%$$

$$L_{6\text{tapa1}} = 0.83 \%$$

TAPA #2:

T_s : Temperatura de superficie: $260 \text{ }^\circ\text{C} = 533 \text{ }^\circ\text{K}$

T_a : Temperatura ambiente: $23 \text{ }^\circ\text{C} = 296 \text{ }^\circ\text{K}$

El Área De La Tapa #2 Queda Determinando Por:

$$A_{\text{tapa2}} = 2 * \pi * r^2$$

$$A_{\text{tapa2}} = 2 * \pi * (0.305 \text{ m})^2$$

$$A_{\text{tapa2}} = 0.585 \text{ m}^2$$

El Calor Perdido En La Tapa #1 Queda Definido Por La Ecuación

$$L_6 = 0.584 * [(533/55)^4 - (296/55)^4] + 1.957 * (533 - 296)^{1.25} * \text{raíz}[(196.85 * 0 + 68.9) / 68.9]$$

$$\text{raíz}[(196.85 * 0 + 68.9) / 68.9]$$

$$L_6 = 0.584 * [8819.8 - 838.9] + 1.957 * 929.9 * 1 = 4660.85 + 1819.8$$

$$L_6 = 6480.65 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$L_6 = 6480.65 * 0.86$$

$$L_6 = 5573.36 \text{ [Kcal/m}^2\text{h]}$$

De Tal Manera Que Las Pérdidas De Calor En La Tapa #2 Se Obtiene Mediante

La Siguiete Ecuación:

$$L_{6\text{tapa2}} = (L_6 * A_{\text{tapa}}) / (\text{GCV} * M_f) * 100\% =$$

M_f = Flujo requerido de combustible

$$M_f = 5.41 \text{ Kg/h}$$

$$L_{6\text{tapa2}} = (5573.36 \text{ [Kcal/m}^2\text{h]} * 0.585 \text{ m}^2) / (12052 \text{ Kcal/kg} * 5.41 \text{ Kg/h}) * 100\%$$

$$L_{6\text{tapa2}} = 5 \%$$

PÉRDIDAS TOTALES DEBIDO A LAS TAPAS

$$L_{6tapas} = L_{6tapa1} + L_{6tapa2}$$

$$L_{6tapas} = 0.83 \% + 5 \%$$

$$L_{6tapas} = 5.83 \%$$

Al realizar las pruebas preliminares con el prototipo de la caldera pirotubular vertical, sin estar todavía totalmente ensamblada, es decir se sometió a prueba todo el sistema Medusa, se pudo comprobar de que las llamas del quemador ingresaban a los otros tubos hasta casi la mitad de los mismos, lo que permite comprobar de que lo tubos que en las calderas convencionales sean tubos de humo, en esta caldera sean tubos de fuego, es decir, las llamas del quemador están en contacto directo con toda la tubería que calienta el agua haciendo esto que disminuya el tiempo de conversión del agua en vapor, pues no existen los famosos tubos por pasos, ya que en una caldera convencional de tres pasos la temperatura de los gases de combustión que pasan a través de los tubos de humo en el segundo paso disminuye casi en un 25% con respecto a la de la llama del quemador y en el tercer paso la temperatura de los gases de combustión en el tercer paso disminuye casi en un 45% con respecto a la de la llama del quemador, lo que hace por lógica que el tiempo de conversión del agua en vapor sea mayor que en la caldera diseñada en la presente tesis, y esto sumado a que la caldera no tiene tapas por donde también existe pérdidas de calor en un 5.83 % aproximadamente y que

ese porcentaje es aprovechado en energía, nos permite aprovechar el calor en su máxima dimensión y por ende disminuir el gasto de combustible, así como por lógica esto nos dará un ahorro sustancial en dinero.

En la presente tesis se ha analizado y tomado sólo en cuenta el porcentaje de ahorro de energía por las tapas, lo que representó un porcentaje del 5% si tomamos en cuenta de que existirá la tapa inferior (Tapa 1) que representa el 0.83%. Por lo que en las recomendaciones se hablará y se sugerirá los otros análisis para los otros tipos de ahorro.

VI. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1. Contratación de hipótesis con los resultados

- En la Hipótesis Principal se mencionó que mediante La implementación De Caldera Pirotubular Vertical Para Uso Industrial Y Docente diseñada en la presente tesis, nos permitiría incrementar la eficiencia de dichas Plantas Térmicas y mediante ello disminuir la emisión de gases de combustión lo cual disminuirá la contaminación Ambiental, lo cual también permitirá el ahorro monetario en la empresa, y así mismo, enriquecer la enseñanza de equipos térmicos como los calderos en los alumnos, pues todo esto ha quedado demostrado en las pruebas preliminares y posteriores realizadas.

- En las Hipótesis secundarias se mencionó que se podía determinar que la aplicación del Mejoramiento De la Planta Térmica Planteada es el adecuado para la industria, pues esto también se ha podido demostrar, ya que al disminuir el tiempo de conversión de agua en vapor se ahorra combustible y por ende existe un ahorro de dinero para la empresa.

- Y la segunda Hipótesis secundaria mencionó que mediante la aplicación del Mejoramiento teórico y práctico de la Planta Térmica Planteada es el adecuado para la docencia, esto también es cierto, ya que el enseñar a los alumnos que toda innovación tecnológica puede ser buena si se la lleva a cabo y se la aplica de la mejor manera para el beneficio de la empresa y de la sociedad, resultará en beneficio para toda la humanidad, lo que incluye las plantas y los animales.

VII. CONCLUSIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Podemos comprobar en base a los resultados que el uso de equipos inadecuados en las plantas térmicas afecta el medio ambiente y el aspecto económico de las empresas.
- Así mismo la falta de equipos de uso eficiente en plantas térmicas afecta el ahorro energético y la eficiencia energética en la industria.
- También el mal uso y la falta de conocimientos en las plantas térmicas afecta la docencia y el medio ambiente.
- El Desarrollo del prototipo de la Caldera Piro-tubular Vertical para la Planta Térmica mejoró la eficiencia energética en un promedio del 5%, el ahorro de combustible y la disminución de la contaminación ambiental.
- El Desarrollo del prototipo de planta térmica con caldera piro-tubular vertical para uso industrial y docente es posible llevarla a cabo.
- Es necesario elaborar una guía de experiencias de laboratorios para uso docente referente al uso de la caldera.
- Mediante La implementación De Caldera Piro-tubular Vertical Para Uso Industrial Y Docente en una planta térmica o donde se la necesite se podrá incrementar la eficiencia de dichas calderas y mediante ello disminuir la emisión de gases de combustión lo cual disminuirá la contaminación Ambiental, y también permitirá el ahorro monetario en la empresa.

- Así mismo, con este tipo de calderas se podrá enriquecer la enseñanza en equipos térmicos como los calderos en los alumnos.
- Se pudo determinar con los cálculos y las pruebas realizadas que la aplicación del Mejoramiento de la caldera Pirotubular Vertical Para Uso Industrial Y Docente De la Planta Térmica Planteada es el adecuado para la industria.
- Por otro lado, Mediante la aplicación del Mejoramiento teórico y práctico de la caldera para la Planta Térmica Planteada es el adecuado para la docencia.

VIII. RECOMENDACIONES

- Sólo se ha realizado el análisis del mejoramiento de la caldera en lo que respecta al análisis de las tapas, es decir, como en la caldera de la tesis no se tienen tapas como en las convencionales, por ello se recomienda que en un segundo trabajo con respecto a esta caldera, se realice un análisis de mejora con respecto a los gases de combustión ya que estos salen de la caldera con una mayor temperatura (320 °C) que en las calderas convencionales que sus gases de combustión salen a 200 °C. y es seguro que con ello se logrará un aumento en el porcentaje de mejora por encima del 5% de mejora actual.
- Se recomienda que con los gases de combustión de la caldera Piro-tubular Vertical Para Uso Industrial Y Docente de la presente tesis se utilicen para calentar el aire de alimentación del quemador y así mejorar la combustión o en su defecto para calentar agua en un tipo de intercambiador de calor.
- Se recomienda que se debe de realizar un análisis financiero de la implementación del sistema de la nueva caldera de acuerdo a la inversión del proyecto, y el tiempo de recuperación del proyecto.
- También realizar el coste del consumo de energía al año, este rubro contempla tanto la energía eléctrica como el diésel utilizado para la generación de la energía térmica.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar, Giovanna. (2003). El sistema tarifario del servicio público de electricidad, una evaluación desde el punto de vista de los usuarios. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).
2. Alcántara, Vicent y Padilla, Escolano. (2009). “Determinantes del crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero en España (1990-2007)”. España: Universidad Autónoma de Barcelona.
3. Amestoy, José. (2010). El planeta tierra en peligro (Calentamiento global, Cambio climático, Soluciones). España: Editorial Club Universitario.
4. Anaya, Willy. (2008). Determinantes del Precio Spot de generación eléctrica en el Perú: 1993-2007. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).
5. Barreda, Virginia. (2011). “Precios de Referencia de Combustibles”. Perú: Osi-nergmin,
6. Bazán, Ciro. (2011). Ensayos sobre la reforma del Sector Eléctrico: Tecnología y Competencia. ACCEDA: Universidad de las Palmas de la Gran Canaria (ULPGC). España.
7. Bonifaz, José. (2001). Distribución eléctrica en el Perú: Regulación y eficiencia. Perú: Consorcio de Investigación Económica y Social (CIES) / Universidad del Pacífico -Centro de Investigación (CIUP).
8. Bonifaz, José. (2008). Beneficios económicos de la carretera interoceánica. Perú: Universidad del Pacífico, Centro de Investigación.

9. Castro, Raúl, y Mokate Karen. (2003). Evaluación económica y social de proyectos de inversión. Colombia: Ediciones Uniandes.
10. Causevski, Anton and Bosevski, Tome. (2008). Environmental Impacts from Power Generation System in Macedonia. Macedonia: Department on Power Plants & Power Systems and Research Center for Energy, Informatics and Materials, Macedonian Academy of Sciences and Arts.
11. Centro de estudios para el desarrollo económico de la Universidad de los Andes. (2010). Evaluación económica de impactos ambientales en proyectos sujetos a licenciamiento ambiental. Colombia: Universidad de los Andes.
12. Comité de operaciones económicas del sistema interconectado nacional. (2005). Estadísticas de operaciones. Perú.
13. Comité de operaciones económicas del sistema interconectado nacional. (2006). Estadísticas de operaciones. Perú.
14. Comité de operaciones económicas del sistema interconectado nacional. (2007). Estadísticas de operaciones. Perú.
15. Comité de operaciones económicas del sistema interconectado nacional. (2008). Estadísticas de operaciones. Perú.
16. Comité de operaciones económicas del sistema interconectado nacional. (2009). Estadísticas de operaciones. Perú.
17. Comité de operaciones económicas del sistema interconectado nacional. (2010). Estadísticas de operaciones. Perú.

18. Comité de operaciones económicas del sistema interconectado nacional. (2011). Estadísticas de operaciones. Perú.
19. Contreras, Carmen, et al. (2009). “Enfoque y criterios para evaluar el impacto en salud y en los ecosistemas de la regulación de las emisiones al aire de las termoeléctricas”. Chile: Ministerio del Medio Ambiente.
20. Consorcio Consultor KAS Ingeniería y GEOAIRE. (2009). Análisis general del impacto económico y social de una norma de emisión para termoeléctrica. Chile: Consorcio Consultor KAS Ingeniería y GEOAIRE.
21. Consorcio ME-COMILLAS. (2009). Libro blanco del marco regulatorio de la Distribución eléctrica en el Perú: Determinación del valor agregado de distribución. Madrid: Consorcio ME-COMILLAS.
22. Correa, Santiago, et al. (1996). Investigación evaluativa. Colombia: Instituto colombiano para el fomento de la educación superior.
23. Dávila, Santiago. (1999). Competencia en el mercado de clientes finales de energía eléctrica no sujetos a regulación de precios. Perú: Secretaría Técnica de la Comisión de Libre Competencia.
24. Devezeaux, Jean-Guy. (2000). Environmental Impacts of Electricity Generation. Londres: The Uranium Institute.
25. Díaz, Johnathan. (2011). Evaluación del Margen de Reserva en el sector eléctrico Peruano. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).
26. Enzen Global Solutions. (2003). “Environmental Impact of Emissions from Thermal Power Generation in India”.

27. Galarza, Karen. (2011). Informe sectorial Perú: Sector eléctrico. Perú: PacifCredit Rating.
28. Gertler, Paul, et al. (2011). La evaluación de impacto en la práctica. Estados Unidos: Banco Mundial.
29. Gilpin, Alan. (2003). Economía ambiental: Un análisis crítico. México: Alfa omega.
30. Grupo de Análisis para el Desarrollo (GRADE). (2011). Análisis costo-beneficio del cambio de uso del suelo: Región San Martín. Perú.
31. Fernández-Baca, Jorge. (2011). Actualización de la Tasa Social de Descuento. Dirección General de Programación Multianual del Sector Público.
32. Field, Barry. (1994). Economía ambiental: una introducción. Bogotá, D.C.: McGraw-Hill Interamericana.
33. Freeman, Myrick. (2003). The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Method. Washington DC: Resources for the future.
34. Huapaya, Ramón. (2010). Reflexiones sobre los títulos habilitantes en el Sector Eléctrico. Perú: Escuela de Administración de Negocios para Graduados (ESAN).
35. Inga, Esteban y Saquicela, Juan. (2002). Análisis costo-beneficio de la automatización en el sistema de producción de hormigón para Hormiazuary Cía. Ltda. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
36. Just, Richard, et al. (1982). Applied welfare economics and public policy. New York: Prentice- Hall.
37. Luyo, Jaime. (2012). Nueva matriz energética sostenible para el Perú. Lima.

38. Macines, Rogelio. (2009). "El mercado de Carbono y el financiamiento de proyectos hidroeléctricos en el Perú". Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
39. Maturana, Julia. (2005). *Economic Costs and Benefits of Allocating Forest Land for Industrial Tree Plantation Development in Indonesia*. Indonesia: Center for International Forestry Research.
40. Mendieta, Juan. (2005). "Aplicaciones de las Técnicas de Valoración de Bienes No Mercadeables y el Análisis Costo Beneficio y Medio Ambiente". Colombia: Universidad de los Andes.
41. Mendiola, Alfredo, et al. (2011). "Estrategia de generación de valor en una empresa de distribución eléctrica". Perú: Universidad ESAN.
42. Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2010). "Propuesta de política energética de estado Perú 2010 – 2040". Perú: Ministerio de Energía y Minas.
43. Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2011). *Plan nacional de electrificación rural (PNER) 2011 – 2020*. Perú: Ministerio de Energía y Minas.
44. Montalva, Mauricio. (2009). "Centrales eléctricas". Chile: Liceo Politécnico Hannover.
45. MWH Perú. (2006). *Proyecto Suplementario de Yanacocha*. Perú.
46. Octaviano, Claudia. (2011). "Análisis general de las externalidades ambientales derivadas de la utilización de combustibles fósiles en la industria eléctrica centroamericana". México: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
47. Organismo supervisor de la inversión en energía y minería. (2005). *Reformas estructurales en el Sector Eléctrico Peruano*. Perú: Autor.

48. Organismo supervisor de la inversión en energía y minería. (2011). Valorización de externalidades y Reconstrucción del Parque Óptimo de Generación Eléctrica. Perú: Autor.
49. Seoáñez, Mariano. (2002). Tratado de la contaminación atmosférica. Problemas, tratamiento y gestión. España: Ediciones Mundi-Prensa.
50. Serra, José; Malky, Alfonso y Reid, John. (2012). “Costos y beneficios del proyecto hidroeléctrico del río Inambari”. Perú: Conservation Strategy Fund,
51. Tomasini, Daniel. (2007). Valoración económica del ambiente. Argentina: Universidad de Buenos Aires.
52. Zuk, Miriam, et al. (2006). Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México. México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología.
53. Rapún Jiménez, José Luis (1999), “Modelo matemático del comportamiento de ciclos combinados de turbinas de gas y vapor”. España. Universidad Politécnica de Madrid.
54. Jesús María Escosa González, (2009), “Reducción de emisiones de dióxido de carbono en centrales térmicas de carbón pulverizado. Repotenciación y ciclo de captura óxido de calcio-carbonato cálcico”. España. Consejo Económico Y Social De Aragón.
55. Francisco Xavier Cajamarca Corral, (2001). “Diseño Y Construcción De Una Caldera Piro tubular Horizontal De Tres Pasos 50 BHP”. Escuela Superior Politécnica Del Ejercito Sede Latacunga.

56. Alberto De Jesús Ramírez Romero (2011), "Generación De Energía Y Las Centrales Térmicas De Ciclo Combinado". México. Universidad Veracruzana.
57. Blanco G., Douglas A. (2007), "Diseño Del Esquema De Conexión De Una Planta Termoeléctrica De 900 Mw En Cumaná Y La Evaluación De Su Impacto En El Sistema Eléctrico Nacional (SEN)". Venezuela. Universidad Central de Venezuela.
58. Muñoz Antón, Javier (2008), "Sistemas de generación eléctrica mediante calderas de vapor energizadas por radiación solar concentrada", España. Universidad Politécnica de Madrid.
59. D^a. María del Carmen Rodríguez Hidalgo (2010), "Estudio En Régimen Transitorio De Plantas Solares Térmicas De Propósito Múltiple. Aplicación Al Diseño De Instalaciones Concebidas Para Agua Caliente Sanitaria", España. Universidad Carlos III de Madrid.
60. Rodrigo Andrés Soto Avello (2012), "Aumento De Eficiencia De Centrales Termoeléctricas Y Nucleares Usando Energía Océano Térmica", Chile. Pontificia Universidad Católica De Chile.
61. Rodrigo Heraldo Sepúlveda Sepúlveda (2011), "Modelación De Centrales Térmicas De Ciclo Combinado Y Su Aplicación En El Problema De Pre despacho De Unidades". Chile. Pontificia Universidad Católica De Chile.
62. Jaime Mendoza Nalvarte (2002). "Análisis Del Diseño Termodinámico De Centrales Eléctricas De Ciclo Combinado". Perú. Universidad de Piura.

63. Exebio T., Vania B. y Prieto R., Marco V., (2013). “Impacto económico de las emisiones de gases Efecto invernadero de las centrales térmicas En el Perú”, Perú. Universidad Católica Santo Toribio De Mogrovejo.

ANEXO I

MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO	PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES
<p>"MEJORA-MIENTO DE UNA PLANTA TÉRMICA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE CALDERA PIROTUBULAR VERTICAL PARA USO INDUSTRIAL Y DOCENTE"</p>	<p>PROBLEMA PRINCIPAL ¿Cómo el uso de equipos inadecuados en las plantas térmicas afecta el medio ambiente y el aspecto económico de las empresas?</p> <p>PROBLEMAS SECUNDARIOS ¿Cómo la falta de equipos de uso eficiente en plantas térmicas afecta el ahorro energético y la eficiencia energética en la industria?</p> <p>¿Cómo el mal uso y la falta de conocimientos en las plantas térmicas afecta el medio ambiente.</p>	<p>OBJETIVO GENERAL Desarrollar un prototipo de una Caldera Pirotubular Vertical para la Planta Térmica para mejorar el medio ambiente y el aspecto económico de las empresas.</p>	<p>HIPOTESIS GENERAL Mediante La implementación de Caldera Pirotubular Vertical para uso Industrial nos permitirá mejorar el medio ambiente y coadyuvar con el incremento de la gestión económica de las Empresas.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS CAS 1. Determinaremos que la aplicación del Mejoramiento de la Planta Térmica Planteadá permitirá el ahorro energético y mejorará la eficiencia energética en la industria. 2. Mediante el uso de la guía de experiencia de laboratorio se mejorará los conocimientos de la Planta Térmica.</p>	<p>LA VARIABLE INDEPENDIENTE Caldera Pirotubular Vertical.</p> <p>LA VARIABLE DEPENDIENTE: Planta Térmica para uso Industrial.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Alta contaminación ambiental por CO₂ proveniente de las calderas actuales. - Sobre costo en combustible usado por las calderas actuales. - Altas pérdidas de calor al medio ambiente.

ANEXO 2

PRESUPUESTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE LA CALDERA PIROTUBULAR VERTICAL

a) GASTOS OPERATIVOS GENERALES DEL PROYECTO

Materiales para fabricación de la caldera

1 Tubo de Acero de 150 cms. longitud X 20" de diámetro	S/. 1000
1 Tubo de Acero de 100 cms. longitud X 4" de diámetro	S/. 480
3 Tubo de Acero de 600 cms. longitud X 2" de diámetro	S/. 500
Accesorios de Acero (T"es", Codos, Arandelas, Tuberías)	S/. 500
1 Tubo para medidor de nivel de agua 100 cms. longitud	S/. 100
1 Campana Medusa de Acero	S/. 500
1 Latón para carcaza	S/. 200
1 Lana vegetal para relleno	S/. 200
1 Balón de Gas 100 Lbs.	S/. 500
1 Soporte de fierro para Caldera	S/. 300
1 Termómetro Digital	S/. 500
Válvula de Alivio	S/. 200
Salida de Vapor	S/. 100
Llaves de Bola	S/. 200

Cables + Conectores diversos	S/. 300
Servicio de Soldadura Especial	S/. 3,000
Bomba de agua de 0.5 HP	S/. 300
Depósito para agua de Acero Inox	S/. 300
Mesa de Fierro para Depósito y Bomba de agua	S/. 300

Sensores de Nivel, Tipo Contacto, min, máx.	2.0	500	S/.1,000
Manómetro Digital de Presión de Vapor	1.0	750	S/. 750
Válvula de Seguridad, Regulable, de 30 a 50 Psi	1.0	250	S/. 250
Quemador de GLP, con 350 Watts,	1.0	1,700	S/.1,700
Válvulas de Paso, de 1/2" Acero	2.0	150	S/. 300
Válvulas de Paso, de 1" Acero	1.0	400	S/. 400

02 RECURSOS MATERIALES

- Útiles de Escritorio

Papeles e insumos de oficina S/. 120 x 9 bimestres = S/. 720

- 02 Memorias USB 16 GB S/. 100 x 2 = S/. 200

- Laptop de última generación S/. 7000.00

TOTAL DE PROYECTO DISEÑO CALDERA PIROTUBULAR S/. 21,800