

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA - ENERGÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE UN SISTEMA DE  
COGENERACIÓN DE ENERGÍA EN CICLO COMBINADO Y  
SU INFLUENCIA EN LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA  
PRODUCTORA DE FIBRAS ACRÍLICAS DE HILADO EN  
SECO, PERÍODO 2016-2017”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**Presentado por:  
TENA JACINTO, ENIO ELÍAS**

**Bellavista – Callao, 2019**

**PERÚ**



## **HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN**

### **JURADO EVALUADOR:**

**PRESIDENTE: Dr. FLORES SÁNCHEZ JAIME**

**SECRETARIO: Mg. MARTIN SIHUAY FERNÁNDEZ**

**VOCAL: Mg. JORGE ALEJOS ZELAYA**

**ASESOR: Dr. TEZEN CAMPOS JOSÉ HUGO**

## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres Escolástico Tena y Victoria Jacinto por su apoyo, que hoy gozan al lado de nuestro Señor Jesucristo que conocen vuestros corazones.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis maestros de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Energía de la Universidad Nacional del Callao, quienes día a día me brindaron sus conocimientos en las aulas de la FIME que sirvieron en gran porcentaje al desarrollo de este trabajo.

## ÍNDICE

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
INDICE.....	1
TABLAS DE CONTENIDO .....	4
ABREVIATURAS.....	6
RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
1.1. Descripción de la realidad problemática .....	11
1.2. Formulación del problema.....	14
1.2.1. Problema general.....	14
1.2.2. Problemas específicos.....	14
1.3. Objetivo de la investigación.....	16
1.3.1. Objetivo general.....	16
1.3.2. Objetivos específicos.....	16
1.4. Limitantes de la investigación .....	16
II. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. Antecedentes internacionales y nacionales .....	18
2.2. Bases teóricas.....	29
2.2.1 La energía .....	29
2.2.2 La energía de un sistema .....	31
2.2.3 Sistema termodinámico.....	31

2.2.4 Sistema de cogeneración de energía .....	32
2.2.5 Topología de una planta térmica .....	36
2.2.6 Optimización topología y su influencia en la eficiencia.....	40
2.2.7 Plantas o centrales térmicas .....	44
2.3 Bases conceptuales.....	52
2.3.1 Planta térmica .....	52
2.3.2 Ciclo combinado .....	52
2.3.3 Descripción de la planta de cogeneración con ciclo combinado .....	53
2.3.4 Eficiencia energética .....	65
2.4 Definiciones de términos básicos .....	97
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	102
3.1 Hipótesis general y específicos .....	102
3.2 Definición conceptual de las variables.....	102
3.2.1 Operacionalización de variables.....	104
IV. DISEÑO METODOLÓGICO .....	105
4.1 Tipo y diseño de investigación.....	105
4.2 Método de investigación .....	107
4.3 Población y muestra .....	107
4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado.....	108
4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de información .....	108
4.6 Análisis y procesamiento de datos .....	108
V. RESULTADOS .....	120
5.1 Resultados Descriptivos .....	120
5.2 Resultados inferenciales.....	121
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	124

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados de la Influencia entre la optimización topológica y eficiencia.....	124
6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios.....	125
6.3 Responsabilidad ética de acuerdo al reglamento vigente.....	126
VII. CONCLUSIONES.....	127
VIII. RECOMENDACIONES.....	129
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	130
ANEXOS .....	

## TABLAS DE CONTENIDO

Tabla 2.1. :	Rendimiento energético de equipos de cogeneración...	71
Tabla 2.2. :	Rendimiento de la combustión y quemado.....	81
Tabla 2.3. :	Comparación del residual R500 y GN.....	81
Tabla 2.4. :	Precios de gas en boca de pozo.....	82
Tabla 2.5. :	Tarifas de gas en Lima – Callao.....	82
Tabla 2.6. :	Tarifas de gas con y sin impuesto.....	83
Tabla 2.7. :	Tarifas finales de gas con y sin impuesto para usuarios comerciales.....	83
Tabla 2.8. :	Tarifas finales de gas y sin impuesto para usuarios de pequeñas industrias.....	84
Tabla 2.9. :	Tarifas finales de gas y sin impuesto para usuarios de medianas industrias.....	84
Tabla 2.10. :	Tarifas finales de gas y sin impuesto para usuarios de grandes industrias.....	85
Tabla 2.11. :	Emisiones comparativas de una caldera de vapor.....	89
Tabla 5.1 :	Correlaciones.....	122

## FIGURAS DE CONTENIDO

Figura 1.1. :	Árbol de problemas.....	13
Figura 1.2. :	Árbol de objetivos.....	15
Figura 2.1. :	Tipos de sistema termodinámico.....	32
Figura 2.2. :	Sistema de cogeneración.....	33
Figura 2.3. :	Generación de energía convencional y cogeneración...	34
Figura 2.4. :	Cogeneración de ciclo de cabecera y Cola.....	35
Figura 2.5. :	Planta térmica con extracción de vapor.....	37
Figura 2.6. :	Planta a con turbina de gas y recuperación de calor...	38
Figura 2.7. :	Planta del ciclo combinado.....	39
Figura 2.8. :	Planta de contrapresión.....	40
Figura 2.9. :	Ciclo Brayton cerrado.....	46
Figura 2.10. :	Ciclo rankine.....	49
Figura 2.11. :	Elementos de la turbina de gas.....	54
Figura 2.12. :	Cámara de combustión .....	55
Figura 2.13. :	Quemador con bajo nivel de NOx.....	56
Figura 2.14. :	Caldera de recuperación de calor.....	58
Figura 2.15. :	Elementos en el interior de la caldera.....	59
Figura 2.16. :	Sistema de evaporación.....	61
Figura 2.17. :	Calderin y Tubos evaporadores.....	62
Figura 4.1. :	Esquema de la planta en estudio.....	110
Figura 4.2. :	Esquema de planta con optimización.....	114
Figura 4.3:	Turbina de gas seleccionada para la optimización.....	115

## ABREVIATURAS

$\eta_{TG}$ : Eficiencia de la turbina de gas

$\dot{W}_T$ : Trabajo de la turbina de gas

$\dot{W}_C$ : Trabajo del compresor

$\dot{m}_c$ : Flujo másico del combustible (gas natural)

$P_{GN}$ : Poder calorífico inferior del gas natural

$\dot{m}_a$ : Flujo másico del aire

$h_4$ : Entalpia a la entrada de la turbina de gas

$h_5$ : Entalpia a la salida de la turbina de gas

$h_2$ : Entalpia a la salida del compresor

$h_1$ : Entalpia a la entrada del compresor

$\varphi_P$ : Factor de potencia

$\eta_{CRC}$ : Eficiencia del caldero de recuperación de calor

$Q_{TV}$ : Calor aportado al ciclo de baja-turbina de vapor

$Q_{RTG}$ : Calor residual del ciclo de alta-turbina de gas

$Q_{CH}$ : Calor perdido por el acoplamiento de los dos ciclos

$\dot{W}_B$ : Trabajo de la bomba

$Q_C$ : Calor aportado por el foco caliente

$\dot{m}_v$ : Flujo másico de vapor

$\eta_{CC}$ : Eficiencia del ciclo combinado

$\eta_{TV}$ : Eficiencia de la turbina de vapor

$FUE$ : Factor de uso de energía

$\dot{W}_{EE}$ : Potencia de energía eléctrica

$\dot{W}_{ET}$ : Potencia de energía térmica

$c_p$ : Calor específico a presión constante

$T_2$ : Temperatura a la salida del compresor

$T_1$ : Temperatura a la entrada del compresor

$\eta_C$ : Eficiencia del compresor

$n$ : Coeficiente poli trópico del aire

$R$ : Relación total de compresión

$R_C$ : Relación de compresión de cada etapa

$N$ : Numero de etapas en el compresor

$Q_{24}$ : Calor transferido por la cámara de combustión

$T_3$ : Temperatura a la entrada de la cámara de combustión

$T_4$ : Temperatura a la entrada de la turbina de gas

$W_T$ : Trabajo realizado por la turbina de gas

$T_a$ : Temperatura ambiente

$v$ : Volumen específico

$P_2$ : Presión a la salida del compresor

$P_1$ : Presión a la entrada del compresor

$A_e$  = Ahorro económico

$C_{cs}$  = Costo energético del sistema convencional

$C_{cg}$  = costo energético del sistema de cogeneración

$C_{ex}$  = Costo energético del excedente

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación titulado “OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE UN SISTEMA DE COGENERACIÓN DE ENERGÍA EN CICLO COMBINADO Y SU INFLUENCIA EN LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE FIBRAS ACRÍLICAS DE HILADO EN SECO, PERIODO 2018” es clasificado como una investigación aplicada o tecnológica, cuyo nivel es descriptivo correlacional por las características de las variables estudiadas y la naturaleza de la investigación.

El resultado que presenta el estadístico de correlación de Pearson es 0.900, lo cual sugiere la existencia de una alta relación directa entre las variables, frente al grado de significación estadística, 0.038; por lo que la hipótesis es aceptada.

Los resultados obtenidos verifican que la selección de la topología optimizada ha sido adecuada en la generación de energía, y conduce a un mecanismo de desarrollo limpio, que nos permite utilizar adecuadamente la energía en cualquier proceso del sistema termodinámico.

La aplicación de parámetros termodinámicos en la tecnología de cogeneración de ciclo combinado nos ha llevado a comprender que el uso adecuado de la energía permite mejorar la eficiencia, disminuir el nivel de emisiones y aumentar la rentabilidad.

**Palabras claves:** Cogeneración, optimización topología, eficiencia, ahorro de energía, ciclo combinado, rentabilidad, reducción de emisiones.

## ABSTRACT

The present research work titled “TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF A COMBINED CYCLE ENERGY COGENERATION SYSTEM AND ITS INFLUENCE ON THE EFFICIENCY OF A DRY ROLLING FIBER PRODUCTION PLANT, PERIODO 2018” for the characteristics of the variables studied and the nature of the research corresponds to its classification as an applied or technological investigation, whose level is descriptive correlational.

The results show the Pearson correlation statistic = 0.900, it means that there is a high direct relationship between the variables, compared to (degree of statistical significance)  $p = 0.038$ ; so the hypothesis is accepted.

The results obtained verify that the selection of the optimized topology has been adequate in the generation of energy, and leads to a clean development mechanism, which allows us to properly use the energy in any process of the thermodynamic system.

Applying thermodynamic parameters in combined cycle cogeneration technology has led us to understand that the proper use of energy allows to improve efficiency, decrease the level of emissions and increase profitability.

**Keywords:** Cogeneration, topology optimization, efficiency, energy saving, combined cycle, profitability, emission reduction.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción de la realidad problemática**

En el mundo se sabe que los efectos negativos que genera el hombre han destruido su propio planeta, dado que el 63% de la producción térmica se disipa al medio ambiente, las mayores incertidumbres o barreras para la optimización de la energía radican en la volatilidad del costo de combustible, la escasez de capital y espacio físico.

En Sudamérica el 13% de la población (50 millones) no tienen energía eléctrica, debido a las fluctuaciones políticas y a la escasez de directrices que representan barreras para el fomento de inversiones en proyectos energéticos, a ello se suma la falta de gestión entre organismos públicos y ministerios donde confunden funciones, situación que se da en varios países.

En el Perú, en las plantas térmicas donde se ha realizado visitas de estudio, se ha observado el consumo inadecuado de la energía primaria y por ende pérdidas considerables en la utilización de dicha energía, por ello la gran cantidad de emisiones al medio ambiente de monóxido de carbono.

La mayoría de las tecnologías utilizadas en los proyectos energéticos, no están disponibles en el Perú, especialmente en lo que respecta a equipos y maquinas como son: compresores, cámaras de combustión, turbinas de gas, turbinas de vapor, calderas de recuperación de calor y tanque de

condensado, que deben ser importados desde el extranjero. Además existe la insuficiencia de recursos humanos con habilidades técnicas fácilmente disponibles para la operación y mantenimiento de las plantas de cogeneración en las empresas, que haga posible la utilización adecuada de la energía primaria.

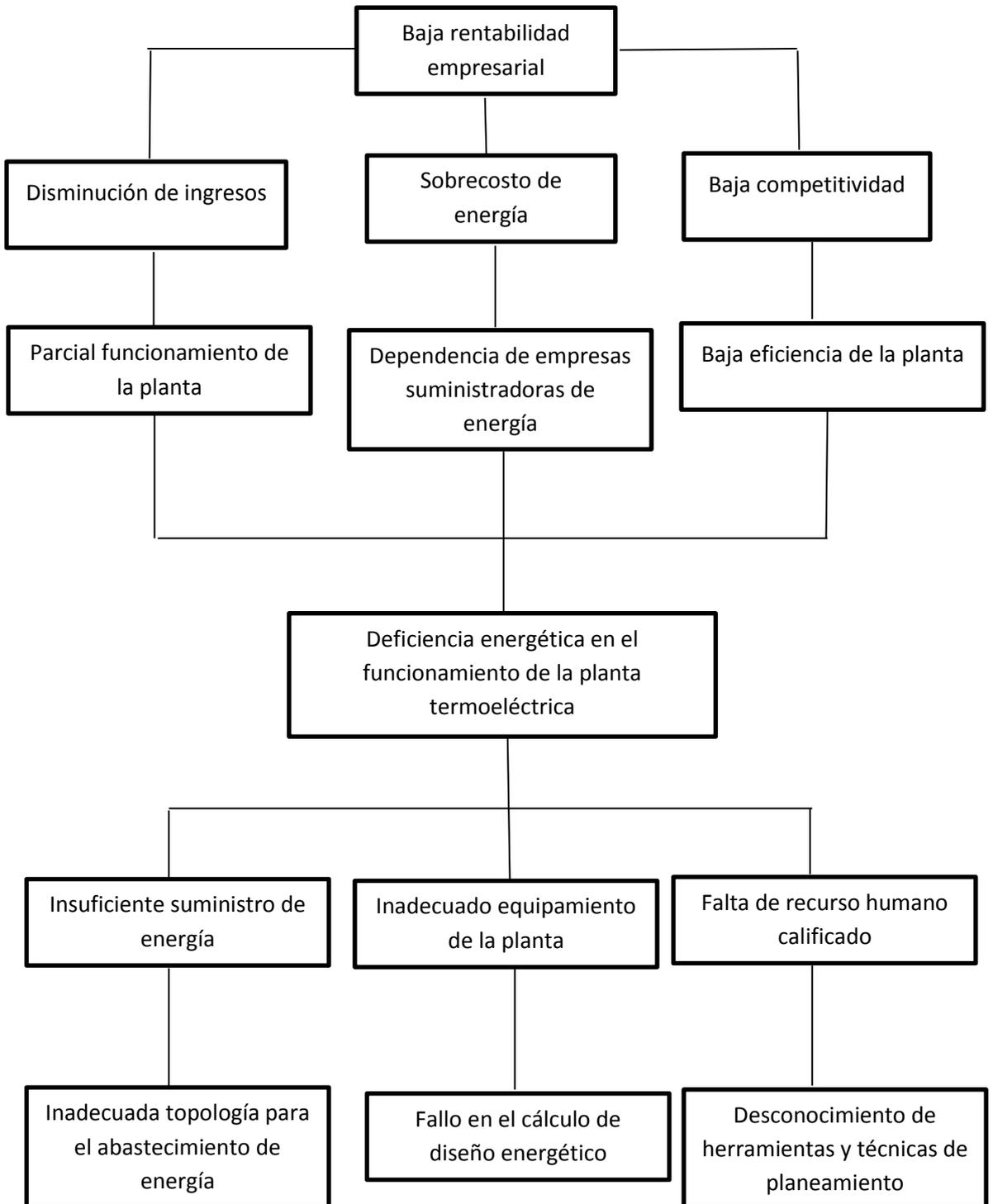
Asimismo, no existe la tecnología del uso adecuado de la energía primaria más aun de optimización topológica de los sistemas de generación de energía eléctrica y energía térmica utilizada en los procesos de producción, que mejore la eficiencia global de la planta termoeléctrica.

La mayoría de empresas compran la energía eléctrica de las generadoras, lo cual las hacen dependientes. Así, un imprevisto de corte de alimentación eléctrica en la planta de producción, afectará a todas las líneas de producción, y la parada de planta generaría una disminución en la producción.

En el Perú existen muchas dificultades para ejecutar los proyectos de optimización, repotenciación o nuevas instalaciones debido a las barreras de inversión, falta de tecnología, recursos de gestión, legales, capacidad de organización.

Analizando los problemas detalladamente, haciendo uso del árbol de problemas podemos observar que en la actualidad la mayoría de nuestras Empresas tienen baja rentabilidad y por tanto no son competitivas en el mercado internacional.

**Figura 1. 1 Árbol de problemas**



**Fuente: Elaboración propia**

## **1.2. Formulación del problema**

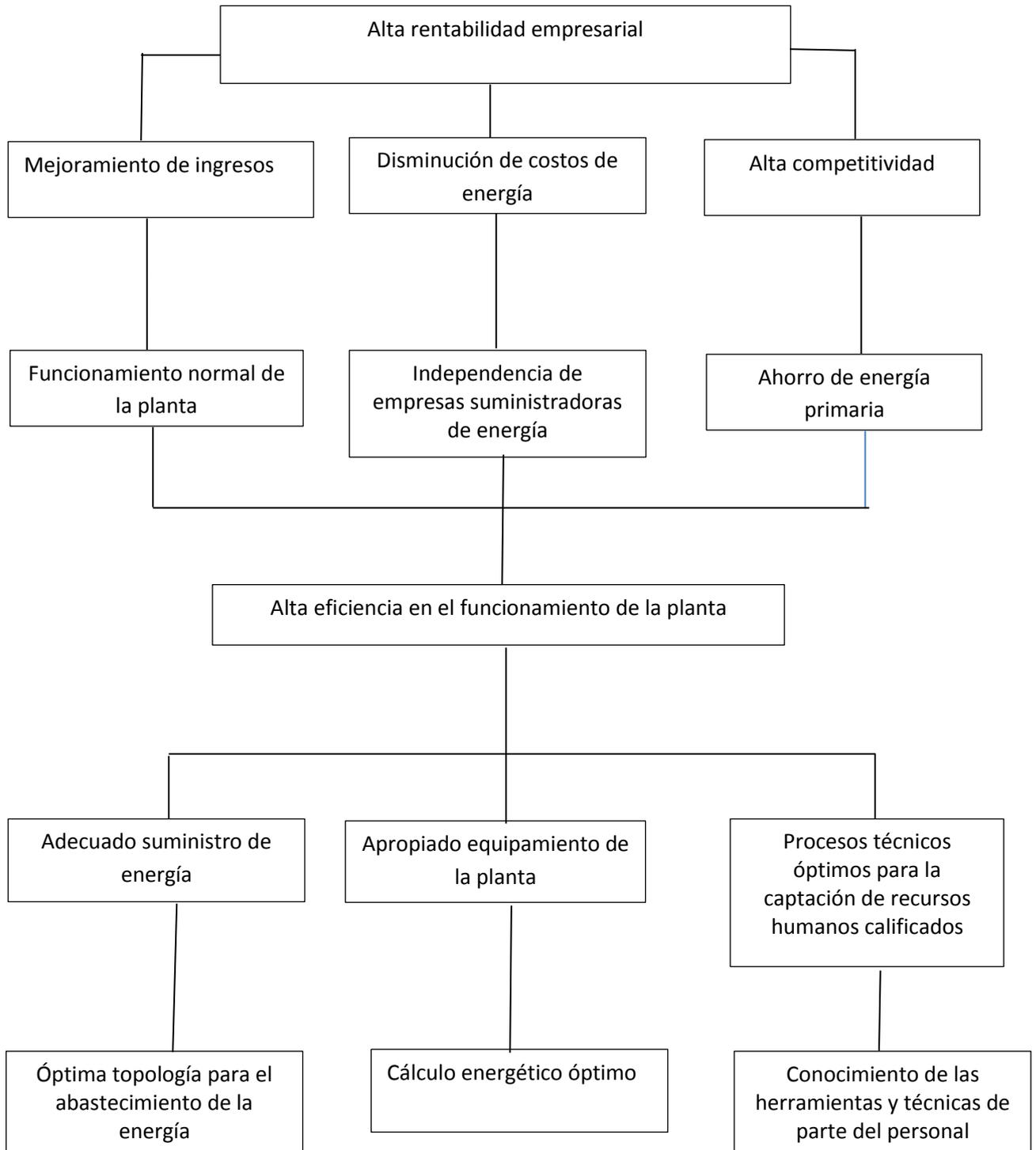
### **1.2.1. Problema general**

¿Cómo influye la optimización topológica del sistema de cogeneración de energía en ciclo combinado en la eficiencia para planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Cómo la selección y ubicación de equipos y máquinas térmicas optimiza la eficiencia para la planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco?
- ¿En qué medida el análisis termo económico de las topologías permitirá optimizar la eficiencia para la planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco?

**Figura 1.2**    **Árbol de objetivos**



**Fuente: Elaboración propia.**

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar la optimización topológica del sistema de cogeneración de energía en ciclo combinado y su influencia en la eficiencia para la planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar la selección y ubicación de equipos y máquinas térmicas conectadas al sistema red que optimiza la eficiencia para la planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco.
- Realizar el análisis termo económico de los equipos y máquinas térmicas que permita la apropiada selección para la optimización de la eficiencia para la planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco.

### **1.4 Limitantes de la Investigación**

#### **Teórica**

La presente investigación se limita a aplicar la teoría de optimización topológica de los sistemas de cogeneración de energía de ciclo combinado y la eficiencia en las plantas térmicas.

### **Temporal**

La investigación está centrada a una planta térmica, que abastece energía eléctrica y térmica a una planta industrial de hilado de fibras acrílicas en seco 2016-2017, teniendo un defecto de energía eléctrica.

### **Espacial**

La presente investigación se delimita a los equipos y máquinas de la planta térmica en estudio.

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes**

#### **Investigaciones Internacionales**

**CIFUENTES (2011) “Sistemas de cogeneración para el ahorro de energía en la industria”.** Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

#### **Resumen**

En esta tesis el autor planteó como problema que uno de los factores que afectan a la economía guatemalteca es el precio de la energía eléctrica, el cual ha ido en aumento, ya que las empresas generadoras de la energía eléctrica son dependientes y los precios de los derivados del petróleo también van aumentando en el tiempo; todo ello causa que el costo de kilovatio de energía sea significativo.

El objetivo de la tesis fue aplicar los sistemas de cogeneración en la industria, debido a la excelente alternativa de ahorro de energía mediante su implementación para la producción conjunta de energía eléctrica y térmica. También se menciona que la instalación de los sistemas de cogeneración depende de los factores como: espacio físico, necesidades de utilizar potencia eléctrica y potencia térmica.

## **Conclusión**

El autor obtuvo como conclusión que, al efectuar los balances energéticos del sistema de cogeneración, se llegó a determinar una eficiencia de 74%.

(6)

Asimismo, hace énfasis en que los proyectos de cogeneración deben enfocarse en las empresas donde el consumo de vapor es necesario en sus procesos de producción.

## **Situación de la cogeneración en diferentes países de la Unión Europea.**

Según el instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE). (7)

**Alemania:** En el caso alemán, el 70% de la calefacción se hace mediante el sistema de cogeneración, y en la actualidad se genera alrededor de 400 MWe al año por el sistema mencionado.

**Austria:** La fuerte política medioambiental establecida en Austria puede ser un punto favorable para el desarrollo futuro, ya que en la actualidad tiene 4000 MWe de potencia instalada con la tecnología de sistema de cogeneración principalmente en la industria papelera, asociados a redes de calefacción.

**Bélgica:** La principal barrera que existe en Bélgica para el desarrollo de la cogeneración es el bajo precio de la energía eléctrica y del fuelóleo. Sin embargo, en la industria alimentaria se desarrolla la cogeneración basada

en los ciclos con turbina de vapor, que representan el 10% de la electricidad generada en dicho país.

**Dinamarca:** La cogeneración juega un papel muy importante en este país, ya que el 50% se genera con esta tecnología siendo el combustible más utilizado el carbón, también el gas natural y biomasa.

**Finlandia:** Junto con Holanda y Dinamarca es uno de los tres países donde más éxitos han tenido los sistemas de cogeneración donde el 52% de la producción nacional de electricidad es abastecida por instalaciones de cogeneración, las principales razones para el gran desarrollo de la cogeneración son básicamente la ausencia de las barreras, la elevada demanda de calor y el reconocimiento de la cogeneración como sistema más económico de generación de energía.

**Francia:** Uno de los problemas que tiene Francia, es el exceso de centrales eléctricas principalmente nucleares, con el precio de electricidad relativamente bajo, hasta la actualidad la potencia instalada con sistema de cogeneración basada en ciclos de caldera y turbina de vapor es alrededor de 3000 MW.

**Holanda:** En este país la cogeneración representa el 30% de la electricidad generada, lo cual se ha conseguido por aplicación de políticas promocionales con precios de gas muy favorables.

**Hungría:** La cogeneración en Hungría es principalmente para la calefacción de las ciudades, por otro lado la actual política energética tiene

como objetivo principal la generación de energía empleando combustibles limpios con costos menores que ya generan 2400 mwe.

**Italia:** A diferencia de los países mencionados anteriormente, Italia se caracteriza por su dependencia energética del exterior, solo el 20% se autogenera debido a la legislación y política actual, el comprador único importa, exporta, suministra a los usuarios en régimen de concesión.

**Portugal:** La cogeneración en Portugal se ha basado hasta muy recientemente en el petróleo ya que el gas natural está en su etapa inicial, sin embargo el 20% de su potencia instalada es de cogeneración y en el futuro estará en primer nivel ya que su marco legal para autorizar las nuevas instalaciones es el más permisivo de Europa.

**Reino Unido:** Dentro de la U.E el Reino Unido es el pionero en la experiencia del proceso de privatización, liberalización, y desregulación del sector energético y como practica fue la imposición de la cogeneración que en la actualidad las barreras de la autogeneración han desaparecido y puede calificarse que más del 50% es producción de energía autogenerada.

**Suecia:** Casi toda la electricidad es generada en centrales nucleares e hidráulicas a bajo costo, este hecho hace que la cogeneración solo representa el 6 % de la producción total. El gas natural es poco utilizado en los sistemas de cogeneración ya que no existe una amplia red de gaseoductos en el país.

## Situación Energética en Latinoamérica

Esta región cuenta con muchos recursos naturales energéticos distribuidos entre las naciones, siendo sus niveles de explotación y producción muy variados según el mercado y sus mecanismos de incentivos que existan, el recurso energético más utilizado es el petróleo y sus derivados destacando también el gas natural en Venezuela y Argentina y actualmente en el Perú en poco porcentaje; sin embargo, la energía hidroeléctrica continúa siendo la principal fuente primaria para la generación eléctrica de la región.

### **Cuadro 2.1 Participación de energía primaria en países sudamericanos.**

	Argentina	Brasil	Chile	Colombia	Ecuador	Perú	Venezuela
Petróleo	30%	42%	45%	38%	80%	33%	40%
Gas Nat.	55%	10%	23%	21%	2%	39 %	30%
Biomasa	3%	8%	10%	9%	8%	17%	5%
Hidro.	12%	40%	22%	32%	20%	11%	25%

**Fuente: Elaboración propia.**

## Investigaciones Nacionales

**QUISPE (2010) “Análisis energético de un sistema de cogeneración con ciclo combinado y gasificación para la industria azucarera”, tesis que le permitió optar el Título profesional de ingeniero mecánico en la Universidad Nacional de Piura.**

## **Resumen**

En esta tesis el autor investigó a cerca del problema general alto costo de energía primaria en la industria azucarera así como los elevados niveles de emisiones de  $CO_2$  al medio ambiente.

El objetivo de la investigación es presentar y evaluar alternativas energéticas, que disminuyan los costos de operación de los sistemas, productores de energía reduciendo los niveles de emisiones y promoviendo la utilización de nuevas fuentes de energía. Estas tecnologías deben permitir un uso racional y eficiente de los recursos energéticos y deben ser aplicados al entorno industrial.

## **Conclusión**

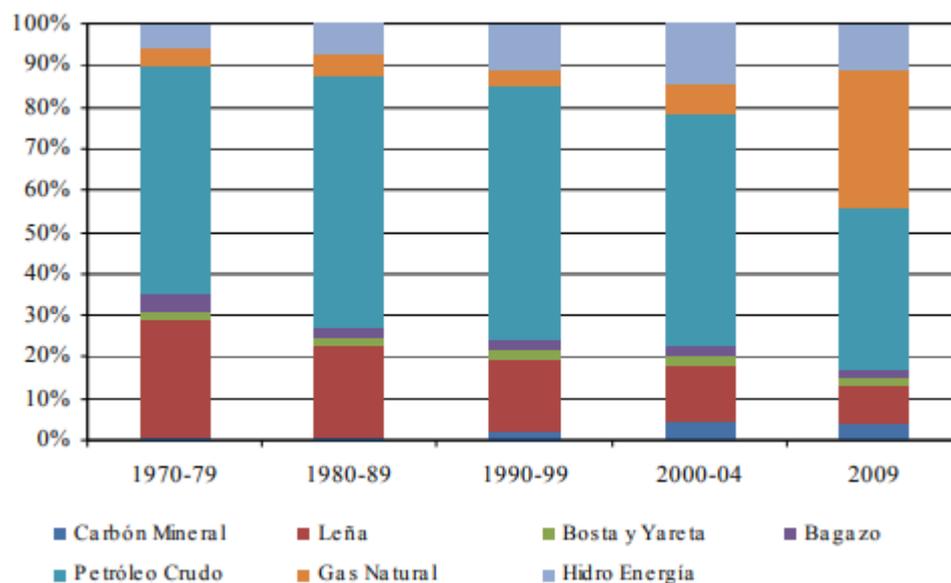
Se concluyó que la utilización del bagazo se convierte en biomasa, es decir, la materia orgánica con energía almacenada se puede constituir en biocombustible. Para ello se seleccionó el sistema de cogeneración, por ser la tecnología adecuada y que permite la gasificación, lo que mejora el proceso energético y aprovecha su buen poder calorífico (5)

## **Situación energética en el Perú**

Según la nueva matriz energética sostenible (NUMES), la estructura del consumo energético se ha volcado históricamente hacia el consumo de gas

natural 39%, los líquidos de gas 33%, la hidroenergía 11%, y el 17% restante es biomasa, carbón y solar.

**Grafica 2.1 Consumo energético en el Perú**



**Fuente: Numes**

En los últimos años el Perú ha cubierto con el gas natural su demanda energética debido al desarrollo, crecimiento de la producción y mejora de servicios debido a que, al ofertar su productividad con valores agregados, permiten posicionarlos y competir con otros países en mercados internacionales. Esto conlleva al mayor uso energético tanto en el sector industrial, residencial y transporte.

La demanda energética ha crecido debido al desarrollo de la minería, también consecuentemente ha crecido la demanda de consumidores que

en la actualidad sobrepasan a 500 000 consumidores residenciales de gas natural a nivel nacional.

El consumo actual del gas natural está estimado en 1900 MMPCD (millones de pies cúbicos al día) y de acuerdo a lo planificado el consumo para el año 2025 será de 2400 MMPCD.

Actualmente existen 5 millones de peruanos que no tienen energía eléctrica para los cuales los solares son una alternativa de solución a sus carencias energéticas, por esta razón el estado peruano adjudicó un proyecto de financiamiento, instalación, operación y mantenimiento de hasta 500 000 paneles solares de 50 MW.

El uso de la biomasa en el Perú no está debidamente actualizado, pero su consumo está orientado básicamente a satisfacer necesidades energéticas especialmente a los pobladores de las zonas rurales, dada la imposibilidad económica para acceder a productos derivados del petróleo. Asimismo, en estos últimos años se inauguró el parque eólico más grande del Perú compuesto por 62 aerogeneradores ubicados en la costa norte del país (la Libertad y Piura) con una capacidad total de 114 MW conectados a la red.

### **Análisis del sector de la cogeneración en el Perú**

Considerando el rápido crecimiento de la demanda eléctrica que ha experimentado el país los últimos años, es posible que se desarrollen

proyectos de cogeneración principalmente con turbinas de gas operando con gas natural, para ello se ha dado la ley de concesiones eléctricas (LCE), norma referente a las actividades relacionadas con la generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica. En la norma indicada figuran los derechos y obligaciones para las entidades que desarrollan actividades de generación, como son: presentar a COES y OSINERGMIN los costos de inversión relacionados con sistemas de cogeneración, así también los costos de operación y mantenimiento utilizando gas natural, facilitar las inspecciones técnicas, cumplir con las normas de conservación del medio ambiente y patrimonio cultural de la Nación, entre otras. El D.L 28.832 del 2006 “para asegurar el desarrollo eficiente de la generación eléctrica”, esta ley define al generador como titular de una concesión o autorización de generación y también incluye la distribución conectadas al SEIN.

**Las principales barreras detectadas son:**

Desconocimiento de la tecnología de cogeneración, proyectistas, instaladores y mantenedores capacitados, siendo el Perú un mercado poco maduro lo que hace que la demanda existente de los diferentes servicios asociados a estas plantas, como son los servicios de ingeniería, instalación y mantenimiento sea de poca confianza, que repercute en la toma de decisiones poco favorable respecto a esta tecnología.

En lo económico, los altos costos iniciales de las instalaciones de cogeneración, así como los elevados periodos de amortización, se presentan como una importante barrera al desarrollo de este mercado, a esto se suma el desconocimiento total o parcial de la tecnología por parte de los usuarios generando una desconfianza y disminución de la demanda del uso de estos sistemas.

### **Beneficios de la cogeneración**

#### **Para el Usuario**

**-Costos de energía reducidos:** resultado de una mayor eficiencia en el uso de combustible y ahorros en el uso de energía.

**-Fiabilidad eléctrica mejorada:** resultado de una menor susceptibilidad a fallas en la red debido a la operación sincrónica.

**-Calidad de energía mejorada:** resultado de reducir las pérdidas de línea y las caídas de voltaje.

**-Seguridad energética mejorada:** resultado de una menor susceptibilidad a los desastres naturales y/o ataques pandilleros.

#### **Para el público en general**

**-Mejora de la calidad ambiental:** resultado de la reducción de los gases de efecto invernadero.

**-Conservación de los recursos energéticos nacionales:** resultado de una mayor eficiencia del combustible utilizado.

### Supuestos Inconvenientes

**Falta de educación y conciencia:** resultado del desconocimiento con las tecnologías, conceptos y beneficios de la cogeneración.

**En la instalación:** resultado del proceso de servicio que a veces puede ser largo, engorroso y costoso y también existe desaliento en la inversión inicial a pesar del ahorro en los costos de energía.

**Cuadro 2.2 Potencial tecnológico y efectivo de la cogeneración en los sectores económicos.**

SECTOR	POTENCIAL TECNOLÓGICO			POTENCIAL EFECTIVO		
	MW	%	INVERSIÓN REQUERIDA Mio US\$	MW	%	INVERSIÓN REQUERIDA Mio US\$
Industrial <sup>1)</sup>	302.8	70.8	318.5	126.4	64.3	138.5
Refinero <sup>2)</sup>	65.4	15.3	96.0	50.9	25.9	60.5
Minero-Metalúrgico <sup>3)</sup>	39.2	9.2	25.6	15.6	7.9	10.2
Servicios <sup>4)</sup>	20.2	4.7	15.0	3.8	1.9	3.4
<b>TOTAL</b>	<b>427.6</b>	<b>100.0</b>	<b>455.1</b>	<b>196.7</b>	<b>100.0</b>	<b>212.6</b>

Fuente: Cenergía

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1 La energía

Es una propiedad que tiene un objeto o sustancia la cual se puede manifestar en las transformaciones que ocurren en la naturaleza, es decir que la energía se manifiesta en los cambios físicos, en los cambios químicos las energías más reconocidas son:

- Energía térmica
- Energía eléctrica
- Energía radiante
- Energía química
- Energía nuclear

### Fuentes de Energía renovables (FER)

Son aquellas que tras ser utilizadas se pueden restaurar de manera artificial o natural, entre ellas tenemos:

**-Energía mareomotriz:** Es aquella producida por el movimiento de las aguas del mar que se generan en la superficie por acción del viento.

**-Energía geotérmica:** Es la energía que se encuentra en las profundidades de la tierra, generalmente como agua caliente o vapor de agua.

**-Energía hidráulica:** Es la producida a partir de la caída del agua, que a gran altura posee energía potencial gravitacional, luego se convierte en

energía cinética y posteriormente en energía eléctrica en la central hidroeléctrica.

**-Energía eólica:** Es la energía cinética producida por el viento, la cual se transforma en electricidad en unos aparatos llamados aerogeneradores.

**-Energía solar:** Es la energía que llega la tierra en forma de energía electromagnética procedentes del sol.

**-Energía de la biomasa:** Es la que se obtiene de los compuestos orgánicos de las vegetaciones mediante procesos naturales, logrando así obtener los biocombustibles, de manera que ayude a satisfacer las necesidades energéticas de manera más limpia que los combustibles fósiles.

#### **- Fuentes de Energía no renovables (NO FER)**

Son aquellas que se encuentran en forma limitada en el planeta y cuyo índice de consumo es mayor que su índice de regeneración, entre ellas tenemos:

##### **-Los combustibles fósiles:**

Son aquellos que han sido formados por grandes cantidades de restos orgánicos provenientes de plantas y de animales que se acumularon en depresiones como fondos marinos o lacustres donde quedaron fuera del alcance de los microorganismos descomponedores aerobios, allí fueron cubiertos por capas de sedimento. La presión y la temperatura crecientes

transforman progresivamente esos restos orgánicos en petróleo carbón, gas natural que pueden permanecer en el mismo lugar o migrar a través de las rocas, incluso escapar a la atmosfera.

**-Sistema energético:** Conjunto de unidades o subsistemas conectados que participan en la conversión y uso de la energía en la que interactúan diferentes flujos de entrada o salida.

### **2.2.2 La energía de un sistema**

La energía de un sistema es la capacidad de él, para realizar un trabajo, la energía se encuentra en diversas formas ligada a la materia de los cuerpos así como la energía térmica, eléctrica, electromagnética, cinética o potencial, energía química, nuclear o puede ser independiente de los cuerpos como las radiaciones térmicas o electromagnéticas, a verdadera naturaleza de la energía no se conoce sino se distingue por sus efectos y se mide por la cantidad de trabajo que puede proporcionar.

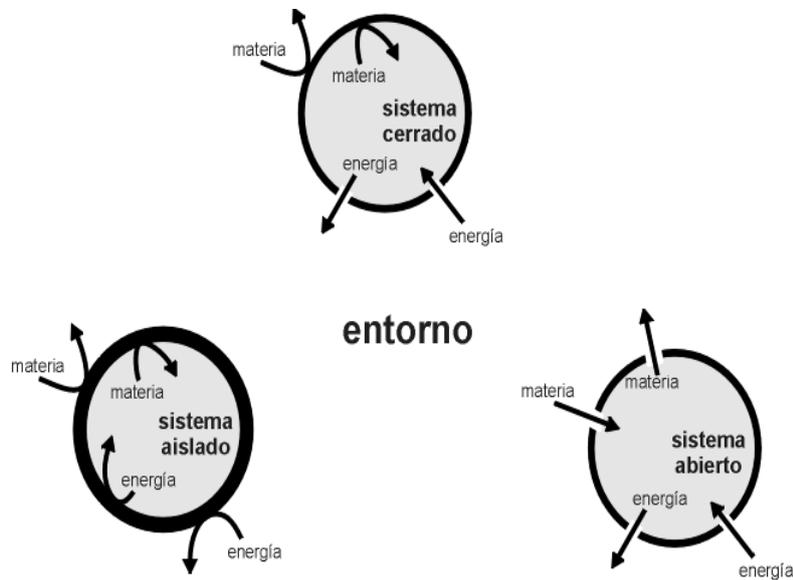
### **2.2.3 Sistema termodinámico**

Es una región del espacio en la cual existen diferentes componentes que interactúan entre sí, intercambiando energía y en algunas ocasiones masa. Un sistema tiene una zona que lo limita llamada frontera que puede ser concreto o abstracto, la zona que rodea al sistema se le llama ambiente o entorno. Si en un sistema no hay intercambio de masa será considerado como masa de control, pero si hay intercambio de masa será considerado como volumen de control.

Los tipos de sistema son:

- Aislado: no intercambia materia ni energía.
- Cerrado: no intercambia materia, pero si energía.
- Abierto: intercambia materia y energía.

**Figura 2.1 Tipos de sistema termodinámico**



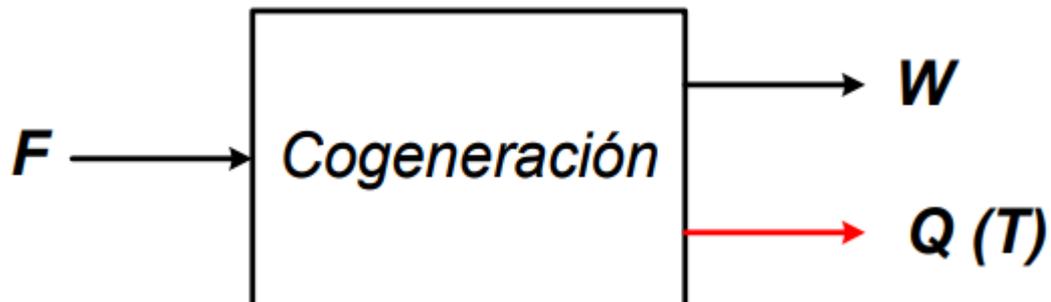
**Fuente: Miguel Ángel Lozano Serrano**

#### **2.2.4 Sistema de cogeneración de energía**

El sistema de cogeneración de energía es una tecnología de producción simultánea de energía eléctrica y energía térmica útil a partir de un mismo combustible para satisfacer la demanda requerida por el usuario, cuando hay satisfacción de las dos energías se la llama sistema de energía total

(11)

**Figura 2.2 Sistema de cogeneración**

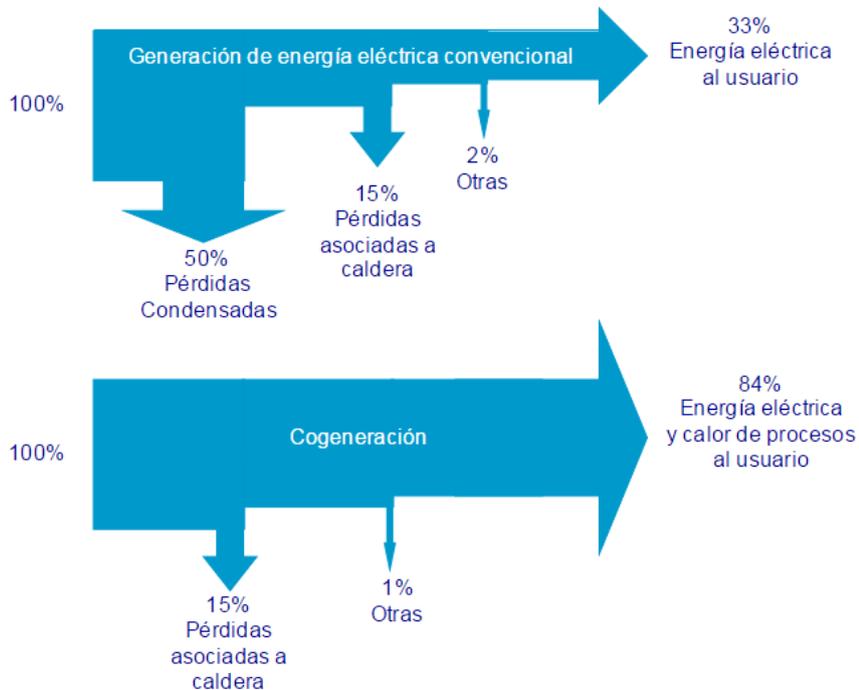


**Fuente: Miguel Ángel Lozano Serrano**

En un sistema convencional de producción de energía eléctrica el rendimiento energético alcanza el 33%, y el 67% de la energía consumida se desperdicia en forma de calor residual, en cambio en la cogeneración el calor residual se utiliza para la industria en los diferentes procesos, de tal forma que la eficiencia energética global aumenta y puede alcanzar hasta 84%.

Los aumentos de eficiencia de las turbinas de gas conseguidas en las últimas décadas y la disponibilidad de gas natural a precios competitivos favorecerían la implantación de los sistemas de cogeneración en la industria ya que generaría relativa facilidad del uso de sus gases limpios de escape para la producción de vapor de agua que se utilizaría para el accionamiento de un ciclo de potencia de vapor, llegando a obtener un resultado favorable frente a otras opciones de abastecimiento energético.

**Figura 2.3 Generación de energía convencional y cogeneración**



**Fuente: Miguel Ángel Lozano Serrano**

**Clasificación de los sistemas de cogeneración:** pueden clasificarse de diferentes criterios:

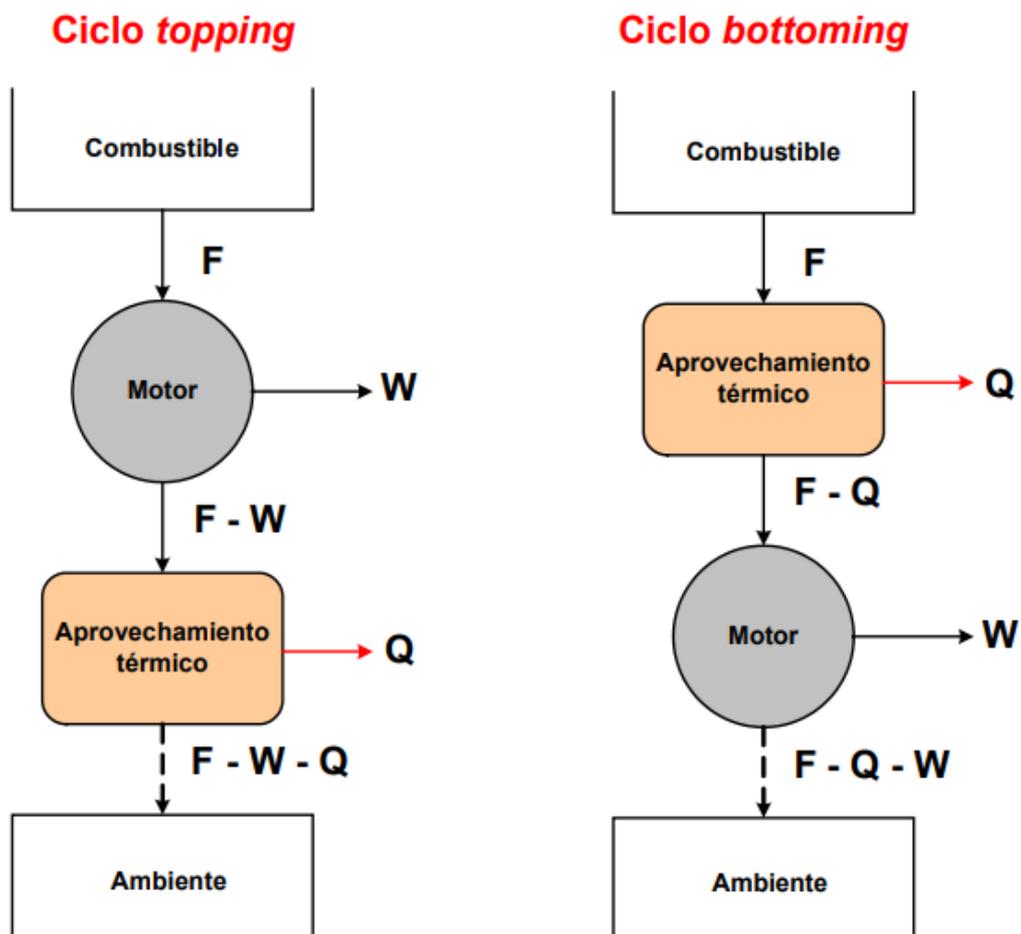
**A) De acuerdo al orden de generación de energía.**

- **Sistema de cogeneración de ciclo de cabecera (topping):** cuando la energía mecánica o eléctrica es generada en el primer escalón del aprovechamiento de la energía liberada por el combustible, siendo aprovechada después en el segundo escalón la energía térmica residual.

- **Sistema de cogeneración de ciclo de cola (bottoming):** Cuando la energía térmica de un proceso se utiliza para producir electricidad están

asociados normalmente a procesos industriales cuyo consumo de energía térmica es a temperaturas altas como son los hornos industriales.

Figura 2.4 Cogeneración ciclo cabecera y ciclo cola



Fuente: Miguel Ángel Lozano Serrano

**B) De acuerdo al tipo de motor térmico presente en el sistema.**

**-Sistema de cogeneración con turbina de vapor:** cuando el salto entálpico producido en el agua pasa por una caldera de vapor se emplea, en primer lugar, para accionar dicha turbina y la posterior condensación del

vapor de agua. Este último escapa de la turbina para proveer las necesidades de calor.

**-Sistema de cogeneración con turbina de gas:** cuando este equipo se utiliza para accionar los alternadores o maquinas consumidoras de trabajo, recuperándose sus gases de escape para un efecto térmico útil.

**-Sistema de cogeneración con motor alternativo de combustión interna:** cuando se aprovechan térmicamente los gases de escape y/o otras fuentes de calor residual del motor.

### **2.2.5 Topología de una planta térmica**

La topología es la configuración o esquematización que se hace con los equipos o máquinas de la ingeniería térmica tales como: calderas, turbinas, intercambiadores de calor, motores, etc, integrados funcionalmente para satisfacer de modo eficiente las demandas de energía eléctrica y energía térmica útil que se solicitan en una planta industrial. (8)

#### **Diferentes topologías de plantas de cogeneración**

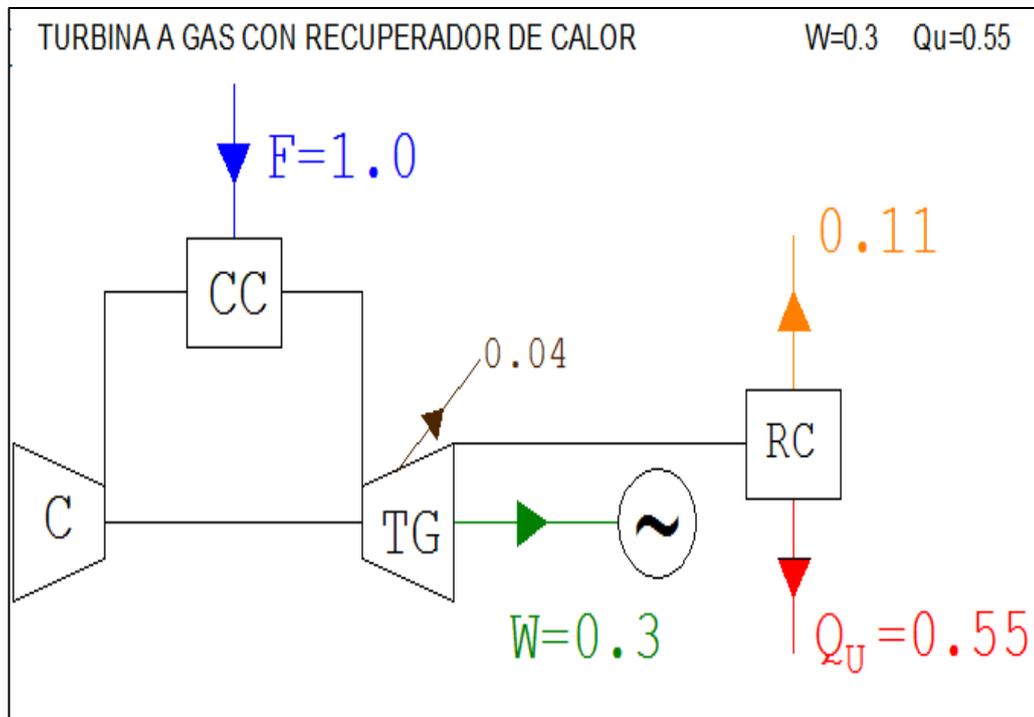
Según Horlock, las plantas de cogeneración más utilizadas en la industria son las que se presentan a continuación.

##### **A) Planta de turbina de vapor con extracción de vapor**

Es una planta con turbina de vapor en la cual se extrae vapor a una presión mayor a la del condensador, este vapor es una forma de calor útil que se puede emplear en los procesos y luego retornar al ciclo. También se utiliza



**Figura 2.6 Planta con Turbina a gas con recuperador de calor**

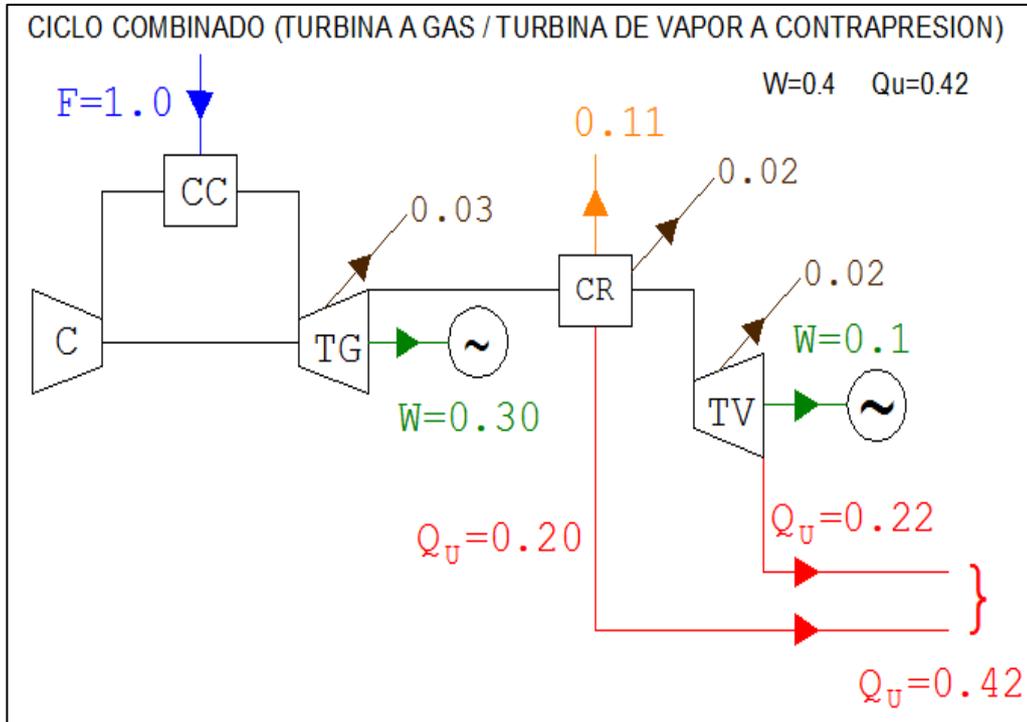


**Fuente: Horlock**

### **C) Planta ciclo combinado a contrapresión**

Se inicia con un ciclo Bretón para la turbina de gas, y los gases de escape de la turbina van a una caldera de recuperación en la cual luego de las pérdidas se produce vapor, que es calor útil. Debido a los requerimientos de energía eléctrica, una parte de este calor útil en forma de vapor se dirige hacia una turbina de vapor, en la cual se produce energía eléctrica y, dado que es una turbina a contrapresión, la expansión de vapor en ella es hasta una presión mayor, por lo que se dispone vapor con determinada calidad, que es una forma de calor útil. (14)

**Figura 2.7 Ciclo combinado (turbina a gas / turbina de vapor a contrapresión)**



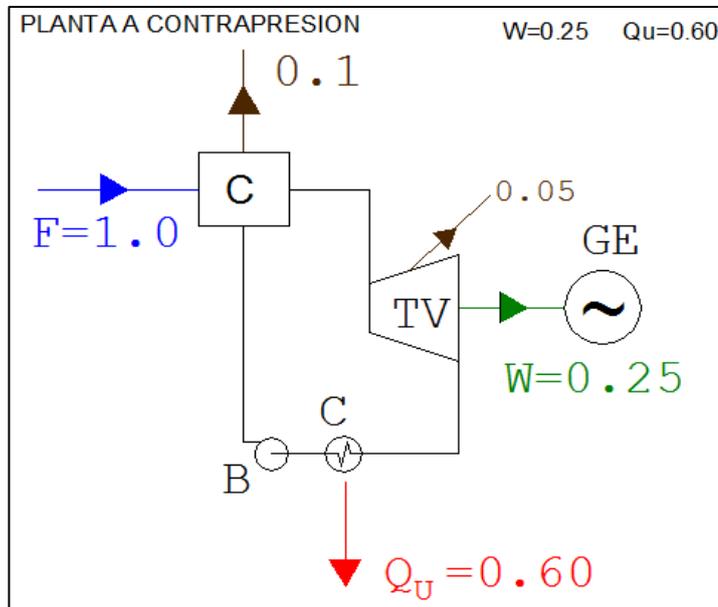
Fuente: Horlock

#### D) Planta de vapor a contrapresión

Es una planta con extracción de vapor, pero en la cual la extracción no es de una parte del flujo del vapor que pasa por la turbina a vapor sino del total del flujo de vapor. Se denomina a contrapresión debido a que se extrae el vapor a una presión superior a la que normalmente se haría en un ciclo Rankine simple, es decir, a una presión mayor; sin embargo, debido a la mayor presión y temperatura, se dispone de un vapor de mejor calidad que puede emplearse en diferentes procesos recibiendo el nombre de calor útil.

(16)

**Figura 2.8 Planta a contrapresión**



**Fuente: Horlock**

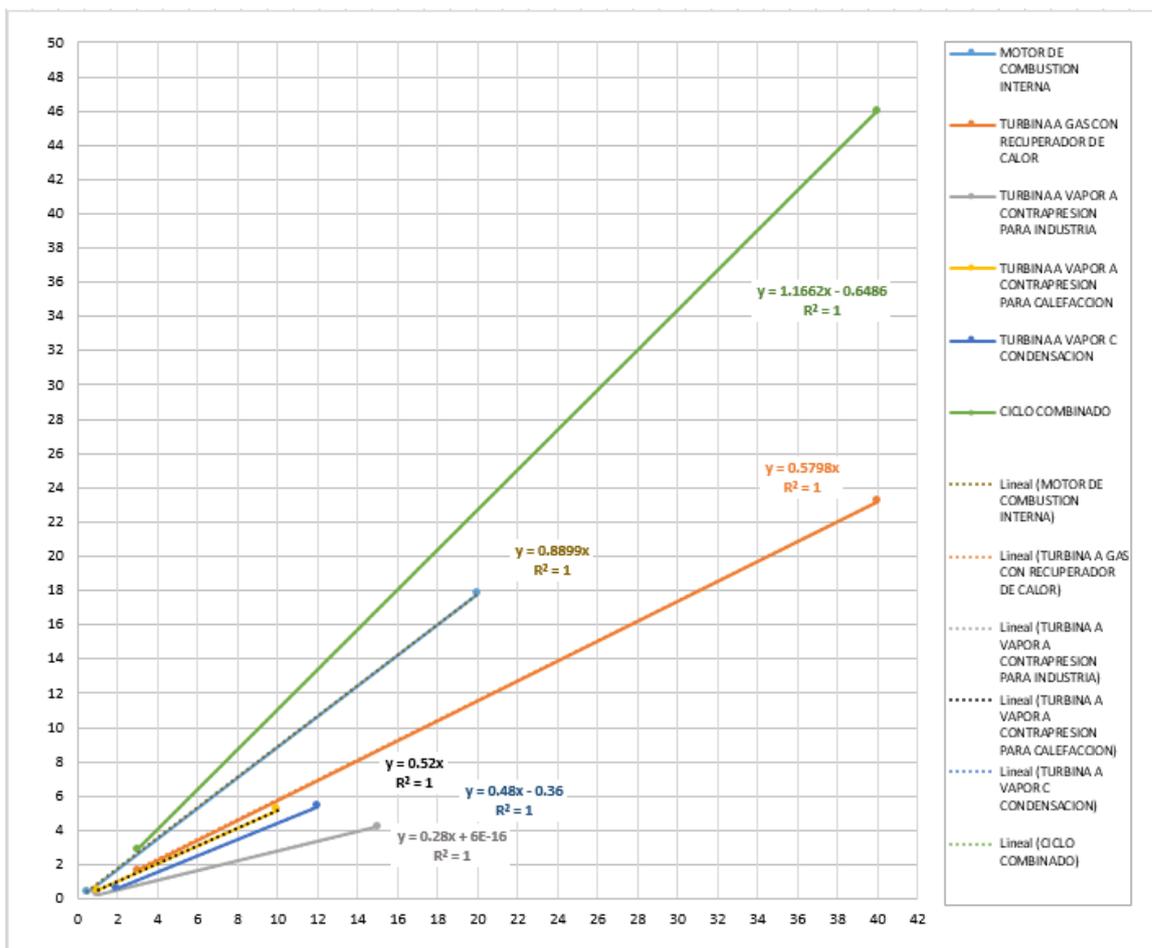
### 2.2.6 Optimización topológica y su influencia con la eficiencia

En esta investigación, la optimización topológica consiste en buscar la mejor configuración deseada, que permita utilizar la menor cantidad de energía primaria y sea esta que permita lograr la mayor eficiencia teniendo en cuenta las necesidades de los usuarios, tecnologías limpias que produzcan menos emisiones contaminantes en el proceso de generación de energía, garantizando las propiedades fundamentales según sea el caso, bajo ciertas restricciones en la operación de la planta como: La temperatura, el flujo de masa, la potencia generada y la presión.

La optimización en plantas térmicas de cogeneración incluye una variedad de actividades entre ellas minimizar los costos de operación, reducir los

costos de energía primaria y la venta de energía eléctrica excedente a la red de interconexión eléctrica, en el caso que lo requiera (9). Según las topologías de cogeneración presentadas por Horlock, podríamos observar que ellas están representadas por una característica muy representativa, su eficiencia teórica proviene de un modelamiento basado en software de energía que mostramos a continuación.

**Grafica 2. 2 Correlación de las diferentes topologías y su eficiencia**



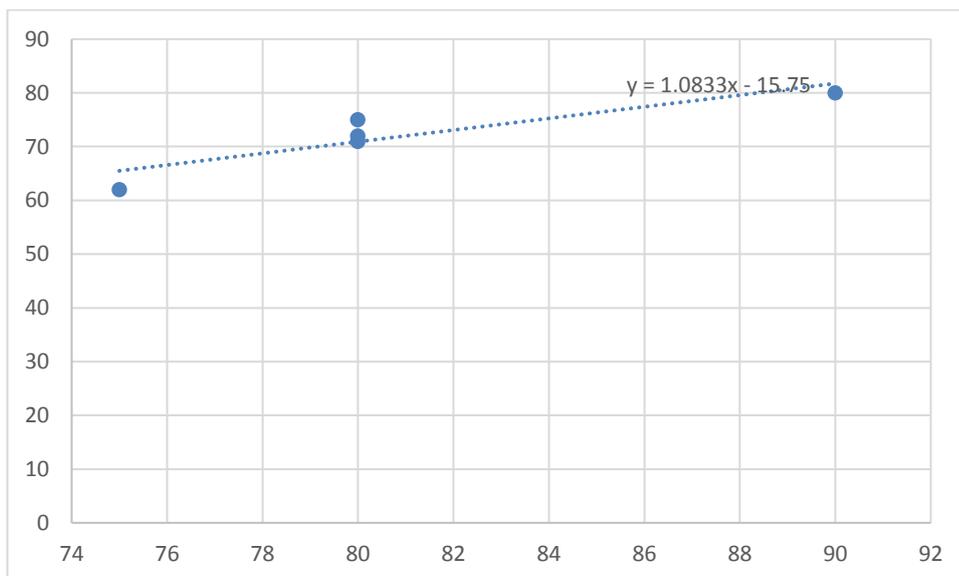
Fuente: Horlock

**Cuadro 2.3 Representación topológica de la cogeneración de energía en ciclo combinado**

<b>Planta de cogeneración</b>	<b>Representación topológica</b>
Turbina a gas con HRSG	90
Turbina a vapor a contrapresión	85
Ciclo Combinado TG y TV	80
Ciclo con Motor Diésel	75
Ciclo con Motor a gas	80

**Fuente: Elaboración propia con datos de Horlock**

**Gráfica 2.3 Topología de los sistemas de cogeneración de energía en ciclo combinado y la eficiencia de una planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco.**



**Fuente: Elaboración propia**

## **Metodología para la optimización topológica**

Los sistemas de cogeneración tienen una vasta cantidad de topologías (configuraciones) aplicadas a la industria, pero el uso de la cogeneración es como un terno a medida que satisface la demanda eléctrica y térmica en cada industria en particular; por ello, la importancia de conocer la demanda eléctrica y térmica de la empresa que será usada en el proceso productivo de la planta industrial. La demanda térmica es relevante, dado que el exceso provocaría muchas dificultades en su venta.

Por falta de una herramienta de simulación computacional en nuestro medio, he optado por aplicar la metodología **AGE** en búsqueda del objetivo. Esta metodología consiste en aplicar 3 etapas que explicamos a continuación:

**Analizar:** Permite conocer el problema y aplicar todas las restricciones a fin de reducir el problema.

**Generar:** En esta etapa se conoce la posible solución del problema mediante los resultados.

**Evaluar:** En esta etapa se evalúa los resultados a fin de observar si se logró el objetivo, si los resultados fueron inadecuados para el objetivo, genera un nuevo problema y se resolverá con la aplicación de AGE hasta lograr el resultado correcto para el objetivo.

### **2.2.7 Plantas o centrales térmicas**

Una central o planta térmica es una instalación que produce energía eléctrica a partir de la combustión de combustible como fuel-oil, carbón o gas natural, que utilizando una caldera, una turbina produce electricidad y vapor a partir del agua utilizado, el esquema básico de funcionamiento de todas las centrales térmicas convencionales es prácticamente el mismo, independientemente del tipo de combustible.

Las únicas diferencias sustanciales consisten en el distinto tratamiento previo que sufre el combustible antes de ser inyectado a la caldera y el diseño de los quemadores de la misma, que varía según el tipo de combustible empleado.

#### **Tipos de centrales térmicas**

**-Centrales térmicas de carbón:** El combustible para utilizar agua es carbón.

**-Centrales térmicas de Fuel:** Se quema fuel para conseguir el calor.

**-Centrales de biomasa:** Se quema biomasa (sobre todo residuos vegetales) para generar calor.

**-Centrales nucleares:** El calor para calentar el agua se consigue por la reacción de fisión de átomos de uranio.

**-Centrales solares térmicas:** El calor de los rayos solares se recoge en paneles solares para luego calentar el agua.

**-Centrales Fotovoltaicas:** Los rayos solares inciden sobre paneles de silicio que convierten este calor directamente en electricidad.

**-Central térmica de ciclo combinado:** Utiliza como combustible gas natural, gasóleo o carbón para alimentar una turbina de gas, luego los gases de escape de la turbina que tienen elevada temperatura se utilizan para producir vapor de agua que se utiliza para mover a una segunda turbina que genera también electricidad.

### **Ciclos termodinámicos**

#### **Ciclo Joule Brayton**

Está compuesto por 4 procesos que conforman el ciclo **Joule-Brayton**. (20)

1-2 Compresión isoentrópica del fluido en el compresor.

2-3 Elevación de temperatura a presión constante (el fluido cede calor)

3-4 Expansión isoentrópica del fluido en la turbina a gas.

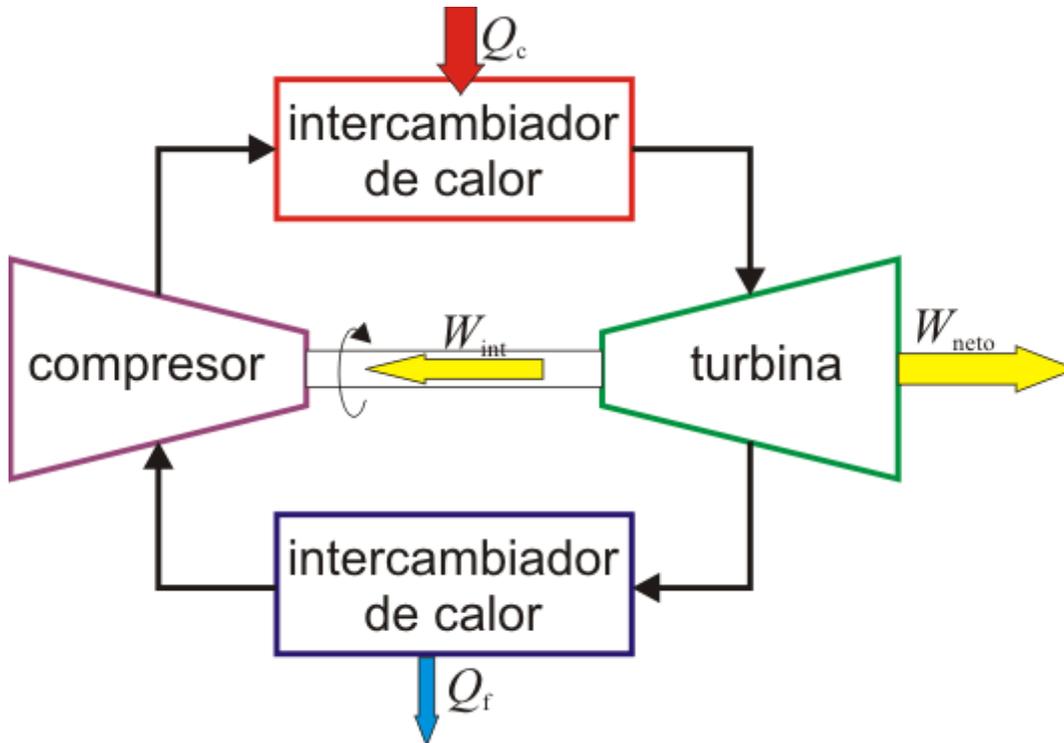
4-1 Cesión de calor a presión constante hasta la temperatura ambiente

#### **Turbina de gas**

Una turbina de gas es una turbomáquina capaz de generar potencia mecánica a partir de la combustión de una mezcla de combustible aire y aire en determinadas condiciones de presión, en la actualidad tienen muchas aplicaciones entre ellos están la propulsión y la generación de energía eléctrica.

## Turbina con eje simple

Figura 2.9 Ciclo Brayton cerrado



Fuente: Yunes A. Cengel

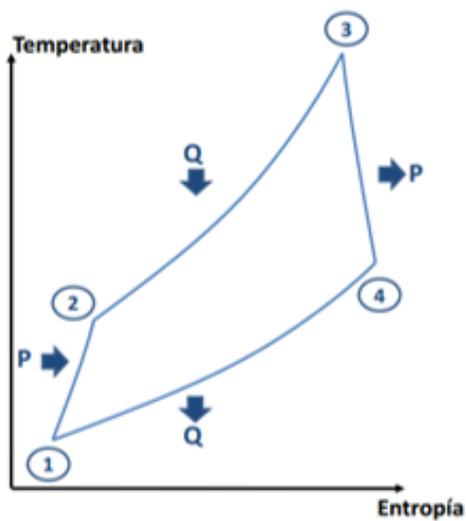
Como se puede observar la turbina de gas en su conjunto consta de un compresor, una cámara de combustión y una turbina. Compresor axial o centrífugo con varios escalonamientos en la función de la relación de compresión y turbina de tipo axial y suele tener un número de escalonamiento inferior al del compresor, van acoplados al mismo eje.

### Descripción del proceso en la turbina de Gas

El proceso que lleva a cabo la turbina de gas para producir potencia mecánica es el siguiente:

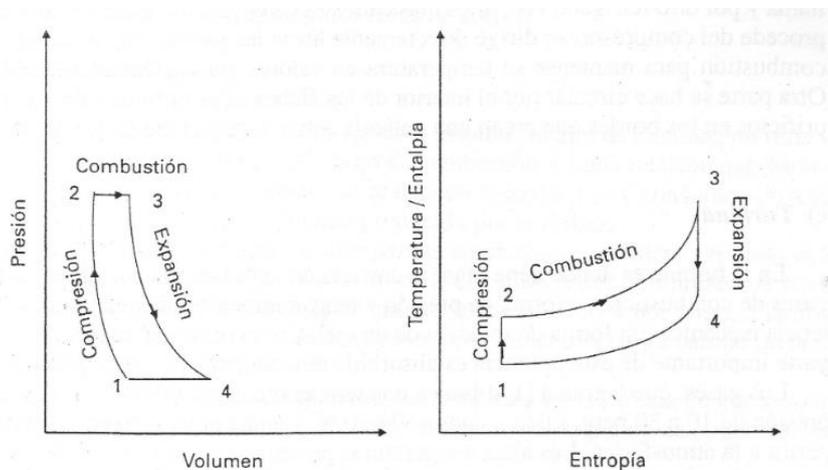
- En el compresor se comprime un cierto gasto másico de aire desde las condiciones ambientales hasta una relación de compresión adecuada, siendo los valores típicos de la relación de compresión en el orden de 10 a 18, el aire es conducido hasta la cámara de combustión donde es mezclado con el combustible y se produce combustión isobárica.

**Gráfica 2. 4 Diagrama Temperatura –Entropía ciclo Brayton.**



**Fuente: Yunes A. Cengel**

**Gráfica 2.5 Diagramas P-V y T-S para ciclo Brayton cerrado**



**Fuente: Yunes A. Cengel**

## **Ciclo Rankine**

El ciclo de vapor consta fundamentalmente los siguientes elementos como: Turbina de vapor, caldera, condensador y bomba de alimentación y está compuesto de cuatro procesos:

1-2 compresión isoentrópica en una bomba

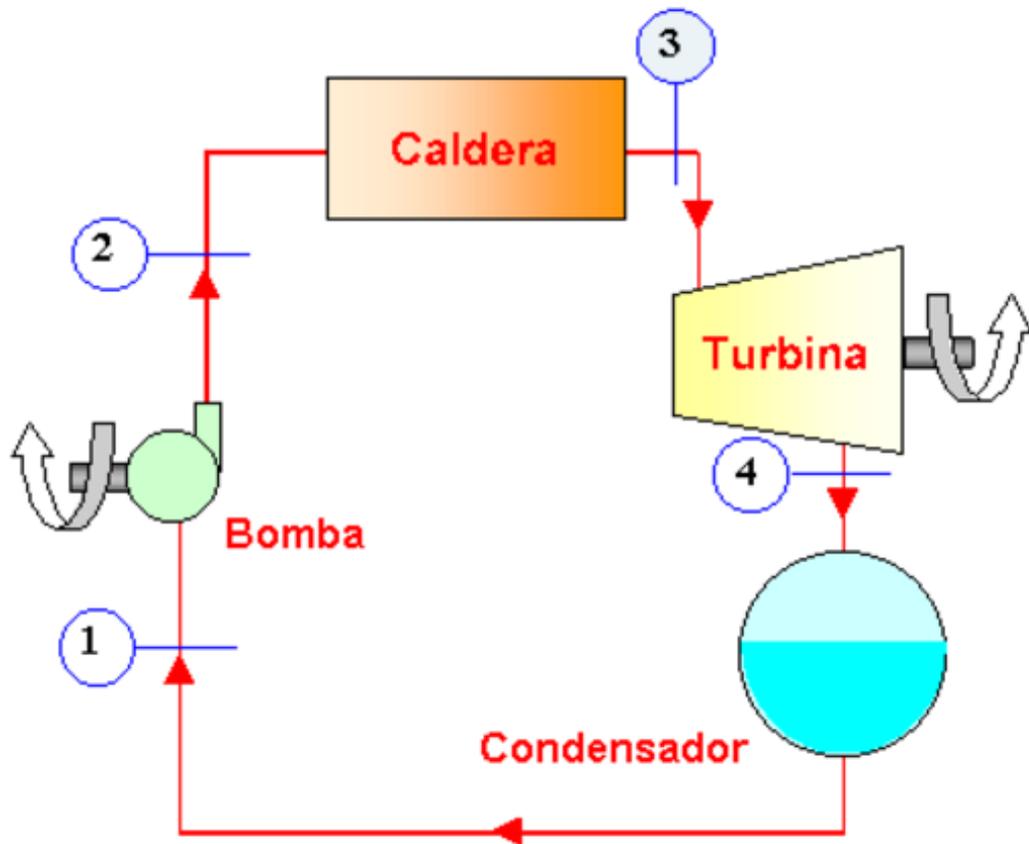
2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera

3-4 Expansión isoentrópica en una turbina

4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador (22).

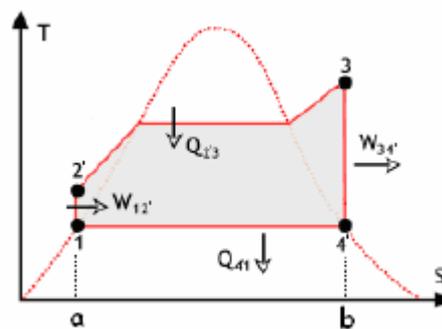
La turbina de vapor es el elemento más importante del ciclo de vapor, ya que es el foco de producción de potencia, está compuesto de una serie de escalonamientos en los cuales se expande el vapor sobrecalentado produciendo una energía mecánica y posteriormente genera energía eléctrica mediante un generador eléctrico.

Figura 2.10 Ciclo Rankine



Fuente: Yunes A. Cengel

Gráfica 2.6 Diagrama T-S ciclo Rankine ideal



Fuente: Yunes A. Cengel

## **Descripción del ciclo Rankine**

El agua entra a la bomba en el estado 1 como líquido saturado y se le aplica una compresión isoentrópica hasta la presión de operación de la caldera. La temperatura del agua aumenta un poco durante este proceso de compresión isoentrópica debido a una ligera disminución en el volumen específico del agua, la distancia vertical entre los estados 1-2 en el diagrama T-s se exagera de manera considerable para mayor claridad.

El agua entra a la caldera como un líquido comprimido en el estado 2 y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3. El vapor sobrecalentado en el estado 3 entra a la turbina donde se expande isoentropicamente y produce trabajo al hacer girar el eje conectado a un generador eléctrico. La presión y la temperatura del vapor disminuyen durante este proceso hasta los valores en el estado 4, donde el vapor entra al condensador. En este estado, el vapor suele ser una mezcla saturada líquido-vapor con una calidad alta. El vapor se condensa a presión constante en el condensador, que es un intercambiador de calor, que rechaza calor hacia un medio de enfriamiento como un río, lago o la atmósfera.

El vapor abandona el condensador como líquido saturado y entra a la bomba, completando el ciclo. En áreas donde el agua es muy valiosa las plantas de potencia son enfriadas por aire en lugar de agua, este método de enfriamiento que también se emplea en motores de automóviles recibe

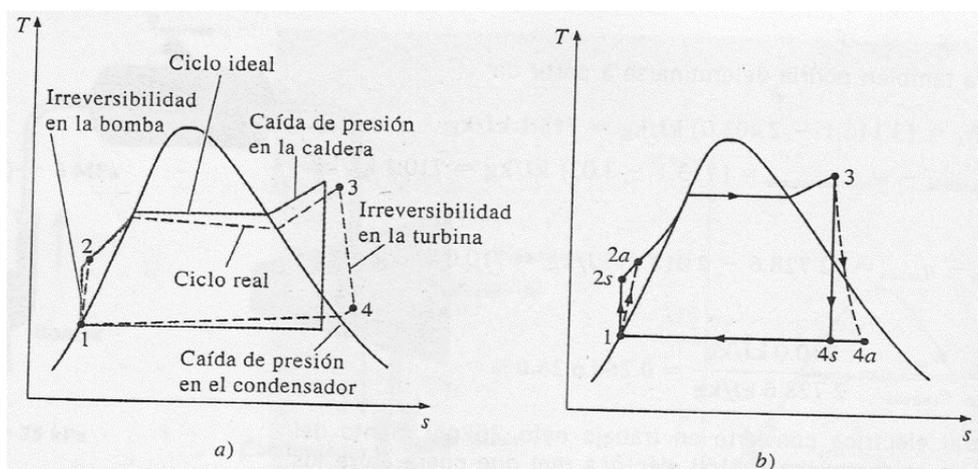
el nombre de enfriamiento seco, es utilizado en varias plantas de potencia en el mundo. (22)

### Desviación del Ciclo Rankine ideal

El ciclo real de potencia de vapor difiere del ciclo *Rankine* ideal, como se ilustra en la figura, debido a las irreversibilidades en diversos componentes. La fricción del fluido y las pérdidas de calor indeseables hacia los alrededores son las dos fuentes más comunes de irreversibilidades.

- a) Desviación del ciclo real de potencia de vapor del ciclo *Rankine* ideal.
- b) El efecto de las irreversibilidades de la bomba y la turbina en el ciclo Rankine ideal. (24)

### Grafica 2.7 Desviación del ciclo real respecto al ciclo Rankine ideal



Fuente: Yunes A. Cengel

## **2.3 Bases conceptuales**

### **2.3.1 Planta térmica**

Las plantas térmicas aprovechan la energía calorífica de un combustible para transformarla en electricidad, esta transformación tiene varios procesos como:

- La energía contenida en el combustible se transforma en energía calorífica mediante la combustión.
- La energía calorífica que absorbe el fluido de trabajo se convierte en energía mecánica al expansionarse en la turbina o motor.
- La energía mecánica es transformada en energía eléctrica a través del generador eléctrico.

### **2.3.2 Ciclo combinado**

El ciclo combinado es el acoplamiento de dos ciclos termodinámicos individuales, uno que opera a alta temperatura (ciclo Brayton) y otro con menores temperaturas de trabajo (ciclo Rankine). El calor residual del proceso de generación de trabajo neto en el ciclo de gas de alta temperatura se aprovecha en su mayor parte en un intercambiador de calor para producir trabajo en un ciclo termodinámico de vapor de agua de baja temperatura. La justificación de los ciclos combinados reside que tal tecnología nos proporciona una eficiencia global mayor que las eficiencias del ciclo de gas y el ciclo de vapor por separado. (17)

### **2.3.3 Descripción de la planta de cogeneración con ciclo combinado**

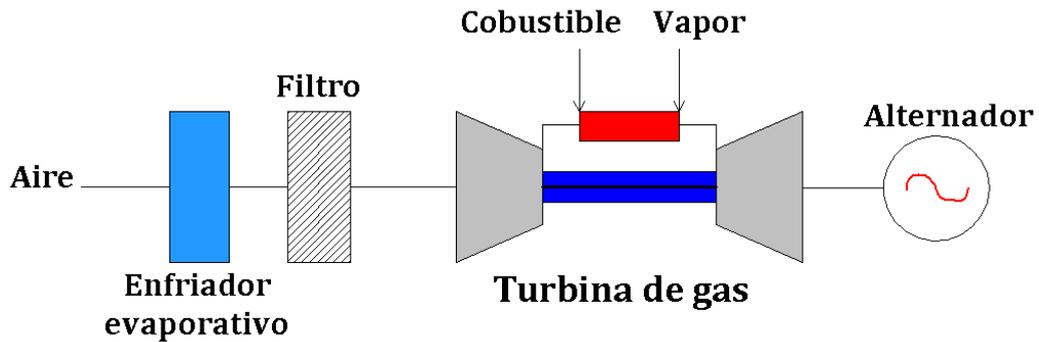
La planta de cogeneración está conformada principalmente por un compresor, una cámara de combustión donde el combustible utilizado generalmente es gas natural, una turbina de gas, una caldera de recuperación HRSG, una turbina de vapor de alta y una de baja presión, un intercambiador de calor donde el conjunto suministra energía eléctrica y vapor para procesos industriales.

#### **Composición de una planta de cogeneración con ciclo combinado**

**A) Turbina a gas:** Es una máquina térmica compuesta por un conjunto de equipos turbina-compresor axiales dispuestas de tal forma que su funcionamiento convierte la energía calorífica de un combustible en energía mecánica (trabajo mecánico) en el eje de la misma, para mover un generador convirtiendo esta, en energía eléctrica, en cada etapa de la turbina está formado por los elementos:

- **El distribuidor:** disminuye la presión de los gases calientes y aumenta su velocidad.
- **El rotor:** transforma la velocidad en energía mecánica. (18)

**Figura 2.11 Elementos de la turbina de gas**



**Fuente: Yunes A. Cengel**

**Los equipos que le acompañan a una turbina de gas son:**

### **Compresor de flujo axial**

Cada etapa del compresor está constituido por:

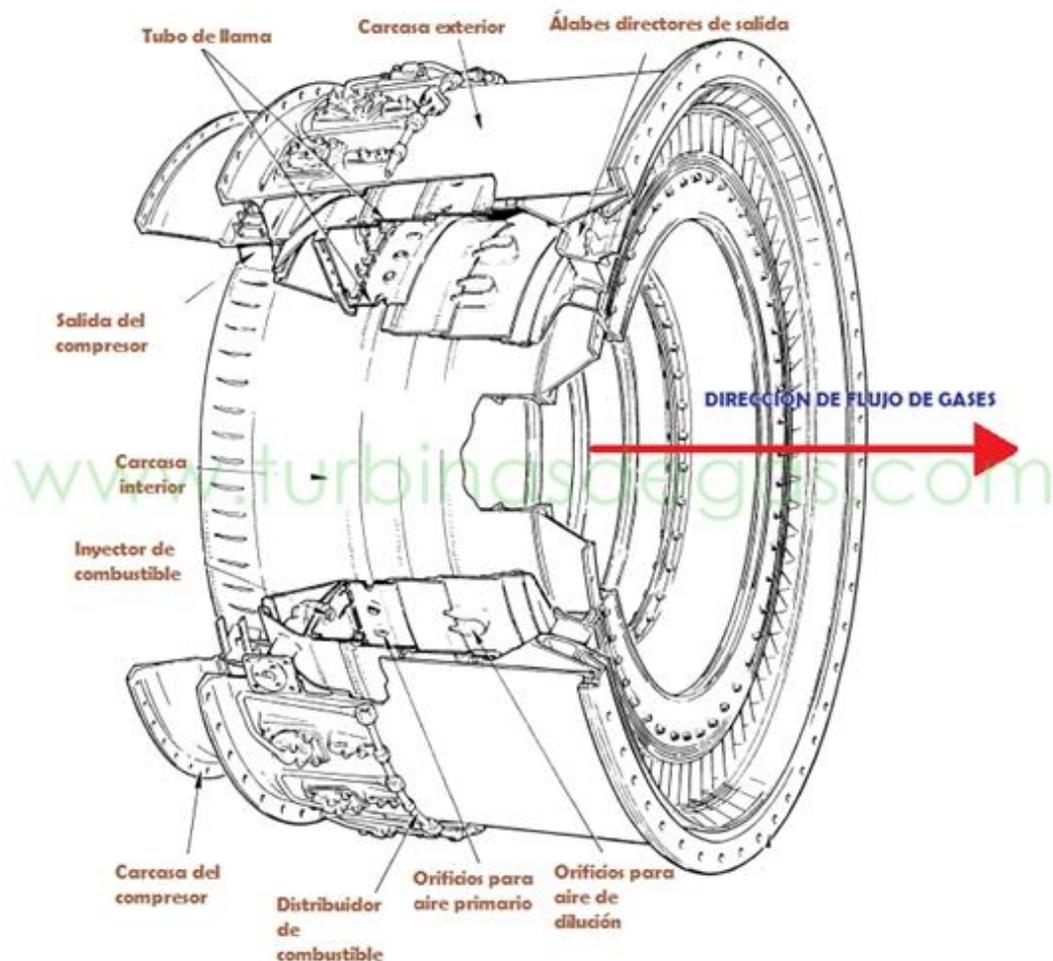
- **El rotor:** que acelera el aire entrante.
- **El difusor:** que transforma la energía cinética adquirida en energía de presión. (19)

**Cámara de combustión:** La cámara adoptada por Siemens tiene la forma anular, consta de un solo tubo de llama, y una serie de inyectores o quemadores cuyo número oscila entre 12 a 25 repartidos en la circunferencia que describe la cámara.

Las cámaras están diseñadas de tal forma que el flujo de aire se divide en tres etapas: primario, secundario y terciario. En la etapa primaria ingresa entre el 15% a 20% en esta se inicia y se establece la combustión, en la

etapa secundaria ingresa entre el 30% a 35% y en ello se completa la combustión; finalmente, en la etapa terciaria ingresa de 45% a 55% lográndose reducir la temperatura a la entrada de la turbina implicada. En cada etapa funcionan dosados distintos. (19)

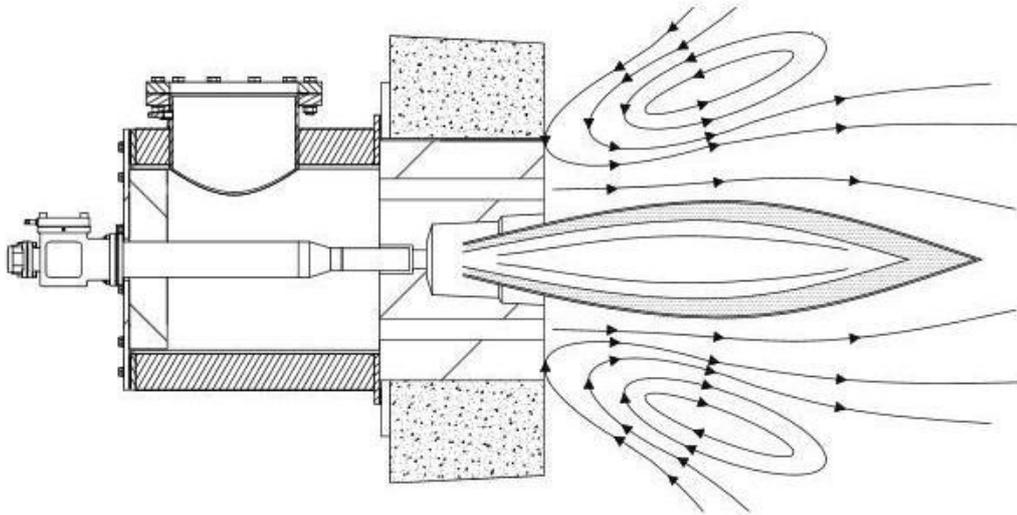
**Figura 2. 12 Cámara de combustión**



**Fuente: Siemens**

El quemador es uno de los dispositivos más importantes de un sistema de combustión y debe satisfacer las condiciones necesarias para lograr una buena combustión.

**Figura 2.13 Quemador con bajo nivel de  $NO_x$**



**Fuente: Yunes A. Cengel**

### **Sistemas auxiliares para su operación**

- Sistemas de lubricación
- Sistema de alimentación de combustible
- Sistema de regulación de velocidad
- Sistema de puesta en marcha y parada
- Sistemas de protección de máquina
- Sistema de acoplamiento hidráulico
- Sistema de virado (virador) (19)

### **Motor de lanzamiento diésel o eléctrico**

Esta máquina acciona la carga que se encuentra montada en el eje de la misma, pudiendo ser un generador eléctrico, una bomba de gran potencia, un compresor, etc.

### **Reductor**

En turbinas menores de 50 MW, la velocidad de rotación del eje suele ser superior a la necesaria para el accionamiento de un alternador (3.000 o 3.600 rpm) o un compresor y por ello suele necesitarse este elemento reductor del número de revoluciones, que adapta la velocidad de la turbina a la necesaria en el elemento accionado.

### **Generador**

Es el elemento consumidor de la fuerza motriz aportada por la turbina y es el que genera la energía eléctrica. (20)

### **Caldera de recuperador de calor HRSG**

Es un equipo de intercambiador de calor, nexo de unión entre dos ciclos integrantes del ciclo combinado y fundamental para su funcionamiento.

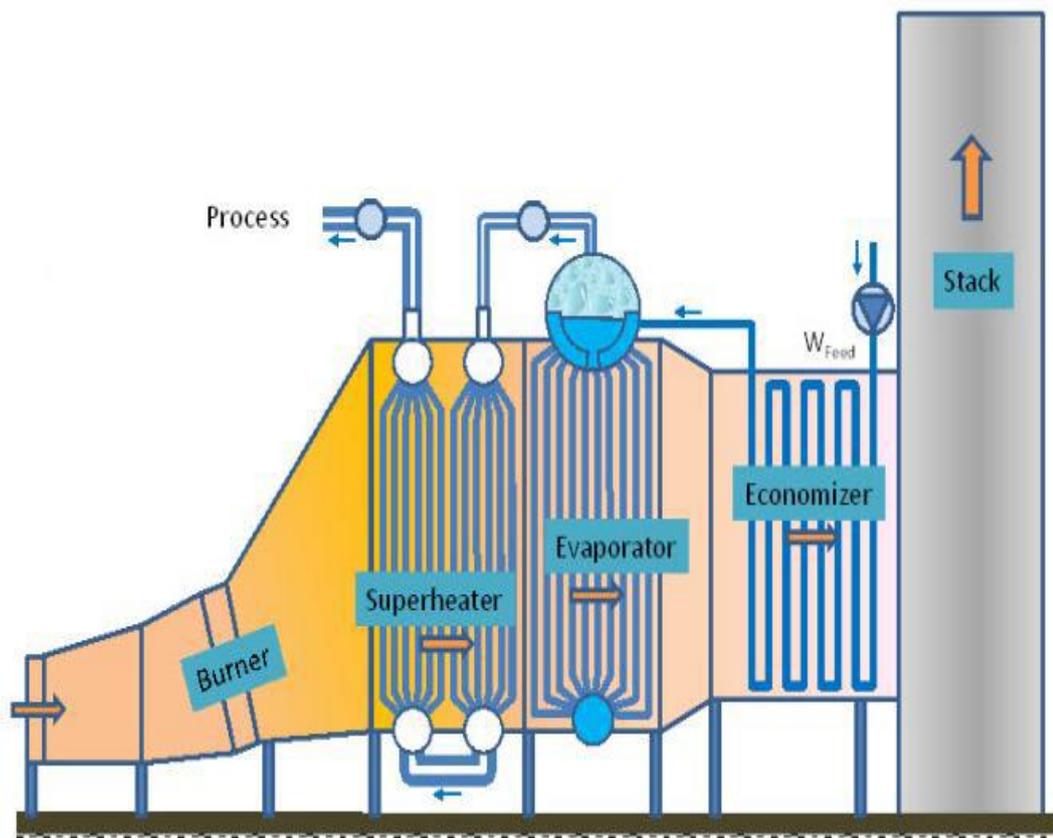
El objetivo de este elemento es recuperar la máxima cantidad de calor de los humos procedentes de la turbina de gas y obtener vapor de agua en condiciones adecuadas para ingresar a la turbina de vapor.

La caldera de recuperación de calor para ciclos combinados es en general de tipo convectivo, es decir, el intercambio de calor se produce fundamentalmente a través del mecanismo de convección que reciben los humos a unas temperaturas del orden de 600°C, también tiene un diseño distinto a una caldera convencional.

Es necesario poner en manifiesto la importancia que tiene el tratamiento del agua para la vida útil, el rendimiento y la seguridad en la operación de calderas industriales. (21)

La caldera de recuperación de calor para ciclo combinado consta de tres elementos necesarios como son: economizador, evaporador, y sobre calentador.

**Figura 2.14 Caldera de recuperación de calor**

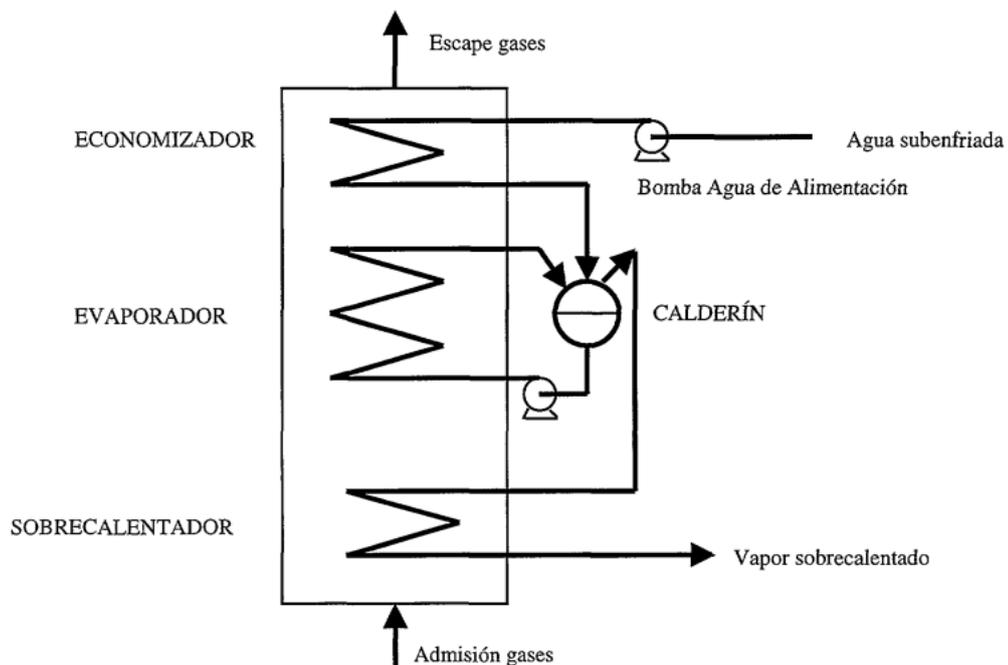


Fuente: Yunes A. Cengel

**Calderas acuotubulares:** En este tipo de caldera por dentro de los tubos circula el agua o vapor de agua y por fuera el flujo cruzado de calor de los humos, la transferencia de calor es básicamente por radiación.

**Calderas pirotubulares:** En este tipo de caldera el humo caliente procedente del hogar circula por el interior de los tubos hasta salir por la chimenea, el calor liberado en el proceso de combustión es transferida a través de las paredes de los tubos al agua que los rodea, quedando todo el conjunto encerrado dentro de una carcasa convenientemente calorifugada. La caldera de recuperación de calor para el ciclo combinado tiene los elementos como muestra la figura.

**Figura 2.15 Elementos en el interior de la caldera**



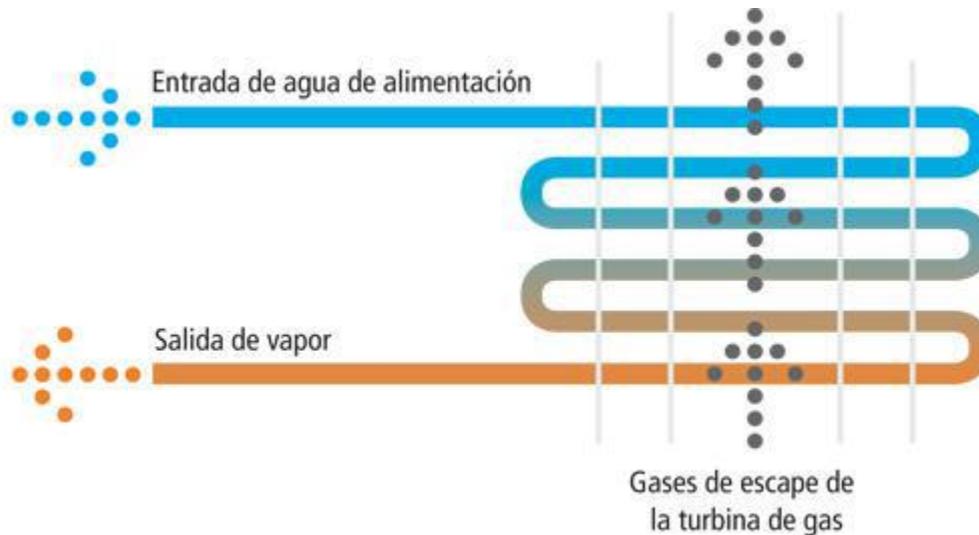
**Fuente: Yunes A. Cengel**

Como se puede observar en el esquema del HRSG, es un cambiador de flujos en contracorriente, el agua subenfriada entra por la zona de escape de humos de caldera, de modo que estos puedan enfriarse lo máximo posible.

**Economizadores:** Intercambiadores encargados de precalentar el agua de alimentación con el calor residual de los gases de escape, aprovechando su energía y evitando saltos bruscos de temperatura en la entrada de agua. En él se extrae el calor residual de los humos, se denomina economizador porque trata de economizar al máximo la corriente de los gases y eleva la temperatura del agua hasta la temperatura de saturación correspondiente a la presión de trabajo. A la diferencia de temperaturas entre la temperatura de saturación y la temperatura con la que el agua sale del economizador, se le denomina "Approach-point".

**Evaporadores:** Son intercambiadores que aprovechan el calor de los gases de escape de temperatura intermedia para evaporar el agua a la presión del circuito correspondientes, la circulación del agua a través de ellos puede ser forzada o natural.

**Figura 2.16 Sistema de evaporación**

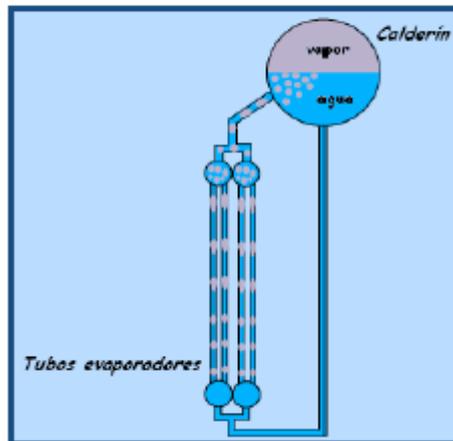


**Fuente: Yunes A. Cengel**

**Sobre calentador:** Son intercambiadores que se encuentran en la parte más cercana a la entrada de los gases procedentes de la combustión, el vapor que sale ya está listo para ser enviado a la turbina de vapor.

**Calderín:** Es un depósito de forma cilíndrica en el que permanecen en equilibrio los estados vapor y líquido, luego que el agua llega proveniente de los economizadores a una temperatura próxima a la de saturación, cuenta con dos salidas, una al tubo de alimentación de agua de los evaporadores y otra para el vapor saturado que se dirige hacia los sobre calentadores para ser sobrecalentado. Los evaporadores regulan la fracción de vapor existente en el interior del calderín.

**Figura 2.17 Calderín – tubos evaporadores**



**Fuente:** Yunes A. Cengel

**Desgasificador:** Es el encargado de eliminar los gases disueltos en el agua de alimentación, oxígeno principalmente y otros gases que podrían provocar corrosiones.

**Tanque de agua de alimentación:** Es un depósito donde se acumula el agua que alimenta al sistema, esta agua debe ser pura para evitar corrosiones y en un futuro podrían obstruir los conductos.

**Bombas de alimentación:** Son las encargadas de enviar el agua desde el tanque de alimentación a su calderín correspondiente.

**Parámetros característicos de la caldera de recuperación de calor.**

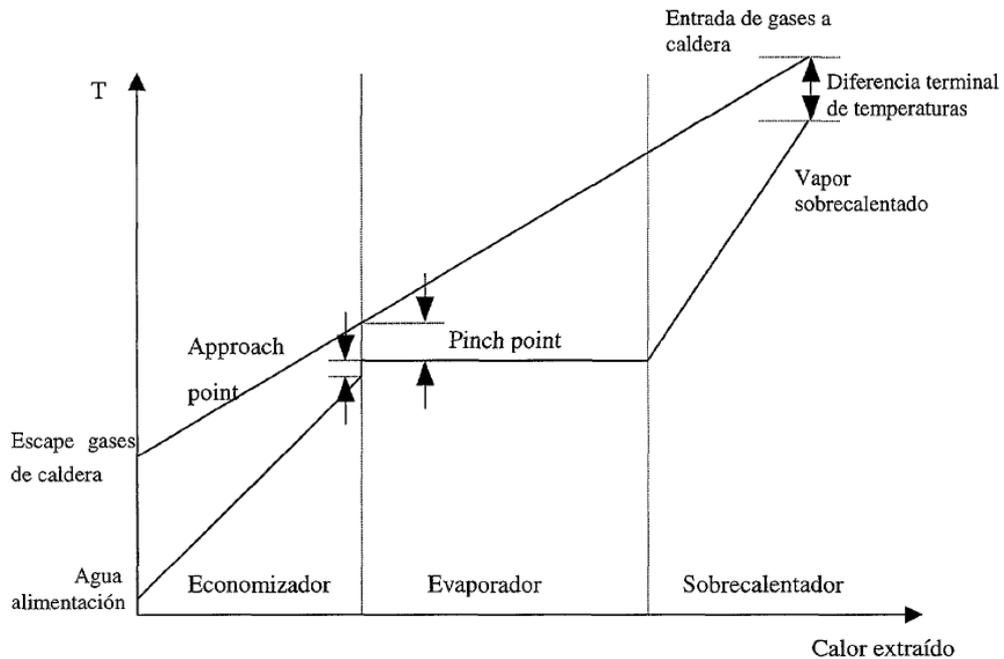
Los parámetros más importantes de la caldera de recuperación además de las presiones y las temperaturas de vapor, son el pinch point y el approach point, ya que la suma de estos determina la producción de vapor en la

caldera de recuperación de vapor una vez fijadas la presiones y las temperaturas de vapor y, por lo tanto, la superficie de la caldera necesaria. Pese a esto, cabe destacar que para una configuración con igual suma de ambos parámetros, no necesariamente corresponde una igual superficie de caldera, debido a que cada uno de estos parámetros fija la superficie necesaria para bancos distintos de la caldera de recuperación de calor, de la siguiente manera:

**Approach point:** Esta diferencia de temperatura no debe ser muy elevada debido al gran choque térmico que recibiría el calderín. Se le considera como un margen de seguridad de diseño para evitar que en el economizador se produzca evaporación, sus valores óptimos se encuentran comprendidos entre 5°C a 10°C. Cuanto menor es el valor, mayor es la cantidad de vapor generado, mayor es la superficie total del intercambio de calor requerida tanto en el evaporador como en el sobre calentador y por lo tanto el costo es mayor.

**Pinch Point:** Se define como la diferencia de temperaturas más baja que existe entre los gases de escape y el agua en la zona del evaporador, este parámetro es de mucha importancia en el diseño de calderas, al disminuir esta diferencia se aumenta en gran medida el área de intercambio de la caldera con la consecuencia de aumentar su costo de fabricación.

**Grafica 2. 8 Temperaturas en la configuración de un HRSG**



**Fuente: Yunes A. Cengel**

La zona plana en el diagrama de temperaturas es debido al cambio de fase del agua y es función de la presión, cuanto mayor sea la presión mayor será la temperatura de saturación y; por otro lado, al aumentar la presión, también disminuye el calor latente de evaporación. Así, la zona plana se estrecha llegando a ser nula, en el caso de la presión crítica. Se han señalado sobre el diagrama tres temperaturas importantes dentro de la caldera.

**Diferencia final de temperaturas:** Se considera como la diferencia de la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas y la temperatura de vapor sobrecalentado.

#### **2.3.4 Eficiencia energética**

La eficiencia energética se realiza con el uso eficiente de la energía, la reducción del uso de la energía primaria reduce los costos y puede generar ahorro financiero para los consumidores. Para ello, se debe implementar una adecuada tecnología, que también considere una solución al problema de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

#### **Eficiencia de la planta de cogeneración con ciclo combinado**

Uno de los parámetros fundamentales en una planta de cogeneración con ciclo combinado es la eficiencia, que manifiesta la parte de combustible que se ha transformado en forma efectiva en energía eléctrica, cuyos valores alcanzan más de 60%, para maximizar la eficiencia será necesario utilizar menor cantidad de combustible para alcanzar la potencia deseada, reduciendo los costes por consumo de energía, pero por otro lado aumentaran los costos por tecnología empleada por lo que será necesario encontrar el punto de equilibrio entre suficiencia y costo, es decir optimizar el sistema.

Asimismo, al disminuir el consumo de combustible se genera una reducción de emisión de gases contaminantes y se contribuye en la mejora de salud ambiental. (17)

### **Eficiencia de una turbina a gas**

La eficiencia de una turbina a gas puede expresarse en función de los saltos de entalpía de las máquinas que la componen y de la energía aportada en forma de combustible, como se muestra en la siguiente expresión:

$$\eta_{TG} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_C}{\dot{m}_c \times P_{GN}} = \frac{(\dot{m}_a + \dot{m}_c)(h_3 - h_4) - \dot{m}_a(h_2 - h_1)}{\dot{m}_c \times P_{GN}} \quad (1)$$

Es importante la necesidad de intercalar entre el compresor y la turbina a gas una cámara de combustión, ya que permite obtener un trabajo mucho mayor en la turbina mediante la elevación de su temperatura, también es importante la relación de presión en el compresor.

Además, al cociente entre la potencia neta obtenida en el eje de la turbina de gas y la generada en el proceso de expansión se le denomina factor de potencia como la apreciamos en la expresión:

$$\varphi_P = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_C}{\dot{W}_T} = 1 - \frac{\dot{W}_C}{\dot{W}_T} = \frac{\dot{m}_a}{(\dot{m}_a + \dot{m}_c)} \times \frac{(h_2 - h_1)}{(h_3 - h_4)} \quad (2)$$

Puede apreciarse mediante este factor que la eficiencia de la turbina de gas depende tanto del dosado y del cociente de los saltos entálpicos del

compresor y la turbina, este factor de potencia en las turbinas actuales tiene un valor en torno al 40%, lo que significa que el 60% de la energía generada en el proceso de expansión se emplea en el accionamiento del compresor, lo cual indica el empleo de compresores de alto rendimiento, pero tecnológicamente es complicado la optimización del compresor, debido que el lleva el fluido desde un estado en equilibrio con el entorno a un estado alejado del mismo con mayor presión y temperatura, mientras que en la expansión de la turbina el fluido evoluciona desde un estado de alta presión y temperatura a otro en equilibrio con el entorno. Es por ello que las eficiencias de los compresores están de 0.89 a 0.91 pesar del mayor número de etapas, mientras que en las turbinas de gas sus eficiencias están de 0.91 a 0.93.

Otro aspecto en la turbina a gas es la influencia de las condiciones ambientales en su operación, las cuales reflejan principalmente en la temperatura del aire a la entrada del compresor, una temperatura elevada implica una importante pérdida de potencia dado que la densidad del aire disminuye reduciéndose el caudal másico del aire y por lo tanto la potencia, es por ello se enfría el aire en la entrada del compresor. (25)

### **Eficiencia de la caldera de recuperación de calor**

La eficiencia de la caldera debido al intercambio de calor entre los gases de escape de la turbina a gas y el circuito de agua-vapor a su paso por la caldera de recuperación de calor está dado por la expresión:

$$\eta_{CRC} = \frac{Q_{TV}}{Q_{RTG}} = \frac{Q_{RTG} - Q_{CH}}{Q_{RTG}} = 1 - \frac{Q_{CH}}{Q_{RTG}} \quad (3)$$

En esta expresión podemos percibir que la eficiencia de la caldera de recuperación de calor aumenta al disminuir las pérdidas en el acoplamiento entre los dos ciclos termodinámicos, una de las formas más comunes y efectivas de alcanzar dicho objetivo es aumentar el número de niveles de presión del circuito agua-vapor. (26)

La temperatura y la presión del vapor generado por el HRSG serán controlados, así como la temperatura del agua de alimentación de caldera de recuperación y la temperatura del gas residual se mide usando transductores de temperatura. (26)

### **Eficiencia de la turbina a vapor**

La eficiencia del ciclo de la turbina a vapor puede expresarse también en función de los saltos de entalpía de las máquinas que la componen y de la energía aportada a la caldera, según la expresión:

$$\eta_{TV} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_B}{Q_C} = \frac{\dot{m}_V x (h_3 - h_4) - \dot{m}_V x (h_2 - h_1)}{Q_C} \quad (4)$$

El factor de potencia es general, incluye a la turbina a vapor, sustituyendo el trabajo de compresión del gas por el de bombeo de la turbina a vapor.

El valor de este parámetro; sin embargo, es mucho mayor que para los ciclos de las turbinas a gas, ya que el trabajo consumido en el proceso de bombeo es en general despreciable frente al generado en el proceso de expansión en la turbina a vapor. Como puede observarse en esta expresión, el rendimiento de la turbina a vapor depende del caudal de vapor que pasa a través de ella y del Salto entálpico de éste entre la entrada y la salida de vapor, es decir, de la diferencia entre sus presiones y temperaturas. Este concepto es clave para entender el papel que juega cada uno de los cuerpos de distintos niveles de depresión de la turbina a vapor en la potencia entregada por ésta. (27)

### **Eficiencia del ciclo combinado**

La eficiencia del ciclo combinado se obtiene a partir de la eficiencia de la turbina de gas, de la turbina de vapor, y de la caldera de recuperación de calor, que son los elementos que componen el ciclo combinado gas-vapor.

La expresión que determina el rendimiento del combinado es la siguiente:

$$\eta_{CC} = \eta_{TG} + \eta_{TV} \times \eta_{CRC} \times (1 - \eta_{TG}) \quad (5)$$

De la expresión de la eficiencia del ciclo combinado puede deducirse que no solo es importante que los ciclos de alta temperatura y de baja temperatura tengan la máxima eficiencia posible, sino también la eficiencia

de la caldera de recuperación de calor que es el acoplamiento del ciclo combinado. (28)

### **Eficiencia de una planta térmica con cogeneración**

La eficiencia de la planta térmica con cogeneración se mide mediante el factor de uso de energía (**FUE**), que es el cociente de la energía eléctrica generada más la energía térmica utilizada entre la energía suministrada a la planta.

Es así como surge el término de Factor de Utilización de Energía, el cual considerará los dos tipos de energía, como es un concepto primigenio se toma el caso más simple en el que se consideran las energías térmica y eléctrica como si fueran del mismo tipo lo cual permite sumarlas, y dicha suma será confrontada con la energía del combustible. (29)

$$FUE = \frac{W_{EE} + W_{ET}}{m_C \times P_{GN}} \quad (6)$$

### **Cuadro 2.4 Eficiencias de diferentes sistemas de cogeneración.**

<b>Planta de cogeneración</b>	<b>Eficiencia</b>
Turbina a gas con HRSG	80
Turbina a vapor a contrapresión	71
Ciclo Combinado TG y TV	75
Ciclo con Motor Diésel	64
Ciclo con Motor a gas	62

**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 2.1 Rendimiento energético de equipos de cogeneración.**

Topología	Rendimiento eléctrico	Rendimiento global	Relación Elect./Calor	Potencia.
Turbina a gas en ciclo simple	30-40	70 - 75	0.5 – 0.8	5-50 MW
Turbina a gas en ciclo combinado.	35-50	$\geq 75$	0.75 – 1.5	7-60 MW
Turbina a vapor en contrapresión.	7-20	70 - 85	0.04 – 0.16	1-20 MW
Motores alternativos	35-45	75	1.1 – 1.5	1-25 MW
Micro motores	25-35	75	0.5 - 0.9	10-400 KW
Micro turbinas.	25-30	75	0.5 – 0.67	20-200 KW.

**Fuente: SIEMENS**

### **Termodinámica para las plantas de cogeneración**

#### **Análisis de energía del ciclo Joule Brayton ideal**

La ecuación de la energía para flujo estacionario correspondiente a este caso es:

Siendo  $Q$  y  $W$  el calor y el trabajo específicos y aplicando esta ecuación a cada uno de los elementos (la variación de la energía cinética del fluido a la entrada y salida es despreciable), tendremos:

**En el compresor:**

$$W_{12} = -(h_2 - h_1) = -c_p(T_2 - T_1) \quad (7)$$

$$T_2 - T_1 = \frac{1}{\eta_c} \times T_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (8)$$

$$R = r_c^N \quad (9)$$

**En la turbina a gas:**

$$Q_{24} = (h_3 - h_2) = c_p(T_3 - T_2) \quad (10)$$

$$W_{45} = (h_3 - h_4) = c_p(T_3 - T_4) \quad (11)$$

El rendimiento del ciclo será:

$$\eta = \frac{\text{trabajo neto obtenido}}{\text{calor aportado}} = \frac{c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} \quad (12)$$

El trabajo neto:

$$W = c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1) \quad (13)$$

Para el caso del compresor de una turbina a gas industrial tomaremos

Como  $p_1 = p_a$  también  $T_1 = T_a$ .

La temperatura más alta, que se consigue al final del proceso de combustión, está limitada por la máxima temperatura soportada por los materiales con que está fabricada la cámara de combustión y los alabes de

las primeras etapas de la turbina, de manera que esta temperatura máxima limita el rendimiento. Las altas temperaturas obtenidas en la combustión de gas hacen del diseño de las cámaras de combustión y de los alabes el gran secreto de los fabricantes. De esta forma, todo lo referente a los materiales y a la refrigeración interna de los alabes y de las cámaras de combustión son aspectos que condicionan la vida útil de la máquina, los costes de mantenimiento y, en definitiva, la vida de la instalación. (30)

### **Análisis de energía del ciclo Rankine ideal**

La bomba, caldera, turbina a vapor, y condensador componentes asociados a este ciclo son dispositivos que conforman el ciclo *Rankine* como procesos de flujo estable. Los cambios en la energía cinética y potencial del vapor suelen ser pequeños respecto de los términos de trabajo y de transferencia de calor y, por consiguiente, casi siempre se ignoran. De ese modo, la ecuación de energía de flujo estable por unidad de masa de vapor se reduce a:

$$(q_{entra} - q_{sale}) + (w_{entra} - w_{sale}) = h_e - h_1 \text{ KJ/kg} \quad (14)$$

La caldera y el condensador no incluyen ningún trabajo, y se supone que la bomba y la turbina de vapor son isentrópicas. (30) En ese caso la relación de la conservación de la energía específica para cada dispositivo se expresa como sigue:

BOMBA ( $q = 0$ )

$$W_{bomba,entrada} = h_2 - h_1 \quad (15)$$

$$W_{bomba,entrada} = v(P_2 - P_1) \quad (16)$$

CALDERA ( $w = 0$ ):

$$q_{en} = h_3 - h_2 \quad (17)$$

TURBINA A VAPOR ( $q=0$ )

$$W_{turb,sal} = h_3 - h_4 \quad (18)$$

Condensador ( $w = 0$ ):

$$q_{sal} = h_4 - h_1 \quad (19)$$

La eficiencia térmica del ciclo *Rankine* se determina a partir de:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{q_{en}} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{en}} \quad (20)$$

$$W_{neto} = q_{en} - q_{sal} = W_{turb,sal} - W_{bomb,en} \quad (21)$$

### **Factores que afectan las prestaciones de servicio de la turbina a gas**

Dado que la turbina de gas es una máquina que respira aire del ambiente, su desempeño cambia si se afecta el flujo de masa de aire de admisión al compresor, y con mayor razón si hay cambios en las condiciones de referencia de la internacional Standards Organization (ISO) de 15 °C, 60% de humedad y 101.4 KPa, debido a esto, el desempeño de las turbinas de

gas varia significativamente con las condiciones locales de temperatura y presión. Si se disminuye la temperatura ambiente, la capacidad y eficiencia de las turbinas de gas se incrementan, debido a que esta disminución induce un aumento en la densidad del aire en la succión del compresor y por ende se da un incremento en el flujo másico.

Igualmente un efecto importante sobre la capacidad de las turbinas de gas, aunque no sobre su eficiencia, es cuando la presión atmosférica disminuye, la densidad del aire baja, lo que a su vez reduce el flujo másico hacia la turbina y por ende su capacidad disminuye. Asimismo, el aire húmedo, al ser más denso que el aire seco, afecta la producción de la potencia.

### **Combustibles utilizados**

Las turbinas a gas pueden utilizar dos tipos de combustibles:

Gaseosos: gas natural, propano, hidrógeno.

Líquidos: gasóleo, gasolinas. Los mejores combustibles para las turbinas a gas son los gaseosos siendo el gas natural el más influyente ya que produce alrededor del 2% más de salida de potencia que los destilados de petróleo(25).

### **Gas natural**

El gas natural es incoloro, inodoro, insípido, sin forma, particular y más ligero que el aire. Se presenta en su forma gaseosa por debajo de los -161°C. Por razones de seguridad, se le añade mercaptan, un agente químico que le da un olor a huevo podrido, con el propósito de detectar una posible fuga de gas.

La composición del gas natural varía según la zona geográfica, la formación o la reserva de la que es extraído, los diferentes hidrocarburos que forman el gas natural pueden ser separados utilizando sus propiedades físicas respectivas (peso, temperatura de ebullición, presión de vaporización).

### **Composición del gas natural (GN) de Camisea.**

$CH_4$  → 90% .....Metano.  
 $C_2H_6$  → 3% .....Etano.  
 $C_3H_8$  → 3% .....Propano.  
 $C_4H_{10}$  → 4% .....Butano.

La normatividad peruana vigente especifica que el gas natural deberá ser entregado por el concesionario en las siguientes condiciones:

1. Libre de arena, polvo, gomas, y otras impurezas.
2. No superara una temperatura de 50°C.
3. El gas natural es el combustible que contamina menos el ambiente debido a que su combustión no genera gases tóxicos, cenizas ni residuos, su transporte y distribución se realiza mediante tuberías subterráneas por lo que no dañan el paisaje, ni atenta contra la vida de los animales. (30)

### **Ventajas del uso del gas natural**

El uso del gas natural en reemplazo de otros combustibles (líquidos o sólidos) en las calderas de vapor posibilita una serie de beneficios para las empresas industriales, tales como:

1. El gas produce una mejor combustión en virtud de que al presentarse sus componentes en estado molecular, reaccionan en forma más completa con las moléculas de oxígeno del aire de combustión. Ello implica un menor requerimiento de exceso de aire (alrededor del 10% solamente) en el quemador, produciendo a la vez menos CO y prácticamente nada de partículas.

2. Siendo el gas natural de Camisea un gas dulce (prácticamente no contiene azufre), no producirá emisiones detectables de SO<sub>2</sub>; asimismo por su menor temperatura de llama, en comparación con los combustibles derivados del petróleo, producirá menor NO<sub>x</sub>. Por ello, y por su menor emisión de CO, resulta un combustible menos contaminante del ambiente que los combustibles hasta ahora quemados en el Perú. Esta situación resulta ventajosa a la hora de cumplir con los Límites Máximos Permisibles de emisiones de chimenea que se establezcan para la industria en un futuro cercano.

3. En virtud de que el gas produce una combustión limpia (sin partículas visibles) y sin presencia de compuestos de azufre corrosivos, resulta ser menos agresivo para las calderas, lo cual se traduce en menores paradas y costos de mantenimiento por limpieza de tubos, cambio de tubos o ductos corroídos, etc.

4. Mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía. Ello resulta porque al producir menos depósitos de hollín en los tubos y menores inquemados

en la combustión, las pérdidas de energía por chimenea son menores y se logra una mayor eficiencia térmica en la caldera.

5. No requiere almacenamiento y el espacio necesario para ello, pues el gas natural se entrega por tubería de una manera segura y confiable.

6. Es más limpio en el manejo que los Petróleos Residuales por ejemplo, lo cual significa ausencia de derrames y borras (tanque, líneas, calentador, etc.).

7. Los quemadores de gas natural no requieren vapor o aire de atomización como los de combustibles líquidos, lo cual implica evitar un costo adicional por demanda de vapor o electricidad para comprimir aire.

#### **Cuadro 2. 5 Emisiones comparativas de diferentes partículas**

Combustible	S <sub>o2</sub> (kg/h)	NO <sub>x</sub> (kg/h)	Partículas (kg/h)	CO <sub>2</sub> (Kg/h)
Gas Natural	0	0,9	0,0	1130
Diésel	2,8	1,3	0,13	1490
Residual	12,2	3,6	0,91	1625
Carbón	22,9	4,4	26,6	2435

**Fuente: Cenergia**

### **Consideraciones técnicas en los proyectos de cogeneración:**

1. La cantidad neta de calor se expresa como la diferencia de entalpía del vapor generado por la instalación del sistema de cogeneración y la entalpía de agua de alimentación.
2. El vapor de agua se mide por la diferencia del contenido de energía entre el vapor suministrado a la planta y el condensado devuelto por la planta al sistema de cogeneración.
3. El caudal, temperatura, y la presión se medirá en forma regular cuando se necesario.
4. La cantidad de gas natural quemado en la cámara de combustión se medirá en forma directa utilizando los medidores de flujo.
5. El calor suministrado por la planta se cuantificará incluyendo las propiedades mediante los transductores de temperatura.

Las modernas turbinas de vapor impone altas exigencias, tanto en lo que se refiere a la precisión como a la rapidez de su aplicación generacional, esta opción se esquematiza en la figura propuesta, el mismo que, es un esquema de principio, funcionamiento del sistema, con sistemas de regulación para la turbina de vapor de extracción generacional, con regulación de la velocidad y la presión de extracción cualitativa.

6. Para optimizar la eficiencia energética de los sistemas de vapor se usan los dispositivos estranguladores, principalmente válvulas que son muy comunes en la industria. Estos nos permiten controlar y reducir la presión, dado que el

proceso de estrangulación es isoentálpica, no se pierde la energía y de acuerdo con la primera ley de la termodinámica<sup>2</sup>, su eficacia es óptima.

7. Una práctica habitual en las instalaciones industriales es mantener la presión en la entrada de una turbina en las condiciones de diseño, esto generalmente implica el uso de válvulas de entrada para el control de la turbina, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, es mejor tener variación de las especificaciones de presión (presión de deslizamiento). Para mantener las válvulas de admisión completamente abiertas, se recomienda que las válvulas sean de un tamaño grande para satisfacer el proceso de estrangulación, de manera que se puede conseguir una caída de presión de 5 a 10 % en el flujo en lugar de 25 a 50 %.
8. La bomba de conducir el fluido debe ser también dimensionada teniendo en cuenta las condiciones, sin embargo, una buena alternativa es usar una turbina de contrapresión que casi conserva las condiciones isotrópicas, pues proporciona un método más eficiente de reducir la presión de vapor de los servicios de baja presión.
9. Las irreversibilidades que tienen lugar en los intercambiadores de calor son debido a dos factores: de transferencia de calor causada por la pérdida de la diferencia de temperatura y de presión asociada con la circulación de fluido, tanto la fricción del fluido y la transferencia de calor irreversible se pueden reducir disminuyendo el flujo de fluido. (31)

---

<sup>2</sup> CENGEL, Y.A. y BOLES, M.A. **Termodinámica**. Ed. McGraw-Hill. México, 2003.

**Tabla 2. 2 Rendimiento de la combustión y quemado**

COMBUSTIBLE	RENDIMIENTO DE LA COMBUSTIÓN INTERNA	RENDIMIENTO DE QUEMADO
Gas Natural	95-98	98-99
Gas Licuado	95-98	98-99
Residual 6	70-77	92-95
Residual 5	70-77	93-95
Diésel 2	80-83	93-95
Leña	45-55	80-85
Carbón Sub-bituminoso	55-60	87-90
Carbón Bituminoso	55-60	87-90

**Fuente: CESA (consejo económico y social de Aragón)**

A continuación se contrastará el uso del combustible residual R500 y el gas natural (GN), en dicha caldera, observando que la utilización del GN, disminuye considerablemente las emisiones de gases que producen el efecto invernadero y con una buena regulación del equipo se dará una mejor eficiencia en la combustión. (32)

**Tabla 2. 3 Comparación del residual R500 y GN**

	Residual 500	GAS NATURAL	Residual 3500	GAS NATURAL
	Carga mínima	Carga Mínima	Carga máxima	Carga máxima
$O_2$ %	4.6	3.9	4.1	2.8
$CO_2$ %	12.4	9.5	12.8	10.1
CO ppm	10	0	17	0
$SO_2$ ppm	349	1	431	0
$NO_x$ ppm	263	48	298	54
IB	3	0	5	0
T gases	185	196.7	215	202
Eficiencia de combustión	81.8	91.1	80.3	91.6

**Fuente: CESA (consejo económico y social de Aragón)**

La utilización del gas natural simplifica la relación combustible-quemador reduciendo el uso de bombas, calentadores, tanques de almacenamiento y otros. (32)

### Precios y tarifas del gas natural

A continuación se presentan algunos cuadros de tarifas de gas natural proporcionados por OSINERGMIN.

**Tabla 2.4 Precios de gas en boca de pozo**

**ESTIMACIÓN DE LOS PRECIOS DEL GAS EN BOCA DE POZO**  
(En US\$ MBTU)

Estimación de los Precios del Gas en Boca de Pozo según tipo de cliente						
Periodo	Distribuidor	Generador	Cientes Iniciales	GNV	Según aplicación del coeficiente general del contrato de Camisea (1)	Precios Calculados según índices para contratos iniciales sin adendas ni limitaciones (2)
Inicial-2003	1,8	1,00	1,80		1,80	1,80
2005	1,95	1,38	1,95		2,83	2,48
2006	2,22	1,37	2,22	0,8	3,40	2,78
2007	2,33	1,43	2,32	0,8	3,57	3,72
2008	2,44	1,58	2,44	0,8	3,75	4,86
2009	2,56	1,58	2,56	0,8	3,94	6,35
2010	2,69	1,57	2,69	0,8	4,13	6,48

**Fuente: Osinergmin**

**Tabla 2.5 Tarifas de gas en Lima-Callao**

**TARIFAS DE GAS EN LIMA-CALAO SEGÚN CATEGORÍAS A INICIOS DE 2011**  
(En US\$ MBTU)

Abrev.	Unidades	Categoría de Consumidor						
		A	B	C	D	GNV	E	GE
Consumo	m3/mes	28	450	125.000	600.000			
FG	Us \$/Mmbtu	1,05	2,83	2,83	2,83	0,80	2,83	1,65
FTRP	Us \$/Mmbtu	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
FSD	Us \$/Mmbtu	4,20	3,79	1,08	0,84	0,93	0,38	
Sub total	Us \$/Mmbtu	6,14	7,50	4,80	4,55	2,62	4,10	2,54
	19% (IGV)	1,17	1,43	0,91	0,86	0,50	0,78	0,48
Total	Us \$/Mmbtu	7,31	8,93	5,71	5,42	3,11	4,87	3,02

**Fuente: Osinergmin**

**Tabla 2.6 Tarifas finales de gas con y sin impuesto**

**ESTIMACIÓN DEL VALOR DE LAS TARIFAS FINALES CON Y SIN IMPUESTOS PARA USUARIOS RESIDENCIALES**

*(En US\$ MBTU)*

Residencial hasta 300 m3 mes					
Año	G	T	MD	Total sin IGV	Con IGV
2005	1,95	1,04	3,70	6,69	7,96
2006	2,20	1,01	3,70	6,91	8,22
2007	2,33	1,06	3,81	7,20	8,57
2008 <sup>a</sup>	0,87	1,02	4,89	6,78	8,07
2009 <sup>b</sup>	0,95	0,93	5,08	6,97	8,29
2010 <sup>c</sup>	1,00	0,98	5,08	7,06	8,40

**Fuente: Osinergmin y Cálidda**

**Tabla 2.7 Tarifas finales de gas con y sin impuesto para usuarios comerciales**

**ESTIMACIÓN DEL VALOR DE LAS TARIFAS FINALES CON Y SIN IMPUESTOS PARA USUARIOS COMERCIALES**

*(En US\$ MBTU)*

Categoría B consumo medio estimado 450 usuarios de 301 a 17500 m3/mes					
Año	G	T	MD	Total sin IGV	Con IGV
2005	1,95	1,04	2,13	5,12	6,09
2006	2,20	1,01	2,13	5,34	6,35
2007	2,33	1,06	2,19	5,58	6,64
2008	2,44	1,12	2,26	5,82	6,93
2009	2,56	0,93	2,92	6,42	7,64
2010	2,69	0,98	2,92	6,60	7,85

**Fuente: Osinergmin y Cálidda**

**Tabla 2.8 Tarifas finales de gas con y sin impuesto para usuarios de pequeñas industrias**

-----  
**ESTIMACIÓN DEL VALOR DE LAS TARIFAS FINALES CON Y SIN IMPUESTOS PARA  
 USUARIOS DE PEQUEÑAS INDUSTRIAS**  
*(En US\$ MBTU)*

Categoría C consumo medio estimado 125000 m3/mes-usuarios de 17501 a 300000 m3/mes					
Año	G	T	MD	Total sin IGV	Con IGV
2005	1,95	1,04	0,77	3,76	4,47
2006	2,20	1,01	0,77	3,98	4,73
2007	2,33	1,06	1,13	4,52	5,38
2008	2,44	1,02	1,16	4,62	5,50
2009	2,56	0,93	1,18	4,67	5,56
2010	2,69	0,98	1,18	4,85	5,77

**Fuente: Osinergmin y Cálidda**

**Tabla 2.9 Tarifas finales de gas con y sin impuesto para usuarios de medianas industrias**

-----  
**ESTIMACIÓN DEL VALOR DE LAS TARIFAS FINALES CON Y SIN IMPUESTOS PARA  
 USUARIOS DE INDUSTRIAS MEDIANAS**  
*(En US\$ MBTU)*

Categoría D consumo medio estimado 600000 m3/mes usuarios de más de 600 mil m3/mes					
Año	G	T	MD	Total sin IGV	Con IGV
2005	1,95	1,04	0,56	3,55	4,22
2006	2,20	1,01	0,56	3,76	4,48
2007	2,33	1,06	0,85	4,24	5,04
2008	2,44	1,02	0,90	4,36	5,19
2009	2,56	0,93	0,90	4,39	5,23
2010	2,69	0,98	0,90	4,57	5,44

**Fuente: Osinergmin y Cálidda**

**Tabla 2.10 Tarifas finales de gas con y sin impuesto para usuarios de grandes industrias**

**ESTIMACIÓN DEL VALOR DE LAS TARIFAS FINALES CON Y SIN IMPUESTOS PARA USUARIOS DE GRANDES INDUSTRIAS (ESTIMACIÓN USUARIOS INICIALES)**  
(En US\$ MBTU)

Categoría mas de 30000 m3/día o 900000 m3/mes					
Año	G	T	MD	Total sin IGV	Con IGV
2005	1,95	1,04	0,33	3,32	3,95
2006	2,20	1,01	0,33	3,54	4,21
2007	2,33	1,06	0,33	3,72	4,43
2008	2,44	1,02	0,34	3,80	4,52
2009	2,56	0,93	0,35	3,84	4,57
2010	2,69	0,98	0,35	4,03	4,79

**Fuente: Osinergmin y Cálidda**

**Cuadro 2.6 Costos de combustibles en soles**

Combustible	Precio en soles incluido IGV
GLP	6,60 soles el galón
R500	8,15 soles el galón
GN	1,00 sol el m <sup>3</sup>

**Fuente: Elaboración propia**

**Impacto al medio ambiente**

**-Calentamiento global:** Es el proceso de aumento gradual de la temperatura de la tierra a consecuencia del incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, provocado por los procesos de combustión con fines energéticos de carburantes fósiles y por la deforestación.

**-Disminución de la capa de ozono:** Es el proceso de reducción de concentración y espesor de la capa de ozono presente en la atmósfera,

este fenómeno es consecuencia de la alteración del balance atmosférico entre el oxígeno y el ozono.

**-Acidificación:** Es el proceso de introducción de sustancias ácidas en el medio ambiente provocado por las emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno provenientes principalmente de la quema de combustibles fósiles tras reaccionar con el vapor de agua presente en el aire, estos óxidos se convierten en compuestos ácidos que la lluvia precipita sobre la superficie terrestre.

### **La unidad de medida de los impactos ambientales**

Para medir el impacto medio ambiental de los sistemas de generación de electricidad es el llamado ecopuntos de impacto, el estudio da a conocer que los sistemas de generación de energía eléctrica tienen un valor total de ecopuntos de impacto ambiental por Terajulio de electricidad producido. Un Terajulio equivale a 278 MWh, los ecopuntos son unidades de penalización, los sistemas con menor puntuación de ecopuntos resultarán ser los más amigables con el medio ambiente.

### **Cuadro 2.7 Eco puntos en los sistemas**

<b>Sistema</b>	<b>Eco puntos</b>
Sistema petróleo	1398
Sistema nuclear	672
Sistema gas natural	267
Sistema eólico	65
Sistema hidráulico	5

**Fuente: Asociación de productores de energía renovable**

## **Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)**

Los 45 países (tierra firme e islas) emiten un promedio de 27040 MMTM (millones de toneladas métricas) de  $CO_2$  al año, de los cuales Sudamérica produce el 4%, es decir 1040 MMTM.

Según los protocolos reconocidos internacionalmente, cabe destacar que cuando hablamos de GEI nos referimos al  $CO_2$  que influye los seis gases de efecto invernadero recogidos en el protocolo de Kioto, el cálculo de emisiones están asociadas al consumo de energía para la cuantificación de emisiones contemplada en la norma ISO14064, que fue desarrollada de acuerdo con el protocolo Greenhouse Gas Protocol (GHG protocol). El GHG Protocol, del World Resources Institute y el World Business Council for Sustainable Development, son los protocolos más utilizados a escala internacional para entender, cuantificar, y gestionar las emisiones de GEI.

El protocolo de Kioto introdujo tres Proyectos innovadores: El mecanismo para un desarrollo limpio (MDL), Unidades de reducción de emisiones (URE), Unidad de la cantidad atribuida (UCA).

En esta investigación se ha considerado las emisiones directas asociadas a las fuentes que posee o controla el sujeto que genera la actividad, como en las calderas o turbinas de gas. (33)

## **Emisiones del proceso de combustión**

La combustión de cualquier combustible fósil libera calor que se aprovecha en gran parte en la generación de vapor en las calderas: pero también produce una serie de emisiones (gases y partículas) descargadas por chimenea que, bajo ciertas condiciones, pueden producir impactos ambientales negativos en el ambiente.

Los principales productos de la combustión son el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , partículas así como  $\text{O}_2$  y  $\text{N}_2$  remanentes del exceso de aire.

De dichos gases, el  $\text{CO}_2$  es considerado gas de efecto invernadero (GEI): mientras que los otros gases como el  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$  y las partículas son considerados como contaminantes atmosféricos.

La producción de  $\text{CO}$  y partículas en las calderas depende de qué bien se completan las reacciones de combustión en el quemador, asimismo del diseño del quemador y su estado de mantenimiento.

Las emisiones de  $\text{SO}_2$  dependen básicamente del contenido de azufre del combustible quemado en la caldera. Por ejemplo un PR-6 (%S=1,06) producirá una mayor emisión de  $\text{SO}_2$  que el Diésel (%S=0,25).

El NO<sub>x</sub> (denominación de la suma del NO y NO<sub>2</sub>) se produce durante la combustión, ya sea debido a la fijación térmica de nitrógeno del aire de combustión o debido a la conversión de nitrógeno químicamente ligado al combustible. La producción de NO<sub>x</sub> aumenta con la temperatura de la llama, el oxígeno disponible, el tiempo de residencia a altas temperaturas y el contenido de nitrógeno del combustible. (35)

Por lo general las emisiones de gases y partículas producto de la combustión de combustibles fósiles, así como la dificultad de combustión, aumentan en la siguiente secuencia:

#### **Gases- Diésel- Petróleos Residuales.**

Las emisiones de las calderas industriales del Perú en término de CO<sub>2</sub> representan casi el 18% de las emisiones de todos los sectores consumidores del país, el 47% del sector productivo y el 38% de las emisiones del petróleo. (36)

**Tabla 2.11 Emisiones comparativas de una caldera de vapor con diferentes combustibles**

Combustible	SO <sub>2</sub> (kg/h)	NO <sub>x</sub> (kg/h)	Partículas (kg/h)	CO <sub>2</sub> (Kg/h)
Gas Natural	0	0,9	0,0	1130
Diésel	2,8	1,3	0,13	1490
Residual	12,2	3,6	0,91	1625
Carbón	22,9	4,4	26,6	2435

**Fuente: CESA (consejo económico y social de Aragón)**

### **Costos de la conversión a gas natural**

El costo de la conversión a gas natural depende de una serie de factores tales como el tipo y capacidad de la caldera, marca, tipo de quemador, trenes de válvulas y de más accesorios cuyo tamaño depende de la capacidad de la caldera, longitud de las tuberías, y números de usuarios entre otros.

No es posible hablar de un monto fijo para cada tamaño de caldera, por ejemplo, en cuanto a quemadores solamente el costo de cambiar o modificar el quemador de una caldera puede costar entre 25000 a 40000 mil dólares dependiendo del tipo de marca del quemador, similarmente el tren de válvulas puede costar entre 5000 a 10000 mil dólares, aparte de ello a que instalar una estación de reducción y medición de consumo de gas en la entrada de la planta, cuyo costo total puede ser de 8000 a 12000 dólares sin considerar el medidor, lo que provee normalmente la empresa distribuidora, así como tubería de distribución de gas dentro de la planta en términos globales, una instalación completa podría fluctuar entre 60000 y 90000 mil dólares. (37)

**Factor de emisión:** es un valor representativo que relaciona la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera en una actividad asociada a la emisión del contaminante, según el observatorio de Cartagena el factor de emisión para el gas natural es  $2,15 \text{ kg } CO_2 / m^3$  de gas natural.

Emisiones de  $CO_2$  = Consumo de G.N ( $m^3/año$ ) x factor de emisión... (22)

Las turbinas de gas se fabrican en tamaños discretos, por lo que su simulación debería realizarse atendiendo a los datos directos proporcionados por el fabricante, no obstante se cuenta con expresiones de variables de operación de la turbina de gas en función de su potencia eléctrica generada y potencia eléctrica útil.

$$m_{g.s} = 2,32 \times P_{util} + 28 \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$T_{g.s} = 0,41 \times P_{gener.} + 503 \quad \dots\dots\dots (24)$$

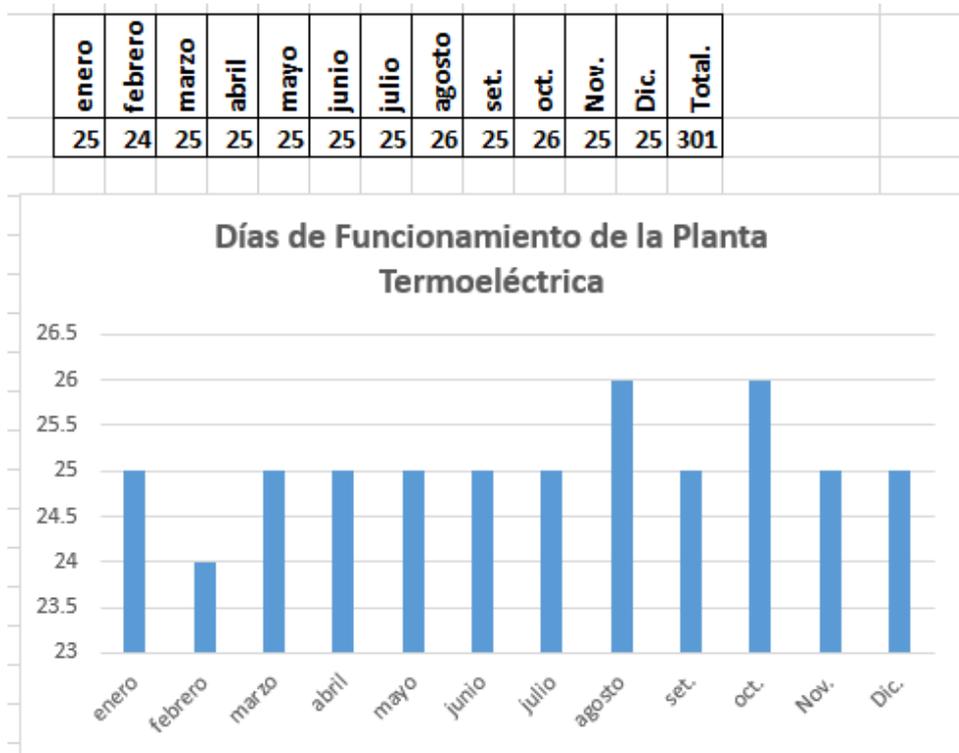
**Cuadro 2. 8 Días de funcionamiento de la planta termoeléctrica**

Enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	set.	oct.	Nov.	Dic.	Total.
25	24	25	25	25	25	25	26	25	26	25	25	301

**Fuente: Elaboración propia**

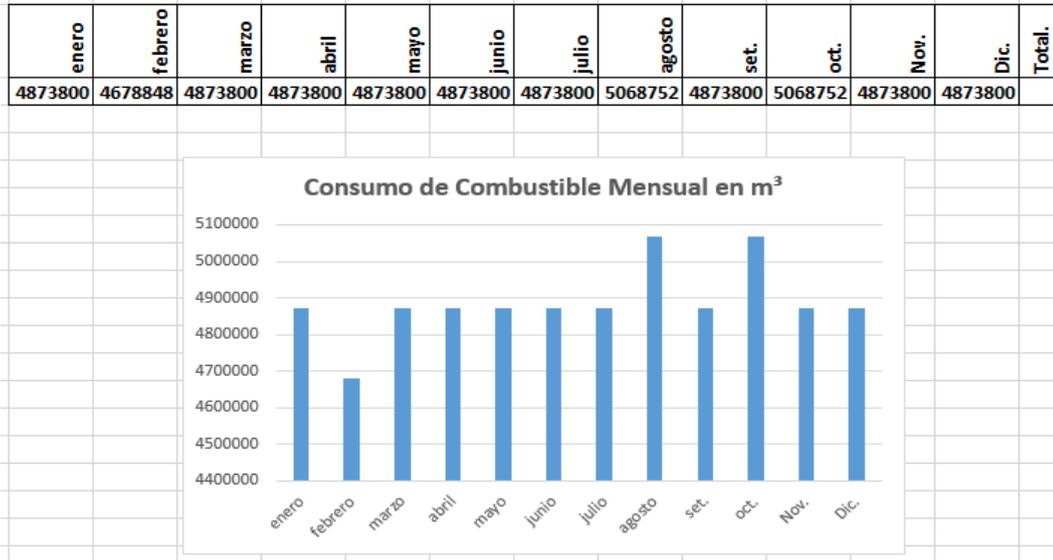
N° de hora/año = 301 x 24 = 7224 H/año

**Cuadro 2.9 Días de funcionamiento de la planta termoeléctrica**



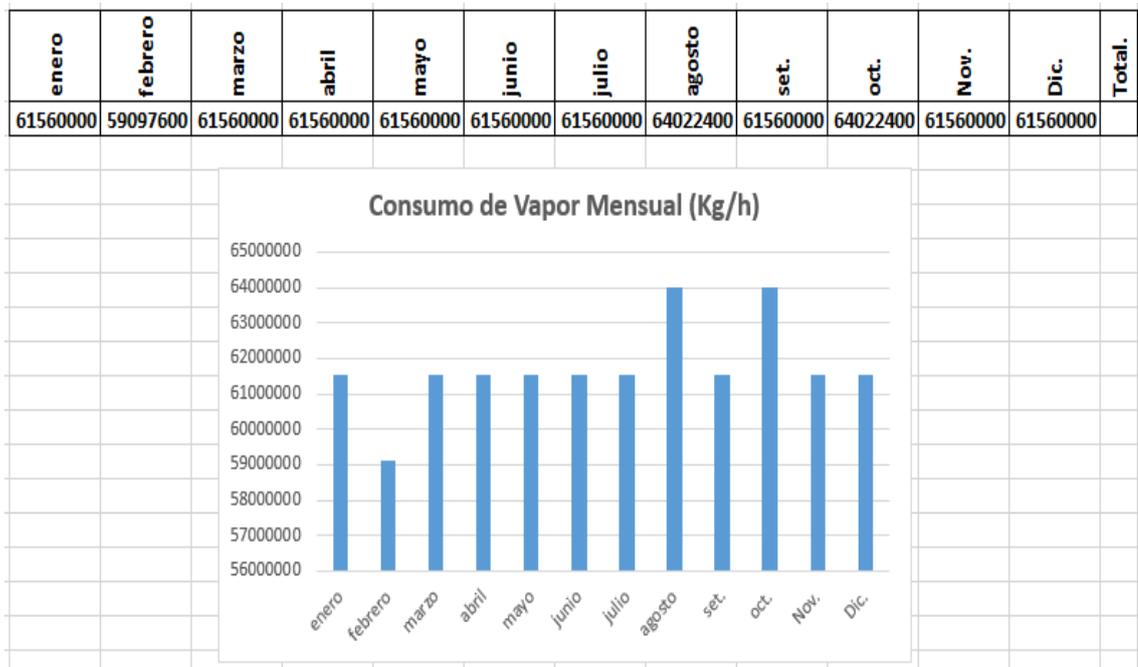
Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 2.10 Consumo de combustible mensual en m<sup>3</sup>**



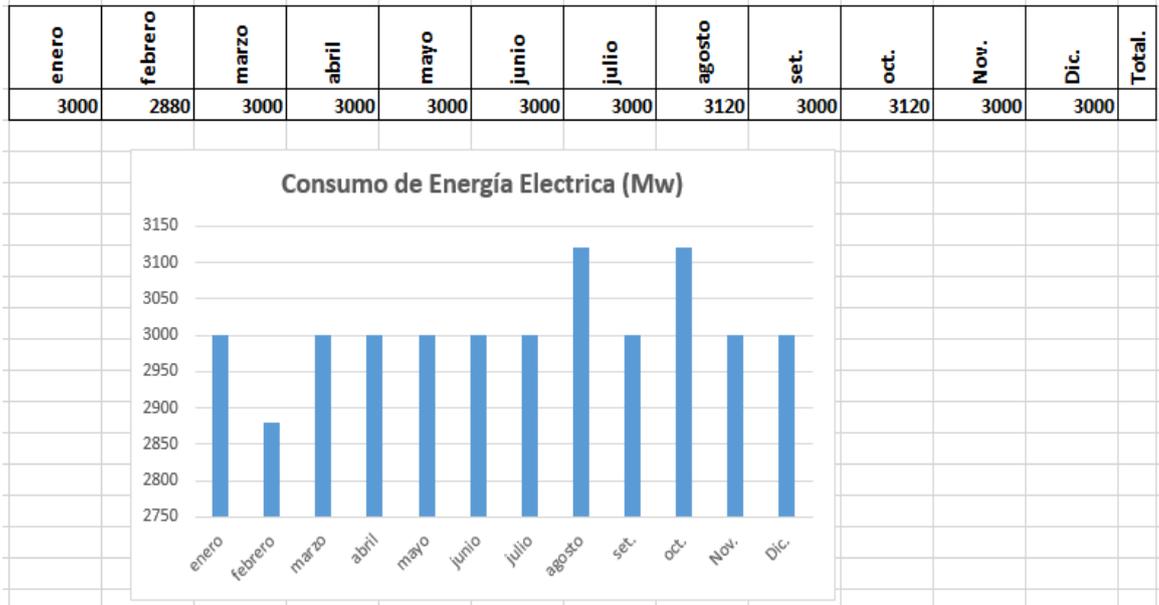
Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 2.11 Consumo de vapor mensual (Kg/h)**



Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 2. 12 Consumo de energía eléctrica (Mw)**



**Fuente: Elaboración propia**

**Cuadro 2.13 Análisis de costo en dólares para el proyecto de la planta optimizada**

<b>Turbina de gas</b>		
Turbina de gas y Generador	8 100 000	
Sistemas auxiliares	370 000	
Compresor	420 000	
Recuperador de condensados	110 000	<b>9 000 000</b>
<b>Equipo de Vapor</b>		
Caldera de recuperación	1 840 000	
Sistema de tratamiento de agua	320 000	
Condensador, bomba de agua	420 000	<b>2 580 000</b>
<b>Equipo Eléctrico</b>		
Transformadores	320 000	
Relevadores y controles	110 000	
Interconexiones	420 000	<b>850 000</b>
<b>Instalación y Servicio</b>		
Ingeniería de diseño	1 100 000	
Ingeniería Civil	630 000	
Control y Mantenimiento	370 000	
Trabajo Eléctrico en campo	840 000	
Trabajo Mecánico en campo	1 420 000	
Transportación y manejo	320 000	<b>4 680 000</b>
Total parcial		17 110 000
Contingencia (aprox. 10 %)		7 110 000
<b>costo total</b>		<b>18 810 000</b>

**Fuente: Elaboración propia**

### **Evaluación económica**

Es un procedimiento matemático que nos permite conocer los balances de los costos anuales de energía para luego comparar los costos con los beneficios que se generan con la optimización topológica, comprendiendo la bondad de esta tecnología.

#### **Ahorro económico con excedentes de energía eléctrica cogenerada.**

Según la comisión nacional para el ahorro de energía (CONAE), el ahorro económico ( $A_e$ ) se obtendrá por:

$$A_e = C_{SC} - C_{COGEN.} + C_{EXC} \dots\dots\dots (25)$$

$$C_{SC} = E_c \times V \dots\dots\dots (26)$$

#### **Tiempo de retorno de la inversión (PB)**

El tiempo que se tarda en recuperar la inversión en los proyectos de optimización, también conocido como “playback” (PB), se define como la relación entre la inversión extra ( $I$ ) ocasionado por la optimización y el ahorro anual obtenido.

$$PB = \frac{I}{A_e} \dots\dots\dots (27)$$

## **2.4 Definiciones de términos básicos**

**Fuentes de energía:** Son los recursos existentes en la naturaleza de los que podemos obtener energía utilizable en nuestras actividades.

**Calor de proceso:** Es la energía térmica requerida por una planta industrial que puede suministrarse como vapor, agua caliente, aire caliente.

**Retorno de proceso:** Es el fluido y calor que regresan de una planta industrial de un sistema de cogeneración, cuándo el calor se suministra como vapor el retorno es condensado.

**Calor neto a proceso:** Es la diferencia entre la energía térmica suministrada a la planta industrial y la energía que retorna al sistema de cogeneración.

**Demanda de potencia de la planta:** Es la potencia o carga eléctrica que requiere la planta industrial para los procesos de producción, iluminación de los ambientes y acondicionamiento del ambiente.

**Ciclo superior:** Es el ciclo térmico donde la energía eléctrica se genera antes de entregar el calor a la planta industrial.

**Ciclo inferior:** Es el sistema donde la generación de energía eléctrica es a costa del calor recuperado de un proceso térmico.

**Topología:** Es una configuración conformado equipos conectados entre sí, mediante líneas de comunicación.

**Planta industrial:** Es un conjunto conformado por máquinas, herramientas y otros equipos dispuestos convenientemente en un local cuya función es transformar una materia prima en productos utilizando la energía eléctrica o potencia mecánica en los procesos de transformación.

**Planta de generación eléctrica:** Utilizan la energía primaria para transformarla en energía eléctrica.

**Planta térmica:** Utilizan la energía que se obtiene de la reacción química de la combustión del elemento energético usado, en este tipo de plantas solo obtiene como energía eléctrica la tercera parte de la energía entrante y el resto son pérdidas liberadas al medio ambiente.

**Planta de cogeneración:** Es la aquella donde se produce simultáneamente energía eléctrica y energía térmica, con una misma energía primaria propiciando nuevos productores independientes de energía en el mercado.

**Sistema energético:** Conjunto de unidades o subsistemas conectados que participan en la conversión y uso de la energía en la que interactúan diferentes flujos de entrada o salida.

**Optimización:** Consiste en mejorar los parámetros ya existentes de un sistema energético aplicando criterios tecnológicos mediante de la

modificación o implementación de máquinas o equipos con el fin de lograr una mayor eficiencia.

**F.U.E.:** Factor de utilización de energía, incluye como criterio medir el desempeño de una planta térmica tomando en cuenta la producción de energía eléctrica y térmica.

**Energía:** Es la capacidad de un sistema de producir una actividad externa o realizar trabajo.

**Línea de base energética:** Referencia cuantitativa que proporciona la base de comparación del desempeño energético.

**Desempeño energético:** Resultados medibles relacionados con la eficiencia energética, el uso de la energía, y el consumo de la energía.

**Eficiencia:** Es la relación entre la energía requerida y la energía utilizada.

**Eficiencia energética:** Es la relación entre la potencia obtenida y la energía a la entrada del sistema.

**Relación de compresión:** Es la relación entre la presión absoluta de descarga y la presión absoluta de succión.

**Dosado:** Es la relación entre la masa de combustible empleada y la masa de aire necesaria y sus valores típicos se encuentran en el intervalo de 2% y 3%.

**Consumo de energía:** Cantidad de energía utilizada.

**Potencia efectiva:** Es la capacidad real de energía que las centrales pueden entregar en forma continua al mercado eléctrico.

**Calor en proceso:** La energía térmica requerida por la planta industrial que puede suministrarse como vapor, agua caliente, aire caliente, etc.

**Retorno de proceso:** El fluido y calor no utilizado que regresan de la planta industrial de un sistema de cogeneración, cuando el calor se suministra como vapor el retorno es condensado.

**Calor neto a proceso:** La diferencia entre energía térmica suministrada a la planta industrial y la energía que retorna al sistema de cogeneración.

**Cogeneración:** Producción simultánea de electricidad y calor útil a partir de la energía de un combustible, magnífica tecnología para la generación eficiente de la energía útil.

**Rendimiento:** Es la relación “Costo/Beneficio”, donde el beneficio es la energía producida (medida en kWh) y el costo es la cantidad de combustible que se consume, expresada en las unidades usuales.

**Mínima carga:** Es la que corresponde a lo que el operador de la planta determine como tal, sin incurrir en sobrecarga.

**Condiciones ISO:** Se refiere a las potencias y rendimientos que se habrían obtenido durante el ensayo si las condiciones imperantes durante la prueba hubiesen sido las definidas por las normas ISO, las cuales consideran el aire ingresando al compresor a 101 KPa y a una temperatura ambiente de 15°C y a 60% de humedad relativa.

**Factor de emisión:** Es un valor representativo que relaciona la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera en una actividad asociada a la emisión del contaminante.

**Repotenciación:** Es la actividad que consiste en la sustitución de equipos antiguos de menor potencia y eficiencia por máquinas nuevas de mayor capacidad y eficiencia, luego que ellos entraron a un colapso, mediante de una evaluación termodinámica, económica y medio ambiental. Lo más interesante de la repotenciación es el aprovechamiento de las instalaciones ya construidas.

**Seguridad energética:** Es la dependencia energética que conlleva riesgos referidos a la seguridad de suministro de energía que conlleva a la competitividad en el futuro.

**Eficiencia económica:** En este caso es obtener la energía al menor costo posible con la tecnología y con los recursos disponibles, conlleva al desarrollo económico social.

### **III. HIPÓTESIS Y VARIABLES**

#### **3.1 Hipótesis general y específicos**

##### **Hipótesis general**

La topología de los sistemas de cogeneración de energía de ciclo combinado influye positivamente en la eficiencia para la planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco.

##### **Hipótesis específicos**

- La óptima selección y ubicación de equipos y máquinas térmicas permitirán mejorar la eficiencia de la planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco.
- El apropiado análisis termo económico de las topologías permitirá optimizar la eficiencia de la planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco.

#### **3.2 Definición conceptual de las variables**

##### **Optimización topológica**

La topología es la configuración o esquematización que se hace con los equipos o máquinas de la ingeniería térmica tales como: calderas, turbinas, intercambiadores de calor y/o motores integrados funcionalmente para satisfacer de modo eficiente las demandas de energía eléctrica y energía térmica útil que se le solicitan en una planta industrial. (8)

La optimización topológica es la correcta selección de los equipos de cogeneración a instalar, también tiene sus limitaciones que impondremos durante la operación del mismo expresadas en 4 estrategias siguientes:

- No se permite la venta de electricidad ni el despilfarro de calor, es decir el sistema opera ajustado a la demanda eléctrica y térmica del usuario.
- No se permite la venta de electricidad pero si el despilfarro de calor, es decir el sistema opera ajustado a la demanda eléctrica.
- Se permite la venta de la electricidad pero no el despilfarro de calor, el sistema opera ajustado a la demanda térmica.
- Se permite la venta de electricidad y el despilfarro de calor, el sistema opera maximizando la producción de energía eléctrica.

### **Eficiencia de una planta térmica**

La eficiencia nos manifiesta que parte de la cantidad de combustible ha sido transformado en forma efectiva en energía útil, cuyos mayores valores alcanzan en el sistema de cogeneración de energía.

### 3.2.1 Definición Operacional de las variables

Es un procedimiento que consiste en desglosar las variables a fin de llegar a niveles de concreción expresados en los indicadores, como se muestra en el cuadro siguiente:

**Cuadro 3. 1 Operacionalización de las variables**

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADORES
Variable Independiente  Sistema de cogeneración	Selección y ubicación De los equipos.	Demanda Energética.
	Análisis termo económico	Producción de energía Eléctrica Y Térmica.
Variable Dependiente  Eficiencia de la planta térmica.	Eficiencia térmica y eléctrica	Flujo másico de portador de energía primaria.
	Nivel de Emisión.	Tipo de combustible utilizado Factor de emisión de combustibles

**Fuente: Elaboración propia**

## **IV. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **4.1 Tipo y diseño de investigación**

#### **Tipo**

Esta investigación es de tipo tecnológica, de nivel aplicada dado que está dirigida a la optimización topológica de los sistemas de ciclo combinado de cogeneración, que permite el ahorro de energía primaria y la disminución de emisiones de efecto invernadero, mejorando la economía.

**Espinoza (2010: 90)**, la investigación tecnológica<sup>3</sup> tiene como propósito aplicar el conocimiento científico para solucionar los diferentes problemas que benefician a la sociedad. (39)

**Zorrilla (1993:43)**, define la investigación tecnológica de nivel aplicada aquel que se orienta a resolver los problemas concretos de la realidad de manera objetiva (38)

**Solís (2008:65)**, la investigación aplicada está orientada a resolver los problemas de los procesos de producción, distribución y circulación de una actividad humana de tipo industrial. Dicha investigación parte de la reflexión sobre la tecnología que se está aplicando y sobre la cual se está trabajando, en la medida que se repiensa la tecnología y se repiensa en las funciones de la máquina, la reflexión se podrá conformar como una vía para la

---

<sup>3</sup> ESPINOZA MONTES, Ciro. **Metodología de investigación tecnológica**. Huancayo, Perú. Editorial Imagen Gráfica SAC. Primera edición. 2010

transformación<sup>4</sup> y el uso de esa tecnología permitirá optimizar la eficiencia con nuevas topologías de planta generadora de energía con cogeneración.

(40)

### **Diseño**

Es una organización que permite controlar las variables de investigación, permite conocer las acciones a seguir para encontrar la posible solución al problema.

En esta investigación el diseño es descriptivo, comparativo y correlacional **Espinoza (2010: 93)**, el diseño descriptivo comparativo recoge información de la muestra y lo caracteriza sobre la base de una comparación de las variables (39)

**Espinoza (2010: 96)**, el diseño correlacional consiste en recolectar un conjunto de datos de un objeto de investigación con la intención de determinar la relación o asociación entre estos datos, más no las relaciones causales o de dependencia (39)

**Ñaupas (2012: 73)**, el método comparativo, es un método ordenado que nos permite comparar dos situaciones distintas y también ayuda a optimizar en tal situación cuando se quiere mejorar algún parámetro relevante. (41)

---

<sup>4</sup> ÑAUPAS PAITÁN, Humberto. **Metodología de la Investigación Científica y Asesoramiento de Tesis**. Lima, Perú. Segunda Edición. 2012.

## **4.2 Método de investigación**

El método es un conjunto de procedimientos por los cuales se plantean los problemas y se ponen a prueba las hipótesis de la investigación.

En la investigación realizada se utilizó el método analítico, sintético y cuantitativo, la reflexión es la base del método analítico en el campo tecnológico, el espacio, la medición y ejecución es la base de la reflexión.

En tanto que a una máquina o un sistema se le agregan nuevos elementos; se piensa obtener de ella nuevas funciones, es decir, mejorar u optimizar su funcionamiento, se puede decir que se ha mejorado esta, ante la presencia de un espacio-objeto.

**Espinoza (2010: 91)**; los problemas de la sociedad, la naturaleza y el pensamiento son complejos, y para entender en su totalidad es necesario la aplicación del análisis y síntesis a fin de reducir toda la teoría y las relaciones teóricas entre las variables de la investigación (39)

**Ñaupas (2012: 73)**, el método es un conjunto de reglas que se fundan en desarrollos lógicos, en el proceso de investigación y orientan sus enunciados proposicionales hacia la verdad, determinando al mismo tiempo el grado de probabilidad de verdad en sus argumentaciones (41)

## **4.3 Población y muestra**

Por las características propias de la investigación la población y muestra se reduce al análisis de una planta atípica que produce fibras acrílicas de hilado en seco, únicas en el Perú, ubicada en el Callao.

#### **4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado**

La investigación se realizó en la planta térmica que abastece energía a planta industrial productora de fibras acrílicas de hilado en seco ubicado en la provincia constitucional del Callao-Perú, durante 2016-2017.

#### **4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de información**

##### **Técnicas**

- La técnica documental para ello se contó con documentos, y revistas información en la visita a la planta.
- La técnica empírica focus group, que consiste en convocar y conocer las opiniones de los ingenieros de nuestro medio involucrados en esta línea de investigación.

##### **Instrumentos**

- Análisis de contenidos
- SPSS

#### **4.6 Análisis y procesamiento de datos**

De acuerdo al contexto donde se ha realizado la investigación, se recogieron los datos en la visita personal y fueron corroborados por los ingenieros de la línea de investigación. Dicha información permite dar la confiabilidad de este trabajo dado que los datos recogidos son reales.

Para realizar la correlación de las variables consideradas en esta investigación se utilizó el programa computacional SPSS, determinando que hay una relación directa entre la topología y la eficiencia de una planta térmica de cogeneración de energía.

### **Descripción de la planta en estudio**

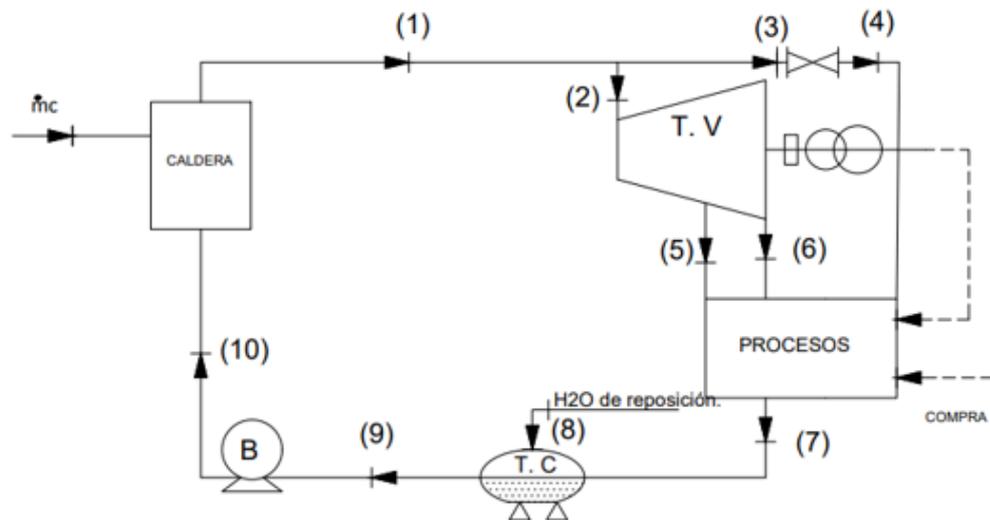
La demanda energética requerida por la planta industrial productora de fibras acrílicas hilado en seco es de  $W_{elec} = 5 \text{ MW}$  y  $W_{term} = 28,5 \text{ MW}$ , también se tenía conocimiento de la compra de una parte de la energía eléctrica para satisfacer su demanda.

Al inicio del proyecto de investigación ya se tenía utilizando el gas natural en la caldera, de generación de vapor para alimentar la turbina de vapor  $TV_1$  con una potencia nominal de 5,4 MW y proporcionar energía térmica para accionar una turbina de vapor, así también una parte directamente a la planta industrial de fibras acrílicas hiladas en seco.

En esta topología se utilizaba un flujo volumétrico de gas natural de  $5000 \text{ m}^3/\text{H}$ , que alimentaba a una caldera como se muestra en el esquema.

Poder calorífico promedio del gas natural de camisea =  $54\,612 \text{ KJ /Kg}$ .

**Figura 4.1 Topología de la planta en estudio**



**Cuadro 4.1 Datos recogidos en la planta en estudio respecto a la caldera.**

Consumo de gas en $m^3/H$	5000
Vapor generado en Ton/H	38,8
Temperatura de Vapor en $^{\circ}C$	430
Presión de vapor en bar	45

**Fuente: Elaboración propia**

**Cuadro 4. 2 Especificaciones técnicas de los equipos considerados en la planta en estudio**

<i>N°</i>	<i>Componente</i>	<i>Técnico parámetros</i>	<i>Valores</i>	<i>Especificaciones</i>	<i>Origen</i>
1	Caldera  Marca:Distral  Fab:1981	Salida de vapor 30 bar	40 ton / hora	Tipo: circulación natural caldera de tubo de agua Total de eficiencia de la caldera: 82%	Brasil.
		La presión del vapor	30bar		
		Temperatura del vapor	325 °C		
2	Turbina de vapor (TV1)	Salida de potencia nominal	5.4 MW	ABB Modelo: GE20	Brasil
		La presión del vapor	45 bar		
3	Turbina de vapor (TV3)	Salida de potencia nominal	2.1 MW	AEG Modelo: GE16	Alemania
		La presión del vapor	30 bar		
4	Tanque de condensado y el Sistema de alimentación de agua	Flujo de vapor	16.3 Kg/s	KSB bombas de agua de alimentación Tipo: Número de centrífugas Bombas: 2 Velocidad nominal: 3.600 rpm presión de admisión: 0.5 Tipo de sello del eje: Mecánica	Alemania

**Fuente: Siemens**

**Cuadro 4.3 Datos recogidos en la planta en estudio respecto a la demanda de vapor para los procesos en la planta industrial.**

Sección Polimerización	Masa de vapor en Ton/H	1,6
	Temperatura de vapor en °C	330
	Presión de vapor en bar	26
Sección Hilandería	Masa de vapor en Ton/H	28
	Temperatura de vapor en °C	210
	Presión de vapor en bar	5
Sección Acabados	Masa de vapor en Ton/H	9
	Temperatura de vapor en °C	285
	Presión de vapor en bar	15

**Fuente: Elaboración propia.**

**Cuadro 4. 4 Valores de propiedades termodinámicas utilizadas**

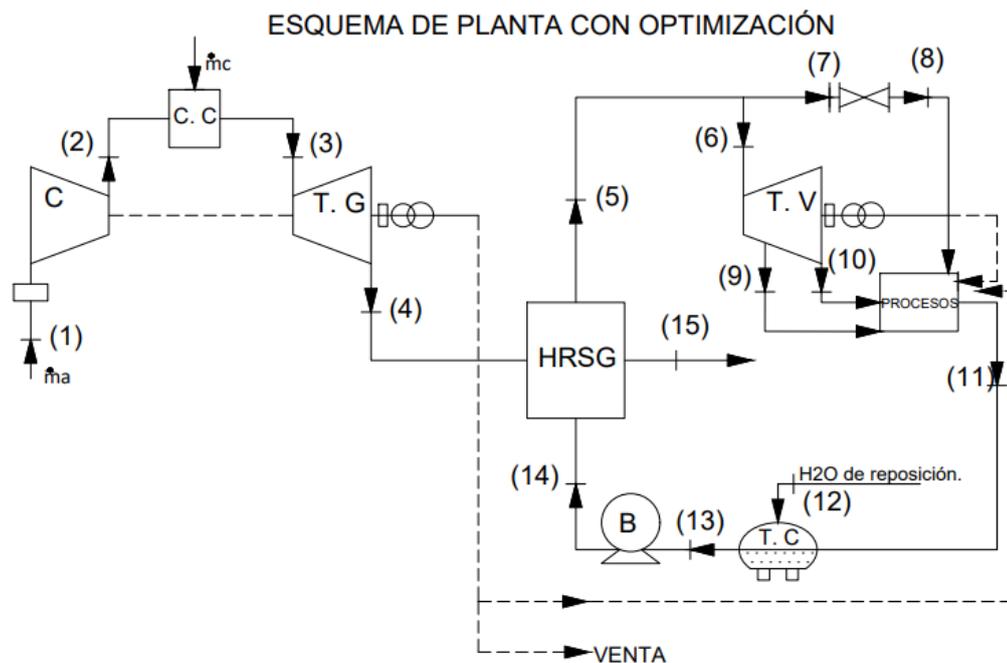
Estado	T °C	P bar	h kJ/kg
1	425	46	3278,5
2	420	45	3264
3	420	45	3264
4	330	26	3126,7
5	285	14,8	3006,4
6	210	5,4	2876,5
7	60	0,2	251,15
9	45	0,1	188,42
10	45	0,1	188,42

**Fuente: Elaboración propia.**

#### **Descripción del proyecto de la planta térmica optimizada**

Para la topología de la planta optimizada se consideró alinearse al mecanismo de desarrollo limpio (MDL), aprovechando la recuperación de los gases salientes de la turbina a alta temperatura, fuente de energía muy valiosa para la optimización. En este caso, como no se dispone de la turbina de gas, la compra se realizará luego de una selección a base de los datos directos proporcionados por el fabricante o en base a la demanda térmica del consumidor. Además, es necesaria la compra de una caldera de recuperación de calor (HRSG) y accesorios para la implementación de la topología optimizada.

**Figura 4. 1 Esquema de planta con optimización**



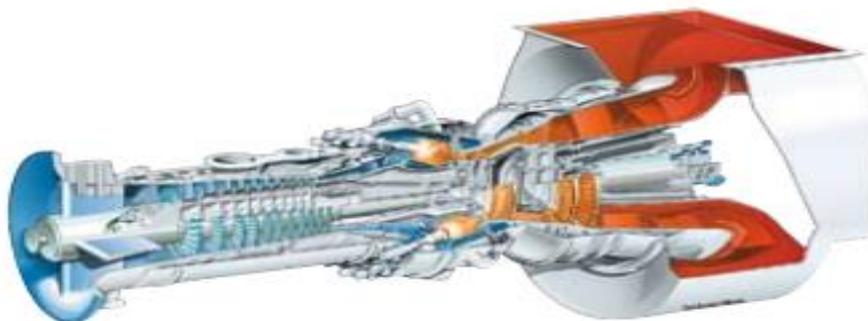
**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 4. 5 Energía térmica utilizada en los procesos**

Parámetros	$E_{T1}$	$E_{T2}$	$E_{T3}$
Masa(Kg/s)	0.5	8	3
Presión( Mpa)	2.60	0.54	1.5
Temperatura(°C)	330	210	290
Entalpia(KJ/Kg)	3079.24	2855.4	7425.5
Calor (KW)	1170.11	21986.58	7425.50

**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 4.3 Turbina de gas seleccionada para el proyecto de optimización**



## SGT-700

Generación de energía	31,21 MW(e)
• Combustible:	gas natural*
• Frecuencia:	50/60Hz
• Eficiencia eléctrica:	36,4 %
• Consumo específico:	9.882 kJ/kWh (9.367 Btu/kWh)
• Velocidad de la turbina:	6.500 rpm
• Relación de compresión:	18:1
• Caudal de gases de escape:	94 kg /s (208 lb /s)
• Temperatura gases escape:	528 °C (983 °F)
• Emisiones de NO <sub>x</sub> (con DLE, corregidas al 15 % de O <sub>2</sub> seco):	≤ 15 ppmV

*\*Otras opciones de combustibles gaseosos, líquidos o duales disponibles*

**Fuente: Siemens**

El proyecto de optimización topológica basado en la integración se realizará en el lugar físico, geográfico de la instalación donde se produce el gas residual / calor / presión y se transforma en energía útil.

Para el desarrollo de este proyecto, la instalación donde se generan electricidad y calor incluye HRSG, las turbinas y todos los demás equipos auxiliares de la planta térmica en estudio.

El valor del calor residual que se utiliza en la optimización topológica es muy importante, las especificaciones técnicas de la turbinas a gas permiten realizar mediciones directas durante la prueba de funcionamiento de la turbina utilizando medidores de energía.

La información en materia de energía es proporcionada por SIEMENS en las especificaciones de turbinas de gas.

En el presente proyecto para el cálculo termodinámico se tendrá en cuenta las siguientes restricciones:

- Los procesos de compresión y expansión son reversibles y adiabáticos.
- La variación de la energía cinética del fluido motor a la entrada y salida de cada elemento es despreciable.
- No existe pérdidas de carga en los conductos de admisión, cámaras de combustión, conductos de escape, y uniones entre los elementos.
- La energía primaria es gas natural cuyo calor específico son constantes y su composición no varía a lo largo de todo el ciclo.
- El gasto másico de gas se mantiene constante durante todo el ciclo.

- En el compresor el aumento total de temperatura será:  $N \times \Delta T_0$  donde, N es el número de etapas y  $\Delta T_0$  es la diferencia de temperatura entre la entrada y salida de una etapa.
- No hay fugas, aplicable en virtud a esta metodología.

**Cuadro 4.6 Datos seleccionados para la Turbina a gas**

Consumo de gas en $m^3/H$	8123
Gases calientes en Ton/H	330,98
Temperatura de los gases calientes en $^{\circ}C$	527

**Fuente: Elaboración propia**

**Cuadro 4.7 Valores de propiedades termodinámicas utilizadas**

Estado	T $^{\circ}C$	P bar	h kJ/kg
1	15		
3	1090		
4	527		
6	430	47	3274,7
8	330	26	3126,7
9	290	15	3006,4
10	210	5	2876,5
11	210	5	2876,5
12	160	5	2752
15	45	0,1	188,42

**Fuente: Elaboración propia**

**Cuadro 4. 8 Especificaciones técnicas de los equipos considerados  
en la planta optimizada**

N°	Componente	Técnico parámetros	Valores	Especificaciones	origen
1	Caldera de recuperación de calor.	Salida de vapor	40 ton/hora	Tipo: circulación natural caldera de tubo de agua Las normas de diseño: ASME para calderas y presión código del barco 100% MRP. Total de eficiencia de la caldera: 99%	Empresa integrado tecnología de EE.UU.
		La presión del vapor	47 bar		
		Temperatura del vapor	430 °C		
2	Turbina de vapor (TV1)	Salida de potencia nominal	5.4 MW	ABB Modelo: GE20	Brasil
		La presión del vapor	45 bar		
4	Tanque de condensado y el Sistema de alimentación de agua	Flujo de vapor	16.3 Kg/s	KSB bombas de agua de alimentación Tipo: Número de centrífugas Bombas: 2	Alemania
		Presión de descarga	65 bar		

**Fuente: Siemens.**

**Tabla 4.9 Inversión en los equipos para el proyecto de optimización**

**En dólares**

<b>Turbina de gas</b>		
Turbina de gas y Generador	8 100 000	
Sistemas auxiliares	370 000	
Compresor	420 000	
Recuperador de condensados	110 000	<b>9 000 000</b>
<b>Equipo de Vapor</b>		
Caldera de recuperación	1 840 000	
Sistema de tratamiento de agua	320 000	
Condensador, bomba de agua	420 000	<b>2 580 000</b>
<b>Equipo Eléctrico</b>		
Transformadores	320 000	
Relevadores y controles	110 000	
Interconexiones	420 000	<b>850 000</b>
<b>Instalación y Servicio</b>		
Ingeniería de diseño	1 100 000	
Ingeniería Civil	630 000	
Control y Mantenimiento	370 000	
Trabajo Eléctrico en campo	840 000	
Trabajo Mecánico en campo	1 420 000	
Transportación y manejo	320 000	<b>4 680 000</b>
<b>Total parcial</b>		17 110 000
Contingencia (aprox. 10 %)		7 110 000
<b>costo total</b>		<b>18 810 000</b>

**Fuente: Elaboración propia**

## V. RESULTADOS

### 5.1 Resultados Descriptivos

#### Planta en Estudio

**Cuadro 5.1 Resultados obtenidos en la planta en estudio**

Calor entregado	Energía eléctrica	Energía térmica	Eficiencia
48,6 $MW_t$	2,7 $MW_e$	28,5 $MW_t$	64%

**Fuente: Elaboración propia**

#### Proyecto de planta optimizada

**Cuadro 5.2 Resultados obtenidos en el proyecto de la planta optimizada**

Calor entregado	Energía eléctrica	Energía térmica	Eficiencia
78,64 $MW_t$	30,48 $MW_e$	28,5 $MW_t$	75%

**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 5.3 Cuadro comparativo de las plantas en estudio y proyecto de la planta optimizada**

	<b>Planta en estudio</b>	<b>Planta optimizada</b>
Eficiencia	64%	75%
Costo operativo anual en soles	26 548 200	32 415 292
Emisiones contaminantes	178 380 Ton de $CO_2$ / año	126 163 Ton de $CO_2$ / año
Compra de energía eléctrica en soles por anual	12 461 400	0
Venta de energía eléctrica en soles por anual	0	103 786 160
Ahorro Anual en soles		42 800 000

**Fuente: Elaboración propia**

## **5.2 Resultados inferenciales**

### **Contrastación de hipótesis General**

H<sub>g</sub>: La topología de los sistemas de cogeneración de energía en ciclo combinado influye positivamente en la eficiencia de una planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco.

H<sub>0</sub>: La topología de los sistemas de cogeneración de energía en ciclo combinado no influye positivamente en la eficiencia de una planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco.

**Grado de correlación y nivel de significancia entre la topología de los sistemas de cogeneración de energía en ciclo combinado y la eficiencia de una planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco**

**Tabla 5.1 Correlaciones**

		la topología de los sistemas	la eficiencia de una planta
la topología de los sistemas	Correlación de Pearson	1	.900*
	Sig. (bilateral)		.038
	N	5	5
la eficiencia de una planta	Correlación de Pearson	.900*	1
	Sig. (bilateral)	.038	
	N	5	5

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

De los resultados que se aprecian en la tabla, se presenta el estadístico de correlación de Pearson = 0.900, significa que existe una alta relación directa entre la variables, frente al (grado de significación estadística)  $p=0.038$ ; por lo que rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa.

**Interpretación:**

Existe una relación directa (0.900) y significativa ( $p=0.038$ ) entre la topología de los sistemas de cogeneración de energía en ciclo combinado

y la eficiencia de una planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco.

La selección de la topología ha sido acertada puesto que la inversión se recuperaría solo en dos años.

En esta investigación se ha determinado la selección más adecuada de la topología, donde la ubicación de equipos y máquinas conlleva a la captura de gases calientes expulsados mediante la chimenea a fin de reutilizar dicha energía, de modo que se optimiza la eficiencia de la planta térmica.

Se ha realizado el análisis termodinámico y económico de los equipos y máquinas térmicas que viabilizan su selección apropiada para la optimización de la eficiencia para la planta productora de fibras acrílicas de hilado en seco obteniendo resultados óptimos tanto en lo termodinámico como en lo económico según se muestra en el capítulo de resultados.

## **VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados de la Influencia entre la optimización topológica y eficiencia**

En los resultados de la tabla de correlación (Tabla 5.1) se observa que existe una alta relación directa entre las variables dado que el estadístico de correlación de Pearson = 0.900, frente al (grado de significación estadística)  $p=0.038$ , lo que nos lleva a aseverar que existe una alta relación directa entre la optimización topológica y la eficiencia de las plantas térmicas.

#### **De la optimización topológica**

En esta investigación se ha determinado la selección más adecuada de la topología, donde la ubicación de equipos y máquinas conlleva a la captura de gases calientes expulsados mediante la chimenea, a fin de reutilizar dicha energía, de modo que se optimiza la eficiencia de la planta térmica.

#### **Del análisis termodinámico y económico**

En esta investigación se ha realizado el análisis termodinámico de todos los equipos y máquinas que constituyen la planta térmica como se muestran en los cuadros de resultados y más detalladamente en el Anexo.

En lo económico, revisado en el Cuadro comparativo 6.1, se demuestra que hay un ahorro anual significativo.

Los resultados descritos en el cuadro comparativo muestran que la selección de una adecuada topología permite optimizar no solamente en ámbito termodinámico, sino también en lo económico y ambiental, con ello estaríamos contribuyendo a generar energía útil, respetando el desarrollo de mecanismo limpio.

1. La creación de un impacto positivo en el rendimiento económico de la producción de fibras acrílicas de hilado en seco, mediante la recuperación de los gases calientes de desecho para la cogeneración, ya que sus fuentes de energía eléctrica y calor serán más fiables y rentables, este efecto le ayudara a la empresa mantener su presencia en el mercado global competitivo.

2. La reducción de los efectos de la contaminación térmica mediante el uso de calor residual que permite mitigar el cambio climático, asimismo mejorar la balanza comercial de hidrocarburos mediante el uso de gas natural que se extrae de las reservas peruanas (Camisea).

## **6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios**

**Willy Cifuentes Villatoro (2011)** en su tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico en la Universidad de San Carlos de Guatemala “**SISTEMAS DE COGENERACIÓN PARA EL AHORRO DE ENERGÍA EN LA INDUSTRIA**” logró determinar una eficiencia de 74%, lo que permite darnos seguridad con los resultados de esta investigación (6).

### **6.3 Responsabilidad ética de acuerdo al reglamento vigente**

Entendiendo que la ética es un conjunto de valores, mi actuación en esta investigación ha sido transparente, en la búsqueda de datos reales recogidos en visitas a la planta térmica en estudio, preciso que el informe se elaboró teniendo en cuenta la norma ISO 690.

## **VII. CONCLUSIONES**

1. Se ha determinado que la selección de una topología adecuada (optimización topológica) del sistema de cogeneración de energía en ciclo combinado conlleva a mejorar la eficiencia del 64% al 75%, de manera que los beneficios aumentan significativamente, en la planta industrial productora de fibras acrílicas de hilado en seco. También el uso del gas natural proporciona procesos limpios con ahorros muy notorios y reduce el impacto ambiental.

2. Se ha efectuado la selección y ubicación de equipos y máquinas térmicas mejorando su eficiencia global de la planta térmica, permitiendo que la planta industrial productora de fibras acrílicas de hilado en seco sea una industria que cuenta con una central térmica flexible en concordancia con sus necesidades energéticas, de fácil explotación que proteja al medio ambiente y genere mayor rentabilidad.

3. Se ha realizado el análisis energético de los equipos y máquinas térmicas seleccionadas para la optimización topológica permitiendo que la planta térmica industrial con cogeneración de ciclo combinado en estudio nos ha dado una eficiencia energética del 75% a comparación de las Centrales Térmicas Convencionales que están en promedio al 40%, y esta nueva orientación relativa al mecanismo para el desarrollo limpio da lugar entre otras cosas la reducción de emisiones alrededor de 52000 tCO<sub>2</sub> al año.

4. Willy Cifuentes Villatoro (2011) en su tesis para optar el grado académico de ingeniero mecánico en la Universidad de San Carlos de Guatemala **“SISTEMAS DE COGENERACIÓN PARA EL AHORRO DE ENERGÍA EN LA INDUSTRIA”** logro determinar una eficiencia de 74%,lo que permite darnos la seguridad los resultados de esta investigación. (6)

## VIII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda adquirir nuevas tecnologías de simulación computacional que permita ahorrar tiempo en la selección topológica adecuada del sistema de cogeneración de energía para proporcionarles el tipo de topología a los usuarios de acuerdo a su demanda energética.

2. Si queremos seguir con una política de respeto al desarrollo de mecanismo limpio (MDL) recomendamos aplicar la tecnología de la cogeneración, y con ello lograremos:

- Difundir el uso adecuado de la energía primaria utilizando dicha tecnología.
- Fomentar la cultura del ahorro energético mediante el aumento de proyectos de generación de energía aplicando sistemas de cogeneración con el uso de gas natural, pues estas disminuyen las facturas de los costos de energía.

3. En el estudio realizado se ha encontrado pocos especialistas en la ingeniería térmica, que nos oriente en el uso adecuado de la energía y las consecuencias que se derivan de este hecho, por ello recomiendo la creación de una escuela profesional de ingeniería térmica en la facultad de ingeniería mecánica y energía de la UNAC.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Ley N° 27345.** Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía.  
Lima : Osinergmin, 2000.
2. **DS N°053-EM.** Aprueban Reglamento de la Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía. s.l. : Osinergmin, 2007.
3. **DECRETO SUPREMO N° 034-2004-EM.** Modifican el Art. 43 y agregan el Art. 68A al Reglamento de Seguridad para el Transporte de Hidrocarburos, aprobado por D.S. N° 026-94-EM. Lima : Osinergmin, 2008.
4. **DS N° 064-EM.** Política energética nacional del Perú del 2010 - 2040.  
*Decreto Supremo.* Lima : OSINERG, 2010.
5. **Quispe Chanampa, C.** Análisis energético de un sistema de cogeneración con ciclo combinado y gasificación para la industria azucarera. *Tesis para optar el grado de ingeniero mecánico.* s.l. : Universidad Nacional de Piura, 2010.
6. **Cifuentes Villatoro, W.** Sistema de cogeneración para el ahorro de energía en la industria. *Tesis para optar el grado académico de ingeniero mecánico.* s.l. : Universidad San Carlos de Guatemala, 2011.

7. **IDAE.** Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. Madrid : s.n.
8. **Lasagni, F.** Optimización topológica. [En línea]  
<http://www.catec.aero/materiales-y-procesos/optimizaci-n-topologica.htm>.
9. *Solución de problemas de optimización topológica empleando el Algoritmo Simulated Annealing Modificado.* **Páramo, M.; Carrillo, B.** 2, s.l. : Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 2016, Vol. 32.
10. *El hombre y la máquina.* **Meza, C.; Tamayo, F.; Fanco, E.** Colombia : Universidad autónoma de occidente, 2015. ISSN: 0121-0777.
11. **Salas Lizárraga, J.** *Cogeneración.* s.l. : Universidad del país Vasco, 2012. 6ta edición.
12. **H. Cohen y G.F.C. Rogers.** *Teoría de turbinas de gas.* España : Editorial Marcombo, 2003. 2ª ed.
13. **Horlock, R.; Rogers, G.F.C. .** *Teoría de las turbinas de gas.* Barcelona, España : Marcombo, 2003. Segunda edición.
14. **Harman, Richard T C. .** *Gas Turbine Engineering Applications, cycles and characteristics.* London, England : The Macmillan Press Ltd, 1981.

15. **Yunus A.; Cengel.** *Transferencia de calor.* Reno : Mc Graw Hill / Interamericana, 2004. 2da edición.
16. *Cogeneración en grandes centrales de proceso.* **Muñoz, J.** 117, México : Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, 2003, Vol. 19. pp. 52-60.
17. **Sala Lizarraga, J. .** *Cogeneración de ciclo combinado.* España : Editorial Vasco , 2008.
18. **Meherwan, P.; Boyce.** *Gas Turbine Engineering Handbook.* s.l. : Gulf Professional Publishing., 2001. 2ª Ed. .
19. **Aungier, R. H.** *Axial-Flow Compressors: Strategy for Aerodynamic Design and Analysis.* s.l. : Asme Press, 2003.
20. **Vsorov. .** *Manual de Motores Diésel.* Moscú : Editorial MIR, 1980.
21. **Villajulca, J.** Cap 1.4 Calderas de recuperación de calor. *Instrumentacion y control. net.* [En línea] 19 de noviembre de 2009. <https://instrumentacionycontrol.net/cap-1-4-calderas-de-recuperacion-de-calor/>.
22. **Moran, M.J. and Shapiro, H.N. .** *Fundamentos de Termodinámica Técnica.* s.l. : Ed. Reverté, S.A, 2010.
23. **Yunus y Michael A. Boles. .** *Termodinámica.* 2005. 7ª ed. .

24. **Cengel, Y.A. y Boles, M.A.** . *Termodinámica*. México : Ed. McGraw-Hill, 2003.
25. **Gonzalez, F.** Turbinas a gas - Sistemas de Generacion Distribuida. *Tecnologías Empleadas en la Generación Distribuida*. [En línea] enero de 2008.  
[https://www.researchgate.net/publication/298891173\\_Capitulo\\_22\\_Turbinas\\_a\\_gas\\_-\\_Sistemas\\_de\\_Generacion\\_Distribuida](https://www.researchgate.net/publication/298891173_Capitulo_22_Turbinas_a_gas_-_Sistemas_de_Generacion_Distribuida).
26. *Simulación de una caldera de recuperación de calor utilizado software HYSYS*. **Oca, L.; Dominguez, F.; Díaz, Y.; Lopez, Y.; Tápanez, A.** 1, s.l. : Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal, 2008, Vol. 28.
27. **Abanto, R.** Turbina de vapor. *Academia. edu*. [En línea] 2015.  
[https://www.academia.edu/7556965/Turbina\\_de\\_Vapor](https://www.academia.edu/7556965/Turbina_de_Vapor).
28. **Sabugal, S., Gomez, V.** . *Centrales Térmicas de Ciclo Combinado: Teoría y Proyecto*. . España : Díaz de Santos, 2006. 310 pp.
29. **Acogen**. Guía de la cogeneración. Madrid, España : Fenercom, 2010.
30. **Howell, J.; Buckius, R.** *Principios de termodinámica para ingeniería*. México : McGraw Hill, 1990.
31. **Fraile, D.** *Cogeneración: Aspectos tecnológicos*. España : EOI, 2008.

32. **Jarabo, F.** . *El libro de las Energías Renovables*. España : Ed. Era Solar, 2010.
33. **Tubiello, F.** *Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)*. [En línea] 2015. <http://www.fao.org/3/a-i4260s.pdf>.
34. **Ríos Villacorta, A.** Futuro de la energía en el Perú. *Estrategias energéticas sostenibles*. [En línea] Junio de 2016.  
[https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/estudio\\_-\\_futuro\\_de\\_la\\_energia\\_en\\_peru\\_-\\_alberto\\_rios.\\_fsp\\_-\\_ir\\_0.pdf](https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/estudio_-_futuro_de_la_energia_en_peru_-_alberto_rios._fsp_-_ir_0.pdf).
35. **Gomez, D.; Watterson, J.** Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero . *Combustión estacionaria*. [En línea] 2006. [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2\\_Volume2/V2\\_2\\_Ch2\\_Stationary\\_Combustion.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf).
36. **Ralbovsky, E.** *Motores Diesel*. España : Paraninfo, 2002.
37. **Sitec.** Cuánto cuesta convertir un carro a gas en el Perú. [En línea] 2018. <https://www.sitec.pe/cuanto-cuesta-convertir-un-carro-a-gas-en-peru/>.
38. **Zorrilla Arena, .** *Introducción a la metodología de la investigación*. México : Aguilar, León y Cal Editores, 1993. 11° edición.

39. **Espinoza Montes, C.** *Metodología de investigación tecnológica.*  
Huancayo : Imagen Gráfica S.A.C., 2010. 1° Ed..
40. **Solis Espinoza, A.** *Metodología de la investigación jurídico social.*  
Lima : Princliness EIRL, 2008.
41. **Ñaupas Paitán, H.** *Metodología de la investigación científica y  
asesoramiento de tesis.* Lima : s.n., 2012. 2° Ed..

## **ANEXOS**

1. Matriz de consistencia
2. Diagrama de entalpía-entropía
3. Norma técnica peruana ISO 50 001